DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/20

Análise do Mecanismo de Ruptura da Estrutura de Contenção da Comunidade do Jacó – Natal/RN

Hipolito Filipe Costa de Araujo
Eng. Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Brasil, o.iflipe@gmail.com

Clara Beatriz Fidelis da Silva
Aluna de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPCIVAM-UFRN), Natal, Brasil, clarabeatrizfideliss@gmail.com

Osvaldo de Freitas Neto
Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Brasil, E-mail: osvaldo.neto@ufrn.br

Olavo Francisco dos Santos Júnior
Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Brasil, E-mail: olavo.santos@ufrn.br

Ricardo Nascimento Flores Severo
Professor, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Natal, Brasil, E-mail: ricardo.severo@ifrn.edu.br

RESUMO: Entre os dias 13 e 14 de junho de 2014, após um período de chuvas intensas e prolongadas, com precipitação acumulada de 315 mm, ocorreu a ruptura de uma estrutura de contenção em solo grampeado na Comunidade São José do Jacó, em Natal/RN. Este trabalho tem como objetivo investigar os mecanismos que contribuíram para a falha da estrutura, utilizando modelagem numérica bidimensional com base no método dos elementos finitos. A simulação considerou as etapas de execução da cortina e avaliou seu comportamento sob a presença de um nível d'água elevado, adotando-se um paramento com dois níveis distintos de permeabilidade. Em cada condição, foram analisadas as pressões atuantes, bem como os campos de deformação e deslocamento, buscando compreender, por meio da modelagem, os fatores responsáveis pela ruptura. O solo da área estudada é característico da Formação Barreiras, situada em uma região com alta suscetibilidade a movimentos de massa. As análises foram realizadas no software OptumG2 (versão 2019), por meio de modelos elastoplásticos e de análise-limite. A comparação entre os deslocamentos e esforços no paramento, as forças nos grampos e as condições com e sem drenagem, associada às observações descritas em estudos anteriores, indicou que a ruptura esteve relacionada à incapacidade do sistema de aliviar as pressões de água geradas pela infiltração das chuvas, potencializada pela ausência de um paramento com capacidade drenante adequada.

PALAVRAS-CHAVE: Solo grampeado, Modelagem numérica, Elementos finitos, Ruptura.

ABSTRACT: On June 13–14, 2014, following a period of intense and prolonged rainfall, with an accumulated precipitation of 315 mm, a nailed soil retaining structure collapsed in the São José do Jacó community in Natal, Brazil. This paper aims to investigate the mechanisms that contributed to the structure's failure using two-dimensional numerical modeling based on the finite element method. The simulation considered the construction stages of the retaining wall and evaluated its behavior under high water table levels, adopting a facing system with two distinct permeability levels. In each condition, acting pressures, as well as deformation and displacement fields, were analyzed to understand the factors responsible for the failure. The soil in the studied area is characteristic of the Barreiras Formation, located in a region highly susceptible to mass movements. The analyses were performed using OptumG2 software (2019 version), through elastoplastic and limit analysis models. The comparison between displacements and stresses in the facing, nail forces, and conditions with and without drainage, combined with observations from previous studies, indicated that the failure was related to the system's inability to relieve pore water pressures generated by rainfall infiltration, exacerbated by the lack of an adequately draining facing system.
KEYWORDS: Soil nailing, Modeling, Finite elements, Rupture.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de contenção permitem o aproveitamento otimizado do espaço urbano ao viabilizar cortes e aterros em taludes sem a necessidade de grandes extensões de terreno. Dentre as diversas metodologias, destaca-se a técnica de solo grampeado.

No caso em estudo, a técnica foi empregada para permitir a execução de um corte vertical em um talude na Comunidade São José do Jacó, em Natal/RN (5°46'46"S e 35°11'58"W), visando a construção de um empreendimento imobiliário. Contudo, após um período de chuvas intensas, de precipitação acumulada de 315 mm entre 13 e 14 de junho de 2014, a estrutura de contenção sofreu ruptura, deflagrada a partir do paramento de concreto. Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2020), esse volume representa quase 90% da média histórica esperada para todo o mês de junho em Natal (353,6 mm). A Figura 1 apresenta a área após a ocorrência da ruptura da estrutura de contenção.

Dada a crescente aplicação dessa solução de engenharia, é fundamental avaliar criteriosamente os métodos de projeto e o comportamento destas estruturas em campo. Este estudo tem como objetivo identificar os mecanismos de ruptura da estrutura citada, utilizando modelagem numérica bidimensional via Método dos Elementos Finitos (MEF), simulando as etapas construtivas e as condições de operação durante o evento pluviométrico supracitado.

2 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Comunidade São José do Jacó se situa na zona leste da capital potiguar, no bairro Rocas. Ela está inserida numa área complexa do ponto de vista geotécnico, devido ao risco de movimentos gravitacionais de massa e aos efeitos de processos erosivos graves (movimentos de transporte de massa), conforme levantado pela Prefeitura Municipal do Natal e apontado por Bezerra (2016). A área objeto de estudo deste trabalho é uma ocupação urbana localizada no limite entre os bairros Rocas e Praia do Meio, zona leste de Natal (Figura 2).



Figura 1. Localização da área de estudo (Bezerra, 2019).

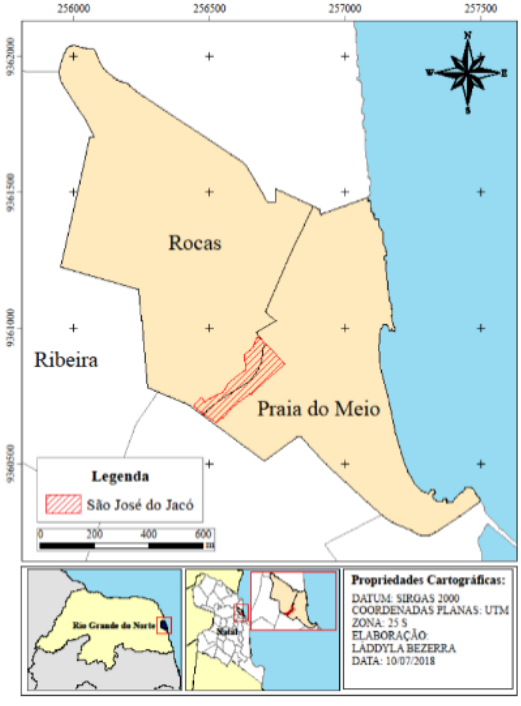


Figura 2. Localização da área de estudo (Bezerra, 2019).

No macrozoneamento municipal a região está localizada em uma Zona Adensável e é considerada Área Especial de Interesse Social (AEIS). Um aspecto relevante a ser apontado é que o assentamento São José do Jacó limita-se apenas ao espaço compreendido entre a Rua Desembargador Lins Bahia, na parte superior da encosta, e a Rua CGU, na parte inferior, abrangendo uma área de 1,08 há (Bezerra, 2019). Bezerra et al. (2020)

realizaram análises de risco na área do assentamento São José do Jacó e apontaram que 50% da área tem alto risco à instabilização de taludes.

A Comunidade São José do Jacó apresenta diversos fatores que elevam o risco de deslizamentos, incluindo intervenções antrópicas, instabilidades geológicas latentes, alta densidade populacional e a presença de moradias precárias. Diante desse cenário, qualquer intervenção de engenharia na região exige rigor técnico e critérios que considerem a fragilidade e a susceptibilidade a acidentes do local.

O rompimento da estrutura provocou o desconfinamento do solo da encosta, resultando na destruição parcial de quatro residências situadas na Rua Desembargador Lins Bahia, além de danos a outras cinco edificações adjacentes (Freitas Neto et al., 2015). O terreno caracteriza-se pelos arenitos argilosos, argilitos e conglomerados típicos da Formação Barreiras (Severo, 2005). No litoral do Rio Grande do Norte, o topo da formação é predominantemente arenoso, com colorações avermelhadas e alaranjadas. Na porção intermediária, observam-se níveis com cimentação ferruginosa, por vezes associada a pedregulhos, formando uma camada de laterita que incorpora grãos de areia grossa. Abaixo dessa camada, na base da falésia, ocorrem depósitos com maiores teores de argila e coloração variegada (Santos Júnior et al., 2015).

3 METODOLOGIA

A modelagem numérica e a avaliação do comportamento da estrutura foram realizadas por meio do software OptumG2 (versão 2019, da OptumCE), que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF). O perfil topográfico utilizado para a modelagem dos taludes natural e de corte está apresentado na Figura 3, a seguir.

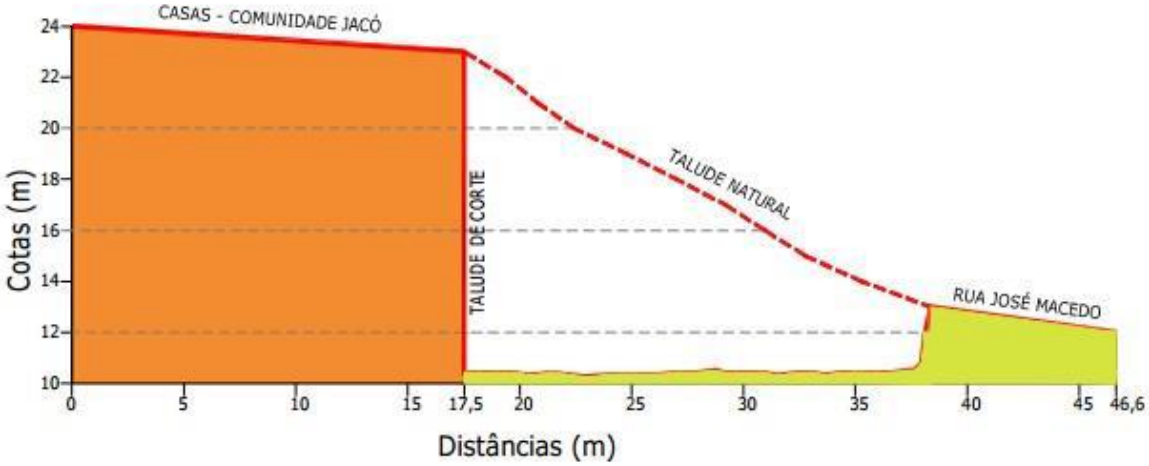


Figura 3. Perfil topográfico dos taludes natural e de corte.

A análise do comportamento da estrutura foi conduzida em três etapas principais: a etapa de verificação e configuração, que determinou as deformações iniciais do terreno natural e analisou a estabilidade do talude escavado sem contenção; a etapa de construção, dividida em 11 estágios, sendo 10 destinados à instalação individual dos grampos e um referente à execução do reaterro para consolidação da obra; e, por fim, a etapa de operação, que submeteu a estrutura à ação da água sob dois cenários distintos: um com paramento permeável, simulando um sistema de drenagem facial operando com eficiência, e outro com paramento impermeável, que representou o comportamento da estrutura na ausência de um sistema de drenagem funcional.

As edificações localizadas na parte mais elevada do talude foram consideradas no modelo a partir de uma sobrecarga de 20 kN/m², que se estende por 15 metros a partir da face do corte após respeitada uma folga de 1,0 m. Os parâmetros do solo foram estimados considerando valores apresentados por Santos Júnior et al. (2015) e Bezerra (2016). Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros do solo utilizados na modelagem numérica, os quais foram adaptados de Santos Júnior et al. (2015) e Bezerra (2016).

Os grampos foram instalados com inclinação de 15°, espaçamento vertical de 1,0 m e horizontal de 1,5 m, com diâmetro de 100 mm. Diferentemente da prática comum em projetos de solo grampeado, esta obra substituiu a injeção de calda de cimento por argamassa de cimento Portland e areia grossa peneirada (traço 1:1).

Tabela 1. Parâmetros de entrada para a modelagem.

Parâmetros	
Peso específico aparente seco (γd)	18,4 kN/m³
Peso específico saturado (γsat)	21,7 kN/m³
Ângulo de atrito efetivo (ϕ')	32,0°
Coesão efetiva (c')	34,2 kPa
Módulo de elasticidade (E)	20,0 Mpa
Coeficiente de empuxo em repouso (K_0)	0,31
Ângulo de dilatância (ψ0)	3°

Para o modelo numérico, o módulo de elasticidade do conjunto foi compatibilizado entre a área do furo e a da barra de aço. Adotou-se módulo de deformabilidade de 210 GPa para o aço e 14 GPa para o material de injeção — valor definido com base em referências bibliográficas como Rodrigues (2014), Barghigiani (2013) e Bertolucci (2010). O cálculo do módulo de elasticidade composto resultou em 26,25 GPa para os três primeiros grampos (barras de 25 mm) e 21,84 GPa para os demais (barras de 20 mm). A Figura 4 apresenta a seção transversal da estrutura de contenção analisada.

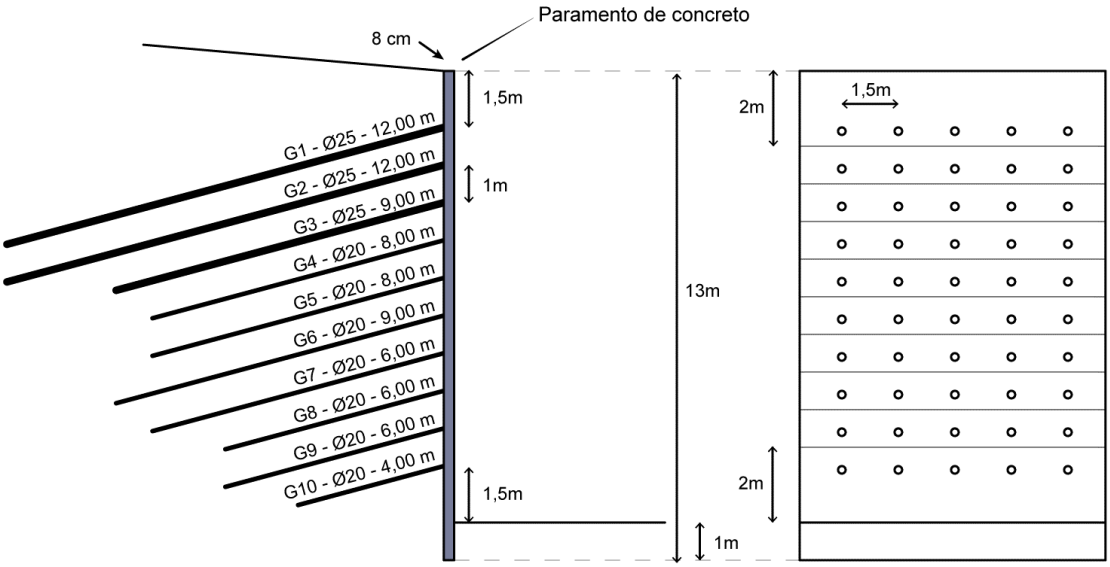


Figura 4. Seção transversal e vista frontal da estrutura de contenção no trecho estudado.

A resistência de aderência dos grampos foi calculada conforme a Equação 1, proposta por Ortigão e Sayão (2004), adotando-se um NSP médio de 30 golpes. O valor resultante foi de 271,07 kPa. Para o software OptumG2, o parâmetro de entrada exigido é a força axial máxima (F_A,máx), correspondente à resistência de aderência unitária, estimada pela Equação 2.

$$q_s = 67 + 60 \cdot \ln(N_{spt}) \quad (1)$$

$$F_{A,máx} = t = q_s \cdot \pi \cdot D \quad (2)$$

Para o caso analisado, obteve-se uma força axial máxima de 85,16 kN/m, valor uniforme para ambos os diâmetros de barras (20 mm e 25 mm), visto que o diâmetro do furo acabado é constante (100 mm).

A etapa de construção foi simulada em cortes sucessivos com altura de 1,0 m, com exceção do primeiro corte (2,0 m) e do último (3,0 m). Ao final da construção, foi modelada a execução de um reaterro de 1,0 m de material.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos resultados obtidos foi possível definir a força normal nos grampos, os esforços e deslocamentos do paramento, o empuxo da água no paramento (na etapa de operação), a poropressão na etapa de operação da estrutura de contenção, os vetores de fluxo na etapa de operação e o fator de segurança da estrutura de contenção considerando a presença e a ausência do sistema de drenagem no paramento.

A mobilização da força de tração em cada grampo, desde sua instalação até o término da obra, foi representada graficamente, resultando em curvas com extensões distintas conforme a sequência de instalação. Os resultados sintetizados da força de tração são apresentados na Figura 5.

Sob a condição de paramento permeável, os grampos apresentaram comportamento típico de estruturas de solo grampeado. As forças apresentaram tendência crescente com a sucessão dos cortes ou sofreram redistribuição ao longo do comprimento do grampo, otimizando o trabalho uniforme do elemento. Tais esforços axiais foram igualmente monitorados e registrados durante a etapa de operação.

Sob a presença de água, a mobilização de força nos grampos intensifica-se, independentemente do cenário de drenagem (Figura 6). Contudo, a ausência de um sistema eficiente, como na situação de paramento impermeável, resulta em solicitações superiores aos valores observados no modelo permeável.

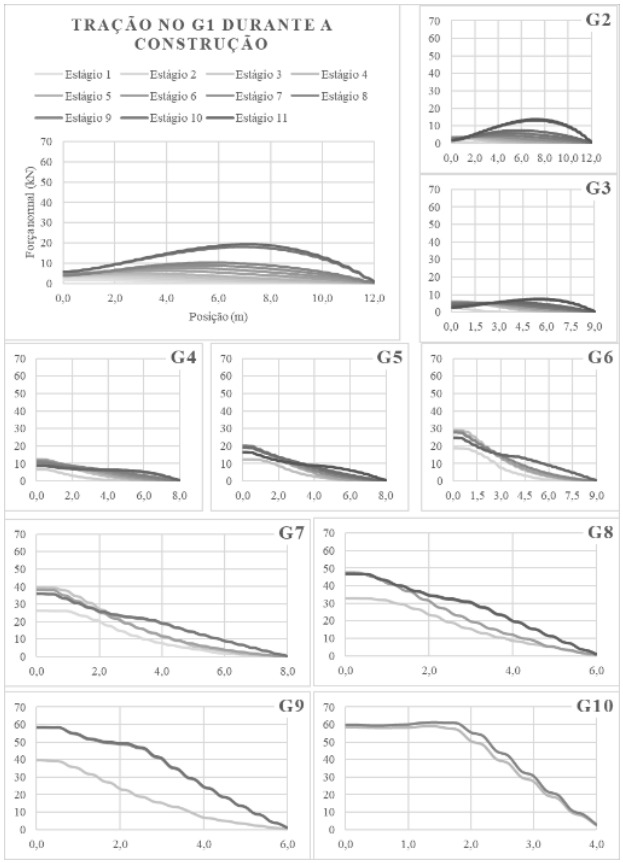


Figura 5. Evolução da força normal nos grampos ao longo dos estágios de construção.

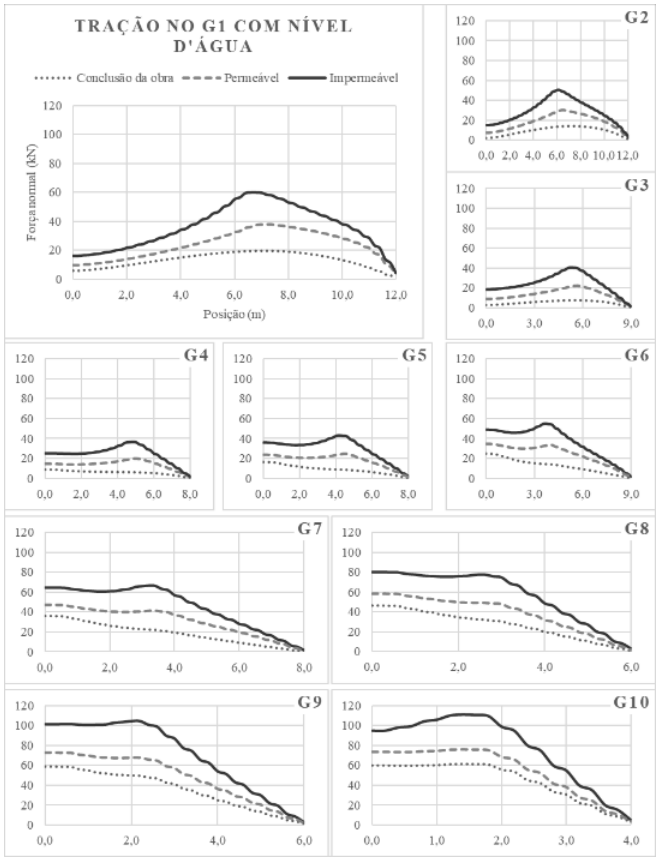


Figura 6. Comparativo entre as força de tração nos grampos - parede permeável e impermeável.

O incremento na solicitação dos grampos varia significativamente: atinge pelo menos 40% na linha superior (G10) e chega a quase 80% nas linhas G3 e G4. Independentemente do acréscimo médio registrado, nota-se a continuidade do padrão de carregamento estabelecido após a conclusão da fase construtiva da estrutura.

Outro conjunto de dados extraído da análise no software OptumG2 refere-se à movimentação do paramento, com foco nos deslocamentos horizontais, por serem os mais representativos. O gráfico da Figura 7 demonstra que o paramento apresenta deslocamento crescente, com movimentação diferencial concentrada na interface entre a seção previamente existente e a recém-executada. Contudo, após a conclusão de cada estágio construtivo, a estrutura tende à estabilização, passando a apresentar um comportamento de movimentação em bloco nos estágios subsequentes.

A situação de paramento impermeável mostrou-se mais crítica, apresentando deslocamentos expressivamente superiores na região inferior da contenção. No restante do paramento, a movimentação horizontal na condição sem drenagem é cerca de 20,0 mm maior do que a observada no estado drenado. Este

último, por sua vez, exibe um aumento médio de 35,0 mm em relação ao deslocamento consolidado após o término da construção (Figura 8).

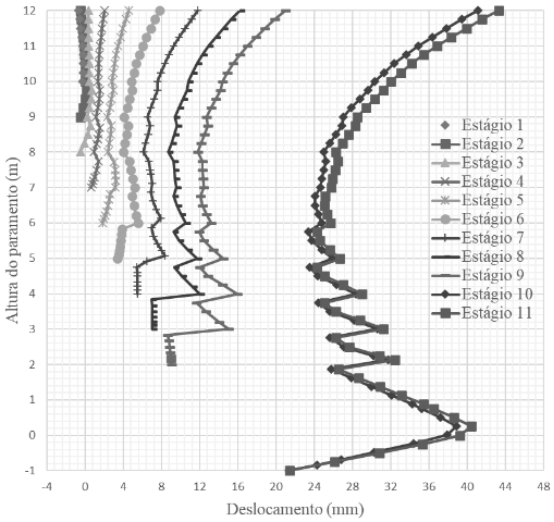


Figura 7. Deslocamentos horizontais acumulados do paramento na construção e em serviço.

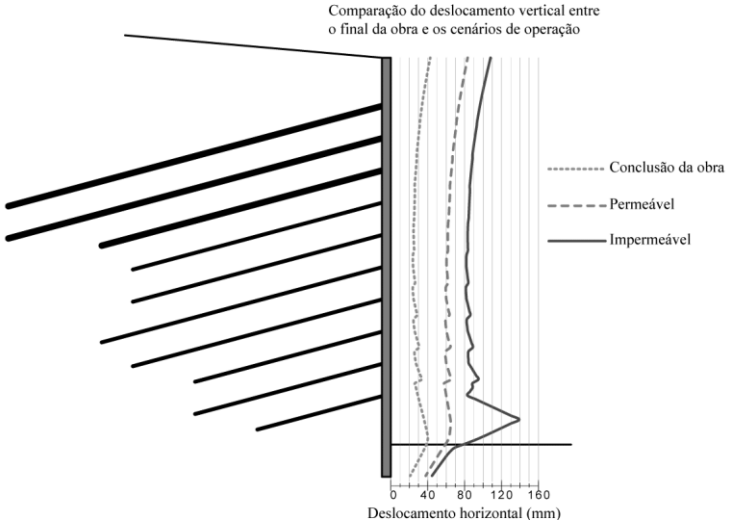


Figura 8. Deslocamentos horizontais: comparação entre sistemas com e sem drenagem e estado final da obra.

A distribuição das poropressões e do empuxo hidrostático sobre o paramento nas etapas de serviço também foi registrada. Conforme as Figuras 8a e 8b, a drenagem permite o alívio das poropressões junto à face, de modo que o paramento permeável não recebe empuxo. O oposto ocorre no modelo com paramento impermeável, onde o acúmulo de água atrás da estrutura gera poropressões e, consequentemente, empuxos - Figuras 12c e 12d. Nessas condições, o diagrama de esforços apresenta o formato triangular esperado, atingindo valores da ordem de 49,9 kPa/m na base do paramento após o reaterro.

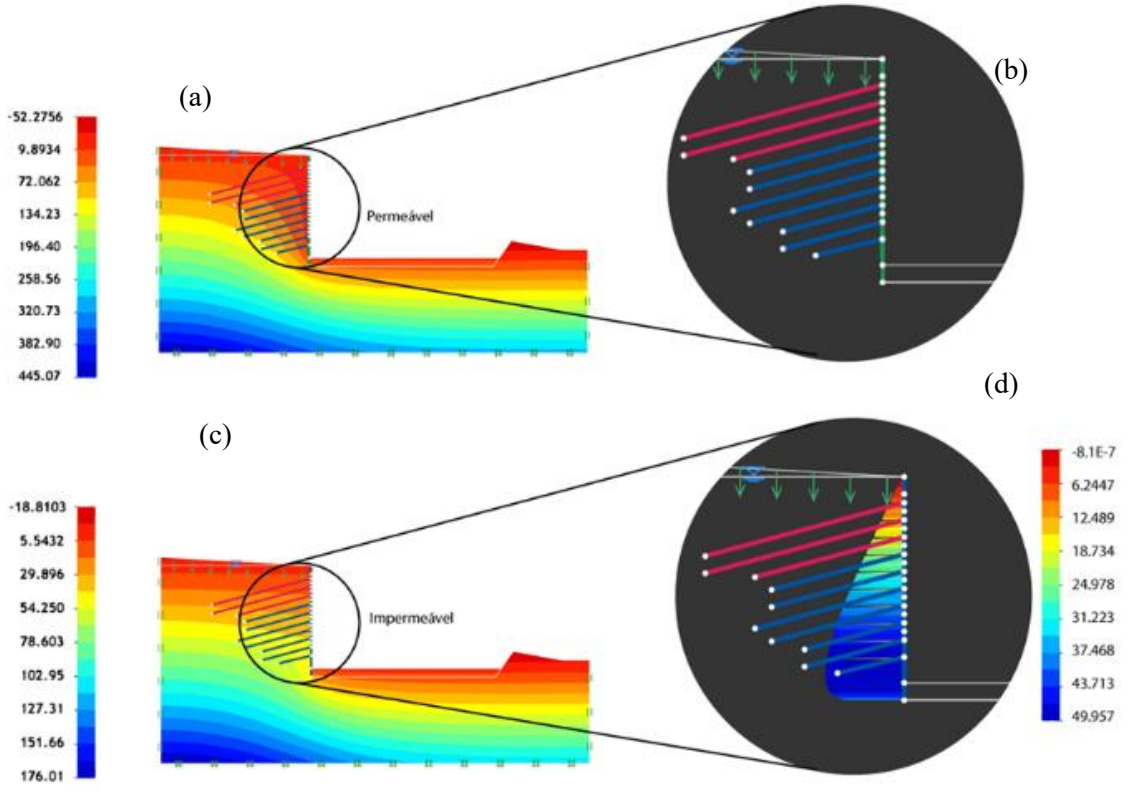


Figura 8. Poropressão e empuxo da água: (a) e (b) paramento permeável e (c) e (d) paramento impermeável.

O fluxo de água apresentou comportamento conforme o previsto, corroborando os resultados anteriores. No cenário com paramento permeável (Figura 9a), os vetores indicam um fluxo mais intenso, com a passagem de água através da face da estrutura. No segundo cenário (Figura 9b), com a drenagem impedida, o fluxo concentra-se exclusivamente no pé da contenção. Este fenômeno justifica o empuxo hidrostático mais elevado observado na porção inferior do paramento.

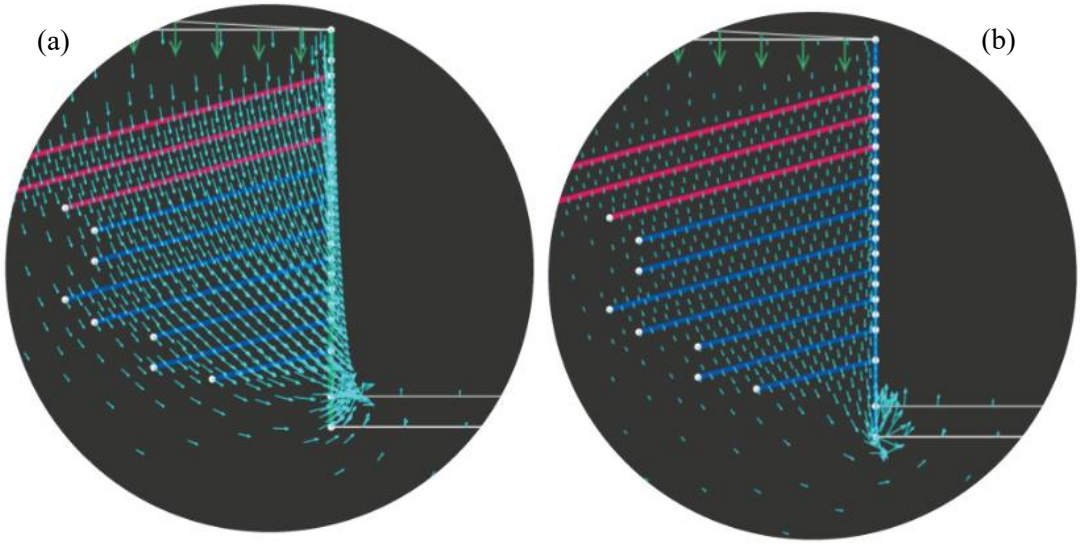


Figura 9. Vetores de fluxo: paramento permeável (a) e paramento impermeável (b).

Freitas Neto *et al.* (2015) concluíram que a ausência de um sistema de drenagem foi o principal fator condicionante para a ruptura da estrutura durante os eventos chuvosos de junho de 2014. Em vistoria técnica pós-ruptura, os autores constataram a inexistência de dispositivos de drenagem nos escombros. Adicionalmente, destacaram que a falha se restringiu ao paramento, mantendo os grampos íntegros e ancorados na massa de solo, sem evidências de arrancamento ou ruptura por tração (Figuras 10a e 10b).



Figura 10. (a) grampos fixados no solo e (b) ausência de drenagem ao longo do paramento.

Os resultados deste trabalho corroboram que a ausência de drenagem foi o fator determinante para a ruptura do paramento. As análises numéricas indicam que as maiores deformações ocorreram a 0,8 m do pé da estrutura; com a drenagem impedida, o deslocamento máximo da cortina superou 10 cm, magnitude inadmissível para o dimensionamento do paramento de concreto, sugerindo um colapso iminente. A ausência de grampos na região inferior da estrutura agravou essas deformações, enquanto a Figura 11 demonstra que um sistema de drenagem tornaria o deslocamento mais homogêneo, evitando a concentração de fluxo e empuxo na base.

Quanto ao fator de segurança global, obteve-se 2,74 para o cenário permeável e 1,49 para o impermeável. Embora tais valores não indiquem, por si só, uma ruptura global do talude, eles não refletem a

falha específica observada em campo: a ruptura do paramento de concreto devido ao empuxo hidrostático localizado.

5 CONCLUSÃO

Os resultados corroboram estudos precedentes ao identificar a ausência ou ineficiência do sistema de drenagem como fator determinante para o rompimento da contenção na Comunidade São José do Jacó, em junho de 2014. As análises indicam que a solução adotada permaneceria estável mesmo sob precipitações extremas, caso elementos de drenagem tivessem sido instalados no maciço de solo e no paramento de concreto.

O deslocamento horizontal observado na modelagem está diretamente ligado ao impedimento da dissipação das pressões de água. Na situação real, o empuxo hidrostático não previsto, especialmente no terço inferior da estrutura, foi decisivo para a instabilização. Conclui-se que a ruptura ocorreu por falha do paramento de concreto, sem comprometimento prévio da capacidade de carga dos grampos, visto que estes não sofreram arrancamento, mantendo-se na massa de solo conforme observado em campo.

Em última análise, há indícios consistentes de que a ruína da estrutura decorreu da incapacidade de dissipação das pressões de água atuantes no paramento, evidenciando a necessidade crítica de sistemas de drenagem interna em obras de solo grampeado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barghigiani, T. M. *Caracterização Experimental de Pastas Cimentícias de Alto Desempenho Reforçadas com Fibras de Polipropileno e PVA.* 2013. 155f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia do Petróleo) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2013.

Bertolucci, F. S. (2010). *Investigação de compósitos cimentícios para preenchimento de juntas da interface e de nichos em ligações de estruturas pré-moldadas*. 185f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

Bezerra, L. T. V. (2019) *Mapeamento de risco e análise de estabilidade de movimentos de massa na comunidade São José do Jacó, Natal/RN*. 337 f. Dissertação de (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.

Bezerra, L. T. V. (2016) *Mapeamento do risco/perigo de movimentos de massa e avaliação da estabilidade das encostas na Comunidade São José do Jacó, em Natal – RN*. 104 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Bezerra, L. T. V., Freitas Neto, O., Santos Jr. O. Mickovski, S. (2020). Landslide Risk Mapping in an Urban Area of the City of Natal, Brazil. *Sustainability*, p. 1-18.

Freitas neto, O., Santos Jr., O. F., Severo, R. N. F., Dourado, K. C. A., Nascimento, K. C. (2015). *Ruptura de Estrutura de Contenção Localizada na Comunidade do Jacó – Natal / RN*. In: 57o Congresso Brasileiro do Concreto. Bonito, IBRACON.

Instituto nacional De Meteorologia (2020). INMET. Recuperado em 29 dezembro,2020, de.

Ortigão, J. A. R.; Sayão, A. S. (2004). *Handbook of Slope Stabilization*. Nova York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Rodrigues, C. F. P. (2014). *Caracterização Experimental de Pastas de Cimento Reforçadas com Fibras de PVA e Polipropileno.* 91 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia do Petróleo) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro.

Santos Jr., O. F.; Coutinho, R. Q.; Severo, R. N. F. (2015). Propriedades Geotécnicas dos Sedimentos da Formação Barreiras no Litoral do Rio Grande do Norte – Brasil. *Geotecnia,* Lisboa, n. 134, p. 87-108.

Severo, R. N. F. (2005). *Análise da estabilidade das falésias entre Tibau do Sul e Pipa-RN*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.