

Avaliação Geotécnica e da Estabilidade de Dique Urbano. Estudo de Caso do Dique do Pôlder da Mathias Velho, no município de Canoas/RS

Fancler Thiago Araldi

Eng. Civil, Msc, Encop Engenharia, Porto Alegre, Brasil, thiago@encop.com

Glauber Candia Silveira

Eng. Civil, Msc, Engeplus Engenharia, Porto Alegre, Brasil, glauber.silveira@engeplus.eng.br

RESUMO: Foi realizada uma investigação geotécnica detalhada e análise da estabilidade em um dique urbano executado sobre solos moles, localizado no Pôlder da Mathias Velho, em Canoas/RS, em área densamente ocupada e sujeita a recorrentes inundações. O objetivo do estudo foi avaliar a estabilidade da estrutura constituída por um maciço de terra, em diferentes fases de operação e também propor soluções viáveis para garantir sua segurança e funcionalidade. Os estudos compreenderam campanha de ensaios geotécnicos, incluindo CPTu, coleta de amostras indeformadas, ensaios de adensamento, triaxiais UU, caracterização física, ensaios de permeabilidade e determinação de índices de consistência. Foram definidos parâmetros para modelagem e simulação de diversos cenários de comportamento dos aterros, sendo identificados trechos com estabilidade crítica. Assim, foram avaliadas alternativas de estabilização e/ou reforço com o uso de bermas de equilíbrio, geogrelhas e a combinação de ambas. O estudo destaca a relevância de abordagens integradas, combinando dados geotécnicos de campo, análises laboratoriais e modelagens numéricas para as diversas condições de estabilidade que foram simuladas, visando o diagnóstico adequado quanto ao comportamento geotécnico das fundações e aterros, especialmente devido à presença de solos do subleito com baixa capacidade de suporte. Os resultados obtidos subsidiaram a tomada de decisão técnica e o planejamento de medidas de reforço, de modo que fossem eficientes e adequadas às restrições operacionais e urbanísticas da região.

PALAVRAS-CHAVE: Solos Moles. Investigação Geotécnica. Reforço de Diques. Geogrelhas. Modelagem Computacional.

ABSTRACT: A detailed geotechnical investigation and stability analysis were conducted on an urban dike built on soft soils, located in the Mathias Velho Polder in Canoas, Rio Grande do Sul, a densely populated area subject to recurring flooding. The objective of the study was to assess the stability of the earthen massif structure during different phases of operation and to propose viable solutions to ensure its safety and functionality. The studies included a geotechnical testing campaign, including CPTu, collection of undisturbed samples, consolidation tests, triaxial UU tests, physical characterization, permeability tests, and determination of consistency indices. Parameters were defined for modeling and simulating various embankment behavior scenarios, identifying critically stable sections. Stabilization and/or reinforcement alternatives were then evaluated using equilibrium berms, geogrids, and a combination of both. The study highlights the importance of integrated approaches, combining geotechnical field data, laboratory analyses, and numerical modeling for the various simulated stability conditions, aiming to accurately diagnose the geotechnical behavior of foundations and embankments, especially due to the presence of subgrade soils with low bearing capacity. The results supported technical decision-making and the planning of reinforcement measures, ensuring they were efficient and appropriate to the operational and urban constraints of the region.

KEYWORDS: Soft Soils. Geotechnical Investigation. Dike Reinforcement. Geogrids. Computational Modeling.

1 INTRODUÇÃO

Este artigo se propõe a contribuir para o preenchimento de uma lacuna prática e metodológica na aplicação de técnicas modernas de reforço em diques urbanos construídos sobre solos moles. A partir do estudo de caso do dique do pôlder da Mathias Velho, em Canoas/RS, busca-se demonstrar a eficácia de uma solução mista (composta por berma de equilíbrio e geogrelha estruturante) aplicada em contexto urbano restrito, com

limitação física e presença de infraestrutura. O modelo proposto visa não apenas estabilizar o maciço existente, mas também servir como referência replicável para outros pôlderes da região metropolitana de Porto Alegre e de outras áreas costeiras e de várzea no Brasil.

A crescente urbanização de regiões de planícies com solos hidromórficos, sujeitas às inundações periódicas, tem imposto desafios significativos à engenharia geotécnica, especialmente quando a proteção de áreas densamente ocupadas depende do bom funcionamento de Sistemas de Proteção contra Cheias, em particular, de contenções na forma de diques de terra. O município de Canoas, inserido na região metropolitana de Porto Alegre, possui histórico crítico de inundações, agravado pelas condições geotécnicas desfavoráveis do subsolo, caracterizado pela ocorrência de solos moles e de baixa capacidade de suporte.

Em maio de 2024, durante um dos maiores eventos hidrológicos registrados no estado, associado às mudanças climáticas, o dique do pôlder da Mathias Velho sofreu galgamento e posterior rompimento em trechos críticos. Além disso, verificou-se que o dique se encontra em cotas de coroamento inferiores às previstas no projeto do DNOS¹, que recomendava valores entre 6,8 m e 7,2 m. Levantamentos recentes apontaram cotas médias de coroamento de apenas 5,05 m, ou seja, mais de 1,75m abaixo do recomendado anteriormente, restando dúvidas se parte desta diferença é decorrente de recalques por adensamento que não foram recompostos ao longo do tempo, ou se realmente na construção original os terraplenos já teriam sido executados com crista abaixo do estabelecido.

Esse cenário motivou a realização de um estudo técnico completo de investigação geotécnica, modelagem de estabilidade e proposição de soluções de reforço estrutural.

2 INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS

Apresenta-se a seguir uma síntese das investigações geotécnicas realizadas.

2.1 Localização e contexto das áreas estudadas

O dique do Pôlder Mathias Velho está situado na porção oeste do município de Canoas/RS, delimitando a borda urbana norte da cidade e atuando como proteção contra inundações provenientes do sistema fluvial do Rio dos Sinos e de canais internos, como o Arroio das Garças. A região é caracterizada por alta densidade populacional, traçado urbano consolidado e topografia plana, com cotas naturais que variam entre 1,0 e 4,0 metros. O segmento estudado neste trabalho corresponde a um trecho contínuo de aproximadamente 5,6 km de extensão, abrangendo toda a extensão do dique do Mathias Velho conforme escopo do Projeto Geotécnico e ressaltado na Figura 1. Na imagem consta também a mancha da inundação ocorrida em maio/2024².

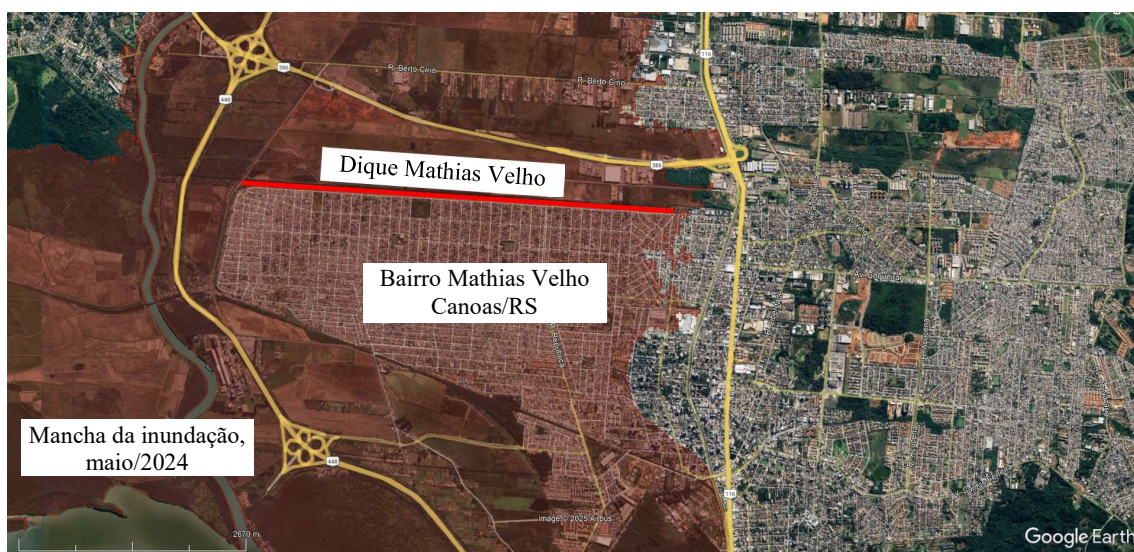


Figura 1. Trecho estudado do Dique do Pôlder Mathias Velho. Fonte: Google Earth

¹ DNOS – Departamento Nacional de Obras e Saneamento, autarquia federal extinta em 1990.

² <https://storymaps.arcgis.com/stories/a81d69f4bccf42989609e3fe64d8ef48> Acesso em: 10 jul. 2025.

2.2 Ensaios realizados

A campanha de investigação geotécnica foi executada em 2024, no âmbito do Projeto Geotécnico do Dique Mathias Velho, com objetivo de identificar os parâmetros de resistência e deformabilidade dos solos de fundação e de alteamento do dique existente. As atividades de campo incluíram ensaios de piezocone (CPTu), testes de dissipação de poropressão, coletas de amostras indeformadas, ensaios de palheta de campo (Vane Test) e reconhecimento estratigráfico com base em perfis geotécnicos. Em laboratório, foram realizados ensaios de caracterização física (granulometria, limites de consistência, peso específico), ensaios triaxiais UU, ensaios de adensamento e determinação dos parâmetros de permeabilidade.

Com base nesses dados, foram definidos os parâmetros representativos para simulação computacional de estabilidade por método de Equilíbrio Limite, utilizando o software SLIDE. Foram considerados cinco cenários de carregamento: Condição Normal de Operação (CN), Final de Construção (FC), Rebaixamento Rápido (RR), Cheia Máxima (CM) e Situação Atual (SA). Os critérios de estabilidade adotados seguiram as diretrizes da ANA (2016), do DNIT (PRO-381/2022) e da NBR 11.682 (ABNT, 2009), estabelecendo Fatores de Segurança mínimos de 1,5 para condições normais e 1,3 para condições excepcionais.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos resultados da caracterização física por ilha de investigação geotécnica, essencial para identificar as argilas de alta plasticidade em trechos específicos do polder. Em especial, valores de LL acima de 60% e IP acima de 40% indicam comportamento potencialmente crítico para estabilidade, devido à elevada compressibilidade.

Tabela 1 – Caracterização física por ilha de investigação geotécnica

Ilha	Furo	Prof. (m)	Tipo de Solo	AASHTO	LL (%)	LP (%)	IP (%)	% Pass. #200
1	SPT-05	3,0	Argila arenosa variegada	A-6	39,2	14,5	24,6	39
2	SPT-13	3,0	Argila siltosa cinza escura	A-7-6	84,7	25,4	59,3	96
3	SPT-19	3,0	Argila pouco arenosa variegada	A-7-5	78,6	32,2	46,4	94
4	SPT-21	3,0	Argila cinza clara	A-7-6	62,0	19,9	42,1	87
5	SPT-28	3,0	Argila pouco arenosa variegada	A-6	31,2	13,3	17,9	43
6	SPT-23	15,0	Argila arenosa cinza clara	A-6	38,1	14,2	23,8	39

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de palheta (VT) realizados nos pontos de investigação. Estes valores são importantes para estimar diretamente a resistência não drenada (S_u) dos solos moles que compõem a fundação do dique. Os dados obtidos reforçam a variabilidade de comportamento geotécnico ao longo das ilhas, com valores de S_u variando significativamente com a profundidade e entre os furos.

Em especial, os resultados revelam a existência de horizontes de solos muito moles, com S_u inferiores a 20 kPa em alguns trechos, o que explica os baixos Fatores de Segurança (FS) verificados nas análises de estabilidade realizadas no desenvolvimento do projeto.

Essas informações foram utilizadas tanto para calibração dos valores de N_{kt} adotados quanto para a definição dos parâmetros de entrada no software SLIDE.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de palheta (S_u , S_{ur} , S_t , S_u corrigido)

Ensaio	Profundidade (m)	S_u (kPa)	S_{ur} (kPa)	S_t	IP (%)	μ	S_u corrigido (kPa)
VT 01	3,0	29,1	6,7	4,34	40	0,80	23,3
VT 01	5,0	68,3	22,8	3,00	40	0,80	54,6
VT 02	3,0	11,6	2,7	4,30	59	0,75	8,7
VT 02	5,8	36,8	10,8	3,41	63	0,75	27,6
VT 03	6,0	46,3	12,8	3,62	36	0,85	39,4
VT 03	8,0	68,9	18,6	3,70	35	0,85	58,6
VT 04	5,0	22,0	8,1	2,72	40	0,80	17,6
VT 04	8,7	38,0	12,0	3,17	40	0,80	30,4

Ensaio	Profundidade (m)	Su (kPa)	Sur (kPa)	St	IP (%)	μ	Su corrigido (kPa)
VT 05	7,0	10,4	3,4	3,10	26	0,95	9,9
VT 05	9,0	19,0	5,3	3,60	32	0,85	16,2
VT 05	11,0	27,9	7,1	3,90	43	0,80	22,3

A Figura 2 compara os perfis de solo reais observados durante as escavações do dique. Nota-se a presença de horizontes orgânicos e de argilas de coloração escura na base dos aterros, com camadas superiores constituídas por argilas arenosas e silto-argilosas variegadas.

Esses estratos apresentam estrutura pouco densificada e elevada deformabilidade, coerente com os baixos valores de resistência não drenada (Su) e os baixos índices de sobreconsolidação (OCR ou razão de pré-adensamento) inferidos em campo, quando da execução dos ensaios de CPTu e de dissipação de poropressão. A estratigrafia reforça a necessidade de adoção de soluções de reforço, como berma estabilizadora e inclusão de geogrelhas, para mitigar os riscos de instabilidade global.



Figura 2. Perfis de solos (camadas) encontrados na fundação do dique do Pôlder Mathias Velho.

Os ensaios de adensamento evidenciaram que os solos moles da região possuem coeficientes de adensamento (C_v) baixos, na ordem de 10^{-8} a 10^{-7} m²/s, e índices de compressibilidade elevados, com C_c médios variando entre 0,25 e 0,40. Estes valores são compatíveis com a presença de argilas de alta plasticidade e refletem o potencial de recalque significativo ao longo do tempo, caso não sejam previstas soluções de pré-carregamento ou reforço. Os dados foram utilizados para verificar o comportamento pós-construção, especialmente na condição de final de obra e rebaixamento rápido.

Já os ensaios de permeabilidade indicaram condutividade hidráulica muito baixa, típica de solos argilosos, com valores entre 10^{-8} e 10^{-10} m/s. Isto implica em uma dissipação lenta de poropressões e, portanto, reforça a necessidade de considerar condições não drenadas nas análises de estabilidade de curto prazo.

A Tabela 3 mostra a correlação obtida entre valores de Su obtidos pelo CPTu e pelos ensaios de palheta, justificando o valor adotado de $N_{kt} = 16$ para os modelos de resistência não drenada, com desvio dentro de padrões aceitáveis.

Tabela 3 – Fator de cone N_{kt} adotado

Ensaio	Profundidade (m)	Su, corrigido (kPa)	Ensaio CPTu	q_t (kPa)	σ_{vo} (kPa)	N_{kt} calculado	N_{kt} adotado
VT 01	3,0	23,3	CPTU 01	230,0	42,0	8,1	10
VT 01	5,0	54,6	CPTU 01	750,0	75,0	12,4	10
VT 02	3,0	8,7	CPTU 02	250,0	44,0	23,7	16
VT 02	5,8	27,6	CPTU 02	500,0	89,0	14,9	16
VT 03	6,0	39,4	CPTU 03	700,0	98,0	15,3	16



Ensaio	Profundidade (m)	Su, corrigido (kPa)	Ensaio CPTu	qt (kPa)	σ_{vo} (kPa)	Nkt calculado	Nkt adotado
VT 03	8,0	58,6	CPTU 03	1000,0	132,0	14,8	16
VT 04	5,0	17,6	CPTU 04	400,0	82,0	18,1	16
VT 04	8,7	30,4	CPTU 04	750,0	105,0	21,2	16
VT 05	7,0	9,9	CPTU 05	350,0	100,0	25,4	16
VT 05	9,0	16,2	CPTU 05	550,0	140,0	25,3	16
VT 05	11,0	22,3	CPTU 05	600,0	188,0	18,5	16

A Figura 3 ilustra os perfis de OCR obtidos em sondagens e ensaios realizados **próximos ao dique**, comparando os resultados obtidos por diferentes métodos (palheta e CPTu). Observa-se uma boa correlação entre os valores medidos, o que reforça a confiabilidade dos dados adotados no projeto. Os valores mais elevados de OCR, superiores a 1,5, predominam nas camadas rasas, sugerindo a presença de solos levemente sobreconsolidados, possivelmente em função de cargas históricas ou variações de nível d'água, aspecto este já amplamente identificado em outros estudos de solos moles na região metropolitana de Porto Alegre (Soares, 1997). Em contrapartida, os horizontes situados entre -2,0 m e -6,0 m exibem valores próximos ou inferiores a 1,0, indicando solos normalmente adensados ou até subconsolidados – justamente as zonas mais críticas em termos de estabilidade. A Figura 4 apresenta os perfis de OCR obtidos **sob o eixo do dique**, revelando uma tendência clara de redução nos valores ao longo da profundidade. Esta redução reflete a ação direta do carregamento do maciço sobre o subleito, promovendo o adensamento da estrutura natural (já ocorrido). Comparando ambas as figuras, constata-se que os solos sob o dique encontram-se em estado de consolidação mais avançado, mas, paradoxalmente, com menor OCR – consequência do rebaixamento de tensões prévias em função do tempo e carregamento progressivo. Em outras palavras, novos carregamentos decorrentes do alteamento do dique deverão seguir um padrão de solo mole normalmente adensado, isto é, maiores recalques.

Diante da variabilidade observada, os valores de OCR foram padronizados nos modelos conforme a localização dos trechos, de forma a representar adequadamente o histórico de tensões e garantir estabilidade conservadora, ou seja:

- Para solos **sob o dique**: de +2,0 m a 0,0 m → OCR = 1,5 • de 0,0 m a -8,0 m → OCR = 1,0
- Para solos **próximos ao dique**: de +2,0 m a -6,0 m → OCR = 2,0

Essa padronização permitiu maior robustez na modelagem numérica, assegurando que as simulações no SLIDE refletissem o melhor possível a condição de campo e os riscos associados à perda de resistência por adensamento e/ou fluência.

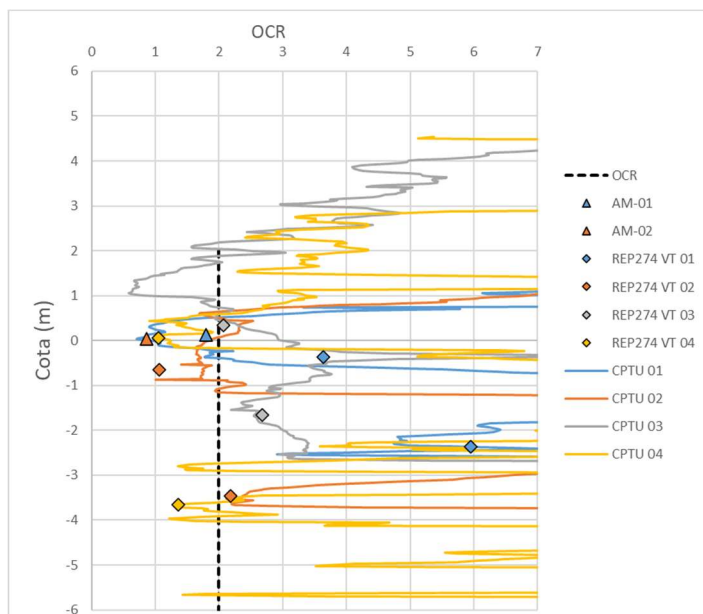


Figura 3. Valores de OCR estimados por diferentes métodos para CPTUs executados próximos ao dique.

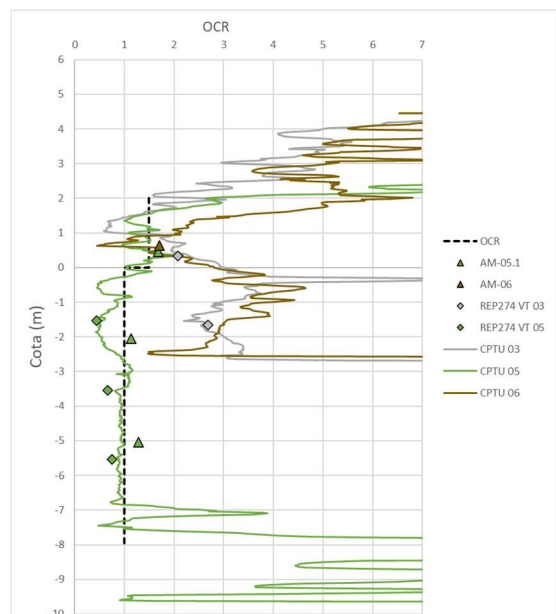


Figura 4. Valores de OCR estimados por diferentes métodos para CPTUs executados sobre o dique

Em relação à previsão de recalques por adensamento, considerando o alteamento do dique para alcançar as cotas de coroamento previstas nos estudos do DNOS, as estimativas foram de um recalque médio de cerca de 0,40m, mas estes estudos não são apresentados no presente trabalho.

3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE E RESULTADOS

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos nas análises de estabilidade do dique.

3.1 Critérios e Condições de Projeto

Os fatores de segurança (FS) adotados para a análise de estabilidade do dique foram definidos com base nas diretrizes da ANA (2016), da NBR 11682 (ABNT, 2009) e do DNIT (2022). Para cada condição de carregamento considerada no projeto, foi estabelecido um valor mínimo de FS a ser atendido, de modo a garantir a segurança estrutural do dique mesmo em cenários de solicitação extrema. Os FS mínimos aceitáveis estão mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – FS mínimos por condição de projeto

Condição	FS _{mín}
Situação Atual – SA	1,0
Condições Normais – CN	1,5
Final de Construção – FC	1,3
Rebaixamento Rápido – RR	1,3
Cheia Máxima – CM	1,4
Ocorrência de Sismo – OS	1,1
Carregamento Acidental – CA	1,3

3.2 Modelagem Numérica com Percolação Transiente

As simulações de estabilidade foram conduzidas utilizando o software SLIDE, abrangendo sete condições de carregamento típicas de estruturas hidráulicas: Situação Atual (SA), Condições Normais (CN), Final de Construção (FC), Rebaixamento Rápido (RR), Cheia Máxima (CM), Ocorrência de Sismo (OS) e Carregamento Acidental (CA). Cada uma dessas condições foi simulada considerando o nível d'água correspondente, atuando na face montante e refletindo o histórico hidrológico e operacional do sistema.

Destaca-se, nas análises, a consideração da percolação transiente integrada ao modelo de estabilidade. Essa abordagem permitiu avaliar, de forma mais realista, a redistribuição das pressões neutras ao longo do tempo, especialmente em situações críticas como o rebaixamento rápido e a cheia máxima. A variação do gradiente hidráulico foi incorporada por meio de simulações acopladas de fluxo e estabilidade, representando o comportamento típico de solos argilosos com baixa permeabilidade e lenta dissipação de poropressões.

Essa modelagem transiente foi essencial para capturar efeitos como o aumento momentâneo das pressões neutras no interior do maciço durante oscilações de nível d'água, que poderiam não ser percebidos em análises estáticas convencionais.

A Figura 5 apresenta o campo de pressão neutra gerado no modelo transiente. Observa-se o acúmulo de poropressões na interface entre o dique e o subleito argiloso, com gradientes hidráulicos significativos na região montante. Esse comportamento reforça a necessidade de avaliar estabilidade considerando fases de transição lenta, como rebaixamento prolongado ou cheia estacionária, comuns em eventos hidrológicos intensos. Os resultados demonstraram que os fatores de segurança tendem a reduzir consideravelmente sob tais condições, especialmente em segmentos com menor sobreconsolidação e S_u reduzido.

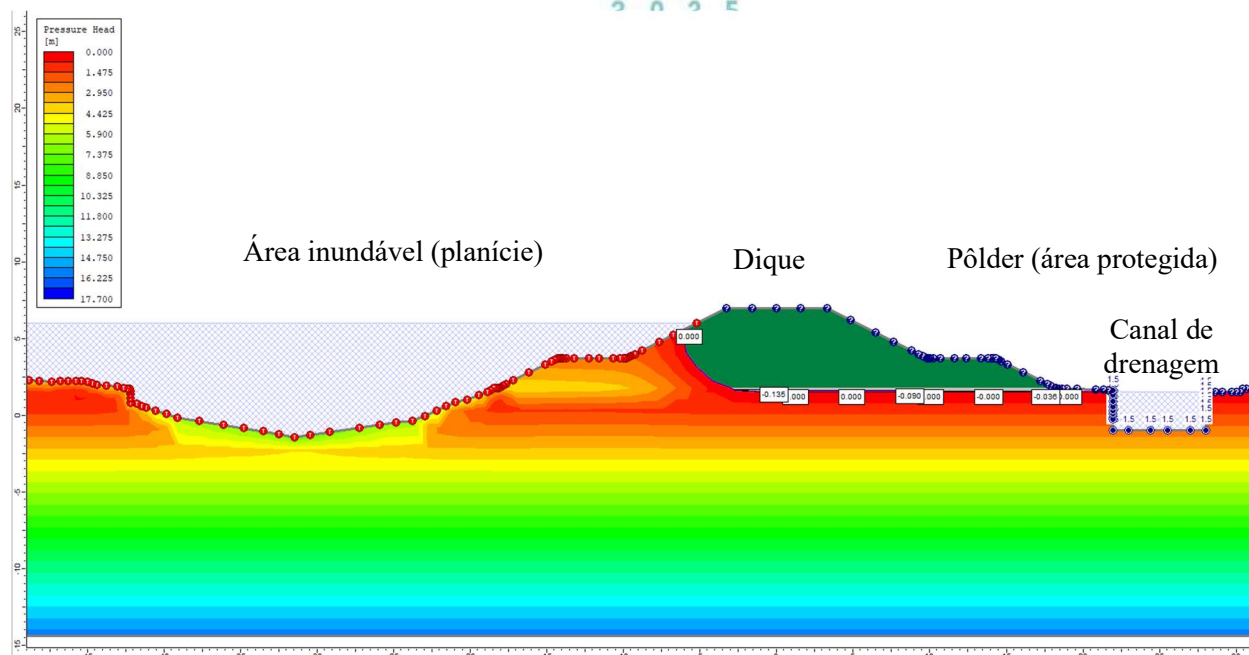


Figura 5. Análise bidimensional de percolação transiente (Trecho 4 – após 30 dias).

3.3 Avaliação por Trecho Homogêneo

O dique estudado foi subdividido em nove trechos homogêneos (TH1 a TH9), com base em dados geotécnicos e geométricos que foram levantados. Para cada trecho, foram simuladas quatro alternativas:

- Situação Atual (sem intervenção);
- Inclusão de berma de equilíbrio;
- Reforço com geogrelha estruturante;
- Solução mista (berma + geogrelha).

A Tabela 6 resume os FS obtidos por trecho sob a condição de Cheia Máxima, com percolação transiente após 30 dias.

Tabela 6 – Fatores de segurança por trecho e solução

Trecho	FS Situação Atual	FS com Berma	FS com Geogrelha	FS com Solução Mista
TH1	1,10	1,35	1,28	1,58
TH2	1,05	1,42	1,33	1,62
TH3	1,00	1,38	1,26	1,61
TH4	1,08	1,33	1,31	1,55
TH5	1,12	1,40	1,34	1,59
TH6	1,07	1,45	1,37	1,63
TH7	1,03	1,30	1,29	1,60
TH8	1,09	1,36	1,30	1,57
TH9	1,06	1,41	1,32	1,61

Os resultados demonstraram que:

- A situação atual é crítica em todos os trechos ($FS < 1,15$);
- O uso exclusivo de berma de equilíbrio melhora os FS, mas exige áreas físicas (lateralmente ao dique) indisponíveis no contexto urbano;
- A inclusão apenas de geogrelha eleva o FS, mas em alguns casos permanece insuficiente;
- A solução mista garante $FS \geq 1,55$ em todos os trechos, dentro dos limites normativos e das restrições espaciais do entorno.

Essa última alternativa, mostrada na Figura 6 foi, portanto, validada tecnicamente e adotada no projeto executivo como solução preferencial para os detalhamentos de projeto implicando, inclusive, na reconstrução total de segmentos para que as geogrelhas pudessem ser implantadas na base dos aterros.

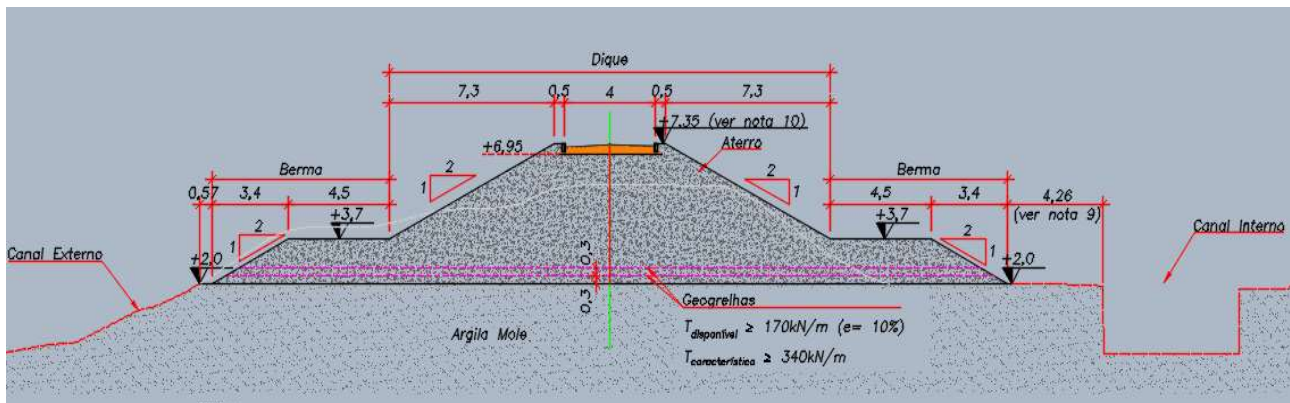


Figura 6. Seção tipo da solução mista adotada para o alteamento do dique (berma+geogrelha).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo apresentou resultados de investigações geotécnicas realizadas na fundação de dique existente, com ocorrência de solos moles, bem como modelagem numérica e proposição de solução técnica visando melhoria das condições de estabilidade. A ruptura parcial ocorrida em 2024 no dique da Mathias Velho expôs fragilidades históricas do sistema, associadas às cotas de coroamento executadas abaixo das recomendações de projeto do extinto DNOS, ou de recalques por adensamento que não foram recompostos, bem como ausência de reforço adequado.

As investigações geotécnicas conduzidas ao longo dos 5,6 km do dique Mathias Velho revelaram trechos com estabilidade crítica, associados à presença de solos moles, com baixa resistência não drenada (S_u) e índice de sobreconsolidação normalmente adensado na fundação do dique e de pré-adensamento na faixa lateral aos aterros. Ensaio de palheta, CPTu, adensamento e permeabilidade permitiram uma caracterização detalhada do subsolo, fornecendo base confiável para a modelagem computacional.

Em síntese, os resultados das análises de estabilidade demonstraram que:

- A condição de Cheia Máxima representa o cenário mais crítico para a estabilidade;
- A simulação com percolação transiente reproduz de forma satisfatória os efeitos de aumento de poropressões e perda de resistência não drenada;
- Entre as alternativas estudadas, a solução mista de berma e geogrelha mostrou-se capaz de atender aos requisitos de FS com compatibilidade urbana e viabilidade executiva.

Do ponto de vista técnico, como contribuição deste trabalho, demonstrou-se ser possível aplicar soluções avançadas de reforço em alteamentos de aterros em contextos urbanos restritos, com respaldo em dados de campo e validação computacional. Do ponto de vista estratégico, trata-se de um modelo que poderá ser replicável para outros polders da região metropolitana de Porto Alegre e do Brasil, onde há restrições de espaço pela crescente pressão por ocupação antrópica, em áreas de solos moles.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- Agência Nacional de Águas - ANA (2016). *Manual de Segurança de Barragens de Terra e de Enrocamento*. Brasília-DF.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (2022). *Norma DNIT 381/2022-PRO Projeto de aterro sobre solos moles para obras viárias - Procedimento*. Brasília-DF.
- SOARES, J. M. D. (1997) *Estudo do comportamento geotécnico do depósito de argila mole da grande Porto Alegre*, Tese de Doutorado. Escola de Engenharia. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil / UFRGS. 332 p.