



Diagnóstico por retroanálise das rupturas dos muros de contenção do canal do Arroio Dilúvio em Porto Alegre/RS após chuvas extremas

Cleber Floriano

Diretor, SF Engenharia, Porto Alegre, Brasil, cleber@souzafloriano.com

Marcos Strauss

Diretor, Singe Engenharia, Porto Alegre, Brasil, strauss@singeengenharia.com.br

RESUMO: Este artigo apresenta o diagnóstico geotécnico realizado para avaliar e propor soluções de contenção após a ruptura do muro de alvenaria na margem do Arroio Dilúvio, em Porto Alegre/RS. As análises foram concentradas em dois pontos de referência - um junto à Avenida Silva Só e outro em frente ao Planetário da UFRGS -, representativos de um padrão recorrente de instabilidade ao longo do canal. As rupturas, frequentes em eventos de grandes vazões, tornaram-se mais críticas após o episódio pluviométrico de setembro de 2023, quando a ciclovia da Av. Ipiranga foi parcialmente afetada. A análise baseou-se em investigações históricas, topográficas e geotécnicas, incluindo ensaios SPT, cisalhamento direto e modelagens computacionais. A retroanálise utilizou o método de equilíbrio limite considerando empuxos ativos e passivos, avaliando variações de embutimento e gradientes hidráulicos. Constatou-se que a perda de embutimento no pé do muro, agravada por diferenças de nível d'água, reduziu significativamente o fator de segurança ao tombamento. As análises indicaram que a ruptura foi condicionada por instabilidade externa e perda progressiva de capacidade de suporte da fundação, servindo de base para o pré-dimensionamento das novas soluções de contenção.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de canais, Retroanálise, Extremos climáticos

ABSTRACT: This article presents the geotechnical diagnosis carried out to evaluate and propose containment solutions following the failure of a masonry wall on the bank of Arroio Dilúvio in Porto Alegre/RS, Brazil. The analysis focused on two reference points - one near Avenida Silva Só and the other in front of the UFRGS Planetarium - which are representative of recurring instability patterns along the channel. Failures, frequent during events of high flow rates, became critical after the intense rainfall of September 2023, when the bicycle lane on Av. Ipiranga was partially affected. The analysis was based on historical, topographic, and geotechnical investigations, including SPT, direct shear tests, permeability tests, soil classification, and computational modeling. Back-analysis adopted the limit equilibrium method with both active (Coulomb) and passive (Rankine) earth pressure considerations, evaluating different embedment depths and hydraulic gradients. It was found that the loss of embedment at the wall base, combined with water level differences between upstream and downstream, significantly reduced the safety factor against overturning. The results indicated a mechanism of external instability and progressive loss of bearing capacity, which served as a basis for the preliminary design of new containment solutions. The study highlights the importance of realistic modeling and integration of hydraulic and geotechnical parameters in urban infrastructure rehabilitation projects subject to extreme weather conditions.

KEYWORDS: Channel stability, Back-analysis, Extreme weather.



1 INTRODUÇÃO

As recentes alterações no regime pluviométrico da região Sul do Brasil têm imposto desafios significativos à manutenção de estruturas urbanas de drenagem. Entre os sistemas mais sensíveis estão os canais urbanos, como o Arroio Dilúvio em Porto Alegre/RS, cuja estabilidade é comprometida em episódios de cheia.

O Arroio Dilúvio é uma estrutura histórica de escoamento superficial implantada na década de 1940, cujo sistema de contenção é formado por muros de alvenaria de pedra argamassada e taludes reaterros compactados. Ao longo das últimas décadas, foram observadas diversas rupturas localizadas em suas margens, geralmente associadas a eventos extremos de chuva, assoreamento do leito e perda de embutimento da fundação.

Durante o evento pluviométrico de setembro de 2023, ocorreram duas rupturas significativas nos muros de contenção do canal: uma no trecho junto ao Planetário da UFRGS e outra nas imediações da Rua Silva Só. Em ambos os casos, os danos afetaram parcialmente a ciclovia da Avenida Ipiranga e comprometeram a integridade estrutural dos muros, sem, no entanto, apresentar retrogressão expressiva.

A reincidência desses eventos e a importância da via marginal demandaram uma abordagem técnica criteriosa, com investigação detalhada das condições geotécnicas, hidráulicas e estruturais. A hipótese de ruptura por instabilidade externa, precedida por perda de apoio na base do muro e intensificada por gradientes hidráulicos, orientou a formulação dos modelos computacionais utilizados nesta análise.

Este trabalho visa relatar o processo de diagnóstico e retroanálise de dois trechos rompidos, tomados como referência para compreender os mecanismos típicos de ruptura dos muros do Arroio Dilúvio. Embora o estudo se concentre nesses dois pontos, os resultados podem ser generalizados a outras regiões do canal, que compartilham características geométricas e construtivas semelhantes, evidenciando um padrão de degradação associado a solicitações hidráulicas recorrentes e envelhecimento estrutural. Relatar o processo de diagnóstico e retroanálise de um dos trechos rompidos, com foco na compreensão do mecanismo de ruptura e na definição de parâmetros representativos para projeto executivo de reabilitação estrutural.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO ARROIO DILÚVIO

O Arroio Dilúvio é o principal canal de drenagem urbana da cidade de Porto Alegre, atravessando-a no sentido leste-oeste e desaguando no Lago Guaíba. A canalização do arroio foi executada em meados da década de 1940, com muros de alvenaria de pedra argamassada, os quais vêm sofrendo processos naturais de degradação ao longo do tempo. Embora as cargas atuantes sobre os muros não tenham se alterado significativamente, o que se observa é uma intensificação das solicitações hidráulicas, com maior frequência de variações bruscas de nível d'água e gradientes acentuados, especialmente associados a eventos extremos. A combinação dessas ações com o envelhecimento dos materiais compromete a estabilidade estrutural, sobretudo em condições de perda de embutimento e erosão da fundação, caracterizando um quadro típico de solicitação cíclica sobre estrutura fragilizada.

Os trechos analisados localizam-se na margem esquerda do canal do Arroio Dilúvio, junto à Avenida Silva Só e em frente ao Planetário da UFRGS. Ambos os pontos foram escolhidos como referências representativas de rupturas ocorridas durante o evento pluviométrico de setembro de 2023, em razão da similaridade das características construtivas, da geometria e da vulnerabilidade hidráulica. Historicamente, essas regiões registram instabilidades pontuais associadas a eventos de cheia, perda de embutimento e gradientes hidráulicos acentuados.

A via marginal, com ciclovia e calçada, aumenta a importância da segurança estrutural nesses setores, dada a proximidade com a circulação urbana. A Figura 1 identifica visualmente o muro de contenção como proteção de margem em questão. Do lado esquerdo, na época da construção e no lado direito uma recente reconstrução.



Figura 1: Imagem da construção de uma parte do muro de contenção do canal do Arroio Dilúvio. Imagem de uma parte recentemente recuperada seguindo o mesmo método executivo original.

2 BASE DE INFORMAÇÕES

Os parâmetros geotécnicos utilizados nas modelagens foram embasados em ensaios de campo e laboratório, aliados a dados geométricos e hidráulicos representativos das condições reais do canal. Foram executados ensaios de Sondagem a Percussão (SPT), ensaios de cisalhamento direto (em corpo de prova remoldado e inalterado), ensaios de permeabilidade em carga constante e caracterização física dos solos.

Os resultados laboratoriais indicaram ângulos de atrito interno variando entre 28° e 33° , com coesões aparentes inferiores a 10 kPa para os materiais de retroaterro. A permeabilidade observada situou-se na faixa de 10^{-4} a 10^{-5} m/s, compatível com solos arenosos com frações finas. A classificação geral segundo a USCS foi SM e SC, confirmando o caráter de solos com certa plasticidade, porém dominância friccional (RELATÓRIO_003-2023_REV01).

As retroanálise estão fundamentadas no equilíbrio limite considerando as premissas de estados ativos e passivos conforme indicado na Figura 2.

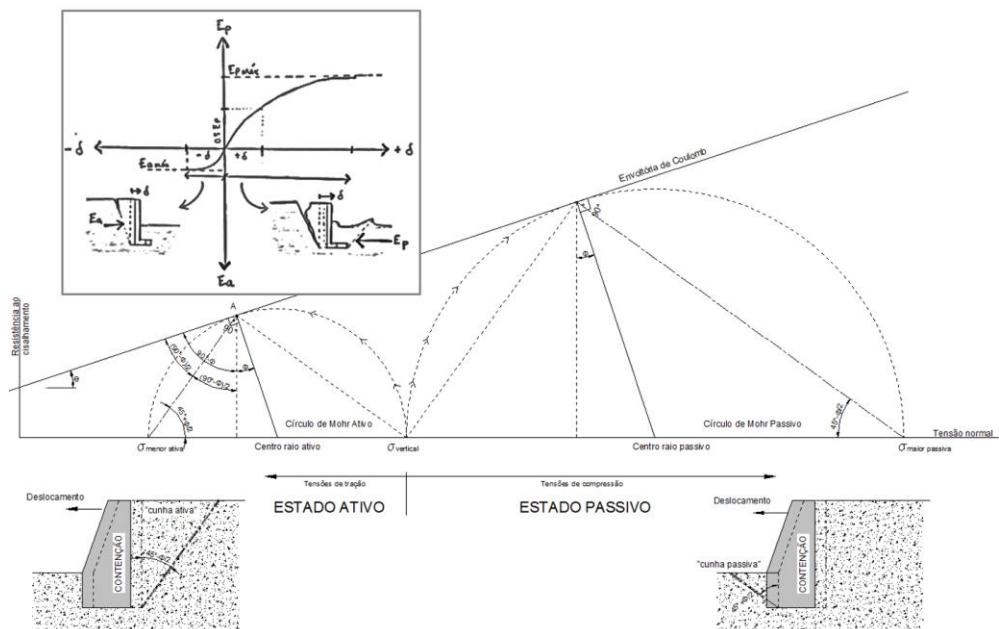


Figura 2: Estados passivo, ativo e ao repouso no círculo de Mohr e as considerações de deslocamentos necessárias e comparativos para o equilíbrio mecânico (Adaptado de Floriano, 2017)

A avaliação técnica baseou-se em um conjunto robusto de dados: levantamento histórico das rupturas, topografia detalhada, investigações geotécnicas com SPT, ensaios de cisalhamento direto, ensaios de permeabilidade e caracterização de solos. Dados sobre a geometria original do canal foram extraídos do projeto DNOS (1968). Com isso, foi construído um modelo geomecânico para ser avaliado com o auxílio do software Geo5.

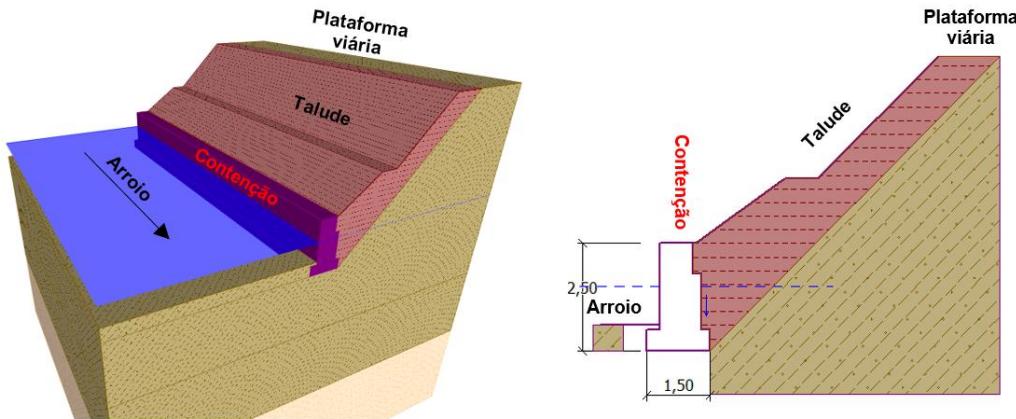


Figura 3: Modelo geométrico convergente (software Geo5).

O solo predominante é arenoso, com baixa coesão e alta suscetibilidade à erodibilidade. As estruturas existentes possuem comportamento monolítico, com elevada resistência à compressão, mas baixa resistência à tração, o que favorece falhas por tombamento quando há perda de embutimento.

Para a modelagem chegou-se aos seguintes parâmetros de entrada, constante na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades geotécnicas dos materiais utilizados na modelagem.

MATERIAL	Peso específico γ (kN/m ³)	Ângulo de atrito interno φ' (°)	Coesão C' (kPa)	Ângulo de atrito Solo-muro ρ (0,8* φ')
Aterro	17	34	5	27,2
Areia siltosa	18	36	5	28,8
Areia siltosa grossa	18	37	1	29,6
Areia compacta	18	38	0	30,4

A geometria do canal foi definida com base nos registros históricos do projeto original do DNOS (1968), sendo o muro modelado como estrutura monolítica com altura média de 2,20 m, largura de base de 1,10 m e embutimento variável entre 0,50 m e 1,00 m, conforme os cenários analisados. As condições de contorno incluíram níveis freáticos móveis, com simulações representando situações de cheia súbita, e a ação de empuxos ativos e passivos segundo as condições de saturação do retroaterro. A presença de gradientes hidráulicos intensos, decorrentes da diferença de nível entre jusante e montante ($\Delta H > 0,5$ m), foi incorporada como fator agravante, influenciando diretamente o equilíbrio de forças e a segurança à estabilidade externa. A parametrização adotada combinou os valores obtidos em laboratório com os resultados retroanalisados a partir do comportamento observado em campo.

4 DIAGNÓSTICO E RETROANÁLISE

A retroanálise foi realizada com base em modelagens computacionais utilizando o software Geo5, adotando o método de equilíbrio limite. As análises consideraram diferentes configurações de empuxo — ativo

(Coulomb) e passivo (Rankine) —, aplicadas a modelos representativos dos muros de alvenaria de pedra argamassada. O principal objetivo foi compreender a relação entre perda de embutimento, variação de nível d'água e o comportamento estrutural dos muros, com foco na avaliação da estabilidade externa (tombamento e deslizamento).

Foram definidos seis cenários distintos de embutimento, associados a quatro condições representativas de nível freático, simulando situações típicas de cheia, rebaixamento brusco e saturação prolongada. No total, foram realizadas 144 simulações paramétricas, com variações sistemáticas dos parâmetros geotécnicos, níveis de água e geometrias de fundação.

As análises mostraram que o tombamento é o modo de ruptura predominante, ocorrendo principalmente quando há perda de embutimento superior a 40% da largura da base do muro. A ação hidráulica desempenha papel decisivo: diferenças superiores a 0,5 m entre o nível d'água do canal e o do tardoz induzem fluxos com gradientes críticos, favorecendo processos erosivos na base e pressão adicional sobre a fundação. Tais condições comprometem a estabilidade ao reduzir o peso estabilizante do solo de apoio frontal, além de promover instabilidade por recalque diferencial e perda de sucção no retroaterro.

Modelos indicaram que a ruptura se configura como instabilidade externa, controlada principalmente por tombamento, e não por ruptura global clássica ou instabilidade interna. A fundação, ainda que superficial, comporta-se como apoio rígido até o ponto de perda de base. A análise indicou progressiva redução do fator de segurança conforme a profundidade do embutimento diminui, em especial na presença de nível d'água elevado no tardoz. A resistência ao cisalhamento foi retroanalisada com base em ângulos de atrito entre 30° e 33°, comparando os valores obtidos por SPT (Liao & Whitman, 1986; Hatanaka & Uchida, 1996) e ensaios de laboratório (LMS-GEO, 2023), com ajuste fino conforme os deslocamentos observados nos trechos rompidos.

As figuras a seguir mostram os seguintes ábacos; FSt x perda de embutimento; tensões x perda de embutimento e estado de tensões com variação de DeltaH e embutimento, respectivamente.

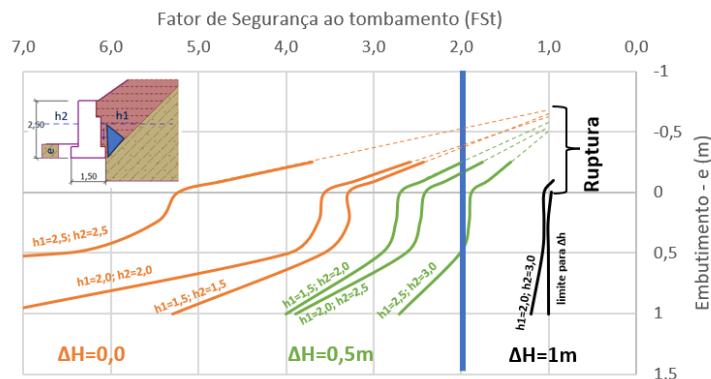


Figura 4: Ábaco que relaciona a queda de Fator de Segurança ao Tombamento versus a perda de embutimento do muro.

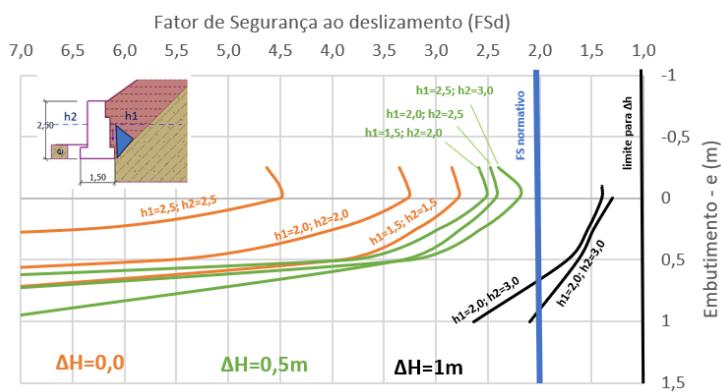


Figura 5: Ábaco que relaciona a queda de Fator de Segurança ao Deslizamento versus a perda de embutimento do muro.

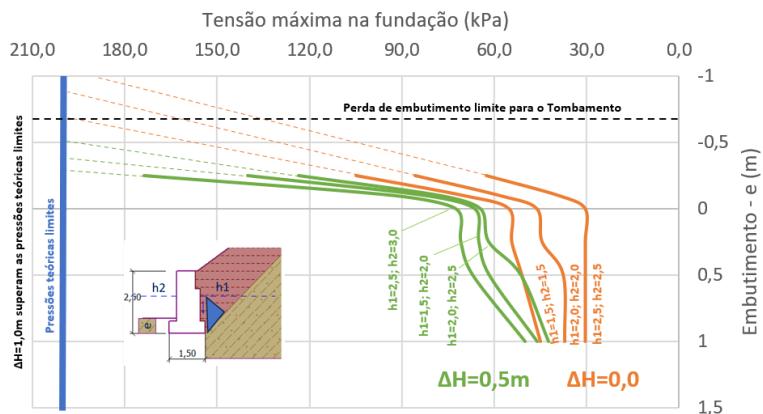


Figura 6: Ábaco que relaciona a o acréscimo de tensões na fundação versus a perda de embedimento do muro.

Essas imagens evidenciam graficamente os efeitos combinados entre perda de apoio e diferenças de nível d'água sobre o comportamento estrutural do muro.

5 CONCLUSÕES

A análise desenvolvida permitiu compreender com maior profundidade os mecanismos que levaram à ruptura dos muros de contenção do Arroio Dilúvio após o evento pluviométrico extremo de setembro de 2023. A abordagem de retroanálise aplicada a dois pontos de referência — junto à Avenida Silva Só e ao Planetário da UFRGS — demonstrou que tais rupturas são representativas de um padrão recorrente de instabilidade ao longo do canal. A combinação de perda de embedimento, envelhecimento estrutural e ação hidráulica cíclica revelou-se determinante na perda de estabilidade das estruturas.

O estudo evidenciou que o tombamento é o modo de ruptura dominante, condicionado por variações de nível d'água entre montante e jusante, que geram gradientes hidráulicos intensos e promovem processos erosivos na fundação. O uso de modelagens realistas, considerando diferentes cenários de saturação e geometrias de embedimento, permitiu identificar a redução progressiva do fator de segurança e mapear os limites críticos da estabilidade estrutural.

A retroanálise embasou a definição de parâmetros geotécnicos compatíveis com o comportamento observado, integrando dados de campo, laboratório e simulação numérica. Como resultado, forneceu subsídios técnicos relevantes para o pré-dimensionamento de soluções de reabilitação, ressaltando a importância de medidas preventivas de conservação estrutural e controle hidráulico em canais urbanos sujeitos a extremos climáticos. O estudo reforça a importância de modelagens realistas e da integração entre dados geotécnicos e hidráulicos para obras em infraestrutura urbana sujeita a extremos climáticos (Craig, 2004; Duncan & Wright, 2005).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o consórcio Drena Poa e a Prefeitura de Porto Alegre pelo fornecimento de dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Craig, R. F. (2004). *Soil Mechanics* (7th ed.). Taylor & Francis.

DNIT (2023). *Manual de Estabilidade de Taludes em Obras de Infraestrutura Rodoviária*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro.



DNOS – Departamento Nacional de Obras de Saneamento. (1968). *Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica das Obras de Defesa de Porto Alegre, Canoas e São Leopoldo contra Inundações*. Consórcio OTI-ENGEVIX.

Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. Wiley.

Floriano, C. (2017). *Mecânica dos Solos Aplicada*. Volume Único. Porto Alegre: Editora Sagah.

Hatanaka, M., & Uchida, A. (1996). Empirical correlation between penetration resistance and internal friction angle of sandy soils. *Soils and Foundations*, 36(4), 1–9.

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS DA PUCRS – LMS-GEO. (2023). *Ensaio de Cisalhamento Direto*. RELATÓRIO_003-2023_REV01, Porto Alegre: 54 p.

Liao, S. S. C., & Whitman, R. V. (1986). Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 112(3), 373–377.

Silva, D. H. (2019). *Diagnóstico Histórico e Ambiental da Bacia Hidrográfica do Arroio Dilúvio*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Dissertação de Mestrado.

Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (2nd ed.). Wiley. (2004). *Soil Mechanics* (7th ed.). Taylor & Francis.

DNOS – Departamento Nacional de Obras de Saneamento. (1968). *Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica das Obras de Defesa de Porto Alegre, Canoas e São Leopoldo contra Inundações*. Consórcio OTI-ENGEVIX.

Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. Wiley.

Floriano, C. (2017). *Mecânica dos Solos Aplicada*. Volume Único. Porto Alegre: Editora Sagah.

Hatanaka, M., & Uchida, A. (1996). Empirical correlation between penetration resistance and internal friction angle of sandy soils. *Soils and Foundations*, 36(4), 1–9.

Liao, S. S. C., & Whitman, R. V. (1986). Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 112(3), 373–377.

Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (2nd ed.). Wiley.

DNIT (2023). *Manual de Estabilidade de Taludes em Obras de Infraestrutura Rodoviária*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro.

Silva, D. H. (2019). *Diagnóstico Histórico e Ambiental da Bacia Hidrográfica do Arroio Dilúvio*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Dissertação de Mestrado.