



FRANCISCO LOUSEIRO GOUVEIA

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA ROTURA DE DIQUES FLUVIAIS POR GALGAMENTO

INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE FROUDE NA EVOLUÇÃO HIDRO-
MORFODINÂMICA DA BRECHA

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa

Março, 2025

Caracterização Experimental da Rotura de Diques Fluviais por Galgamento

Influência do número de Froude na evolução hidro-morfodinâmica da brecha

FRANCISCO LOUSEIRO GOUVEIA

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Orientadora: Sílvia Rute Caleiro Amaral,
Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Coorientador: João Nuno Sequeira Fernandes,
Professor Auxiliar Convidado, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutora Maria da Graça Neves,
Professora Associada com Agregação, FCT-NOVA

Arguente: Doutor Moisés Brito,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

Orientadora: Doutora Sílvia Rute Caleiro Amaral,
Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Caracterização Experimental da Rotura de Diques Fluviais por Galgamento

Influência do número de Froude na evolução hidro-morfodinâmica da brecha

Copyright © Francisco Louseiro Gouveia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, à minha orientadora Sílvia Amaral, investigadora auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), um agradecimento especial pela disponibilidade, partilha de conhecimentos e contributo essencial na construção, organização e elaboração desta dissertação.

Agradecer ao meu coorientador, professor João Fernandes pelo contributo na elaboração desta dissertação e pela oportunidade de desenvolver este trabalho em parceria com o LNEC.

Ao Ricardo Jónatas, um agradecimento especial por todos os conhecimentos partilhados, pela ajuda na elaboração dos ensaios e sua análise, pela disponibilidade e reflexões constantes que contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação. Obrigado.

Ao Amílcar Gonçalves, do Departamento de Geotecnia do LNEC, pela ajuda na construção dos diques experimentais e análise das suas propriedades. Ao Nuno Aido do Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC, pelas propostas das melhores soluções construtivas a aplicar na instalação experimental.

Agradecer ao LNEC, em particular ao Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas (NRE) do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) pelo acolhimento e fornecimento dos recursos necessários para a realização desta investigação.

Um agradecimento à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pela bolsa de investigação sem a qual seria impossível dedicar o tempo e trabalho investido neste projeto. Um agradecimento à Universidade Nova - FCT e a todos os docentes que contribuíram no meu percurso académico.

“Só sei que nada sei.”
(Sócrates).

RESUMO

O aumento da frequência de eventos hidrológicos extremos, devido às alterações climáticas, intensifica a necessidade de compreender os mecanismos de rotura das estruturas de defesa contra cheias, como sejam os diques fluviais, fundamentais para a proteção de zonas habitadas e infraestruturas críticas. A rotura destas estruturas pode resultar em inundações severas, perdas humanas e elevados prejuízos socioeconómicos, tornando essencial o aprofundamento do conhecimento sobre os processos de erosão associados à rotura.

Neste contexto, a presente investigação insere-se no projeto *DikesFPro – Integrating Data and Models to Understand Dikes Failure Processes* (PTDC/ECI-EGC/7739/2020), financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), e recorre a um modelo físico experimental localizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para analisar a influência das condições do escoamento afluente, representadas pelo número de Froude, na evolução do processo de rotura (morfologia da brecha) e no caudal efluente da brecha (hidrograma de rotura). Foram realizados quatro (4) ensaios experimentais, induzindo uma rotura por galgamento de um dique fluvial homogéneo, mantendo constantes variáveis críticas, como o caudal afluente, o teor em água, a compactação, o material e a geometria do dique.

Para monitorização e análise dos ensaios, recorreram-se a técnicas inovadoras, incluindo tecnologia *LiDAR* para captação da evolução do processo de rotura e o método *Particle Tracking Velocimetry* (PTV) para determinação dos campos de velocidade na aproximação à brecha.

Os resultados obtidos nesta investigação contribuem para a caracterização detalhada do processo de rotura de diques, fornecendo dados para calibração e validação de modelos numéricos. Estes modelos permitirão melhorar a previsão do hidrograma de cheia efluente da rotura e assim, apoiar a definição de estratégias de mitigação e reforçar a segurança deste tipo de estruturas hidráulicas e das populações expostas aos riscos de inundação.

Palavras chave: Diques fluviais, rotura por galgamento, processo erosivo da brecha, número de Froude, caudal efluente da brecha, ensaios experimentais.

ABSTRACT

The increasing frequency of extreme hydrological events, driven by climate change, heightens the need to understand the failure mechanisms of flood defence structures, such as fluvial dikes, which are essential for protecting inhabited areas and critical infrastructure. The failure of these structures can result in severe flooding, loss of life and significant socio-economic damage, making it crucial to deepen our understanding of the erosion processes associated with breach formation.

In this context, the present research is part of the *DikesFPro – Integrating Data and Models to Understand Dikes Failure Processes* (PTDC/ECI-EGC/7739/2020) Project, funded by the Foundation for Science and Technology (FCT), and uses an experimental facility at the Portuguese National Laboratory for Civil Engineering (LNEC) to assess the influence of inflow conditions, represented by the Froude number, on the breach evolution (breach morphology) and outflow discharge (breach hydrograph). Four (4) experimental tests were conducted, inducing a breach formation by overtopping in a homogeneous fluvial dike, while keeping critical variables constant, such as inflow discharge, water content, compaction, material properties and dike geometry.

Innovative techniques were employed for monitoring and analysing the tests, including *LiDAR* technology to capture the breach evolution and *Particle Tracking Velocimetry (PTV)* to determine velocity fields in the approach flow to the breach.

The results of this study contribute to a detailed characterisation of the dike breaching process, providing essential data for the calibration and validation of numerical models. These models will enhance breach hydrograph forecasting hence, support the development of mitigation strategies and strengthen the safety of hydraulic structures and populations exposed to flood risks.

Keywords: Fluvial dikes, overtopping failure, breach erosion process, Froude number, breach outflow discharge, experimental tests.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Estrutura da dissertação.....	3
2	ESTADO DE ARTE.....	5
2.1	Enquadramento.....	5
2.2	Diques Fluviais.....	5
2.2.1	Diques artificiais vs. naturais.....	6
2.2.2	Aspetos construtivos de diques artificiais.....	7
2.3	Mecanismos de rotura.....	9
2.3.1	Galgamento.....	10
2.3.2	Erosão interna.....	10
2.3.3	Falhas geotécnicas.....	10
2.4	Parâmetros influentes no processo de rotura.....	11
2.4.1	Características geotécnicas do dique fluvial.....	11
2.4.2	Características hidráulicas - Importância do número de Froude.....	13
2.5	Roturas históricas.....	16
2.5.1	Nacional (diques do rio Mondego).....	17
2.5.2	Internacional.....	18
2.6	Revisão de estudos experimentais.....	21
2.6.1	Tipos de abordagem: empírica, física e numérica.....	21

2.6.2	Avanços na investigação sobre a rotura de diques.....	22
2.6.3	Importância da continuidade da investigação sobre rotura de diques.....	27
3	INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL.....	29
3.1	Enquadramento.....	29
3.2	Descrição geral	29
3.3	Instrumentação.....	33
3.4	Calibração.....	37
3.5	Dique Experimental.....	41
3.5.1	Composição	41
3.5.2	Processo construtivo.....	42
4	MÉTODOS DE MEDIÇÃO E ANÁLISE DE DADOS	45
4.1	Enquadramento.....	45
4.2	Procedimento experimental.....	45
4.3	Classificação de eventos.....	48
4.4	Reconstrução tridimensional e evolução morfológica da brecha.....	49
4.5	Campos e vetores de velocidade na aproximação à brecha.....	52
4.6	Caracterização do hidrograma efluente da brecha	54
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	59
5.1	Enquadramento.....	59
5.2	Ensaio realizados.....	60
5.3	Análise visual dos ensaios realizados	61
5.4	Análise da evolução morfológica do dique.....	63
5.4.1	Estudo da evolução da brecha	63
5.4.2	Estudo da erosão global do dique.....	65
5.5	Estudo dos campos de velocidade na aproximação à brecha.....	70
5.6	Análise dos hidrogramas efluentes da brecha	72
5.7	Compatibilidade dos métodos de cálculo do caudal efluente da brecha.....	74
5.8	Análise comparativa com outras investigações.....	75
6	CONCLUSÕES	79

6.1	Considerações finais e principais contributos.....	79
6.2	Desenvolvimentos futuros.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - a) Formação natural de um dique fluvial (https://geography-revision.co.uk) b) Transição de um dique natural para um artificial (Knox et al., 2022) c) Dique artificial (https://greendispach.substack.com).....	7
Figura 2.2 - Tipos de diques artificiais (Danka & Zhang, 2015).....	8
Figura 2.3 - Mecanismos de rotura de diques (https://www.nsf.gov/ , Fundação Nacional da Ciência, EUA).....	9
Figura 2.4 - a) Evolução da erosão ao longo do tempo para 3 diferentes teores de água b) Coeficiente de erodibilidade em relação ao teor de água para o mesmo solo (Hanson & Hunt, 2006).....	13
Figura 2.5 - Regime de escoamento hidráulico e zonas de erosão (Powledge et al., 1989).....	14
Figura 2.6 - a) Variação do número de Froude na direção longitudinal b) Variação do número de Froude na direção transversal (Michelazzo, 2014).	16
Figura 2.7 - Variação do número de Froude num canal de rio (Sundt et al., 2022).....	16
Figura 2.8 - a) Número de cheias por país com a localização indicada com um círculo b) Área exposta a cheias por país e acumulação da população exposta entre 2000 - 2015 (Tellman et al., 2021).....	17
Figura 2.9 - a) Rio Mondego e principais afluentes b) Rotura do dique da margem direita do canal principal, junto da Estação Elevatória de Foja em 2001 (Cunha, 2002) c) Rotura do dique da margem direita do canal principal em 2019 em Montemor-o-Velho.....	18
Figura 2.10 - a) Esquema da perda de ligação entre o dique e a parede de corte em "I" b) Abertura junto à rotura do Canal da Avenida de Londres em Nova Orleães (Sills et al., 2008).	19
Figura 2.11 - a) Erosão interna observada no rio Panaro b) Hipótese analisada sobre a estabilidade do talude com um túnel c) Hipótese analisada sobre a estabilidade do talude com uma câmara de abrigo ligada ao túnel.	20

Figura 3.1 - Planta da instalação experimental com indicações do percurso de circulação da água ($\rightarrow$), zonas críticas, descarregadores, localização dos equipamentos e corte AA'.....	31
Figura 3.2 - a) Canal principal sem estrutura redutora vista de montante. b) Canal principal com estrutura redutora vista de montante. c) Canal principal com estrutura redutora vista de jusante.	32
Figura 3.3 - Corte AA' do canal principal para diferentes números de Froude. a) $Fr = 0,1$. b) $Fr = 0,2$. c) $Fr = 0,3$. d) $Fr = 0,4$. (valores em milímetros).	32
Figura 3.4 - Sistema de alimentação. a) Localização dos reservatórios inferior e superior e da conduta de alimentação. b) Sistema de bombagem com instalação em paralelo.....	33
Figura 3.5 - Equipamentos de medição de caudais e de níveis de água. a) Caudalímetro Altometer. b) Sonda Ultrasónica Baumer U500. c) Condicionador de sinal QuantumX MX 840 AZ. d) Placa NI cDAQ - 9172.	34
Figura 3.6 - Esquema de funcionamento das sondas UVP na instalação.	35
Figura 3.7 - Azure Kinect DK. (a) Desenho técnico ilustrativo. (b) Localização relativa dos AK na instalação.	35
Figura 3.8 - (a) Software KinectCloud. (b) AK posicionado na instalação.	36
Figura 3.9 - Posicionamento dos equipamentos de aquisição de imagem (a) Detalhe da câmara GoPro Hero 8; (b) GoPro (círculo laranja), Azure Kinect (círculo azul).	37
Figura 3.10 - Calibração das sondas de nível - Relação entre os dados de tensão e as alturas de água decorrentes do processo de calibração.....	38
Figura 3.11 - Curva de vazão do descarregador retangular.	40
Figura 3.12 - Curva de vazão do descarregador retangular com corte em V.	40
Figura 3.13 - Curva granulométrica do solo dos diques experimentais.	41
Figura 3.14 - Curva de compactação advinda do ensaio Proctor Standard.	42
Figura 3.15 - Procedimento de construção. (a) Pesagem de 50kg de material. (b) Distribuição de material no dique após a adição de água na betoneira eléctrica. (c) Compactação com placa vibratória. (d) Escarificação das camadas. (e) Acréscimo de nova camada. (f) Conclusão das camadas e compactação final. (g) Dique perfilado e nivelado. (h) Abertura do canal piloto.	43
Figura 3.16 - Ensaio da garrafa de areia. (a) Remoção da amostra. (b) Preenchimento com material calibrado. (c) Remoção do material calibrado.	44
Figura 4.1 - Fluxograma do procedimento experimental.	47
Figura 4.2 - Ensaio de rotura de dique por galgamento. (a) Imagem representativa do início de um ensaio. (b) Imagem representativa do final de um ensaio.	48
Figura 4.3 - Posicionamento dos alvos coordenados na instalação experimental. a) Padrões de identificação para cada alvo. b) Alvo em 3 dimensões. c) Identificação da posição dos alvos.	50

Figura 4.4 - Esquema do procedimento de análise da evolução da rotura do dique (morfologia da brecha).	51
Figura 4.5 - Definição da zona de transição para um escoamento 3D (com componentes horizontais e verticais).	52
Figura 4.6 - Escoamento na aproximação à brecha com partículas traçadoras. (a) Planta com identificação da área a ser analisada pelo algoritmo. (b) Detalhe do diagrama Voronoï na área de análise.	53
Figura 4.7 - Ilustração dos vários passos dos Diagramas de Voronoï. (a) Diagrama e estrela Voronoï para um determinado instante. (b) Diagrama e estrela Voronoï para o instante seguinte. (c) Correspondência entre as estrelas Voronoï.	53
Figura 4.8 - Capturas de ecrã do Software CatmanEasy. a) Ligação e leitura correta das sondas ultrassónicas. b) Demonstração dos valores no CatmanEasy antes do início de um ensaio. ...	55
Figura 4.9 - Representação esquemática das variáveis intervenientes na equação do balanço de massas no canal principal. Caudais afluente (Q_{in}), efluente pelo descarregador retangular (Q_{dr}) e efluente da brecha (Q_{br}) e variação de volume no canal principal.	56
Figura 4.10 - Parâmetros necessários à estimativa local do caudal efluente da brecha. Vetores de velocidade, linha de transição do escoamento e área de transição.	57
Figura 5.1 - Evolução morfológica da brecha para os testes realizados. Instantes intermédios, final e eixo de simetria representados a tracejado, traço contínuo e traço - ponto, respetivamente.	64
Figura 5.2 - Forma final da brecha em cada ensaio.	65
Figura 5.3 - Teste 2. Reconstrução 3D do dique erodido em vários instantes (direção do escoamento representada por uma seta azul). Esquerda - Vista em planta (zonas erodidas no intervalo de tempo referido representadas a azul); Direita - Vista em perspetiva do talude de jusante.	66
Figura 5.4 - Teste 3. Reconstrução 3D do dique erodido em vários períodos (direção do escoamento representada por uma seta azul). Vista em planta (zonas erodidas representadas a azul).	67
Figura 5.5 - Teste 3. Reconstrução 3D do dique erodido em vários instantes (direção do escoamento representada por uma seta azul). Vista em perspetiva do talude de jusante.	68
Figura 5.6 - Reconstrução 3D do dique erodido no instante final. Vista em planta (zonas erodidas representadas a azul). a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3; d) Teste 4.	69
Figura 5.7 - Comparação entre a erosão acumulada da brecha e o caudal efluente da brecha para os 4 ensaios.	70
Figura 5.8 - Taxa de erosão e o crescimento da erosão acumulada para os 4 ensaios.	70
Figura 5.9 - Primeiro evento dos ensaios. Vetores de velocidade.	71

Figura 5.10 - Caudais de entrada e saída dos quatro ensaios medidos pelas curvas de vazão dos descarregadores.....	72
Figura 5.11 - Hidrograma de cheias dos quatro ensaios.	73
Figura 5.12 - Estimativa do caudal efluente da brecha obtido pelos três métodos utilizados para os quatro testes.	74
Figura 5.13 - Evolução da brecha. a) $Fr_i = 0,13$ (Rifai, 2018); b) $Fr = 0,14$ (imagem superior) e $Fr = 0,29$ (imagem inferior) (Islam, 2012); c) A montante e jusante para um $Fr_i = 0,022$ (Michelazzo, 2014).....	76
Figura 5.14 - Evolução de vários parâmetros ao longo dos ensaios a) Número de Froude. b) Altura de água no canal. c) Caudal efluente da brecha. Retirado de Rifai, (2018).	76
Figura 5.15 - Resultados de três ensaios com a mesma granulometria (D_{50}) a) Caudal de sólido descarregado; b) Caudal efluente da brecha. Retirado de Bhattarai, (2015).	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos de erosão da brecha consoante o diâmetro do solo (Morris et al., 2009). ...	12
Tabela 2.2 - Investigações sobre a rotura de diques fluviais.	25
Tabela 3.1 - Percentagem de material que passa em cada peneiro.	41
Tabela 5.1 - Dados dos ensaios realizados.	60
Tabela 5.2 - Evolução da erosão do coroamento nos Testes 1, 2, 3 e 4.	61
Tabela 5.3 - Evolução da erosão frontal nos Testes 1, 3 e 4.	62

SÍMBOLOS

Alfabeto Latino

A_{cp}	Área transversal ao escoamento do canal principal	$[m^2]$
c	Velocidade da luz	$[m/s]$
d	Distância	$[m]$
D_{50}	Diâmetro médio do solo	$[mm]$
f	Frequência	$[Hz]$
Fr	Número de Froude	$[-]$
Fr_i	Número de Froude inicial no canal principal	$[-]$
g	Aceleração gravítica	$[m/s^2]$
h_c	Altura crítica	$[m]$
K_d	Coeficiente de erodibilidade	$[m^3N^{-1}s^{-1}]$
l_{cp}	Largura do canal principal	$[m]$
Q	Caudal	$[m^3/s]$
Q_{br}	Caudal efluente da brecha	$[m^3/s]$
Q_{dr}	Caudal efluente do descarregador retangular	$[m^3/s]$
Q_{in}	Caudal inserido no canal principal	$[m^3/s]$
t	Tempo	$[s]$
t_0	Tempo inicial de ensaio	$[s]$
t_f	Tempo final de ensaio	$[s]$
U	Velocidade de escoamento	$[m/s]$

V	Volume	[m ³]
v_m	Velocidade média	[m/s]
w	Teor de água	[%]
w_{ótimo}	Teor de água ótimo dado pelo ensaio Proctor	[%]
y_h	Profundidade hidráulica	[m]

Alfabeto Grego

Ø	Diferença de fase	[rad]
γ_s	Peso volúmico seco	[kN/m ³]
π	Razão entre o perímetro de uma circunferência e o seu diâmetro	[-]

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A crescente preocupação com eventos hidrológicos extremos, impulsionados pelas alterações climáticas tem induzido um maior interesse no estudo da estabilidade e segurança das estruturas de defesa contra cheias. Enquanto as estruturas hidráulicas de proteção costeira têm recebido uma maior atenção devido ao impacto do aumento do nível do mar, os diques fluviais têm ficado em segundo plano nas iniciativas de investigação globais, merecendo ainda um maior aprofundamento. Estes desempenham um papel crucial na mitigação de cheias, protegendo as populações e infraestruturas localizadas nas planícies de cheia, mas estão sujeitos a processos de degradação e fenómenos de cheias que podem, muitas vezes, conduzir à rotura da estrutura, com impactos socioeconómicos severos.

Note-se que as alterações climáticas não só aumentam a frequência e intensidade das precipitações e consequentes cheias, como também influenciam os padrões de escoamento dos rios (Dankers et al., 2014; Mimura, 2013; Tellman et al., 2021), alterando a carga hidráulica a que os diques estão sujeitos, muitas vezes levando ao galgamento da estrutura. Outros fatores, como erosão interna ou falhas geotécnicas, são processos que também podem comprometer a integridade destas estruturas, tornando essencial a compreensão dos mecanismos que levam à sua deterioração e eventual rotura.

Vários eventos de rotura de diques, alguns com consequências catastróficas, evidenciam a necessidade do estudo destas estruturas com vista à capacidade de deteção de situações anómalas, mas também de previsão do comportamento em situação de rotura, com a consequente caracterização da cheia induzida (hidrograma de rotura), permitindo a implementação de medidas de mitigação dos potenciais impactos, garantido assim a segurança das populações no vale a jusante.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é aprofundar o conhecimento sobre a evolução hidro-morfodinâmica da brecha resultante da rotura por galgamento de diques fluviais, com especial interesse na influência do número de Froude do escoamento afluente no canal de aproximação. Para tal, foi desenvolvido um programa experimental que permitiu monitorizar e caracterizar detalhadamente o processo de rotura, tendo como objetivos específicos:

- **Caracterizar a evolução morfológica da brecha** ao longo do processo de rotura, analisando a influência do número de Froude na geometria e na progressão da erosão do dique;
- **Determinar o hidrograma efluente da brecha** e avaliar a relação entre este e as condições hidrodinâmicas do escoamento afluente;
- **Fornecer uma base de dados experimental detalhada**, contribuindo para a calibração e validação de modelos numéricos de previsão da evolução da rotura de um dique fluvial;
- **Comparar diferentes metodologias de medição e análise**, nomeadamente de reconstrução 3D do dique em rotura (em particular, da brecha) através da tecnologia LiDAR e a determinação dos campos de velocidade por *Particle Tracking Velocimetry* (PTV).

Note-se que, este último objetivo foi decorrente de uma necessidade identificada no decurso do trabalho, acabando por ser complementar aos objetivos específicos do estudo. Para estes serem alcançados, foi construída uma instalação experimental no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), onde foram realizados quatro (4) ensaios de rotura por galgamento em diques fluviais homogéneos, garantindo o controlo de variáveis como o caudal afluente, o teor de água, a compactação, a geometria do dique e o seu material.

Através de diferentes métodos de análise foi possível obter resultados que visam não só melhorar o conhecimento sobre os mecanismos de rotura de diques fluviais, mas também ajudar a desenvolver novas abordagens para investigações futuras, fornecer dados para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e aperfeiçoamento de modelos numéricos capazes de prever a evolução da rotura, contribuindo para uma gestão mais eficaz do risco de cheias e para a segurança das infraestruturas e populações localizadas em áreas vulneráveis.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em seis (6) capítulos, organizados de forma a contextualizar o tema, apresentar a metodologia experimental adotada e discutir os resultados obtidos.

O **Capítulo 1** introduz o tema e a sua relevância no contexto atual, destacando a necessidade de compreender os processos de rotura de diques fluviais. Apresenta ainda os objetivos específicos da investigação e descreve a estrutura da dissertação.

O **Capítulo 2** apresenta a fundamentação teórica essencial para o estudo dos diques fluviais, abordando a sua função e características construtivas, os principais mecanismos de rotura, incluindo o galgamento e a erosão interna e os fatores que influenciam a estabilidade destas estruturas. São também analisados exemplos de roturas históricas, tanto a nível nacional como internacional. No final, é feita uma revisão experimental alinhada com as investigações já realizadas sobre o tema, as quais a presente investigação teve como base.

O **Capítulo 3** descreve a instalação experimental utilizada para os ensaios apresentados nesta dissertação, incluindo a sua configuração, os equipamentos de medição e os procedimentos de calibração. Apresenta ainda a metodologia adotada na construção dos diques e as condições de controlo impostas para garantir a reprodutibilidade dos ensaios.

O **Capítulo 4** foca-se nos métodos de medição e análise de dados, incluindo a reconstrução 3D do dique em rotura através de tecnologia *LiDAR*, a determinação dos campos de velocidade na aproximação à brecha com recurso ao *Particle Tracking Velocimetry* (PTV) e o cálculo do caudal efluente da brecha (hidrograma de rotura).

O **Capítulo 5** apresenta e discute os resultados obtidos nos ensaios experimentais, analisando a evolução morfológica da brecha, os padrões de erosão, os hidrogramas efluentes da brecha e os campos de velocidade. Os resultados são comparados com estudos prévios, permitindo validar as metodologias adotadas e compreender melhor os processos envolvidos na rotura de diques.

Por fim, o **Capítulo 6** sintetiza as conclusões retiradas desta tese de mestrado, destacando os principais contributos do estudo, as limitações identificadas e as recomendações para trabalhos futuros.

A estrutura adotada neste documento visa assegurar uma exposição lógica e coerente do estudo, facilitando a compreensão dos métodos e resultados apresentados.

ESTADO DE ARTE

2.1 Enquadramento

Este Capítulo 2 procura estabelecer uma base teórica para o estudo dos diques fluviais, abordado a sua função e características construtivas, comparando os diques artificiais com os naturais e detalhando os tipos de materiais utilizados na sua construção (2.2). Posteriormente, analisam-se os mecanismos de rotura mais comuns, destacando-se o galgamento, a erosão interna e as falhas geotécnicas (2.3) e identificam-se os principais fatores que influenciam a estabilidade destas estruturas, como as propriedades geotécnicas dos materiais e as condições hidráulicas do escoamento (2.4). Em 2.5 são apresentados vários exemplos de roturas históricas de diques, tanto a nível nacional como internacional, ilustrando a gravidade das consequências resultantes da rotura destas estruturas.

Por fim, é realizado um estudo sobre as investigações mais relevantes sobre a rotura de diques fluviais em conjunto com uma análise dos seus resultados (2.6).

2.2 Diques Fluviais

Os diques fluviais são estruturas hidráulicas longitudinais de controlo de cheias que têm como objetivo principal confinar o escoamento ao leito principal do rio, protegendo assim a população e bens localizados nas planícies de inundação.

Habitualmente apresentam uma altura relativamente reduzida quando comparados com as habituais alturas das barragens de aterro. Podem estender-se ao longo de vários quilómetros e, uma vez que são apenas expostos temporariamente a pressões de água elevadas, não necessitam de um núcleo central argiloso na sua disposição transversal sendo maioritariamente construídos a partir de solos homogéneos existentes na zona de construção (Schmocker & Hager, 2009).

2.2.1 Diques artificiais vs. naturais

Os diques podem designar-se a partir da sua forma de construção, nomeadamente, por artificiais, quando construídos por mão de obra humana, ou por naturais, quando se desenvolvem de forma natural a partir de várias cheias que, ao ocorrerem vão acumulando material nas margens dos rios (Figura 2.1). Para além deste fenómeno, os diques naturais podem também ser beneficiados pelo transporte de sedimentos através do vento e pelo crescimento de vegetação nestas zonas. Os diques artificiais são maioritariamente constituídos por material granular que após um processo de consolidação das várias camadas formam um dique com geometria trapezoidal (Rifai, 2018).

O acréscimo da camada de vegetação nos diques aumenta significativamente a resistência mecânica do mesmo através da interligação deste com as raízes sendo que quanto mais antiga for a vegetação mais fortes serão as raízes e, consequentemente, maior será a resistência. A existência de uma camada de vegetação permite também que, caso ocorra o galgamento da estrutura, o escoamento sobre o talude de jusante se dê com menores velocidades, logo com um menor potencial erosivo (Trung, 2014).

Apesar dos diques naturais executarem a sua função de impedir a passagem de água e não necessitarem de um investimento económico prévio para a sua construção, não é possível garantir a estabilidade dos diques originados desta forma, por ser difícil caracterizar o seu estado de conservação assim como a respetiva composição, tornando a sua manutenção praticamente inexequível.

As estruturas de contenção de cheias são essenciais sendo os diques fluviais maioritariamente desenvolvidos pela mão humana. Contrariamente aos diques naturais, os artificiais, embora exijam um investimento económico, apresentam uma segurança estrutural mais fiável pois são dimensionados especificamente para um determinado local considerando os parâmetros geotécnicos e hidráulicos chave, sendo que, permitem também a respetiva manutenção ao longo do tempo.

No entanto, a construção destes diques leva a que o escoamento confinado no leito principal não consiga atingir o leito de cheia, não se conseguindo assim efetuar qualquer amortecimento da cheia e atenuação do caudal de pico. Como muitas vezes, após a construção dos diques, estas zonas são rapidamente urbanizadas, apesar de se reduzir a probabilidade de ocorrência de inundações nos vales a jusante dos diques, caso o nível de água no rio consiga galgar o dique, as consequências da cheia podem ser mais gravosas (Di Baldassarre et al., 2015).

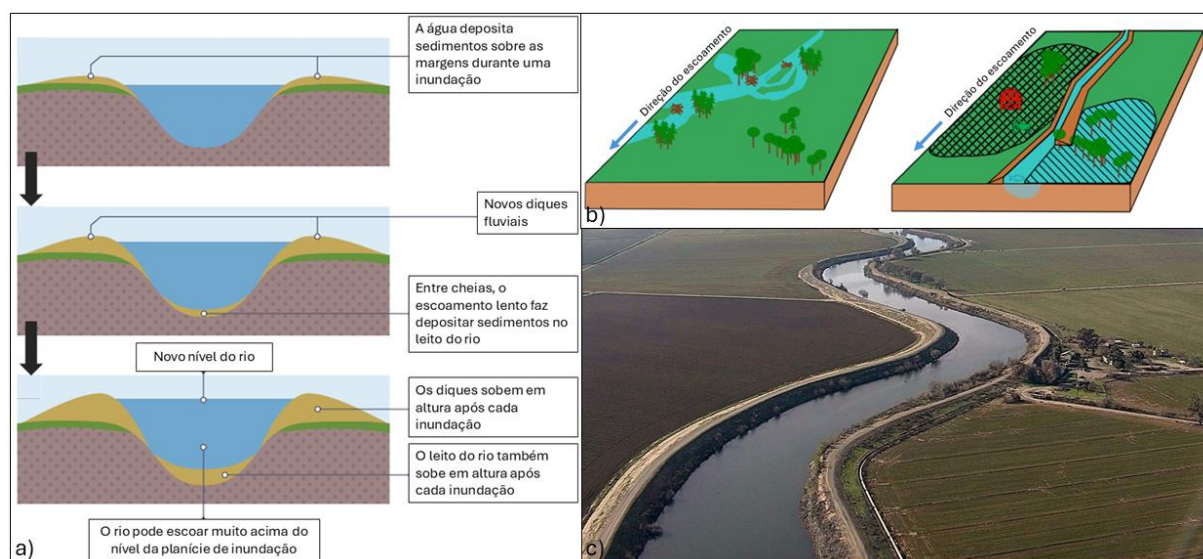


Figura 2.1 - a) Formação natural de um dique fluvial (<https://geography-revision.co.uk>) b) Transição de um dique natural para um artificial (Knox et al., 2022) c) Dique artificial (<https://greendispatch.substack.com>).

2.2.2 Aspetos construtivos de diques artificiais

Como já referido, os diques fluviais são estruturas que se estendem ao longo de vários quilómetros, sendo necessário uma grande quantidade de solo para a sua construção. Neste contexto, por razões económicas, na maioria das vezes estas estruturas são desenvolvidas com os solos existentes no local da obra, sendo apenas em casos muito específicos, quando o solo tem uma quantidade insuficiente de finos, ou na presença de argilas expansivas, é que se recorre a solos provenientes de manchas de empréstimo não localizadas na zona da obra.

Os solos podem ser divididos em não coesivos, coesivos ou com enrocamento, sendo que a secção transversal do dique, para além da respetiva composição interna, são dependentes do tipo de solo utilizado na sua construção. De uma maneira geral, optam-se por diques homogêneos quando o solo disponível na zona da obra apresenta uma fração fina que lhe confere um comportamento mecânico idêntico ao de um solo com uma estrutura coesiva. A adoção de um dique zonado, *i.e.* com um núcleo interno argiloso, fica reservado para as situações em que os solos disponíveis na zona não apresentam qualidade adequada à construção, nomeadamente no que respeita às características de resistência e de permeabilidade após compactação. No fundo, realce-se aqui, que os solos não têm que ser totalmente coesivos, mas devem apresentar uma quantidade de finos suficientes ao seu desempenho estrutural equivalentes aos solos de estrutura coesiva. Caso os solos disponíveis no local não apresentem o desempenho exigido, é comum a adoção de um núcleo central ou uma camada exterior (colocada no talude de montante) argilosa de forma a conferir ao dique uma menor permeabilidade, reduzindo as infiltrações para níveis aceitáveis (Morris et al., 2009).

Assim, as várias soluções de diques existentes podem resumir-se em (Figura 2.2):

- **Diques homogêneos** são construídos em locais onde existe uma quantidade suficiente de solo com material fino cuja impermeabilidade e resistência contra a erosão é alta;
- **Diques zonados** são construídos quando o solo disponível na zona não apresenta a qualidade adequada, neste caso é necessário que se utilize um solo adicional, com características coesivas, sendo este apenas utilizado em zonas específicas do dique, sendo mais comum no núcleo central ou no talude de montante (junto ao rio), para diminuir a percolação através do dique para valores compatíveis com a manutenção da estabilidade do mesmo, estes podem ainda apresentar outras soluções, como o reforço das camadas sobre o dique original por recurso ao acrescento de material homogêneo com características de resistência e de permeabilidade adequadas ou a implementação de um descarregador na zona do núcleo para conduzir a água infiltrada para a fundação;
- **Diques compostos** são estruturas que, para além do corpo principal do dique, incluem elementos adicionais independentes. Estas adições têm como principal objetivo reduzir a largura do dique alcançando a mesma altura que um dique construído apenas com material original. Este tipo de diques é particularmente útil em locais onde a disponibilidade de espaço é limitada ou onde se pretende reforçar a segurança contra cheias sem necessidade de grandes movimentações de terra (Danka & Zhang, 2015).

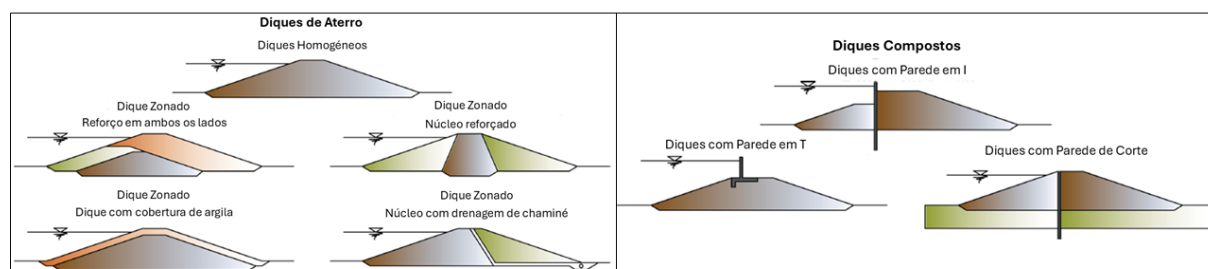


Figura 2.2 - Tipos de diques artificiais (Danka & Zhang, 2015).

2.3 Mecanismos de rotura

Quando um dique sofre deformações estruturais, a sua funcionalidade e respetiva capacidade de proteção contra cheias pode ser posta em causa, sobretudo quando as mesmas comprometam a estrutura do dique, podendo inclusivamente vir a verificar-se um cenário de rotura.

Existem várias causas que podem levar à rotura de um dique fluvial como ilustrado na Figura 2.3, sendo as mais comuns o galgamento devido a cheias, a erosão interna do talude de montante, a atividade sísmica, o deslizamento de terras ou problemas estruturais a nível das fundações e/ou da própria estrutura do dique (Singh, 1996). Quando a rotura acontece é comum o aparecimento de uma brecha na estrutura do dique representada por uma abertura criada pela erosão. A evolução do processo erosivo relaciona-se, entre outras causas, com o tipo de solo adotado, condições do solo implementadas, características construtivas e até com as condições do escoamento no rio. Sendo o objetivo do dique impedir que os caudais de cheia inundem as planícies protegidas em redor, o solo mais indicado deverá apresentar um comportamento mecânico equivalente ao de um solo coesivo, ou seja, não deve ser um solo puramente granular, por forma a fortalecer as ligações entre as partículas do solo após compactação (Morris et al., 2009).

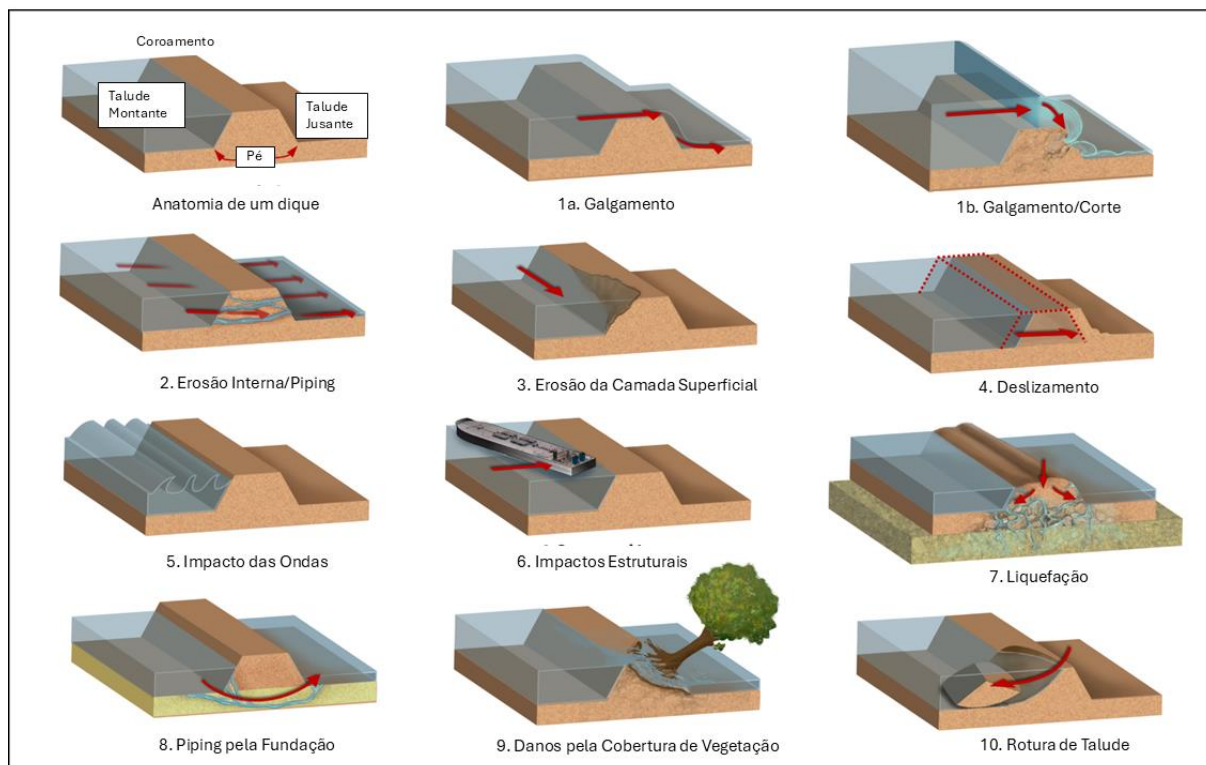


Figura 2.3 - Mecanismos de rotura de diques (<https://www.nsf.gov/>, Fundação Nacional da Ciência, EUA).

2.3.1 Galgamento

Geralmente o galgamento dá-se quando existe um aumento significativo do caudal no canal principal, levando a uma subida do nível de água no rio, que pode ultrapassar a cota do coroamento do dique. Este também pode ser originado pela existência de uma zona rebaixada, isto é, com uma cota do coroamento inferior à de Projeto, eventualmente, devido à ocorrência de um assentamento do terreno subjacente.

O escoamento sobre o dique dá início ao processo de erosão do coroamento quando a tensão de arrastamento excede a capacidade resistente do solo provocando o destacamento de partículas do solo. Estas partículas do solo são posteriormente transportadas pelo talude de jusante criando um canal preferencial, a partir do qual se irá dar a evolução da brecha (Schmocker, 2011).

2.3.2 Erosão interna

Os diques são estruturas de aterro permeáveis através dos quais a água percola com taxas de infiltração muito reduzidas. Caso estas taxas aumentem, originando uma percolação excessiva, pode ocorrer erosão interna ("pipping") do corpo do dique, isto é, podem ocorrer brechas com forma tubular através das quais se dá uma infiltração elevada com consequente arrastamento de partículas, podendo convergir para a rotura da estrutura.

A iniciação destas infiltrações e consequentes brechas podem ser provocadas pelo aumento da carga hidráulica na estrutura do dique, pela atividade animal, por exemplo pelos castores, pelo crescimento não controlado de vegetação nos taludes do dique, pela atividade sísmica ou devido a condições meteorológicas agressivas como o efeito gelo e degelo (Rifai, 2018). No entanto, este efeito pode ser evitado com a criação de um núcleo argiloso na zona central do dique com a adição de filtros de forma a intersectar infiltrações excessivas e conduzi-las para jusante. Para controlar as infiltrações pode ser feita uma drenagem das águas por meios naturais ou artificiais, usualmente com a criação de um dreno de pé de talude junto à base do dique.

A erosão interna por vezes induz à rotura por galgamento. Isto ocorre quando as infiltrações excessivas fazem com que haja um assentamento local na zona onde o solo das camadas inferiores foi arrastado por erosão interna, criando uma zona rebaixada através da qual o caudal escoado no rio consegue galgar o dique.

2.3.3 Falhas geotécnicas

As falhas mais comuns a nível geotécnico ocorrem por deslizamento de terras do talude do dique ou por rotura da fundação. Estas acontecem quando as tensões de corte ultrapassam

a resistência do solo o que leva à ocorrência de escorregamento de uma parte do corpo do dique. As tensões de corte podem ser provocadas por forças horizontais ou verticais tais como a pressão da água, ondas, vento ou mesmo a passagem de automóveis ou algum peso constante na zona do coroamento. A estas forças ainda se podem acrescentar forças dinâmicas provocadas pela atividade sísmica ou trabalhos de máquinas. As tensões resistentes devem-se a características do material como a coesão, o ângulo de atrito e o módulo de elasticidade (Schmocker, 2011).

2.4 Parâmetros influentes no processo de rotura

Existem diversos aspetos a considerar na conceção e consequente construção de um dique fluvial para que este apresente um comportamento estrutural adequado. Para além dos principais, como sejam o tipo de estrutura e as condições hidráulicas a que irá estar submetido (carga e velocidades do escoamento), é também necessário considerar o solo que irá ser utilizado, com a respetiva caracterização geotécnica, da qual irá depender a geometria do dique e as condições do solo a serem impostas durante a construção, nomeadamente grau de compactação e o teor em água (Morris et al., 2009).

2.4.1 Características geotécnicas do dique fluvial

O tipo de estrutura a adotar está diretamente ligado com o solo a utilizar na construção do dique. Como visto no capítulo 2.2.2, caso o solo usado não tenha uma fração fina adequada a ligação entre as partículas do solo não é resistente o suficiente o que leva à erosão progressiva do material da camada superficial, sendo comum, nestes casos a construção de zonas impermeáveis no dique (Morris et al., 2009).

Caso o solo disponível tenha uma fração fina adequada, ou seja, apresente um comportamento mecânico coesivo, não se afigura necessário a adição de elementos de baixa permeabilidade no corpo do dique, permitindo a adoção de um perfil homogêneo. A natureza do solo influencia diretamente o processo de erosão como visto na Tabela 2.1, uma vez que camadas superficiais mais coesivas possuem ligações mais fortes entre as partículas, tornando a erosão mais gradual. Nestes casos, a erosão ocorre por corte no coroamento, originando patamares no talude exterior, nas interfaces correspondentes às zonas de separação entre camadas de compactação.

A erosão num dique construído com enrocamento dá-se de forma semelhante ao que ocorre em diques de solo não coesivo. No entanto, a taxa de erosão depende do diâmetro dos blocos do enrocamento, sendo que quanto maior o enrocamento maior a resistência ao arrastamento.

Para mitigar o impacto da erosão no caso de galgamento, é comum a aplicação de uma camada protetora nos taludes do dique para reduzir a velocidade de escoamento junto à mesma, aumentando simultaneamente a resistência da estrutura.

Tabela 2.1 - Tipos de erosão da brecha consoante o diâmetro do solo (Morris et al., 2009).

Tipo de Erosão	Erosão por corte do coroamento											
	Erosão progressiva da camada superficial											
Fração	Argila	Siltes			Areia			Seixo			Erosão por perda de ligação	
		fino	médio	grosso	fina	média	grossa	fino	médio	grosso	Calhau	Pedra
Dimensões [mm]	<0,002	0,006	0,02	0,06	0,2	0,6	2	6	20	60	150	>150

As características dos solos utilizados na construção dos diques desempenham um papel crucial na ocorrência e evolução do processo erosivo, nomeadamente na formação da brecha de rotura. Tanto o grau de compactação do solo como o teor de água presente durante a construção são fatores determinantes para garantir resistência mecânica e uma permeabilidade adequada.

Cada tipo de material utilizado na construção do dique possui um teor de água ótimo e um peso volúmico seco máximo, conforme o ensaio Proctor Standard, que define as condições ideais para maximizar a resistência da estrutura (ASTM D698-12, 2021). Estas condições resultam na melhor interligação entre as partículas do solo, aumentando a sua resistência.

É importante destacar que pequenas variações no teor de água (w) podem ter um impacto significativo no coeficiente de erosão (K_d) como visto na Figura 2.4. Em particular, quando o solo apresenta um teor de água inferior ao ótimo, ou seja, mais seco, o aumento da suscetibilidade à erosão é muito mais acentuado do que quando o teor de água excede o nível ótimo (Hanson & Hunt, 2006).

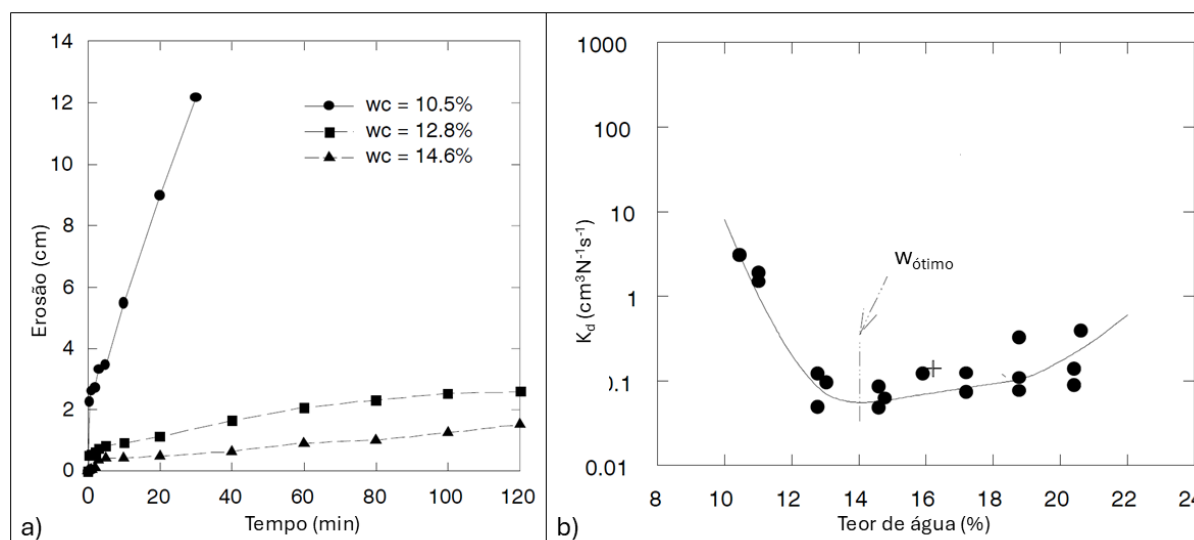


Figura 2.4 - a) Evolução da erosão ao longo do tempo para 3 diferentes teores de água b) Coeficiente de erodibilidade em relação ao teor de água para o mesmo solo (Hanson & Hunt, 2006).

2.4.2 Características hidráulicas - Importância do número de Froude

A carga hidráulica pode influenciar e até provocar a rotura de um dique se ultrapassar o nível para o qual foi dimensionado. Além disso, o tipo de carga também desempenha um papel relevante. Nos diques fluviais, o escoamento é geralmente paralelo à estrutura, e a variação de carga pode ocorrer de duas formas, súbita em caso de cheias onde o caudal não tem tempo para ser escoado para jusante ou de forma gradual durante períodos de seca expondo o dique à abertura de fissuras pela evaporação de água e de precipitação durante um longo período de tempo aumentando o caudal de forma contínua.

Ao contrário das barragens, onde o caudal afluyente ao reservatório desce bruscamente à medida que a brecha aumenta, nos diques fluviais, o caudal mantém-se praticamente constante, a menos que a cheia proveniente de montante diminua (Kakinuma & Shimizu, 2014).

O número de Froude (Fr) é um parâmetro adimensional amplamente utilizado na análise de escoamentos em superfície livre. As condições de escoamento onde este parâmetro é inserido, desempenham um papel fundamental no transporte de sedimentos influenciando diretamente a erosão do dique. Este parâmetro adimensional pode ser calculado através da seguinte equação:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \times y_h}} \quad (2.1)$$

- U - Velocidade do escoamento [m/s];
- g - Aceleração gravítica [m/s²];
- y_h - Profundidade hidráulica [m];

Com base no valor de Fr o escoamento é classificado em três regimes (Quintela, 2002):

- **Lento** ($Fr < 1$): escoamento dominado pela gravidade, com velocidades relativamente reduzidas;
- **Crítico** ($Fr = 1$): transição entre regimes, onde a velocidade do escoamento é igual à velocidade das ondas de superfície;
- **Rápido** ($Fr > 1$): escoamento dominado pela inércia, com velocidades elevadas e maior capacidade erosiva;

Quando ocorrem discontinuidades ou quando a altura de água ultrapassa o coroamento do dique, o escoamento pode ser dividido em três zonas de erosão, diretamente relacionadas com o Fr (Figura 2.5).

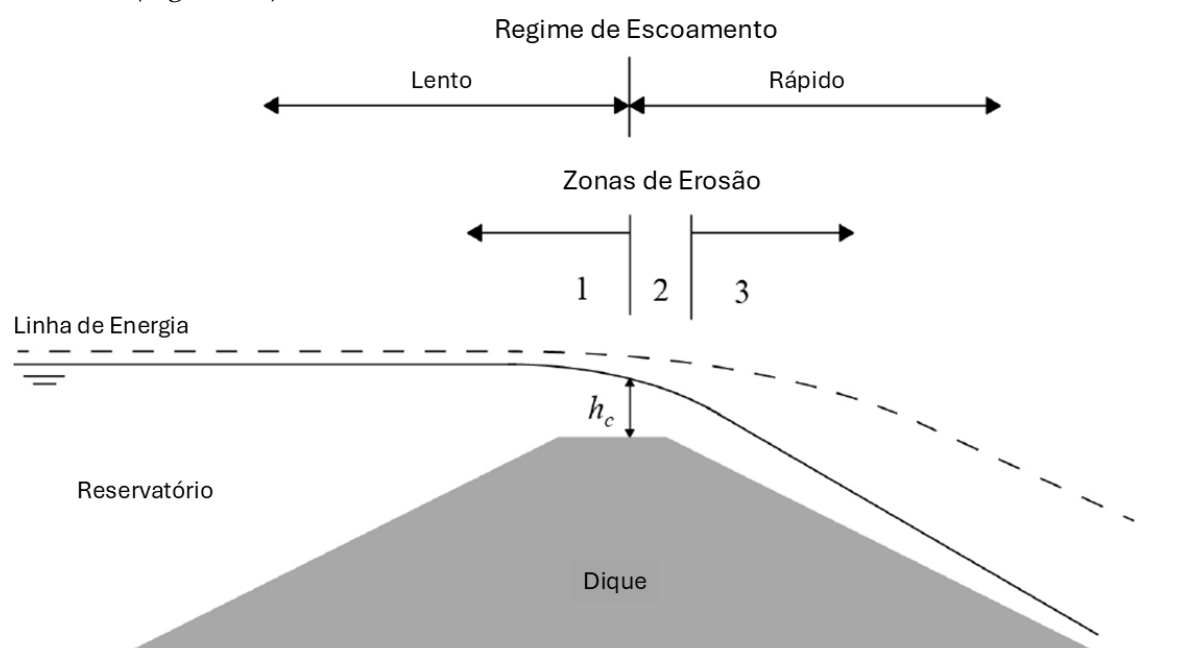


Figura 2.5 - Regime de escoamento hidráulico e zonas de erosão (Powledge et al., 1989).

A **primeira zona de erosão**, caracterizada por um escoamento em regime lento, é dominada pela gravidade, apresentando baixa velocidade e um gradiente de energia reduzido. Nesta zona a profundidade da água é maior e as forças hidráulicas são relativamente fracas, o que limita a erosão no coroamento do dique, a menos que o material seja facilmente erodível.

À medida que a água se aproxima da zona de galgamento, entra na **segunda zona de erosão**, uma região de transição entre o regime lento e o rápido onde ocorrerá o regime crítico. Nesta zona, o escoamento acelera e o gradiente de energia pode tornar-se suficientemente elevado para gerar forças de tração significativas. No entanto, a largura do coroamento impõe uma limitação à magnitude destas forças, tornando a erosão mais intensa no talude de jusante do dique.

Por fim, na **terceira zona de erosão**, o escoamento passa para regime rápido onde a energia cresce à medida que a água desce pelo talude de jusante. A velocidade do escoamento aumenta consideravelmente, acompanhada de um gradiente de energia acentuado, o que gera forças de tração elevadas e intensifica a erosão no talude. Neste cenário, o escoamento pode apresentar um efeito de cascata, originando variações na distribuição de forças de tração e contribuindo para uma erosão irregular e acelerada da estrutura do dique (Powledge et al., 1989).

A partir da equação (2.1) observa-se que o número de Froude varia em função da velocidade do escoamento e das dimensões do canal, ilustrado nas Figura 2.6 e Figura 2.7. No entanto, outros fatores, como a rugosidade do talude de montante, também influenciam o valor do Fr. Superfícies mais rugosas aumentam o atrito entre a água e o material do dique, reduzindo a velocidade do escoamento e, conseqüentemente, o valor de Fr.

A inclinação do talude é outro aspeto determinante visto que taludes mais íngremes tendem a apresentar valores de Fr mais elevados pois minimizam a deposição de sedimentos e impedem o crescimento de vegetação que aumentaria a rugosidade da superfície (Sequeiros, 2012; Sundt et al., 2022).

O número de Froude é amplamente utilizado na modelação hidráulica, nomeadamente no estudo de barragens e canais fluviais. Nestes sistemas, as forças dominantes são as de gravidade e pressão, enquanto que a viscosidade da água e a tensão superficial são geralmente desprezáveis. Esta simplificação permite a aplicação da Semelhança de Froude, essencial para a construção de modelos físicos reduzidos de estruturas hidráulicas (Quintela, 2002).

No âmbito de investigação em modelos físicos, particularmente no caso específico de canais fluviais, o número de Froude pode ser calculado através da equação apresentada em Rifai et al. (2017) que relaciona a geometria do canal com o caudal afluente ao canal:

$$Fr = \frac{l_{cp} \times Q_{in}^2}{A_{cp}^3 \times g} \quad (2.2)$$

- l_{cp} - Largura do canal principal [m];
- Q_{in} - Caudal afluente do canal principal [m³/s];
- A_{cp} - Área transversal ao escoamento do canal principal [m²];
- g - Aceleração gravítica [m/s²];

Embora o escoamento em canais fluviais seja predominantemente lento, os valores de Fr no âmbito deste regime podem variar significativamente (Figuras 2.6 e 2.7). Esta dispersão evidencia a necessidade de analisar o comportamento dos diques à rotura sob diferentes condições de escoamento do canal de montante, *i.e.* diferentes Fr (Sundt et al., 2022).

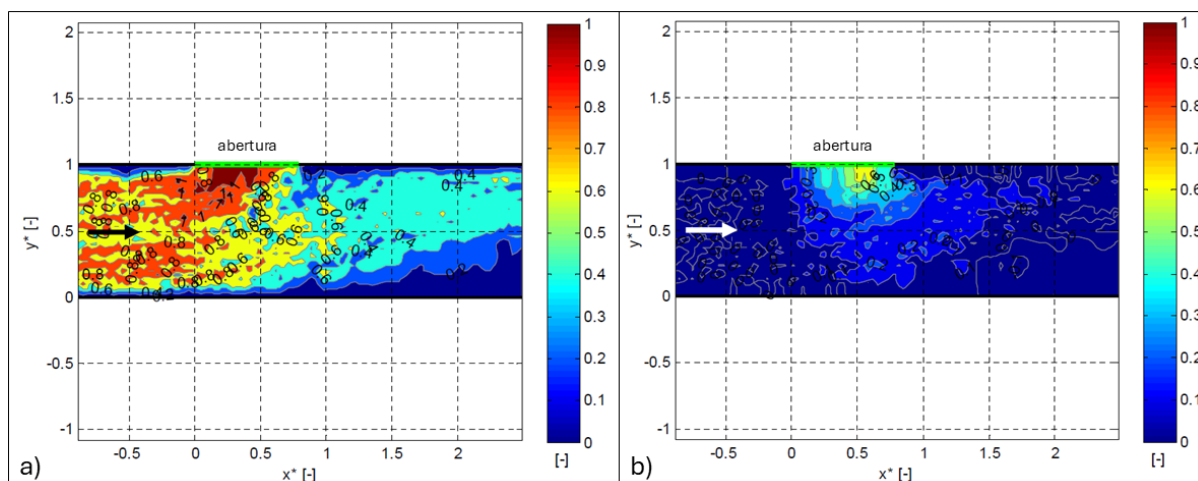


Figura 2.6 - a) Variação do número de Froude na direção longitudinal b) Variação do número de Froude na direção transversal (Michelazzo, 2014).

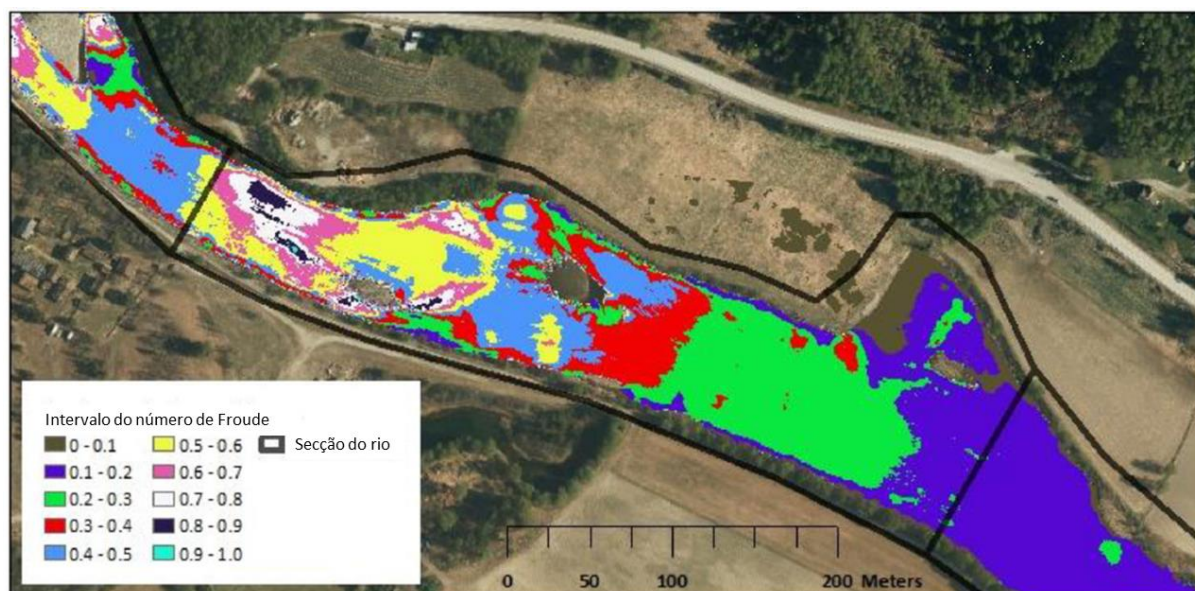


Figura 2.7 - Variação do número de Froude num canal de rio (Sundt et al., 2022).

2.5 Roturas históricas

As cheias são um fenómeno global que ameaça populações e territórios, comprometendo a sua segurança e sustentabilidade. Com o aumento da frequência e intensidade destes eventos, impulsionados pelas alterações climáticas como visto na Figura 2.8, torna-se essencial o seu estudo para melhorar a sua prevenção e mitigação de impactos. Estima-se que, até 2030, cerca de 758 milhões de pessoas estarão expostas a cheias com um período de retorno de 100 anos (Tellman et al., 2021).

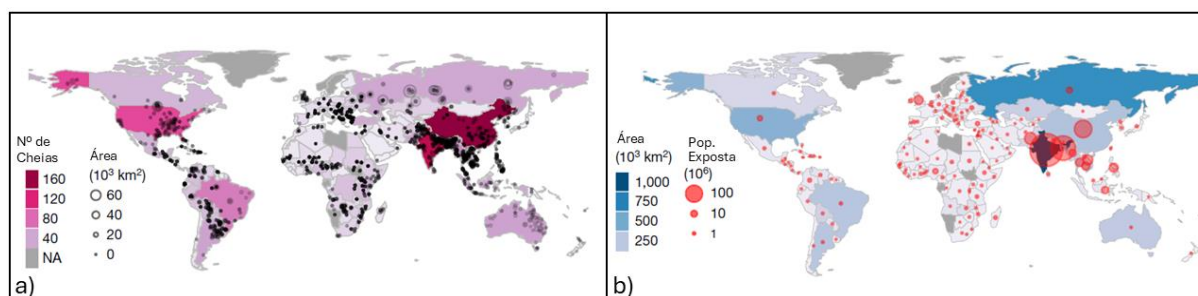


Figura 2.8 - a) Número de cheias por país com a localização indicada com um círculo b) Área exposta a cheias por país e acumulação da população exposta entre 2000 - 2015 (Tellman et al., 2021).

No caso de cheias fluviais, estas podem resultar do aumento do volume de água nos rios devido a chuvas intensas, ao degelo ou a condições inadequadas de drenagem, sendo mais frequente em países em desenvolvimento (Kheloui, 2022).

2.5.1 Nacional (diques do rio Mondego)

As alterações climáticas e o aumento da frequência de eventos extremos de precipitação têm causado impactos significativos em várias regiões do mundo, incluindo Portugal. Em dezembro de 2019, as tempestades Elsa e Fabien provocaram um aumento abrupto do caudal do rio Mondego, levando à rotura de duas estruturas de diques na zona de Montemor-o-Velho, uma delas com uma extensão de 150m (APA, 2020). Este acidente resultou na morte de 2 pessoas, 144 desalojados e mais de 350 deslocados (Jornal Público, 2019).

Outro episódio crítico ocorreu em janeiro de 2001, quando estruturas hidráulicas na região de Coimbra enfrentaram caudais com um período de retorno estimado em cerca de 1000 anos. O evento levou à rotura de 14 diques, incluindo um no troço de Casais, onde o coroamento dos diques foi ultrapassado em 20 cm, resultando no afogamento de animais e no resgate da população por helicóptero. Em Montemor-o-Velho, a rotura dos diques inundou centenas de habitações e destruiu uma ponte. Para conter a inundação em áreas habitadas, foi tomada a decisão de romper um dique num local estratégico por forma a conduzir propositadamente o escoamento para zonas agrícolas menos povoadas (Cunha, 2002).

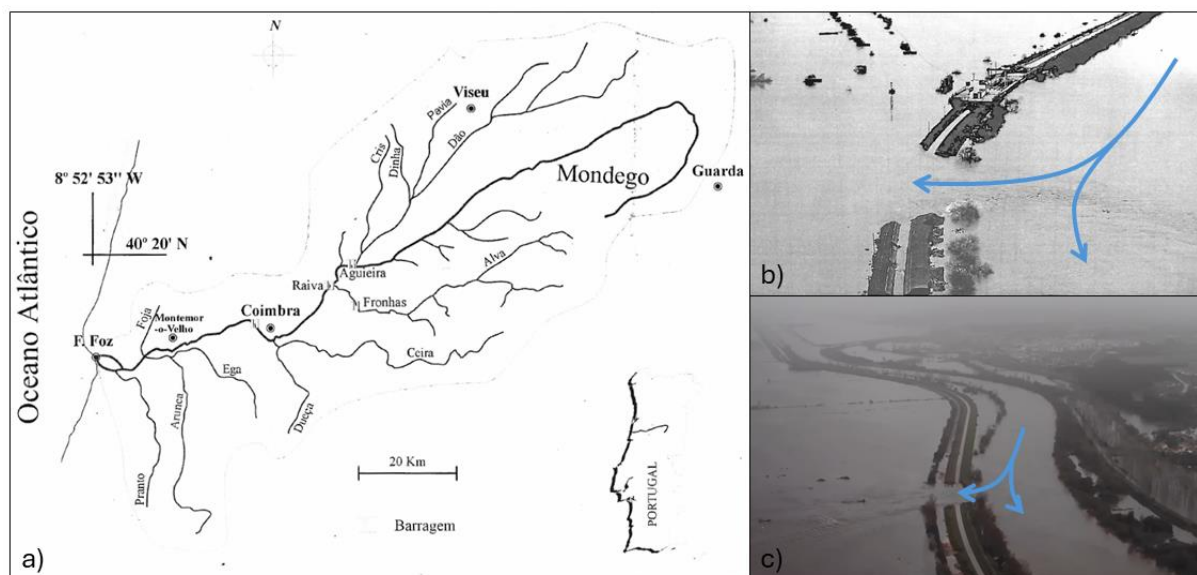


Figura 2.9 - a) Rio Mondego e principais afluentes b) Rotura do dique da margem direita do canal principal, junto da Estação Elevatória de Foja em 2001 (Cunha, 2002) c) Rotura do dique da margem direita do canal principal em 2019 em Montemor-o-Velho.

2.5.2 Internacional

Furacão Katrina (Nova Orleães, EUA, 2005)

O furacão Katrina, que atingiu Nova Orleães em agosto de 2005, foi um dos desastres mais devastadores da história dos Estados Unidos, resultando em 1.118 mortes. A tempestade causou a rotura de diques em aproximadamente 50 locais, permitindo a inundação de vastas áreas urbanas (Daniel & Asce, 2014).

Os diques da região eram de dois tipos: homogêneos e compostos com parede de corte. Ambos apresentavam deficiências de projeto que aumentaram o risco de rotura face ao elevado volume de água e às forças exercidas sobre as estruturas. Os diques homogêneos, construídos com solo granular, e, portanto, sem coesão, sofreram uma erosão mais acelerada, formando múltiplas brechas após o galgamento. Já os diques compostos apresentavam paredes de corte em forma de "I" e "T" invertido. Durante o furacão, ventos de 260 km/h causaram deformações severas nas paredes em "I", levando à perda de ligação estrutural e consequente falha dos diques (Figura 2.10), enquanto as paredes em "T" demonstraram maior resistência às forças transversais (Sills et al., 2008).

Além das falhas de conceção, problemas na execução da obra comprometeram a eficácia dos diques. O coeficiente de segurança adotado foi insuficiente, e a profundidade das paredes de corte em "I" não alcançou as camadas de solo mais resistentes. Além disso, o assentamento do terreno não foi devidamente considerado, resultando numa cota de coroamento inferior à prevista, o que contribuiu para o galgamento das estruturas (Daniel & Asce, 2014).

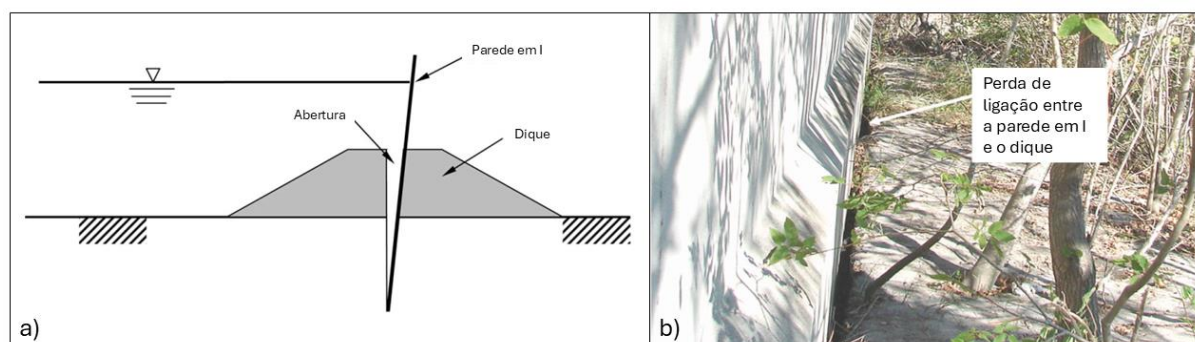


Figura 2.10 - a) Esquema da perda de ligação entre o dique e a parede de corte em "I" b) Abertura junto à rotura do Canal da Avenida de Londres em Nova Orleães (Sills et al., 2008).

Rotura no Rio Secchia (Itália, 2014)

Nem sempre a erosão interna resulta exclusivamente de infiltrações de água, em alguns casos, a atividade animal, como seja a formação de tocas, pode ser um fator crítico. Em janeiro de 2014, a rotura de um dique no Rio Secchia, no norte de Itália, foi associada à formação de tocas, provocando prejuízos estimados em 500 milhões de euros.

Embora não tenha sido possível confirmar que o início do processo de rotura teve origem nas zonas afetadas pela atividade animal, estudos realizados no rio Panaro, próximo do rio Secchia, indicaram que a erosão interna se deveu aos túneis escavados por animais, criando fragilidades no corpo do aterro, isto é, caminhos preferenciais de escoamento por onde se deverá ter iniciado o processo de rotura. No entanto reparações realizadas a tempo no corpo do dique evitaram a sua total rotura. Analogamente infere-se que a rotura do dique no Rio Secchia deverá ter tido a mesma origem (Balistocchi et al., 2021).

A reparação do dique Panaro envolveu o preenchimento das aberturas no talude com solo adequado, no entanto não há registos sobre a compatibilidade desse solo com o material existente. Em alguns casos a extensão dos túneis ultrapassava os 10 metros de comprimento, exigindo a reconstrução total das áreas afetadas. Em certas secções, a dimensão dos túneis inviabilizou a reparação completa, comprometendo a estabilidade da estrutura a longo prazo. Observou-se ainda que, após a recuperação estrutural dos diques, os animais voltaram a escavar tocas nas mesmas zonas, tornando o problema recorrente.

Para o caso do desastre no rio Secchia foram estudadas três possibilidades para a origem da rotura do dique (Orlandini et al., 2015):

1. Infiltração de água: a erosão interna ocorre apenas quando o nível de água atinge a abertura da toca localizada na zona interior do dique;
2. Instabilidade do talude: o Colapso resulta da instabilidade do talude na zona do túnel, hipótese não confirmada por simulações numéricas;
3. Colapso com câmara de abrigo: A presença de uma câmara ligada ao túnel provoca a instabilidade do talude, sendo esta a hipótese mais plausível.

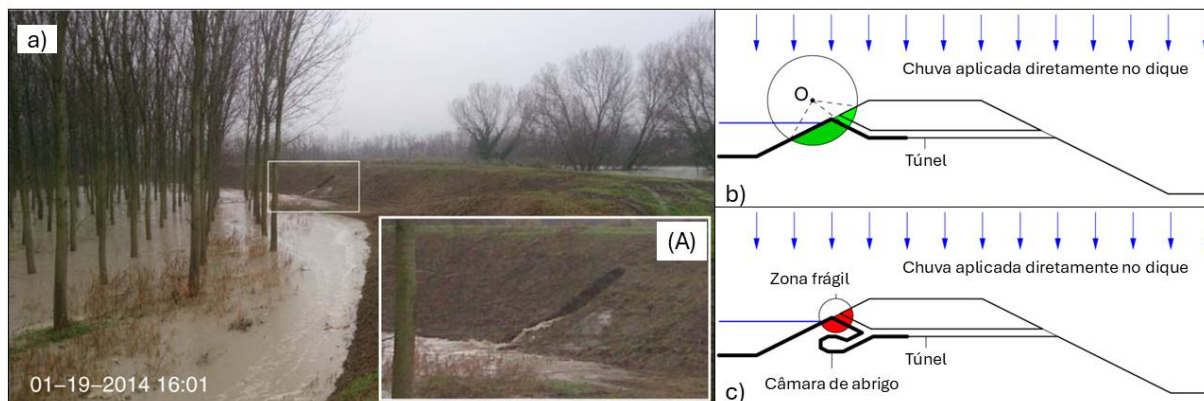


Figura 2.11 - a) Erosão interna observada no rio Panaro b) Hipótese analisada sobre a estabilidade do talude com um túnel c) Hipótese analisada sobre a estabilidade do talude com uma câmara de abrigo ligada ao túnel.

As roturas históricas analisadas evidenciam a vulnerabilidade das estruturas hidráulicas a fatores naturais e estruturais. Seja pela intensidade de fenômenos meteorológicos extremos, como no caso do Katrina, ou pela erosão progressiva causada por atividade animal, como no caso do rio Secchia, a rotura de diques é um fenômeno relativamente frequente e que, devido às suas potenciais consequências devastadoras, merece a devida atenção em termos de estudos de investigação dedicados.

2.6 Revisão de estudos experimentais

De forma a comparar os resultados obtidos nesta dissertação com os de outros estudos, foi realizada uma revisão das principais investigações existentes sobre diques fluviais. A análise dos trabalhos existentes visa confirmar resultados previamente estabelecidos, identificar discrepâncias e contribuir para o avanço do conhecimento sobre aspetos ainda não explorados. Dado que esta dissertação tem um carácter experimental, com foco em modelação física, foi dada maior ênfase aos estudos experimentais, em detrimento dos de modelação numérica.

2.6.1 Tipos de abordagem: empírica, física e numérica

O estudo sobre o comportamento de diques fluviais durante a rotura é fundamental para prevenir ou mitigar os impactos resultantes. Diversas abordagens têm sido utilizadas para compreender os mecanismos de rotura dos diques, incluindo a análise de acidentes passados (conhecimento empírico), a modelação física em laboratório e a modelação numérica.

Uma das abordagens mais comuns baseia-se na análise de eventos históricos de rotura de diques. No entanto, nem sempre existe informação disponível para realizar uma investigação detalhada destes acidentes tais como: o fenómeno que despoletou a rotura, a duração e o caudal máximo descarregado. Grande parte dos dados de base utilizados neste tipo de investigação são adquiridos por meio de relatos de testemunhas que presenciaram o acontecimento, o que pode comprometer a precisão dos dados.

Outra abordagem amplamente utilizada, e adotada nesta dissertação, é a modelação física em escala reduzida, permitindo reproduzir a rotura de um dique em condições controladas. Este tipo de estudos consegue dar uma compreensão detalhada dos processos envolvidos, permitindo isolar e analisar a influência de diferentes parâmetros na rotura do dique. Para garantir a validade dos resultados e a sua transposição para a realidade, é essencial considerar os efeitos de escala sendo habitual recorrer à teoria de semelhança de Froude (Quintela, 2002).

A modelação numérica constitui outra abordagem relevante, permitindo a análise de diversos cenários sem necessidade de realizar campanhas de ensaios extensas e morosas em modelo físico. No entanto, para que seja confiável, requer uma validação com base em dados experimentais ou observacionais. Assim, a modelação numérica depende, pelo menos numa fase inicial, fortemente dos resultados obtidos através das abordagens anteriores.

2.6.2 Avanços na investigação sobre a rotura de diques

Historicamente, os estudos sobre a rotura de estruturas hidráulicas de aterro seguiam uma linha de investigação direcionada para as barragens de aterro. No entanto, recentemente tem-se verificado um crescente interesse pelo estudo da rotura de diques fluviais. Schmocker, (2011) investigou a rotura de diques homogêneos submetidos a escoamentos perpendiculares, variando parâmetros como as dimensões do dique e o caudal afluente (Tabela 2.2). Apesar do escoamento, no caso dos diques, ser paralelo à estrutura, e não perpendicular, como foi ensaiado, os resultados obtidos contribuíram para compreender a relação entre o andamento da superfície do escoamento e a erosão da camada superficial do dique no talude de jusante, bem como para identificar a zona do dique onde ocorre a transição do regime lento para rápido obtendo resultados semelhantes aos de Powledge et al., (1989) visto na Figura 2.5.

Tendo em conta que o escoamento nos diques fluviais é predominantemente paralelo à estrutura, estudos mais recentes, resumidos na Tabela 2.2, têm-se focado na caracterização do complexo processo erosivo, considerando a referida direção do escoamento.

Islam, (2012) validou um modelo numérico baseado em eventos reais nos rios Kariyata e Ikarashi, concluindo que a erosão lateral da brecha é substancialmente superior à erosão vertical e ocorre com uma velocidade inicial elevada, reduzindo-se ao longo do tempo. Estes resultados foram corroborados por ensaios em modelos físicos, sendo mais evidente nos ensaios com valores do número de Froude superiores. Islam, (2012) também analisou a influência da altura da base móvel do canal em relação à bacia de cheia, verificando que quanto maior for essa altura, maior será a erosão na brecha e consequente passagem de caudal. Contudo, a natureza do material da base tem um papel relevante, uma vez que materiais mais grosseiros reduzem a erosão.

Michelazzo, (2014) conduziu dois estudos experimentais distintos. No primeiro, *sem dique e com um descarregador lateral de geometria retangular a simular a brecha*, analisou o comportamento hidrodinâmico do escoamento na aproximação à brecha, testando várias geometrias. No segundo, *com dique e canal piloto sujeito a galgamento*, focou-se no processo de erosão e no cálculo do caudal efluente da brecha. A comparação entre ambos revelou que o caudal efluente depende diretamente da geometria da brecha, funcionando como um descarregador lateral, embora a aplicação destes resultados a diques de escala real (protótipos) permaneça incerta devido a fatores como a granulometria do solo (que foi neste caso uniforme) e a variação do nível da água (que diminuiu ao longo dos ensaios), que podem ter influenciado os resultados. Michelazzo também estudou a evolução geométrica da brecha, observando que o talude de jusante tende a assumir uma configuração final vertical, enquanto o talude de montante assume uma inclinação que é determinada pela direção do escoamento na

aproximação à brecha sofrendo uma erosão inferior à do talude de jusante. Adicionalmente, identificou a zona de transição do regime lento para rápido, que verificou ser sobre o coroamento, tal como nos escoamentos perpendiculares ao aterro (caso das barragens), tendo concluído que a zona de transição é independentemente da direção do escoamento em relação ao aterro.

Kakinuma & Shimizu (2014) destacaram a dificuldade de reproduzir experimentalmente diques com dimensões de protótipos, sobretudo devido ao seu extenso comprimento. Para contornar esta limitação, realizaram ensaios em modelo físico num canal de dimensões equivalentes à escala de protótipo (Canal Chiyoda, Japão), descrevendo o processo de erosão em quatro fases distintas: (1) após o início do galgamento ocorre a erosão do talude de jusante e o aprofundamento da brecha não havendo alargamento nesta fase; (2) seguidamente começa a verificar-se erosão lateral da brecha (de forma simétrica) e do talude de montante levando ao aumento do caudal efluente; (3) a erosão lateral continua, mas apenas do lado jusante da brecha, atingindo-se o valor máximo do caudal efluente (caudal de pico); (4) o caudal estabiliza e torna-se aproximadamente constante até ao final do ensaio reduzindo a taxa de erosão.

Bhattarai, (2015) realizou ensaios numa instalação experimental com uma escala reduzida, observando comportamentos semelhantes no processo de erosão. Concluiu que a erosão é mínima quando o caudal efluente se torna constante e que a relação entre a erosão e o caudal efluente é interdependente. Testou ainda a rotura de diques com fundo erodível, verificando que materiais de menor diâmetro, quando saturados, apresentam menor tensão de corte e maior erodibilidade do leito do rio, facilitando a criação de ressaltos hidráulicos e o aumento da sedimentação a jusante.

Rifai, (2018) analisou a influência de fundos não erodíveis comparados com fundos erodíveis, concluindo que estes últimos, favorecem a dissipação de energia e reduzem a geometria final da brecha. Observou que a erosão lateral para jusante é maior para números de Froude elevados, resultado que pode ser influenciado pela variação do nível da água, tal como já referido por Bhattarai, (2015), Islam, (2012) e Michelazzo, (2014). Também estudou a erosão transversal ao dique e, tal como Schmocker, (2011), verificou que esta se inicia no talude de jusante em torno de um ponto de rotação, que leva aos sedimentos erodidos na zona superior se acumularem na base inferior do dique, sendo a posição deste ponto influenciada pelo tipo de material utilizado.

Wu et al., (2018) examinaram a evolução da rotura de um dique localizado numa curva do canal, e não totalmente paralelo à direção do escoamento, obtendo resultados semelhantes aos de estudos anteriores. Constataram que a composição do material do dique influencia a sua evolução morfológica: diques com solo de menor diâmetro apresentam maior resistência à erosão devido às forças de sucção, prolongando o tempo de rotura (também observado por

Bhattarai, (2015)); diques construídos com materiais mais grosseiros são mais vulneráveis à percolação interna, podendo romper por erosão interna antes mesmo de ocorrer o galgamento inicial; diques construídos com materiais mais finos revelam um comportamento estrutural mais seguro, corroborando as observações de Rifai, (2018).

Os estudos analisados enaltecem a complexidade das interações entre os parâmetros analisados no processo de erosão e rotura de diques demonstrando que, a aplicação destes resultados a diques de escala real requer investigação adicional.

Tabela 2.2 - Investigações sobre a rotura de diques fluviais.

Autores	Dimensões Canal	Dimensões do Dique	Condições de Fronteira	Escoamento	Material	Ensaio
(Schmocker, 2011)	Compr. = 8,0m Larg. = 0,40m Alt. = 0,70m	Alt. = 0,1m a 0,4m Larg. = 0,1m a 0,4m Coroam. = 0,05m a 0,2m Incl. = 1V : 2H; 2,5H; 3H Sistema de drenagem	$Q_{in} = 2$ a 64 l/s	Perpendicular ao dique $Fr =$ Variado	Homogéneo, não coesivo Diâmetro uniforme $D_{50} = 0,31$ a 8,00 mm	68 Ensaio Alterações no Q_{in} , dimensões e material do dique
	Compr. = 9,0m Larg. = 1,0m Alt. = 0,70m	Alt. = 0,2m Larg. = 1,0m Coroam. = 0,1m Incl. = 1V : 3H	Caudal variado	Perpendicular ao dique	Homogéneo, não coesivo Diâmetro uniforme $D_{50} = 1,14$ mm	2 Ensaio Condições iguais
(Islam, 2012)	Compr. = 20m Larg. = 2,2m Alt. = 1m Base erodível	Alt. = 0,15m Compr. = 3,0m Coroam. = 0,05m Incl. = 1V : 2H	$Q_{in} = 5$ a 9,5 l/s Descarregador triangular a jusante do canal	Paralelo ao dique $Fr_1 = 0,12$ até 0,29	Material homogéneo D_{50} (finos) = 0,13mm D_{50} (grosseiro) = 1,00mm	6 Ensaio Alterações no Q_{in} , material do dique e base erodível
(Kakinuma & Shimizu, 2014)	Escala real	Alt. = 3,0m Compr. = 60m a 100m Coroam. = 3m e 6m Incl. = 1V : 2H	$Q_{in} = 35.000$ a 70.000 l/s Comporta a jusante do canal para manter o nível	Paralelo ao dique	Material homogéneo $D_{50} = 5,40$ mm; 4,90mm; 0,20mm; 0,70mm	4 Ensaio Alterações no Q_{in} , dimensões e material do dique
(Michelazzo, 2014)	Base fixa Compr. = 5m Larg. = 0,44m Alt. = 0,30m	Descarregador Lateral representa a brecha no estado final (constante) Larg. = 0 - 0,47m	$Q_{in} = 3$ a 10 l/s Comporta ajustável a jusante do canal principal	Paralelo ao descarregador $Fr = 0,57$	-	26 Ensaio Alterações no Q_{in} , abertura da comporta a jusante, largura do descarregador lateral
	Base erodível Compr. = 30m Larg. = 2m Alt. = 0,8m	Alt. = 0,25m Compr. = 15,0m Coroam. = 0,1m Incl. = 1V : 2H	$Q_{in} = 10$ a 70 l/s Comporta ajustável a jusante do canal principal	Paralelo ao dique $Fr_1 = 0,02$ a 0,23 $Fr = 0,1$ a 0,7 após iniciação da brecha	Homogéneo, não coesivo $D_{50} = 0,84$ mm Base erodível com material igual Compactação manual	12 Ensaio Alterações no Q_{in} , abertura da comporta a jusante e nº de brechas

Tabela 2.2 - Investigações sobre a rotura de diques fluviais (continuação).

Autores	Dimensões Canal	Dimensões do Dique	Condições de Fronteira	Escoamento	Material	Ensaio
(Bhattarai, 2015)	Compr. = 8m Larg. = 0,30m	Alt. = 0,15m Compr. = 0,3m Coroam. = 0,075m Incl. = 1V : 2,5H (Montante) Incl. = 1V : 2H (Jusante)	$Q_{in} = 7,89 \text{ l/s}$ Comporta ajustável a jusante do canal principal	Paralelo ao dique com descontinuidade	Homogéneo $D_{50} = 0,1$ até 0,479 mm Placa de compactação e cilindro	12 Ensaio Alterações no diâmetro do material
	Base erodível ou base fixa Compr. = 4m Larg. = 0,30m	Alt. = 0,15m Compr. = 1,0m Coroam. = 0,075m Incl. = 1V : 2H	$Q_{in} = 10 \text{ l/s}$ Comporta ajustável a jusante do canal principal	Paralelo ao dique	Homogéneo $D_{50} = 0,089$ até 0,314 mm Placa de compactação e cilindro	21 Ensaio Alterações no diâmetro do material e no tipo de base
(Rifai, 2018)	Modelo Ulg Base fixa Compr. = 10m Larg. = 1m	Alt. = 0,30m Compr. = 3,0m Coroam. = 0,1m Incl. = 1V : 2H Com sistema de drenagem	$Q_{in} = 20$ a 57 l/s Testados 3 sistemas: Descarregador perfurado; Descarregador retangular; Comporta regularizável;	Paralelo ao dique $Fr_1 = 0,066$ até 0,189	Homogéneo, não coesivo $D_{50} = 1\text{mm}$ e 1,67mm Material reutilizado Compactado manualmente	30 Ensaio Alterações no Q_{in} , condição de fronteira a jusante do canal principal, confinamento da bacia de cheia, material do dique
	Modelo EDF Base fixa e erodível Compr. = 15,5m Larg. = 2,25m (alterada)	Alt. = 0,30m Compr. = 7,0m Coroam. = 0,1m Incl. = 1V : 2H Com sistema de drenagem	$Q_{in} = 38$ a 160 l/s Descarregador perfurado	Paralelo ao dique $Fr_1 = 0,102$ até 0,184	Homogéneo, não coesivo $D_{50} = 0,8\text{mm}$ até 1,0mm	24 Ensaio Alterações no Q_{in} , material do dique, dimensões do canal principal e base erodível
(Wu et al., 2018)	Formato em "U" Compr. = 50m Larg. = 1,20m Alt. = 0,6m	Alt. = 0,18m ou 0,15m Compr. = 13,0m Coroam. = 0,10m ou 0,16m Incl. = 1V : 1H	$Q_{in} = 7$ a 29 l/s Comporta ajustável a jusante do canal principal	Paralelo em curva	Homogéneo $D_{50} = 0,032$ até 0,62 mm Compactação com cilindro	12 Ensaio Alterações no Q_{in} , dimensões e material do dique

2.6.3 Importância da continuidade da investigação sobre rotura de diques

A investigação sobre rotura de diques fluviais desempenha um papel essencial na mitigação de cheias e no desenvolvimento de planos de contingência para a proteção de populações e infraestruturas (Chinnarasri et al., 2003).

Modelos experimentais em escala reduzida têm-se revelado fundamentais para a engenharia hidráulica, permitindo avaliar a segurança estrutural de diques existentes e projetar novas estruturas de defesa (Ebrahimi et al., 2024). A modelação experimental permite avaliar os vários parâmetros que influenciam a evolução da rotura, como sejam a velocidade e profundidade do escoamento de aproximação, o caudal afluente, o tempo até à rotura, entre outros (Michelazzo et al., 2018). Assim, permite compreender os complexos processos físicos envolvidos na rotura de uma estrutura erodível, contribuindo para calibrar/validar ferramentas de modelação numérica com capacidade de estimar a evolução do processo de rotura e consequente hidrograma efluente.

O projeto de investigação no qual esta dissertação está inserida contribui para o avanço do conhecimento sobre rotura de diques sob condições que simulam a manutenção do nível de água no canal principal durante a totalidade dos ensaios, conforme se espera acontecer na realidade num caso de cheias. Adicionalmente, também estuda a influência de variáveis como o tipo de material, o teor de água e a velocidade do escoamento de aproximação, traduzida pelo número de Froude.

Em resumo, os estudos de investigação dedicada são fundamentais para melhorar o conhecimento teórico e prático sobre a rotura de diques, contribuindo para a redução dos riscos e para a segurança das populações expostas a este tipo de eventos.

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

3.1 Enquadramento

Neste capítulo apresenta-se a instalação que deu lugar ao programa de ensaios realizados no âmbito do presente trabalho de mestrado. Localizada no pavilhão de hidráulica fluvial do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), foi desenvolvida para estudar a rotura de diques fluviais, tendo resultado de várias adaptações implementadas na instalação anterior, destinada a estudar a rotura de barragens de aterro.

3.2 Descrição geral

A instalação utilizada nos ensaios, apresentada na Figura 3.1, é composta por dois reservatórios localizados a cotas distintas, um inferior e outro superior, interligados por um conjunto de condutas e caleiras que permitem a circulação da água em circuito fechado. O sistema inclui ainda duas bombas e diversos equipamentos eletrónicos descritos posteriormente de forma detalhada.

O percurso da água no circuito fechado processa-se da seguinte forma: (i) a água armazenada no reservatório inferior é bombada para o reservatório superior; (ii) de seguida, é escoada por gravidade através de uma conduta de 350 mm de diâmetro até à entrada do canal principal; (iii) após percorrer o canal, a água pode ultrapassar o dique por galgamento (escoamento lateral) ou seguir para jusante (escoamento frontal); (iv) o escoamento que galga o dique segue para uma bacia de retenção de sedimentos, localizada a jusante do dique, e na qual existe um descarregador retangular com um corte em V, enquanto o escoamento que segue para jusante do dique, no canal principal, atravessa uma comporta de seccionamento, escoando-se posteriormente através de um descarregador retangular; (v) finalmente, após

passar pelos descarregadores, a água regressa ao reservatório inferior através de um sistema de caleiras, concluindo o ciclo.

Na entrada do canal principal existe uma estrutura de tijolos furados, cuja função é estabilizar e uniformizar o escoamento. O canal principal, concebido para simular um curso de água natural, possui de 1,40m de largura e 19,15m de comprimento, com o dique experimental posicionado a cerca de 9,10 m da entrada. A montante e jusante do dique existem paramentos fixos com inclinação de 1:1,5, garantindo a continuidade da estrutura do dique e reproduzindo condições reais de escoamento.

O dique é implantado paralelamente ao escoamento no canal principal e pode atingir 0,50m de altura e 2,00m de comprimento, ter um coroamento de 0,10m e taludes inclinados a 1:1,5.

Para regular o nível de água no canal principal e evitar o galgamento do dique, foi instalada uma comporta de regulação automática a jusante do dique. O caudal que passa nesta comporta escoar-se para uma bacia com 0,98m de largura que dispõe no seu final de um descarregador retangular que permite estimar o caudal efluente pela secção de jusante do canal principal. A água que atravessa o canal piloto e o material erodido por ela passam por uma planície de inundação à mesma cota do dique experimental e são ambos levados para uma bacia a uma cota inferior de dimensões de 4,50m de largura e 2,25m de comprimento, com o objetivo de assentar o nível da água e posteriormente escoá-la para um descarregador retangular com um corte em V com a mesma intenção de calcular o caudal de saída. Esta bacia possui também um filtro que evita que o material erodido do dique seja transportado para jusante e entre no sistema de recirculação (Jónatas et al., 2023).

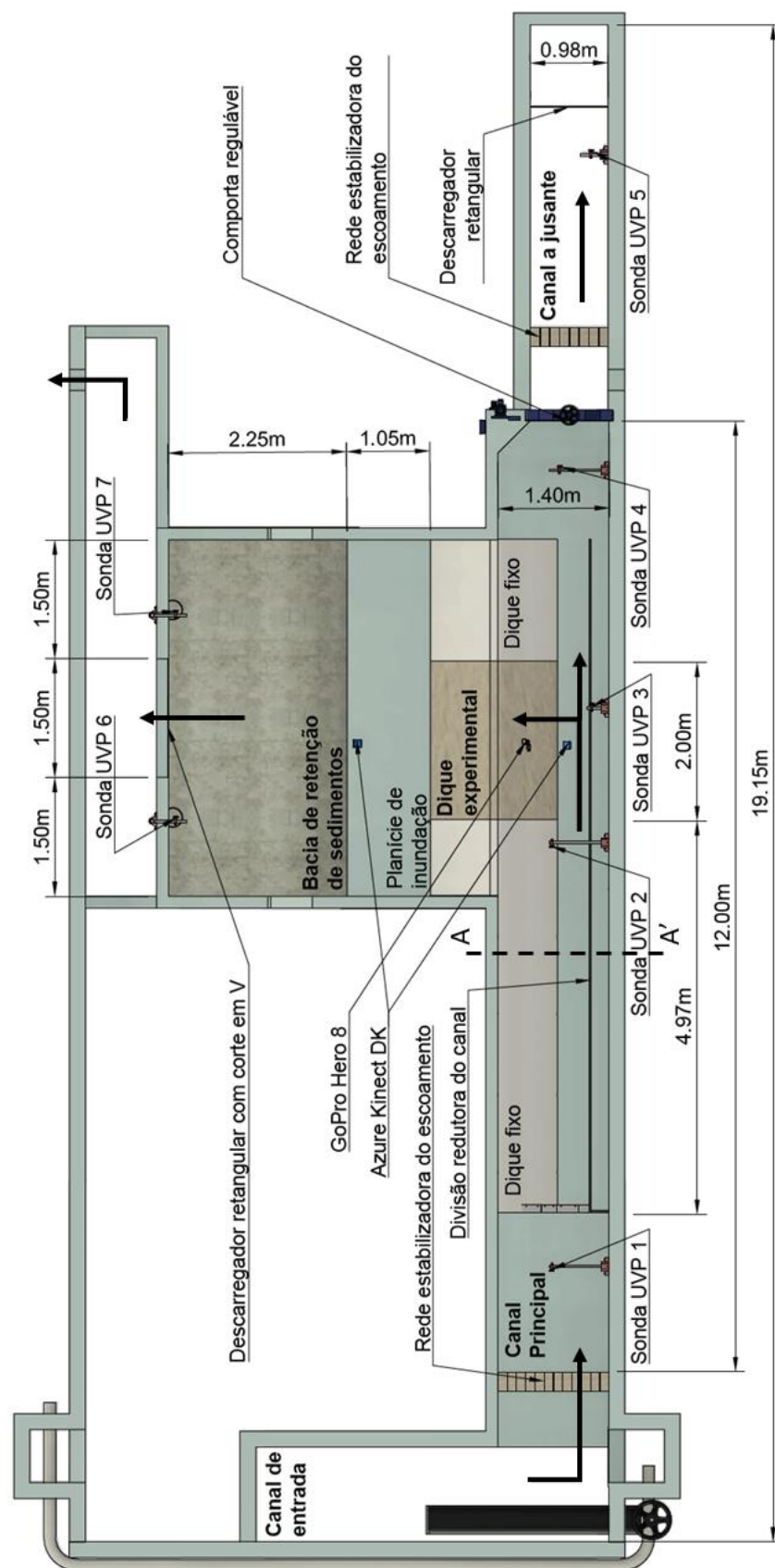


Figura 3.1 - Planta da instalação experimental com indicações do percurso de circulação da água (→), zonas críticas, descarregadores, localização dos equipamentos e corte AA'.

Como um dos objetivos do estudo foi analisar a rotura dos diques sob diferentes condições de escoamento, isto é, considerando velocidades distintas no canal de aproximação, ou seja, ajustando o número de Fr, desenvolveu-se uma estrutura que permitisse variar a largura do canal e obter os valores de Fr necessários para cada ensaio. Esta estrutura encontra-se representada na Figura 3.2.

Como tal, realizaram-se quatro ensaios: um com um dique de 0,50 m de altura ($Fr = 0,1$) e três com diques de 0,30 m de altura ($Fr = 0,2, 0,3$ e $0,4$), variando a largura do canal conforme ilustrado na Figura 3.3.

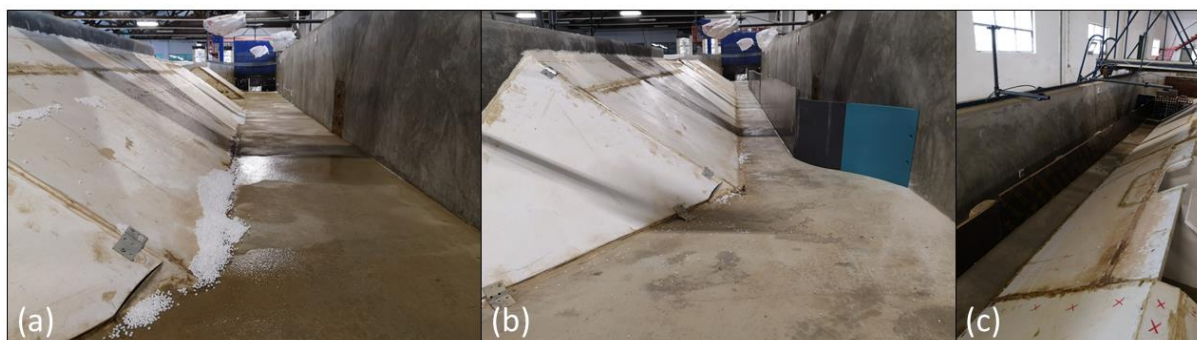


Figura 3.2 - a) Canal principal sem estrutura redutora vista de montante. b) Canal principal com estrutura redutora vista de montante. c) Canal principal com estrutura redutora vista de jusante.

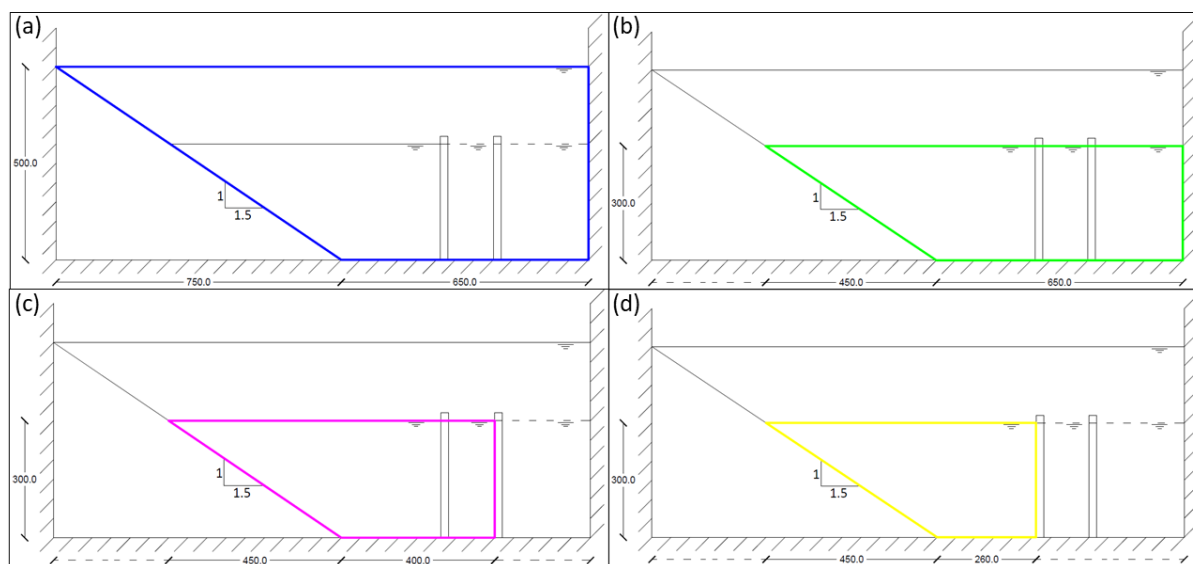


Figura 3.3 - Corte AA' do canal principal para diferentes números de Froude. a) $Fr = 0,1$. b) $Fr = 0,2$. c) $Fr = 0,3$. d) $Fr = 0,4$. (valores em milímetros).

3.3 Instrumentação

A monitorização dos níveis da água, dos caudais, afluente ao canal principal e efluentes do canal principal e do dique, e a evolução morfológica da brecha durante o processo de rotura, foi realizada por recurso a diversos equipamentos.

Antes dos ensaios é necessário garantir que ambos os reservatórios se encontram cheios (Figura 3.4, a). O reservatório inferior fornece água ao superior através de um sistema de bombagem em paralelo, com capacidade máxima de 200 l/s (Figura 3.4, b) e a alimentação da instalação faz-se por gravidade a partir deste último, através de uma conduta com 350 mm de diâmetro (Figura 3.4, a).



Figura 3.4 - Sistema de alimentação. a) Localização dos reservatórios inferior e superior e da conduta de alimentação. b) Sistema de bombagem com instalação em paralelo.

A medição do caudal de entrada é realizada manualmente com um caudalímetro eletrónico Altometer SC 100 AS de 220V da Krohne (Figura 3.5, a). A monitorização dos níveis de água nos pontos críticos, nomeadamente no canal principal, na bacia de retenção de sedimentos e a jusante da comporta é efetuada por sondas ultrasónicas (UVP) U500.DA0 da Baumer (Figura 3.5, b) com um intervalo de captação entre os 100mm e os 1000mm (Baumer, 2018). Quer o caudalímetro quer as sondas UVP são alimentados por uma caixa de junção GEWISS GW 44 209 que está ligada à corrente elétrica do edifício. Os sinais emitidos pelas sondas são amplificados com recurso ao condicionador de sinal QuantumX MX 840 (Figura 3.5, c) e através de uma placa da National Instruments - cDAQ-9172 (Figura 3.5, d). Os valores são captados em forma de tensão elétrica (Volts) sendo posteriormente convertidos em alturas de coluna de água (cm) após calibração.



Figura 3.5 - Equipamentos de medição de caudais e de níveis de água. a) Caudalímetro Altometer. b) Sonda Ultrasónica Baumer U500. c) Condicionador de sinal QuantumX MX 840 AZ. d) Placa NI cDAQ - 9172.

Na Figura 3.6 ilustra-se o esquema de funcionamento das sondas no interior da instalação, isto é, demonstra como as mesmas são alimentadas e como o sinal adquirido é transmitido: i) o condicionador de sinal QuantumX recebe o sinal das sondas S2, S3, S5, S6 e S7; ii) o software Catman Easy permite estimar os caudais de entrada e saída da instalação; iii) a placa da National Instruments recebe o sinal das sondas S1 e S4 (Figura 3.1) que se encontram, respetivamente, no início e no fim do canal principal, junto à comporta de saída; iv) a regulação da comporta de jusante é realizada de forma automática com base no registos das sondas S1 e S4, por forma a manter constante o nível de água no canal.

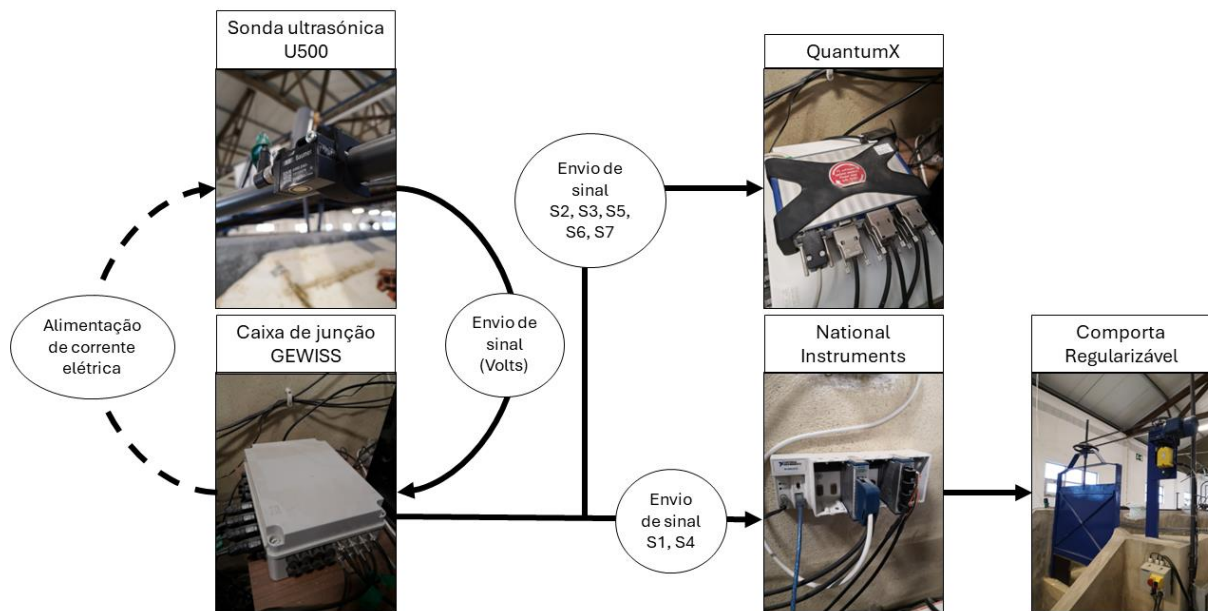


Figura 3.6 - Esquema de funcionamento das sondas UVP na instalação.

Para analisar a evolução morfológica da brecha na zona do dique utilizaram-se dois dispositivos Azure Kinect DK (Microsoft) posicionados na direção de ambos os taludes do dique, montante e jusante (Figura 3.7). Estes dispositivos contêm uma câmera RGB e uma câmera de profundidade, ambas com uma taxa de aquisição máxima de 30 fps, um emissor de infravermelhos, um giroscópio e um conjunto de 7 microfones (Microsoft, 2022).

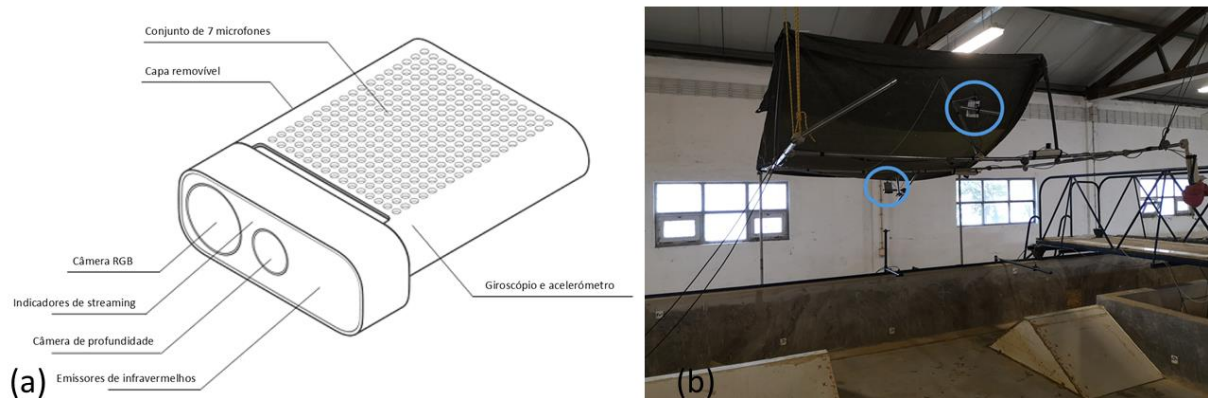


Figura 3.7 - Azure Kinect DK. (a) Desenho técnico ilustrativo. (b) Localização relativa dos AK na instalação.

A câmera de profundidade funciona com a tecnologia Time-of-Flight para determinar a distância entre dois pontos, este princípio funciona com o tempo que a luz infravermelha emitida pelo sensor leva a chegar a um ponto específico e o tempo de volta ao sensor (Kim & Kim, 2015).

$$d = \frac{c \times t}{2} \quad (3.1)$$

Esta equação é dividida por dois uma vez que a distância a ser calculada é a de ida e volta ao sensor. Como o sinal é captado em comprimento de onda e a diferença de fase medida é $\phi = 2\pi ft$, o tempo pode ser substituído na equação (3.1) obtendo a equação (3.2) (Horaud et al., 2016).

$$d = \frac{c}{4 \times \pi \times f} \times \phi = \frac{c}{4 \times \pi \times f} \times \arctan\left(\frac{C_3 - C_1}{C_0 - C_1}\right) \quad (3.2)$$

Assim, usando o software KinectCloud (Figura 3.8) para relacionar as imagens captadas com cada Azure Kinect DK e com base em pontos previamente referenciados que são visualizados por ambos os equipamentos, é possível georeferenciar as várias imagens e construir imagens únicas da totalidade do dique, e consequentemente gerar modelos tridimensionais a partir das nuvens de pontos.

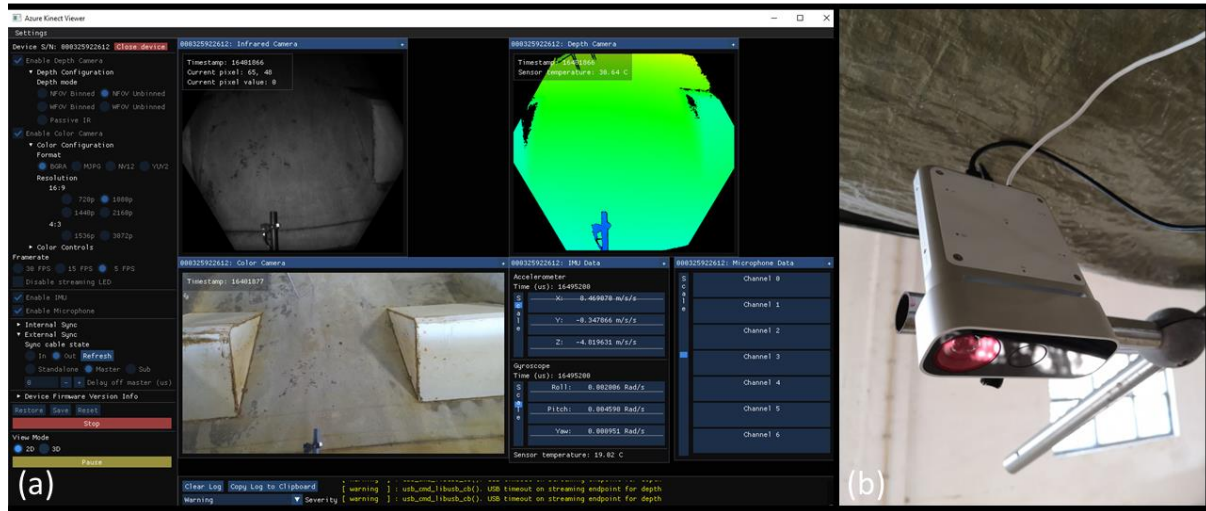


Figura 3.8 - (a) Software KinectCloud. (b) AK posicionado na instalação.

Também se instalaram várias câmaras para registo visual do ensaio, incluindo uma câmara frontal orientada para o talude seco do dique (jusante), uma câmara lateral focada na brecha e uma Camara GoPro Hero 8 (Figura 3.9), capaz de gravar a 240 fps em resolução 1080p, permitindo a análise em câmara lenta da transição do escoamento. Esta última foi colocada de topo, perpendicularmente ao plano do coroamento do dique, com o campo de visão centrado no escoamento de aproximação, por forma a captar os deslocamentos das partículas traçadoras (partículas de poliestireno com 3mm de diâmetro aproximadamente) e com base na aplicação de um algoritmo de *Particle Tracking Velocimetry* (PTV), poder determinar a velocimetria na zona de transição do escoamento. A quantidade de vídeos e imagens captadas durante os ensaios permitem identificar os momentos de maior relevância na evolução do processo de rotura. A disposição dos equipamentos que compõem o layout experimental é ilustrada na Figura 3.1.

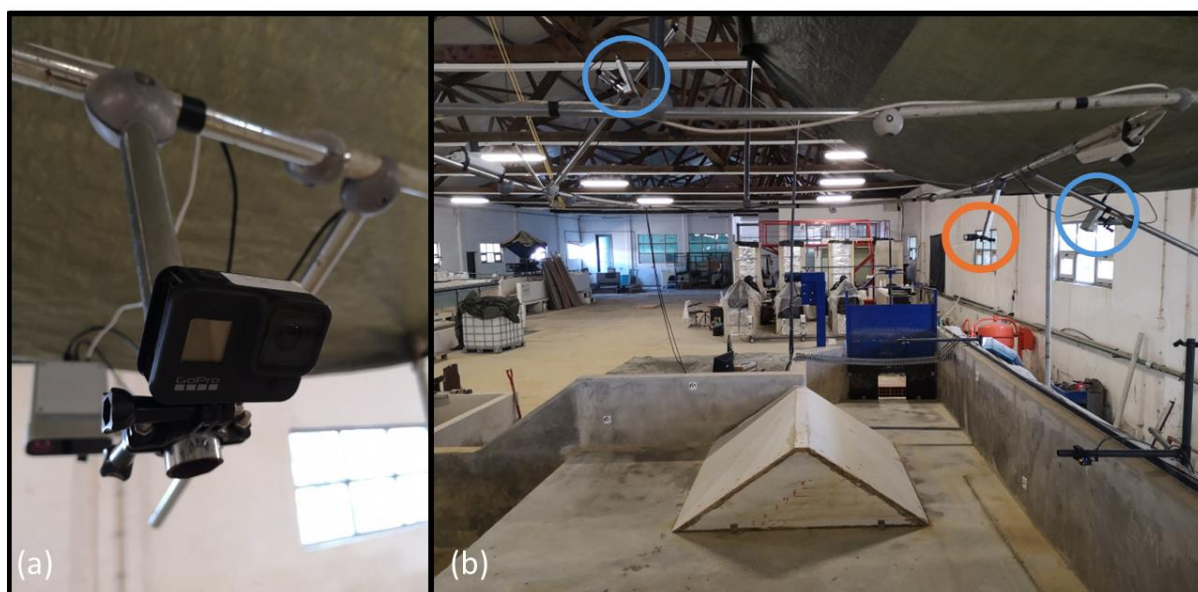


Figura 3.9 - Posicionamento dos equipamentos de aquisição de imagem (a) Detalhe da câmera GoPro Hero 8; (b) GoPro (círculo laranja), Azure Kinect (círculo azul).

3.4 Calibração

Para a obtenção dos dados das sondas ultrassónicas em centímetros foi necessário proceder à sua calibração, uma vez que estas fornecem medições em tensão elétrica (Volts).

Para converter as unidades, registaram-se os valores em Volts de cada sonda a diferentes alturas e mediram-se as respetivas alturas de coluna de água em centímetros, recorrendo a uma régua de hidrómetro de ponta direita para garantir maior precisão. Relacionando estas alturas com um valor constante que representa a altura inicial sem água, consegue-se obter uma equação linear que correlaciona os dados em Volts com as diferentes alturas de água, como ilustrado na Figura 3.10.

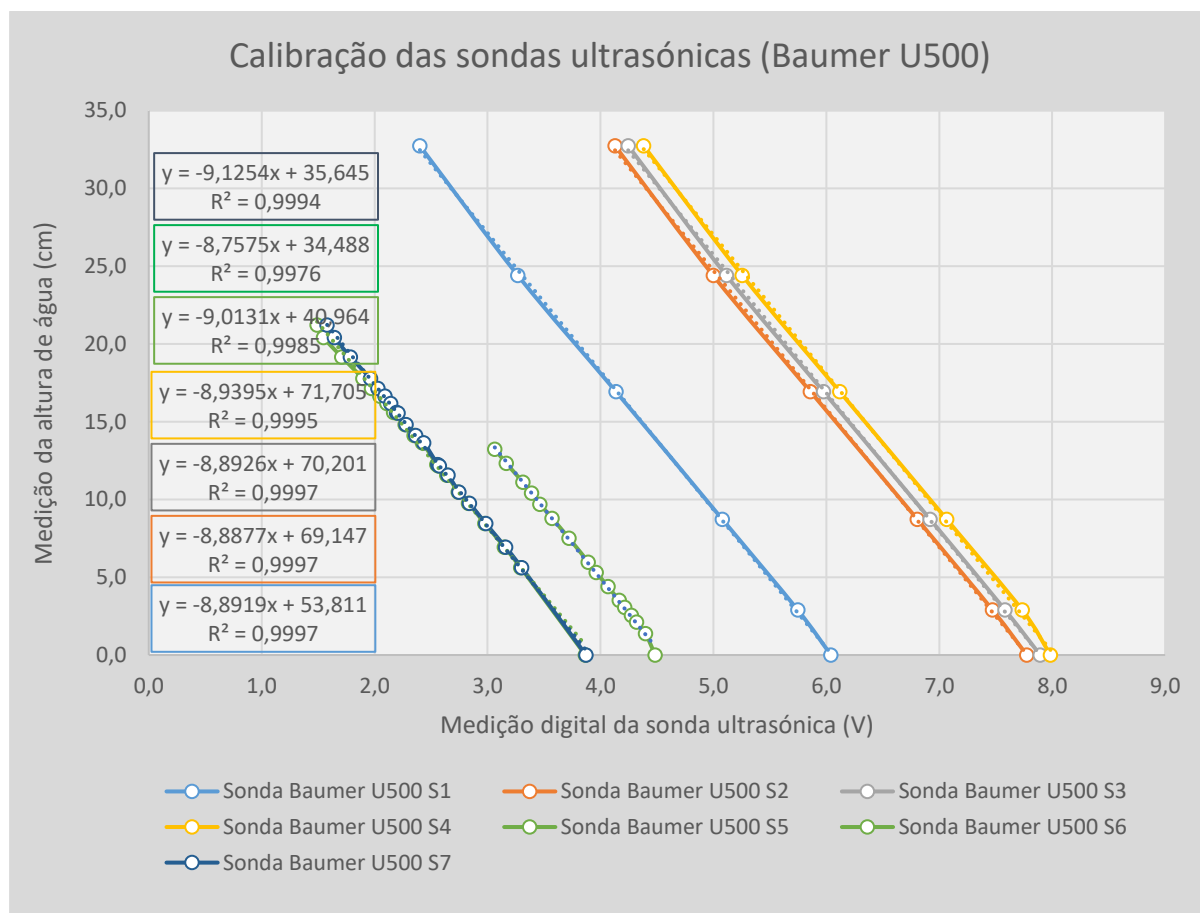


Figura 3.10 - Calibração das sondas de nível - Relação entre os dados de tensão e as alturas de água decorrentes do processo de calibração.

Para determinar os caudais efluentes dos dois descarregadores presentes na instalação, foi necessária uma segunda calibração, relacionando o caudal afluente registado no caudalímetro com o nível das sondas (já convertido em centímetros) à saída dos descarregadores. Os pontos de referência para medir as alturas de coluna de água foram os seguintes: 1) a bacia a jusante do canal principal, no caso do descarregador retangular; 2) a bacia de retenção de sedimentos, no caso do descarregador em V; ambas cheias até ao ponto em que os descarregadores iniciam a respetiva descarga, ou seja, até à respetiva crista.

Cada descarregador foi calibrado individualmente. No caso do descarregador retangular a jusante do canal principal foi necessário isolar a abertura para a construção do dique e manter o nível de água no canal principal com o auxílio da comporta regulável. Para o descarregador retangular com um corte em V, a comporta regulável foi completamente fechada, garantindo que a única saída de água na instalação fosse pelo descarregador pretendido. Neste último caso, utilizaram-se duas sondas para aumentar a precisão na medição da altura de água na bacia de retenção de sedimentos. Como nesta bacia o crescimento da curva de vazão baseada nos dados de ambas as sondas era semelhante,

utilizou-se a média dos valores obtidos, resultando na equação da curva de vazão do descarregador retangular com corte em V. Para determinar as curvas de vazão foi ainda considerado um erro de aproximadamente 5 l/s do caudalímetro e foi necessário ajustar o início das equações polinomiais de segundo grau para garantir que o ponto de origem correspondesse ao início do escoamento. Assim, foi possível obter os caudais efluentes dos descarregadores a partir das curvas de vazão de cada descarregador (Figura 3.11 e Figura 3.12).

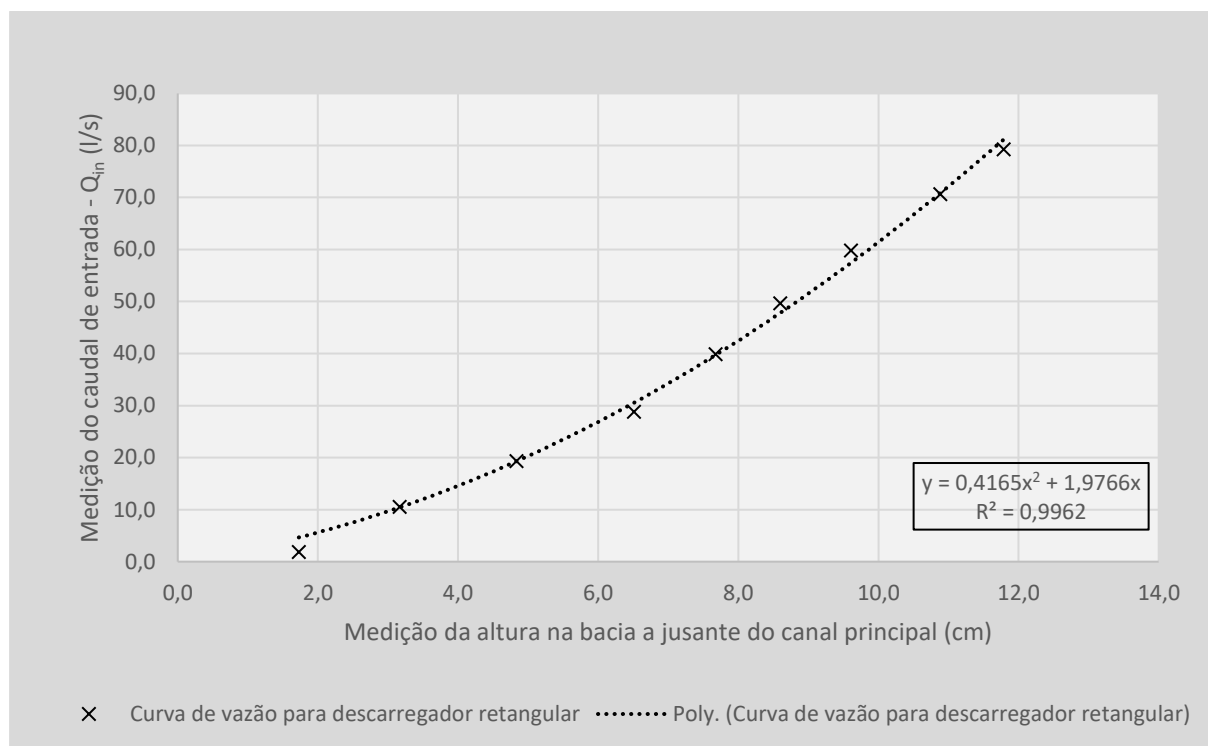


Figura 3.11 - Curva de vazão do descarregador retangular.

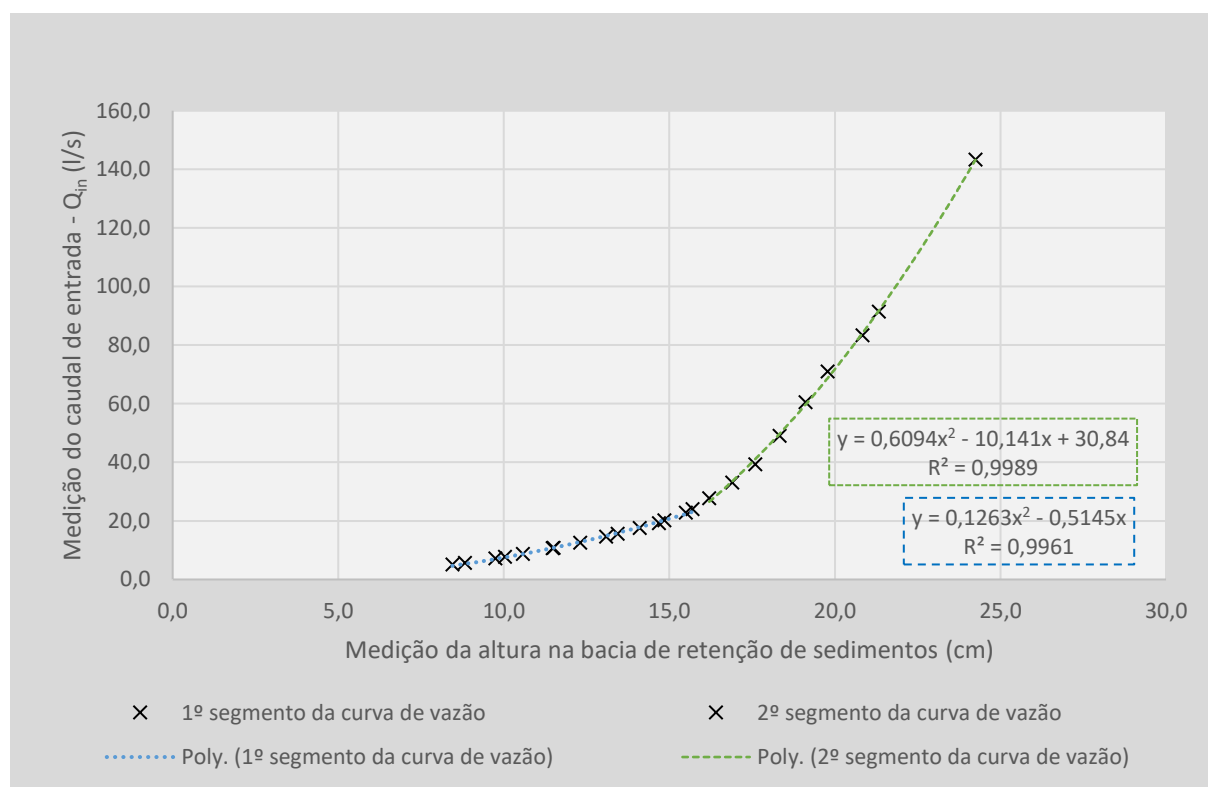


Figura 3.12 - Curva de vazão do descarregador retangular com corte em V.

3.5 Dique Experimental

3.5.1 Composição

A construção dos diques ensaiados foi realizada em parceria com o Departamento de Geotecnia (DG) do LNEC. Os solos utilizados foram previamente caracterizados em termos geotécnicos, nomeadamente em termos de análise granulométrica, mas também determinação dos Limites de Atterberg e da curva de compactação advinda do ensaio Proctor Standard.

O controle da compactação foi realizado durante a construção do aterro, através da análise de amostras recolhidas de várias camadas de compactação.

Para a construção do dique experimental foi usado um material composto maioritariamente por siltes e areias. A análise granulométrica concluiu que o material tem um diâmetro médio (d_{50}) de 0.17 mm e que há cerca de 95,2% de material a passar no peneiro #4, confirmando a predominância de agregados finos sobre os grossos, como ilustrado na Figura 3.13 e apresentado numericamente na Tabela 3.1.

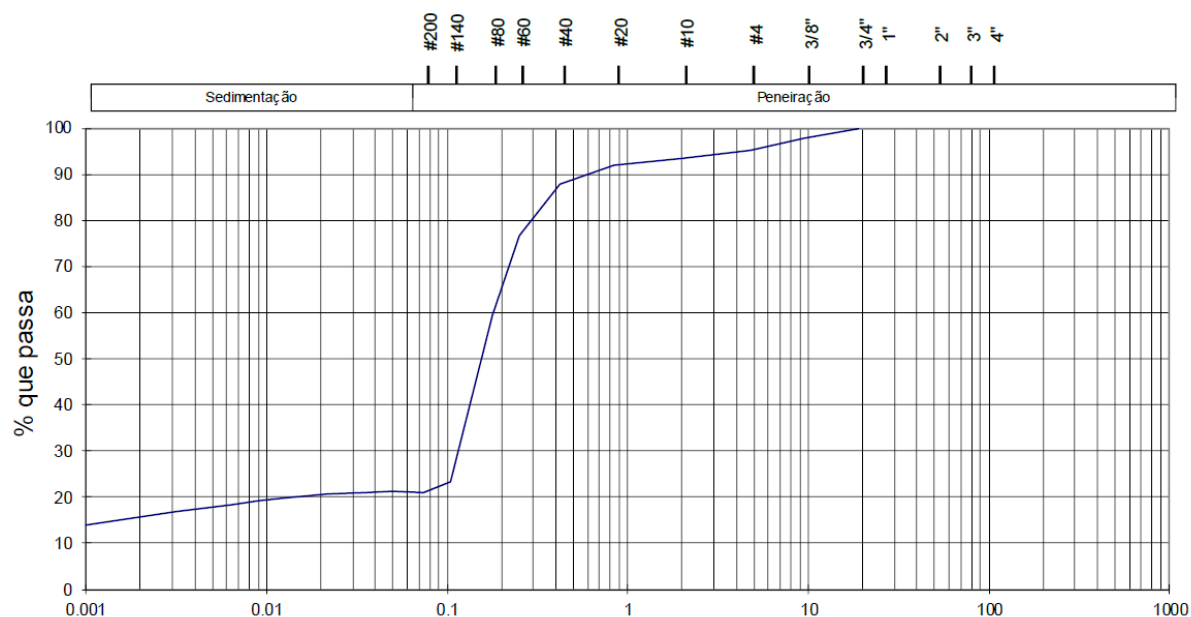


Figura 3.13 - Curva granulométrica do solo dos diques experimentais.

Tabela 3.1 - Percentagem de material que passa em cada peneiro.

Peneiro	#200	#140	#80	#60	#40	#20	#10	#4	3/8"	3/4"	1"	2"	4"
# (mm)	0.1	0.105	0.177	0.25	0.42	0.841	2	4.76	9.51	19	25.4	50.8	101.6
% passa	21.0	23.4	59.4	76.8	87.9	92.0	93.5	95.2	97.7	100.0			

Além da análise granulométrica também se realizou o ensaio Proctor para estimar a curva de compactação do solo (Figura 3.14) e assim, determinar a quantidade ótima de água a ser adicionada ou removida, de modo a garantir as condições de compactação que garantem a maior resistência do aterro. Os dados obtidos indicam que a compactação ótima do solo ocorre para um teor de água de 14,4%, conforme ilustrado na Figura 3.14.

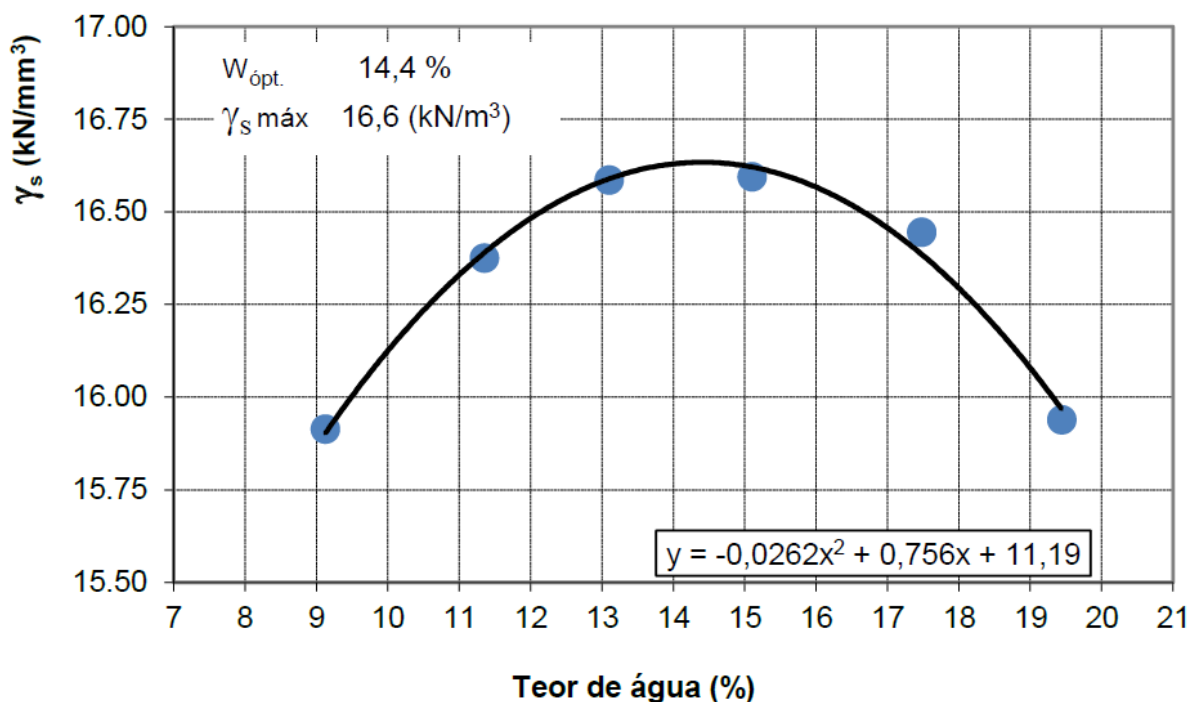


Figura 3.14 - Curva de compactação advinda do ensaio Proctor Standard.

3.5.2 Processo construtivo

O dique experimental tem de 2,0m de comprimento, uma altura variável entre 0,3m e 0,5m, taludes com inclinação de 1:1,5 e um coroamento com largura de 0,1m.

Como o material utilizado está sujeito a variações do teor de água devido à exposição ambiental, antes da construção é adicionada água até se atingir o teor de água pretendido tendo em conta o teor de água ótimo definido pelo ensaio Proctor Standard. Esta adição é feita em lotes de 50 kg de material. Como um dos objetivos do projeto de investigação foi avaliar a evolução da brecha sob diferentes teores de água no solo, foram realizados ensaios com valores acima e abaixo do teor ótimo. A homogeneização do material foi garantida através da utilização de uma betoneira elétrica.

Após a mistura, inicia-se a construção do dique. Esta é feita por camadas sucessivas de 5 cm até se atingir a altura final do dique. Após a deposição de cada camada esta é compactada com uma placa vibratória passada 9 vezes no sentido transversal ao dique, valor previamente determinado num ensaio experimental como o mais eficaz para obter o melhor grau de compactação.

Após a compactação de cada camada, procedeu-se à escarificação da superfície do solo de forma a promover uma boa aderência entre as camadas subsequentes. Concluída a construção, o dique foi perfilado e nivelado de acordo com a geometria pretendida. Este processo de construção encontra-se ilustrado na Figura 3.15.

Para simular a rotura do dique por galgamento foi aberta uma secção no centro do coroamento, com 0,1 m de largura e 0,02 m de altura, designada por canal piloto. Assim que o ensaio tem início, o canal piloto passa a ser designado como brecha.

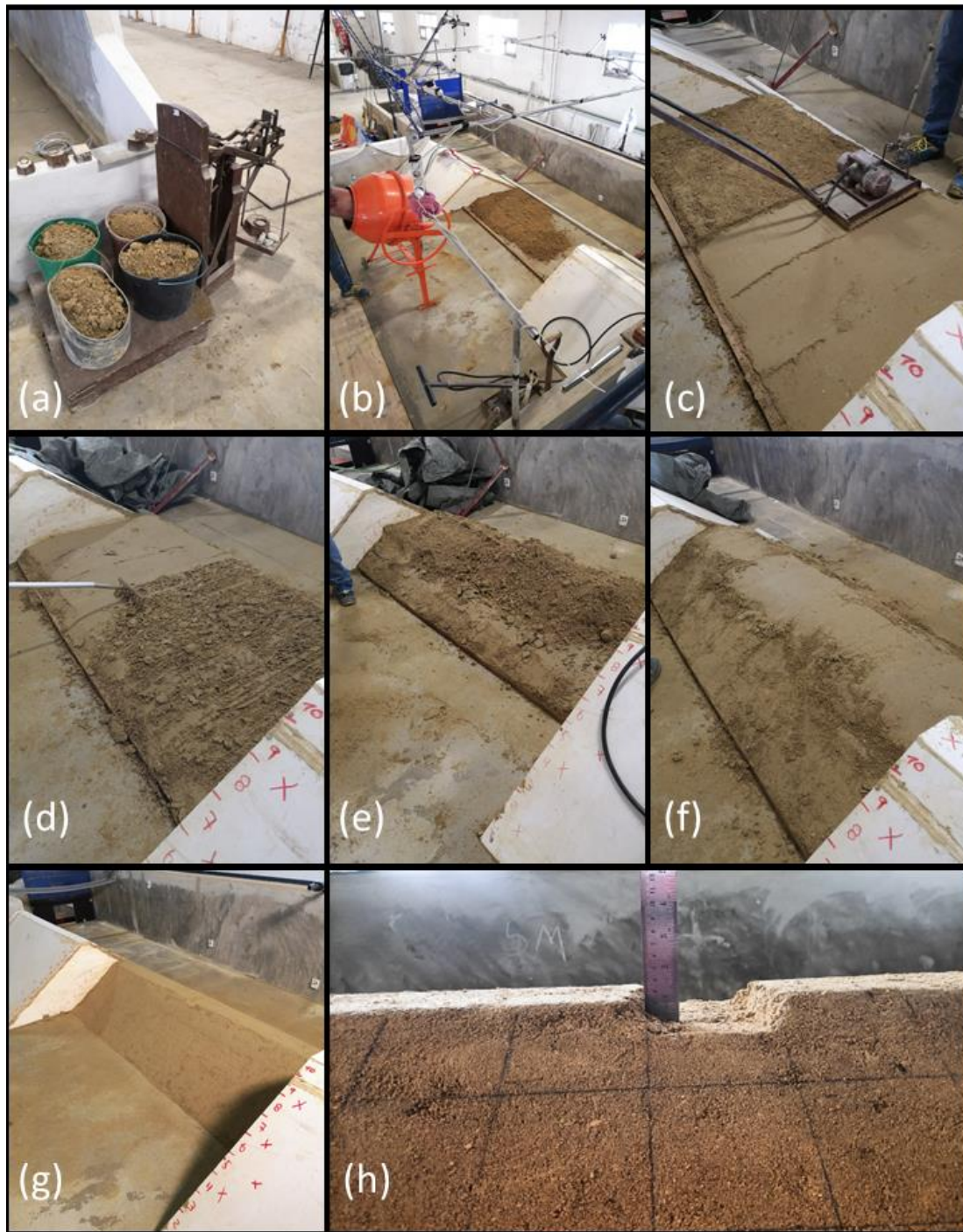


Figura 3.15 - Procedimento de construção. (a) Pesagem de 50kg de material. (b) Distribuição de material no dique após a adição de água na betoneira eléctrica. (c) Compactação com placa vibratória. (d) Escarificação das camadas. (e) Acréscimo de nova camada. (f) Conclusão das camadas e compactação final. (g) Dique perfilado e nivelado. (h) Abertura do canal piloto.

Para determinar os parâmetros teor de água e grau de compactação do dique experimental, realizou-se o ensaio de garrafa de areia (Figura 3.16). Este método consiste na remoção de uma amostra de solo, cuja secagem em estufa permite calcular o teor de água do material. A massa seca da amostra obtida pela secagem em estufa é subtraída à massa inicial da amostra obtendo a quantidade de água evaporada, permitindo assim avaliar a humidade do solo existente naquela amostra.



Figura 3.16 - Ensaio da garrafa de areia. (a) Remoção da amostra. (b) Preenchimento com material calibrado. (c) Remoção do material calibrado.

MÉTODOS DE MEDIÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

4.1 Enquadramento

Este capítulo descreve os métodos de medição e análise de dados adotados para estudar a rotura de um dique fluvial, com o objetivo de compreender a evolução do processo de rotura ao longo de ensaios experimentais, variando parâmetros pré-determinados. A implementação destes métodos exigiu a utilização de diversos softwares, tanto para aquisição de dados quanto para o respetivo processamento. Entre os softwares utilizados para aquisição de dados, refiram-se o CatmanEasy, o LabVIEW e o KinectCloud, enquanto o processamento de dados foi realizado por recurso ao MatLab, Excel, CloudCompare e ao Fusion360.

4.2 Procedimento experimental

Antes de realizar os ensaios experimentais foi necessário definir um plano detalhado dos trabalhos para atingir os objetivos a que esta investigação se propõe. Realce-se aqui que, como já referido anteriormente, o presente trabalho está inserido num Projeto de Investigação sobre rotura de diques fluviais, o qual abrange um extenso programa de ensaios que engloba o estudo da influência de vários parâmetros no processo de rotura do dique.

No presente trabalho o parâmetro em estudo foi o número de Froude do escoamento afluente ao dique, tendo sido este o único parâmetro alterado entre ensaios.

Os equipamentos escolhidos para a monitorização e aquisição de dados experimentais tiveram em consideração aspetos de compatibilidade com a instalação e de adequação aos dados pretendidos.

Após a construção dos diques, são verificadas as posições e o correto funcionamento dos Azure Kinects, GoPro, Sondas Ultrassónicas e Comporta regulável a jusante do canal

principal, de seguida, uma vez haverem diferentes equipamentos de medição, são executados processos para compatibilizar os tempos de gravação entre os equipamentos. Antes de se iniciar os ensaios, ambas as bacias na instalação são cheias até ao ponto onde se inicia a descarga (crista), após estes procedimentos realizam-se os ensaios experimentais. Todo o ensaio decorre de forma automática após o seu início, sendo apenas dispostos traçadores no canal principal para o cálculo do campo de velocidades. Com o fim dos ensaios, os dados obtidos permitem realizar diversas análises, com ênfase na evolução morfológica do dique após o galgamento e nos caudais efluentes da brecha, ambos analisados em função do tempo de cada ensaio. O procedimento está resumido na Figura 4.1.

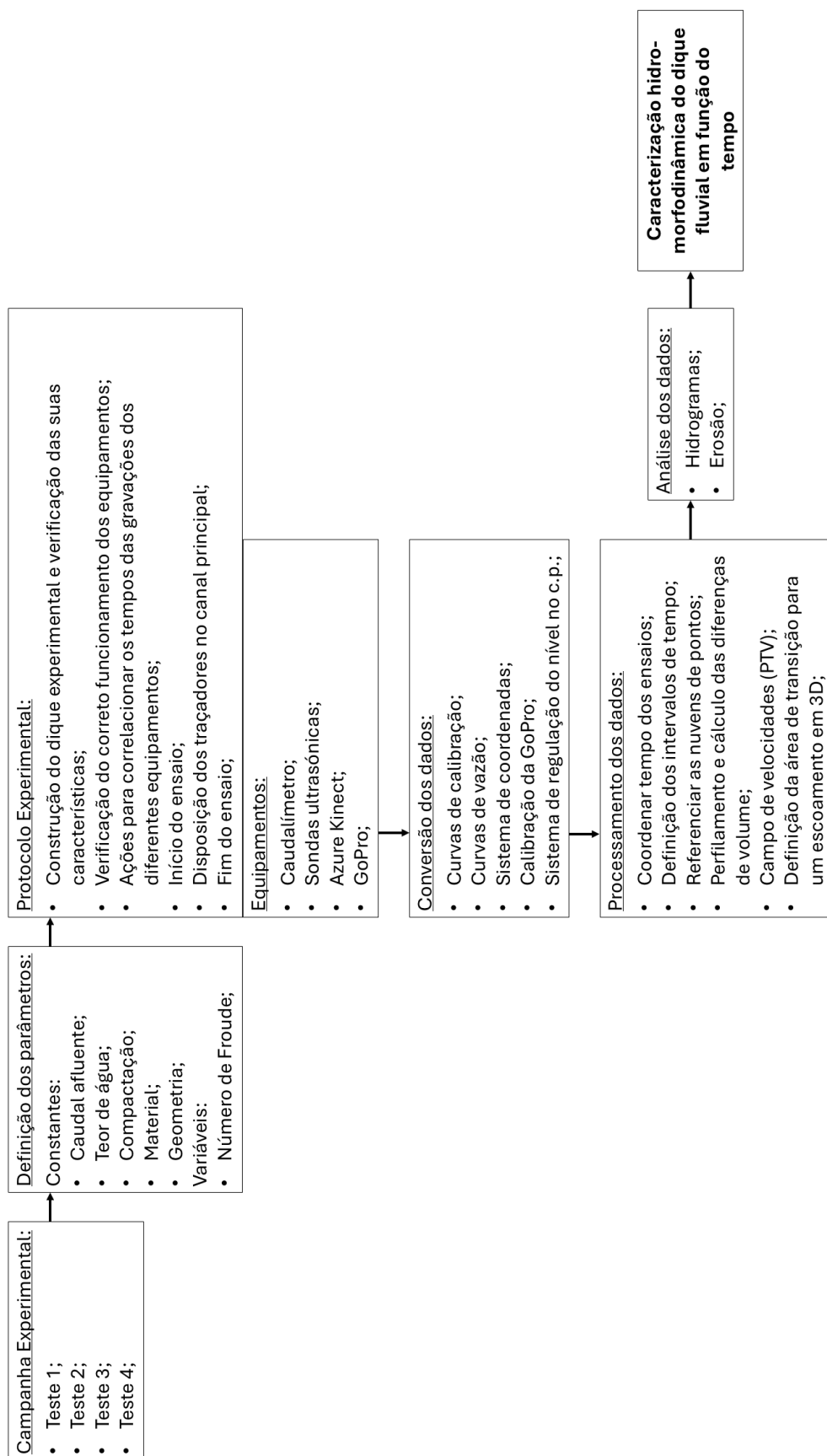


Figura 4.1 - Fluxograma do procedimento experimental.

4.3 Classificação de eventos

Para iniciar a análise dos dados, é necessário estabelecer o início e fim de cada ensaio. Por forma a haver compatibilização entre os diferentes ensaios, o início é sempre marcado pelo momento quando a água entra em contacto com o talude de jusante do dique (Figura 4.2, a)), enquanto o fim ocorre quando o escoamento no canal principal deixa de apresentar características fluviais (Figura 4.2, b)), isto é, quando deixa de ser possível manter o nível de água no canal principal mesmo com o fecho completo da comporta regulável de jusante. Em alguns ensaios, o fim estabelecido não foi alcançado, pois a erosão do dique foi suficientemente acentuada para perder a ligação com o talude fixo a jusante, não permitindo que se chegasse ao fim esperado.

Uma vez definidos os momentos de início e de fim, os vídeos das câmaras foram correlacionados para facilitar a identificação dos eventos durante as diferentes gravações.

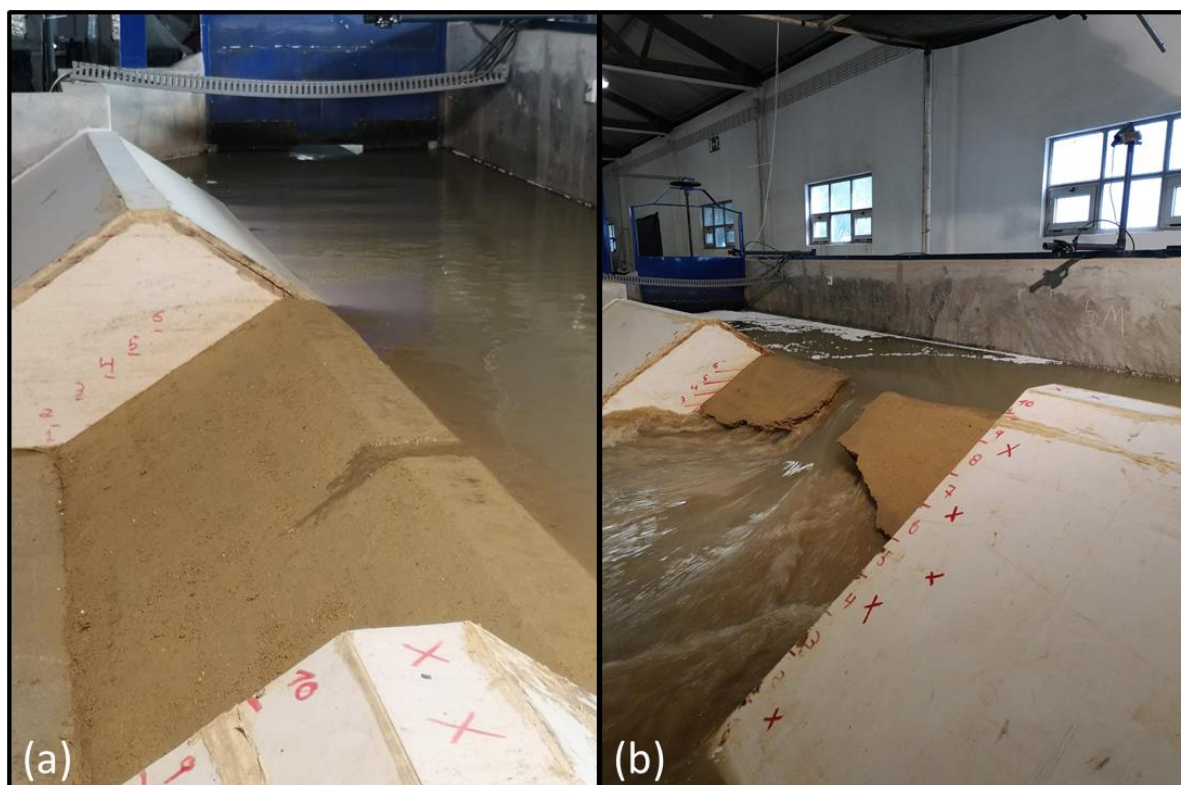


Figura 4.2 - Ensaio de rotura de dique por galgamento. (a) Imagem representativa do início de um ensaio. (b) Imagem representativa do final de um ensaio.

A identificação dos eventos a estudar foi feita através da análise posterior dos vídeos, procurando identificar alterações relevantes na geometria da brecha, como por exemplo a queda súbita de blocos do corpo do dique (massas de solo). Além dos instantes onde ocorrem alterações relevantes, a duração do ensaio é dividida em intervalos de tempo constantes para se poder analisar a evolução da brecha entre ensaios de forma contínua.

4.4 Reconstrução tridimensional e evolução morfológica da brecha

Para um estudo mais aprofundado sobre a rotura do dique fluvial, além da observação empírica durante os ensaios, foi necessário recorrer a outros métodos que complementassem esta análise e validassem os resultados obtidos.

Para tal, foram captadas imagens de cada ensaio por recurso a um método de monitorização contínua. Note-se que a interrupção dos ensaios para captação de imagens influenciaria o desenvolvimento da erosão, podendo comprometer os resultados dos ensaios quanto à sua representatividade. Contudo, a monitorização contínua apresenta algumas limitações, como a distorção devida à refração da luz através da água no canal, o que dificulta a obtenção rigorosa da morfologia do dique. Este problema foi resolvido parcialmente utilizando o software CloudCompare, que permite corrigir os dados fornecidos pelos Azure Kinects.

Após a exportação das nuvens de pontos dos instantes a analisar, estas são inseridas no software CloudCompare, permitindo a reconstrução do dique e a obtenção de resultados fundamentais, como as dimensões da brecha ao longo do ensaio, a erosão global do dique e a zona de transição do escoamento (entre o escoamento no canal principal e o que é direcionado para a brecha onde inicia uma componente vertical acentuada).

A reconstrução tridimensional do dique exigiu a georreferenciação da instalação com base em alvos de coordenadas conhecidas, distribuídos localmente, na instalação e na própria estrutura do dique fixo (Figura 4.3), o que permitiu a correlação das nuvens de pontos adquiridas.

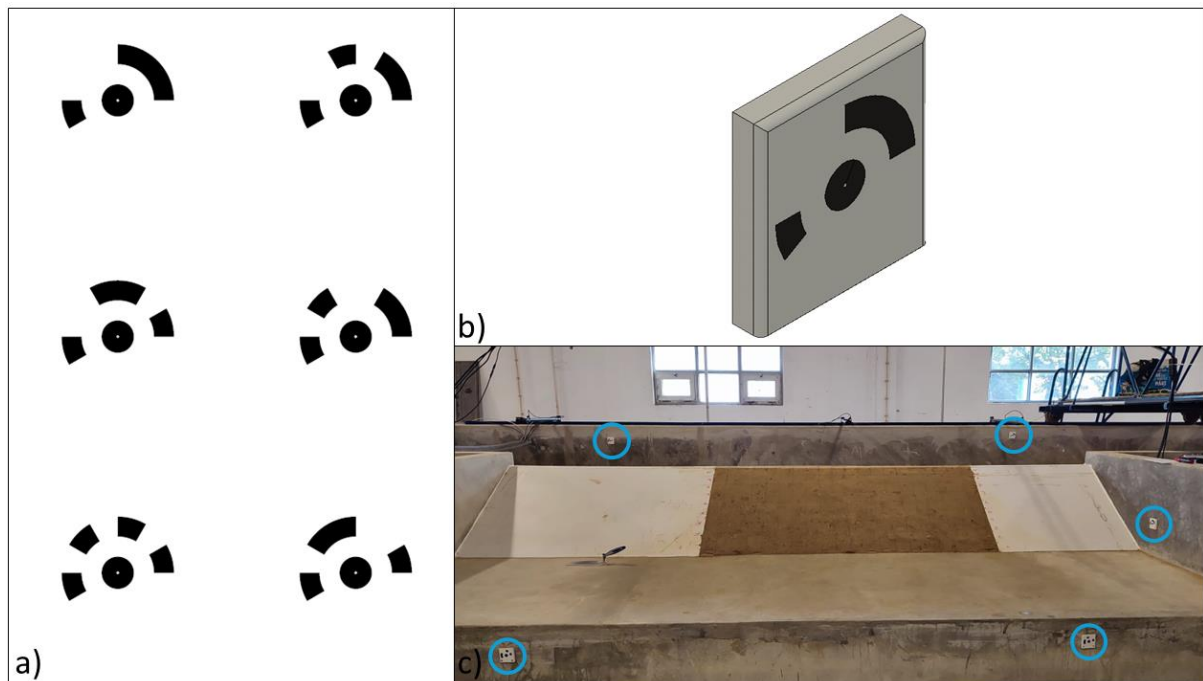


Figura 4.3 - Posicionamento dos alvos coordenados na instalação experimental. a) Padrões de identificação para cada alvo. b) Alvo em 3 dimensões. c) Identificação da posição dos alvos.

Com o sistema de coordenadas definido, a reconstrução 3D do dique foi realizada de acordo com o seguinte procedimento (Figura 4.4):

- i. Exportação das nuvens de pontos da gravação em vídeo dos Azure Kinects através do software KinectCloud e respetiva inserção no CloudCompare;
- ii. Referenciação e união das nuvens de pontos dadas por ambos os equipamentos Azure Kinects no sistema de coordenadas definido;
- iii. Interseção das nuvens de pontos com linhas paralelas e perpendiculares ao coroamento para obtenção do perfil do dique;
- iv. Extração dos perfis do coroamento para comparação da evolução da brecha ao longo do ensaio;
- v. Formação de uma malha com os perfis completos, permitindo quantificar a erosão, analisar os padrões de erosão e outros destaques que sejam relevantes considerar na análise dos resultados experimentais;
- vi. Definição da zona de transição do escoamento para um escoamento em 3 dimensões para construção da área transversal ao escoamento aplicada num dos métodos de cálculo do caudal efluente da brecha através do software Fusion360.

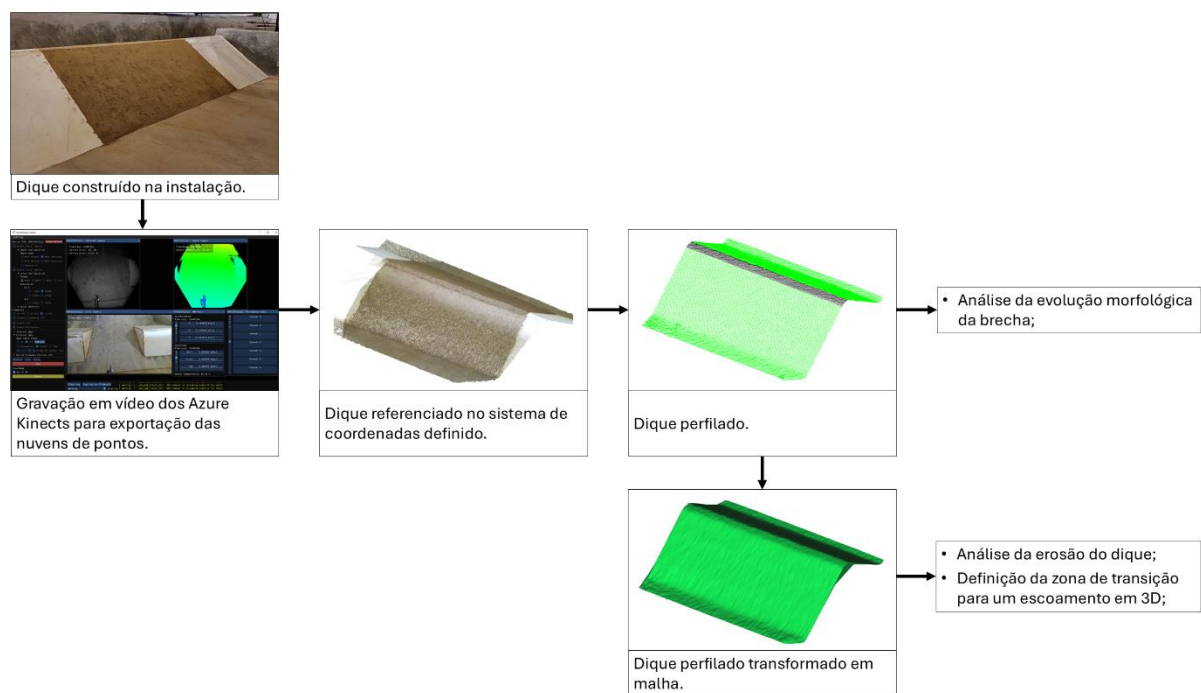


Figura 4.4 - Esquema do procedimento de análise da evolução da rotura do dique (morfologia da brecha).

A definição da zona de transição do escoamento, onde este diminui de altura à medida que se aproxima da zona da brecha, foi auxiliada pela colocação de partículas flutuantes, de geometria esférica e dimensões reduzidas (poliestireno com cerca de 3mm), no canal principal.

Como estas partículas se mantêm a flutuar sob a superfície do escoamento durante a totalidade dos ensaios, as nuvens de pontos analisadas para este momento foram escolhidas de forma a conterem partículas, e assim poderem auxiliar na estimativa do nível de água no canal principal.

A comparação das alturas de água estimadas com base nos dados das sondas ultrassónicas e das nuvens de pontos permite delimitar a zona de transição do escoamento através de uma linha onde a altura da água começa a diminuir como visto na Figura 4.5, respetivamente localizada na zona representada a branco entre a zona a vermelha (canal principal) e a zona azul (brecha).

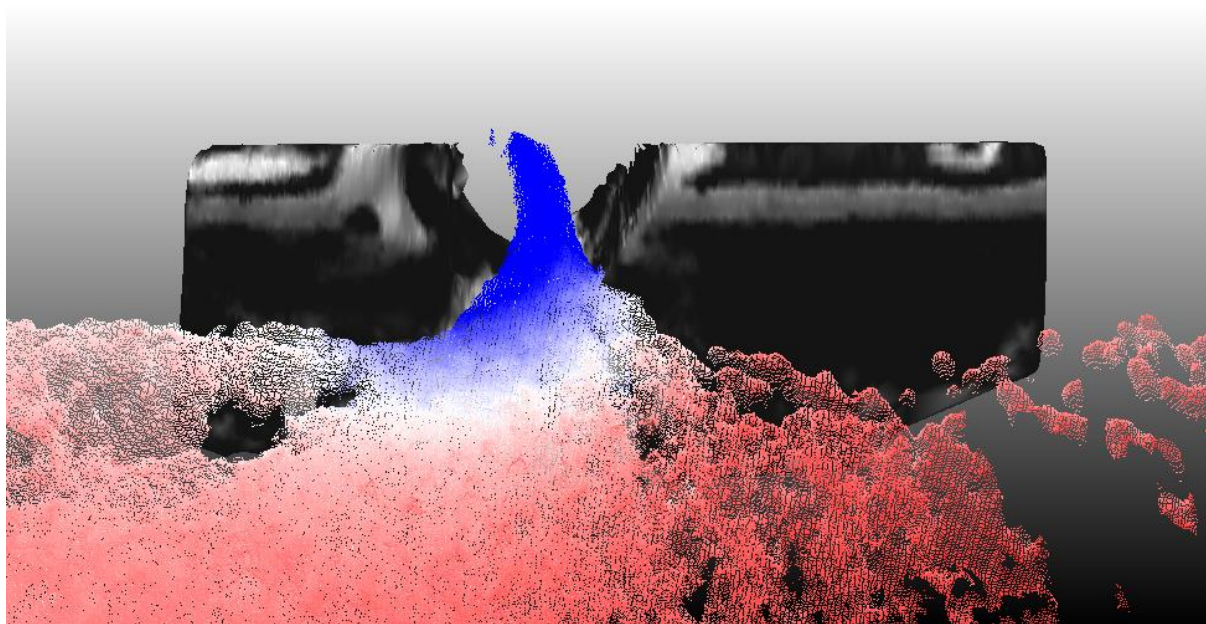


Figura 4.5 - Definição da zona de transição para um escoamento 3D (com componentes horizontais e verticais).

A definição da linha de transição é de grande importância pois esta é utilizada num dos métodos de cálculo do caudal efluente da brecha.

4.5 Campos e vetores de velocidade na aproximação à brecha

Para a obtenção dos vetores de velocidade superficiais, utilizaram-se as partículas de poliestireno já referidas, colocadas no canal principal para servirem de traçador, uma vez que as mesmas, devido à reduzida densidade, assumem a mesma velocidade e direção do escoamento.

O método utilizado para calcular as velocidades do escoamento foi o *Particle Tracking Velocimetry (PTV)*, combinado com o algoritmo Voronoï (Aleixo et al., 2011; Capart et al., 2002). O método *PTV* consiste em capturar e identificar as partículas traçadoras com uma câmara de alta velocidade, utilizando um intervalo de tempo entre imagens pré-definido (utilizada câmara GoPro de 240 FPS). O algoritmo Voronoï é utilizado para seguir as partículas identificadas e efetuar a respetiva correspondência destas entre imagens consecutivas. A relação entre a posição de uma mesma partícula em imagens subsequentes é determinada calculando a distância mínima entre a partícula no instante inicial e as partículas no instante seguinte.

Este algoritmo divide a imagem capturada em várias células (diagrama de Voronoï) sendo que cada célula tem uma partícula de poliestireno como ponto de referência (Figura 4.6).

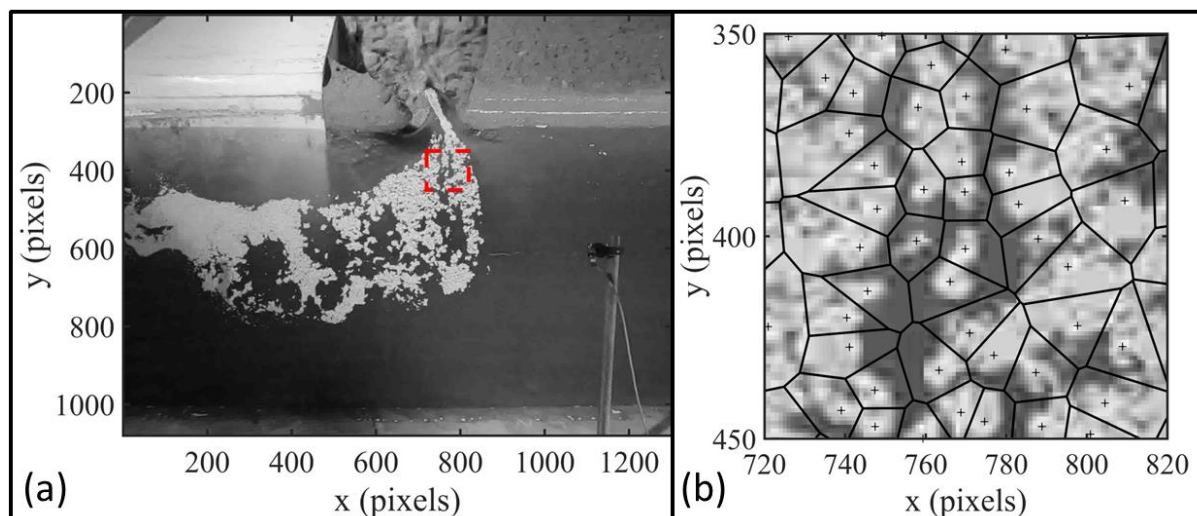


Figura 4.6 - Escoamento na aproximação à brecha com partículas traçadoras. (a) Planta com identificação da área a ser analisada pelo algoritmo. (b) Detalhe do diagrama Voronoï na área de análise.

De seguida, é feita uma ligação entre a partícula a analisar e os pontos de referência das células na fronteira formando a estrela Voronoï. O mesmo processo é feito para a imagem seguinte e relacionando as distâncias aos pontos de referência de cada imagem é estabelecida uma correspondência entre as partículas das diferentes imagens (Figura 4.7).

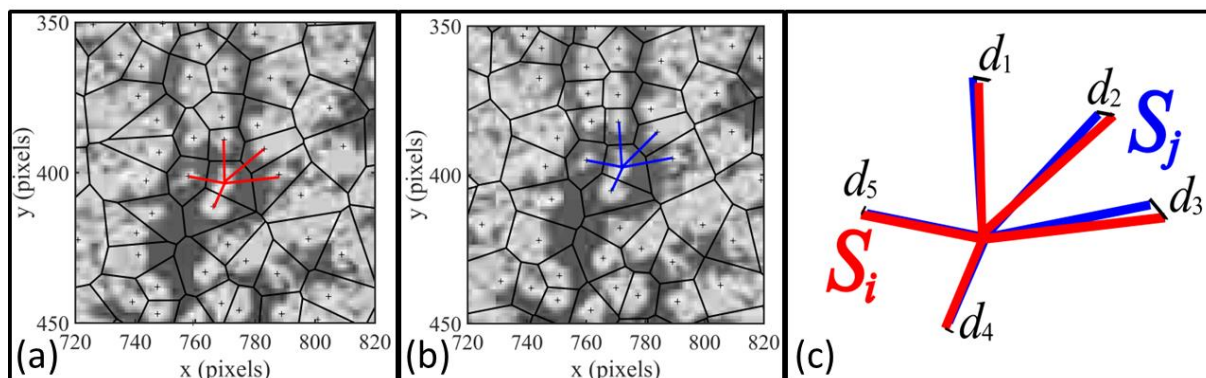


Figura 4.7 - Ilustração dos vários passos dos Diagramas de Voronoï. (a) Diagrama e estrela Voronoï para um determinado instante. (b) Diagrama e estrela Voronoï para o instante seguinte. (c) Correspondência entre as estrelas Voronoï.

A repetição deste processo em várias áreas de análise de dimensões superiores e vários pares de imagens, permite a construção de um campo de velocidades detalhado do escoamento.

O cálculo destes campos de velocidade foi realizado com o software MatLab utilizando uma extensão - código Grafite - desenvolvido por Benoit Spinewine (Spinewine, 2000). Para cada evento a analisar, previamente identificado para cada ensaio, foram introduzidos no código os seguintes dados: i) imagens a analisar; ii) rácio entre o número de imagens necessárias para uma partícula se mover determinado número de píxeis; iii) dados de

calibração das imagens por forma a dar ao software a correspondência entre o número de pixéis e as unidades do Sistema Internacional (metros).

Como o referido código analisa os dados em 2D, consideraram-se apenas as velocidades até à linha de transição do escoamento, a partir da qual a velocidade inicia uma componente vertical muito acentuada.

4.6 Caracterização do hidrograma efluente da brecha

Um dos objetivos deste estudo foi a determinação do caudal efluente da brecha, para o qual se utilizaram três abordagens distintas:

- i. Determinação com base na curva de vazão do descarregador retangular em V;
- ii. Cálculo através do princípio de balanço de massas;
- iii. Cálculo local utilizando a área transversal ao escoamento na zona de transição e a respetiva velocidade média local.

As estimativas do caudal efluente da brecha obtidas a partir destas abordagens, foram comparadas para averiguar a compatibilidade e precisão de cada método.

A estimativa do caudal efluente com base na **curva de vazão do descarregador retangular em V** é obtida diretamente, uma vez que a mesma foi previamente calibrada. Assim a estimativa do caudal efluente da brecha por este método corresponderá ao caudal descarregado pelo descarregador retangular em V localizado na secção final da bacia de retenção de sedimentos.

A soma de todos os caudais efluentes da instalação, designadamente por todos os descarregadores foi sempre igual ao caudal afluente à instalação durante os ensaios, o que comprova a sua precisão.

As estimativas de caudal determinadas com base nas curvas de vazão dos respetivos descarregadores utilizam o software CatmanEasy onde se inseriram as equações correspondentes. Assim é possível obter diretamente as referidas estimativas dos caudais efluentes de cada descarregador, como ilustrado na Figura 4.8.

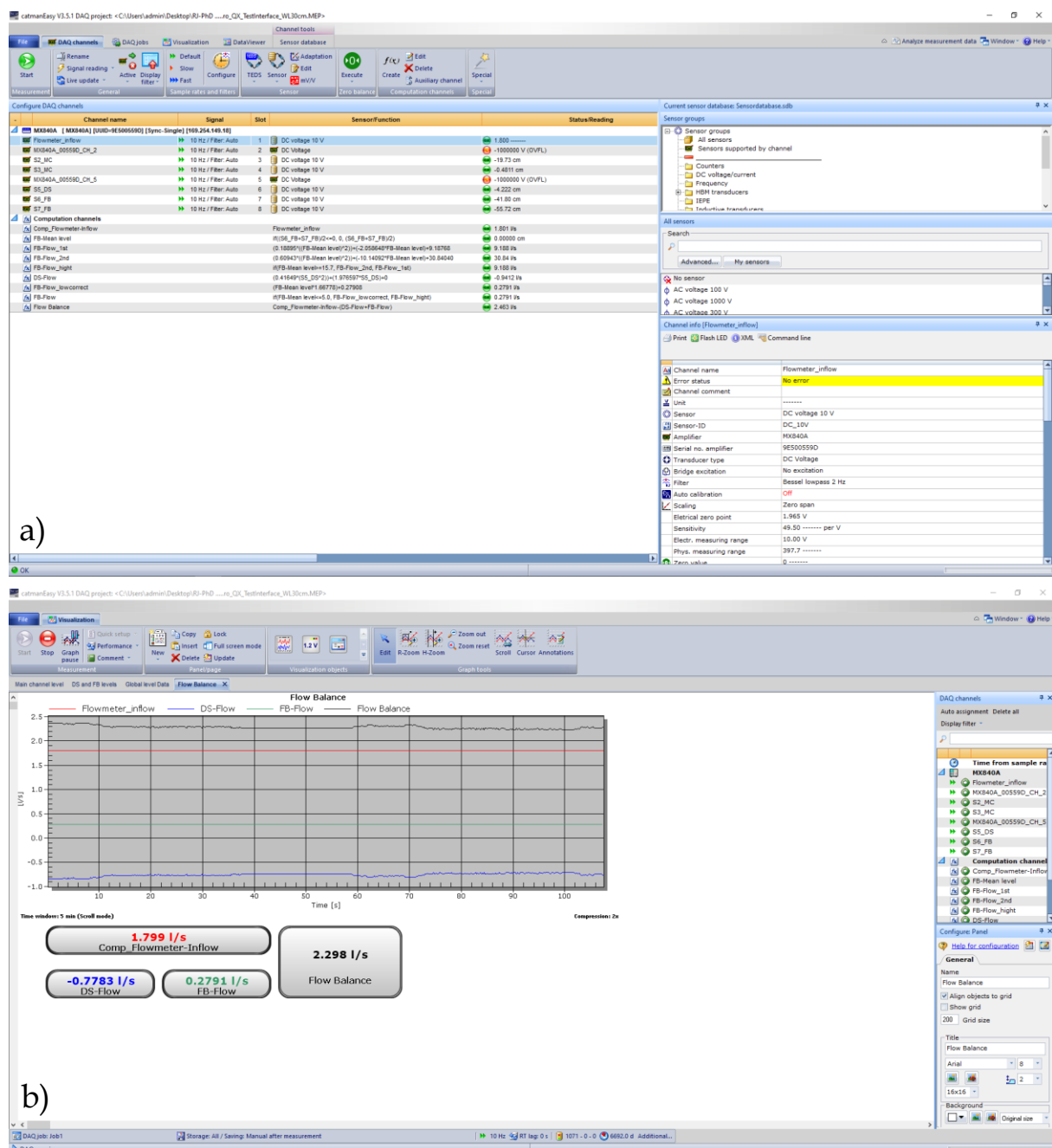


Figura 4.8 - Capturas de ecrã do Software CatmanEasy. a) Ligação e leitura correta das sondas ultrassónicas. b) Demonstração dos valores no CatmanEasy antes do início de um ensaio.

Outra abordagem utilizada para estimar o caudal efluente da brecha é baseada no **princípio de balanço de massas** entre o caudal afluente à instalação, o caudal efluente pelo descarregador do canal principal e as variações de volume no interior do mesmo, medidas de forma contínua a montante da brecha.

Dado que a variação de volume no canal é $\Delta V = A \times \Delta h$, a contribuição da variação do volume na determinação do caudal é dada pela seguinte equação:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{A \times \Delta h}{\Delta t} \quad (4.1)$$

Sendo o canal composto por duas saídas, o caudal afluyente terá de ser igual à soma dos caudais efluentes com a variação de volume no interior do canal a montante da brecha (Figura 4.9).

$$Q_{in} = Q_{dr} + Q_{br} + \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (4.2)$$

- Q_{in} - Caudal afluyente ao canal principal;
- Q_{dr} - Caudal efluyente do descarregador retangular do canal principal;
- Q_{br} - Caudal efluyente da brecha;

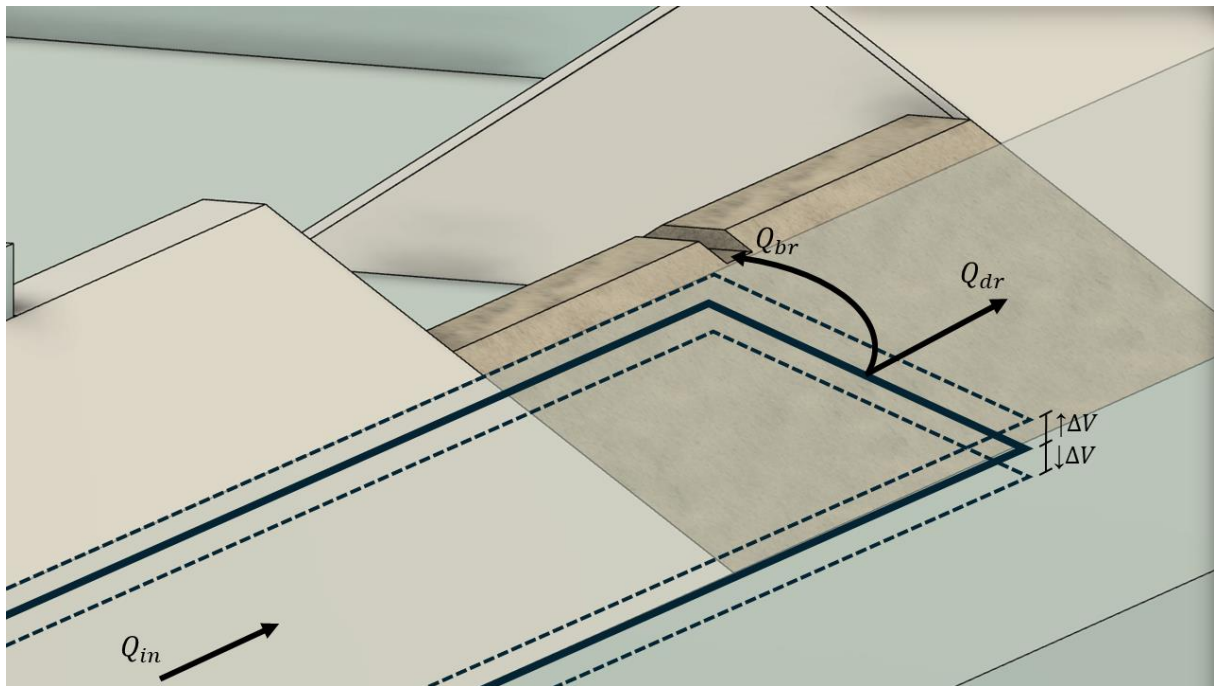


Figura 4.9 - Representação esquemática das variáveis intervenientes na equação do balanço de massas no canal principal. Caudais afluyente (Q_{in}), efluyente pelo descarregador retangular (Q_{dr}) e efluyente da brecha (Q_{br}) e variação de volume no canal principal.

A última abordagem de cálculo do caudal efluyente da brecha é uma **estimativa local** que se baseia nos valores da velocidade de escoamento na zona de transição para um escoamento em 3D na aproximação à brecha e a respetiva área transversal ao escoamento nessa zona. A multiplicação desta área pela velocidade média do escoamento na linha de transição permite obter uma estimativa do caudal efluyente da brecha (Bento et al., 2017).

$$Q_{br} = v_m \times A \quad (4.3)$$

- Q_{br} - Caudal efluente da brecha;
- v_m - Velocidade média na linha de transição do escoamento;
- A - Área transversal ao escoamento.

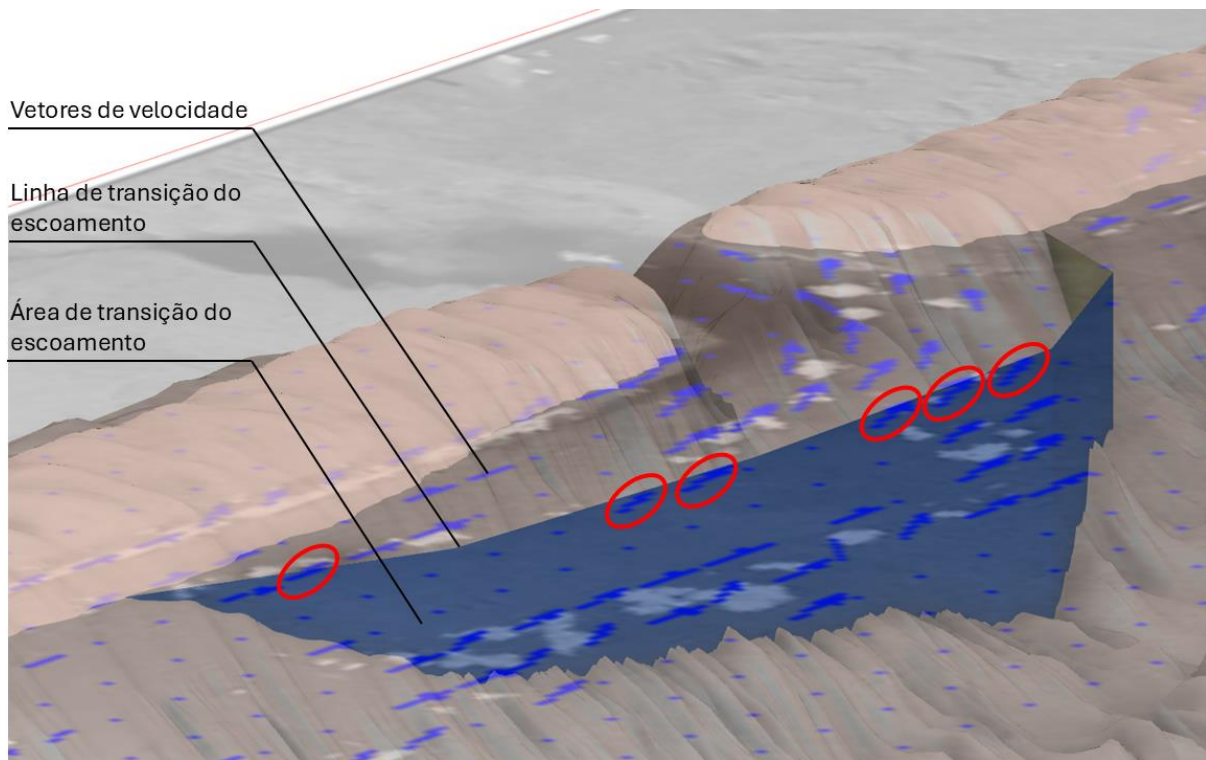


Figura 4.10 - Parâmetros necessários à estimativa local do caudal efluente da brecha. Vetores de velocidade, linha de transição do escoamento e área de transição.

Na Figura 4.10 é possível observar a área transversal ao escoamento (representada a azul), sendo que esta será tanto maior quanto maior for a abertura da brecha, ao que corresponderá, naturalmente, um aumento no caudal efluente da brecha. Como o *PTV* permite apenas a determinação dos vetores de velocidade superficiais, e não em profundidade, as velocidades utilizadas nesta abordagem correspondem à média dos valores dos vetores de velocidade superficial, sob a linha de transição (assinalados com um círculo vermelho).

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Enquadramento

No presente capítulo apresentam-se os resultados de quatro (4) ensaios de rotura por galgamento de diques fluviais realizados no âmbito desta tese de mestrado.

Como descrito anteriormente, os resultados aqui analisados consistem na reconstrução 3D do dique para a avaliação morfológica da brecha, nos campos de velocidade do escoamento na aproximação à brecha e nos hidrogramas efluentes da brecha.

Assim, o presente capítulo, para além desta subsecção de enquadramento (5.1) apresenta ainda mais sete (7) subsecções. Em 5.2, são descritas as condições experimentais dos quatro ensaios realizados, incluindo os parâmetros adotados. Em 5.3, procede-se a uma análise pela observação baseada em registos visuais locais durante os ensaios e nos vídeos adquiridos, destacando os padrões de erosão e o desenvolvimento da brecha ao longo do tempo.

A evolução morfológica da brecha é abordada no subcapítulo 5.4, que se divide em duas vertentes principais: na avaliação da progressão da erosão da brecha através de reconstrução 3D (5.4.1) e na avaliação da erosão global do dique, identificando os diferentes padrões de erosão observados nos ensaios (5.4.2). Em 5.5, estuda-se a distribuição dos campos de velocidade do escoamento na aproximação à brecha e a sua relação com o desenvolvimento da erosão e a morfologia final do dique. Em 5.6 e 5.7, analisam-se os hidrogramas efluentes da brecha relacionando-os com os campos de velocidade e com o desenvolvimento da erosão abordando os três métodos de cálculo.

Por fim, em 5.8 faz-se uma comparação dos resultados obtidos com os de outras investigações sobre o mesmo tema já abordados no subcapítulo 2.6.2.

5.2 Ensaios realizados

O objetivo desta dissertação é a avaliação do impacto das condições do escoamento no canal principal, traduzidas pelo número de Froude (Fr), na evolução da rotura do dique, em particular, na evolução morfológica da brecha que se forma no corpo do mesmo, e por conseguinte, no respetivo hidrograma efluente. Neste contexto, os parâmetros: caudal afluente, solo, grau de compactação, teor de água e geometria do dique, designadamente, declives dos taludes, foram mantidos constantes, tendo-se apenas variado o Fr entre ensaios. As principais características dos ensaios realizados são apresentadas na Tabela 5.1.

Realizaram-se 4 ensaios distintos, doravante designados como Teste 1, 2, 3 e 4. Como já referido, o número de Froude foi o parâmetro analisado neste estudo, tendo variado entre 0,1 e 0,4. O Teste 1 foi o ensaio com menor velocidade do escoamento ($< Fr$) e o Teste 4 o que apresentou maior velocidade ($> Fr$) embora sempre num regime de escoamento lento ($Fr < 1$). O teor de água do solo foi mantido constante entre ensaios, próximo do valor ótimo, mas ligeiramente abaixo, por forma a simular diques construídos do lado seco da curva de compactação, e assim, mais erodíveis. Note-se que tem que se garantir algum grau de erodibilidade dos diques ensaiados por forma a conseguir conduzir-se os mesmos à rotura nas condições experimentais possíveis de implementar em laboratório (velocidades inferiores às correspondentes no protótipo, logo com menos potencial erosivo).

Tabela 5.1 - Dados dos ensaios realizados.

Ensaios	Dimensões do Dique	Caudal de entrada	Tipo de material	D_{50} [mm]	Grau de Compactação [%]	Teor de água ótimo [%]	Teor de água experimental [%]	Número de Froude
Teste 1	Altura = 0,5m Comprimento = 2,0m Inclinação = 1V:1,5H	$Q_{in} = 80$ l/s	70% Areias 10% Cascalhos 20% Siltes	0,17	94,2	14,4	13,35	0,10
Teste 2	Altura = 0,3m Comprimento = 2,0m Inclinação = 1V:1,5H	$Q_{in} = 75$ l/s	70% Areias 10% Cascalhos 20% Siltes	0,17	96,6	14,4	12,95	0,20
Teste 3	Altura = 0,3m Comprimento = 2,0m Inclinação = 1V:1,5H	$Q_{in} = 78$ l/s	70% Areias 10% Cascalhos 20% Siltes	0,17	97,9	14,4	13,15	0,30
Teste 4	Altura = 0,3m Comprimento = 2,0m Inclinação = 1V:1,5H	$Q_{in} = 83$ l/s	70% Areias 10% Cascalhos 20% Siltes	0,17	96,0	14,4	13,10	0,40

5.3 Análise visual dos ensaios realizados

Para além dos resultados experimentais, resultantes do pós-processamento dos dados adquiridos, a análise dos ensaios baseia-se também na visualização exaustiva dos mesmos, não apenas durante a respetiva realização mas sobretudo com base na observação cuidadosa dos vídeos adquiridos em cada ensaio.

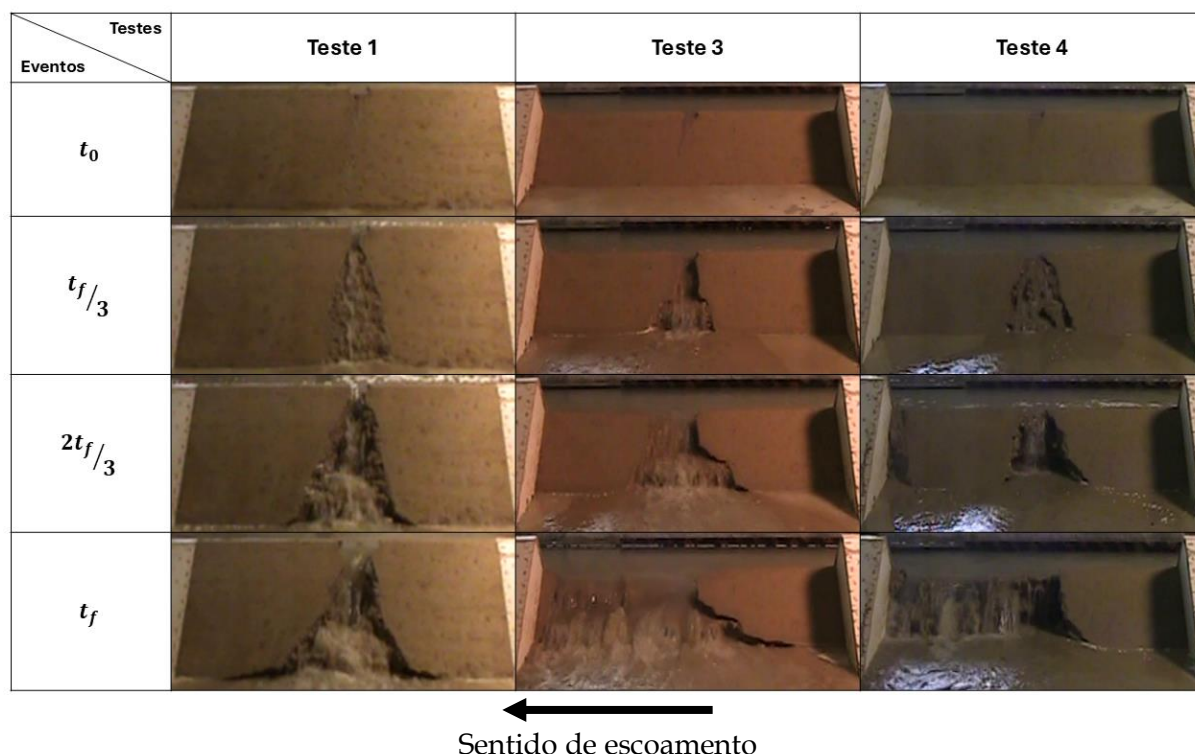
Por forma a poder comparar os ensaios em instantes de evolução da rotura equivalentes, adimensionalizou-se a variável tempo com a duração máxima de cada ensaio (instante final). Assim, nas Tabela 5.2 e Tabela 5.3 representam-se quatro (4) estados de evolução da rotura de cada ensaio em instantes equivalentes, isto é, referidos à mesma escala temporal: instantes inicial (t_0) e final (t_f) e dois instantes intermédios, nomeadamente a um terço ($t_f/3$) e dois terços ($2t_f/3$) da duração total do ensaio.

Tabela 5.2 - Evolução da erosão do coroamento nos Testes 1, 2, 3 e 4.

Testes Eventos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
t_0				
$t_f/3$				
$2t_f/3$				
t_f				


 Sentido de escoamento

Tabela 5.3 - Evolução da erosão frontal nos Testes 1, 3 e 4.



Com base na análise dos vídeos e ilustrado na Tabela 5.2, foi possível observar um aumento da erosão no coroamento a jusante da brecha, com o aumento da velocidade do escoamento no canal principal. No caso de $Fr = 0,1$ a erosão da brecha ocorre de forma simétrica e mantém-se constante durante grande parte do ensaio. Já com $Fr = 0,4$ verifica-se uma erosão total do coroamento a jusante da brecha. No Teste 3 este fenómeno também se observa, embora a erosão no coroamento a montante da brecha e no talude de montante seja menor do que a registada no Teste 4.

A erosão no Teste 2 é semelhante à do Teste 1, porém, ao longo do ensaio, perde o efeito de simetria, uma vez que a erosão no talude de montante do dique, a jusante da brecha, é ligeiramente superior à que ocorre a montante da mesma.

Relativamente à erosão do talude de jusante, conforme indicado na Tabela 5.3, observa-se a formação de patamares em todos os ensaios. Este fenómeno deve-se à compactação do dique durante a fase de construção, que foi realizada em camadas de 5 cm. Com o escoamento e queda de água sobre talude, formam-se patamares nas zonas de separação entre camadas.

No entanto, a tendência da erosão apresentada na Tabela 5.2 é consistente com a erosão do talude de jusante registada na Tabela 5.3. No Teste 1, mantém-se a simetria da erosão, enquanto nos Testes 3 e 4 há um aumento significativo da erosão do coroamento a jusante da brecha, levando à sua erosão total. No Teste 4, verifica-se uma perda uniforme de material no

talude de jusante, a montante da brecha, ao passo que, no Teste 3 essa perda ocorre maioritariamente junto à base do dique.

Durante esta análise, foi dada especial atenção à possibilidade de queda de blocos de grandes dimensões (erosão geotécnica) à medida que o dique era erodido, uma vez que isso poderia provocar picos no caudal efluente da brecha (hidrograma de rotura). No entanto, este tipo de erosão não foi observado, podendo dever-se ao tipo de material utilizado, nomeadamente, com a respetiva granulometria, que resultou num solo mais coeso quando compactado. Assim, a erosão foi sobretudo de origem hidráulica levando a uma erosão superficial nas zonas onde a água tem mais intensidade, desgastando e quebrando a ligação entre as partículas do solo à superfície.

No que respeita ao Teste 2 não foi possível obter imagens frontais do dique.

5.4 Análise da evolução morfológica do dique

5.4.1 Estudo da evolução da brecha

A análise morfológica da brecha que se forma no dique fluvial baseou-se nos métodos anteriormente descritos, com o objetivo de compreender como a erosão se processa ao longo do tempo, tanto em termos quantitativos como na identificação de padrões comuns entre os ensaios.

A Figura 5.1 ilustra a evolução morfológica da brecha ao longo do ensaio. No entanto, no Teste 4, um problema técnico, impossibilitou a gravação contínua do ensaio, ficando apenas disponíveis os instantes inicial e final da brecha. Ainda assim, é possível observar que, nos testes com maior velocidade de escoamento, nomeadamente nos Testes 3 e 4, existe uma erosão significativa a jusante da brecha, confirmando a análise realizada localmente durante os ensaios, bem como a observação dos vídeos.

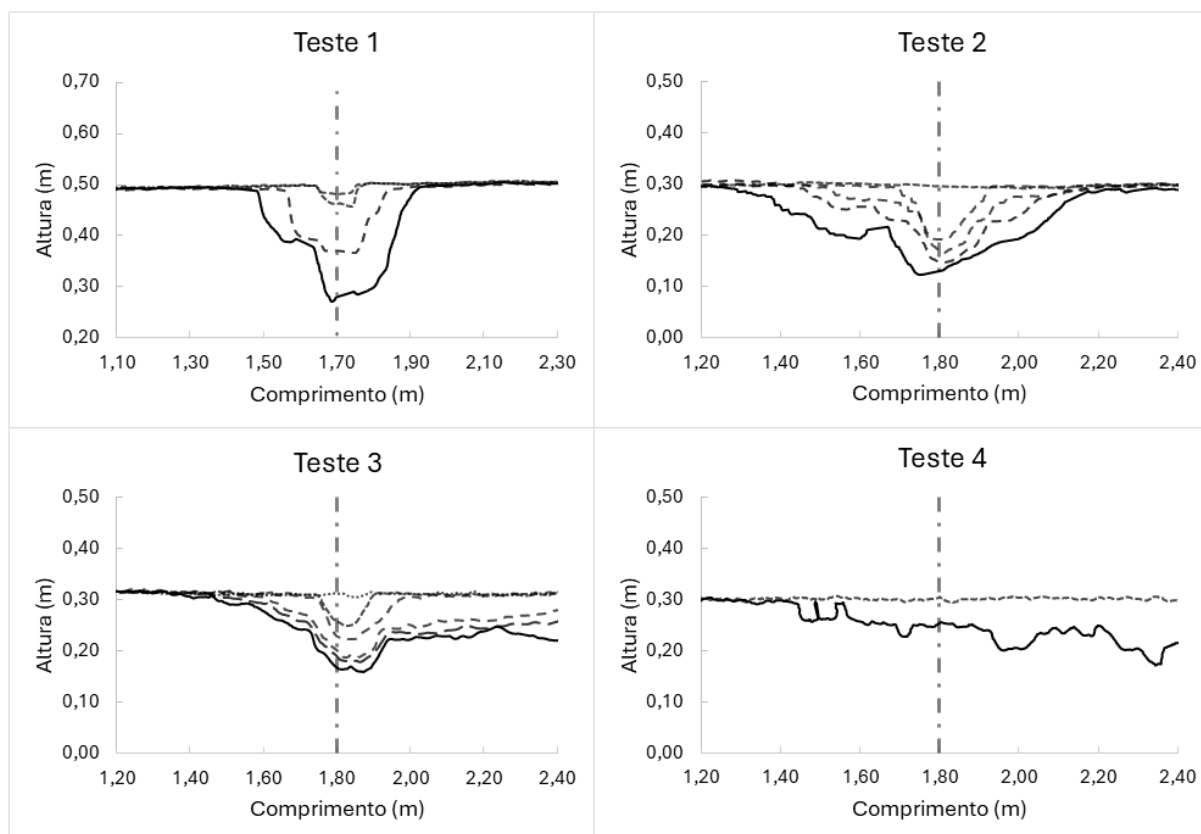


Figura 5.1 - Evolução morfológica da brecha para os testes realizados. Instantes intermédios, final e eixo de simetria representados a tracejado, traço contínuo e traço - ponto, respetivamente.

A reconstrução morfológica das brechas permite observar que a erosão segue uma tendência simétrica para velocidades de escoamento menores. No entanto, este efeito perde-se à medida que a velocidade e, consequentemente, o número de Froude aumentam, como verificado nos Testes 3 e 4. Na Figura 5.1, os instantes intermédios do ensaio, representados a tracejado, mostram que esta simetria está presente nas fases iniciais, mas desaparece ao longo do tempo, sendo mais evidente no Teste 3.

Destaca-se ainda a predominância de uma forma em "V" na erosão da brecha ao longo do ensaio, observada de forma clara no Teste 2 e também confirmada nos Testes 1 e 3. No entanto, esta configuração acaba por se perder nos instantes finais, como verificado no Teste 3. Apesar da ausência de dados intermédios no Teste 4, é expectável que o seu comportamento seja semelhante ao do Teste 3, mas com um formato em "V" menos evidente.

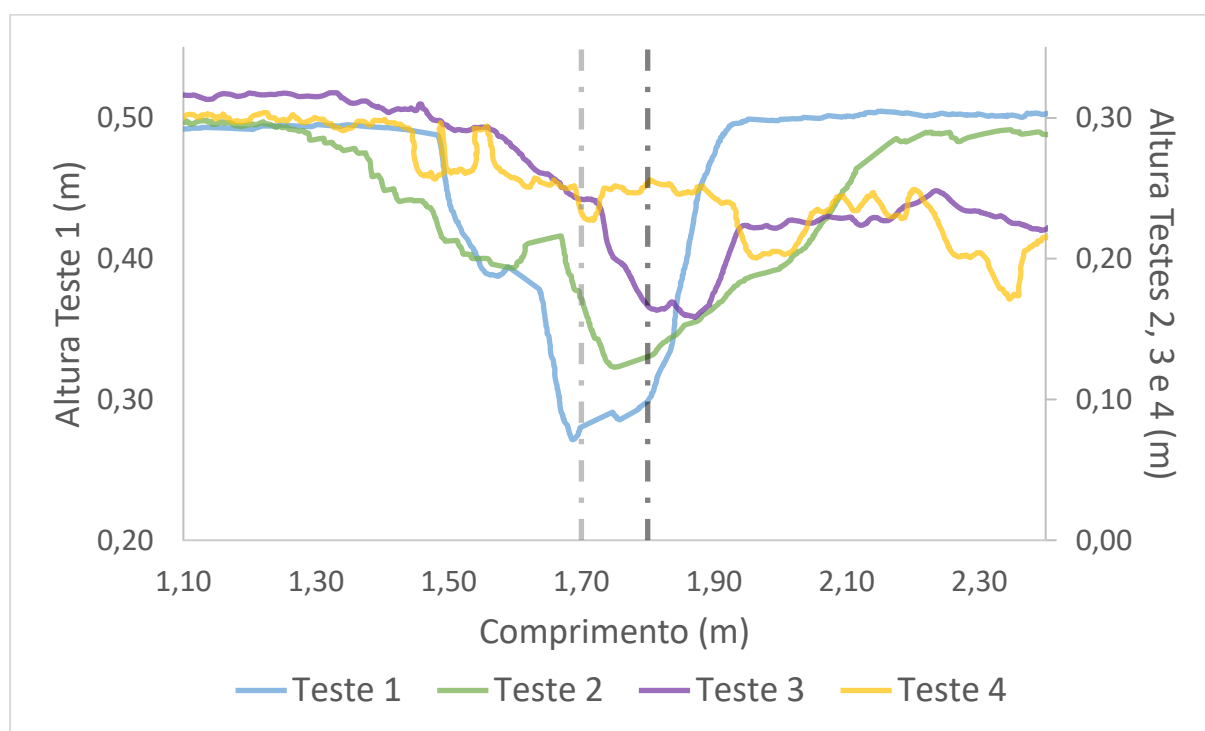


Figura 5.2 - Forma final da brecha em cada ensaio.

A Figura 5.2 compara a forma final das brechas nos diferentes ensaios. O gráfico foi adaptado para refletir as diferentes alturas dos diques, uma vez que o dique do Teste 1 foi construído com 0,5m de altura e os restantes com 0,3m.

Ao comparar os instantes finais de cada ensaio, observa-se que a profundidade da brecha, indicada no eixo das ordenadas da Figura 5.2, diminui com o aumento da velocidade do escoamento. A brecha mais profunda ocorre no Teste 1, seguida pelos Testes 2 e 3 e sendo o Teste 4 aquele que apresenta menor profundidade. Em contraste, a erosão do coroamento, a jusante da brecha, segue uma ordem inversa, sendo mais acentuada no Teste 4 e decresce progressivamente, com o Teste 1 a apresentar a menor erosão no coroamento. Embora a Figura 5.2 não represente a extensão total do coroamento, consegue evidenciar que este é totalmente erodido a jusante da brecha no Teste 4.

5.4.2 Estudo da erosão global do dique

Em relação à quantificação e análise da evolução global da erosão do dique, verificou-se inicialmente um desgaste parcial no talude de jusante ao mesmo tempo que a brecha é erodida em profundidade. De seguida, observou-se uma erosão mais intensa das zonas laterais da brecha, com maior intensidade a jusante da brecha conforme a velocidade de escoamento aumenta. Este comportamento é ilustrado nas Figura 5.3 e Figura 5.4, relativas aos Testes 2 e 3, respetivamente.

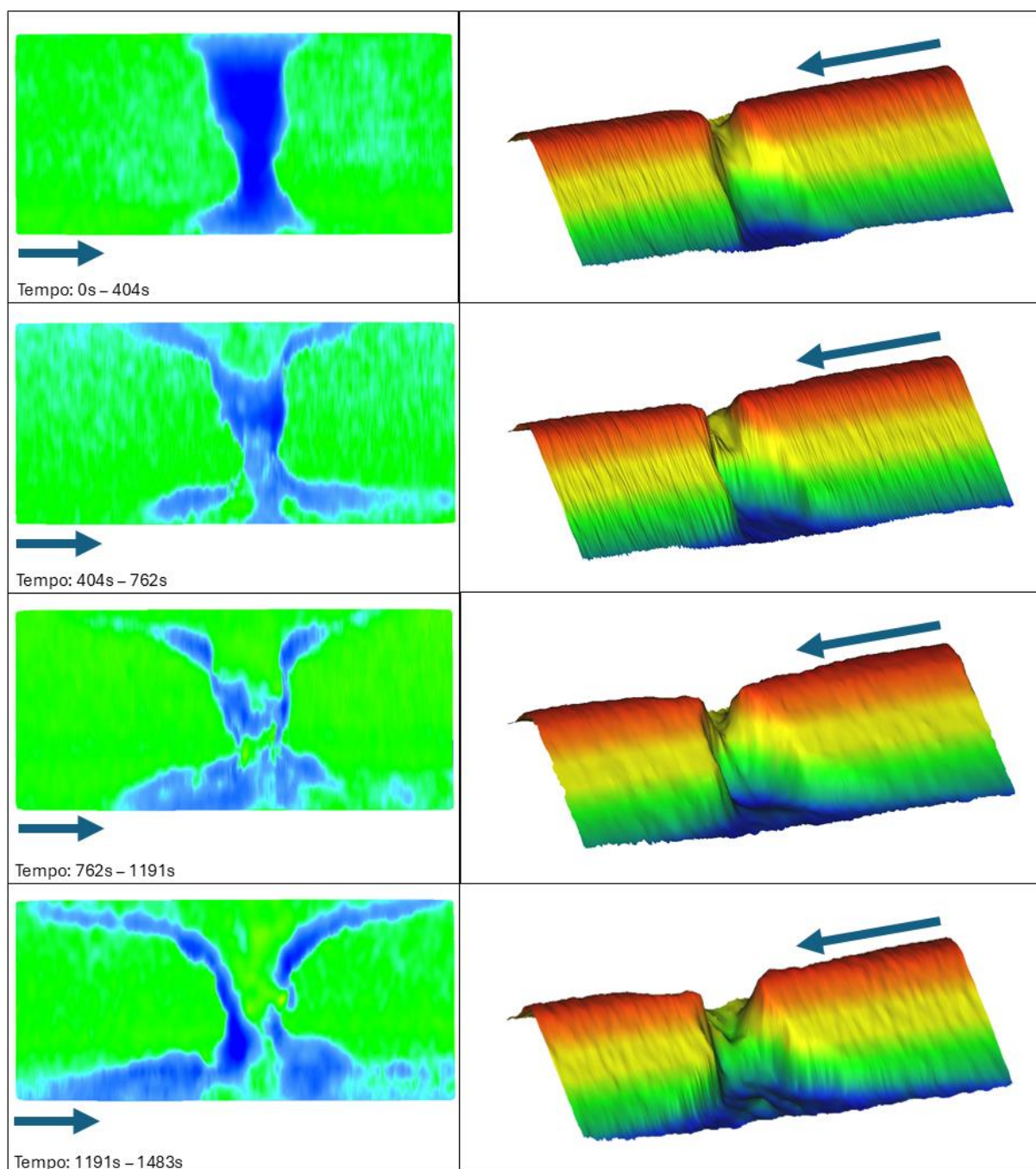


Figura 5.3 - Teste 2. Reconstrução 3D do dique erodido em vários instantes (direção do escoamento representada por uma seta azul). Esquerda - Vista em planta (zonas erodidas no intervalo de tempo referido representadas a azul); Direita - Vista em perspectiva do talude de jusante.

Na Figura 5.3, observa-se que a simetria da erosão associada à brecha se estende ao corpo do dique. Inicialmente, a erosão ocorre preferencialmente na zona central do talude de jusante, sendo seguida por uma erosão nas zonas laterais, com uma progressão aproximadamente constante.

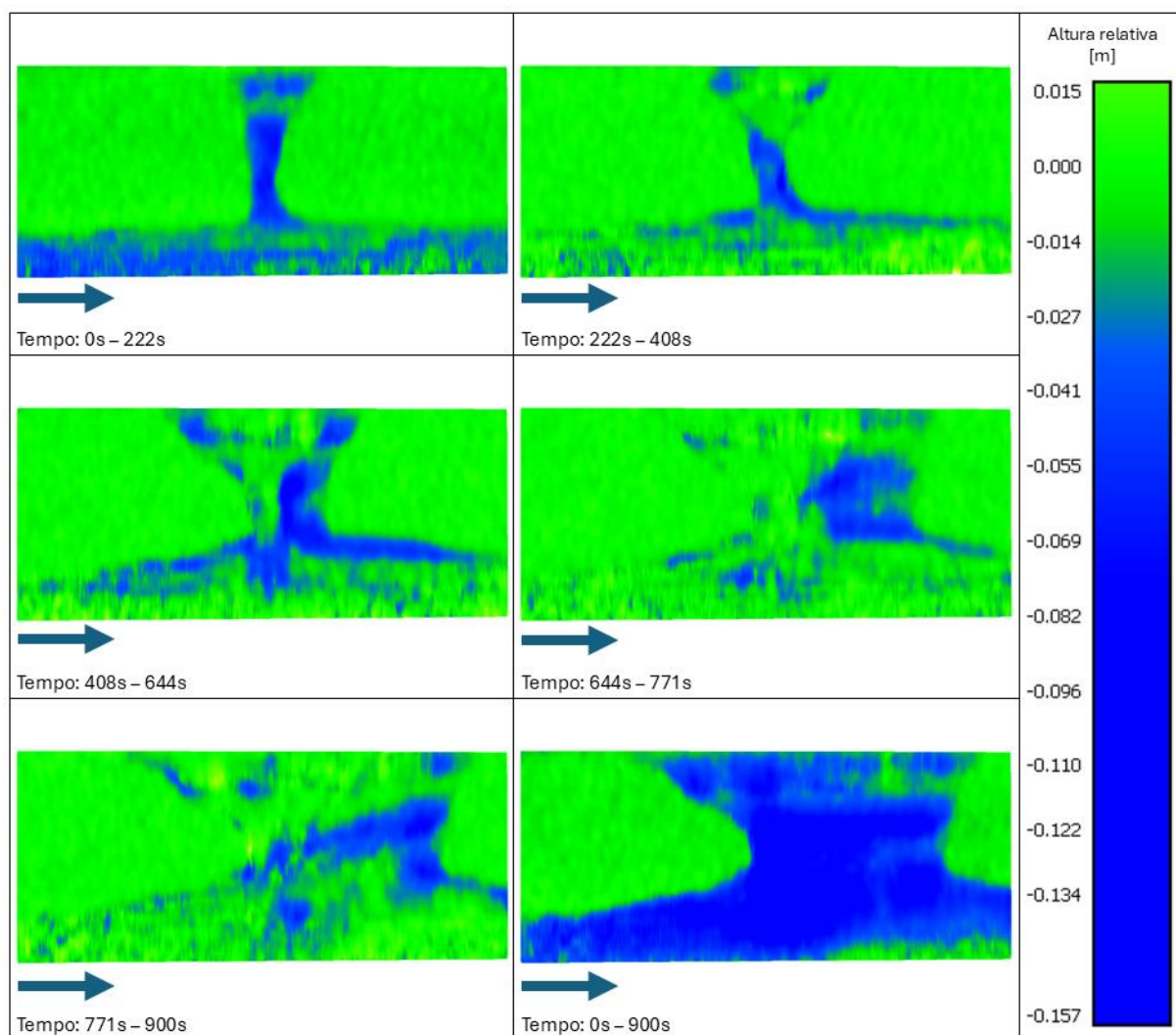


Figura 5.4 - Teste 3. Reconstrução 3D do dique erodido em vários períodos (direção do escoamento representada por uma seta azul). Vista em planta (zonas erodidas representadas a azul).

As Figura 5.4 e Figura 5.5 demonstram um padrão semelhante, com uma erosão inicial no centro do talude de jusante, seguida por uma erosão generalizada no talude de montante. De seguida, verifica-se uma erosão muito mais acentuada a jusante da brecha do que a montante, levando à perda de simetria tanto na zona da brecha como no corpo do dique.

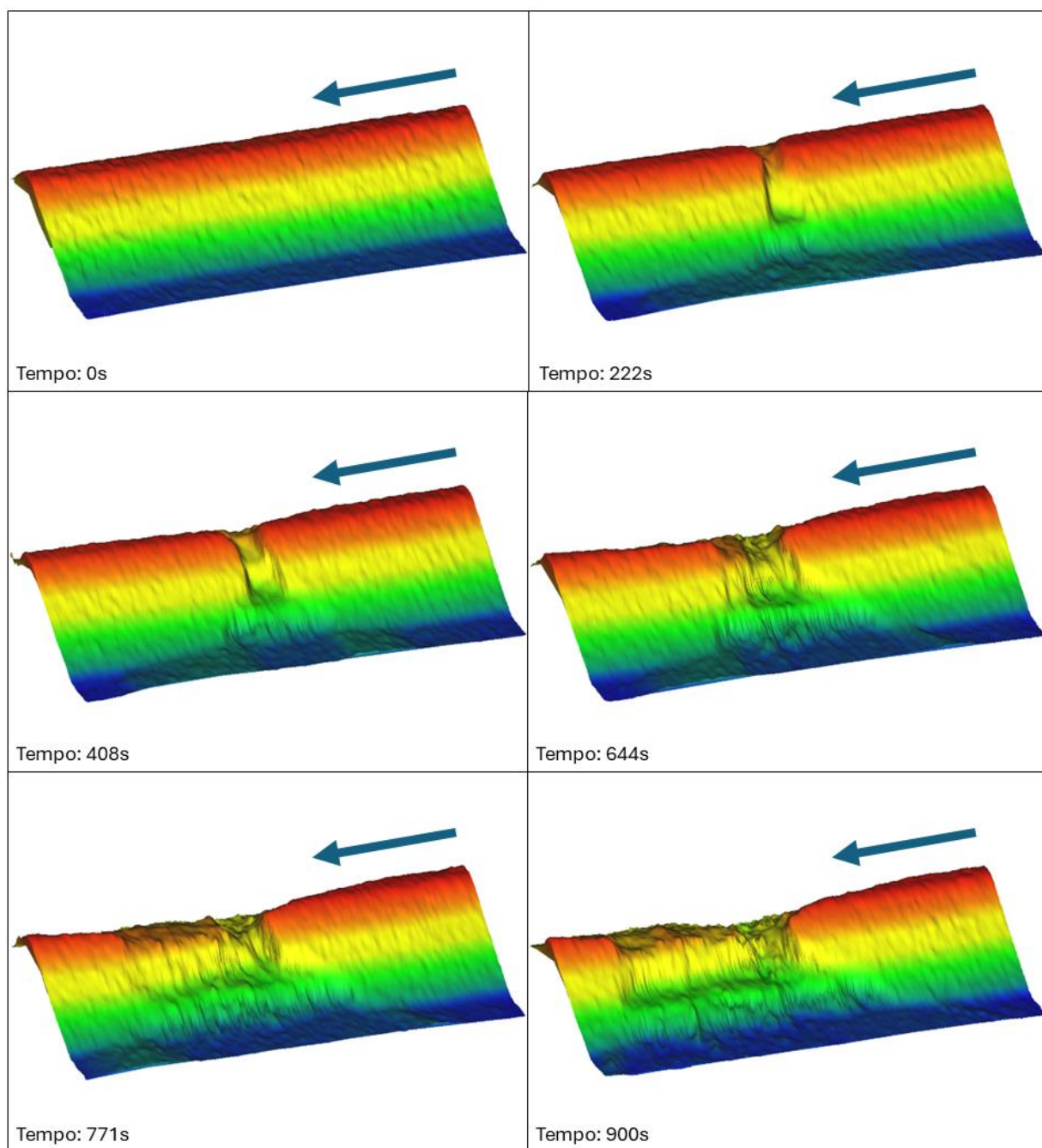


Figura 5.5 - Teste 3. Reconstrução 3D do dique erodido em vários instantes (direção do escoamento representada por uma seta azul). Vista em perspectiva do talude de jusante.

Nos Testes 1 e 2, a erosão do paramento a jusante da brecha não segue o mesmo padrão observado nos Testes 3 e 4. Nestes dois primeiros ensaios a erosão é semelhante à de um dique submetido a um escoamento perpendicular, apresentando um padrão simétrico em forma de ampulheta, tal como verificado em ensaios com barragens de aterro. Nota-se assim, uma transição clara no tipo de erosão quando o número de Froude aumenta de 0,2 para 0,3 (Figura 5.6).

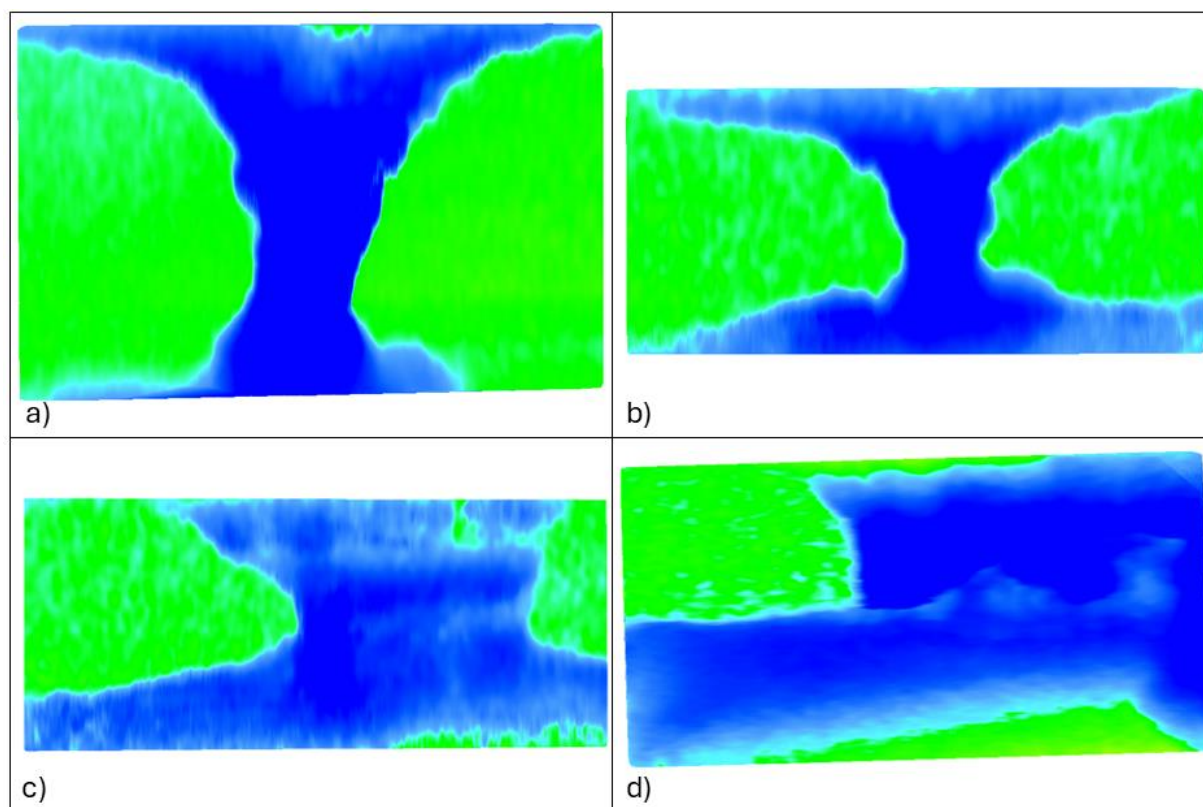


Figura 5.6 - Reconstrução 3D do dique erodido no instante final. Vista em planta (zonas erodidas representadas a azul). a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3; d) Teste 4.

Para quantificar a erosão da brecha, calcularam-se as diferenças de volume na zona da brecha entre momentos consecutivos de cada ensaio. Foi identificada uma relação evidente entre o caudal efluente da brecha e a erosão desta (Figura 5.7), verificando-se que um aumento no caudal se traduz por um aumento correspondente da erosão. No Teste 3 regista-se uma maior erosão inicial no talude de montante, enquanto nos ensaios com um número de Froude inferior a 0,2, a erosão neste talude ocorre numa fase posterior, como evidenciado pela comparação das Figura 5.3 e Figura 5.4.

No caso do Teste 4, não foi possível obter dados sobre a morfologia do dique ao longo do ensaio, estando apenas disponíveis os instantes inicial e final.

Ao analisar a taxa de erosão global do dique nos três ensaios possíveis com os dados disponíveis, verifica-se a existência de um pico inicial na quantidade de volume erodido correspondente à erosão central do talude de jusante e na zona da brecha seguido de outro crescimento devido à erosão lateral e alargamento da brecha. O pico inicial ocorre mais tarde, nos ensaios com menor velocidade de escoamento, embora a tendência de crescimento da erosão acumulada seja semelhante entre os testes. A inclinação da curva da erosão acumulada também varia consoante a velocidade, isto seja, quanto maior, maior a inclinação inicial e, consequentemente, maior será a erosão inicial (Figura 5.8).

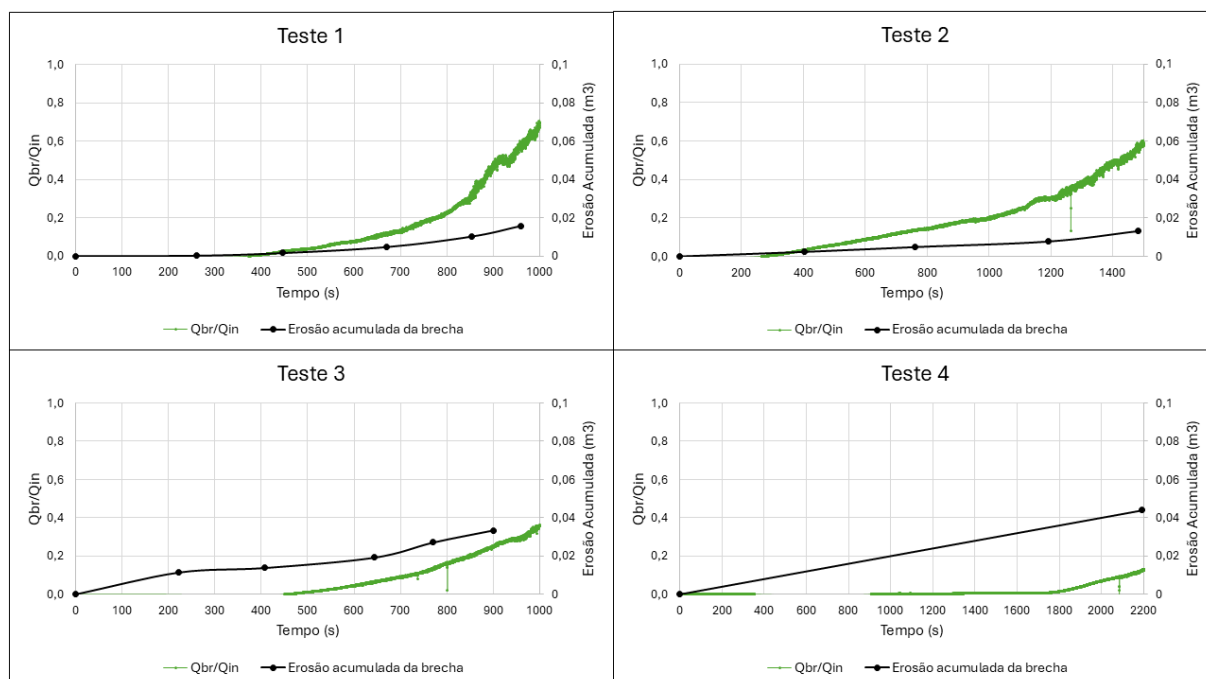


Figura 5.7 - Comparação entre a erosão acumulada da brecha e o caudal efluente da brecha para os 4 ensaios.

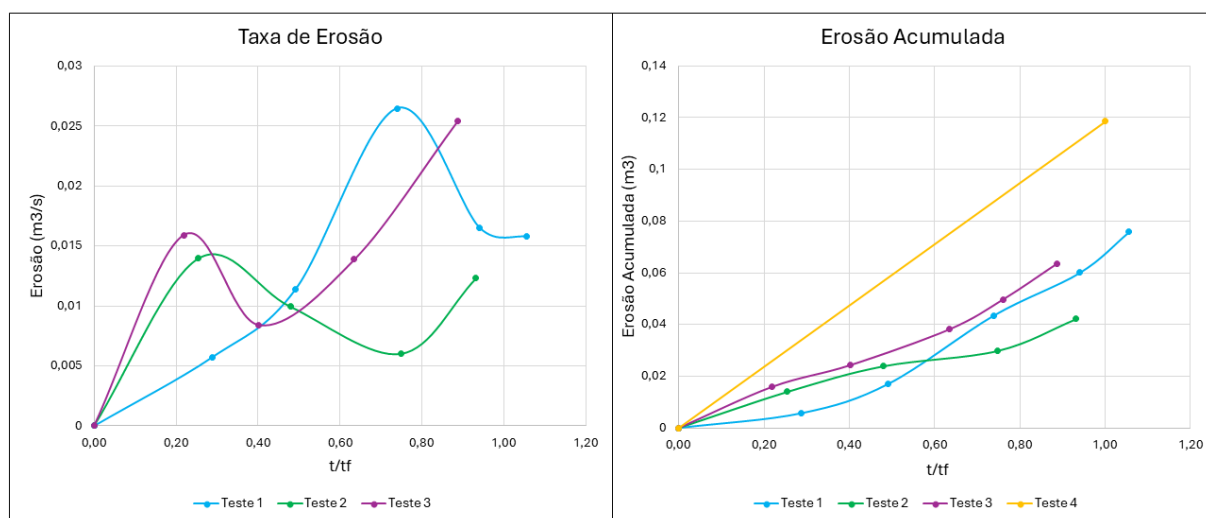


Figura 5.8 - Taxa de erosão e o crescimento da erosão acumulada para os 4 ensaios.

5.5 Estudo dos campos de velocidade na aproximação à brecha

A análise dos campos de velocidade do escoamento revelou-se essencial no estudo da rotura dos diques, uma vez que o escoamento contínuo sob o talude de montante do dique influencia diretamente a erosão, podendo criar descontinuidades e, por conseguinte, zonas vulneráveis ao galgamento.

Os campos de velocidade obtidos nos 4 ensaios realizados podem ser diretamente relacionados com os padrões de erosão observados na reconstrução 3D do dique, apresentada no subcapítulo 5.4.

Nos Testes 1 e 2, com números de Froude (Fr) de aproximadamente 0,1 e 0,2, respectivamente, observa-se uma evolução mais simétrica da brecha. A análise dos campos de velocidade é mostra que os vetores mais próximos da brecha são direcionados para o seu interior, provocando erosão em ambas as laterais da brecha, montante e jusante, resultando numa geometria simétrica (Figura 5.9).

Nos Testes 3 e 4, com Fr de aproximadamente 0,3 e 0,4 respectivamente, a direção dos vetores de velocidade difere dos ensaios anteriores. Na aproximação à brecha, os vetores apontam contra a zona a jusante da brecha, seguindo um escoamento quase paralelo ao coroamento (Figura 5.9). Este impacto da água a jusante provoca um desgaste progressivo do coroamento, que acaba por ser totalmente erodido, levando a uma geometria final da brecha assimétrica.

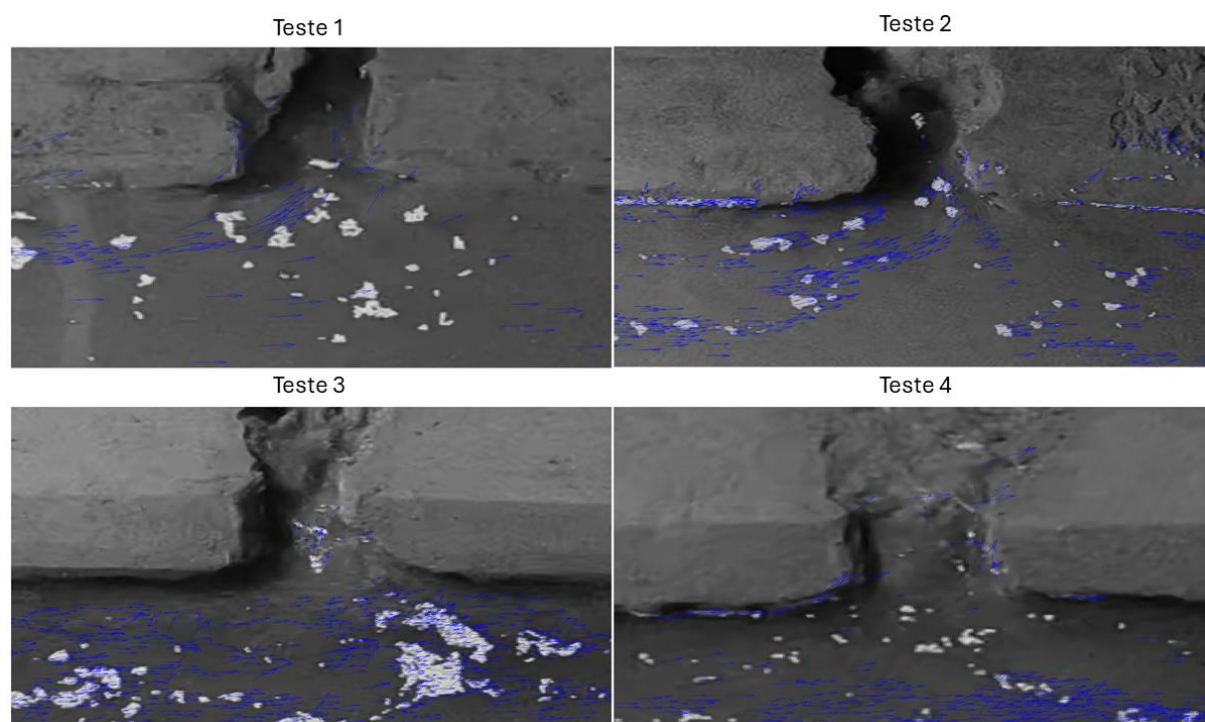


Figura 5.9 - Primeiro evento dos ensaios. Vetores de velocidade.

A progressiva abertura da brecha devido à erosão lateral altera a direção do escoamento ao longo do tempo. No início dos ensaios apenas a água junto ao coroamento é direcionada para a brecha. No entanto, à medida que a brecha alarga, passa a captar água de zonas mais afastadas do coroamento, estendendo a área de transição do escoamento ao longo da largura do canal. No entanto, no Teste 4, a velocidade do escoamento é suficientemente elevada para que as partículas dispersas no canal sigam uma trajetória paralela ao coroamento.

Assim, apenas as partículas situadas junto do coroamento são desviadas para o interior da brecha.

5.6 Análise dos hidrogramas efluentes da brecha

Um dos principais objetivos dos ensaios foi quantificar o caudal que, em vez de seguir pelo canal principal, se escoava pela brecha, à medida que esta é erodida. Para isto recorreu-se aos métodos descritos no subcapítulo 4.6.

A Figura 5.10 compara os caudais de entrada e saída nos quatro ensaios realizados. Por vezes o caudal de saída pela comporta regularizável apresenta variações abruptas nos gráficos, o que se deve à velocidade da abertura e fecho da comporta para manter o nível de água no canal principal. No Teste 3 houve um problema técnico com a sonda 5, localizada a jusante da comporta, impedindo a aquisição de dados e o cálculo do caudal de vazão pelo descarregador retangular a partir dos 800 segundos. Para garantir uma representação visual coerente, os valores não medidos foram estimados com base na tendência dos dados anteriores a esse instante.

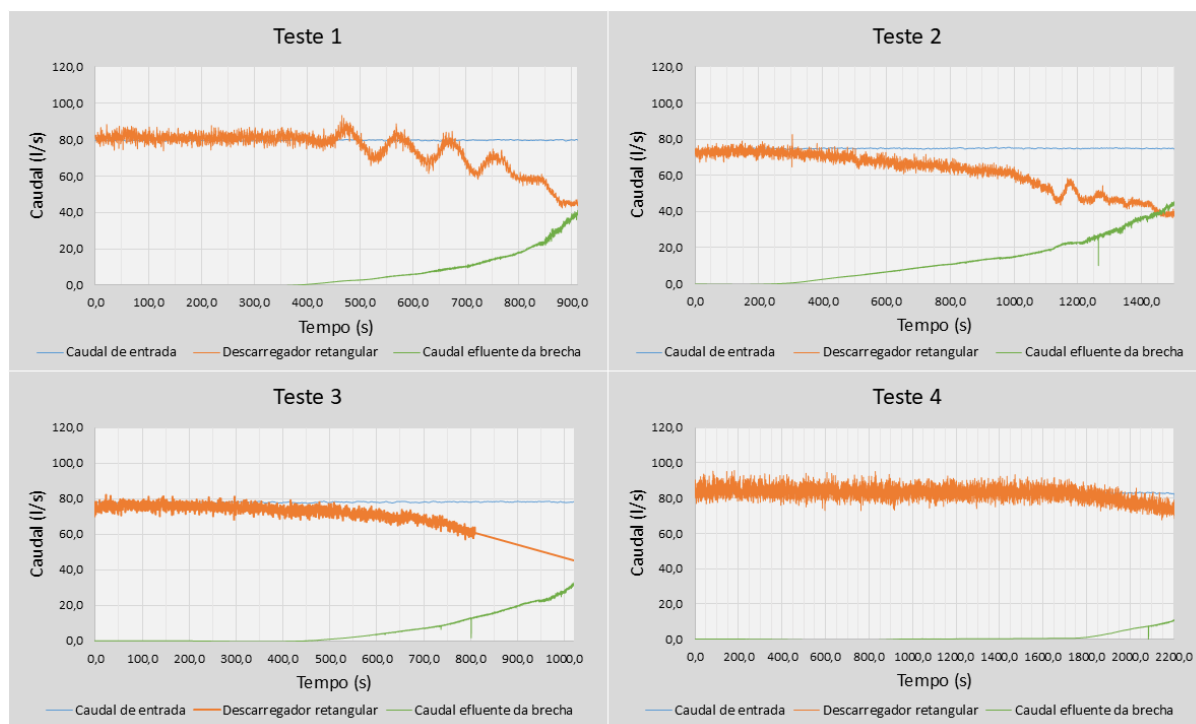


Figura 5.10 - Caudais de entrada e saída dos quatro ensaios medidos pelas curvas de vazão dos descarregadores.

Para que o nível de água atingisse a altura da brecha foi necessário inserir um caudal de entrada que representa o caudal afluente, variado entre 75 l/s e 85 l/s e mantido constante em cada ensaio.

Uma vez que o caudal de entrada permaneceu constante, observa-se que o volume de água escoado pela comporta regulável diminui assim que existe água a passar pelo descarregador retangular com corte em "V" a jusante da bacia de retenção de sedimentos, o que representa o caudal efluente da brecha. A interseção entre esses caudais ocorre quando aproximadamente metade do caudal de entrada é atingido, ou seja, cerca de 40 l/s, confirmando o balanço entre caudais.

Na Figura 5.10 pode observar-se que a quantidade de água escoada pela brecha é significativamente menor no Teste 4 que nos restantes ensaios. Este comportamento pode estar relacionado com a condição final do ensaio, uma vez ser diferente devido à erosão a jusante da brecha e perda de ligação com o talude fixo, para além do que, o volume de água que atravessa a brecha no início do ensaio é reduzido pois a elevada velocidade do escoamento no canal principal impede que o escoamento se direcione para a brecha. É apenas quando o coroamento a jusante da brecha é erodido que ocorre um aumento significativo do caudal efluente, confirmando as conclusões obtidas através do estudo dos campos de velocidade e pela observação dos vídeos.

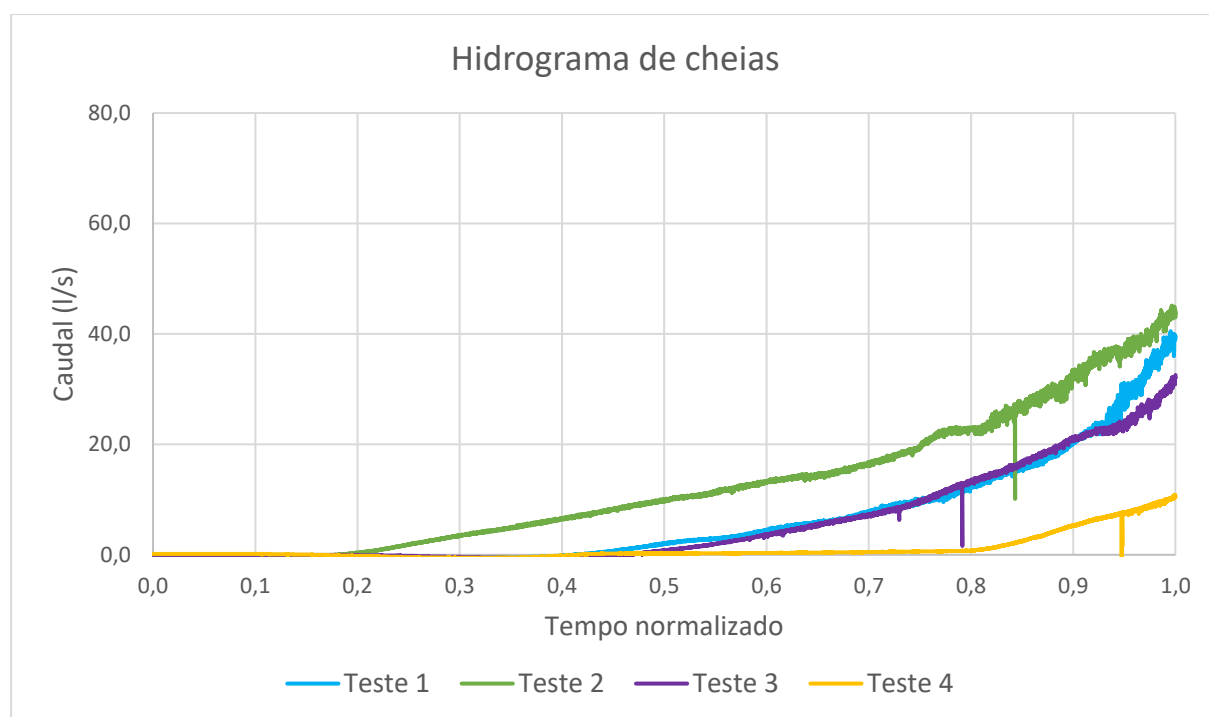


Figura 5.11 - Hidrograma de cheias dos quatro ensaios.

Para a análise do hidrograma de cheias resultante da rotura do dique, o tempo de ensaio foi normalizado com o instante final correspondente a cada ensaio. Na Figura 5.11 é possível observar que o caudal final no Teste 4 não coincide com os valores obtidos nos Testes 1, 2 e 3, o que pode, novamente, dever-se à condição final do ensaio. No entanto, caso as

condições de escoamento tivessem sido mantidas constantes, seria expectável um crescimento semelhante ao dos outros ensaios.

O aumento do caudal efluente da brecha segue uma tendência constante até atingir o valor máximo, sem se observar a ocorrência de picos isolados. Isto sugere um processo de erosão predominantemente abrasivo (erosão hidráulica), sem a ocorrência súbita de quedas de blocos de solo (erosão geotécnica) mas sim um desgaste gradual das camadas superficiais do dique.

Os valores de caudal negativos existentes nos hidrogramas podem estar relacionados com interferências nas sondas ultrassónicas ou nos respetivos cabos de alimentação, não sendo relevantes para a análise de dados.

5.7 Compatibilidade dos métodos de cálculo do caudal efluente da brecha

O caudal efluente da brecha é um parâmetro de grande importância, uma vez que representa o potencial impacto de uma cheia originada pela rotura de um dique real. Para aumentar a precisão da estimativa e avaliar a compatibilidade entre diferentes abordagens, este caudal foi calculado por três métodos distintos.

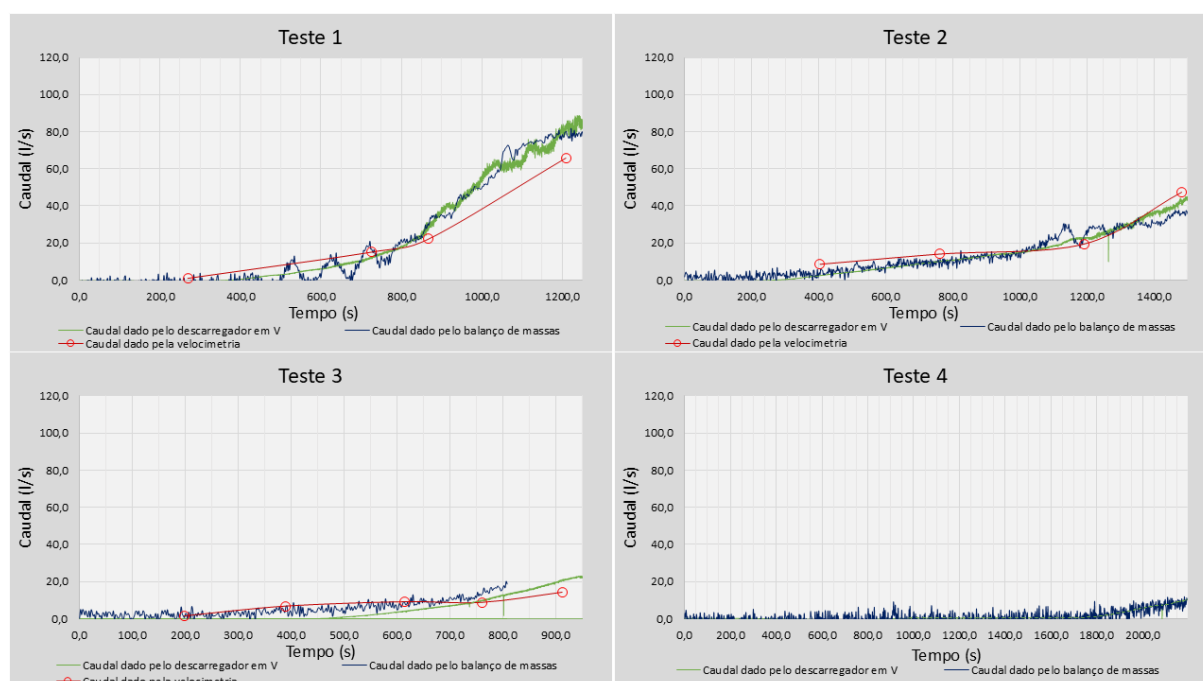


Figura 5.12 - Estimativa do caudal efluente da brecha obtido pelos três métodos utilizados para os quatro testes.

No Teste 3 não foi possível estimar o caudal pelo balanço de massas após os 800s devido a um problema técnico na sonda localizada a jusante da comporta regulável que

impossibilitou a determinação do caudal de vazão do descarregador retangular. No Teste 4, não foi possível estimar o caudal efluente da brecha devido a problemas técnicos na captação de imagens com os Azure Kinects. A ausência dessas imagens impediu a determinação da área transversal do escoamento e, por conseguinte, a determinação do caudal efluente através do método da velocimetria.

Apesar das limitações indicadas, a Figura 5.12 mostra uma elevada compatibilidade entre os caudais efluentes obtidos pelos três métodos de cálculo nos ensaios em que foi possível aplicá-los.

Estes resultados conferem credibilidade aos métodos de determinação do caudal efluente da brecha utilizados, em particular, ao cálculo baseado na combinação da velocimetria com a área transversal ao escoamento, ambas extraídas a partir de métodos de pós-processamento das imagens adquiridas nos ensaios.

5.8 Análise comparativa com outras investigações

No contexto dos estudos de rotura por galgamento de diques fluviais, existem diversas investigações com resultados semelhantes aos obtidos nesta dissertação, enquanto outras divergem ou exploram aspetos ainda não analisados.

Relativamente à erosão geral do dique verificou-se um comportamento característico de solos coesivos, sem infiltrações significativas, o que levou a uma erosão progressiva da camada superficial. Este processo origina a formação de patamares no talude de jusante sem a ocorrência de queda de blocos de solo, como visto por Pickert et al., (2011) e Rifai, (2018), seguindo as fases descritas por Kakinuma & Shimizu, (2014).

Quanto ao desenvolvimento da brecha, os resultados obtidos alinham-se com os de Islam, (2012) para um número de Froude próximo de 0,3 evidenciando um aumento significativo da erosão no talude de jusante. No entanto, para valores de Fr iguais e inferiores a 0,2, os estudos anteriores indicam um padrão de erosão diferente, contrastando com a simetria verificada nesta dissertação para Fr de 0,1 e 0,2. Esta discrepância também é observada na comparação com os trabalhos de Michelazzo, (2014) e Rifai, (2018), conforme ilustrado na Figura 5.13.

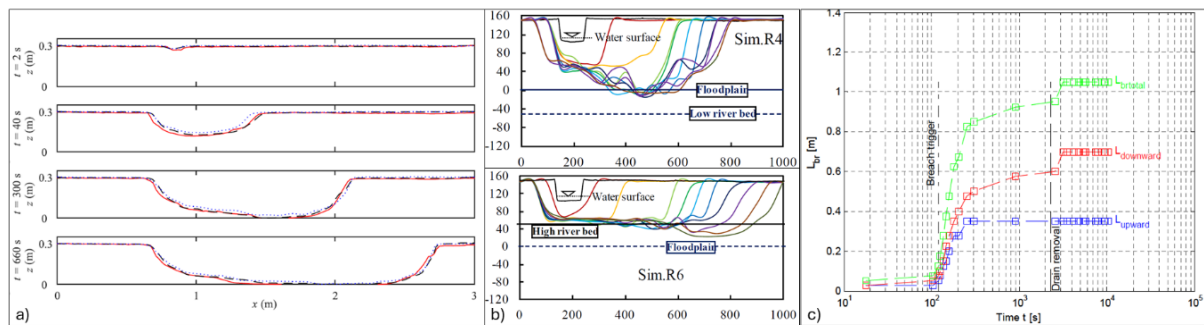


Figura 5.13 - Evolução da brecha. a) $Fr_i = 0,13$ (Rifai, 2018); b) $Fr = 0,14$ (imagem superior) e $Fr = 0,29$ (imagem inferior) (Islam, 2012); c) A montante e jusante para um $Fr_i = 0,022$ (Michelazzo, 2014).

Rifai, (2018) verificou a existência de simetria na evolução da brecha até determinado valor do número de Froude, a partir do qual a erosão passa a ser predominantemente a jusante. Este fenómeno pode dever-se à granulometria do solo utilizada, uma vez que diferentes diâmetros de partículas originam padrões de erosão distintos. Também o uso de um material granular com diâmetro uniforme na construção do dique pode levar a uma menor interligação entre partículas, ao contrário do solo utilizado nesta dissertação, que apresenta maior heterogeneidade e, conseqüentemente, maior resistência à erosão. Outro fator determinante é a variação do nível de água no canal ao longo dos ensaios. Em algumas investigações esse nível diminui à medida que a brecha aumenta, o que faz aumentar a velocidade do escoamento e, conseqüentemente o número de Froude ao longo do tempo (Figura 5.14). Nesta dissertação, contudo, houve a preocupação de manter o Fr constante, controlando a altura de água através da comporta regulável existente a jusante do canal principal.

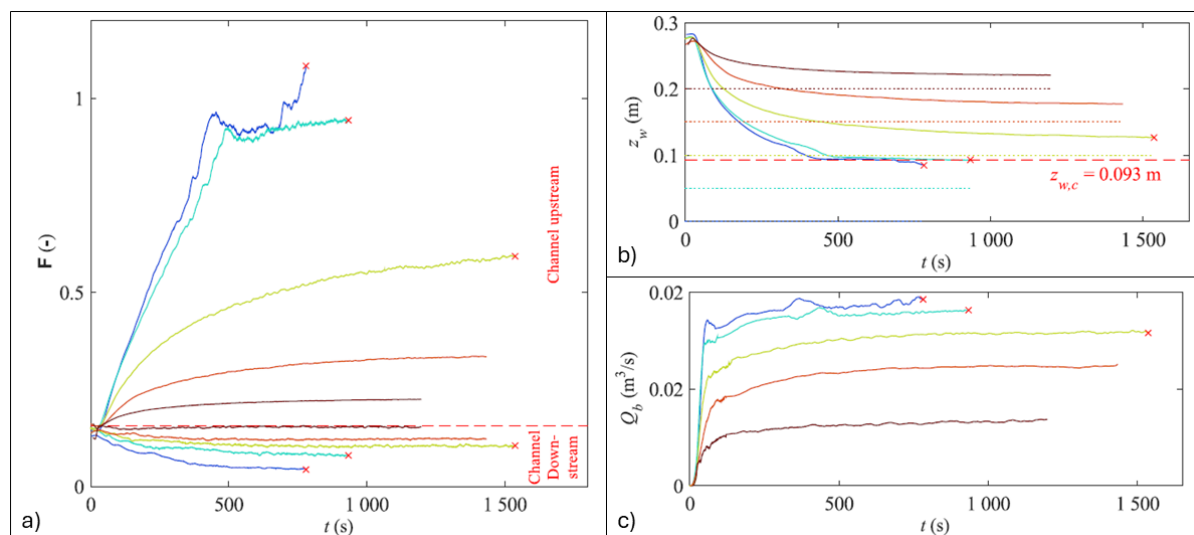


Figura 5.14 - Evolução de vários parâmetros ao longo dos ensaios a) Número de Froude. b) Altura de água no canal. c) Caudal efluente da brecha. Retirado de Rifai, (2018).

Em relação ao balanço entre caudais de entrada e saídas, verificou-se um período de atraso, antes do início de escoamento significativo pela brecha nos ensaios realizados. Este

comportamento contrasta com os resultados de várias investigações (Bhattacharai, 2015; Islam, 2012; Michelazzo, 2014; Rifai, 2018), onde o pico de caudal ocorre quase instantaneamente. No entanto, Kakinuma & Shimizu, (2014), que realizaram ensaios em escala real, observaram um atraso semelhante antes do aumento exponencial do caudal efluente da brecha.

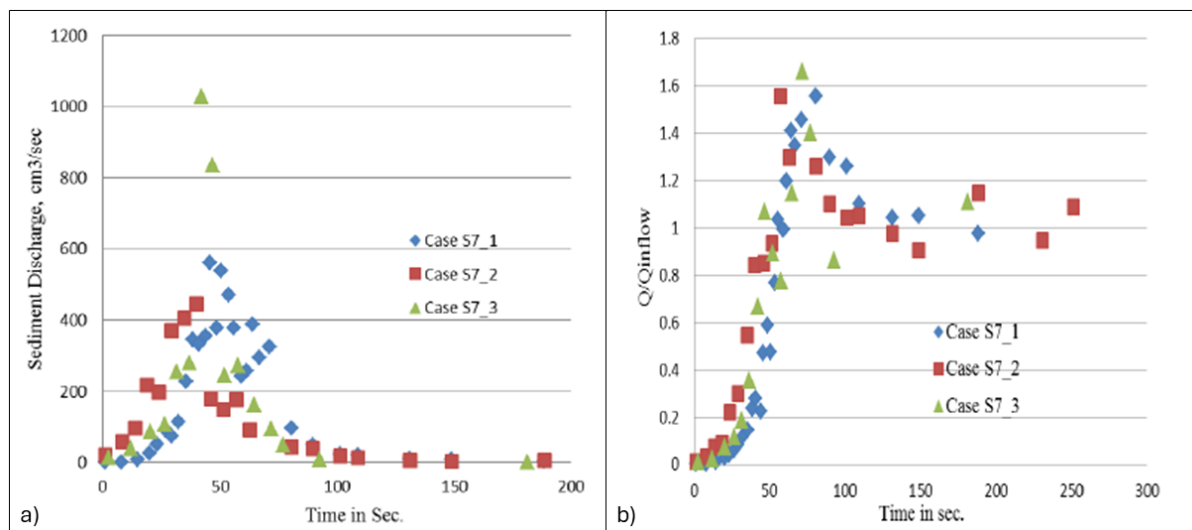


Figura 5.15 - Resultados de três ensaios com a mesma granulometria (D_{50}) a) Caudal de sólido descarregado; b) Caudal efluente da brecha. Retirado de Bhattacharai, (2015).

Por fim, a relação entre a erosão do dique e o caudal efluente da brecha é evidente também nos resultados de Bhattacharai, (2015), conforme ilustrado na Figura 5.15, apesar do crescimento desses parâmetros apresente diferenças em relação aos obtidos nesta dissertação.

CONCLUSÕES

6.1 Considerações finais e principais contributos

A presente dissertação foi realizada no âmbito de um projeto de investigação atualmente em curso, *DikesFPro – Integrating Data and Models to Understand Dikes Failure Processes* (PTDC/ECI-EGC/7739/2020), e envolveu a realização de ensaios experimentais em modelo físico reduzido, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), onde foram testadas roturas de diques fluviais com diferentes condições de escoamento no canal principal. A contribuição deste estudo para o projeto compreendeu a caracterização experimental do processo de rotura de diques fluviais por galgamento, com foco na influência do número de Froude na evolução hidro-morfodinâmica da brecha e no caudal efluente.

Nos ensaios realizados, manteve-se constante um conjunto de parâmetros essenciais, nomeadamente o caudal afluente, o tipo de material do dique, o teor de água e o grau de compactação, variando-se apenas o número de Froude entre ensaios. Esta variação foi obtida, alterando as dimensões do dique ou do canal principal, o que permitiu modificar a velocidade do escoamento na aproximação ao dique.

A análise dos ensaios foi baseada tanto nos dados adquiridos pelas sondas, como nos métodos de pós-processamento de imagem digital. Destacam-se a técnica *Particle Tracking Velocimetry* (PTV), utilizada para caracterizar os campos de velocidade do escoamento de aproximação ao dique, e a reconstrução 3D da brecha a partir de imagens de profundidade obtidas com os sensores Azure Kinect. A combinação destas metodologias possibilitou a estimativa local do caudal efluente da brecha, permitindo a obtenção do respetivo hidrograma de rotura.

A análise dos resultados confirmou que o número de Froude é um parâmetro determinante na evolução do processo de rotura, influenciando tanto a geometria da brecha como a progressão da erosão do corpo do dique. Em particular, verificou-se uma transição no

padrão de erosão entre escoamentos com $Fr = 0,2$ e $Fr = 0,3$. Para $Fr \leq 0,2$, a erosão apresentou um comportamento semelhante ao de barragens, assumindo uma geometria simétrica em forma de ampulheta. No entanto, para $Fr \geq 0,3$, observou-se a perda desse efeito de simetria, registrando-se uma erosão significativamente mais intensa a jusante da brecha.

Os campos de velocidade obtidos na aproximação à brecha explicam esta variação nos padrões erosivos, evidenciando que a zona de transição do escoamento se desloca progressivamente mais para jusante do eixo da brecha, à medida que a velocidade no canal principal aumenta. Adicionalmente, os hidrogramas dos ensaios mostraram que o aumento do caudal efluente da brecha ocorre mais tardiamente quanto maior for a velocidade de escoamento, como visto nos Testes 2, 3 e 4. No entanto, esta relação não se verificou de forma consistente no Teste 1, sugerindo a necessidade de investigações adicionais para compreender melhor este comportamento.

Relativamente ao cálculo do caudal efluente da brecha, os três métodos testados apresentaram resultados semelhantes, validando a utilização do método baseado na velocimetria e área transversal. Este factor é particularmente relevante, pois demonstra que este método poderá ser aplicado na monitorização em tempo real do caudal efluente em eventos reais de rotura, oferecendo um importante contributo para a previsão e gestão do risco de cheias. No entanto, para aplicações a casos reais, será essencial considerar a estimativa dos campos de velocidade em profundidade para melhorar a precisão das estimativas do caudal efluente da brecha.

A comparação dos resultados obtidos com investigações anteriores destacou uma diferença significativa na evolução da brecha para Fr inferiores a 0,2. Enquanto na presente investigação se obteve uma geometria simétrica e estável ao longo do ensaio, estudos anteriores apresentaram uma evolução diferente, possivelmente devido à redução progressiva do nível da água no canal desses ensaios. Em contraste, no presente estudo, o nível de água foi mantido constante ao longo de todo o ensaio, garantindo condições hidráulicas controladas e semelhantes às que ocorrem na realidade em diques fluviais.

Um dos contributos mais inovadores deste trabalho foi a utilização de tecnologia LiDAR para a reconstrução 3D da brecha e a aplicação do método *Particle Tracking Velocimetry* (PTV) na análise dos campos de velocidade. Estas técnicas permitiram uma caracterização mais detalhada do escoamento e do transporte de sedimentos, contribuindo para um conhecimento mais aprofundado dos padrões de erosão envolvidos no processo de rotura. Os dados obtidos representam um recurso valioso para a calibração e validação de modelos numéricos, possibilitando a melhoria das ferramentas de previsão da evolução da rotura de diques fluviais e do hidrograma de rotura subsequente.

Além do impacto técnico e científico, os resultados desta dissertação têm implicações práticas significativas. A compreensão detalhada do processo de rotura de diques fluviais é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação do risco de cheias, nomeadamente na definição de critérios para reforço estrutural de diques existentes e no desenvolvimento de diretrizes para o dimensionamento de novas infraestruturas de proteção contra inundações. O conhecimento gerado poderá também apoiar entidades responsáveis pela gestão do risco, facilitando a tomada de decisão em cenários de emergência e contribuindo para a segurança das populações e infraestruturas localizadas em zonas vulneráveis a estes eventos.

6.2 Desenvolvimentos futuros

A investigação sobre a rotura de diques fluviais tem vindo a ganhar uma relevância crescente a nível global devido ao seu impacto no planeamento urbano, na segurança das infraestruturas e na mitigação dos riscos de cheia. Assim, o aprofundamento do conhecimento sobre este fenómeno, é fundamental, podendo ser adquirido a partir de diferentes abordagens científicas, entre as quais, a adotada no presente estudo.

Um dos objetivos do projeto de investigação, no qual esta dissertação está incorporada, visa o desenvolvimento de um modelo numérico capaz de prever a evolução temporal da rotura de diques fluviais, com especial foco na caracterização do hidrograma de cheia efluente. Para atingir este objetivo, é essencial recolher dados experimentais detalhados que permitam parametrizar e calibrar o modelo. Assim, os quatro ensaios realizados nesta dissertação fazem parte de uma campanha experimental mais abrangente, centrada na rotura por galgamento de diques homogêneos, sendo o número de Froude apenas um dos vários parâmetros a considerar na formulação de um modelo numérico robusto e adaptado à realidade.

Embora esta dissertação tenha permitido obter avanços na compreensão do impacto da variação do número de Froude do escoamento na evolução da rotura por galgamento de diques fluviais, ainda se identificam diversas direções para investigações futuras, com o objetivo de complementar/expandir o conhecimento:

1. Investigação sobre diferentes tipos de diques (composição e geometria) e mecanismos de rotura (galgamento/ erosão interna/ instabilidade geotécnica).

Para tornar os modelos numéricos mais representativos da realidade, é essencial expandir os estudos para diferentes tipos de diques e mecanismos de rotura. Assim, além dos diques homogêneos com material granular utilizados neste estudo, devem ser analisados diques com outras composições, como solos coesivos, enrocamento e diques zonados, avaliando a sua resistência à erosão.

A geometria do dique, incluindo a inclinação dos taludes e a largura do coroamento, também deve ser explorada para compreender o seu impacto na estabilidade da estrutura. É também fundamental estudar outros mecanismos de rotura, como erosão interna e instabilidade geotécnica, garantindo uma abordagem mais abrangente da segurança destas infraestruturas.

2. Análise do efeito de fundos erodíveis e não erodíveis do rio e integração de proteções nos taludes dos diques.

A interação entre o escoamento no rio e o fundo do canal pode influenciar significativamente o início e evolução da erosão do dique e respetiva morfologia da brecha, sendo também um parâmetro importante a considerar. Estudos futuros devem analisar a influência de diferentes composições do leito do rio, desde leitos rochosos a fundos altamente erodíveis, no desenvolvimento da rotura. Além disso, deve também estudar-se o impacto da adoção de camadas de proteção artificial nos taludes dos diques, como vegetação, mantas geotêxteis e revestimentos de enrocamento, na resistência aos processos erosivos e estabilização dos taludes.

3. Calibração e validação (ou desenvolvimento) de modelos numéricos.

A calibração e validação de modelos numéricos é essencial para garantir estimativas confiáveis da evolução da rotura de diques fluviais. Os dados experimentais obtidos neste estudo podem ser utilizados para calibrar/validar modelos numéricos existentes, avaliando a capacidade de reprodução da evolução da brecha, dos padrões de erosão e do hidrograma efluente da rotura. Modelos numéricos mais avançados podem ainda incorporar efeitos tridimensionais e a interação entre o escoamento e a estrutura do dique, aumentando a sua capacidade de previsão, tornando-os assim, ferramentas mais eficazes de apoio à gestão do risco.

4. Aplicação dos resultados a casos reais e estudos de avaliação e gestão de risco.

A aplicação dos resultados de estudos deste tipo a casos reais é fundamental para validar modelos numéricos de previsão de hidrogramas de cheia e apoiar a gestão do risco nas zonas vulneráveis. A comparação com dados históricos de roturas de diques e medições de campo permite também melhorar a confiança nas estimativas realizadas e definir estratégias mais eficazes para reforço e manutenção deste tipo de infraestruturas de proteção contra cheias. Em última análise, esta abordagem contribuirá para auxiliar as entidades responsáveis na tomada de decisões em situações de emergência, reduzindo o impacto de eventos extremos e aumentando a segurança das populações expostas ao risco de inundações.

Como se começou por referir, este trabalho está inserido no projeto *DikesFPro*. Neste âmbito refere-se que, alguns dos aspetos relativos a investigações futuras, acima referidos, já estão a ser abordados no mesmo, designadamente o mecanismo de rotura por erosão interna, o tipo de material e a variação do teor de água do dique fluvial.

Em conclusão, a continuidade desta linha de investigação contribuirá para uma melhor compreensão do comportamento dos diques em situações de rotura, permitindo a adoção de estratégias mais eficazes para a redução do impacto das cheias e proteção das comunidades expostas a este risco. A integração de novas variáveis experimentais, a validação de modelos numéricos e a aplicação dos resultados em estudos de vulnerabilidade reais serão fundamentais para reforçar a segurança deste tipo de infraestruturas hidráulicas e mitigar os efeitos das inundações.

BIBLIOGRAFIA

- Aleixo, R., Soares-Frazão, S., & Zech, Y. (2011). Velocity-field measurements in a dam-break flow using a PTV Voronoï imaging technique. *Experiments in Fluids*, 50(6), 1633–1649. <https://doi.org/10.1007/s00348-010-1021-y>
- APA. (2020). *Reconstruídos Dique e Canal Condutor Geral da Margem Direita do Leito Central do Mondego*.
- ASTM D698-12. (2021). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*.
- Balisticchi, M., Moretti, G., Ranzi, R., & Orlandini, S. (2021). Failure Probability Analysis of Levees Affected by Mammal Bioerosion. *Water Resources Research*, 57(12). <https://doi.org/10.1029/2021WR030559>
- Baumer. (2018). *Ultrasonic distance measuring sensors U500.DA0 EN*. www.baumer.com
- Bento, A. M., Amaral, S., Viseu, T., Cardoso, R., & Ferreira, R. M. L. (2017). Direct Estimate of the Breach Hydrograph of an Overtopped Earth Dam. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001294](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001294)
- Bhattarai, P. K. (2015). *Study on River Dyke Breach Characteristics by Overtopping Flow* [PhD Thesis]. Kyoto University.
- Capart, H., Young, D. L., & Zech, Y. (2002). Voronoï imaging methods for the measurement of granular flows. <https://doi.org/10.1007/s003480100351>
- Chinnarasri, C., Tingsanchali, T., Weesakul, S., & Wongwises, S. (2003). Flow patterns and damage of dike overtopping. In *Article in International Journal of Sediment Research*. <https://www.researchgate.net/publication/292600636>
- Cunha, P. P. (2002). *Vulnerabilidade E Risco Resultante Da Ocupação De Uma Planície Aluvial - O Exemplo das Cheias do Rio Mondego (Portugal Central), no Inverno de 2000/2001*.
- Daniel, D. E., & Asce, D. M. (2014). *A Perspective on the Levee Failures in New Orleans from Hurricane Katrina*.

- Danka, J., & Zhang, L. M. (2015). Dike Failure Mechanisms and Breaching Parameters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(9). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001335](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001335)
- Dankers, R., Arnell, N. W., Clark, D. B., Falloon, P. D., Fekete, B. M., Gosling, S. N., Heinke, J., Kim, H., Masaki, Y., Satoh, Y., Stacke, T., Wada, Y., & Wisser, D. (2014). First look at changes in flood hazard in the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project ensemble. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9), 3257–3261. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302078110>
- Di Baldassarre, G., Viglione, A., Carr, G., Kuil, L., Yan, K., Brandimarte, L., & Blöschl, G. (2015). Debates - Perspectives on socio-hydrology: Capturing feedbacks between physical and social processes. In *Water Resources Research* (Vol. 51, Issue 6, pp. 4770–4781). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/2014WR016416>
- Ebrahimi, M., Delpierre, N., Gilles, A., & Soares-Frazão, S. (2024). *Monitoring medium-scale dike breaching using photogrammetry: preliminary results*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13556.36485>
- Hanson, G. J., & Hunt, S. L. (2006). Lessons Learned Using Laboratory Jet Method To Measure Soil Erodibility Of Compacted Soils. In *Applied Engineering in Agriculture* (Vol. 23, Issue 3).
- Horaud, R., Hansard, M., Evangelidis, G., & Ménier, C. (2016). An overview of depth cameras and range scanners based on time-of-flight technologies. *Machine Vision and Applications*, 27(7), 1005–1020. <https://doi.org/10.1007/s00138-016-0784-4>
- Islam, S. (2012). *Study On Levee Breach And Successive Disasters In Low-Land Through Numerical And Experimental Approaches* [PhD]. Nagoya University.
- Jónatas, R., Palinhos, M., Amaral, S., Aleixo, R., Viseu, T., & Ferreira, R. M. L. (2023). Validation Of Experimental Facility And Monitoring Layout For Dike Breach Experiments. In *Experimental Mechanics in Engineering and Biomechanics*. https://paginas.fe.up.pt/~icem20/proceedings_icem20/-681-
- Jornal Público. (2019, December 23). *Cheias em Montemor-o-Velho: as imagens aéreas captadas pelos fuzileiros*. <https://www.publico.pt/2019/12/23/video/cheias-montemorovelho-imagens-aereas-fuzileiros-20191223-152444>
- Kakinuma, T., & Shimizu, Y. (2014). Large-Scale Experiment and Numerical Modeling of a Riverine Levee Breach. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(9). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000902](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000902)
- Kheloui, L. (2022). *Physical and numerical modelling of overtopping induced fluvial dikes breaching* [PhD Thesis, Ecole des Ponts ParisTech]. <https://pastel.hal.science/tel-04205552>

- Kim, K., & Kim, J. (2015). Dynamic displacement measurement of a vibratory object using a terrestrial laser scanner. *Measurement Science and Technology*, 26(4). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/4/045002>
- Knox, R. L., Morrison, R. R., & Wohl, E. E. (2022). A river ran through it: Floodplains as America's newest relict landform. In *Sci. Adv* (Vol. 8).
- Michelazzo, G. (2014). *Breaching of river levees: analytical flow modelling and experimental hydromorphodynamic investigations* [PhD].
- Michelazzo, G., Oumeraci, H., & Paris, E. (2018). New Hypothesis for the Final Equilibrium Stage of a River Levee Breach due to Overflow. *Water Resources Research*, 54(7), 4277–4293. <https://doi.org/10.1029/2017WR021378>
- Microsoft. (2022). *Azure Kinect DK hardware specifications*. <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/kinect-dk/hardware-specification>
- Mimura, N. (2013). Sea-level rise caused by climate change and its implications for society. In *Proceedings of the Japan Academy Series B: Physical and Biological Sciences* (Vol. 89, Issue 7, pp. 281–301). Japan Academy. <https://doi.org/10.2183/pjab.89.281>
- Morris, M., France, S., Hassan, M., Wallingford, H. R., & Visser, P. J. (2009). *Breaching Processes: A state of the art review*. www.floodsite.net
- Orlandini, S., Moretti, G., & Albertson, J. D. (2015). Evidence of an emerging levee failure mechanism causing disastrous floods in Italy. *Water Resources Research*, 51(10), 7995–8011. <https://doi.org/10.1002/2015WR017426>
- Pickert, G., Weitbrecht, V., & Bieberstein, A. (2011). Breaching of overtopped river embankments controlled by apparent cohesion. *Journal of Hydraulic Research*, 49(2), 143–156. <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.552468>
- Powledge, G. R., Ralston, D. C., Miller, P., Chen, Y. H., Clopper, P. E., & Temple, D. M. (1989). *Mechanics Of Overflow Erosion On Embankments. II: Hydraulic And Design Considerations*.
- Quintela, A. de C. (2002). *Hidráulica* (Fundação Calouste Gulbenkian, Ed.; 8ª Edição).
- Rifai, I. (2018). *Modélisation physique et numérique des écoulements générés par la formation de brèche dans les digues fluviales soumises aux surverses* [PhD Thesis]. Université Paris - Est.
- Rifai, I., Erpicum, S., Archambeau, P., Violeau, D., Piroton, M., El Kadi Abderrezzak, K., & Dewals, B. (2017). Overtopping induced failure of noncohesive, homogeneous fluvial dikes. *Water Resources Research*, 53(4), 3373–3386. <https://doi.org/10.1002/2016WR020053>
- Schmocker, L. (2011). *Hydraulics of dike breaching*. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000063147>
- Schmocker, L., & Hager, W. H. (2009). Modelling dike breaching due to overtopping. *Journal of Hydraulic Research*, 47(5), 585–597. <https://doi.org/10.3826/jhr.2009.3586>

- Sequeiros, O. E. (2012). Estimating turbidity current conditions from channel morphology: A Froude number approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(4). <https://doi.org/10.1029/2011JC007201>
- Sills, G. L., Asce, M., Vroman, ; N D, Wahl, ; R E, & Schwanz, N. T. (2008). *Overview of New Orleans Levee Failures: Lessons Learned and Their Impact on National Levee Design and Assessment*. <https://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412008134:5556>
- Singh, V. P. (1996). Dam Breaching. In *Dam Breach Modeling Technology* (1st ed., Vol. 17). Springer Dordrecht. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-94-015-8747-1>
- Spinewine, B. (2000, March 21). *GRAnular Flows Imaging TEchniques*. //LEONARDO/FTP/Site4.21-Ftp3-Trento/Grafite/Welcome to Grafite.Html.
- Sundt, H., Alfredsen, K., Museth, J., & Forseth, T. (2022). Combining green LiDAR bathymetry, aerial images and telemetry data to derive mesoscale habitat characteristics for European grayling and brown trout in a Norwegian river. *Hydrobiologia*, 849(2), 509–525. <https://doi.org/10.1007/s10750-021-04639-1>
- Tellman, B., Sullivan, J. A., Kuhn, C., Kettner, A. J., Doyle, C. S., Brakenridge, G. R., Erickson, T. A., & Slayback, D. A. (2021). Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature*, 596(7870), 80–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w>
- Trung, L. H. (2014). *Overtopping on grass covered dikes - Resistance and failure of the inner slopes* [Ph.D Thesis]. Delft University of Technology.
- Wu, S., Yu, M., Wei, H., Liang, Y., & Zeng, J. (2018). Non-symmetrical levee breaching processes in a channel bend due to overtopping. *International Journal of Sediment Research*, 33(2), 208–215. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.09.007>



2025

FRANCISCO GOUVEIA

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA ROTURA DE DIQUES FLUVIAIS POR GALGAMENTO