



ISEL



Caracterização Experimental da Rotura de Diques Fluviais por Galgamento

MARTA GONÇALVES PALINHOS
(Licenciada em Tecnologias e Gestão Municipal)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, na Área de Especialização de Hidráulica

Orientadores:

Doutora Sílvia Rute Caleiro Amaral
Doutor Rui Jorge Ferreira Aleixo

Júri:

Presidente: Doutora Maria do Carmo Cachão Conde
Vogais:

Doutor Nelson Jorge Gaudêncio Carriço
Doutora Sílvia Rute Caleiro Amaral

setembro de 2024

Caracterização Experimental da Rotura de Diques Fluviais por Galgamento

MARTA GONÇALVES PALINHOS
(Licenciada em Tecnologias e Gestão Municipal)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, na Área de Especialização de Hidráulica

Orientadores:

Doutora Sílvia Rute Caleiro Amaral (ISEL/LNEC)
Doutor Rui Jorge Ferreira Aleixo (Institute of Hydro- Engineering of the Polish Academy of Sciences)

Júri:

Presidente: Doutora Maria do Carmo Cachão Conde (ISEL)

Vogais:

Doutor Nelson Jorge Gaudêncio Carriço (ISEL/LNEC)
Doutora Sílvia Rute Caleiro Amaral (ISEL/LNEC)

setembro de 2024

*Para os meus avós
Encarnação e Silvino*

Agradecimentos

Importa agradecer a todos os que fizeram parte desta caminhada e que de alguma forma contribuíram para o meu sucesso académico:

Em primeiro lugar, à minha orientadora, Sílvia Amaral, pela partilha de conhecimento, disponibilidade, confiança, motivação e preocupação constante ao longo deste trabalho e por ter criado não só um ambiente amigável, como uma aprendizagem única.

Ao meu coorientador, Rui Aleixo, pelas formações incansáveis de MATLAB, pela confiança e motivação. Obrigada pela sua elevada disponibilidade e pela promoção de um ambiente de trabalho descontraído.

Ao Ricardo Jónatas pelo conhecimento transferido e pela ajuda interminável para a realização desta dissertação. Obrigada pelo companheirismo, simpatia e paciência, assim como pelas palavras de motivação. Também de assinalar são os momentos mais descontraídos que passámos assim como o excelente ambiente de trabalho criado. Sem ele, tenho a certeza que a dissertação teria sido muito mais difícil de concretizar. Foram meses de reflexões, partilha de conhecimentos e saberes que me enriqueceram e muito contribuíram para o desenvolvimento das minhas competências enquanto futura engenheira.

Ao senhor Timóteo e ao senhor Gonçalves, assim como ao Nuno Aido, um grande obrigado pela ajuda na construção dos diques experimentais e pela partilha de conhecimento e experiência, sempre com um ambiente descontraído. De facto, o trabalho experimental teria sido muito mais difícil sem a sua colaboração.

Ao LNEC, na pessoa da Engenheira Teresa Viseu, agradeço o acolhimento caloroso e os ensinamentos que tornaram possível a realização desta dissertação de mestrado.

Aos meus amigos que me ajudaram a levantar a cabeça e a ter vontade para continuar a minha dissertação, em especial à Margarida Junqueira. Vocês ficam para sempre no meu caminho e obrigada por acreditarem no meu sucesso e fazerem parte do meu percurso académico.

Ao André Filipe Lopez dos Santos, meu amor, pela constante motivação, amor, esforço e apoio por estar presente nesta fase da minha vida. Obrigada por acreditar e por viver o momento como se fosse dele. Sem o André, não teria tido a motivação para terminar.

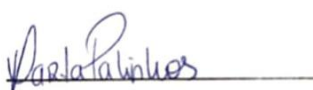
À minha família pelo apoio nas fases mais difíceis, pela motivação que me deram e pelas palavras de força. Em especial aos meus avós a quem devo muito do que sou hoje. Aos meus pais, que tanto se esforçaram por me darem o melhor, mas em especial à minha mãe, a voz da razão, da paciência, e por sempre me acalmar com as palavras que encaixavam nos momentos mais ansiosos e difíceis.

Às minhas irmãs, Maria e Mariana, pelo amor constante que me deram, apoio incondicional e por acreditarem em mim. Sem elas nada disto teria sido possível. Elas são a minha vida, a minha força, a minha vontade de querer continuar e os meus pilares. Sou muito grata! Obrigada!

Declaração de integridade

Declaro que esta(e) dissertação / trabalho de projeto / relatório de estágio é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor


Lisboa, 30. de Setembro. de 2024

Caracterização Experimental da Rotura de Diques Fluviais por Galgamento

Resumo

A manifestação das alterações climáticas tem vindo a provocar a rotura de barragens de aterro e diques. Estas provocações apresentaram particular interesse no campo da investigação ao nível da rotura de barragens de aterro – área com maior incidência de estudo. Todavia, a rotura de diques fluviais também apresenta interesse, sendo vários os motivos que suportam a necessidade de desenvolver novos estudos acerca de acidentes nesta matéria. Entre os motivos que podem originar a rotura de um dique, podem existir a ocorrência de graves inundações afetando as áreas urbanas e rurais e resultando em perdas humanas, económicas e ambientais significativas. A rotura de um dique é um processo complexo dependente não apenas das condições do escoamento no rio, mas também das condições geotécnicas do corpo do dique. Assim, a realização de estudos dedicados, que permitam aprofundar o conhecimento sobre os processos de desencadeamento e evolução da rotura, contribuirão para uma melhor caracterização do hidrograma efluente do dique em rotura e, conseqüentemente, para a obtenção de melhores estimativas das áreas inundadas. O tema da dissertação está inserido num projeto de investigação financiado pela FCT, designado por *“DikesFPro – Integração de dados e modelos para a compreensão de processos de rotura de diques – PTDC/ECEGC/7739/2020”* a decorrer no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em parceria com o Instituto Superior Técnico (IST) e corresponde à colaboração numa parte dos ensaios em modelo físico da componente experimental deste projeto. Assim, o trabalho de mestrado contemplou a participação em quatro ensaios experimentais cujos parâmetros estudados fora a composição do corpo do dique (curva granulométrica) e as condições de aproximação do escoamento ao dique (número de Froude), e também a participação no tratamento e análise dos dados adquiridos. Os ensaios experimentais previstos utilizaram instrumentação e métodos experimentais inovadores, que permitiram monitorizar e caracterizar os parâmetros de interesse para os fenómenos em estudo, nomeadamente: a evolução geométrica da brecha durante o processo de rotura, os campos de velocidade superficiais na aproximação e junto à brecha, o hidrograma efluente do dique em rotura.

Palavras-chave: rotura de diques fluviais; ensaios experimentais; processo de evolução da brecha; reconstrução 3D; campos de velocidade superficiais: Particle Imaging Velocimetry (PIV)

Experimental characterization of failure in fluvial dykes due to overtopping

Abstract

The manifestation of climate change has been causing the failure of earth-fill dams and dykes. This issue has attracted significant interest in research, particularly in the field of earth-fill dam failure, which has been more extensively studied. However, the failure of river dykes also presents considerable interest, with various reasons supporting the need for further studies on incidents related to this topic. Potential causes of dyke failure include severe flooding that affects both urban and rural areas, resulting in significant human, economic, and environmental losses. The failure of a dyke is a complex process dependent not only on river flow conditions but also on the geotechnical properties of the dyke itself. Therefore, conducting dedicated studies to deepen the understanding of the triggering and evolution processes of dyke failure will contribute to a better characterization of the effluent hydrograph of the failing dyke and, consequently, to more accurate estimates of the flooded areas. The subject of the dissertation is part of a research project funded by FCT, titled “DikesFPro – Integration of Data and Models for Understanding Dyke Failure Processes – PTDC/ECEGC/7739/2020,” which is being conducted at the Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), in partnership with the Instituto Superior Técnico (IST). It involves collaboration in a portion of the physical model tests of the experimental component of this project. Thus, the master's work included participation in four experimental tests, where the parameters studied were the composition of the dyke body (grain size curve) and the flow conditions approaching the dyke (Froude number), as well as involvement in the processing and analysis of the acquired data. The planned experimental tests employed innovative instrumentation and experimental methods, allowing for the monitoring and characterization of key parameters for the phenomena under study, including the geometric evolution of the breach during the failure process, surface velocity fields near and around the breach, and the effluent hydrograph of the failing dyke.

Keywords: rupture of river dikes; experimental trials; rupture gap; 3D reconstruction; PTV velocity maps

Lista de Símbolos e de siglas

Alfabeto romano

A_o Área da brecha (m^2)

C_d Coeficiente de vazão

dt Intervalo de tempo infinitesimal (s)

dV Variação infinitesimal do volume no canal principal (m^3)

f – Sinal de frequência

H Altura da água cima da linha central da zona de rotura (m)

Q Caudal (m^3/s)

Q_b Caudal da brecha com base no balanço de massas (m^3/s)

Q_a Caudal afluente da brecha (m^3/s)

Alfabeto grego

μ volume por unidade de largura do dique

φ – Diferença de fase.

Siglas

DHA Departamento Hidráulica e Ambiente

EUA Estados Unidos da América

IST Instituto Superior Técnico

LNEC Laboratório Nacional de Engenharia Civil

PTV Particle Tracking Velocimetry

Índice

| | |
|---|-----------|
| 1. Introdução..... | 1 |
| 1.1. Enquadramento e apresentação do problema..... | 1 |
| 1.2. Objetivos e metodologia..... | 2 |
| 1.3. Estrutura..... | 3 |
| 2. Revisão da literatura..... | 5 |
| 2.1. Introdução..... | 5 |
| 2.2. Estado da arte..... | 5 |
| 2.3. Antecedentes históricos..... | 8 |
| 2.3.1. Acidentes relevantes a nível mundial..... | 8 |
| 2.3.2. Acidentes e rotura de diques no contexto nacional..... | 10 |
| 2.4. Diques fluviais..... | 10 |
| 2.4.1. Diques naturais e artificiais..... | 10 |
| 2.4.2. Diferença entre construção antiga vs moderna..... | 14 |
| 2.4.3. Diferenças em relação às barragens de aterro..... | 15 |
| 2.4.4. Modos de rotura..... | 16 |
| 2.4.4.1. Introdução..... | 16 |
| 2.4.4.2. Rotura por galgamento..... | 17 |
| 2.4.4.3. Rotura por erosão interna..... | 18 |
| 2.4.4.4. Rotura de origem geotécnica..... | 19 |
| 3. Caracterização da instalação experimental e medições..... | 21 |
| 3.1. Introdução..... | 21 |
| 3.2. Canal de rotura de diques fluviais..... | 21 |
| 3.3. Configuração Experimental..... | 25 |
| 3.3.1. Estrutura de suporte de equipamentos..... | 25 |
| 3.3.2. Caudalímetro..... | 26 |
| 3.3.3. Sondas de nível..... | 26 |
| 3.3.4. Sistema de aquisição de Imagem..... | 27 |
| 3.4. Estimativas dos caudais afluente e efluente..... | 29 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.4.1. | Enquadramento..... | 29 |
| 3.4.2. | Caudal afluente ao canal principal..... | 29 |
| 3.4.3. | Caudal efluente do dique em rotura | 29 |
| 3.5. | Morfologia da brecha..... | 31 |
| 3.5.1. | Estimativa da geometria da brecha e curva de transição do escoamento | 31 |
| 3.5.2. | Reconstrução 3D do dique em vários instantes do processo de rotura | 32 |
| 3.5.3. | Velocimetria superficial..... | 33 |
| 4. | Ensaios experimentais..... | 36 |
| 4.1. | Campanha experimental | 36 |
| 4.2. | Geometria dos diques ensaiados | 37 |
| 4.3. | Caracterização geotécnica do solo..... | 38 |
| 4.3.1. | Curva granulométrica | 38 |
| 4.3.2. | Curva de compactação | 40 |
| 4.4. | Processo de construção dos diques..... | 42 |
| 4.5. | Procedimento experimental..... | 44 |
| 5. | Resultados obtidos | 46 |
| 5.1. | Enquadramento..... | 46 |
| 5.2. | Caudal efluente da brecha | 47 |
| 5.3. | Morfologia da brecha..... | 52 |
| 5.3.1. | Análise qualitativa | 52 |
| 5.3.2. | Análise quantitativa | 54 |
| 5.3.3. | Volume erodido | 58 |
| 5.4. | Velocimetria superficial..... | 60 |
| 5.4.1. | Introdução ao Particle Tracking Velocimetry (PTV)..... | 60 |
| 5.4.2. | Análise detalhada dos ensaios baseada no campo de velocidades superficial e respetiva secção de transição do escoamento na aproximação à brecha | 63 |
| 5.4.2.1. | Ensaio 1 (S1T1) | 63 |
| 5.4.2.2. | Ensaio 2 (S1T2) | 66 |
| 5.4.2.3. | Ensaio 3 (S2T1) | 67 |

| | |
|--|-----------|
| 5.4.2.4. Ensaio 4 (S2T2) | 70 |
| 5.5. Comparação dos resultados obtidos com os resultados da literatura | 71 |
| 6. Conclusões | 79 |
| Referências bibliográficas | I |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 – (a) e (b) Exemplo de imagens da rotura do 1º dique do Mondego ocorrida no dia 22 de dezembro de 2019 | 2 |
| Figura 2.1 – (a) Vista do topo do dique; (b) A inundação de Huang He; (c) A inundação de 1953 nos Países Baixos; (d): A inundação de 1953 nos Países Baixos..... | 9 |
| Figura 2.2 – Acidentes catastróficos numa versão mais recente. (a) A rotura de dois diques fluviais no rio Piura (Perú). (b) Rotura do dique fluvial na Coreia do Sul | 10 |
| Figura 2.3 – Rotura de dique fluvial no rio Mondego, em 2019..... | 10 |
| Figura 2.4 – (a) Dique formado naturalmente. (b) Dique construído pelo homem | 11 |
| Figura 2.5 – Forma o natural de um dique ao longo de um rio. Fase (a) Situa o inicial; Fase (b) Nível de água e inunda o aumentam; Fase (c) Diques naturais formados | 11 |
| Figura 2.6 – Tipos de diques. (a) dique de aterro; (b) dique de enroncamento; (c) dique pré-fabricado; (d) dique pré-fabricado com camada de cimento; (e) dique de estacas | 13 |
| Figura 2.7 – (a) Tipologia de constru o do antigo dique; (b) Tipologia adotada atualmente..... | 14 |
| Figura 2.8 – Diferença da caracteriza o geométrica do dique e da barragem de aterro. (a) dique; (b) barragem de aterro..... | 15 |
| Figura 2.9 – Tipos de rotura mais comuns em diques fluviais..... | 17 |
| Figura 2.10 – Comportamento do dique num processo de rotura por galgamento | 18 |
| Figura 2.11 – Representa o do desenvolvimento da rotura por erosão interna de um dique fluvial | 19 |
| Figura 3.1 – Instala o experimental | 22 |
| Figura 3.2 – Sistema de alimenta o..... | 22 |
| Figura 3.3 – Elementos constituintes na instala o. (a) válvula de seccionamento; (b) estrutura de estabiliza o; (c) estrutura fixa; (d) comporta automática | 23 |
| Figura 3.4 – (a) fotos do processo de referencia o local; (b) distribu o dos alvos no canal..... | 24 |
| Figura 3.5 – Descarregadores existentes na instala o. (a) descarregador retangular; (b) descarregador em “V-Notch” | 24 |
| Figura 3.6 – Instrumenta o utilizada e a sua localiza o..... | 25 |
| Figura 3.7 – Caudalímetro secundário | 26 |
| Figura 3.8 – Sondas ultrass nicas U500 <i>Baumer</i> | 27 |
| Figura 3.9 – Câmaras de vídeo | 27 |
| Figura 3.10 – Componentes dos sensores Kinect 2.0 e Kinect Azure DK | 28 |
| Figura 3.11 – Queda de bloco (Primeiro ensaio)..... | 30 |
| Figura 3.12 – Exemplo de imagem captada pela câmara GoPro (Primeiro ensaio)..... | 33 |
| Figura 3.13 – (a) Imagem do escoamento no tempo $t = 328$ s com a indica o da zona a analisar; (b) Diagrama de Vorono  na zona selecionada; (c) Diagrama de Vorono  e estrela para o tempo $t = 328$ s; (d) Diagrama de Vorono  e estrela para o tempo $t+dt$ (e) Determina o do Diagrama de Vorono ..... | 35 |
| Figura 4.1 – Dimensões do dique em metros..... | 37 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.2 – Curva granulométrica do solo | 39 |
| Figura 4.3 – Análise granulométrica do solo | 40 |
| Figura 4.4 – Ensaio de compactação PROCTOR Standard do solo relativamente ao E1 e E2 | 41 |
| Figura 4.5 – Ensaio de compactação PROCTOR Standard do solo relativamente ao E3 e E4 | 41 |
| Figura 4.6 – Passos para a construção do dique..... | 44 |
| Figura 4.7 – Canal piloto..... | 44 |
| Figura 5.1 – Hidrogramas afluente ao canal principal, efluente pela comporta de jusante do canal principal e efluente pelo descarregador v-notch a jusante do dique. a) Ensaio S1T1; b) Ensaio S1T2; c) Ensaio S2T1; d) S2T2 | 50 |
| Figura 5.2 - Hidrograma de rotura adimensionalizado (caudal efluente da brecha). Determinado com base na curva de vazão do descarregador “V-notch” localizado à saída da bacia de sedimentos. | 51 |
| Figura 5.3 – Evolução temporal da rotura do dique. Vista do coroamento, de montante para jusante. | 53 |
| Figura 5.4 – Localização do plano de corte em relação ao canal piloto inicial. Local de avaliação da evolução morfológica da brecha de rotura. | 54 |
| Figura 5.5 – Evolução temporal da morfologia da brecha. (a) Ensaio S1T2; (b) Ensaio S2T1; (c) Ensaio S2T2. | 55 |
| Figura 5.6 – Forma final da brecha de rotura para os ensaios S1T2 e S2T1. $Fr=0.1$; Diferentes solos | 56 |
| Figura 5.7 – Forma final da brecha de rotura para os ensaios S2T1 e S2T2. Teores em água semelhantes ($w\sim 13\%$); Diferentes números de Froude ($Fr_{S2T1}=0,1$; $Fr_{S2T2}=0,2$)..... | 57 |
| Figura 5.8 – Reconstrução 3D do dique em rotura dos ensaios realizados nos instantes ($t=0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, 1$)..... | 59 |
| Figura 5.9 – Taxa de erosão dos quatro ensaios..... | 60 |
| Figura 5.10 – Aplicação do PTV a duas imagens sequencias já com o | 61 |
| Figura 5.11 – Campo de velocidades junto à brecha (Ensaio S1T1) | 62 |
| Figura 5.12 – Modelo conceptual com comportamento hidrodinâmico do escoamento junto à brecha..... | 63 |
| Figura 5.13 – Ensaio S1T1. (a) curva de transição do escoamento.(b) Evolução temporal da morfologia da brecha no paramento de jusante visto de frente | 65 |
| Figura 5.14 – Ensaio S1T2. (a) curva de transição do escoamento.(b) Evolução temporal da morfologia da brecha no paramento de jusante visto de frente | 67 |
| Figura 5.15 – Ensaio S2T1. (a) curva de transição do escoamento.(b) Evolução temporal da morfologia da brecha no paramento de jusante visto de frente | 69 |
| Figura 5.16 – Curva de transição do escoamento no ensaio S2T2 | 70 |
| Figura 5.17 – Resultados experimentais da tese de doutoramento de Ismail Rifai. (a): evolução do caudal no canal principal. (b): hidrograma de rotura..... | 71 |
| Figura 5.18 – Números de Froude a montante e a jusante do canal..... | 72 |
| Figura 5.19 – Representação longitudinal do coroamento do dique no ensaio 8..... | 72 |
| Figura 5.20 – Distribuição granulométrica para: (a) Material 1: 2 medidas redundantes $d_{50} = 1$ mm, (b) Material 2: com $d_{50} = 1.67$ mm..... | 73 |
| Figura 5.21 – Distribuições granulométricas para os diferentes materiais 1 e F, e distribuição granulométrica sintética baseada nos rácios de peso dos materiais F1, F2 e F3. | 75 |

| | |
|--|------|
| Figura 5.22 – Topografia da brecha reconstruída no ensaio 8 | 76 |
| Figura A.1 – Dimensões da estrutura fixa..... | VI |
| Figura A.2 – Dimensões do descarregador retangular | IX |
| Figura A.3 – Dimensões do descarregado “V-Notch” | X |
| Figura A.4 – Curva de calibração do descarregador retangular | XI |
| Figura A.5 – Curva de calibração do descarregador "V-Notch..... | XII |
| Figura A.6 – Curva de calibração do caudalímetro | XII |
| Figura A.7 – Curva de calibração das sondas de nível | XIII |
| Figura A.8 – Dispensador de partículas. (a) Dispensador; (b) motor | XIII |
| Figura A.9 – (a): Placa de aquisição de sinal das condas acústicas (DAQ - NI 9203 - IST);..... | XIV |
| Figura A.10 – Sequência do processo do Método da Garrafa de Areia | XV |

Índice de quadros

| | |
|--|-----|
| Quadro 4.1 – Características geotécnicas dos ensaios | 36 |
| Quadro 4.2 – Posição do canal piloto..... | 38 |
| Quadro 4.3 - Valores da curva granulométrica (ensaio S1T1 e S1T2) | 39 |
| Quadro 4.4 - Valores da curva granulométrica (ensaio S2T1 e S2T2) | 40 |
| Quadro 4.5 - Dados para o ensaio PROCTOR | 41 |
| Quadro 4.6 – Graus de compactação implementados em cada ensaio com os respectivos teores em água e peso volúmico seco..... | 42 |
| Quadro 5.1 - Propriedades dos Materiais 1 e 2 | 74 |
| Quadro 5.2 - Propriedades dos materiais testados nos modelos experimentais..... | 75 |
| Quadro A.1 - Segundos definidos para os tempos marcados | xvi |

1. Introdução

1.1. Enquadramento e apresentação do problema

Diques fluviais são estruturas construídas ao longo das margens de um rio ou de um canal de água para proteger as áreas adjacentes de inundações que, em caso de rotura, podem resultar na ocorrência de elevados danos económicos, ambientais e sociais (Di Baldassare, et al., 2015; Foster, Spannagle & Fell, 2000).

De uma maneira geral, tem-se verificado um maior interesse por parte da comunidade científica em estudos de rotura de barragens de aterro do que em diques fluviais (Nagy L. , 2006).

No entanto, as roturas destes últimos também podem ser catastróficas, como se verificou na cidade de *New Orleans* em 2005, quando após o furacão Katrina, cerca de 85% da área metropolitana ficou inundada como consequência da rotura dos diques fluviais, o que se traduziu em centenas de mortes e elevados prejuízos sociais e ambientais. (CBN, 2016).

Em Portugal também se registaram vários acidentes com diques fluviais, como sejam o caso de alguns diques nos rios Mondego e Tejo. A última destas ocorrências, com impactos não desprezáveis nas áreas adjacentes foi a rotura de dois diques do rio Mondego ocorridas no dia 22 de dezembro de 2019 (Figura 1.1) (Lusa A., 2019).



Figura 1.1 – (a) e (b) Exemplo de imagens da rotura do 1º dique do Mondego ocorrida no dia 22 de dezembro de 2019 (Lusa A., 2020)

No sentido de dar resposta aos acidentes de roturas de diques fluviais é necessário conhecer e estudar os parâmetros que permitem conduzir o processo de rotura de um dique fluvial para a obtenção de previsões mais rigorosas dos hidrogramas efluentes da rotura e, conseqüentemente, melhores estimativas das escalas de tempo e das zonas afetadas pela inundação que podem ser traduzidas no desenvolvimento de medidas de mitigação mais adequadas (Michelazzo, Oumeraci, & Paris, 2015; Rifai, 2018).

Um hidrograma de cheia traduz a evolução do caudal ao longo do tempo em determinada secção. No caso da rotura de um dique, o hidrograma de cheia efluente corresponderá à variação do caudal na secção da rotura, ou seja, na secção da brecha que se forma no corpo do dique, ao longo do tempo. Este hidrograma corresponde à condição de fronteira de montante dos estudos de propagação de cheias que se realizam para mapear as zonas afetadas pela cheia.

Importa mencionar que esta dissertação se inseriu numa das linhas de investigação atualmente em curso no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), designadamente a “*Investigação em Rotura de Barragens de Aterro e Diques Fluviais*”. Neste âmbito encontra-se presentemente em curso um Projeto FCT em parceria com o Instituto Superior Técnico (CERIS e INESC), designado “*DikesFPro – Integração de dados e modelos para a compreensão de processos de rotura de diques – PTDC/ECEGC/7739/2020*”, no qual esta dissertação foi englobada.

1.2. Objetivos e metodologia

O objetivo deste trabalho é estudar o fenómeno da rotura de diques fluviais do ponto de vista hidráulico e geotécnico assim como da respetiva interação entre ambos através de um conjunto de experiências em modelo físico reduzido.

Os resultados deste trabalho experimental, traduzidos pelo aprofundamento do conhecimento dos processos físicos envolvidos neste tipo de rotura, contribuirão para a criação de uma base de dados de rotura de diques de aterro, cujo objetivo é também a utilização na calibração de modelos numéricos. A dissertação visa, em particular, a *caracterização experimental da rotura por galgamento de diques fluviais* e análise dos fenómenos associados **sob condições distintas de composição do corpo dos diques, i.e., para diferentes composições granulométricas.**

Antes da realização da campanha experimental foi necessário validar a instalação de rotura de diques fluviais, e os métodos de medição adotados.

A validação da instalação foi baseada na reprodução de um ensaio realizado no âmbito da campanha experimental do trabalho de doutoramento do aluno Ismail Rifai (2018) (Universidade de Liège, Bélgica), em condições de semelhança geométricas, geotécnicas e hidráulicas. Os resultados obtidos, nomeadamente, a evolução da rotura, os campos de velocidade e os caudais efluentes, foram comparados com os do ensaio correspondente de Rifai (2018), permitindo assim concluir da adequabilidade da instalação e respetivo sistema de monitorização para a realização deste tipo de ensaios.

Esta dissertação de mestrado descreve a realização de quatro (4) ensaios experimentais de rotura de diques nos quais foi variada a curva granulométrica do corpo do dique (silte arenoso e areia siltosa) com o objetivo de caracterizar:

- i) a evolução temporal da rotura (evolução geométrica da brecha de rotura);
- ii) o campo de velocidades superficial do escoamento na aproximação e junto à secção da brecha;
- iii) hidrograma efluente da brecha.

Apresenta-se uma análise conjunta dos resultados destes ensaios comparando-os também com resultados existentes na literatura (e.g Rifai, 2018).

1.3. Estrutura

A presente dissertação encontra-se dividida em **6 capítulos** e está estruturada da seguinte forma:

O Capítulo 1 consiste na presente **Introdução**, e é onde se efetua um enquadramento da tese e do problema em análise, se apresentam os objetivos e a metodologia adotada, assim como se refere a estrutura adotada.

O Capítulo 2 corresponde à **Revisão da literatura** dos diques fluviais, onde é exibido o estado da arte, antecedentes históricos, no contexto nacional e mundial, e os métodos de medição que são normalmente utilizados na caracterização deste tipo ensaios experimentais.

O Capítulo 3 corresponde à **Caracterização da instalação experimental e medições**, onde se descreve o canal de ensaios dos diques, se apresenta a configuração experimental, designadamente os equipamentos e respetivo posicionamento. São ainda detalhadas as estimativas dos caudais afluentes e efluentes e a morfologia da brecha.

No Capítulo 4 são detalhados os quatro **Ensaio experimentais** pela sua geometria, caracterização geotécnica do solo, o seu processo de construção e protocolo estipulado nos ensaios.

O tratamento e pós-processamento dos dados adquiridos durante os ensaios e a sua respetiva análise são apresentados no capítulo 5.

Finalmente no Capítulo 6 apresentam-se as **Conclusões** do trabalho realizado.

2. Revisão da literatura

2.1. Introdução

Neste capítulo é descrito o estado da arte, o enquadramento teórico dos diques fluviais e o processo de evolução de brechas e do caudal efluente dos diques em rotura.

2.2. Estado da arte

Os diques têm o propósito de evitar a inundação dos terrenos circundantes. Funcionam como uma barreira física que, em caso de cheia, deve evitar que o escoamento atinja as planícies localizadas a jusante dos mesmos. Os mesmos são dimensionados para determinados períodos de retorno de referência, correspondentes a cheias excecionais, e por isso, não devem ser galgados, uma vez que após esta ocorrência são extremamente suscetíveis à rotura (Bradley, 1989; Le, Verhagen, & Vrijling, 2016; Britannica, 2023).

A rotura de estruturas de aterro sempre tem sido um tema de investigação de grande interesse devido aos impactos negativos passíveis de ocorrerem nos vales a jusante dos mesmos, nomeadamente, ambientais, económicos e sociais.

O grande número de estudos já realizados sobre rotura de barragens de aterro reflete o interesse neste tema de investigação. Verifica-se, no entanto, um menor número de estudos de investigação experimental sobre rotura de diques fluviais que os correspondentes às barragens de aterro (Evangelista, 2015). E embora a rotura de diques fluviais tem potencialmente menores impactos, apresenta também um grande interesse na medida que, embora menos gravosos, são bastante mais frequentes. Assim, importa aprofundar a compreensão dos processos físicos envolvidos no início e evolução da rotura de diques fluviais.

Seguidamente são apresentados de forma cronológica, alguns estudos sobre o tema “Rotura de diques fluviais”.

Yonghui (2006) investigou a erosão por rotura de diques de areia que permitiu concluir que canal piloto desempenha um papel importante no aumento instantâneo do caudal efluente devido à queda de material a jusante. Este aumento instantâneo do caudal efluente no dique deve-se, sobretudo, à não utilização de finos e às dimensões do dique.

Schmocker (2011) centrou-se na investigação do processo e rotura da brecha devido a galgamento e no ensaio 3D da brecha. Através deste estudo foi possível definir um intervalo de grãos devido aos efeitos erosivos e a semelhança do número de Froude. Para permitir um desempenho de ensaio representativo, o autor concluiu que as dimensões devem ser 0,2m de altura e 0,2m de largura.

Islam (2012) caracterizou a brecha do dique devido à descarga de caudal e duração, comprimento inicial da brecha e a altura do leito do rio, e ainda, a compreensão da influência da paisagem da planície de inundação num extremo de cheias. Realizou experiências com diques coesivos e não coesivos com diferentes níveis iniciais do fundo do canal. Verificou que os canais com uma largura maior apresentavam brechas mais rasas e largas e os ensaios com diques coesivos mostraram brechas mais estreitas. O tipo de modelo paisagístico influencia diretamente o impacto das cheias e deposição de sedimentos.

Michelazzo (2014) investigou o processo evolutivo de rotura dos diques abordando a interação entre a evolução da brecha e a hidro-morfodinâmica fluvial e ainda definiu uma fase de equilíbrio para a evolução da brecha e escoamento fluvial. Constatou que as velocidades de montante contribuíram para um alargamento mais rápido e aumento da brecha em largura. Um ensaio adicional consistiu em duas roturas iguais e concluiu que a rotura a jusante se desenvolve mais rapidamente.

Bhattarai (2015) analisou o comportamento da evolução da brecha, na qual integrou o modelo de escoamento de infiltração, erosão e de escoamento normal. Pretendeu que estes modelos pudessem prever o hidrograma de escoamento e o alargamento lateral resultando da rotura do dique do rio. O autor teve em conta a erosão da fundação e da planície de inundação. Os resultados obtidos mostram que o material mais grosseiro acaba por ter uma erosão mais rápida devido ao seu D50 e que o modelo pode, de facto, prever o alargamento lateral da brecha e a descarga total.

Elalfy (2015) conduziu os ensaios nas condições semelhantes a Bhattarai (2015), o que permitiu validar o modelo 2D da hidrodinâmica em ondas de rotura lateral utilizando uma dimensão de rotura fixa. Este modelo foi aplicado a casos de rotura de diques, acoplado um módulo morfodinâmico a um operador de rotura de taludes.

Evangelista (2015) analisou o impacto de uma onda súbita que provoca o galgamento do dique e o objetivo focou-se em “contribuir para a compreensão da evolução dos processos de galgamento das ondas e consequente erosão dos diques, com uma nova visão das ondas dinâmicas”. Foram utilizados dois tipos de areia (quase uniforme), cada ensaio tinha altura inicial de nível diferente e a altura do dique manteve-se sempre constante. Concluiu-se que durante o processo, as partes mais íngremes dos taludes dos diques sofrem uma combinação de erosão superficial e falhas de deslizamento devido à perda de material de suporte. Constatou-se também que os dois materiais apresentam uma resposta diferente à onda de impacto. A areia siltosa é mais resistente do que a areia mais grosseira ao caudal de galgamento em termos de erosão. Erosão essa que é mais provável de acontecer na areia “grossa” que “também apresenta uma tendência diferente da evolução temporal da elevação do fundo nas secções de referência, com uma maior quantidade de material sólido transportado e depositado, devido a uma maior mobilidade das partículas observada nos ensaios realizados”.

Lemmens et al. (2016) estudaram o retardamento da rotura de diques de areia ao adicionar bentonite. O estudo demonstra que o uso de bentonite reduz a permeabilidade e a velocidade de erosão, diminuindo o alargamento da brecha e a velocidade de escoamento em áreas protegidas por diques. Cerca de 2,4% de bentonite reduz o processo erosivo, e 5,4% são suficientes para diminuir a velocidade de cheia para menos de 0,5 m/h, o que aumenta consideravelmente a segurança.

Rifai (2018) analisou os mecanismos e dinâmicas da evolução da rotura da brecha numa configuração fluvial e delineou as especificidades do processo de rotura em diques fluviais, em contraste com as barragens frontais. Avaliou ainda o processo de rotura devido ao escoamento do canal principal, dimensões do canal e o fundo da planície de inundação erodível, efeito da água e a composição do dique. Dos 54 ensaios realizados, constatou-se que as alterações no nível da água a montante aumentaram as velocidade de escoamento, induzindo um erro experimental da evolução morfodinâmica da rotura e que a evolução da rotura da brecha tende a erodir mais para jusante.

Schmitz et al. (2021) analisaram a influência que a geometria de diques fluviais homogêneos e não coesivos têm durante o fenómeno de sobrecarga, particularmente no caudal e alargamento da brecha. O autor classificou três padrões distintos de hidrogramas de cheia: tipo A - caracterizado por um máximo absoluto, tipo B - caracterizado por um máximo relativo e tipo C – hidrograma gradualmente crescente. Hidrogramas do tipo A ocorrem em diques mais fracos (considera que dique fraco apresenta menor volume por unidade de largura) e o número de Froude igualmente baixo com caudais mais reduzidos enquanto, o hidrograma do

tipo C ocorre em diques mais fortes, caudais e Froude mais elevados e o hidrograma tipo B situa-se no intermediário desses dois tipos. A transição entre os diferentes tipos de hidrograma de brecha conclui-se que não é abrupta, indicando que parâmetros como teor em água e grau de compactação podem influenciar os resultados. Concluiu ainda que o μ (volume por unidade de largura do dique) é eficaz acompanhar a evolução geométrica da brecha.

Branß et al. (2022) estudaram a formação e evolução dos diques naturais em paisagens fluviais e os fatores que influenciam as suas características, bem como o impacto que a vegetação tem nos diques. O estudo demonstrou que os processos de transporte lateral de sedimentos associados à formação de diques naturais, tanto os de transporte como os induzidos por turbulência, podem ser simulados com sucesso em modelos físicos em escala reduzida. Os diques criados pelo transporte de sedimento resulta na formação de diques largos e declive suave, enquanto os de transporte induzido por turbulência gera diques mais estreitos e a inclinação mais acentuada. Relativamente à influência de vegetação, o autor conclui que a vegetação pode introduzir camadas adicionais de turbulência e tensões tangenciais, alterando a estrutura dos diques formados e, em alguns casos, promove a erosão localizada dos sedimentos depositados.

Após uma análise de conteúdo no que diz respeito à temática da rotura de diques, foi possível identificar alguma incerteza associada ao estudo da previsão da brecha. Também não é analisado, com maior rigor, o campo de velocidade na aproximação da brecha, bem como a caracterização dos processos de erosão e processos hidrodinâmicos correlacionados, o que necessitam de mais investigação experimental.

Não são conhecidos estudos de investigação sobre rotura de diques fluviais a nível nacional, para além do que está atualmente em curso no LNEC. Assim, a presente tese, é um contributo para esta investigação.

2.3. Antecedentes históricos

2.3.1. Acidentes relevantes a nível mundial

A ocorrência de rotura de diques fluviais pode variar de acordo com diferentes regiões e eventos específicos. No entanto, existem alguns exemplos notáveis de locais onde a rotura de diques fluviais ocorreu historicamente. Alguns desses locais incluem:

1. O desastre de *Johnstown*, Estados Unidos da América (EUA) em 1889 (Figura 2.1 (a)): A rotura da represa *South Fork*, localizado na Pensilvânia, resultou numa das piores tragédias de inundação na história dos EUA com mais de 2 200 mortes;

2. A inundação de Huang He, (Rio Amarelo), na China em 1938 (Figura 2.1 (b)): Durante a segunda guerra sino-japonesa, as forças chinesas romperam diques ao longo do rio Huang He para atrasar o avanço das tropas japonesas, originando uma inundação catastrófica que resultou em centenas de milhares de mortes;
3. A inundação de 1953 nos Países Baixos (Figura 2.1 (c)): Uma combinação de maré alta e tempestades resultou na rotura de vários diques ao longo da costa do Mar do Norte, causando uma inundação generalizada e a morte de mais de 1 800 pessoas;
4. O desastre de Banqiao, na China, em 1975 (Figura 2.1 (d)): A rotura de uma série de barragens e diques durante uma série de tuf es resultou numa das maiores tragédias de inundação da história, com estimativas variando entre 26 000 a 230 000 mortes.

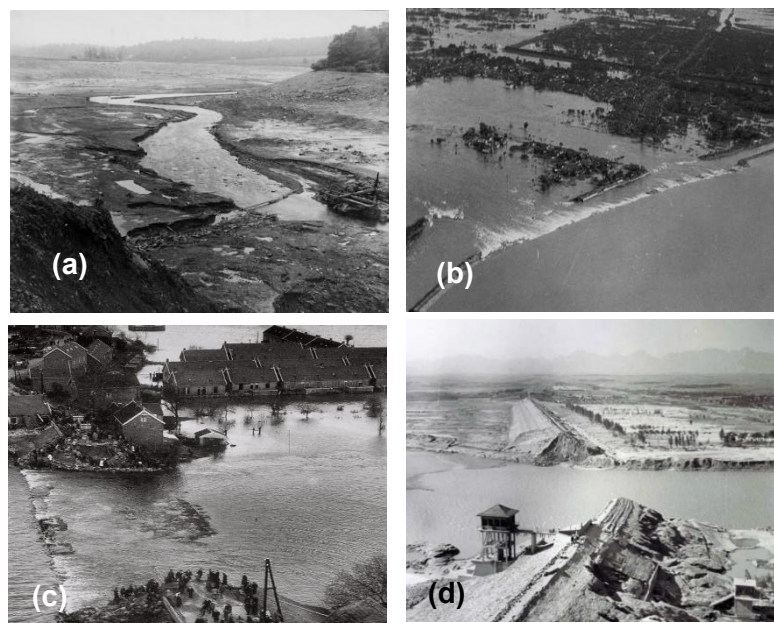


Figura 2.1 – (a) Vista do topo do dique (Vintage Everyday, 2017); (b) A inundação de Huang He (Nuestras Charlas Nocturnas, 2021); (c) A inundação de 1953 nos Países Baixos (Ducs Amsterdam, 2017); (d): A inundação de 1953 nos Países Baixos (World Stop insider, 2023)

Em março de 2018 uma rotura de diques fluviais ocorreu no rio Piura (Perú). Não houve acidentes graves, contudo danificou zonas agrícolas e teve um custo de recuperação elevado, como se pode demonstrar na Figura 2.2 (a). Em julho de 2024, na Coreia do Sul, devido às inundações extremas ocorridas, o dique na Coreia do Sul rompeu, não havendo certezas sobre o número de vítimas mortais (Figura 2.2 (b)).

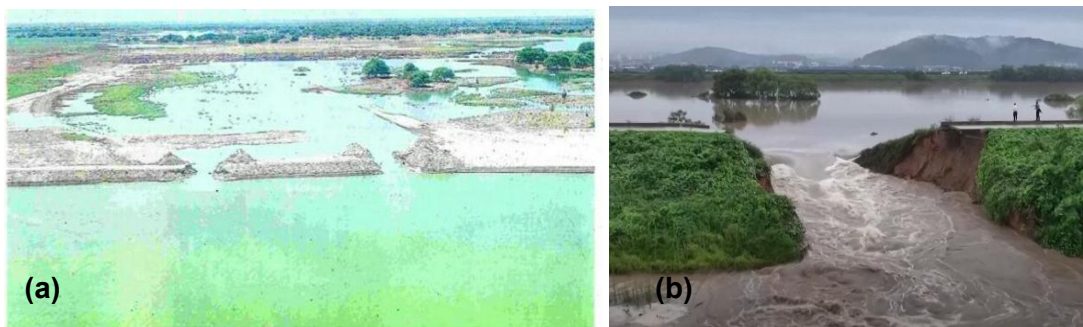


Figura 2.2 – Acidentes catastróficos numa versão mais recente. (a) A rotura de dois diques fluviais no rio Piura (Perú) (Ministério de desenvolvimento agrícola e da irrigação, 2018). (b) Rotura do dique fluvial na Coreia do Sul (CNN, 2024)

2.3.2. Acidentes e rotura de diques no contexto nacional

No rio Mondego (Montemor-o-Velho), a rotura do dique, causou a evacuação de Casal Novo do Rio, bem como a destruição e alagamento da zona, em 2019 (Figura 2.3).



Figura 2.3 – Rotura de dique fluvial no rio Mondego, em 2019 (TVI, 2019)

2.4. Diques fluviais

2.4.1. Diques naturais e artificiais

A palavra dique (*“levees”* ou *“dike”* em inglês do Reino Unido) provém da palavra holandesa *“dijk”* (Schmocker, 2011; Conceito de, 2020). Os diques podem ser de origem natural, quando são formados pela natureza, ou artificial (Nagy L., 2012; Rifai, 2018). A Figura 2.4 apresenta um exemplo de cada origem.



Figura 2.4 – (a) Dique formado naturalmente (Art, 2021).
 (b) Dique construído pelo homem (Safarek, 2020)

A formação de diques naturais ocorre devido à elevação dos níveis de água durante a ocorrência de cheias, levando os sedimentos em suspensão e depositados no leito principal para o leito de cheia (Fibras y Normas de Columbia S.A.S., 2023). Quando o nível de água diminui, os sedimentos permanecem no leito de cheia do rio (Fell, MacGregor, Stapledon, & Bell, 2005). São os ciclos sucessivos de cheias que levam ao aparecimentos de diques naturais. A Figura 2.5 ilustra a sequência de fases para a formação de diques fluviais naturais.

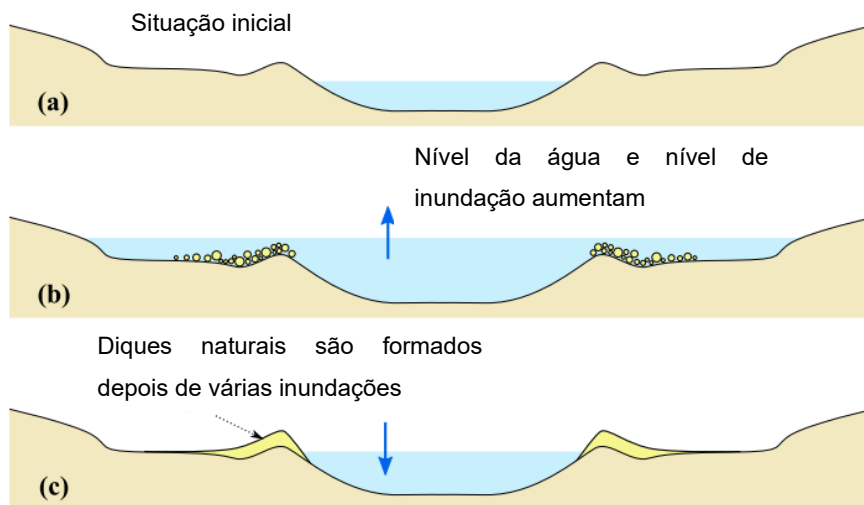


Figura 2.5 – Formação natural de um dique ao longo de um rio. Adaptado de (Rifai, 2018).
 Fase (a) Situação inicial; Fase (b) Nível de água e inundação aumentam; Fase (c) Diques naturais formados

Diques de aterro que são constituídos por um solo compactado ou por material rochoso, são normalmente largos na base e apresentam inclinações dos taludes pouco íngremes para melhorar a estabilidade. Normalmente são utilizados para criar reservatórios, canais de navegação e proteção contra inundações (Figura 2.6(a)).

Diques de enrocamento que são compostos essencialmente por enrocamento (Figura 2.6 (b)). Estes diques são mais resistentes à erosão originada pelo escoamento e pela ondulação que os diques de aterro. No respetivo processo construtivo o enrocamento é compactado por camadas para criar uma barreira sólida.

Diques de betão armado ou pré-fabricado (Figura 2.6 (c)). São os diques mais duráveis por serem os que melhor suportam as ações do escoamento e também o desgaste temporal. São diques mais apropriados para rios com maior profundidade uma vez que suportam maiores cargas. Por serem altamente resistentes à erosão, são usados nas áreas onde o risco de inundação é elevado ou onde se pretenda garantir um elevado grau de proteção.

Diques de enrocamento com cortina de cimento que são mais resistentes e contêm uma proteção adicional contra as inundações (Figura 2.6 (d)). No seu núcleo, são compostos por enrocamento e rocha e por uma camada de cimento.

Dique de estacas em madeira, aço ou betão (Figura 2.6 (e)). Estas estacas são cravadas no solo e reforçadas com vigas e painéis verticais com o objetivo de criar uma barreira contra a água. Este tipo de dique é visível em zonas onde o solo é mais instável e macio.



Figura 2.6 – Tipos de diques. (a) dique de aterro (RuudMorijn, 2018); (b) dique de enrocamento (iStock, 2016); (c) dique pré-fabricado (rpc, 2023); (d) dique pré-fabricado com camada de cimento (Joziassse, 2009); (e) dique de estacas (Maderas Ruta 25, 2013)

2.4.2. Diferença entre construção antiga vs moderna

Os diques fluviais são importantes a nível de proteção, resistência e segurança, mas a partir do século XIII, há uma importância maior em reforçar os diques por forma a aumentar a sua resistência às inundações e às oscilações dos níveis de maré. Foi neste século que, a população, começa a estudar as primeiras soluções de proteção de diques. Inicialmente nasce uma solução focada na construção de diques constituídos por dois muros de alvenaria simples entre os quais se colocava uma camada de terra para aumento da resistência. De realçar, no entanto, que naquela altura, as técnicas eram ainda relativamente rudimentares, uma vez que ainda não existiam diretrizes construtivas estabelecidas.

Entretanto, decorrendo da experiência que, entretanto, se foi adquirindo, sobretudo ao nível da prática, uma vez que naquela época não se realizam estudos dedicados, verificou-se que os conhecimentos construtivos foram aumentando, o que se traduziu na redução de acidentes com este tipo de estruturas. A revolução industrial propiciou o desenvolvimento técnico construtivo traduzindo-se no aparecimento de diretrizes construtivas consagradas (Schmocker, 2011).

Na Figura 2.7 (a) está representado a tipologia da construção do dique no século XIX. A inclinação a jusante é mais íngreme que a montante. Com a adoção de novas técnicas e a criação de diretrizes de referência, os diques, apresentam atualmente, uma estrutura com paramentos de montante e jusante menos inclinados, como está representado na Figura 2.7 (b), com camadas de proteção e, em alguns casos, com camadas de proteção adicionais (ex: de alvenaria) capazes de proteger o dique contra a erosão provocada pelo escoamento.

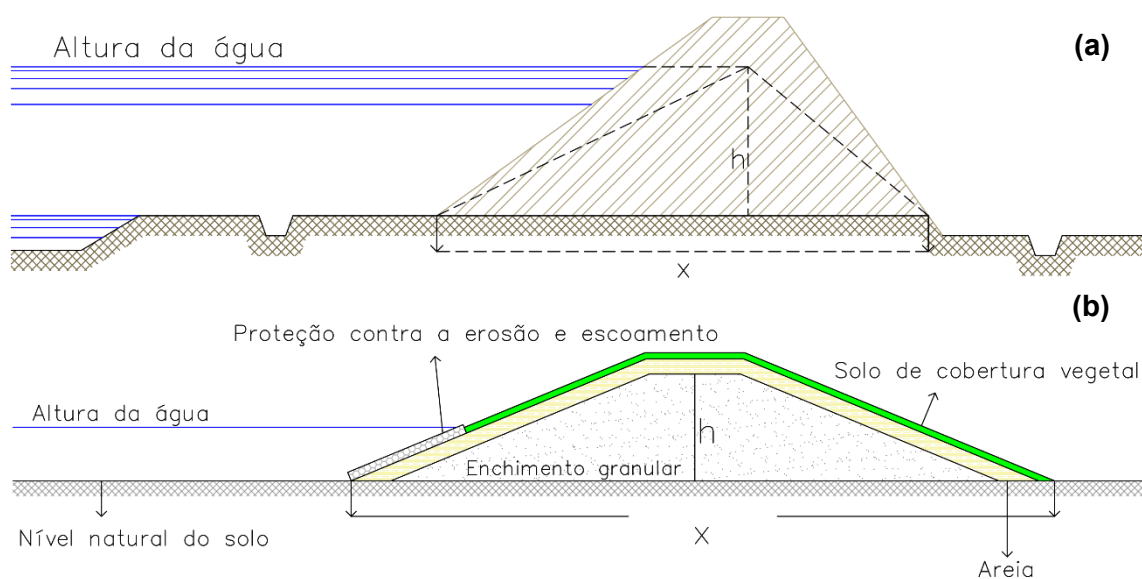


Figura 2.7 – (a) Tipologia de construção do antigo dique. Adaptado de (Kreuter, 1921); (b) Tipologia adotada atualmente. Adaptado de (Rimoldi et al., 2021)

Segundo Rifai (2018), os diques têm a função principal de defesa contra cheias, mas também desempenham outros papéis, nomeadamente, a contribuição para a retenção de volumes de cheia, funcionando temporariamente como bacia de retenção e constituindo um “sistema de controlo e libertação de cheias” através de comportas ou de diques fusíveis, que são intencionalmente abertos ou rebentados, a fim de atenuar as inundações.

2.4.3. Diferenças em relação às barragens de aterro

Diques fluviais e barragens de aterro são “estruturas utilizadas para armazenamento de água, regulação do nível de água em cursos de água, atividades recreativas, produção de energia e proteção das áreas circundantes contra inundações” (Elalfy, 2015). Uma maneira mais clara de entender essa distinção é reconhecer que os diques correm paralelamente ao curso de água, contendo água apenas num dos lados para proteger o outro, ao contrário de uma barragem que se posiciona frontalmente em relação ao rio, com água presente em ambos os lados, embora a níveis diferentes.

Outra diferença que os distingue no que respeita a definição da geometria: i) os diques, para assegurarem uma maior estabilidade estrutural e minimizar a infiltração, são construídos com declives pouco íngremes nas margens e a base/largura apresentam grandes dimensões (Rifai, 2018). A razão por de trás desta geometria é sobretudo porque os diques não são construídos com diretrizes tão rigorosas como as barragens de aterro e têm um menor peso próprio, logo para evitar o perigo de derrubamento têm que ter os taludes menos íngremes; ii) o dimensionamento da geometria de uma barragem de aterro é mais centrada na altura por forma a poder armazenar todo o volume da albufeira, o peso próprio é muito maior e também têm uma percentagem de finos maior, de modo que, após a compactação, é possível manter a estabilidade com taludes inclinados, como se pode verificar na Figura 2.8 um exemplo ilustrativo de cada um.

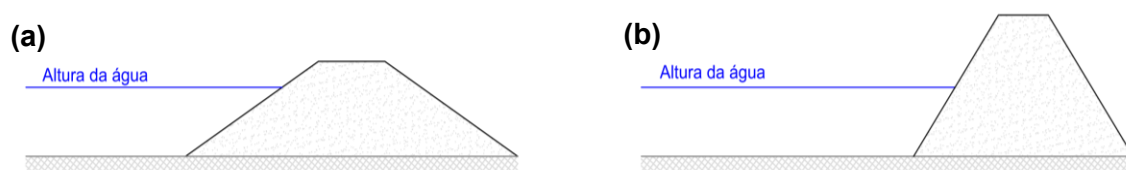


Figura 2.8 – Diferença da caracterização geométrica do dique e da barragem de aterro. (a) dique; (b) barragem de aterro

Tanto os diques fluviais como as barragens de aterro podem romper pelas mesmas causas, designadamente, devido ao deslizamento, ao derrubamento, à erosão interna e ao galgamento, entre outras menos comuns. No entanto a rotura de uma barragem de aterro é potencialmente mais gravosa, na medida em que, à partida, pode causar impactos mais significativos nos vales a jusante em termos económicos, ambientais e sociais.

Orlandi et al. (2015) afirma que a exposição frequente à ação da água, a falta de manutenção, o mau dimensionamento, a realização de obras de reabilitação inadequadas e a destruição animal, provocam o aumento de danos e falhas estruturais nos diques.

Já segundo Mendes (2017), o aumento dos acidentes com barragens de aterro pode apresentar outros motivos, nomeadamente: dimensionamento inadequado da barragem e/ou dos órgãos de segurança e exploração, construção inadequada e também a ocorrência de deslizamentos de terra.

As barragens de aterro devem obedecer a critérios de construção mais restritos que os diques, como é o caso do material a ser utilizado dever localizar-se nas proximidades da obra, assim como, dever possuir uma quantidade adequada de finos (siltes e argila) para a construção da barragem. No caso de barragens de aterro zonadas na maioria das vezes a mancha de empréstimo local não apresenta as condições ideais para o núcleo argiloso, de modo que para esta zona muitas vezes há que coletar solo de zonas onde existam solos com as características requeridas.

2.4.4. Modos de rotura

2.4.4.1. Introdução

Os diques estão constantemente expostos a níveis de água elevados, a variações rápidas das condições do escoamento, à erosão ribeirinha, a intrusão animal, originando a criação de cavidades e/ou canais preferenciais de escoamento fragilizando o dique e, conseqüentemente, aumentando os acidentes com diques, e, por vezes, convergindo para a própria rotura da estrutura.

Embora sejam muitos os modos de rotura mais comuns em diques, como ilustrado na Figura 2.9, de uma maneira geral os mais frequentes são os que se apresentam seguidamente e que se detalham nos subcapítulos 2.4.4.2 a 2.4.4.4 (Rifai, 2018):

1. Rotura por galgamento;
2. Rotura por erosão interna;
3. Rotura de origem geotécnica.

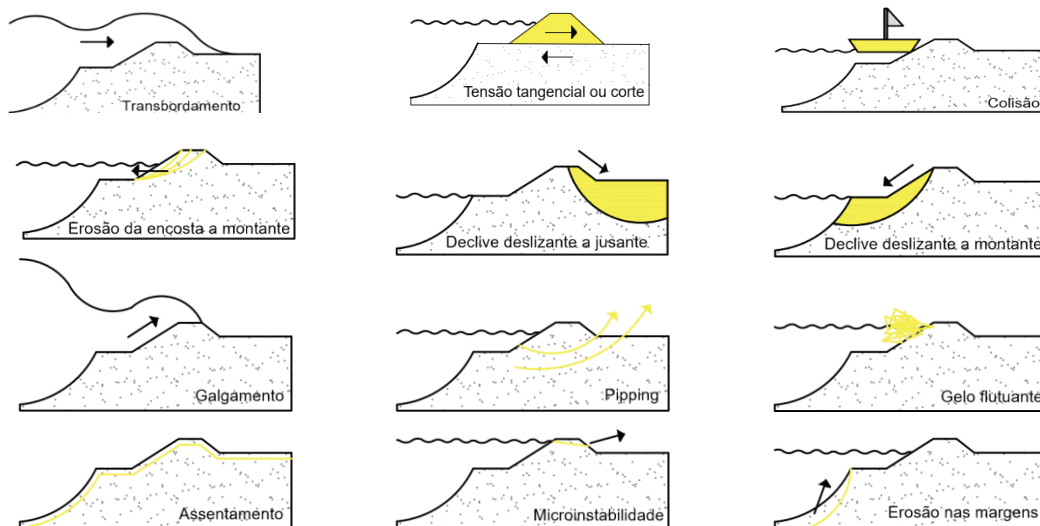


Figura 2.9 – Tipos de rotura mais comuns em diques fluviais. Adaptado de (Schierneck, 1998; Vrijling et. al, 2011; Rifai, 2018)

Conforme mencionado por Danka & Zhang (2015), Nagy (2006) e Elalfy (2015), a rotura por galgamento tem sido apontada como uma das causas mais comuns de rotura de barragens de aterro e diques com base num conjunto de dados. No contexto específico dos diques, aproximadamente 50 em cada 120 casos de rotura foram por galgamento” (Fry et al., 2012; Rifai, 2018). Foster et al. (2000), também afirma que a maioria das roturas são causadas pelo galgamento (48,4%) e pela erosão interna (*pipping*) (46,1%). Através da investigação de Nagy (2006), dos 506 dados de rotura analisados, 87% foram por galgamento, erosão interna e instabilidade do talude do dique, sendo que dessa percentagem, 70% foram por rotura por galgamento.

2.4.4.2. Rotura por galgamento

A rotura por galgamento é o tipo de rotura mais frequente (Brater & King, 1976; Schierneck, 1998; Schmocker, 2011; Jónatas, 2013; Bhattarai, 2015; Rifai, 2018; Mendes, 2017; Branb, T. et al, 2022).

Este tipo de rotura ocorre quando o nível de água ultrapassa o coroamento do dique originando o aparecimento de uma brecha e a consequente erosão do material do talude de jusante, podendo evoluir até atingir a base do aterro. O galgamento tem maior probabilidade de ocorrência nas zonas do coroamento com cotas mais reduzidas, como por exemplo em descontinuidades ou em zonas onde tenham ocorrido assentamentos locais (Bhattarai, 2015). No início do galgamento, as tensões de corte induzidas pelo escoamento sobre o talude de jusante iniciam a erosão. Se a tensão tangencial ou de corte for superior à tensão de rotura do material do dique, acontecerá o processo de erosão, na qual as partículas de solo são arrastadas para jusante (Bhattarai, 2015; Eduardo, C. et al., 2017).

Na Figura 2.10 ilustra-se a evolução temporal do processo de rotura por galgamento de um dique em que a brecha inicial se dá junto à parede do canal.

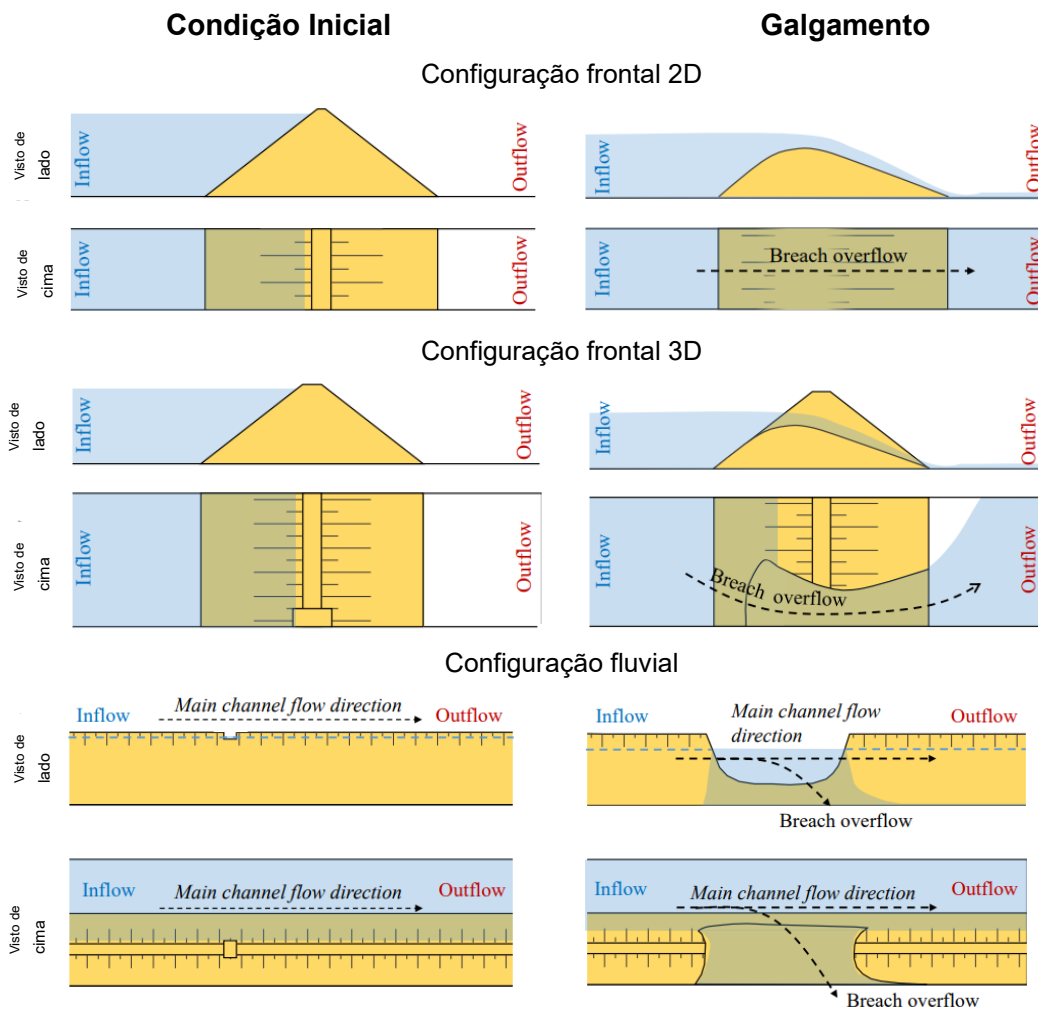


Figura 2.10 – Comportamento do dique num processo de rotura por galgamento. Adaptado de Rifai (2018)

2.4.4.3. Rotura por erosão interna

A erosão interna ocorre quando se verifica uma percolação interna excessiva através do solo, criando caminhos de fluxo preferenciais e conseguindo arrastar partículas do interior do dique para jusante (Foster, Fell & Spannagle, M. 2000; Younghui, 2006; Caldeira, 2018; Charrier, G. et al, 2013; Rifai, 2018). Se esta erosão for significativa pode dar-se início a um processo de erosão irreversível, em que a taxa de erosão aumenta continuamente, conduzindo assim à rotura do dique. Este tipo de rotura pode ser controlado através de diretrizes geotécnicas específicas, designadamente através da implementação de um núcleo argiloso com os respetivos filtros (Bhattarai, 2015). Na Figura 2.11 está representado a evolução de uma rotura por erosão interna.

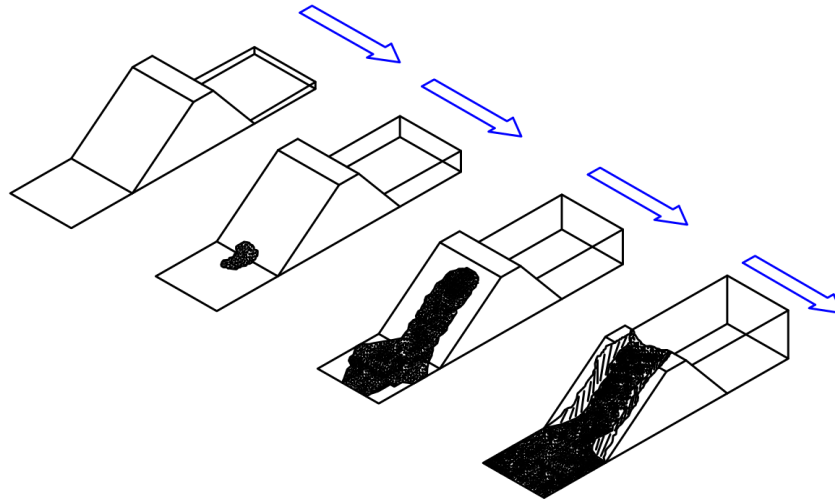


Figura 2.11 – Representação do desenvolvimento da rotura por erosão interna de um dique fluvial

O escoamento através do dique, no caso de rotura por erosão interna pode ser calculado por recurso á escoação de caudal através de um orifício, na medida em quem, durante grande parte do processo de evolução da rotura e comporta como tal. A expressão mais utilizada para calcular o caudal devido à rotura por erosão interna está representada na equação (2.1):

$$Q = C_d A_o \sqrt{2gH} \quad (2.1)$$

Em que:

Q – Caudal (m³/s);

C_d – Coeficiente de vazão;

A_o – Área da brecha (m²);

H – Altura da água cima da linha central da zona de rotura (m).

2.4.4.4. Rotura de origem geotécnica

A rotura de origem geotécnica ocorre quando ocorre uma rotura estrutural do dique, nomeadamente, devido às características geotécnicas de implementação do corpo do dique ou dos materiais de fundação. Este tipo de rotura acontece devido à incapacidade do corpo do dique ou dos materiais de fundação de resistirem às cargas atuantes. Segundo Bhattarai (2015), “todas as falhas geotécnicas têm em comum o facto de as forças motrizes efetivas (cargas estáticas e cargas dinâmicas) sobre o dique ou sobre a fundação excederem a capacidade resistente (atrito, coesão, coeficiente de elasticidade), de modo que o perfil do dique não possa ser novamente obtido”. O autor define ainda que:

- Forças efetivas: cargas estáticas (“mortas”) e as cargas dinâmicas (“de tráfego”);
- Forças horizontais: pressão de água, pressão do gelo, ondas ou vento;
- Forças dinâmicas: sísmicas, máquinas e obras para controle do efeito de golpe de aríete.

3. Caracterização da instalação experimental e medições

3.1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se a instalação experimental utilizada para a realização dos ensaios de rotura de diques, descrevendo a sua geometria e o respetivo modo de funcionamento. São detalhados os equipamentos e métodos de medição utilizados para a monitorização e respetiva caracterização dos ensaios. Ainda neste capítulo, descreve-se como se caracterizaram os ensaios experimentais, nomeadamente em termos hidrodinâmicos da rotura e cinemáticos do escoamento (reconstrução 3D do corpo do dique ao longo da rotura, campos de velocidade superficiais do escoamento, hidrogramas efluentes da rotura e determinação da geometria da brecha em termos matemáticos) com base nos dados adquiridos com os vários equipamentos que compõem o layout experimental.

3.2. Canal de rotura de diques fluviais

Os ensaios foram realizados numa instalação experimental que foi especificamente desenvolvida para a realização de ensaios experimentais de rotura de diques e que se localiza no Pavilhão de Hidráulica Fluvial do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) no LNEC.

A identificação dos vários elementos constituintes da instalação, a geometria com as dimensões respetivas, assim como a direção do escoamento no canal estão representadas na Figura 3.1.

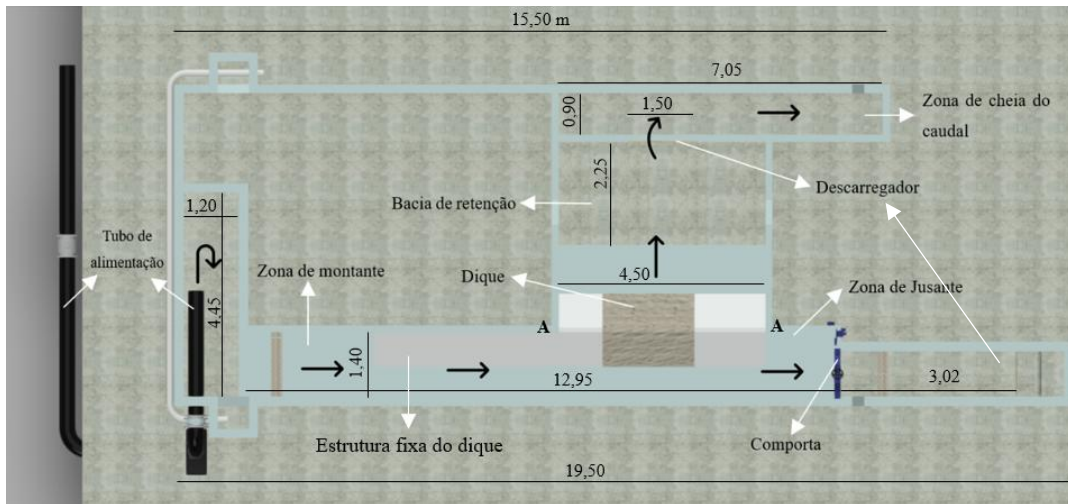


Figura 3.1 – Instalação experimental

Em termos de alimentação, a instalação funciona em circuito fechado, realizando o seguinte percurso: 1) a água que se encontra armazenada num reservatório inferior é elevada para um reservatório superior por recurso a um sistema de bombagem composto por duas bombas instaladas em paralelo (Figura 3.2); 2) o reservatório superior é dotado de um *trop-plein* que se liga por meio de uma conduta à instalação de rotura de diques, a qual alimenta por gravidade; 3) após ter sido utilizado na instalação, o caudal retorna ao reservatório inferior com a ajuda de um sistema de caleiras que se inicia na secção de saída da instalação e termina à entrada do reservatório inferior.

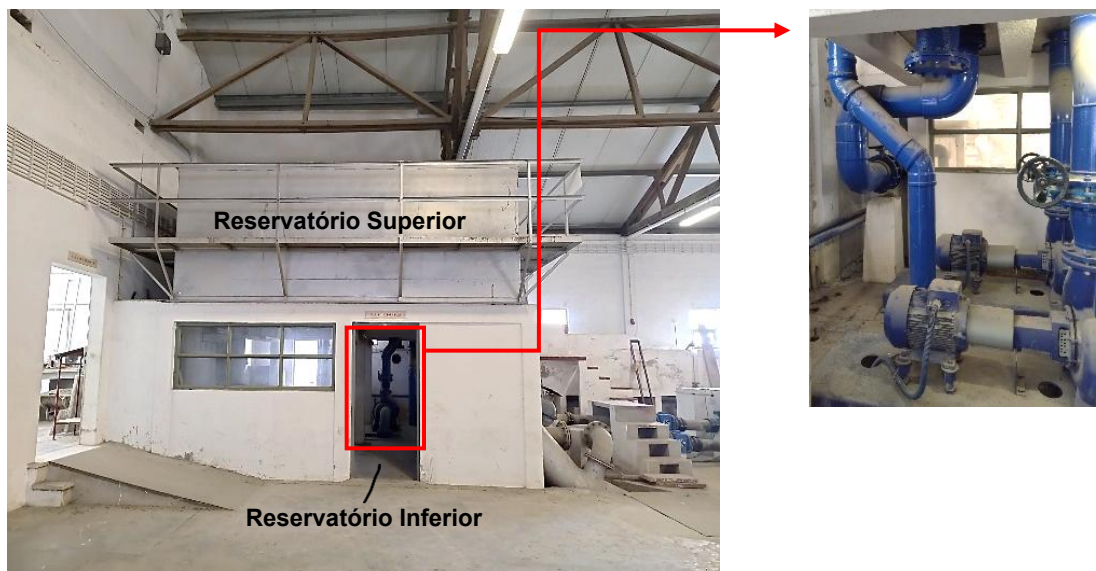


Figura 3.2 – Sistema de alimentação

O caudal afluente à instalação é controlado de forma manual por recurso a uma válvula de seccionamento de borboleta com diâmetro de 350 mm (Figura 3.3 (a)) e é registado continuamente com o auxílio de caudalímetro eletromagnético que se encontra no mesmo local. O caudal à saída da válvula de controlo de caudal é tipicamente turbulento, tendo-se

utilizado uma estrutura de estabilização e encaminhamento do escoamento à entrada do canal, com 1,4 m de largura e 0,55 m de comprimento, para acalmar as condições de escoamento ((Figura 3.3 (b)).

Para garantir a condição de fronteira de montante (dique semi-infinito) adicionou-se uma estrutura fixa com a mesma geometria do dique lateralmente, a montante e a jusante da zona de construção do corpo do dique (Figura 3.3 (c)). As dimensões desta estrutura encontram-se no Figura A.1. A manutenção do nível de água no canal de ensaios é realizada através de uma comporta automática (equipada com um motor trifásico) que regula os níveis de abertura da mesma em função dos níveis de água medidos no canal (Figura 3.3 (d)). Os valores da regulação do nível da comporta encontram-se no Anexo A.2 – Regulação do nível da comporta

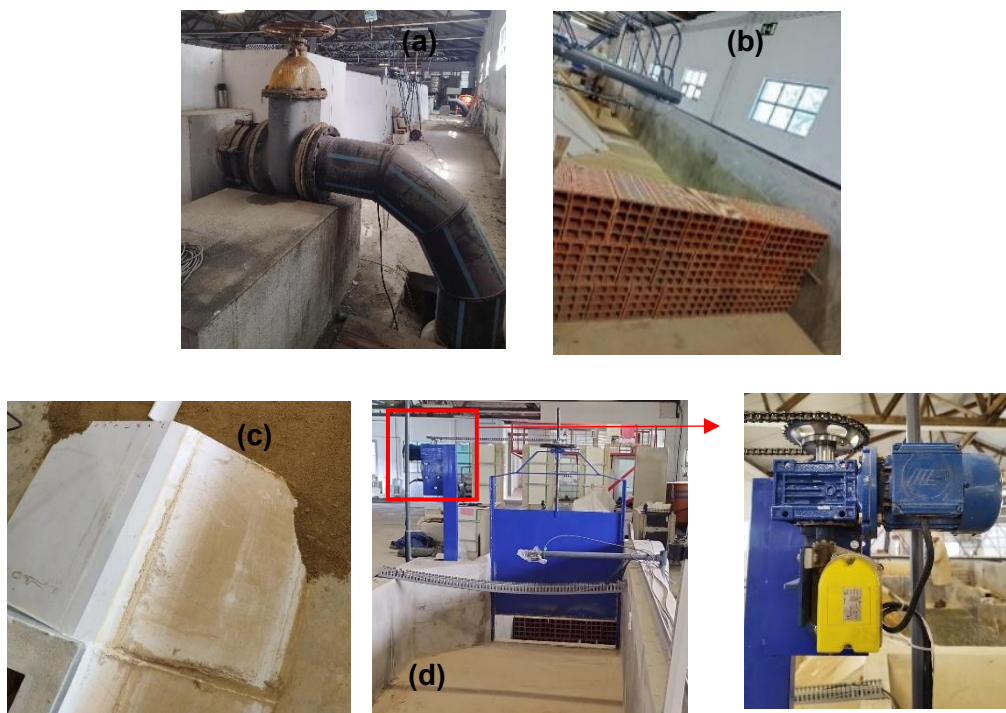


Figura 3.3 – Elementos constituintes na instalação. (a) válvula de seccionamento; (b) estrutura de estabilização; (c) estrutura fixa; (d) comporta automática

Na instalação experimental fixaram-se dez alvos 3D de georreferenciação (código em formato circular *Metashape* para deteção automática e atribuição de coordenadas) para auxiliar o processo de georreferenciação do dique durante a evolução da rotura e auxiliar a reconstrução 3D da evolução temporal da brecha. As coordenadas dos alvos foram determinadas com base nas leituras de um teodolito, como ilustrado na Figura 3.4.

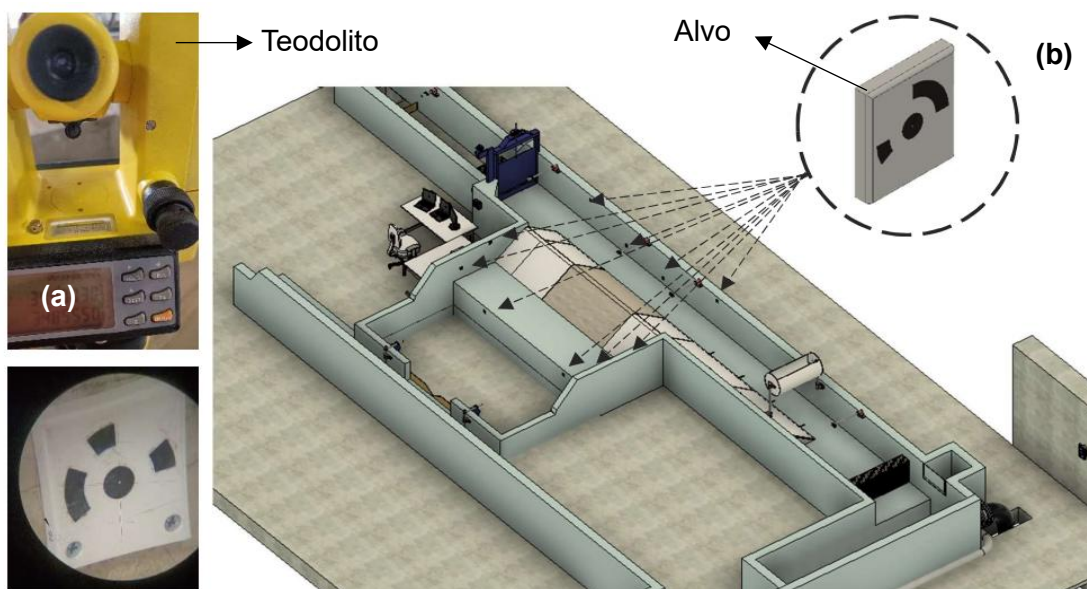


Figura 3.4 – (a) fotos do processo de referenciação local; (b) distribuição dos alvos no canal

Para efeitos de medição de caudais saídos da instalação, foram implementados dois descarregadores nas fronteiras de saída da mesma: 1) descarregador retangular sem contração (Figura 3.5, (a)) na fronteira de saída do canal principal, a jusante da comporta motorizada, para determinação do caudal efluente deste canal; 2) descarregador “V-notch” com contração lateral na zona de saída da bacia de retenção de sedimentos erodidos do dique (Figura 3.5, (b)) para determinação do caudal descarregado pela brecha. As dimensões de ambos os descarregadores encontram-se nos Anexos A.3 e A.4.



Figura 3.5 – Descarregadores existentes na instalação. (a) descarregador retangular; (b) descarregador em “V-Notch”

Para determinar o caudal escoado pelo descarregador retangular sem contração, utilizou-se a equação (3.1)(Massey, 2002; Quintela, 1990):

$$Q = L \cdot C \left(\frac{2}{3}\right) \sqrt{2g} (H)^{\frac{3}{2}} \quad (3.1)$$

Em que, Q é o caudal escoado (m³/s), L é o comprimento (m), C é o coeficiente de vazão (C=0,58), g é a aceleração da gravidade (9,8 m/s²) e H é a carga Hidráulica (m).

Para descarregadores em “V-notch”, a determinação do cálculo para o caudal escoado calcula-se com a fórmula de Manning-Strickler (3.2) (Brater & King, 1976):

$$Q = C \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) H^{\frac{5}{2}} \quad (3.2)$$

Em que C, H e g têm o significado descrito anteriormente e α é o ângulo do descarregador (°).

Para conseguir estimar o caudal escoado pelos descarregadores é necessário calibrá-los usando o hodómetro. Esse procedimento está explicado no Anexo A.5 – Procedimento da curva de calibração dos descarregadores

3.3. Configuração Experimental

3.3.1. Estrutura de suporte de equipamentos

Na Figura 3.6, apresenta-se uma vista geral da instalação e da localização da instrumentação utilizada. A instrumentação foi colocada de modo a medir as variáveis relevantes em toda a região de interesse.



Figura 3.6 – Instrumentação utilizada e a sua localização na instalação

3.3.2. Caudalímetro

O caudal afluente à instalação foi medido com um caudalímetro eletromagnético Krohne Optiflux2000F1 (Figura 3.7), posicionado à entrada do canal, cujo secundário (SC 100AS) está ligado digitalmente a um condicionador de sinal - *Quantum X* - que permite que esta medição seja recebida e armazenada continuamente por recurso ao software de aquisição, *catman Easy*. O controlo do caudal afluente foi realizado manualmente através da válvula de seccionamento. Este equipamento tem de estar previamente calibrado, cuja curva de calibração está representada no Anexo 4.6.



Figura 3.7 – Caudalímetro secundário

3.3.3. Sondas de nível

Os níveis de água ao longo do canal e no interior da bacia de retenção, a montante do descarregador “*V-notch*”, foram medidos com sondas acústicas ultrassónicas *Baumer U500* (Figura 3.8) que também estão previamente calibradas (Anexo 4.7 – Curva de calibração das sondas de nível). Estas sondas funcionam por efeito *Doppler* (que é a variação de frequência devido ao movimento relativo entre a fonte sonora e o observador), ou seja, baseiam-se na diferença entre o tempo de emissão e receção de um som de alta frequência. Estas sondas também foram ligadas ao *Quantum X*, com o qual se faz a aquisição dos dados das mesmas. Os níveis de água foram monitorizados em vários pontos do canal principal, a montante e jusante do dique, assim como na zona de aproximação, e também no interior da bacia de retenção.

Na instalação experimental distribuíram-se sete sondas acústicas por várias posições de interesse. Estas foram colocadas nas posições que se apresentam no Anexo 4.7 – Curva de calibração das sondas de nível. Outras características importantes são (Baumer, 2023):

- ➔ o intervalo de medição é de [0,10 m – 1m];
- ➔ o erro de medição é inferior a 0,5 mm;
- ➔ o seu sinal de saída está na gama [4 - 20 A/ 0 - 10 V] (corrente/tensão).



Figura 3.8 – Sondas ultrassónicas U500 *Baumer*

3.3.4. Sistema de aquisição de Imagem

Os ensaios experimentais contaram com a utilização de quatro câmaras distintas no respetivo sistema de aquisição de imagem (Figura 3.9). As câmaras de monitorização têm como finalidade: registar a evolução da brecha a partir de montante (Panasonic, Figura 3.9 (a)) e de jusante do dique (Sony, Figura 3.9 (c)), uma visão global da experiência (NVIAN, Figura 3.9 (b)) e registar o áudio de toda a duração do ensaio. Usou-se ainda uma câmara GoPro HERO 7 (Figura 3.9 (d)) para registar os deslocamentos de partículas de poliestireno à superfície do escoamento, na zona de aproximação e na secção da brecha, com vista à aplicação de um algoritmo de *Particle Tracking Velocimetry* (PTV) para obter os campos de velocidade superficial.



Figura 3.9 – Câmaras de vídeo

A reconstrução 3D do dique ao longo do processo de evolução da rotura foi baseada no pós-processamento das nuvens de pontos adquiridas com vários sensores de profundidade da Microsoft: versões Kinect 2.0 e Kinect Azure DK distribuídos em torno do corpo do dique por forma a conseguir um varrimento completo da área a medir.

O sensor Kinect é um dispositivo de entrada de movimento e reconhecimento de voz que permite captar não só os movimentos do processo da rotura da brecha, como registar imagens em 3D através da combinação de câmaras e sensores de profundidade. As componentes do sensor Kinect incluem (Microsoft, 2023; Gregoriji et al, 2022):

- ➔ Câmara RGB que tem como finalidade guardar imagens com cor (Figura 3.10 (1));
- ➔ Câmara infravermelhos que, com a ajuda do sensor de profundidade para iluminar a área em frente ao Kinect, permite registar imagens mesmo em condições com pouca luminosidade (Figura 3.10 (2));
- ➔ Sensor de profundidade que, com a ajuda da câmara de infravermelhos, consegue medir a distância entre o sensor e o objeto na qual o Kinect está a captar, contribuindo assim que o equipamento capture imagens em 3D (Figura 3.10 (3));
- ➔ Placa de som permite que o Kinect registre todo o som durante o ensaio (Figura 3.10(4)).



Figura 3.10 – Componentes dos sensores Kinect 2.0 e Kinect Azure DK

As vantagens deste equipamento são o reduzido custo de aquisição e a simplicidade do software de processamento das nuvens de pontos. A versão mais recente do Kinect (versão Azure) já efetua a sobreposição das nuvens de pontos adquiridas por cada equipamento de forma automática, dispensando a realização do pré-processamento o qual era necessário nas versões mais antigas. É importante salientar que as nuvens de pontos obtidas por estes equipamentos apresentam deformação nas extremidades sendo a precisão ótima alcançada no centro do campo de visão e apresentam um erro de medição que aumenta com a distância do objeto: quanto mais longe, maior o erro de medição. (Andrea et al, 2016).

Na instalação experimental foi utilizado outros tipos de equipamento nomeadamente o dispensador de partículas, o *software Catman Easy*, as Placas de aquisição National Instruments (NI) e Labview Signal Express. A descrição detalhada está no Anexo 4.8 – Dispensador de partículas–Anexo A.10 – Placas de aquisição National Instruments (NI) e Labview Signal Express.

3.4. Estimativas dos caudais afluente e efluente

3.4.1. Enquadramento

De uma maneira geral os caudais efluentes de uma brecha podem ser estimados a partir de: (i) equações empíricas de previsão, (ii) modelos paramétricos e (iii) dados recolhidos de modelos físicos. As estimativas empíricas focam-se em construir expressões que relacionam o caudal máximo efluente da brecha com as características do dique ou do canal. Nos modelos paramétricos pré-definir-se a geometria da brecha (largura e forma final) e o tempo de rotura, fazendo uso do tratamento estatístico da informação que é originada das roturas históricas ou de resultados experimentais. As estimativas baseadas em modelação física utilizam os dados recolhidos durante os ensaios estimando os caudais efluentes do aterro em rotura, através de um balanço de massa no reservatório a montante (no caso dos diques, no canal que simula o rio) ou através das leis de vazão de descarregadores localizados em pontos de referência da instalação.

Sendo este um trabalho de cariz experimental, as estimativas do caudal efluente da brecha foram baseadas nos dados adquiridos durante os ensaios.

3.4.2. Caudal afluente ao canal principal

A determinação dos dados do caudal afluente (de alimentação à instalação) foi realizada com base na combinação dos dados do caudalímetro com a abertura manual da válvula de borboleta localizada a montante (esta informação está explicada no subcapítulo 3.3.2). Os valores do caudal afluente lidos no caudalímetro são registados de forma automática e contínua numa placa de aquisição (data logger) *Quantum X* e o *software Catman Easy* que controla a placa de aquisição.

3.4.3. Caudal efluente do dique em rotura

O caudal descarregado pelo dique em rotura, ou seja, pela brecha, aqui designado de caudal efluente, é estimado da seguinte forma:

- ➔ baseado num **Balanço de massas** - através da diferença entre o caudal afluente, o balanço de massa no interior do canal e o caudal descarregado no descarregador a jusante da comporta do canal (baseado na curva de vazão do descarregador que é conhecida e está previamente calibrada);

Segundo Rifai (2018), a variação do volume depende dos parâmetros do caudal, do teor em água, do grau de compactação e do tipo de material. Caudais com o número de Froude elevado geram uma variação de volume maior e caudais com número de Froude reduzido

geram uma variação de volume menor (Schmocker, Frank, & Hager, 2014). Esta variação de volume pode ser dividida em dois comportamentos: i) variação gradual em que o escoamento “não sente” o processo erosivo; ii) “Queda de blocos” que se caracteriza pela queda do material durante a experiência e que afeta o escoamento instantaneamente (Figura 3.11).



Figura 3.11 – Queda de bloco (Primeiro ensaio)

A contribuição da variação de volume do canal principal para o caudal da brecha é estimada pela equação (3.3):

$$\frac{dV}{dt} = Q_a(t) - Q(t) \quad (3.3)$$

Em que:

Q_a – Caudal afluyente da brecha (m^3/s);

Q – Caudal da brecha com base no balanço de massas (m^3/s);

dV – Variação infinitesimal do volume no canal principal (m^3);

dt – Intervalo de tempo infinitesimal (s).

Sendo o volume do canal principal definido por $V = Ah$, em que A é a área do reservatório e h é a altura da água, a equação anterior pode ser rescrita como:

$$Q = A \frac{dV}{dt} \quad (3.4)$$

- ➔ Com base na curva de vazão do descarregador *V-notch* (apresentada em 3.2).
- ➔ A estimativa direta do caudal descarregado pela brecha é obtida a partir da combinação da área da brecha em cada instante (área disponível para escoamento resultante da reconstrução 3D) com a respetiva velocidade do escoamento nessa secção (resultante da estimativa dos campos de velocidade).

3.5. Morfologia da brecha

3.5.1. Estimativa da geometria da brecha e curva de transição do escoamento

Devido à natureza dinâmica dos ensaios de rotura de aterros de barragens e diques, é impossível prever quando e onde os blocos se vão destacar da estrutura principal do aterro. No caso de aterros homogêneos, a correta caracterização da evolução morfodinâmica é um desafio acrescido pelo facto da técnica de *stop-motion* para extrair a evolução da morfologia da brecha poder também reduzir a estabilidade da brecha e levar ao seu colapso, o que pode comprometer a caracterização hidrodinâmica do ensaio. Uma solução para evitar a técnica de *stop-motion* é a utilização de técnicas óticas em tempo real.

A extração de dados em tempo real da morfologia 3D da brecha pode ser conseguida por equipamentos como o Lidar *Time of Flight* (ToF), que medem diretamente o tempo de ida e volta de um impulso de luz ao respetivo emissor. Os emissores de luz e os foto-detetores medem as diferenças de fase entre uma onda de luz sinusoidal contínua emitida ou um impulso único e o sinal recebido por cada sensor. Em seguida, o tempo de percurso do impulso é multiplicado pela velocidade da luz e convertido em dados de distância. Isto pode ser efetuado por meio de um ToF de impulso único definido pela expressão (3.5):

$$d = \frac{ct}{2} \quad (3.5)$$

Em que:

d – Distância entre o objeto e o equipamento;

c – velocidade da luz (m/s);

A equação pode ser traduzida pela fase ToF que está representada na equação (3.6):

$$d = \frac{c}{4\pi f} \varphi = \frac{c}{4\pi f} \left(\frac{C_3 - C_1}{C_0 - C_2} \right) \quad (3.6)$$

Em que:

f – Sinal de frequência;

φ – Diferença de fase.

Definiu-se a curva de transição do escoamento como a região em que as características hidráulicas da velocidade do caudal sofrem uma transição de regime lento para rápido. A determinação do limite do cone de transição do escoamento e, conseqüentemente, a avaliação da área do cone de transição do escoamento são de importância fundamental para a estimativa do escoamento da rutura *in situ*.

A geometria da brecha e o escoamento no cone de transição foram determinados usando dois Kinects, incorporados com câmara de alta resolução RGB (Red, Green, Blue), uma câmara infravermelhos e sensores de profundidade que estão mais bem caracterizados no capítulo 3.3.4.

Por fim, analisou-se o número de Froude através da expressão (3.7):

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (3.7)$$

Em que:

Fr – Número de Froude (parâmetro adimensional);

U – Velocidade de escoamento (m/s);

g – Aceleração da gravidade (9,81 m/s²);

h – Profundidade hidráulica (m), sendo que $h=A/B$ (sendo A a área da secção transversal, em m², e B a largura da superfície livre, em m).

Desta forma é possível classificar o escoamento como:

- ➔ Fr < 1 – Regime lento: Em termos teóricos, a altura uniforme é maior que a altura crítica. Isto significa que num plano prático, o escoamento é lento, profundo e as ondas propagar-se-ão a montante, logo o dique tende a erodir também a montante;
- ➔ Fr = 1 – Regime crítico: a altura uniforme é igual a altura crítica, o que em termos práticos produz um escoamento de transição de um canal com diferentes dimensões;
- ➔ Fr > 1 – Regime rápido: a altura uniforme é menor que a altura crítica, o que cria um escoamento rápido, raso e as ondas propagar-se-ão a jusante, o que gera uma erosão do dique mais a jusante também.

A análise do número de Froude em relação à altura uniforme e crítica é crucial para o design e gestão eficiente de canais, ajudando a prever e controlar diferentes regimes de escoamento.

3.5.2. Reconstrução 3D do dique em vários instantes do processo de rotura

A reprodução tridimensional do dique em vários instantes da rotura foi realizada com base na utilização de sensores Kinect. Tanto o Kinect 2.0 como o Kinect Azure DK permitem a aquisição de nuvens de pontos, e, por conseguinte, a reconstrução 3D do corpo do dique. É necessário ter em conta a localização dos Kinect's, a sobreposição das nuvens de pontos adquiridas, de maneira a conhecer a gama de erro e validar os dados.

3.5.3. Velocimetria superficial

Para a determinação do campo de velocidades na zona de aproximação e secção da brecha utilizou-se um algoritmo de PTV para seguir as partículas de polistireno dispersas na superfície livre a montante do dique.

As imagens usadas para a determinação do campo de velocidades foram as adquiridas com a câmara GoPro a 240 Hz, ou seja, com uma taxa de aquisição suficientemente elevada para que o deslocamento das partículas entre imagens fosse suficientemente pequeno para ficar dentro da mesma área de análise (Figura 3.12). As vantagens desta câmara são: elevada frequência de aquisição, elevada memória para gravação de longas séries temporais e elevada resolução das imagens (indicar o valor 1300x1080 em pixéis). Como desvantagem a lente "olho de peixe" que provoca a distorção das imagens adquiridas, obrigando a uma etapa de pré-processamento para corrigir as imagens.

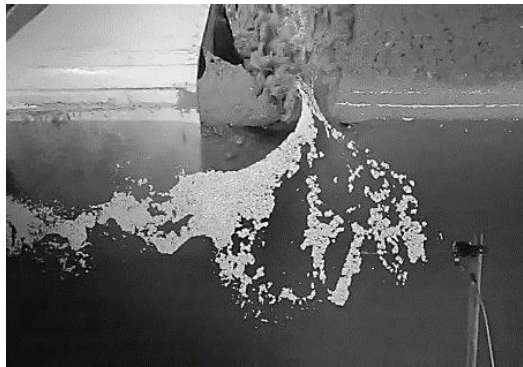


Figura 3.12 – Exemplo de imagem captada pela câmara GoPro (Primeiro ensaio)

Para determinar as velocidades na aproximação à brecha e seguir as partículas utilizou-se o algoritmo PTV *Voronoi* (Capart et al. 2002) que consiste em desenhar, para o tempo t , e em torno das partículas detetadas (Figura 3.13 (a)), o respetivo diagrama de Voronoï (Figura 3.13 (b)). Ao ligar o i -polígono aos seus vizinhos mais próximos, obtém-se um padrão designado por “Estrela de Voronoï” (Figura 3.13 (c)). Aplica-se o mesmo raciocínio para a imagem em $t=t+dt$ (Figura 3.13 (d)). Este estudo é utilizado como modelo de correspondência entre a partícula i e a partícula j que ocorre se a distância entre as extremidades das duas estrelas S_i e S_j for um mínimo estimado na expressão (3.8):

$$match(P_i, P_j) = \min (dist(S_i, S_j)) \quad (3.8)$$

A distância entre as extremidades é dada pela expressão (3.9):

$$\text{dist}(S_i, S_j) = \text{mediana}(d_1, d_2, \dots, d_n) \quad (3.9)$$

Em que:

d_i ($i=1,2,\dots,n$) - é a distância euclidiana entre cada extremidade.

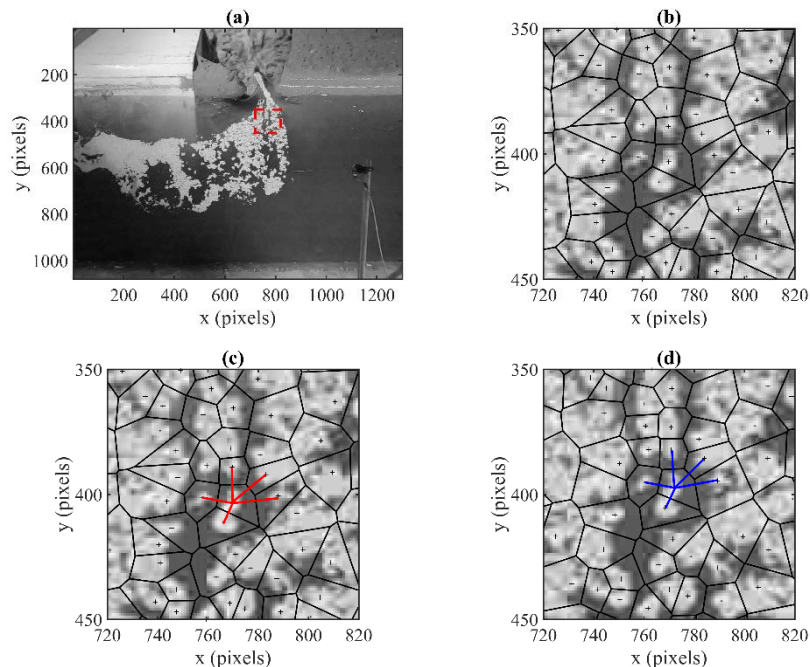
A velocidade da partícula i é dada pela equação (3.10):

$$v = \frac{\text{dist}(S_i, S_j)}{dt} \quad (3.10)$$

Em que:

dt - é o tempo de intervalo entre pares de imagens.

A mediana é utilizada na equação para aumentar a robustez do algoritmo. De facto, as estrelas não necessitam de ter o mesmo número de ramos, pelo que se uma partícula se perder, por exemplo, devido a um movimento fora do plano, é ainda possível utilizar os outros ramos no procedimento de emparelhamento. Uma das vantagens da utilização deste método é a sua robustez para lidar com gradientes elevados, sendo por isso relevante a sua utilização no contexto de escoamentos transitórios, como é o caso do escoamento da rotura do dique.



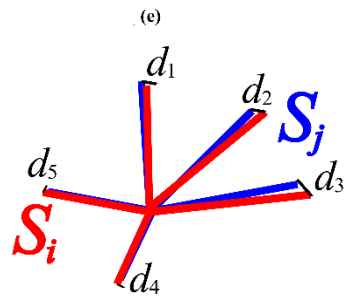


Figura 3.13 – (a) Imagem do escoamento no tempo $t = 328$ s com a indicação da zona a analisar; (b) Diagrama de Voronoï na zona selecionada; (c) Diagrama de Voronoï e estrela para o tempo $t = 328$ s; (d) Diagrama de Voronoï e estrela para o tempo $t+dt$ (e) Determinação do Diagrama de Voronoï

4. Ensaios experimentais

4.1. Campanha experimental

Neste subcapítulo são descritas: a caracterização geométrica e granulométrica dos diques onde se explica o *Ensaio PROCTOR Standard*, o processo construtivo dos diques, com a definição do canal piloto e o procedimento experimental. Foram realizados 4 ensaios experimentais nos quais se variou a composição do solo, o grau de compactação e o número de Froude. As condições de implementação do dique, designadamente o teor de água, o peso volúmico seco e a altura do dique são consequência do grau de compactação adotado e do número de Froude, respetivamente. No Quadro 4.1 apresenta-se um resumo dos 4 ensaios realizados.

Quadro 4.1 – Características geotécnicas dos ensaios

| Designação | Ensaio 1 S1T1 | Ensaio 2 S1T2 | Ensaio 3 S2T1 | Ensaio 4 S2T2 |
|--|---|------------------|------------------|------------------|
| Dique | Homogéneo | Homogéneo | Homogéneo | Homogéneo |
| h_{dique} (m) | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,3 |
| Número de Froude | Variável ($Q \neq \text{constante}$) | 0,1 | 0,1 | 0,2 |
| D_{50} | 0,6 | 0,6 | 0,2 | 0,2 |
| Grau de compactação (%) | 95,1 | 100,1 | 93,4 | 90,3 |
| Teor de água experimental, W (%) | 7,6 | 9,2 | 13,3 | 13 |
| Peso Volúmico seco experimental, γ_{exp} (kN/m^3) | 17,7 | 18,6 | 15,6 | 15 |
| Posição do canal piloto (x)(m)* | 0,3 | 0,5 | 1,0 | 1,0 |

*Ver Figura 4.1

Considerou-se ainda a seguinte nomenclatura:

- “S1T1” como “Primeiro teste do solo 1” (primeiro ensaio). O caudal neste ensaio foi considerado variável;
- “S1T2” como “Segundo teste do solo 1” (segundo ensaio). O caudal foi constante;
- “S2T1” como “Primeiro teste do solo 2” (terceiro ensaio). O caudal foi constante, mas com material diferente;
- “S2T2” como “Segundo teste do solo 2” (quarto ensaio). O caudal é constante, mas há redução da altura do dique para 30 cm;
- “CE” como “Caudal Efluente” uma vez que a instalação apresenta duas zonas de saída de caudal.

4.2. Geometria dos diques ensaiados

O canal experimental permite ensaiar diques até 0,5m de altura, sendo que os ensaios S1T1 a S2T1 foram realizados com 0,5m e o S2T2 com 0,3m de altura. A geometria destes diques encontra-se esquematizada na Figura 4.1. O corte A-A é caracterizado pela estrutura fixa do dique (está caracterizado no capítulo 3.2 e a sua localização na instalação está no Anexo A.1 – Dimensões da estrutura fixa colocada na instalação experimental e localização do corte A-A).

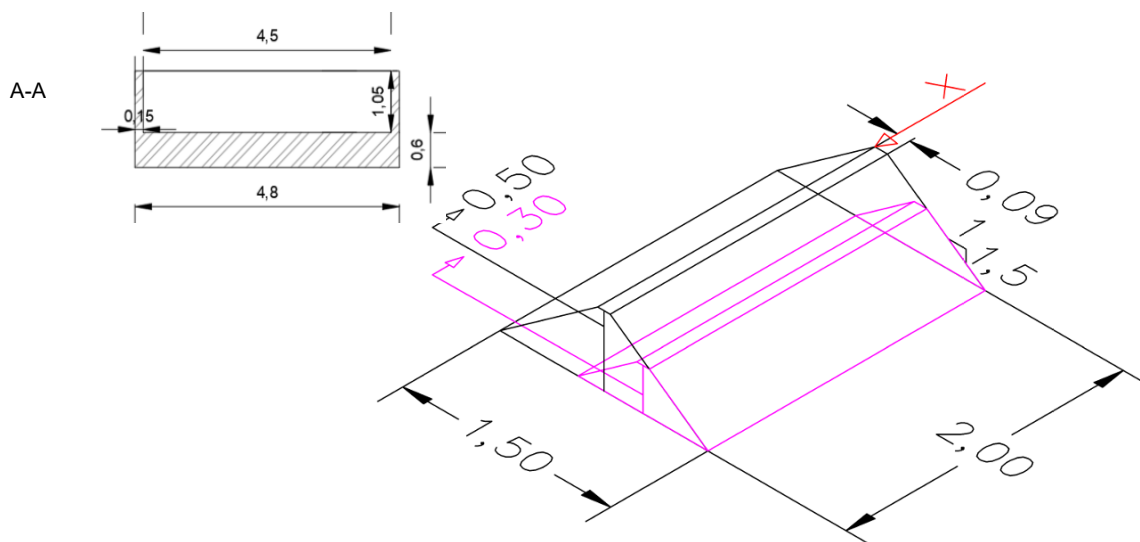


Figura 4.1 – Dimensões do dique em metros

Conforme se pode observar no Quadro 4.1 foram reproduzidos 3 números de Froude distintos, variáveis entre 0,1 e 0,2. Os valores do grau de compactação variam entre 90,3 a 100,1%, bem como o teor de água distintos, variáveis entre 7,6 a 13,3%.

Refira-se que se reduziu a altura do dique do S2T2 em 0,2m por forma a se conseguir aumentar o número de Froude no canal de alimentação, conforme exposto na Figura 4.1.

Embora o canal piloto inicial não tenha sido objeto de estudo no presente trabalho, a posição do mesmo foi variável entre ensaios, uma vez que, no início da campanha experimental ainda se estava a avaliar qual seria a melhor posição para a localização do mesmo. No quadro seguinte indica-se a distância à estrutura fixa do eixo central do mesmo, sendo que, como se pode observar, a distância de 1m, portanto no centro do dique, acabou por ser a posição adotada. As dimensões do canal piloto estão expostos no subcapítulo 4.4 que atendeu às proporções do dique e ao caudal efluente no canal principal.

Quadro 4.2 – Posição do canal piloto

| Designação | Ensaio 1 | Ensaio 2 | Ensaio 3 | Ensaio 4 |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Posição do canal piloto (m) | 0,3 | 0,5 | 1,0 | 1,0 |

4.3. Caracterização geotécnica do solo

4.3.1. Curva granulométrica

Na seleção das misturas granulométricas a adotar considerou-se a percentagem de finos adequada a este tipo de obra hidráulica, tendo em mente as características geotécnicas que normalmente se encontram em diques reais localizados em Portugal.

A caracterização geotécnica foi efetuada no Departamento de Geotecnia do LNEC, sendo que após a mesma se selecionaram os seguintes solos, ambos areias siltosas com percentagens de finos distintas:

- ➔ Solo 1 – Ensaios 1 e 2 - S1: 10% Seixo e 10% finos com d_{50}^{s1} 0,6 mm;
- ➔ Solo 2 – Ensaios 3 e 4 - S2: 10% Seixo e 20% finos com d_{50}^{s2} 0,2 mm.

Note-se que, os solos ensaiados, embora com alguma percentagem de finos, e portanto, com alguma coesão aparente, não podem ser considerados solos puramente coesivos. Podendo, no entanto, afirmar-se que durante o processo erosivo apresentam um comportamento mecânico semelhante aos solos coesivos.

A curva granulométrica do Solo 1, resultante da análise das frações do solo através da peneiração e da sedimentação do material, está representada na Figura 4.2 e as respetivas características são apresentadas no Quadro 4.3.

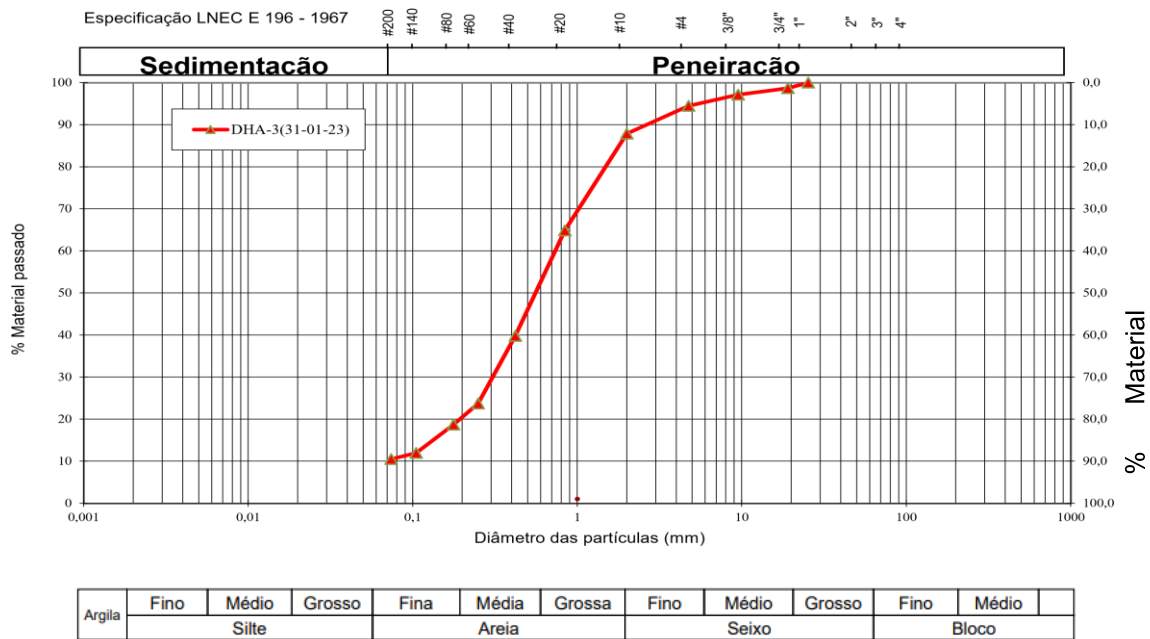


Figura 4.2 – Curva granulométrica do solo

Quadro 4.3 - Valores da curva granulométrica (ensaio S1T1 e S1T2)

| 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 | 12,9 | 14,5 | 19,6 | 29,3 | 49,4 | 72,6 | 82,8 | 89,8 | 93,0 | 96,8 | 100,0 | 100,0 | |

Nos ensaios 3 e 4 selecionou-se um solo com uma maior percentagem de finos (20%), e com 10% seixos. Na Figura 4.3 e no Quadro 4.2 apresentam-se respetivamente a curva granulométrica e as respetivas características.

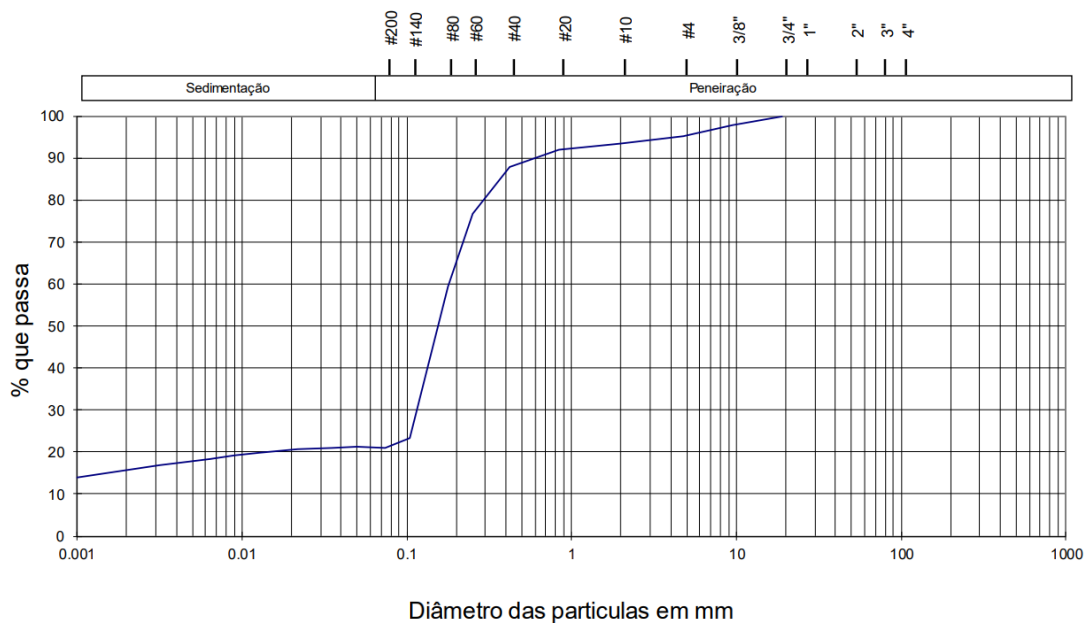


Figura 4.3 – Análise granulométrica do solo

Quadro 4.4 - Valores da curva granulométrica (ensaio S2T1 e S2T2)

| | | | | | | | | | | | | | |
|---------|------|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|-------|
| 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 | | | |

Por fim, utilizou-se o Método da Garrafa de Areia para determinar a densidade seca in situ, neste caso no dique. O procedimento deste método encontra-se demonstrado no (Anexo A.11)

4.3.2. Curva de compactação

A compactação do solo é um processo essencial na construção de diques fluviais, contribuindo para reduzir o volume de ar nos espaços vazios entre as partículas, aumentando assim o peso volúmico do solo. Este procedimento resulta no aumento da resistência do aterro e na redução da respetiva permeabilidade.

Na Figura 4.4 e Figura 4.5, estão representadas as curvas de compactação obtidas por recurso ao *Ensaio PROCTOR Standard* para os ensaios 1 e 2 e para os ensaios 3 e 4, respetivamente. Os dados de base utilizados neste ensaio constam no Quadro 4.5 .

Quadro 4.5 - Dados para o ensaio PROCTOR

| Ensaio de compactação PROCTOR | | | |
|-------------------------------|------|------------------------------------|-----|
| Peso do pilão (g) | 2490 | Nº de camadas | 3 |
| Altura de queda (cm) | 30,4 | Nº de pancadas por camada | 25 |
| Peso do molde (g) | 2028 | Volume do molde (cm ³) | 934 |

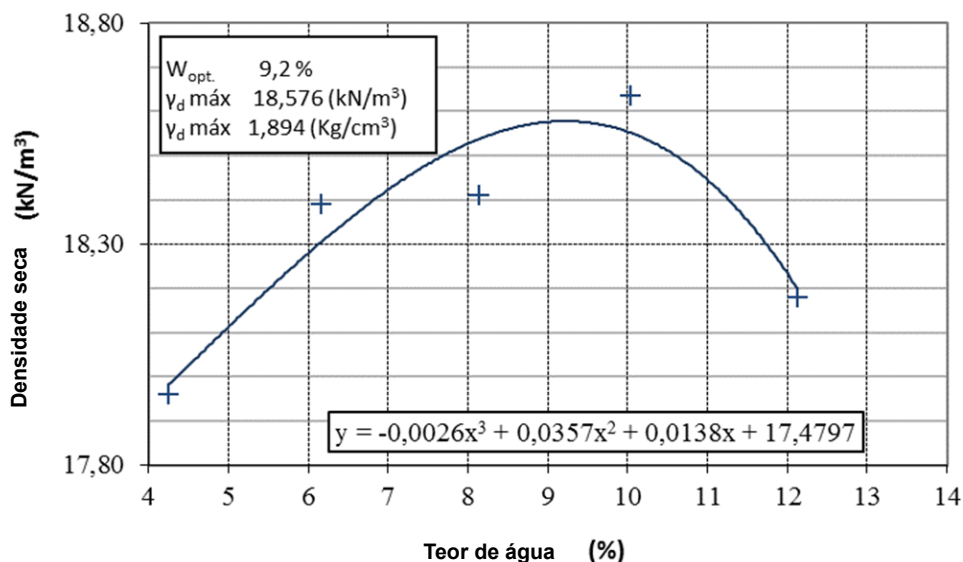


Figura 4.4 – Ensaio de compactação PROCTOR Standard do solo relativamente ao E1 e E2

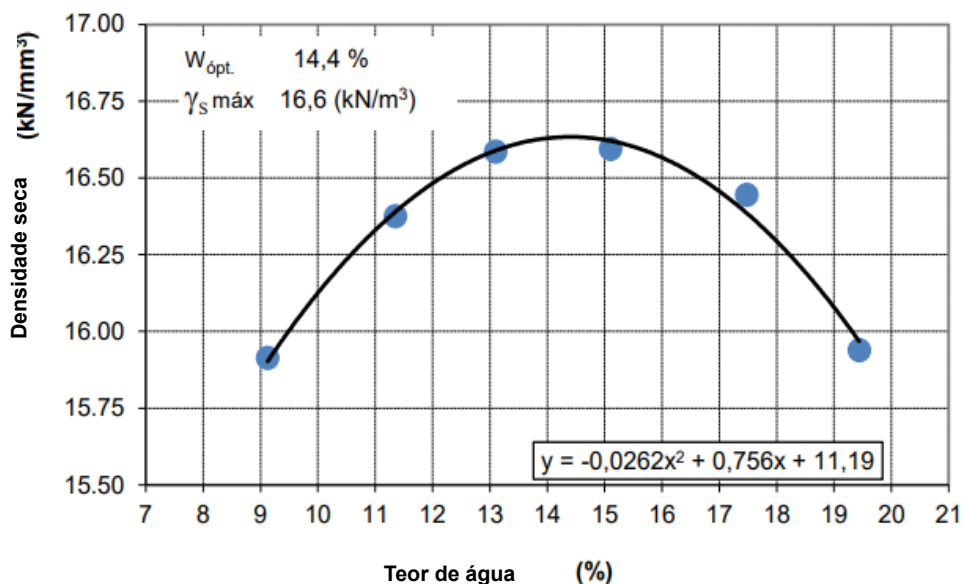


Figura 4.5 – Ensaio de compactação PROCTOR Standard do solo relativamente ao E3 e E4

Para se conseguir conduzir o dique à rotura em condições laboratoriais, isto é, com as reduzidas velocidades que se conseguem induzir no canal de aproximação à brecha, é necessário diminuir a resistência do dique.

Esta redução é conseguida à custa da diminuição do grau de compactação dos diques, para um valor abaixo dos 100%, valor este para o qual se conseguem obter os valores ótimos do teor em água e máximo do peso volúmico seco. No Quadro 4.6, apresentam-se os graus de compactação implementados em cada ensaio experimental com os respetivos teores de água e peso volúmico seco, assim como também os valores provenientes do ensaio PROCTOR. Embora este quadro apresente parte da informação constante do Quadro 4.1, foi aqui novamente colocada para frisar as diferenças obtidas nos teores de água e pesos volúmicos secos, em relação aos valores de referência advindos do ensaio PROCTOR.

Saliente-se que, à exceção do ensaio 2, para o qual o grau de compactação foi aproximadamente 100%, e como tal o peso volúmico seco que se conseguiu implementar no laboratório, foi o de referência do ensaio PROCTOR, nos restantes ensaios aquela variável apresentou sempre valores inferiores ao de referência. Ou seja, os diques dos ensaios E1, E3 e E4 apresentaram menor resistência que o E2. De facto, conforme se virá a apresentar mais à frente, este ensaio apresentou um maior tempo de rotura que os restantes.

No que respeita o teor em água, em todos os ensaios realizados, E1 a E4, a diminuição do grau de compactação, combinada com uma fraca adição de água previamente ao processo de compactação, impôs uma redução no teor em água em cerca de 1 a 2% do valor ótimo de referência do teste de PROCTOR.

Quadro 4.6 – Graus de compactação implementados em cada ensaio com os respetivos teores em água e peso volúmico seco

| Designação | Ensaio 1 | Ensaio 2 | Ensaio 3 | Ensaio 4 |
|--|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Grau de compactação (%) | 95,1 | 100,1 | 93,4 | 90,3 |
| Teor em água (%) $W_{op} / W_{experimental}$ | 9,2 / 7,6 | 9,2 / 7,6 | 14,4 / 13,3 | 14,4 / 13 |
| Peso Volúmico (kN/m ³) seco, $\gamma_{PT} / \gamma_{experimental}$ | 18,4 / 17,7 | 18,4 / 18,6 | 16,6 / 16,53 | 16,6 / 16,55 |

4.4. Processo de construção dos diques

Independentemente da diferença entre os solos adotados nos primeiros ensaios (1 e 2) e nos últimos ensaios (3 e 4), o processo de construção dos diques foi o mesmo, podendo ser descrito pelos seguintes passos:

- antes da colocação do material, foi adicionada uma estrutura fixa de acrílico para definir a geometria e a localização exata do dique;

- depois, iniciou-se o processo de construção no qual o primeiro passo foi a colocação do material na área de implementação do dique (Figura 4.6 (a));
- o dique foi construído por camadas, tendo sido adotadas 10 camadas para se atingir as alturas alvo dos diques experimentais;
- após cada camada, retira-se o excesso de areia com a finalidade de respeitar os critérios de compactação (Figura 4.6(b));
- a compactação das camadas foi realizada de seguida, por recurso a um vibrador PC1010 da Euro-Shatal com base retangular de dimensões 0,30x0,40m e com uma frequência de vibração de 100 Hz (Figura 4.6 (c));
- com a ajuda de um ancinho e de um molde de madeira, efetuam-se os ajustes finais entre camadas, designadamente a conferência de adesão à camada seguinte (Figura 4.6 (d));
- após a construção total do dique, sarrafa-se o mesmo, com o objetivo de retirar o excesso de material com a ajuda de uma régua metálica e do molde executado antes da construção para atribuir aos diques as formas desejadas nomeadamente em termos de altura e de declives dos taludes. (Figura 4.6 (e));
- após a realização do último passo obtêm-se as formas finais dos diques experimentais (Figura 4.6 (f));
- o passo final, a realizar imediatamente antes da realização do ensaio experimental, é a realização do entalhe no corpo do dique para reprodução do canal piloto, ou seja, do local onde vai ser iniciado o processo de rotura (Figura 4.7).





Figura 4.6 – Passos para a construção do dique

Como referido anteriormente, para iniciar o processo de rotura, efetua-se uma fragilidade no corpo do dique, onde se irá iniciar a brecha inicial, denominada de canal piloto. O canal piloto é a zona onde passa o escoamento para se iniciar o processo de rotura. O mesmo é igual em todos os ensaios e apresenta uma brecha de secção retangular (10 cm de comprimento e 3 cm de profundidade). Para definir a zona onde o canal piloto se situava, delineou-se no dique, uma grelha quadrada de 10 cm de lado. Esta marcação permitiu igualmente facilitar a análise da quantidade de material erodido pela rotura. A Figura 4.7 apresenta o canal piloto utilizado para os quatro ensaios.



Figura 4.7 – Canal piloto

4.5. Procedimento experimental

Para a realização dos quatro ensaios seguiu-se um protocolo com as tarefas a efetuar garantindo uma melhor organização e sucesso dos mesmos.

Na semana anterior ao ensaio efetuavam-se as seguintes tarefas:

- Montagem da estrutura para colocação dos sistemas de aquisição;
- Limpeza da instalação;
- Verificação da quantidade de material necessária à construção do dique;
- Construção do dique;
- Ensaio teste para verificar se todos os equipamentos estão operacionais;
- Colocação dos computadores na instalação;
- Verificação dos intervalos de valores para abertura e fecho da comporta;
- Calibração dos equipamentos.

No dia anterior ao ensaio realizaram-se as seguintes tarefas:

- Verificar a compatibilização da extração de dados com o tempo real;
- Verificar o funcionamento das bombas;
- Garantir a disponibilidade de poliestireno para a realização da totalidade do ensaio;
- Encher o reservatório da bacia de retenção e da zona de jusante até ao nível da crista dos descarregadores;
- Verificar o funcionamento do caudalímetro;
- Garantir a modelação 3D em tempo real com o Kinect Azure DK;
- Colocação da iluminação para melhor visualização da zona em estudo;
- Nova verificação da operacionalidade e adequação das leituras de todos os equipamentos;
- Verificação do funcionamento dos softwares de extração de dados.

No dia do ensaio realizaram-se as seguintes tarefas:

- O corte do canal piloto
- A montagem dos Kinects por forma a apanhar a região de interesse;
- A montagem da GoPro a 2,5 m de distância da superfície livre do dique;
- A montagem das câmaras de vídeo;
- A ligação das bombas;
- O enchimento do tubo do dispensador de poliestireno;

Após a realização do ensaio, no próprio dia, ou no dia seguinte retira-se todos os sistemas de aquisição de dados e limpou-se o local;

5. Resultados obtidos

5.1. Enquadramento

Conforme referido em 4.1 foram realizados quatro ensaios de rotura por galgamento de diques fluviais no âmbito do presente trabalho de mestrado. O presente capítulo destina-se à apresentação e discussão dos resultados obtidos.

A discussão é baseada na análise dos caudais efluentes (hidrograma de rotura), na evolução temporal da morfologia da brecha e respetivos volumes erodidos (desenvolvimento do processo de rotura), e na velocimetria superficial do escoamento na aproximação da brecha (campo de velocidades superficial), respetivamente apresentados nos pontos 5.2, 5.3 e 5.4. Este capítulo termina com a comparação dos resultados obtidos com um ensaio de referência da literatura.

Por forma a melhor compreender a discussão apresentada neste capítulo, adotaram-se as seguintes assunções:

- o **início do ensaio** foi considerado como o instante de passagem de água pelo canal piloto, ou seja, o momento a partir do qual se inicia o processo erosivo do paramento de jusante do dique;
- define-se como **queda de blocos**, o evento que resulta num aumento súbito da área da brecha, ou seja, da área disponível para escoamento;
- na ausência de queda de blocos durante um intervalo de 200 segundos, considera-se o início de um novo evento;
- o **ensaio termina** quando já não se conseguem manter condições de escoamento fluvial no canal, isto é, quando a manutenção do nível de água no mesmo, é conseguida à custa do fecho total da comporta de jusante, gerando-se assim correntes de retorno que não correspondem ao comportamento normal do escoamento fluvial;
- utilizou-se **um caudal constante de 80 l/s** para todos os ensaios à exceção do ensaio S2T2, no qual o caudal foi ajustado para 74 l/s.

5.2. Caudal efluente da brecha

O caudal efluente da brecha (hidrograma de rotura) pode ser estimado com base num **balanço de massas** no canal principal ou com base **na curva de vazão do descarregador “V-notch”** de jusante, conforme referido em 3.4.3. A análise feita do hidrograma de cheia é uma análise qualitativa.

O primeiro ensaio realizado (S1T1) foi de carácter exploratório, tendo servido para avaliar a adequação do layout experimental, o funcionamento dos equipamentos eletromecânicos (caudalímetro e comporta de jusante) e o desempenho da instalação na reprodução da rotura de um dique fluvial. De uma maneira geral as conclusões advindas deste teste foram positivas, tendo ficado provado a adequabilidade da instalação para a realização deste tipo de ensaios. Observou-se, no entanto, que a comporta de jusante necessitava de uma afinação mais fina no que respeita o controlo do nível do canal, uma vez que não se conseguiu manter o nível constante no canal principal durante a totalidade do período do ensaio. Ou seja, este ensaio S1T1 foi realizado em condições variáveis de caudal afluente e nível no canal principal.

A automação da comporta de jusante foi posteriormente afinada, sendo que nos ensaios seguintes esta comporta já se encontrava devidamente calibrada, permitindo manter condições de nível constante durante a totalidade do período de interesse dos ensaios (aqui designadas, como ‘condições fluviais’).

A Figura 5.1 apresenta os caudais afluente e efluente do canal principal, designadamente hidrograma afluente ao dique e hidrograma efluente do canal principal, assim como o hidrograma efluente da brecha, medido com base na curva de vazão do descarregador “V-notch” instalado no final da bacia de sedimentação, localizada a jusante do dique.

De uma maneira geral pode observar-se que no Ensaio 1 (S1T1), o caudal afluente ao canal (linha azul da Figura 5.1, a)), a partir do instante $t=70s$ começa a aumentar, enquanto o caudal que está a sair pela comporta de jusante deste canal (linha laranja da imagem a)) diminui. De facto, nos restantes ensaios (2, 3 e 4) o caudal afluente ao canal principal foi sempre mantido constante como se pode ver na linha azul representada em cada uma das imagens correspondentes (Figura 5.1, b), c), d)). Também nestas últimas 3 imagens se observa uma diminuição progressiva do caudal efluente do canal principal (linha a laranja nas Figura 5.1, b), c), d)), representativa da diminuição da abertura da comporta por forma a manter o nível constante no canal.

A linha a verde das imagens da Figura 5.1 representa o caudal efluente da brecha, medido com base na curva de vazão do descarregador “V-notch” instalado no final da bacia de sedimentação.

A Figura 5.2 apresenta esta última estimativa para os 4 ensaios realizados num só gráfico, mas com os eixos do x e do y normalizados, isto é, com o caudal efluente e o tempo de ensaio respetivamente normalizados da seguinte forma:

- Caudal adimensional:

$$Q_{adimensional} = \frac{Q_{t=i}}{Q_{ponta}} \quad (5.1)$$

Em que $Q_{adimensional}$ é o caudal adimensional do caudal efluente, $Q_{t=i}$ é o caudal no instante i (m^3/s), Q_{ponta} é o caudal de ponta (m^3/s)

- Tempo adimensional

$$t_{adimensional} = \frac{t - t_0}{t_{final} - t_0} \quad (5.2)$$

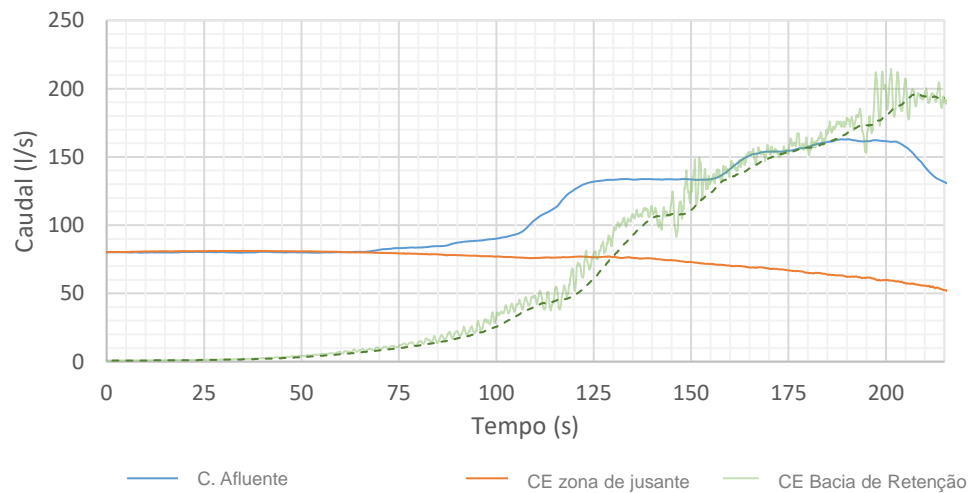
Em que $t_{adimensional}$ é o tempo adimensional, t é tempo num dado instante (s), t_0 é o tempo inicial e t_{final} (s) é o tempo de ensaio (s).

A observação da Figura 5.2 permite emitir as seguintes observações:

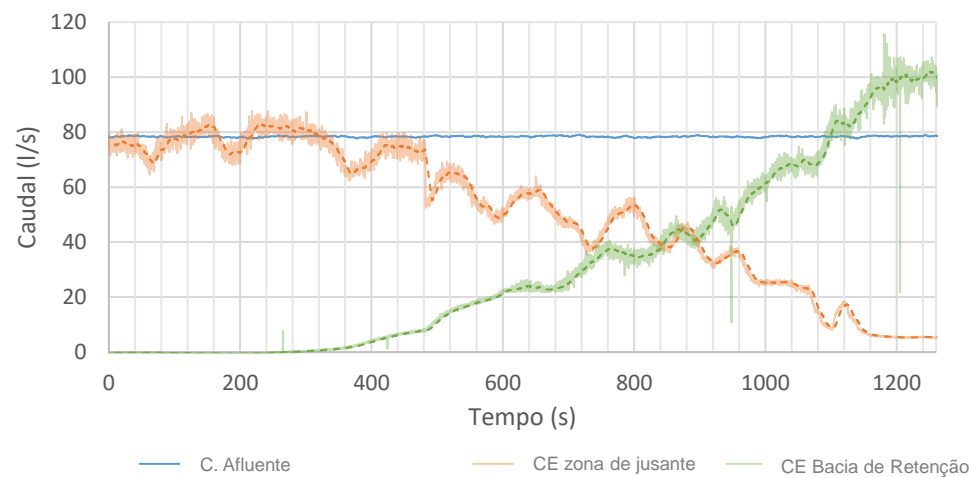
- O Ensaio 1 (S1T1) apresenta um comportamento francamente diferente dos restantes, mas de facto, este ensaio não é comparável uma vez que foi realizado em condições fluviais distintas (nível no canal e caudal afluente ao dique variáveis ao logo do ensaio,

para além do que a partir de determinado instante, quando a comporta de jusante do canal se fechou na totalidade, perdeu o cariz de escoamento fluvial);

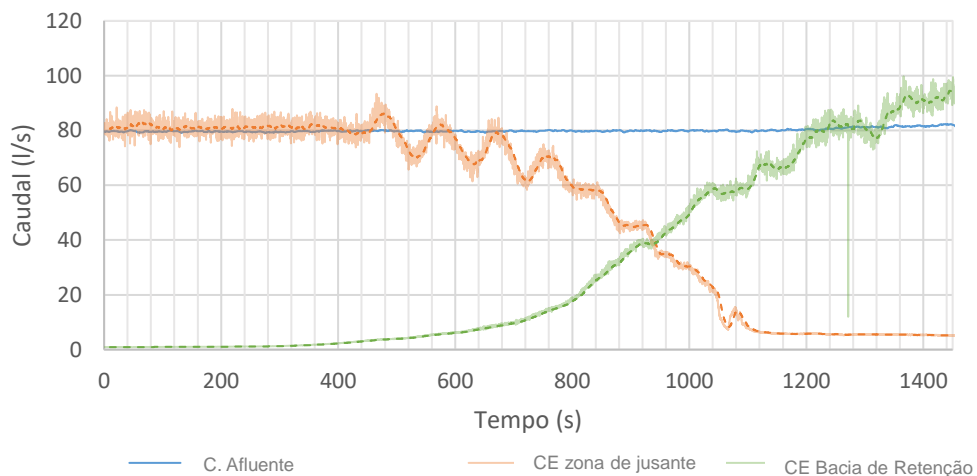
- Os Ensaios 2 (S1T2) e 4 (S2T2) representados respetivamente pelas curvas azul clara e azul escura, foram realizados com solos, teores em água e pesos volúmicos secos distintos (S1T2– $D_{50}=0,6\text{mm}$, $w=9,2\%$; $\gamma_d=18,6\text{kN/m}^3$; S2T2– $D_{50}=0,2\text{mm}$; $w=13\%$; $\gamma_d=15\text{ kN/m}^3$ – Quadro 4.1); o Ensaio 2, por ser mais grosseiro ($>D_{50}$) e, simultaneamente mais seco ($<w\%$), embora mais resistente ($>\gamma_d$), apresenta logo desde início uma taxa de erosão maior que se repercute por um crescimento mais rápido do caudal efluente; já no Ensaio 4, a caudal efluente apresenta um crescimento mais lento até cerca do instante $t=0,7$, sendo que depois, apresenta uma taxa de crescimento idêntica ao ensaio anterior; na realidade era expectável que esta taxa de crescimento, mesmo que a partir de determinado instante aumentasse, fosse sempre inferior à correspondente no Ensaio 2, no entanto, saliente-se que neste Ensaio 4 se utilizou um caudal afluente à brecha, traduzido por um número de Froude de 0.2 (Quadro 4.1), portanto com o dobro do correspondente no Ensaio 2 ($Fr_{S1T2}=0,1$ – Quadro 4.1), o que acaba por se traduzir numa evolução de caudal, após o ponto de inflexão, equivalente ao Ensaio 2;



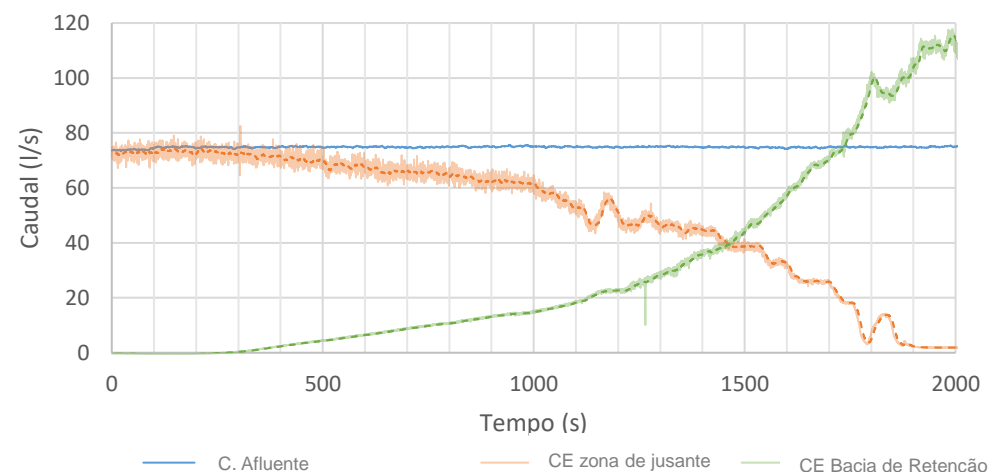
a)



b)



c)



d)

Figura 5.1 – Hidrogramas afluente ao canal principal, efluente pela comporta de jusante do canal principal e efluente pelo descarregador v-notch a jusante do dique. a) Ensaio S1T1; b) Ensaio S1T2; c) Ensaio S2T1; d) S2T2

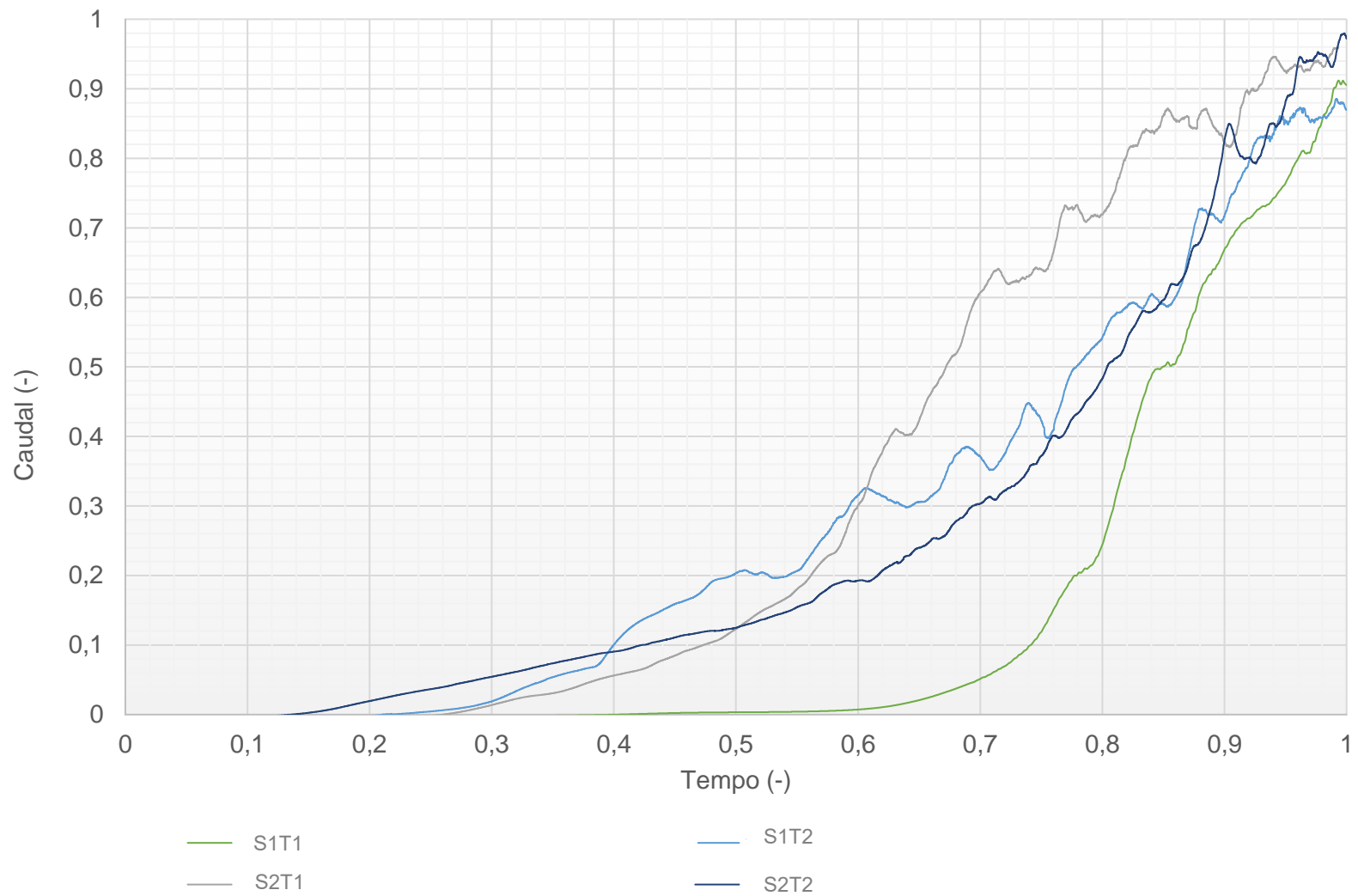


Figura 5.2 - Hidrograma de rotura adimensionalizado (caudal efluente da brecha). Determinado com base na curva de vazão do descarregador “V-notch” localizado à saída da bacia de sedimentos.

5.3. Morfologia da brecha

5.3.1. Análise qualitativa

Na Figura 5.3 apresenta-se a evolução do processo de rotura do dique para os ensaios realizados. O registo dos momentos em que ocorreram os tempos de captação destes instantes estão no Anexo A.12 – Segundos definidos para os tempos marcados.

O registo da câmara de montante permitiu captar a evolução do processo erosivo ao longo da totalidade dos ensaios. Assim, por forma a se poder comparar os ensaios entre si, definiram-se os instantes $t=0$, $t=1/4$, $t=1/2$, $t=3/4$ e $t=1$, respetivamente correspondentes ao instante inicial ($t=0$), aos instantes $1/4$, $1/2$ e $3/4$ da duração do ensaio ($t=1/4$, $t=1/2$ e $t=3/4$) e ao instante final ($t=1$).

A evolução do processo de rotura do dique apresentada na Figura 5.3 corrobora a interpretação já realizada relativamente à evolução dos caudais efluente da brecha, apresentada em 5.2. Tome-se como exemplo o estado de evolução da brecha no instante $t=3/4$, onde é evidente que a largura da brecha no Ensaio 1 (S1T1) é francamente menor e que nos restantes 3 ensaios assim como a correspondente ao Ensaio 3 (S2T1) é maior. O caudal efluente da brecha para cada um destes ensaios 1 e 3 no instante $t=3/4$, é concordante com esta observação (veja-se a Figura 5.2).

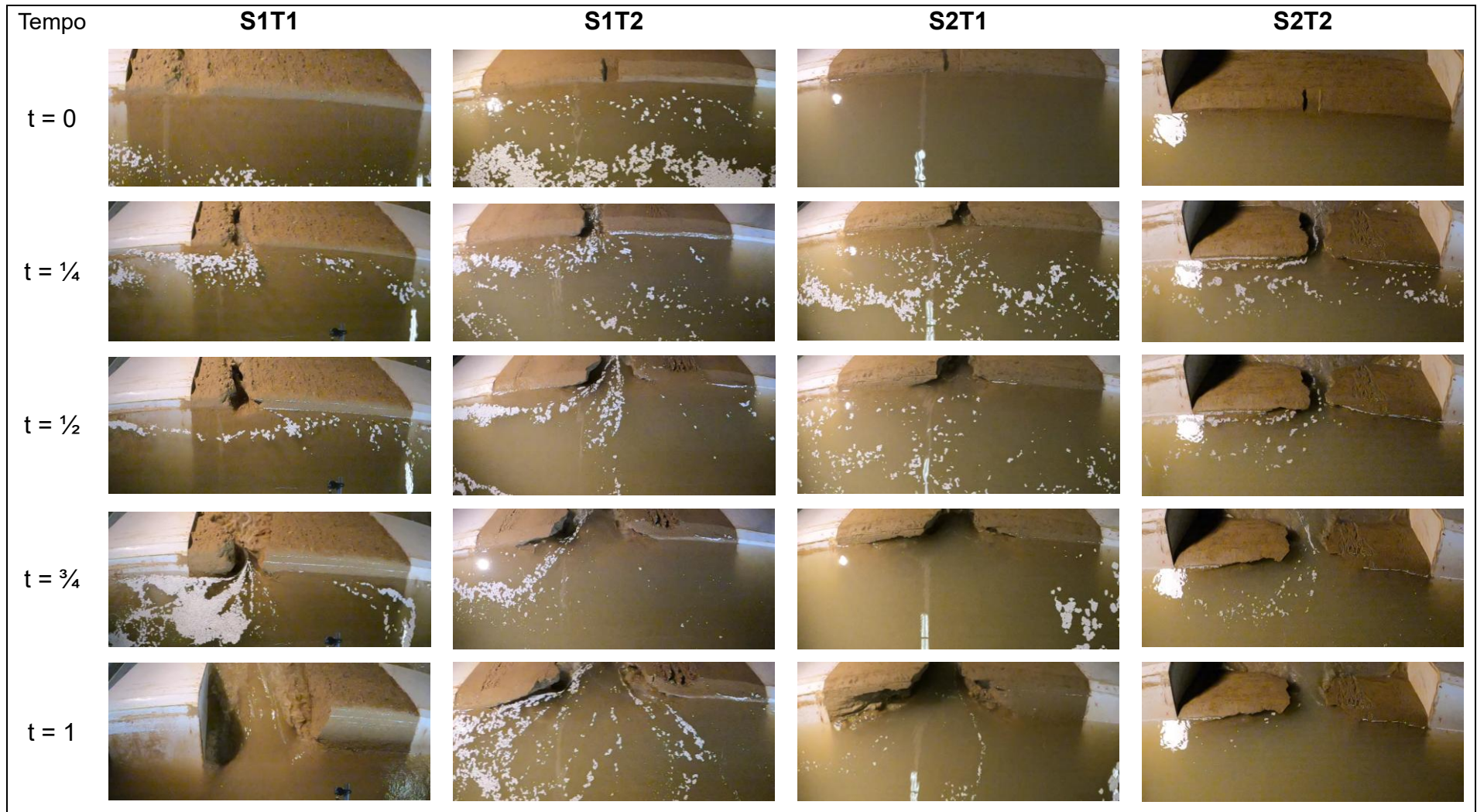


Figura 5.3 – Evolução temporal da rotura do dique. Vista do coroamento, de montante para jusante.

5.3.2. Análise quantitativa

Este subcapítulo é dedicado à quantificação dos resultados obtidos e à aplicação de métodos estatísticos para análise desses mesmos resultados.

A partir da reconstrução 3D da rotura de dique foi possível definir um plano de corte e extrair a evolução da brecha durante os ensaios, o que foi feito para os ensaios S1T2, S2T1 e S2T2. O ensaio S1T1 resultou numa forma indefinida não sendo analisado neste subcapítulo. Na Figura 5.4 está representado o plano de corte que define a secção onde se avaliou a evolução morfológica da brecha ao longo dos ensaios, sendo que os resultados obtidos estão representados nas Figura 5.5.

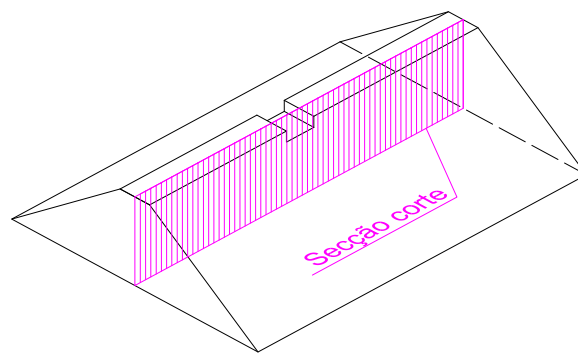


Figura 5.4 – Localização do plano de corte em relação ao canal piloto inicial. Local de avaliação da evolução morfológica da brecha de rotura.

A observação da Figura 5.5 permite verificar que a evolução morfológica da brecha ao longo do tempo foi distinta entre ensaios. Por exemplo, no Ensaio 2 (S1T2) a erosão é puramente hidráulica, portanto, progressiva, não se verificando a queda de blocos, isto é, o destacamento súbito de massas de solo, normalmente, de origem geotécnica. Observa-se também que a forma final da brecha apresenta uma geometria quadrangular.

Quando o número de Froude aumenta, passando a 0,2, como ocorre no Ensaio 4 (S2T2) a evolução geométrica da brecha altera-se também, diminuindo em profundidade e aumentando em largura, verificando-se maior erosão a jusante.

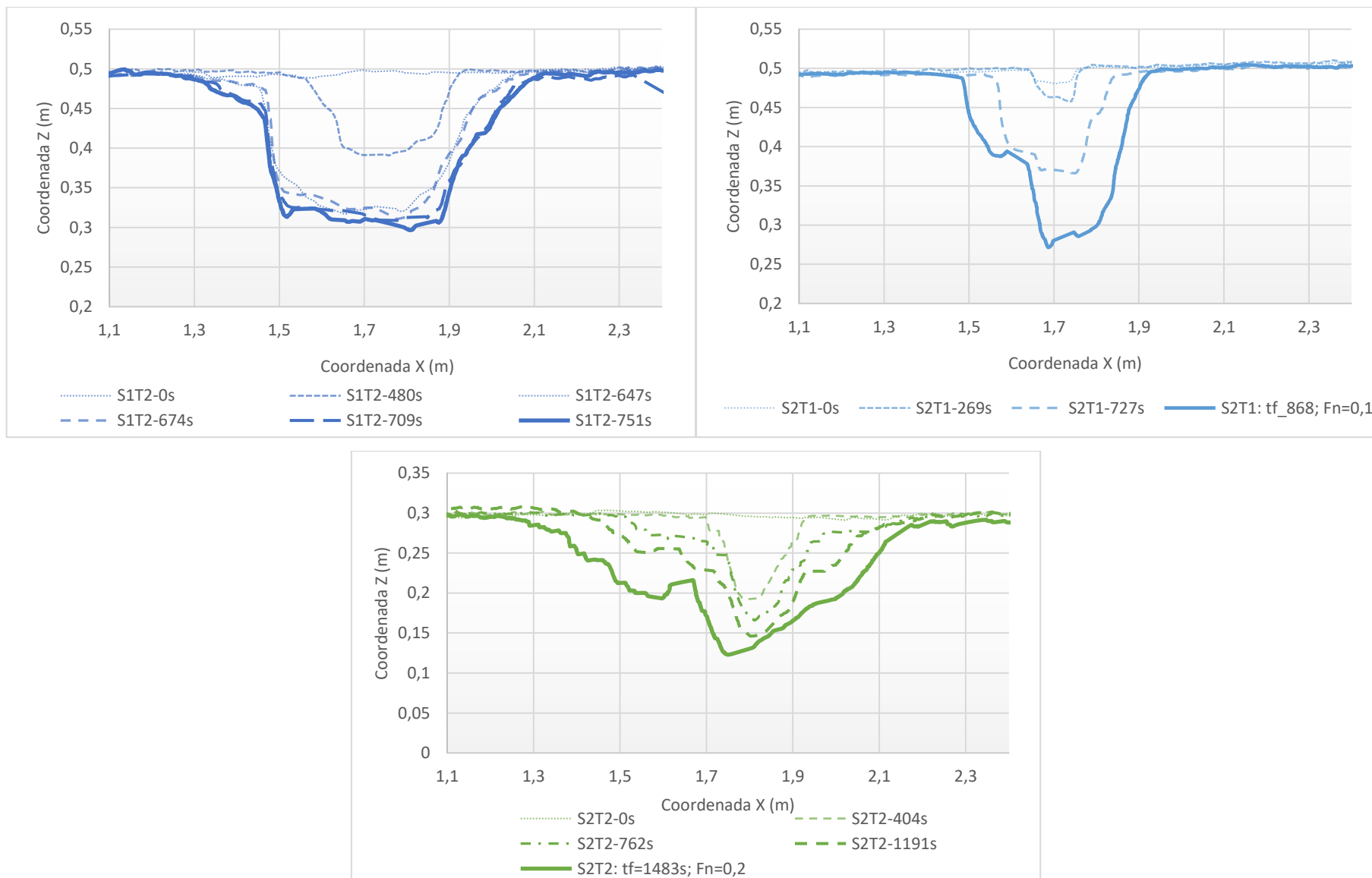


Figura 5.5 – Evolução temporal da morfologia da brecha. (a) Ensaio S1T2; (b) Ensaio S2T1; (c) Ensaio S2T2.

Na Figura 5.6 compara-se a morfologia da brecha em instantes temporais equivalentes, dos Ensaios S1T2 e S2T1. Observa-se que no Ensaio S2T1, onde o solo é mais fino ($D_{50}=0,2\text{mm}>0,6\text{mm}$ – Quadro 4.1) e mais húmido (desvio de 1,1% em relação ao PROCTOR Standard de referência, comparativamente com o valor correspondente para o Ensaio S1T2, que é de 1,6%), a brecha aprofunda mais rapidamente, o que leva a que alargue menos. Ou seja, solos mais finos e mais húmidos traduzem-se em brechas com morfologia final predominantemente triangular. Já no caso do Ensaio S1T2, que é composto por um dique mais grosseiro e mais seco (mais próximo do valor de referência do PROCTOR Standard), como o aterro é menos erodível, a brecha aprofunda menos durante o processo de rotura, o que é compensado com um maior alargamento da mesma ao longo do ensaio. Ou seja, para condições de menor humidade relativa e aterros mais arenosos, a brecha final é tendencialmente de geometria trapezoidal ('quasi'-retangular).

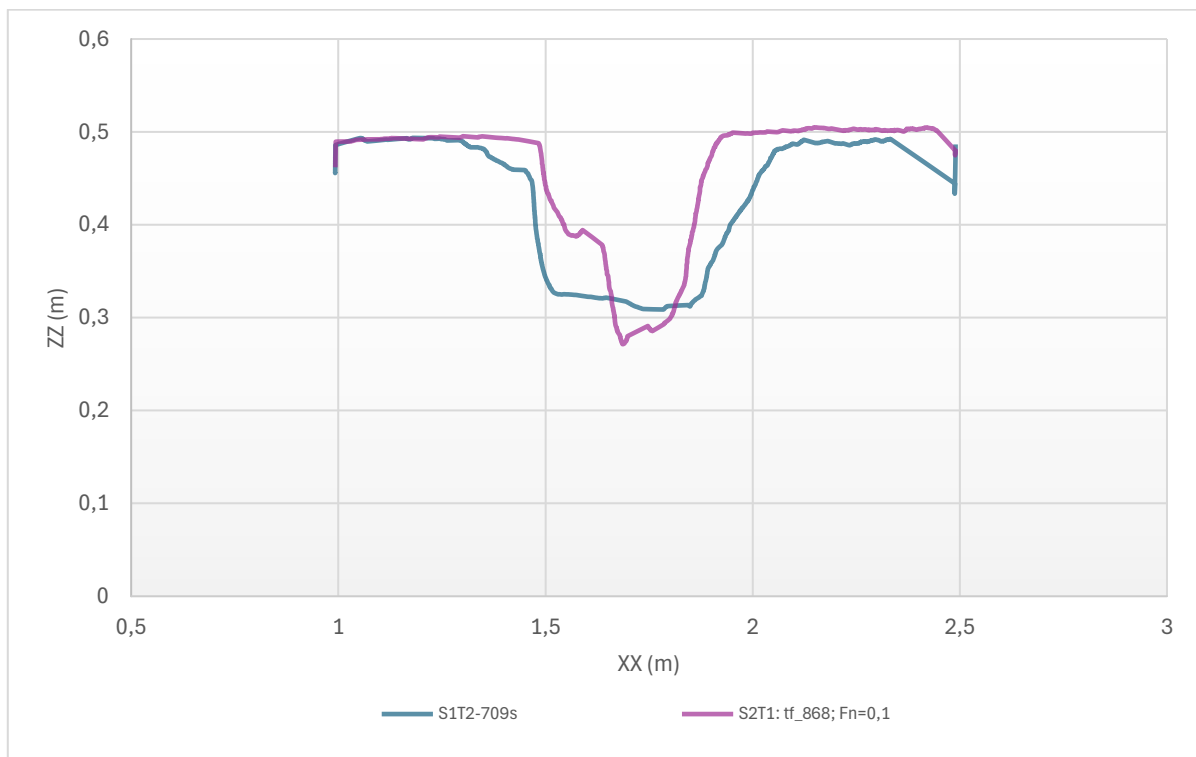


Figura 5.6 – Forma final da brecha de rotura para os ensaios S1T2 e S2T1. $Fr=0,1$;
Diferentes solos

Na Figura 5.7 compara-se a morfologia da brecha em instantes temporais equivalentes, dos Ensaios 3 e 4 (respetivamente, S2T1 e S2T2). Nestes ensaios o solo foi o mesmo (Solo 2 – areia-siltosa com $D_{50}=0,2\text{mm}$ – Quadro 4.1) e as condições de teor em água e de peso volúmico seco foram semelhantes (Quadro 4.1), sendo que a única diferença evidente foi o número de Froude que, no caso do Ensaio 4 (S2T2) foi o dobro do Ensaio 3 (S2T1) – $Fr_{S2T2}=0,2$ e $Fr_{S2T1}=0,1$ (Quadro 4.1).

Observa-se que no Ensaio 4 a brecha alargou mais do que aprofundou, tendo-se verificado uma brecha mais encaixada no caso do Ensaio 3. Esta diferença foi atribuída à diferença nos números de Froude do escoamento de aproximação. Note-se que, tal como expresso no número de Froude correspondente, no Ensaio 4 o escoamento no canal de aproximação processa-se com maior velocidade que no caso do Ensaio 3. A elevada velocidade do escoamento faz com que o paramento de montante do dique erode bastante e que, até determinado valor de caudal efluente da brecha, o escoamento passe junto ao canal piloto (brecha inicial), quase “sem o ver”. Ou seja, o processo erosivo inicia-se mais tarde que no Ensaio 3, o que acaba por se traduzir numa brecha mais larga e menos funda no Ensaio 4.

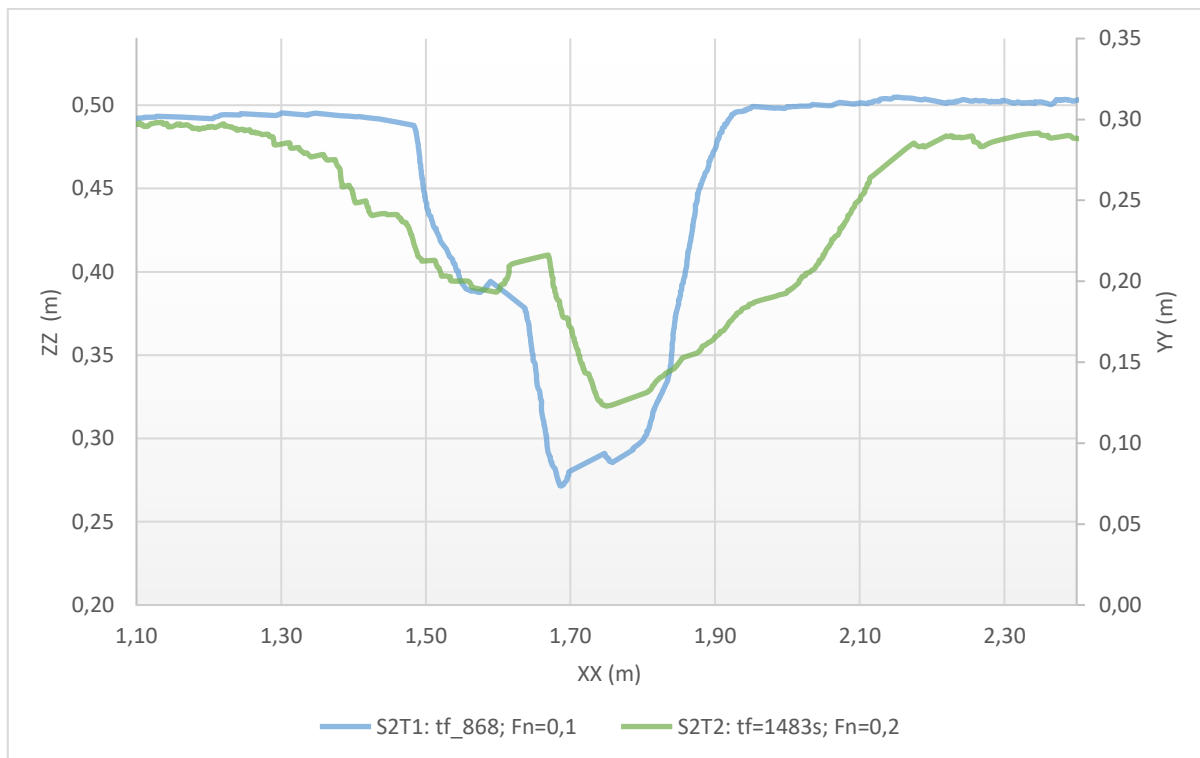


Figura 5.7 – Forma final da brecha de rotura para os ensaios S2T1 e S2T2. Teores em água semelhantes ($w\sim 13\%$); Diferentes números de Froude ($Fr_{S2T1}=0,1$; $Fr_{S2T2}=0,2$)

5.3.3. Volume erodido

O processo de rotura do dique desenvolve-se devido ao processo erosivo na secção da brecha. A taxa de erosão é determinada a partir das estimativas do volume erodido do corpo do dique ao longo do ensaio, ou seja, corresponde à variação do volume do dique (ΔV) ao longo do tempo (t). A variação do volume do dique é calculada através da expressão (5.3):

$$\Delta V = \frac{V_{n+1} - V_n}{V_{total}} \quad (5.3)$$

Em que:

ΔV – volume erodido entre dois instantes temporais;

$V_n, n+1$ – Volume do corpo do dique em instantes consecutivos (n e n+1);

V_t – Volume total do dique (inicial).

O conhecimento da taxa de erosão é importante para compreender os efeitos das forças naturais sobre o dique e as implicações em termos de conservação do solo, impactos ambientais e a previsibilidade do tempo de evacuação da população em situações de rotura.

Para se determinar a taxa de erosão é necessário conhecer o volume do dique ao longo do tempo. Com base nas imagens adquiridas com as duas câmaras de profundidade (*Kinect sensors*) foi possível adquirir nuvens de pontos com informação georreferenciada do dique ao longo da totalidade do ensaio (malha de pontos coordenados, x, y, z). Estas nuvens de pontos foram processadas no software *CloudCompare* permitindo assim a reconstrução 3D da rotura do dique ao longo do tempo (Figura 5.8). A subtração da reconstrução 3D do dique em rotura em dois instantes consecutivos permitiu a obtenção da variável ΔV e, por conseguinte, a caracterização temporal da taxa de erosão. Na Figura 5.8 apresenta-se a reconstrução 3D nos instantes de referência analisados neste trabalho (t=0, 1/4, 1/2, 3/4, 1) onde a variação de cores simboliza a diferença de volume erodido nos instantes, sendo as cores frias mais afastadas do volume no instante inicial (t=0).

Com base nos resultados expressos na Figura 5.8 foi possível determinar a taxa de erosão de cada ensaio, representada na Figura 5.9.

Pode observar-se que as taxas de erosão correspondentes a cada ensaio são concordantes com os respetivos hidrogramas efluentes da brecha apresentados na Figura 5.2.

A taxa de erosão no Ensaio 1 (S1T1) é mais reduzida que nos restantes do mesmo modo que o hidrograma efluente da brecha (comparem-se Figura 5.2 e Figura 5.8).

Na Figura 5.2 pode observar-se que o caudal efluente da brecha com crescimento mais rápido é o correspondente ao Ensaio 3 (S2T1), embora na Figura 5.8, este apareça como o que tem a segunda maior taxa de erosão. Isto deve-se ao facto de, no Ensaio 4 (S2T2), como o escoamento no canal de aproximação à brecha ser o mais acelerado dos 4 ensaios, o dique, para além da erosão na secção da brecha e paramento de jusante (que no fundo condicionam a evolução temporal do caudal efluente da brecha), também ocorreu uma forte erosão do paramento de montante do dique, devido às elevadas velocidades que se fizeram sentir no canal. É o elevado volume de solo que foi erodido do paramento de montante do dique que é o responsável pela maior taxa de erosão deste ensaio.

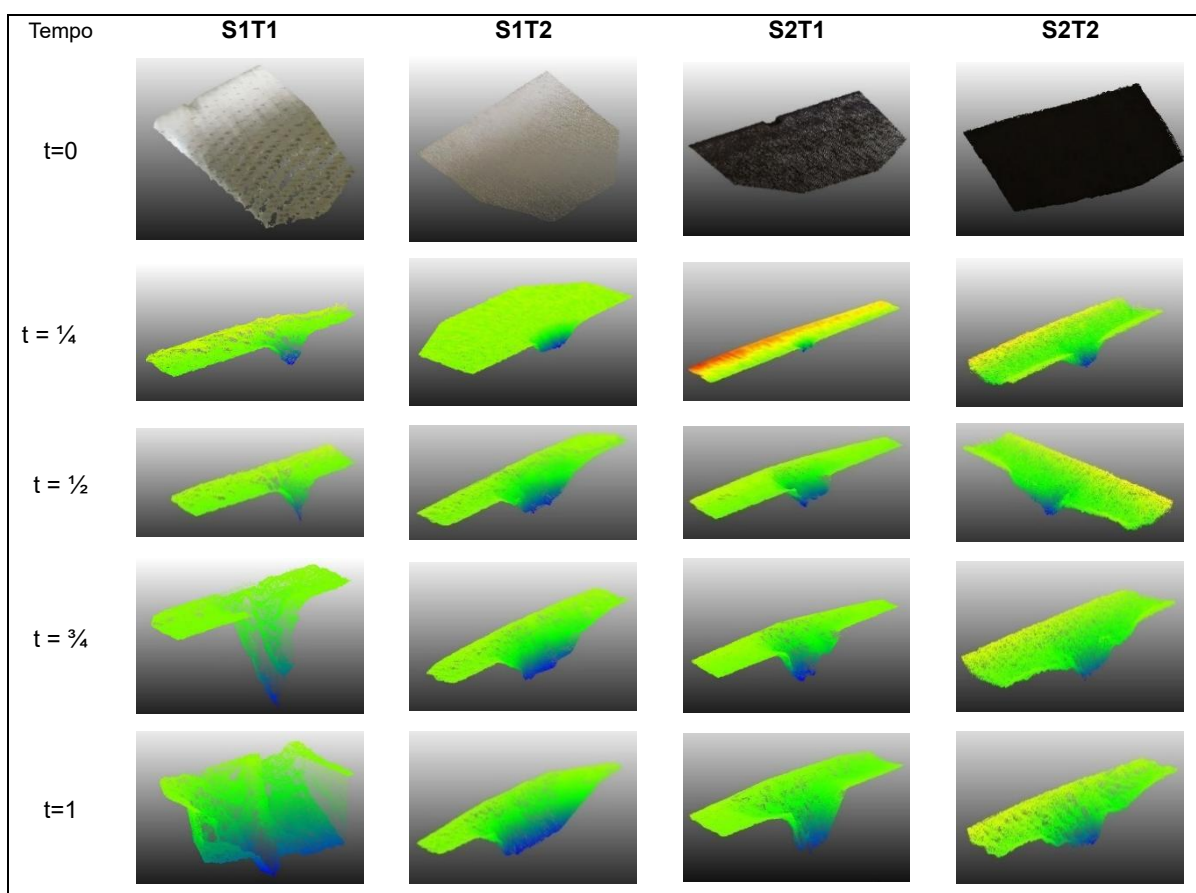


Figura 5.8 – Reconstrução 3D do dique em rotura dos ensaios realizados nos instantes (t=0, 1/4, 1/2, 3/4, 1)

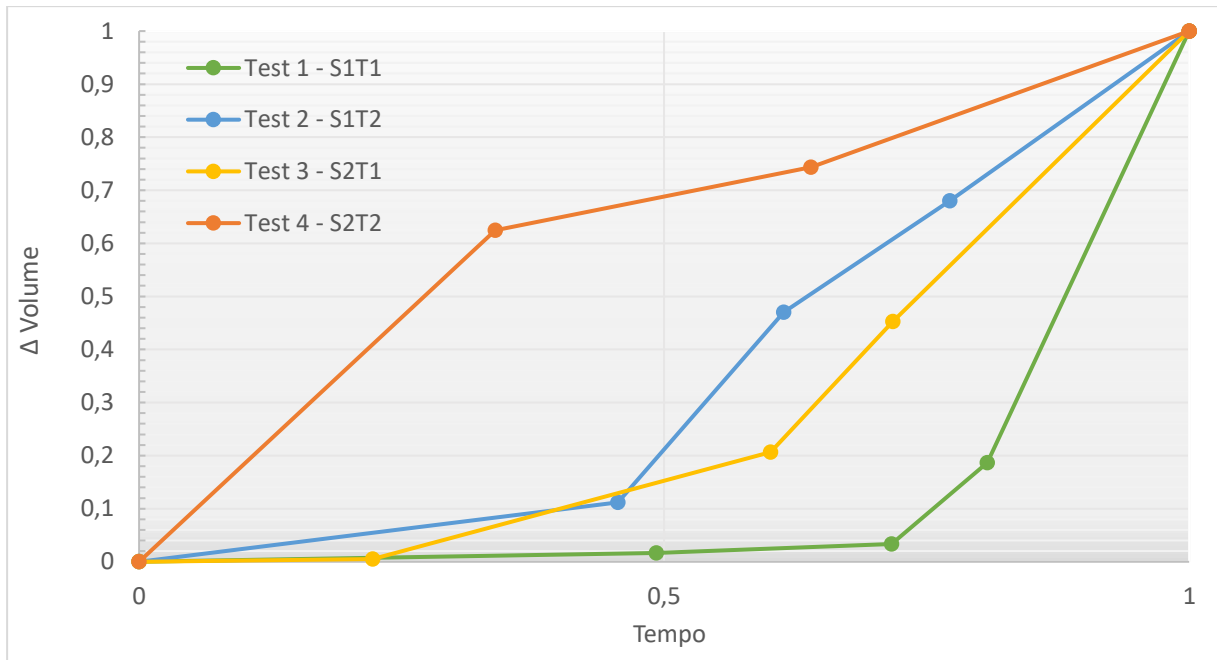


Figura 5.9 – Taxa de erosão dos quatro ensaios

5.4. Velocimetria superficial

5.4.1. Introdução ao Particle Tracking Velocimetry (PTV)

PTV é um técnica utilizada para medir e analisar o movimento de partículas individuais num fluido. As partículas ou traçadores são introduzidas no fluido em estudo e o seu movimento é registado por câmaras de elevada resolução espacial e temporal. O método PTV consiste em quatro etapas fundamentais:

- ➔ Identificar as partículas;
- ➔ Fazer corresponder as partículas entre fotogramas consecutivos;
- ➔ Calcular o campo de velocidade;
- ➔ Pós-processamento.

Neste trabalho de investigação foi utilizada a câmara GoPro como descrito no subcapítulo 3.3.4. A GoPro é usada para capturar imagens das partículas. Geralmente são captadas imagens em rápida sucessão com um pequeno intervalo de tempo entre elas. Com base nas imagens capturadas, é possível determinar o deslocamento das partículas entre duas imagens e, assim, calcular a velocidade do escoamento.

Na Figura 5.10 exemplifica-se a aplicação do PTV a duas imagens sequenciais adquiridas com uma taxa de 240 fps (frames por segundo) com a câmara GoPro. O vermelho é a posição inicial da partícula e o amarelo é a posição final.

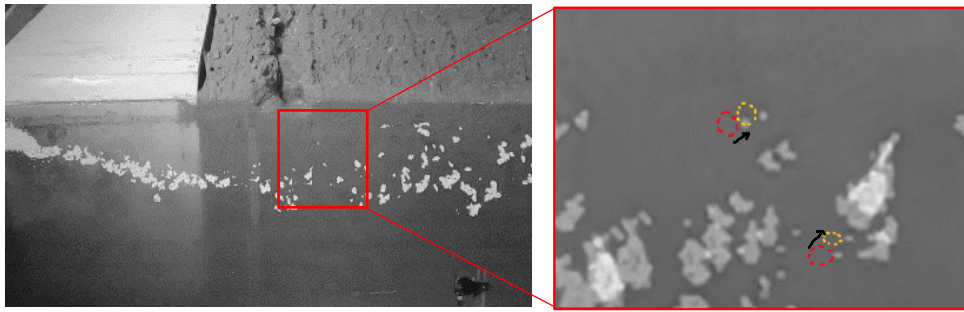


Figura 5.10 – Aplicação do PTV a duas imagens sequencias já com o “pré-processamento” realizado (Ensaio S1T2)

Para a extração das imagens através do vídeo, utilizou-se a ferramenta *ffmpeg* de software livre e código aberto criada para lidar com tarefas de processamento e conversão de áudio e vídeo. Esta ferramenta inclui bibliotecas e programas que permitem converter, gravar, transmitir e editar áudio e vídeo de diferentes formatos. Nesta experiência, o *ffmpeg* define-se como a primeira etapa para extrair as imagens de um vídeo na qual converteu o vídeo gerado pela GoPro em imagens (240 frames por segundo) e estabeleceu-se o intervalo de tempo a estudar. A linha de código para esta conversão determina-se na seguinte sequência:

→ O ficheiro vídeo deve ser colocado na mesma pasta onde se encontra o executável *ffmpeg.exe*;

→ Correr a linha de código que se encontra no Anexo A.13 – Código *ffmpeg* utilizado.

A “área de interrogação” é uma região onde o escoamento se divide: parte do caudal vai diretamente para a brecha e a outra segue diretamente para a zona de jusante. Graças ao uso do *ffmpeg* e de um código Matlab, é possível determinar o campo de velocidade nesta região com alta precisão, permitindo uma melhor compreensão do comportamento do escoamento nesta secção. Na Figura 5.11 está um exemplo da aplicação do código “MATLAB” com o pré-processamento das imagens. Esta aplicação permite estudar e definir onde se encontra a transição do escoamento na aproximação à brecha que está explicado no subcapítulo 5.4.2.

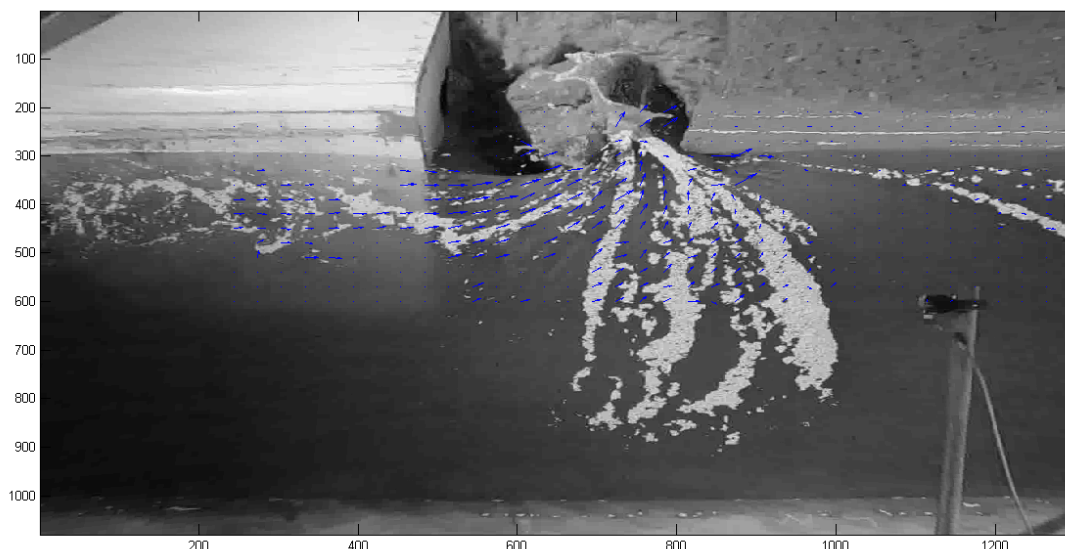


Figura 5.11 – Campo de velocidades junto à brecha (Ensaio S1T1)

Durante os ensaios é previsível que, nas condições do escoamento que atravessa o canal piloto, ocorram instabilidades geotécnicas (destacamento súbito de massas de solo para o escoamento). A observação do escoamento sobre a brecha permitiu identificar dois episódios de erosão geotécnica:

- ➔ O campo de velocidades é afetado por um episódio de erosão geotécnica, o que significa que o bloco cai e intersesta o campo de velocidades (como é possível demonstrar na Figura 5.11);
- ➔ O campo de velocidades não é afetado, em que o escoamento é gradual e “não sente” o episódio de ruptura, o que significa que o bloco não cai e que a erosão ocorre abaixo do campo de velocidades.

Na Figura 5.12 está representado o modelo conceptual do observado durante os ensaios e que traduz a hidrodinâmica do escoamento na aproximação à brecha.

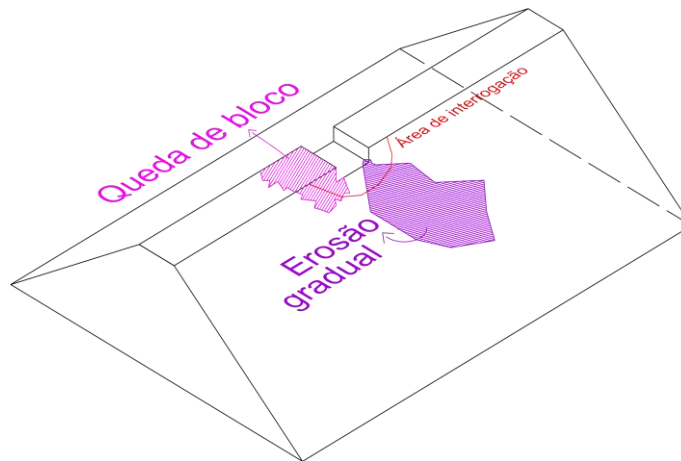


Figura 5.12 – Modelo conceptual com comportamento hidrodinâmico do escoamento junto à brecha

5.4.2. Análise detalhada dos ensaios baseada no campo de velocidades superficial e respetiva secção de transição do escoamento na aproximação à brecha

Prever a geometria da brecha e o caudal efluente é importante para estimar as extensões da inundação, o plano de operações de emergência e desenhar as medidas de mitigação. A evolução da brecha é muito estudada no modelo standardizado. Isto significa que se vão desenvolver a rotura da brecha no paradigma frontal (como os ensaios de uma barragem de aterro), desvalorizando a rotura da brecha com o caudal a passar lateralmente. Segundo Rifai (2018), há uma discrepância nos resultados no que toca ao reduzido número de experiências feitas em diques fluviais que resultaram em conclusões fragmentadas. Neste sentido, analisa-se a curva de transição do escoamento por forma a estudar e concluir como se comporta a evolução da brecha. Durante as experiências dos ensaios de rotura de diques observou-se que à medida que o escoamento atravessa o canal piloto, a rotura da brecha aumenta. Isto significa que parte do caudal direciona-se para a zona de rotura e que a outra parte permanece no eixo XX. Quando todo o caudal afluente vai para essa zona, dá-se o término do ensaio, isto porque se transforma num “canal de rega” em que a zona de jusante (zona da comporta), a água está praticamente parada e que apenas tem movimento pela rotura. Foi então necessário estudar a transição do escoamento antes de acontecer o comportamento como “canal de rega”. Nesse sentido, assinalou-se os episódios de erosão mais progressiva que têm como consequência o alargamento da brecha analisando a evolução temporal da transição do escoamento.

5.4.2.1. Ensaio 1 (S1T1)

Na Figura 5.13 apresenta-se a evolução temporal da morfologia da brecha. Como a variação do caudal é constante, permite registar uma transição que toma uma forma indefinida, mas

que tende a erodir mais a montante, uma vez as condições também não são controladas a montante. A curva de transição do escoamento acaba por ser impedida pela estrutura fixa que há na instalação, o que permite retirar a informação de que se o dique fosse mais comprido, a curva de transição seria maior e com maior velocidade de escoamento.

É possível ainda observar a queda de grandes blocos de solo por instabilidade geotécnica (erosão geotécnica) o que acaba por acontecer devido à erosão causada na base do dique o que, naturalmente, leva a que a brecha alargue, erodindo com mais rapidez e cada vez mais para o lado de montante. Para acrescentar, observa-se também que não existem deformações no paramento de jusante após o término do ensaio. Por fim, também compreende-se que o caudal à medida que aumenta se gera mais turbulência, leva a que a erosão se dê cada vez com mais intensidade.

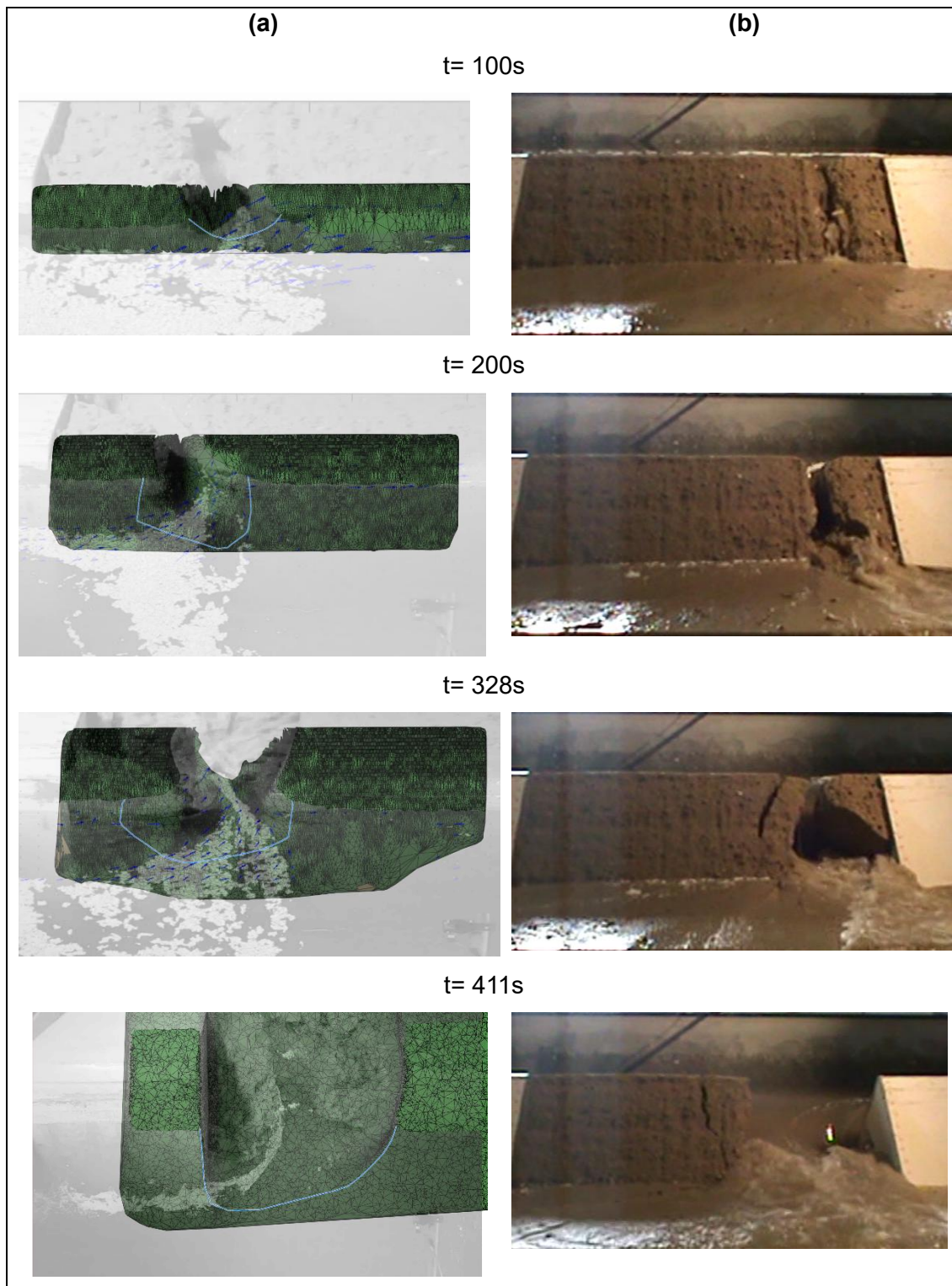


Figura 5.13 – Ensaio S1T1. (a) curva de transição do escoamento.(b) Evolução temporal da morfologia da brecha no paramento de jusante visto de frente

5.4.2.2. Ensaio 2 (S1T2)

Este ensaio foi realizado com caudal e número de Froude constantes. A curva de transição (assinalada com uma linha azul-clara nas imagens a) da Figura 5.14) toma forma de uma “elipse”, devido às condições controladas de caudal no canal de aproximação. A evolução temporal da morfologia da brecha é caracterizada pelo processo de erosão gradual, portanto, de erosão hidráulica (sem instabilidades geotécnicas). Não se verificaram deformações nos paramentos do dique para além da erosão progressiva normal na secção da brecha. Comprova-se na Figura 5.14, que a brecha ocorreu através de pequenos desabamentos da face de jusante do coroamento e não de grandes quedas abruptas de massas de solo. O lento processo de erosão que se observou no Ensaio 2 (S1T2 continua) foi essencialmente realizado através do desgaste lateral das paredes da brecha até ao instante $t=813s$ do ensaio experimental, momento em que o escoamento consegue “arrastar” o material que está na base do dique juntamente com a queda de uma porção do paramento de jusante.

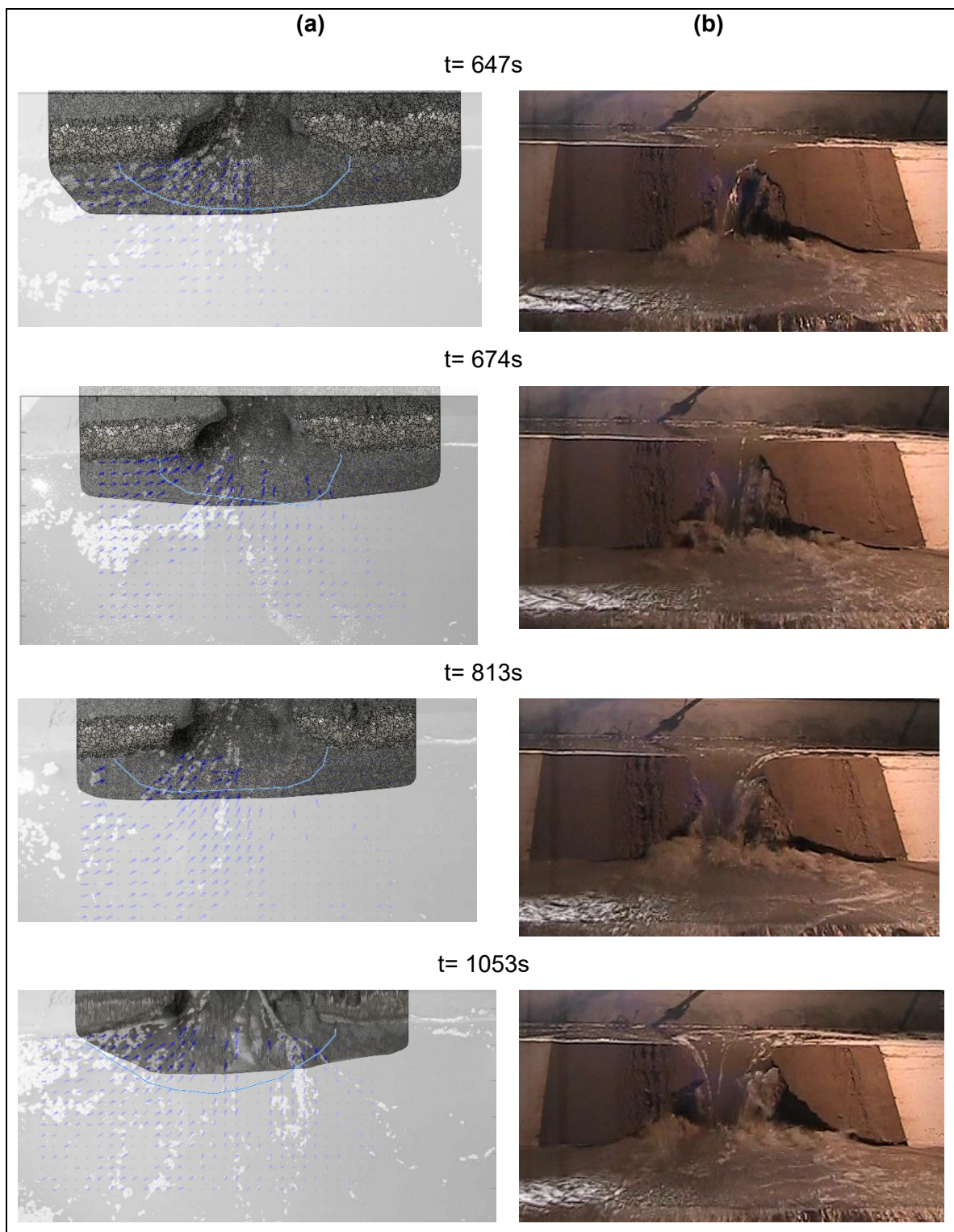


Figura 5.14 – Ensaio S1T2. (a) curva de transição do escoamento.(b) Evolução temporal da morfologia da brecha no paramento de jusante visto de frente

5.4.2.3. Ensaio 3 (S2T1)

Neste ensaio observou-se que, enquanto a erosão se processou de forma aproximadamente constante, a presença de “socialcos” (tipicamente designados na literatura como “*steps and*

pools”) no paramento de jusante, isto é, de erosão em degraus, pode, eventualmente, coincidir com as várias camadas de compactação, como se pode observar na Figura 5.15. Estes “socalcos” de pequena dimensão vão desenvolvendo uma maior altura, provocando o desgaste e a queda de blocos de pequena dimensão. Esse desgaste contínuo da zona de jusante causado pela passagem de água no canal e pelos ressaltos hidráulicos originados a partir dos “socalcos” formados, diminuem o número de “socalcos” registados, aumentando as suas dimensões relativamente aos “socalcos” iniciais, como se pode comprovar no t= 800s deste Ensaio 3. Observou-se que durante este Ensaio 3, houve queda de material de pequena dimensão do coroamento no paramento de jusante não se verificando a queda de blocos de grande dimensão. É possível constatar que a abertura de jusante da brecha, sofreu poucas alterações uma vez que foi consequência das condições impostas a montante. Inicialmente a estrutura erosiva do paramento de montante consiste em vários degraus de pequenas dimensões, eventualmente, à escala da altura das camadas de compactação. Posteriormente esta estrutura evolui para uma descarga do tipo jato que incide numa pequena “pool”. Por fim, houve infraescavação (*undercutting*) no pé de jusante do dique, como se pode comprovar ao t=800s. O *undercutting* a montante acontece devido às interfaces das camadas de compactação existentes. É interessante observar que neste ensaio a curva de transição do escoamento tende a estender-se mais para montante e a base do dique tende a erodir e a expandir para jusante.

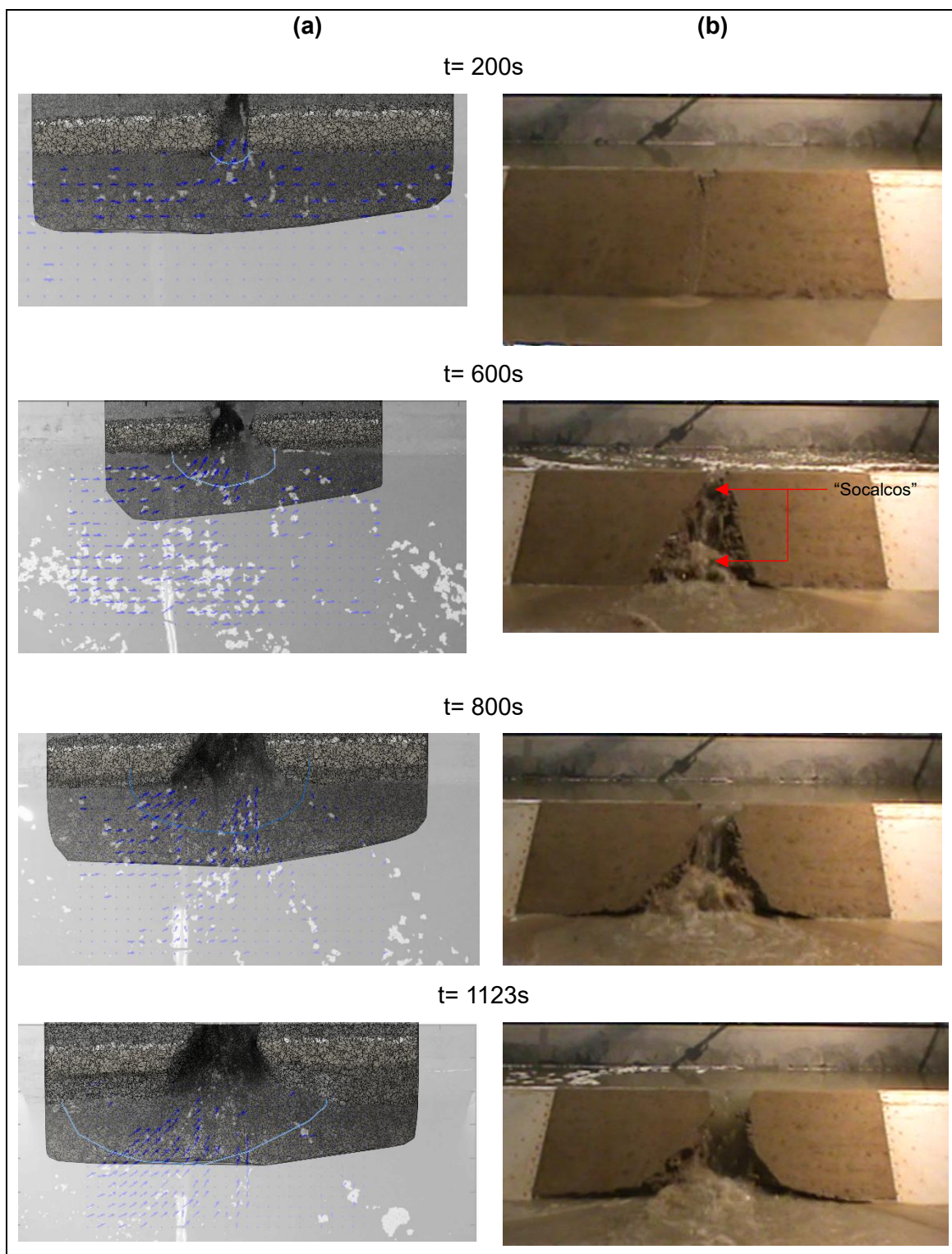


Figura 5.15 – Ensaio S2T1. (a) curva de transição do escoamento.(b) Evolução temporal da morfologia da brecha no paramento de jusante visto de frente

5.4.2.4. Ensaio 4 (S2T2)

No último ensaio (Figura 5.16), verifica-se que o escoamento tende a aumentar a erosão no paramento de montante, que é coerente, dado que a velocidade de escoamento e o número de Froude são também mais elevados neste ensaio. A curva de transição do escoamento toma também forma de uma “elipse” que vai aumentando ao longo do tempo, como é previsível.

Neste ensaio também é possível observar o coroamento em consola para o lado de montante durante todo o ensaio devido à elevada velocidade no canal. Nos ensaios anteriores o que alterava a morfologia da brecha ao longo do tempo era a queda de pequenos blocos de solo (erosão geotécnica) ou a ocorrência de “socalcos”: Neste Ensaio 4 pode afirmar-se que é a velocidade de escoamento que efetua o desgaste da brecha em termos de profundidade que erode o paramento de jusante.

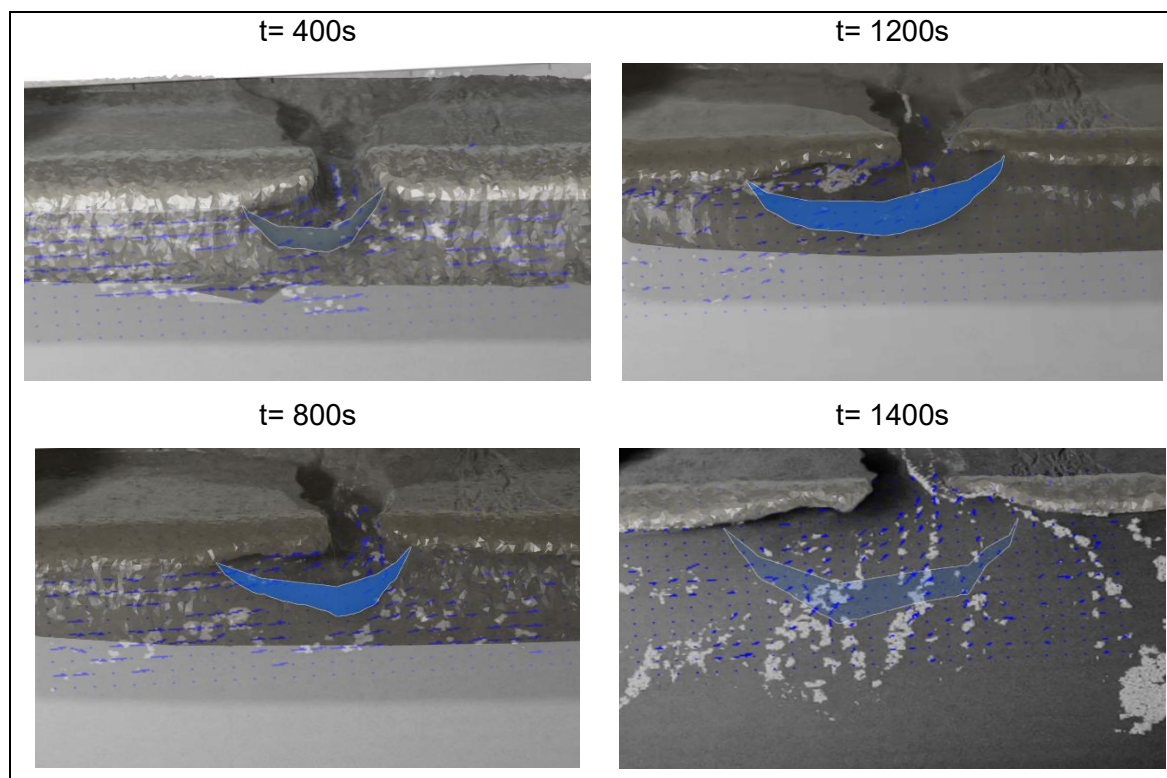


Figura 5.16 – Curva de transição do escoamento no ensaio S2T2

5.5. Comparação dos resultados obtidos com os resultados da literatura

Neste trabalho de investigação um dos objetivos a cumprir foi a validação da instalação de rotura de diques fluviais. Neste sentido, a instalação é baseada na reprodução de um ensaio realizado no âmbito dos ensaios experimentais de Rifai (2018). Compara-se a evolução da rotura, os campos de velocidade e os caudais efluentes.

Na Figura 5.17 mostra a evolução da água no canal principal (a) e o hidrograma de rotura (b) do Ensaio 8 dos Ensaio de Rifai (2018). Durante os ensaios experimentais o caudal na instalação é constante, não tendo como objetivo a estabilização do número de Froude que acabou por ser variável como se comprova na Figura 5.18 (d). Não sendo um valor variável e permissivo aos objetivos iniciais, o comportamento da evolução da brecha tem uma rotura diferente das aqui apresentadas.

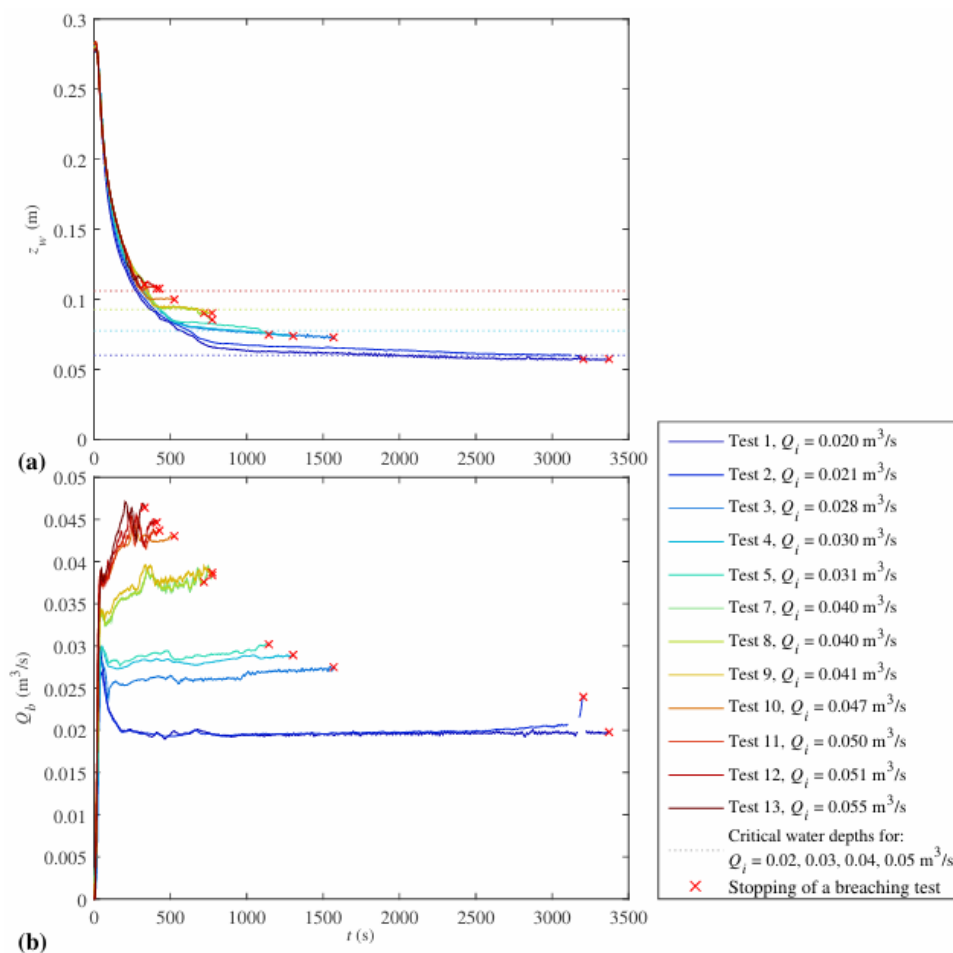


Figura 5.17 – Resultados experimentais da tese de doutoramento de Ismail Rifai. (a): evolução do caudal no canal principal. (b): hidrograma de rotura (Rifai, 2018)

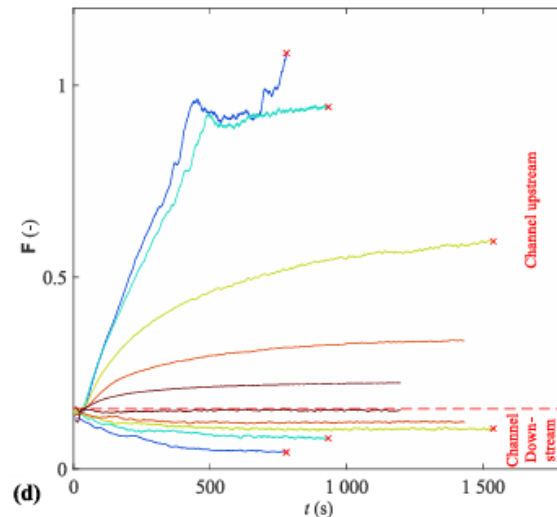


Figura 5.18 – Números de Froude a montante e a jusante do canal (Rifai, 2018)

Esta diferença da evolução da rotura da brecha permitiu que se subdivide em três fases:

- ➔ Fase 0 (cor azul) – a brecha está no seu estado inicial, a sua expansão é demorada e as velocidades de aproximação à zona de fragilidade são reduzidas;
- ➔ Fase 1 (cor vermelha) – A profundidade e a largura da brecha são promovidas com um deslocamento da linha central da brecha em direção à extremidade a jusante do canal. Nesta fase a brecha expande-se relativamente rápida devido à diminuição do nível de água no canal principal que resulta no galgamento;
- ➔ Fase 2 (cor verde) - A superfície livre do canal diminui e a profundidade do caudal começa a estabilizar no seu nível mínimo. A evolução de rotura da brecha torna-se lenta, o coroamento deixa de erodir e a profundidade da brecha começa a moderar e a estabilizar.

O autor representa e exemplifica através de um dos seus ensaios os episódios que acontecem estas fases, como está representado na Figura 5.19.

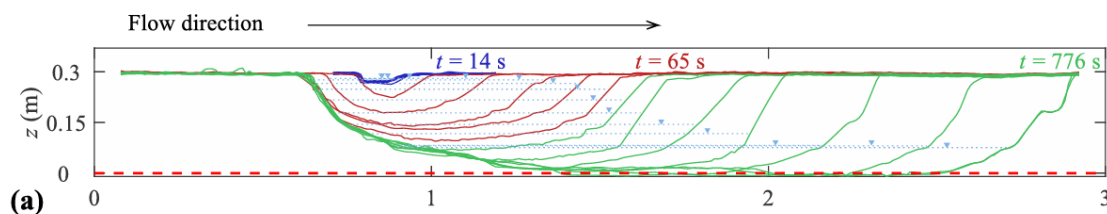


Figura 5.19 – Representação longitudinal do coroamento do dique no ensaio 8 (Rifai, 2018)
Comparando com os ensaios agora realizados, há uma diferença significativa uma vez que nem todos os testes a brecha evolve para jusante e com uma grande profundidade, à exceção do ensaio S2T2 no qual a brecha tende apenas a deslocar-se para jusante.

Os resultados do ensaio S1T1 não se encaixam nas fases descritas pelo autor, pois as altas velocidades causaram a queda de blocos, contrariando os resultados esperados.

Olhando para uma perspectiva comparativa sobre o tipo de material utilizado na tese Rifai (2018), o autor utilizou duas areias de dois solos bem graduados que acaba por se afastar das condições naturais de um solo considerado “normal”, como está representado nas Figura 5.20 e Quadro 5.1.

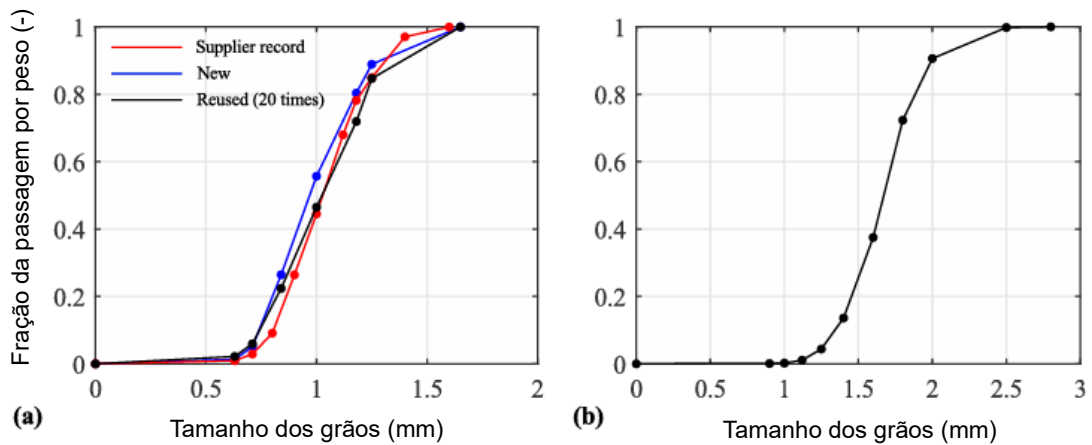


Figura 5.20 – Distribuição granulométrica para: (a) Material 1: 2 medidas redundantes $d_{50} = 1$ mm, (b) Material 2: com $d_{50} = 1.67$ mm

Quadro 5.1 - Propriedades dos Materiais 1 e 2. Adaptado de Rifai (2018)

| | Material 1 | Material 2 |
|--|------------|------------|
| Diâmetro médio d_{50} (mm) | 1 | 1,67 |
| Coefficiente de distribuição σ (-) | 1,22 | 1,16 |
| Densidade ρ_s (kg/m ³) | 2600 | 2600 |
| Massa volúmica ρ_b (kg/m ³) | 1600 | 1500 |
| Porosidade ρ (-) | 0,37 | 0,39 |
| Ângulo de fricção seco ϕ (°) | 28 | - |
| Ângulo de fricção húmido ϕ (-) | 55 | - |
| Inclinação de ângulo seco ϕ | 30 | - |

No Quadro 5.2 estão representadas as características do solo e na

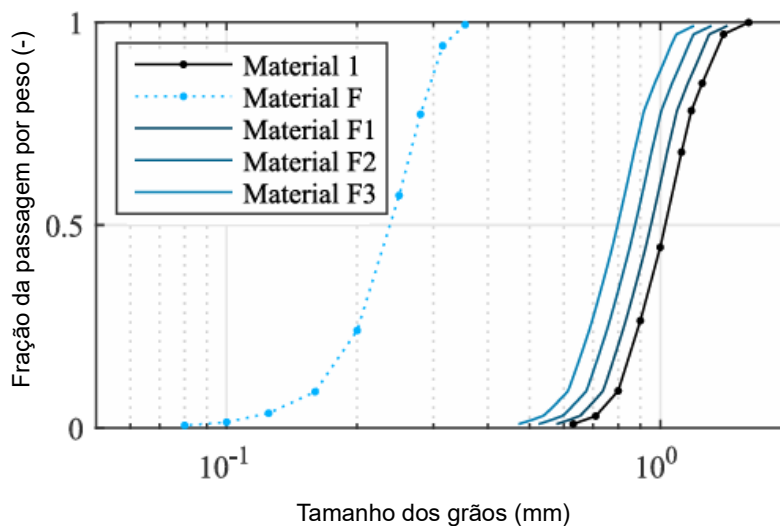


Figura 5.21 a distribuição granulométrica dos Material 1 e F. O tipo de solo utilizado nos diques para a realização dos ensaios foi a mistura dos Materiais 1, F1, F2 e F3. Sendo um solo misturado com outros materiais, é provável que em condições reais de rotura de cheia, a evolução da brecha pode tomar outra forma.

Quadro 5.2 - Propriedades dos materiais testados nos modelos experimentais. Adaptado de Rifai (2018)

| | Material F | Material 1 | Material F1 | Material F2 | Material F3 |
|---|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Percentagem de finos (%) | 100 | 0 | 10 | 20 | 30 |
| Diâmetro médio d_{50} (mm) | 0,24 | 1 | 0,95 | 0,88 | 0,8 |
| Coefficiente de distribuição σ (-) | 1,3 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| Densidade ρ_s (kg/m ³) | 2500 | 2600 | - | 2500 | - |
| Massa volúmica ρ_b (kg/m ³) | 1500 | 1600 | 1700 | 1900 | 1900 |
| Porosidade p (-) | 0,38 | 0,37 | 0,31 | 0,25 | 0,25 |
| Ângulo de fricção seco ϕ (°) | 28-30 | 28 | - | 30 | - |
| Ângulo de fricção húmido ϕ (-) | - | 55 | - | - | - |
| Ângulo de inclinação ϕ (°) | 32 | 30 | - | 29 | - |
| Tensão de corte crítica τ_{er} (Pa) | - | 11,9 | 9,7 | 3,2 | 11,9 |
| Coefficiente de erosão K_d (cm ³ /N-s) | - | 174,5 | 135,9 | 122,1 | 247,2 |

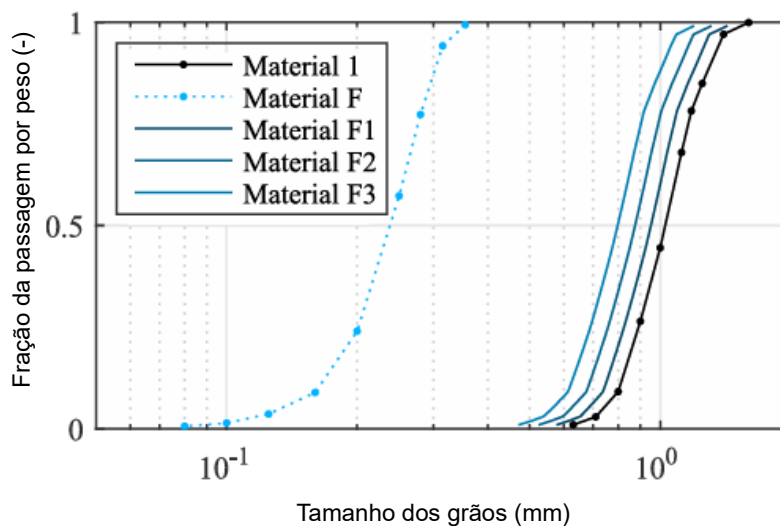


Figura 5.21 – Distribuições granulométricas para os diferentes materiais 1 e F, e distribuição granulométrica sintética baseada nos rácios de peso dos materiais F1, F2 e F3.

Neste trabalho o objetivo era construir um dique que se aproximasse das condições mais reais e naturais dos diques existentes em Portugal, o solo utilizado é um solo não calibrado nem graduado. Esta diferença marcada pelo tipo de material influencia as condições da evolução da brecha, do tempo de ensaio, do volume erodido e dos caudais efluentes e afluentes.

Na Figura 5.22 está representada a evolução morfológica da brecha no ensaio 8 na qual a linha vermelha tracejada é a posição inicial do canal piloto. Observam-se algumas

semelhanças no comportamento uma vez que o caudal efluente foi constante e a instalação também apresenta as mesmas dimensões.

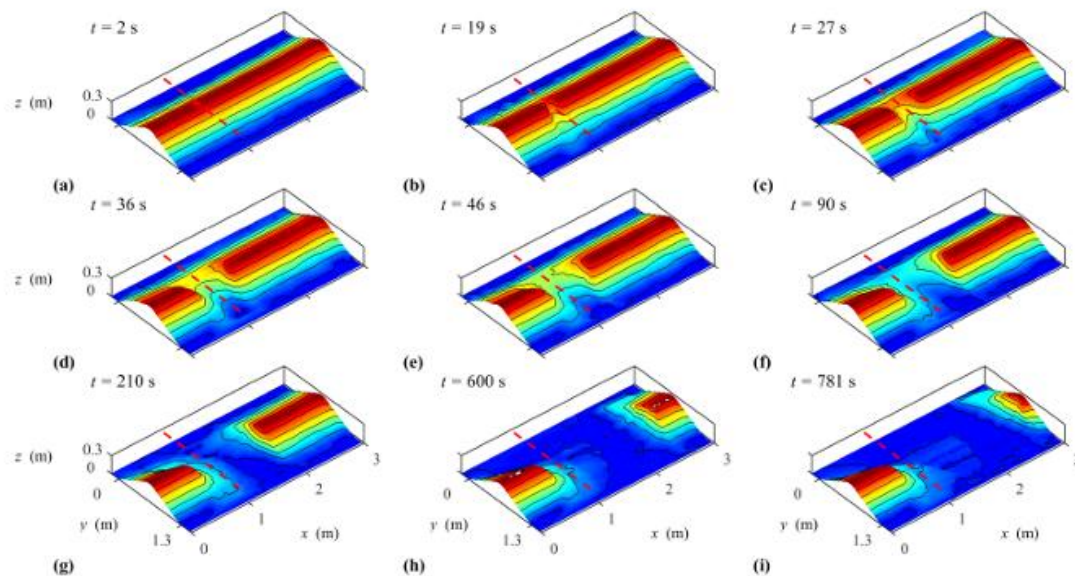


Figura 5.22 – Topografia da brecha reconstruída no ensaio 8

Nos ensaios do Rifai (2018) apesar de a instalação ser parecida no sentido das condições geométricas do escoamento pois o caudal é paralelo ao coroamento, as condições hidráulicas dos ensaios do Rifai são diferentes desta investigação. O autor apresenta um caudal constante só que o número de Froude é variável na medida em que o autor tem dificuldade em estabelecer o nível no canal principal, aumentando sempre. Durante os ensaios realizados, o nível de água no canal principal desce e o caudal mantém-se constante, a velocidade de escoamento aumenta, contrariamente ao estudo do autor.

Uma das principais diferenças entre este trabalho e o do autor está na caracterização granulométrica dos solos utilizados. Enquanto o autor tem um solo que é uma mistura de dois solos de duas areias bem graduadas, resultando numa curva granulométrica com uma distribuição mais ampla dos tamanhos das partículas (variam entre d_{50} 1,0 e os 1,67 mm), os solos utilizados neste estudo apresenta, curvas granulométricas mais homogêneas ($0,2 \text{ mm} \leq d_{50} \leq 0,6 \text{ mm}$), aproximando das condições reais. Essa diferença na distribuição granulométrica influencia significativamente a formação e evolução da brecha. A mistura de duas areias bem graduadas gera um maior imbricamento dos grãos, o que leva a resultados variáveis entre os ensaios, mesmo sob as mesmas condições de teor de água e grau de compactação.

Se houver um tipo de material, um d_{50} mais natural, e compará-lo com duas areias menos naturais, haverá diferenças observáveis. De forma geral, as brechas tendem a evoluir para jusante, mas nos ensaios realizados neste trabalho, isso não foi observado.

Outra diferença que tem influência o processo de rotura da brecha é que o autor não conhece a percentagem do teor em água, nunca sabendo se o dique está seco ou saturado. Essa informação é importante no processo de rotura.

6. Conclusões

Os ensaios realizados para avaliar o comportamento hidráulico e morfológico de roturas em diques fluviais evidenciam a relevância da calibração experimental e das variáveis físicas na evolução do processo de rotura. O Ensaio 1 (S1T1) destacou-se como exploratório e permitiu aferir a adequação do sistema experimental e dos equipamentos eletromecânicos. Contudo, as condições fluviais variáveis limitaram a sua comparabilidade com os ensaios subsequentes. Após a calibração do sistema, os Ensaios 2 (S1T2), 3 (S2T1) e 4 (S2T2) apresentaram resultados mais robustos e consistentes, conduzindo a importantes observações.

A análise qualitativa e quantitativa dos caudais efluentes da brecha revelou a influência significativa das características do solo e das condições de escoamento. Solos mais grosseiros e secos, como no Ensaio 2, favoreceram brechas com evolução mais rápida e morfologia final trapezoidal, enquanto solos mais finos e húmidos, como no Ensaio 3, resultaram em brechas mais profundas e com geometria predominantemente triangular. Estes resultados confirmam que as propriedades do solo e o teor de água são determinantes na evolução temporal da morfologia da brecha e por conseguinte na dinâmica da rotura de diques fluviais.

A influência do número de Froude foi também evidente. No Ensaio 4, com um número de Froude de 0,2, observou-se uma brecha mais larga e menos profunda, devido à maior velocidade de escoamento que intensificou a erosão no paramento de montante do dique. Este comportamento diferencia-se do Ensaio 3, onde o número de Froude inferior resultou numa brecha mais estreita e profunda.

A quantificação do volume erodido e das taxas de erosão mostrou-se coerente com os hidrogramas efluentes. A utilização de reconstruções 3D permitiu mapear a evolução morfológica da brecha e avaliar o volume erodido do dique ao longo do tempo. Verificou-se que a maior taxa de erosão ocorreu no Ensaio 4, devido à conjugação de elevadas velocidades e significativa erosão do paramento de montante.

A análise dos campos de velocidade, utilizando o método **PTV**, contribuiu para compreender a hidrodinâmica do escoamento junto à brecha e a interação com os episódios de erosão geotécnica. Este método revelou ser uma ferramenta eficiente para caracterizar a linha de transição do escoamento (secção de regime crítico) e os padrões de velocidades nas áreas de interesse.

Por fim, a comparação com estudos prévios, nomeadamente os ensaios de Rifai (2018), validou a instalação experimental e a abordagem metodológica utilizada. Apesar de diferenças nas condições de fronteira, os padrões gerais observados nos ensaios são consistentes com os da literatura, reforçando a robustez deste trabalho experimental.

Estes resultados são essenciais para o desenvolvimento de modelos preditivos de roturas de diques fluviais e contribuem para uma melhor gestão do riscos em cenários de inundação decorrentes de acidentes ou rotura destas estruturas hidráulicas. A instalação experimental demonstrou adequabilidade para futuros estudos de maior complexidade, permitindo explorar variáveis adicionais e as suas interações no comportamento dinâmico de diques fluviais.

Referências bibliográficas

- 2005: *furacão Katrina deixa 1,8 mil mortos na costa Sul dos EUA*. (2016). Globo.com. <https://cbn.globoradio.globo.com/institucional/historia/aniversario/cbn-25-anos/boletins/2016/08/08/2005-FURACAO-KATRINA-DEIXA-18-MIL-MORTOS-NA-COSTA-SUL-DOS-EUA.htm>
- Andrea, C., Silvio, G., Giacomo, M., & Remo, S. (2016). *Robotics and autonomous systems*. (Vol. 75, pp. 584–594). A metrological characterization of the Kinect V2 time-of-flight camera. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921889015002195?via%3Dihub>
- Azure Kinect DK – Desenvolver Modelos de IA | Microsoft Azure*. (2024). Microsoft.com. <https://azure.microsoft.com/pt-br/products/kinect-dk/>
- Baumer. (n.d.). *U500.DA0.2-IAMJ.72F*. Wwww.baumer.com. <https://www.baumer.com/br/pt/resumo-dos-produtos/deteccao-de-objeto/sensores-ultrassonicos/sensores-de-ultrassom-robustos-com-parametrizacao-flexivel/sensores-quadrados/u500-da0-2-iamj-72f/p/38787>
- Bernard Stanford Massey. (2002). *Mecânica dos fluidos*. Fundação Calouste Gulbenkian.
- Bhattacharai, P. K. (2015). *Study on River Dyke Breach Characteristics by Overtopping*. [Tese de Doutorado]. <https://doi.org/10.14989/doctor.k19282>
- Bradley, J. (1989). Dyke (dike). *Encyclopedia of Earth Science*, 134–136. https://doi.org/10.1007/0-387-30845-8_57
- Branß, T., Núñez-González, F., & Aberle, J. (2022). Fluvial levees in compound channels: a review on formation processes and the impact of bedforms and vegetation. *Environmental Fluid Mechanics*, 22(2-3), 559–585. <https://doi.org/10.1007/s10652-022-09850-9>
- Brater, E. F., & King, H. W. (1976). *Handbook of hydraulics* (6th ed.). McGraw-Hill.
- Britannica. (n.d.). *Dike | igneous rock*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/dike-igneous-rock>
- Caldeira, L. (2018). Internal Erosion in Dams: Studies and Rehabilitation. *International Journal of Civil Engineering*, 17(4), 457–471. <https://doi.org/10.1007/s40999-018-0329-5>
- Capart, H., D., Young, L., & Zech, Y. (2002). *Voronoi Imaging Methods for the Measurement of Granular Flows: Vol. Experiments in Fluids* 32 (pp. 121–135).
- Charrier, G., Amielh, M., Pietri, L., Anselmet, F., & Paquier, A. (2013). *Etude expérimentale des ruptures de digues par surverse*. 248–255. https://www.researchgate.net/publication/274310634_Etude_experimentale_des_ruptures_de_digues_par_surverse
- Conceito de. (2020, July 30). *Conceito de dique*. Conceito.de. <https://conceito.de/dique>
- Danka, J., & Zhang, L. M. (2015). Dike Failure Mechanisms and Breaching Parameters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(9), 04015039. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001335](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001335)
- 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. *Water Resources Research*, 51(6), 4770–4781. <https://doi.org/10.1002/2014wr016416>
- Duclos, D. (2017). *Quando os diques na Holanda falharam: é verdade que a Holanda fica abaixo do nível do mar?* Ducs Amsterdam. <https://www.ducsamsterdam.net/diques-na-holanda/>
- Eduardo, C., Gomes, M., Araújo, B., Rosa, A., Maciel, C., Rosmari Marodin Gobo, Carlos, José Marcus Godoy, & Maria, A. (2017). *A COMPOSIÇÃO FÍSICA E ELEMENTAR DOS SEDIMENTOS MARINHOS ENTRE A REGIÃO COSTEIRA E O OCEANO PROFUNDO NA BACIA DE CAMPOS*. 6, 229–276. <https://doi.org/10.1016/b978-85-352-7563-6.50016-8>

- Elalfy, E. Y. (2015). *Numerical and Experimental Investigations of Dam and Levee Failure* [Tese de Doutoramento].
<https://scholarcommons.sc.edu/cgi/viewcontent.cgi?httpsredir=1&article=4277&context=etd>
- Evangelista, S. (2015). Experiments and Numerical Simulations of Dike Erosion due to a Wave Impact. *Water*, 7(10), 5831–5848. <https://doi.org/10.3390/w7105831>
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., & Bell, G. (2005). *Geotechnical Engineering of Dams* (1st ed., p. 930). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/noe0415364409>
- FIBRAS & NORMAS de Columbia S.A.S. (2023). *Diques y represas: Definición, Tipos, Construcción e Importancia* - Blog. TÉRMINOS Y DEFINICIONES. <https://blog.fibrasnormasdecolombia.com/diques-y-represas-definicion-tipos-construccion-e-importancia/#:~:text=Pueden%20clasificarse%20en%20tres%20tipos%3A%20diques%20de%20escollera%2C>
- Foster, M., Fell, R., & Spannagle, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 1000–1024. <https://doi.org/10.1139/t00-030>
- Fry, J-J., Vogel, A., Royet, P., & Courivaud, J-R. (2012). *Dam failures by erosion: lessons from ERINOH data bases R290*. https://izw.baw.de/publikationen/tc213/0/7_290_ICSE-6_Dam%20failure_12-08-29_R290_FRY.pdf
- Gregoretti, C., Maltauro, A., & Lanzoni, S. (2010). Laboratory Experiments on the Failure of Coarse Homogeneous Sediment Natural Dams on a Sloping Bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(11), 868–879. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000259](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000259)
- Islam, M. S. (2012). *Study on Levee Breach and Successive Disasters in Low-land through Numerical and Experimental Approaches* [Tese de Doutoramento].
- iStock. (2016, March 4). *The so-called Wadden dyke on the island of Terschelling in the North...* IStock; VLIET. <https://www.istockphoto.com/pt/foto/waddendyke-com-ovelhas-na-ilha-de-terschelling-na-holanda-gm511795686-86821075?phrase=dykes>
- iStock. (2021, December 20). *The levees and flood control channel making up the Los Angeles River*. IStock; Art Wager. <https://www.istockphoto.com/pt/foto/los-angeles-river-aerial-gm1359906185-433094855>
- Jiang, S. M., Joyce. (2024, July 22). Summer of devastating floods shows steep challenge for China as it grapples with extreme weather. CNN. <https://edition.cnn.com/2024/07/22/china/china-floods-climate-change-intl-hnk/index.html>
- Jónatas, R. (2013). *Rotura de barragens de aterro por galgamento Ensaios experimentais com aterros homogéneos* [Dissertação de mestrado]. https://repositorio.ul.pt/jspui/bitstream/10451/10259/1/ulfc106012_tm_Ricardo_J%C3%B3natas.pdf
- Joziase, H. (2009). A sea dyke, extra protected with concrete blocks and heavy stones [Imagem Online]. In *alamy*. <https://www.alamy.com/a-sea-dyke-extra-protected-with-concrete-blocks-and-heavy-stones-image69992188.html>
- Kreuter, F. (1910). *Der Flussbau* (Vol. 3).
- Le, H. T., Verhagen, H. J., & Vrijling, J. K. (2016). Damage to grass dikes due to wave overtopping. *Natural Hazards*, 86(2), 849–875. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2721-2>
- Lemmens, D., F. Bisschop, Pieter Jelle Visser, & C. van Rhee. (2016). Retarding the breaching process of dikes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering*, 169(3), 99–114. <https://doi.org/10.1680/jmaen.2015.20>
- Lusa, A. (2020, July 10). *Dique recuperado no rio Mondego a tempo de abastecer campos agrícolas neste verão*. PÚBLICO; Público. <https://www.publico.pt/2020/07/10/local/noticia/dique-recuperado-rio-mondego-tempo-abastecer-campos-agricolas-neste-verao-1923971>
- Lusa, A. (2019, December 22). Dique que estava a ser reparado no mondego rompeu-se. Expresso. <https://expresso.pt/sociedade/2019-12-22-Dique-que-estava-a-ser-reparado-no-Mondego-rompeu-se>
- Maderas Ruta 25. (2013). *Maderas Ruta 25 | Maderas, Decks, Machimbres, Encofrados, Cubiertas, Aislacion, etc...* Maderasruta25.com.ar. <http://maderasruta25.com.ar/obras.html>
- Michelazzo, G. (2014). Breaching of river levees: analytical flow modelling and experimental hydro-morphodynamic investigations. In *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/308524187_Breaching_of_river_levees_analytical_flow_modelling_and_experimental_hydromorphodynamic_investigations
- Michelazzo, G., Oumeraci, H., & Paris, E. (2017). Closure to “Laboratory Study on 3D Flow Structures Induced by Zero-Height Side Weir and Implications for 1D Modeling” by Giovanni Michelazzo, Hocine Oumeraci, and Enio Paris. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(3), 07016011. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001257](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001257)

- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2018). Autoridad Local del Agua debe decidir acciones por rotura de diques en río Piura [Imagem Online]. In *AGRO RURAL*. <https://www.agrorural.gob.pe/autoridad-local-del-agua-debe-decidir-acciones-por-rotura-de-diques-en-rio-piura/>
- Nagy, L. (2006). Estimating dike breach length from historical data. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 50, 125–139. https://www.researchgate.net/publication/237811778_Estimating_dike_breach_length_from_historical_data#fullTextFileContent
- Nagy, L. (2012). STATISTICAL EVALUATION OF HISTORICAL DIKE FAILURE MECHANISM. *Riscuri Si Catastrofe*, 11(2), 7–20. https://riscuriscatastrofe.reviste.ubbcluj.ro/Volume/XI_Nr_11_2_2012/PDF/LNagy.pdf
- NUESTRAS CHARLAS NOCTURNAS. (2021). Huang He, el río más peligroso de China ... [Imagem Online]. In *Nuestras Charlas Nocturnas*. <https://nuestrascharlasnocturnas.wordpress.com/2021/08/29/huang-he-el-rio-mas-peligroso-de-china/>
- 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>
- Quintela, A. C. (1990). *ESTRUTURAS HIDRÁULICAS*.
- Rifai, I. (2018). *Modélisation physique et numérique des écoulements générés par la formation de breàche dans le digues fluviales soumises aux surverses* [Tese de Doutoramento].
- Rimoldi, P., Shamrock, J., Kawalec, J., & Touze, N. (2021). Sustainable Use of Geosynthetics in Dykes. *Sustainability*, 13(8), 4445. <https://doi.org/10.3390/su13084445>
- rpc Contracts Ltd. (n.d.). Revetment Systems [Imagem Online]. In *rpc*. <http://www.rpcLtd.co.uk/contracts/revetment.html#prettyPhoto>
- RuudMorijn. (2018). Flooded Dutch landscape due to the high water level in the adjacent river [Imagem Online]. In *iStock*. <https://www.istockphoto.com/pt/foto/flooded-dutch-landscape-due-to-the-high-water-level-in-the-adjacent-river-gm914100274-251605732?phrase=earthen%2Bdikes>
- Safarek, G. (2020). Aerial view of the Sava River in Lonjsko polje, Croatia [Imagem Online]. In *iStock*. <https://www.istockphoto.com/pt/foto/aerial-view-of-the-sava-river-in-lonjsko-polje-croatia-gm1291898857-386877735?phrase=fluvial%2Bdyke>
- Schiereck, G. J. (1998). Fundamentals on Water Defences. *TAW-ENW Report*. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:fe16f99c-6ddc-49bd-b7f7-18223e9b73b4?collection=research>
- Schmitz, V., Sébastien Epicum, Kamal, Rifai, I., Archambeau, P., Pirotton, M., & Dewals, B. (2021). Overtopping-Induced Failure of Non-Cohesive Homogeneous Fluvial Dikes: Effect of Dike Geometry on Breach Discharge and Widening. *Water Resources Research*, 57(7). <https://doi.org/10.1029/2021wr029660>
- Schmocker, L. (2011). *Hydraulics of dike breaching* (p. 185) [Tese de doutoramento]. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010025751>
- TVI. (2019). *TVI Notícias*. <https://tvi.iol.pt/noticias/sociedade/casal-novo-do-rio/rotura-iminente-de-dique-no-mondego-obriga-a-evacuacao-de-povoaca>
- Valente Mendes, S. (2017). *Rotura de barragens de aterro por galgamento. Caracterização laboratorial do hidrograma efluente da rotura* [Dissertação de Mestrado]. <https://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/7126/1/Disserta%c3%a7%c3%a3o.pdf>
- Vintage Everyday. (2017). The Johnstown Flood: 27 Rare Photographs of the Great Flood of 1889 Which Killed Over 2,000 People in Minutes [Imagem Online]. In *Vintage Everyday*. <https://www.vintag.es/2017/02/the-johnstown-flood-27-rare-photographs.html>
- Vrijling, J. K., Schweckendiek, T., & Kanning, W. (2011). Safety standards of flood defenses. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk, ISGSR 2011, Munich, Germany, 2-3 June 2011*, 18. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:652da5f1-1b65-4619-91f0-20cbf669d532?collection=research>
- Wager, A. (2021, December 20). *The levees and flood control channel making up the Los Angeles River...* IStock. <https://www.istockphoto.com/pt/foto/los-angeles-river-aerial-gm1359906185-433094855>
- Word Stop Insider. (2023). *Top 15 Most Famous Engineering Disasters 2023 | World's Top Insider*. https://worldstopinsider.com/famous-engineering-disasters/?expand_article=1

Younghui, Z. (2006). *Breach Growth in Clay-Dikes* [Tese de Doutorado].

7.Anexos

Embora a descrição detalhada dos acessórios contemplados na instalação experimental não seja objeto desta dissertação, é essencial fornecer uma visão geral destas dimensões para facilitar uma compreensão abrangente do processo subsequente da análise dos dados.

Anexo A.1 – Dimensões da estrutura fixa colocada na instalação experimental e localização do corte A-A

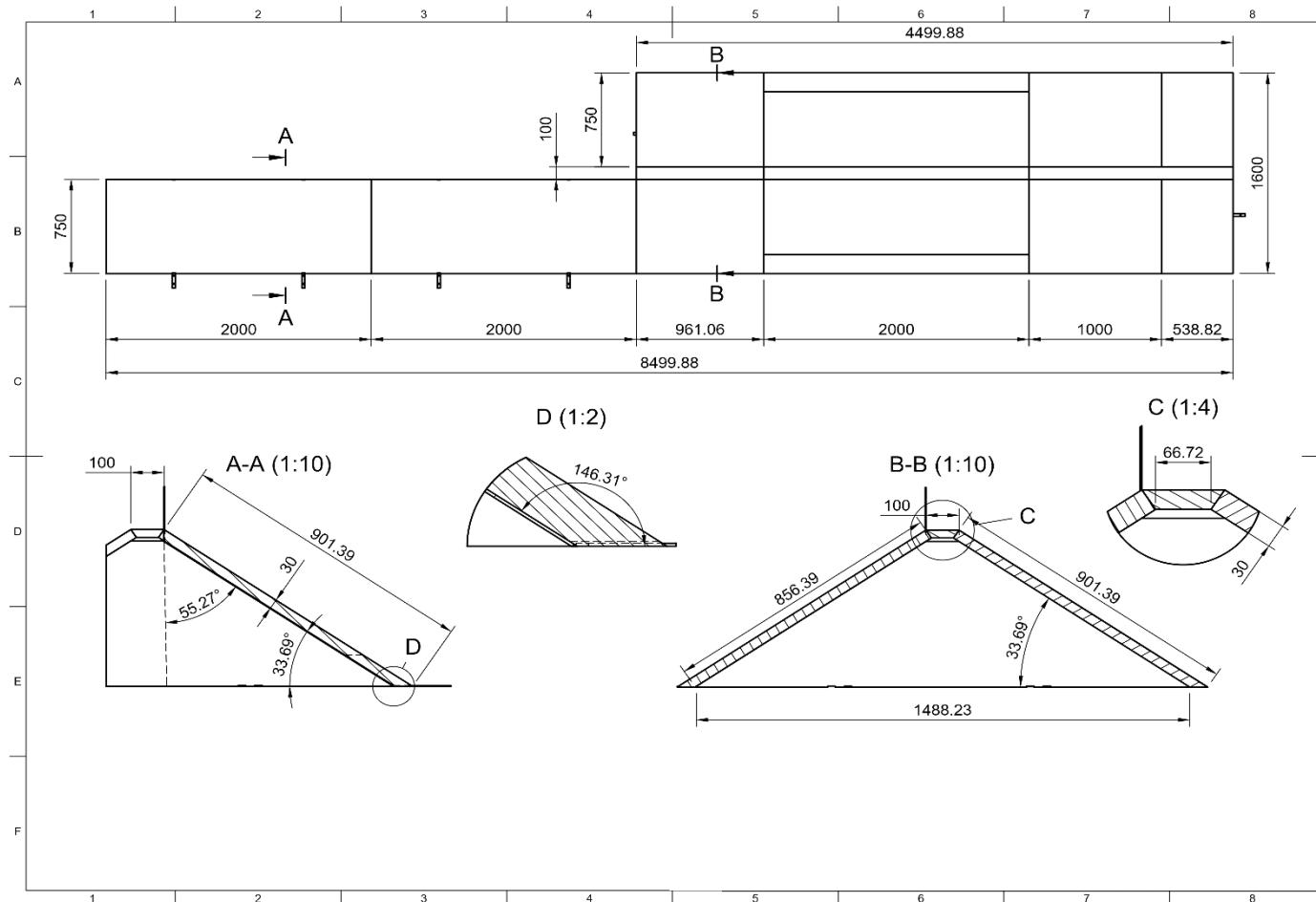
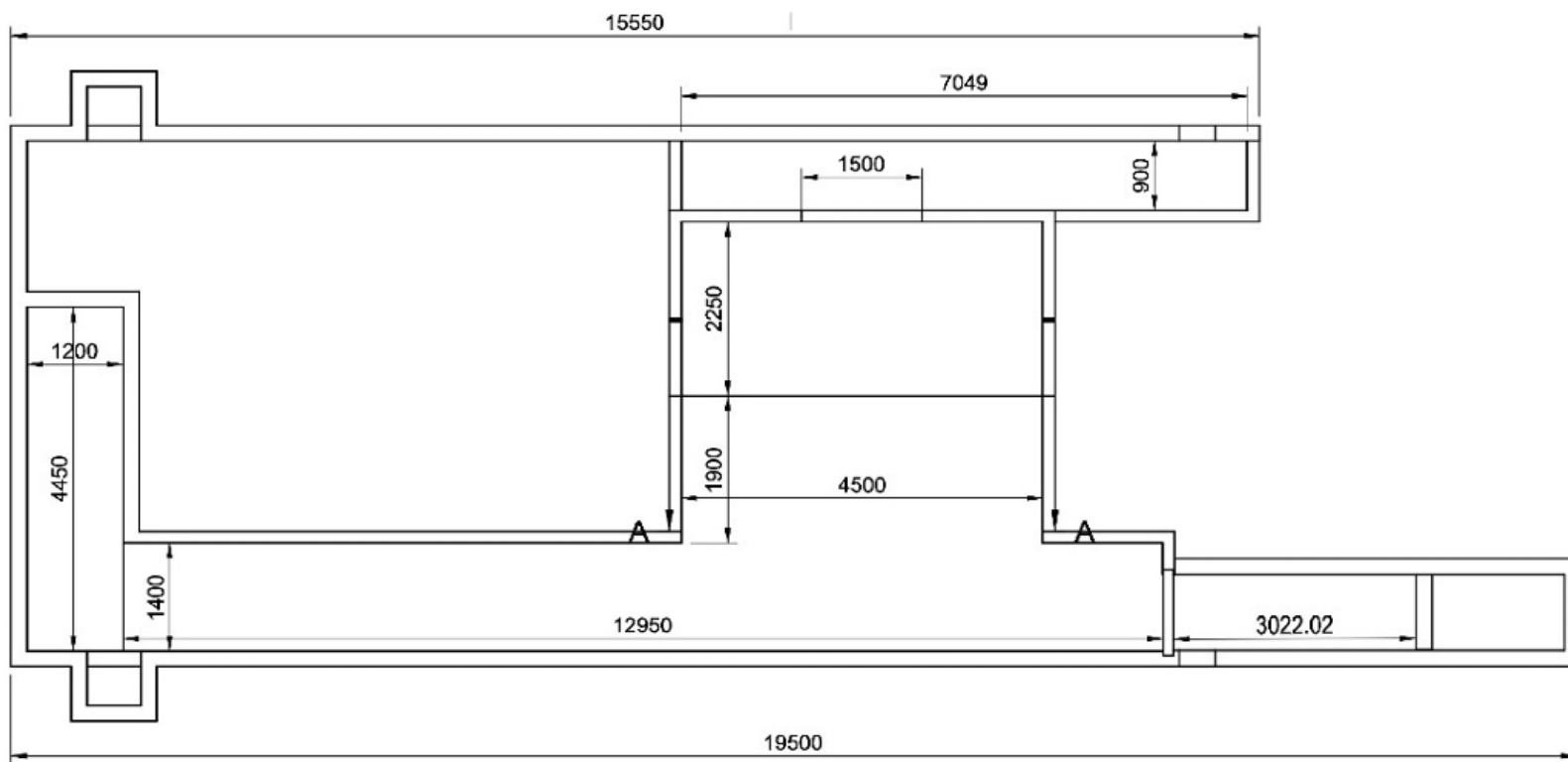


Figura A.1 – Dimensões da estrutura fixa



Anexo A 1.1 - Localização do corte A-A

Anexo A.2 – Regulação do nível da comporta

A regulação do nível é realizada da seguinte forma:

- Quando a coluna de água no canal principal for inferior a 48,0 cm ou estiver compreendida entre 48,4 e 48,6 cm, a comporta fecha;
- Quando a coluna de água no canal principal estiver compreendida entre 48,2 e 48,4 cm, 48,6 e 48,8 cm ou 49,0 e 49,2 cm, a comporta pára;
- Quando a coluna de água no canal principal for superior a 49,5 cm ou estiver compreendida entre 48,8 a 49,0 cm, a comporta abre;

Anexo A.3 – Dimensões do descarregador retangular

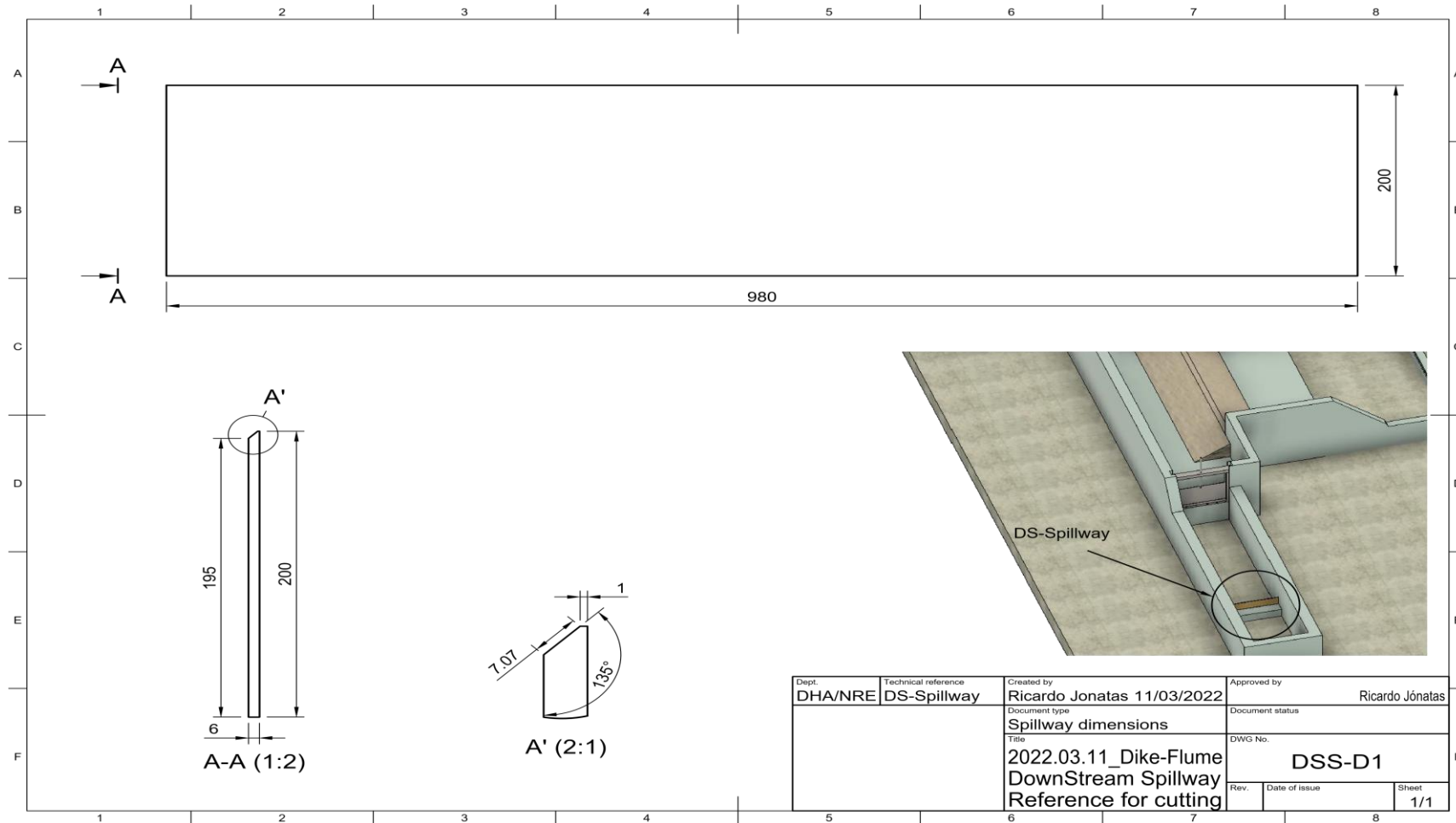


Figura A.2 – Dimensões do descarregador retangular

Anexo A.4 – Dimensões do descarregado “V-Notch”

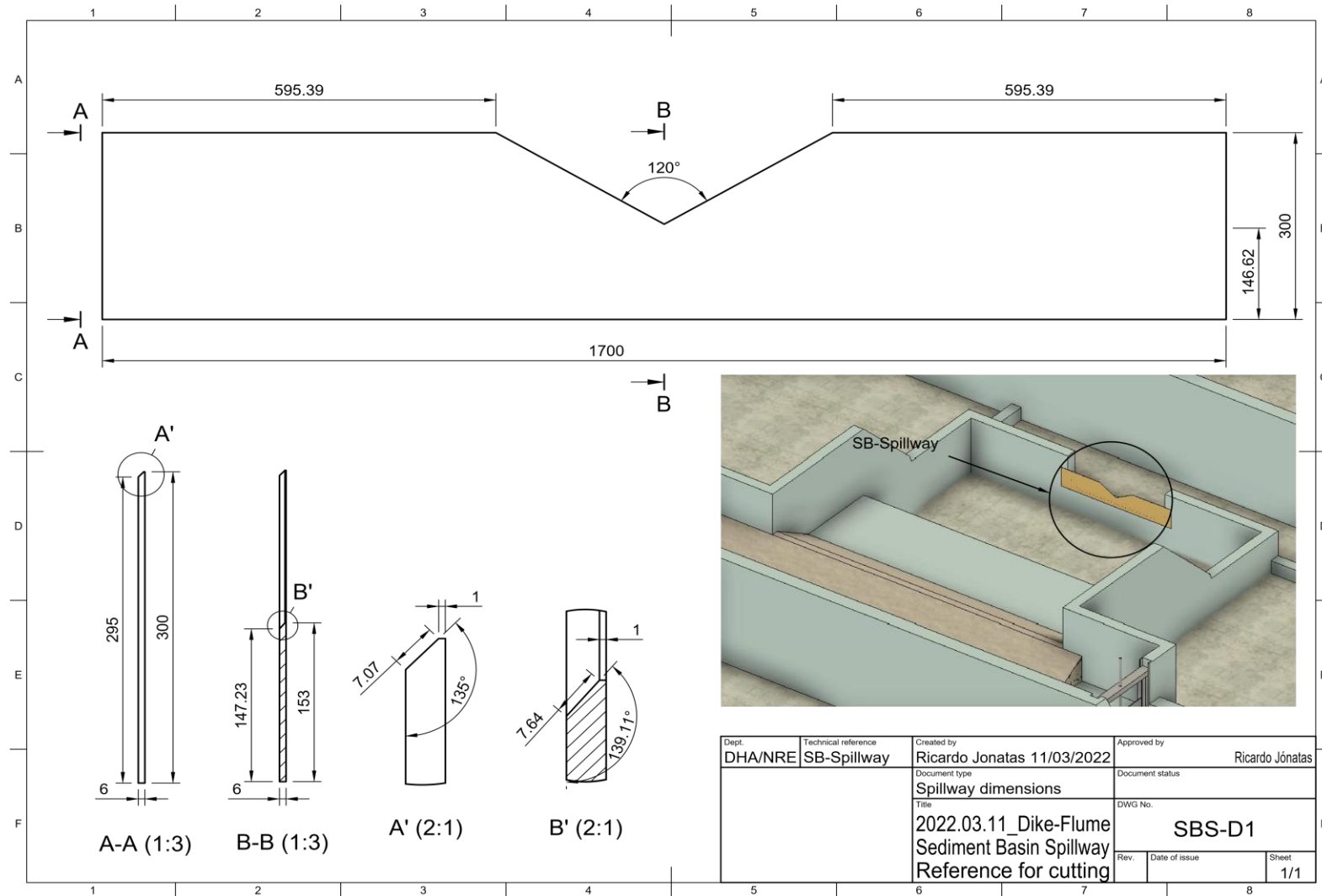


Figura A.3 – Dimensões do descarregado “V-Notch”

Anexo A.5 – Procedimento da curva de calibração dos descarregadores

Os descarregadores passam por um processo de calibração, utilizando um hodómetro, antes da realização dos ensaios. O procedimento é iniciado ao abrir a válvula, permitindo o escoamento de 80 l/s no canal. A calibração prossegue até que os níveis de água, monitorizados pelas sondas ultrassónicas, se estabilizem dentro de um intervalo de valores (com uma variação de 1m). Durante esse período, não é possível realizar registos. Quando o nível de água no canal alcança a estabilidade desejada, regista-se o valor correspondente aos 80 l/s. Em suma, reduz-se o caudal para 70 l/s e o nível de água é novamente verificado. Por fim, este processo é repetido iterativamente, diminuindo gradualmente o caudal até atingir a sua anulação no canal. Na Figura A.4 – Curva de calibração do descarregador retangular e Figura A.5 são apresentadas as curvas dos descarregadores existentes na instalação experimental.

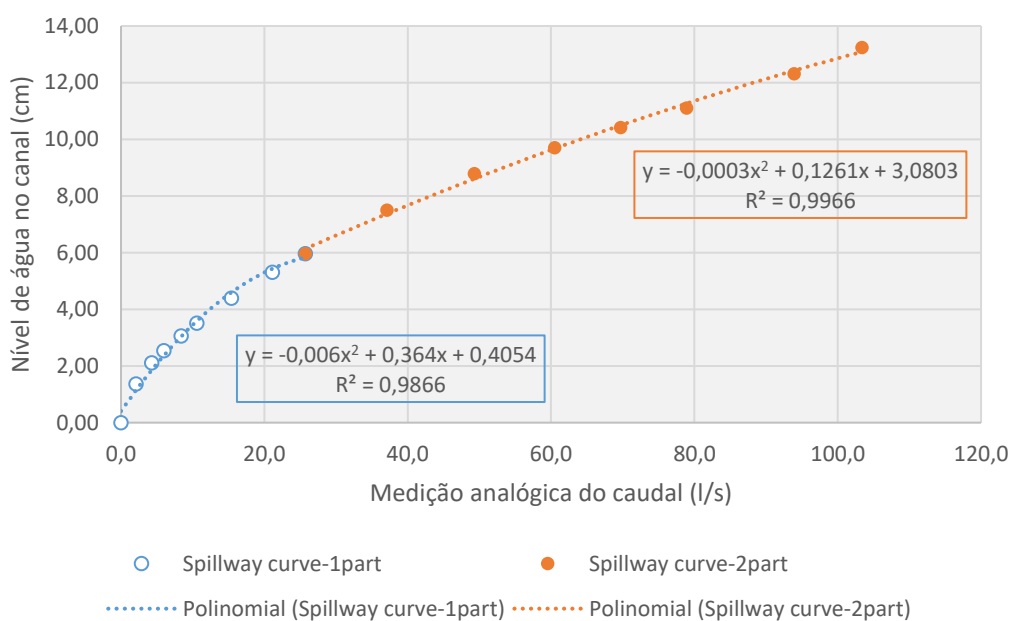


Figura A.4 – Curva de calibração do descarregador retangular

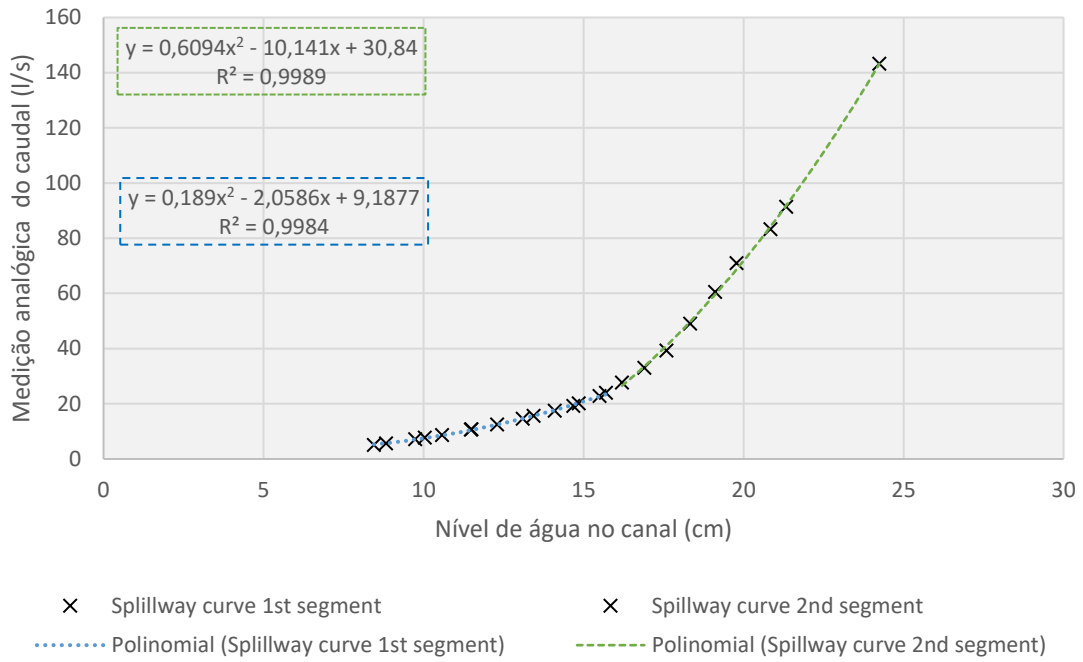


Figura A.5 – Curva de calibração do descarregador "V-Notch"

Anexo 4.6 – Curva de calibração do caudalímetro

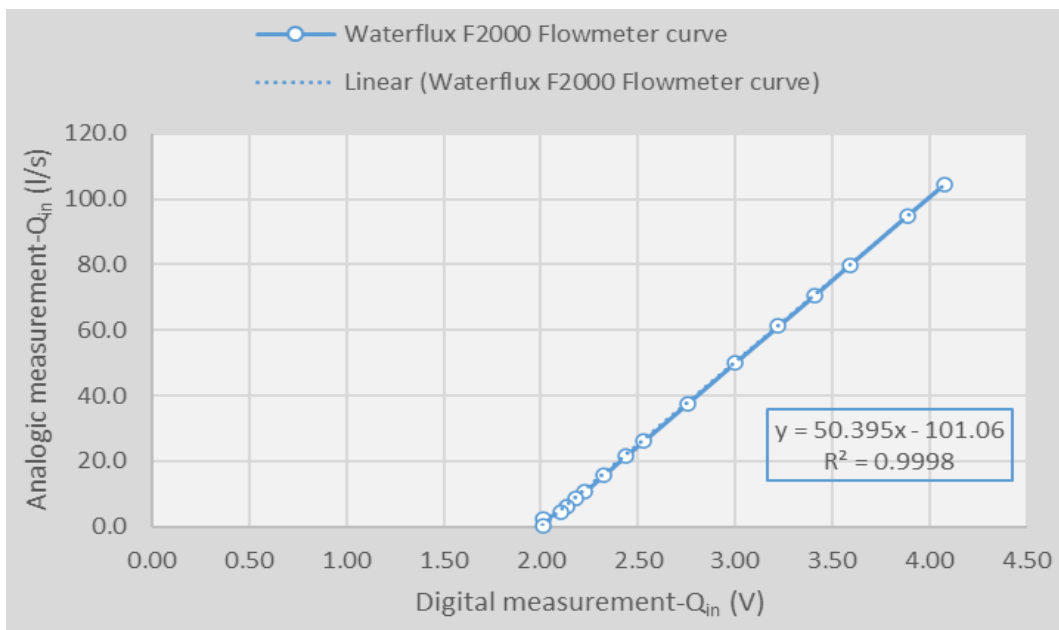


Figura A.6 – Curva de calibração do caudalímetro

Anexo 4.7 – Curva de calibração das sondas de nível

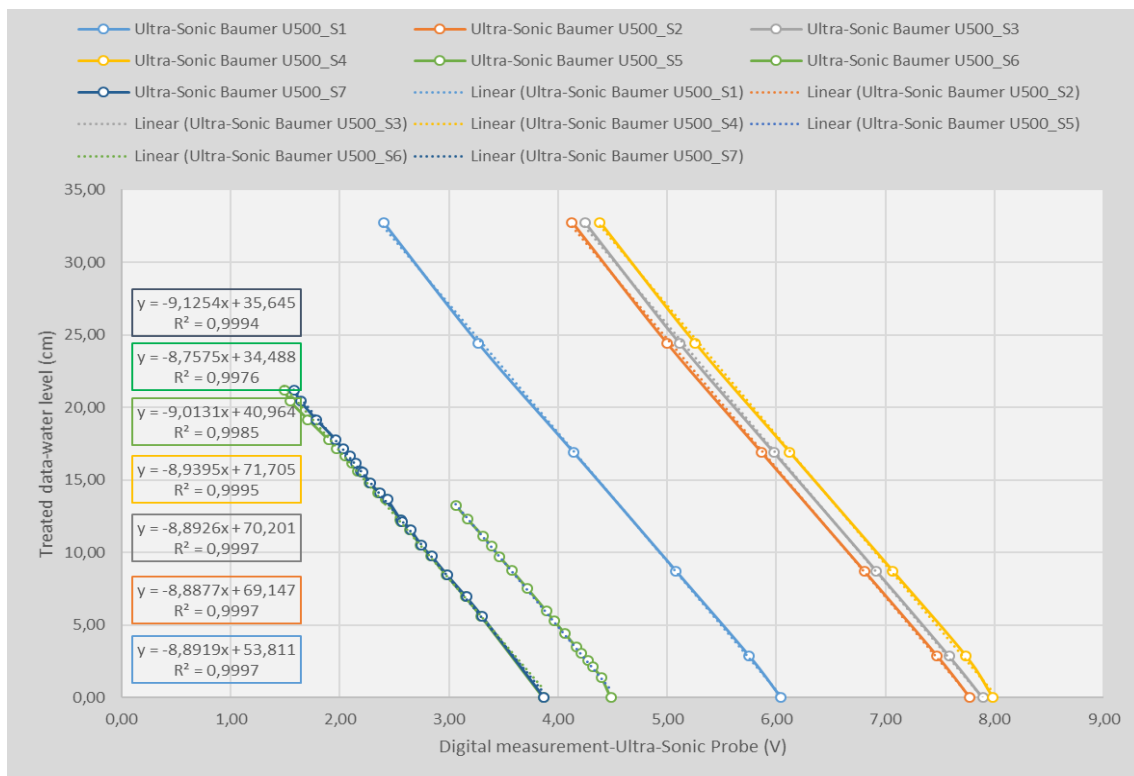


Figura A.7 – Curva de calibração das sondas de nível

Anexo 4.8 – Dispensador de partículas

Os campos de velocidade a caracterizar nos ensaios baseam-se no pós-processamento de imagens digitais obtidas com uma taxa de aquisição elevada. A determinação dos campos de velocidade requer a presença de elementos traçadores sobre a superfície do escoamento cujo deslocamento entre imagens será avaliado com base na aplicação de um algoritmo de PTV.

Como traçadores utilizaram-se partículas esféricas de poliestireno com um com uma distribuição de diâmetros $3 \text{ mm} \leq d \leq 5 \text{ mm}$. A alimentação destas partículas à superfície do escoamento foi realizada com recurso a um dispensador automático de partículas (Figura A.8 (a)). Este é constituído por um pequeno reservatório perfurado onde são colocadas as partículas. Este reservatório é colocado em vibração por um motor (Figura A.8 (b)) provocando assim a queda das partículas e a sua dispersão uniforme na superfície do escoamento.



Figura A.8 – Dispensador de partículas. (a) Dispensador (Tubo PVC); (b) motor

Anexo 4.9 – Software CATMAN EASY

Catman Easy é um software que permite verificar e monitorizar o estado de aquisição de dados das sondas ultrassónicas, neste caso, o nível de água na instalação experimental. Este *software* para apresentar os dados devidamente corretos, tem de ter os parâmetros apropriados ao estudo. É essencial a correção desses parâmetros, uma vez que durante o ensaio, os dados adquiridos serão utilizados para estimar o cálculo do caudal afluyente e efluente.

Uma das dificuldades a enfrentar neste *software* é a quantidade de dados a tratar dado que a capacidade de extrair informação por parte das sondas ultrassónicas é muito grande, mas acima de tudo a complexidade do tratamento destes dados. Por outro lado, é necessário ter em conta que a variação das cotas de água é de extrema importância e como tal não se deve desprezar a possibilidade de conseguir detetar a variação dos níveis em menos de um segundo. Tendo em conta que este *software* adquire dados com uma frequência de 10 Hz, consegue que a cada segundo o *software* adquire dez cotas medidas pelas sondas.

Anexo A.10 – Placas de aquisição National Instruments (NI) e Labview Signal Express

Para recolher dados de todas as sondas acústicas em simultâneo durante um ensaio experimental, foi utilizada uma placa de aquisição de sinais (Figura A.9). Como complemento, foi utilizado um software de medição interativo, LabVIEW Signal Express, concebido para processar rapidamente os sinais das sondas sem necessidade de programar.

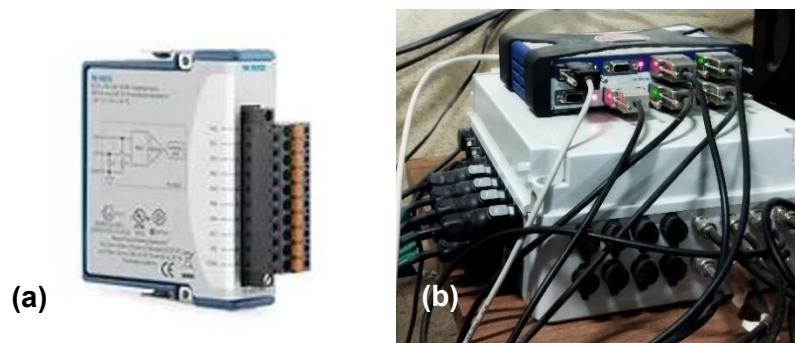


Figura A.9 – (a): Placa de aquisição de sinal das condas acústicas (DAQ - NI 9203 - IST);
(b): Chassis de alimentação da placa na instalação (NI cDAQ - 9172 - CIC)

Anexo A.11 – Método da Garrafa de Areia

O método da garrafa de areia é uma técnica utilizada para determinar a distribuição dos tamanhos das partículas de um solo, ou seja, sua granulometria. Com este método é possível obter a caracterização do solo.

Para determinar o teor de água presente no solo a este método que consiste em medir o peso volúmico seco e o teor em água de um provete colhido fazendo-se os orifícios longe do eixo central do dique de maneira a não prejudicar o processo de rotura do dique. O processo inicia-se da seguinte forma:

1. é colocado o prato na zona onde é recolhida a amostra (Figura A.10 (1));
2. é fixado o prato com uns suportes próprios (Figura A.10 (2));

3. com a ajuda de umas ferramentas, é retirado o volume necessário a uma profundidade total ou metade do diâmetro do prato. (O diâmetro do prato é de 15 cm, por isso a profundidade situa-se entre 7,5 – 15 cm) (Figura A.10, (3) e (4)).
4. o material extraído vai ser separado em dois: partículas que são superiores e que passam no peneiro 4 mm e as partículas inferiores e que não passam nesse peneiro. É necessário esta separação uma vez que as partículas de maior dimensão apresentam uma percentagem de teor em água diferente.
5. é colocado a garrafa de areia no centro do círculo e esvaziado o seu conteúdo até preencher o volume do orifício. A areia que está na garrafa não é a do solo; é uma areia mais calibrada onde se sabe que cada kilo que areia pesa um determinado volume. Terminado, o orifício é fechado e a garrafa de areia é removida (Figura A.10, (5));
6. a areia que ocupou o orifício e a que sobrou do cone da garrafa são removidas e guardadas (Figura A.10, (6) e (7));
7. depois é calculado o peso da areia dentro do volume que deriva da subtração do peso que preenche o cone da garrafa ao peso total da areia que foi retirada;
8. o orifício é re-preenchido e compactado com a ajuda de um pilão.

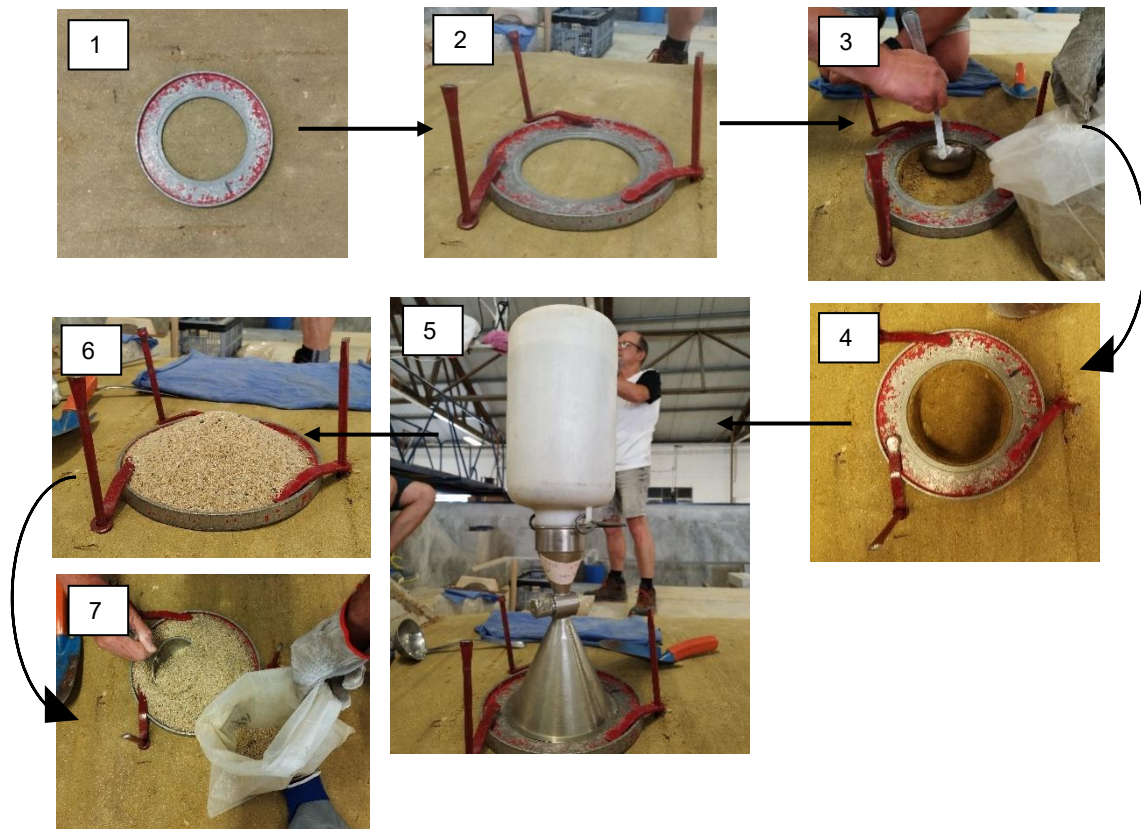


Figura A.10 – Sequência do processo do Método da Garrafa de Areia

Anexo A.12 – Segundos definidos para os tempos marcados

Quadro A.1 - Segundos definidos para os tempos marcados

| Tempo (segundos) | S1T1 | S1T2 | S2T1 | S2T2 |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| t = 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| t = ¼ | 110 | 283 | 363 | 550 |
| t = ½ | 220 | 566 | 725 | 1100 |
| t = ¾ | 330 | 848 | 1088 | 1650 |
| t = 1 | 440 | 1131 | 1450 | 2200 |

Anexo A.13 – Código ffmpeg utilizado

```
"ffmpeg -ss xx:xx:xx -to xx:xx:xx -i video.mp4 -vf fps=xxx nome_das_imagens_%02d.png"
```

Em que:

Fmpeg - Corre o executavel;

ss - Indica o instante inicial considerado para a extração dos frames;

to - Indica o instante final considerado para a extração dos frames;

i - indica o nome do ficheiro video e a extensão;

vf fps - indica o numero de frames a extrair (importa saber à partida qual o numero de frames em cada segundo do video);

nome_das_imagens - Inserir a nomenclatura desejada;

%02d.png - Cada imagem terá duas casas decimais para numeração e a extensão será .png