



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
NOVOS
DESAFIOS

MODELAÇÃO FÍSICA DA ROTURA DE BARRAGENS DE TERRA. MÉTODOS DE ANÁLISE E PÓS-PROCESSAMENTO DE IMAGEM

Sílvia, AMARAL¹; Teresa, ALVAREZ²; Teresa, VISEU³, Rui, FERREIRA⁴

¹ Bolseira de Pós-doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, samaral@lnec.pt, 218 443 439

² Bolseira de doutoramento, CERIS, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, talvarez@lnec.pt, 218 443 439

³ Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, tviseu@lnec.pt, 218 443 771

⁴ Professor Associado, CERIS, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, ruimferreira@ist.utl.pt, 218 418 143

Resumo

O escoamento originado pela rotura de uma barragem de terra é tridimensional e bifásico (composto por água e sedimentos), logo é caracterizado por várias escalas espaciais. Assim, o estudo pormenorizado do processo de evolução da brecha só pode ser alcançado com uma campanha experimental abrangente e devidamente controlada. O presente estudo representa uma contribuição para atingir este objetivo e é baseado em ensaios experimentais de rotura por galgamento de barragens de terra homogéneas com uma elevada fração de finos. Estes foram realizados numa instalação experimental de média escala construída especificamente para o propósito no Laboratório Nacional de Engenharia Civil e foram conduzidos em condições hidráulicas e geotécnicas controladas. O principal objetivo do trabalho foi o desenvolvimento de estimativas do hidrograma efluente da brecha (HEB) com base em medições locais e a comparação das mesmas com estimativas clássicas, *i.e.* baseadas, em balanços de massa na albufeira e em curvas de vazão calibradas em secções a jusante da barragem. Observou-se que as estimativas desenvolvidas estiveram de acordo com as estimativas clássicas, isto é, que o caudal aumenta de forma aproximadamente contínua, mesmo durante a ocorrência de episódios de erosão geotécnica (EEG), *i.e.* destacamentos súbitos de massas de solo do corpo da barragem. Assim, surgiu como segundo objetivo, compreender a razão pela qual erosões descontínuas da brecha (aumento súbito da área da brecha durante aos EEG) não causam discontinuidades no caudal. Para dar resposta a esta segunda questão estudou-se em detalhe a relação entre a hidrodinâmica do escoamento junto à brecha e a evolução morfológica da mesma. Esta análise permitiu demonstrar que o caudal efluente da brecha nem sempre aumenta na sequência de EEG, e mesmo quando o faz, este aumento é sempre gradual. Por fim, refira-se que a concretização dos dois objetivos propostos só foi possível devido à utilização de instrumentação recente, assim como, à adoção de métodos de medição inovadores, sendo que as variáveis de interesse do estudo foram maioritariamente extraídas por recurso a métodos de pós-processamento de imagem que aqui são apresentados.

Palavras-chave: rotura por galgamento; barragens de terra; processo de evolução de brecha; estimativas do hidrograma efluente da brecha; métodos de pós-processamento de imagem **Tema:** Investigação em hidráulica e recursos hídricos



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
NOVOS
DESAFIOS

1. INTRODUÇÃO

A rotura de barragens de terra coloca riscos significativos às populações e bens localizados na zona de inundação (Wahl, 2004; Yochum et al., 2008). Estas têm particular interesse porque totalizam cerca de 3/4 das 33 105 grandes barragens a nível mundial (das quais 88 e 12% são, respetivamente, barragens de terra e de enrocamento - ICOLD (2003)) e também porque são, de longe, as que rompem com maior frequência. O estudo do mecanismo de rotura por galgamento justifica-se porque, de acordo com ASCE (2011), este constitui um dos principais modos de rotura de barragens de terra (34%).

Os primeiros estudos de rotura de barragens de aterro foram de natureza numérica tendo sido apenas nas últimas duas décadas que os estudos experimentais começaram a surgir, tipicamente realizados em instalações experimentais de pequena e média escala (Zhu et al., 2011; Tingsanchali and Chinnarasri, 2001). Embora nem todos os estudos experimentais se debrucem sobre as mesmas variáveis, as mais comumente estudadas são o processo de evolução da brecha e o hidrograma efluente da mesma (HEB).

No que respeita as estimativas do HEB observa-se que a maior parte dos estudos se baseiam em dados adquiridos longe da secção da brecha, portanto efetuam estimativas '*não locais*' – geralmente por aplicação de curvas de vazão de descarregadores em secções a jusante da barragem (Schmocker and Hager, 2012 e Van Emelen et al., 2015) e através de balanços de massas na albufeira (Cestero et al., 2015). No entanto, o cariz '*não local*' destas estimativas pode induzir à filtragem de variações súbitas do HEB (Bento *et al.*, 2017) ocultando variações reais do caudal.

Note-se que, os estudos que se debruçaram sobre a caracterização simultânea do HEB e do processo de evolução da brecha (Frank, 2016 e Walder et al., 2015) demonstraram que o processo erosivo, em barragens compostas por solos com elevadas frações finas (comportamento mecânico coesivo), se dá, maioritariamente, por erosão hidráulica (processo erosivo contínuo) e por ocorrência singular de episódios de erosão geotécnica (EEG), onde massas de solo se destacam do corpo da barragem, originando alargamento súbitos da brecha (erosão descontínua). Desta perspetiva seria expectável que a ocorrência de EEG se repercutisse no HEB como uma descontinuidade local (aumento súbito de caudal). No entanto os estudos referidos observaram exatamente o contrário, levantando a seguinte questão: '*Estará o HEB estimado com base nas estimativas clássicas a ser bem medido?*'

Para dar resposta a esta questão desenvolveu-se um método inovador, não intrusivo, baseado em ferramentas de pós-processamento de imagem, para estimar localmente o HEB (estimativa '*local*') através do produto da velocidade normal à secção da brecha com a área da mesma. Os campos superficiais de velocidade na aproximação e na secção da brecha foram determinados por recurso ao método de *large-scale particles image velocimetry (LSPIV)* e o contorno da brecha foi determinado automaticamente por pós-processamento de imagem. Esta estimativa local do HEB não é afetada pelos efeitos inerciais presentes nas estimativas clássicas, sentindo apenas os efeitos inerentes à adaptação do escoamento à geometria local.

O HEB estimado localmente exhibe uma evolução temporal contínua semelhante às estimativas não locais, apenas sem atraso temporal. Esta observação é contraintuitiva e motiva a seguinte questão de investigação fundamental: '*porque é que o HEB é contínuo quando a evolução morfológica da brecha é descontínua?*'

Para responder a esta questão efetuou-se um estudo de pormenor no qual se observou em simultâneo a hidrodinâmica do escoamento e a mecânica do solo na brecha, que permitiu investigar a razão pela qual o caudal efluente da brecha pode permanecer contínuo durante a ocorrência de EEG.

Este artigo é composto por cinco secções principais. Começa com a *Secção 1*, a introdução. Segue-se a *Secção 2*, onde se apresenta a instalação onde decorreu a campanha experimental e assim como as variáveis monitorizadas durante os ensaios. A *Secção 3* apresenta a estimativa local do HEB desenvolvida neste estudo assim como a comparação da mesma com as estimativas clássicas. Na *Secção 4* apresenta-se o estudo da relação entre a hidrodinâmica do escoamento e a evolução morfológica da brecha onde se apresentam os métodos de pós-processamento de imagem utilizados na extração de vetores de velocidade locais e na caracterização da largura do escoamento contraído e da reconstrução 3D da morfologia da brecha após a ocorrência de EEG. O artigo finaliza com a apresentação das principais conclusões deste estudo.

2. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E VARIÁVEIS MONITORIZADAS

Nos ensaios experimentais utilizou-se uma instalação de média escala com 31,5 m de comprimento; 1,60 a 6,60 m de largura; 0,05 to 1,30 m de profundidade (Figura 1, (a)). Ensaíram-se barragens de terra homogéneas de com as seguintes características principais (Figura 1, (b), (c), (d)): i) 0,45 a 0,48 m de altura; ii) coroamento com 1,5 de comprimento e 0,17 m largura; iii) paramentos de montante e jusante com inclinações de 1V:2H e 1V:2.5H, respetivamente; iv) com drenos de pé de talude para controlo da percolação interna.

Legenda:

- 1 – entrada de caudal ($\phi=350\text{mm}$)
- 2 – dispositivo de estabilização do escoamento
- 3 – esgoto para esvaziamento da albufeira
- 4 – localização das barragens
- 5 – local de colocação da bomba submersível
- 6 – bacia de retenção de sedimentos
- sondas resistivas
- sondas acústicas

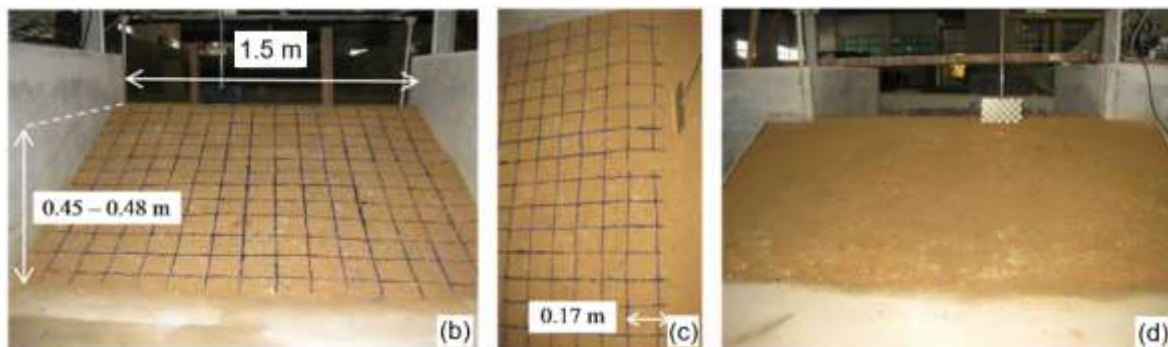
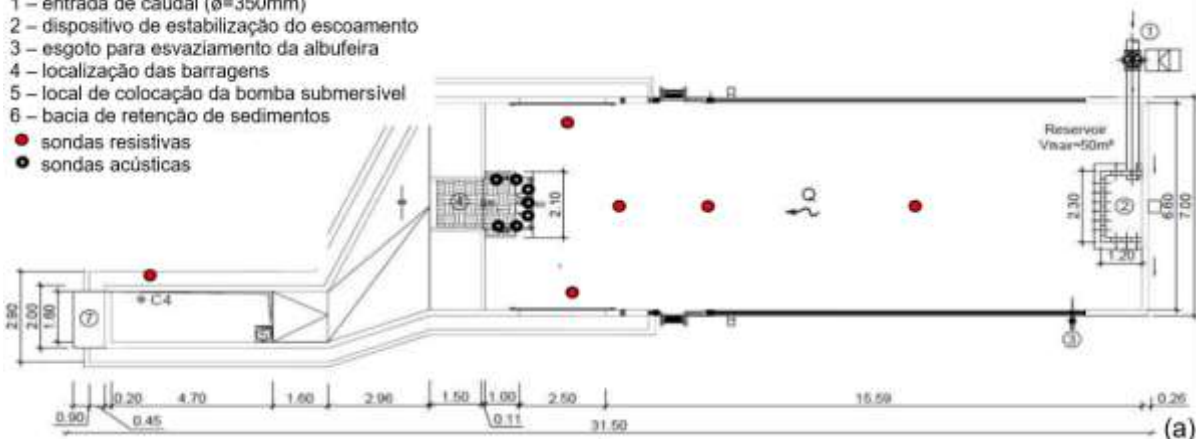


Figura 1. (a) Vista em planta da instalação experimental (dimensões em metros); Modelo físico de barragem de terra homogênea: (b) paramento de jusante com grelha desenhada; (c) vista de topo com localização do coroamento; (d) paramento de montante

Os principais resultados extraídos da campanha experimental basearam-se em medições do caudal de entrada, dos níveis de água no interior da albufeira e na bacia de retenção de sedimentos (a jusante) e em imagens HD adquiridas com um sistema de aquisição de imagem especialmente desenhado para este propósito (composto por 5 câmaras distintas – 2 câmaras HD; 2 câmaras de alta velocidade; 1 Kinect sensor (RGB e IR câmaras)); e iluminação de alta potência por recurso a uma folha de laser ($\lambda=532\text{nm}$). Para detalhes adicionais sobre a instalação, a configuração experimental e sobre o sistema de aquisição de imagem e respetivas componentes bem como acerca do procedimento para extração das variáveis de interesse consultar Bento et al. (2017) e Amaral (2017).

3. ESTIMATIVA 'LOCAL' DO HIDROGRAMA EFLUENTE DA BRECHA

3.1 Enquadramento

O caudal efluente de uma brecha de área A é dado por:

$$Q(x_0, t) = \int_{A(x_0, t)} \mathbf{u}(x, y, z, t) \cdot \mathbf{n}(x, y, z) dS \quad (1)$$

onde x_0 = coordenada do centroíde da secção da brecha; \mathbf{u} = distribuição de velocidades na secção da brecha; \mathbf{n} = vetor unitário normal à secção da brecha; x, y, z = três coordenadas espaciais ortogonais que mapeiam a secção da brecha no espaço \mathbb{R}^3 ; e t = instante temporal.

Como o escoamento é variável, o caudal efluente e a área da brecha variam no tempo e no espaço (*i.e.* são funções do local específico x_0 onde são avaliados). Portanto, para uma secção x_0 convencionalizada, $Q(x_0)$ define o hidrograma efluente da brecha (HEB). Com base na equação (1) o HEB é determinado como o produto da velocidade normal à secção transversal da brecha (u_n) e a área correspondente da brecha (A_{brecha}), ambas caracterizadas neste trabalho por métodos não intrusivos, baseados em métodos de pós-processamento de imagem. A instrumentação requerida para aplicação destes métodos é apresentada em 3.2. A área da brecha foi determinada por dois métodos distintos (A and B – §3.3) e o campo de velocidades superficiais foi obtido pela aplicação de um algoritmo de *large-scale particle image velocimetry* (LSPIV – §3.4). As estimativas A e B do HEB e a respetiva comparação com as estimativas clássicas são apresentadas em 3.5.

3.2 Instrumentação necessária e disposição adotada

Para caracterizar as variáveis necessárias à aplicação da nova estimativa do HEB foram usadas uma folha de laser (Figura 2, (a), (b)), partículas de esferovite uniformemente distribuídas na superfície do escoamento e duas câmaras de alta velocidade (CAV), uma colocada a montante da barragem, a monitorizar a evolução geométrica da brecha em profundidade (Photonfocus – Figura 2, (c), (d)) e outra colocada de topo, a monitorizar o alargamento temporal da brecha e os deslocamentos das partículas de esferovite ao longo do tempo (Mikrotron – Figura 2, (e), (f)), dispostas como apresentado na Figura 3.

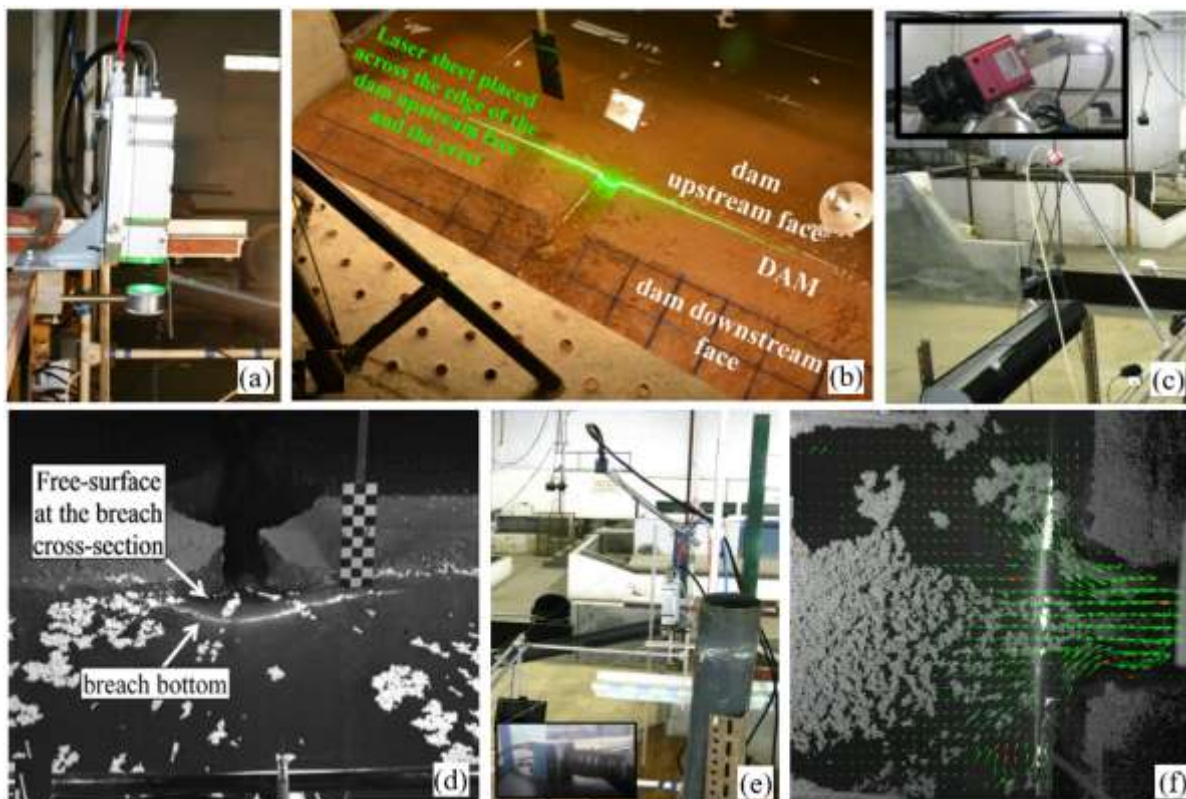


Figura 2. (a) laser acoplado a lente cilíndrica (criação de folha de laser); (b) projeção da folha de laser na barragem (marca secção da brecha); (c) posicionamento da CAV montante (Photonfocus); (d) imagem adquirida com a Photonfocus; (e) posicionamento da CAV de topo (Mikrotron); (f) imagem adquirida com a Mikrotron; representação de campo de velocidades superficial (LSPIV)

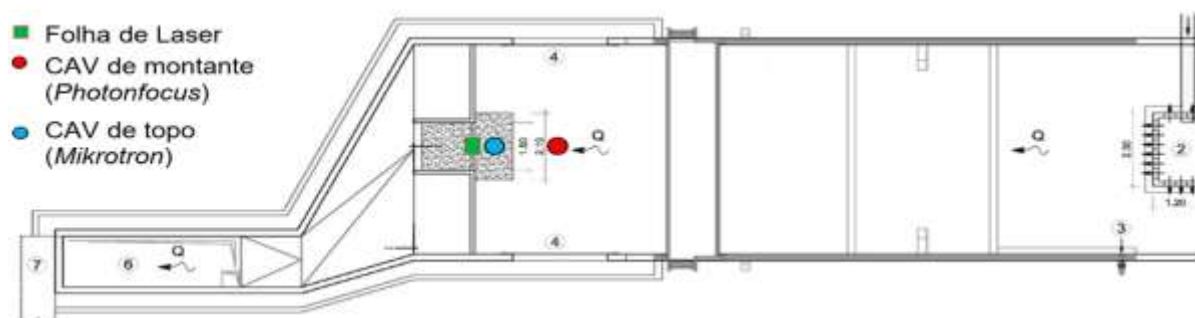


Figura 3. Disposição da instrumentação requerida para aplicação da nova estimativa do HEB

3.3 Determinação da área da brecha

A área da brecha determinada pelos dois métodos propostos (A e B) é considerada vertical por se basear num plano definido pela projeção vertical da folha de laser:

- **Método A:** a secção da brecha corresponde à interseção do plano da folha de laser com a parte submersa da barragem e com a superfície do escoamento; a área da brecha $A(t)$ corresponde ao plano vertical localizado entre os feixes do laser projetados nas interfaces referidas; escolheu-se para secção de referência da

brecha, a secção inicial do coroamento (Figura 2, (b)); a Figura 4, (a) ilustra a definição desta área;

- **Método B:** pressupõe a existência de uma linha de crista da brecha curvilínea com elevação aproximadamente constante, aproximadamente em forma de rim, separando a zona não perturbada do escoamento da zona inclinada onde este se encaminha para o canal da brecha; assumindo que a linha submersa do coroamento da brecha tem elevação constante, como representado na Figura 4, (b) (*Plan view*), a tracejado, a sua posição pode ser determinada pela intersecção do plano vertical da folha de laser com a barragem conforme ilustrado na Figura 4, (b); a profundidade do escoamento é determinada por um raciocínio semelhante ao apresentado anteriormente.

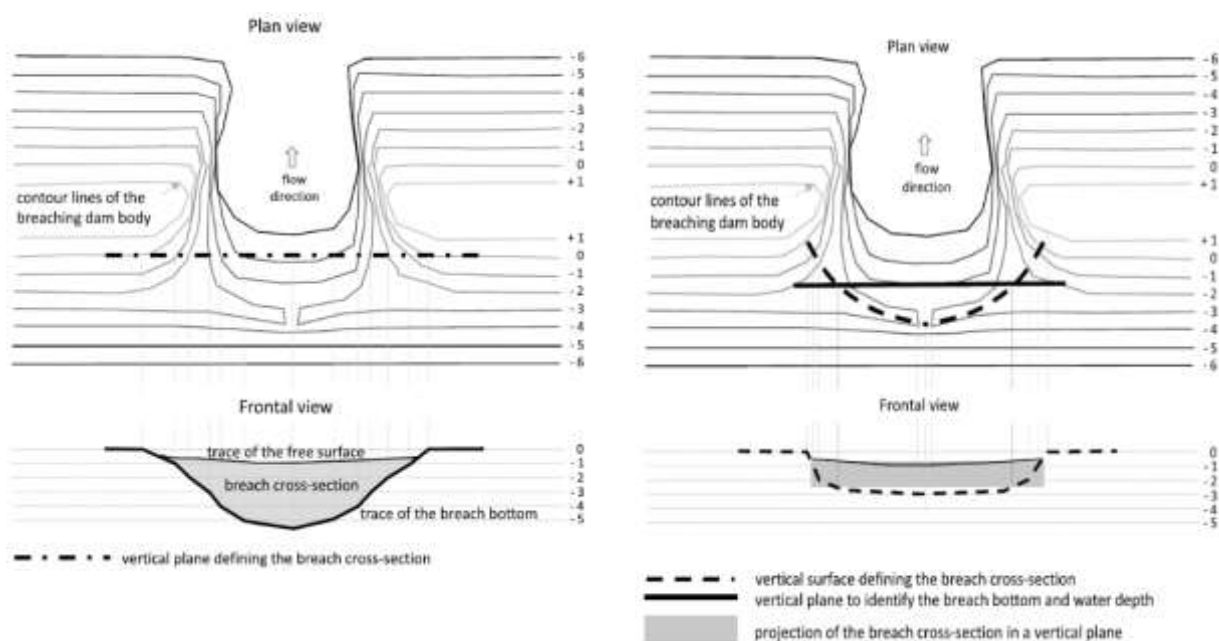


Figura 4. Definição da área da brecha. (a) Método A; (b) Método B

Mais detalhes sobre os métodos de pós-processamento de imagem adotados na extração automática a área da brecha das imagens das CAV através dos Métodos A e B é apresentada em Bento et al. (2017) e Amaral (2017).

3.4 Caracterização do campo de velocidades superficiais junto à brecha através de Large Scale Particles Image Velocimetry (LSPIV)

O método de LSPIV é uma técnica de deteção remota baseada em análise de imagem de cariz não intrusivo e pode ser utilizado para medições da velocidade superficial do escoamento numa vasta gama de condições de escoamento (Muste et al., 2008). Na presença de uma quantidade razoável de 'seeding' (partículas de esferovite) uniformemente distribuído, a opção pelo método de LSPIV é feita porque este introduz perturbações reduzidas no escoamento e permite uma resolução espacial adequada dos vetores de

velocidade. Este foi assim o método utilizado na caracterização dos campos de velocidade superficial junto da brecha neste trabalho.

As imagens de base para aplicação do LSPIV (adquiridas com a CAV de topo - Mikrotron) foram filtradas para enaltecimento da qualidade, nomeadamente para aumento do contraste, eliminação de ruído e remoção de picos (Raffel et al., 2007). Após este tratamento, os campos de velocidade junto à brecha foram obtidos com o software de uso livre PIVlab (Thielicke and Stamhuis, 2014) seguindo os passos principais ilustrados na Figura 5.

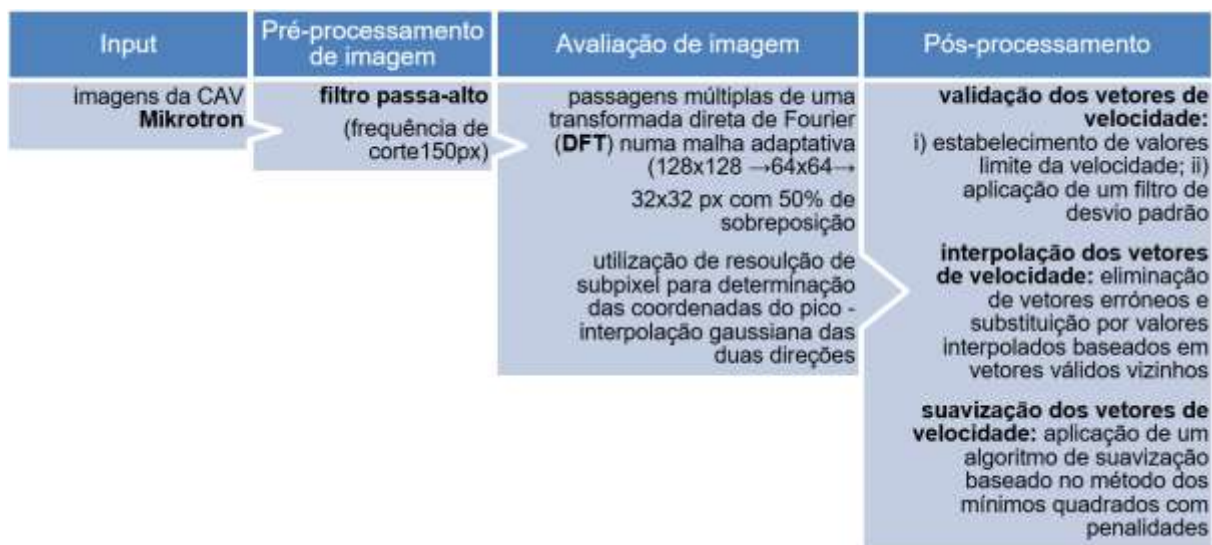


Figura 5. Passos principais do LSPIV adotados na aplicação do software PIVlab

Os mapas de velocidade em unidades métricas foram obtidos por recurso ao seguinte processo de calibração das imagens de base (Figura 6, (a)-(c)): 1) colocar uma placa em xadrez de dimensões conhecidas (células de 6x6cm) a várias alturas (desde o coroamento da barragem até à sua base) previamente à realização do ensaio; 2) reconstruir a posição da superfície livre do escoamento no interior do volume de controlo ao longo do tempo (Figura 6, (d)) por forma a contemplar as variações de distância entre a câmara e a superfície e permitindo relacionar as imagens adquiridas num dado instante com a imagem da placa de calibração colocada à cota correspondente. Este passo 2 foi realizado com base nos dados do nível de água sobre a brecha, extraídos através de métodos de pós-processamento das imagens adquiridas com a CAV de montante (Photonfocus) e nos dados dos níveis da superfície livre adquiridos com sete sondas de nível acústicas posicionadas em torno da brecha.

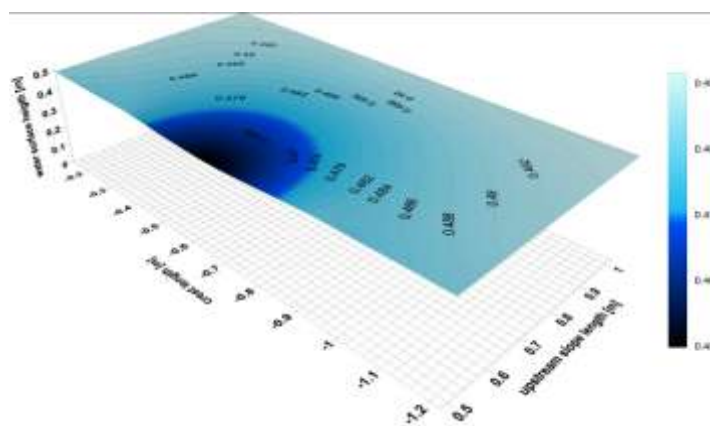
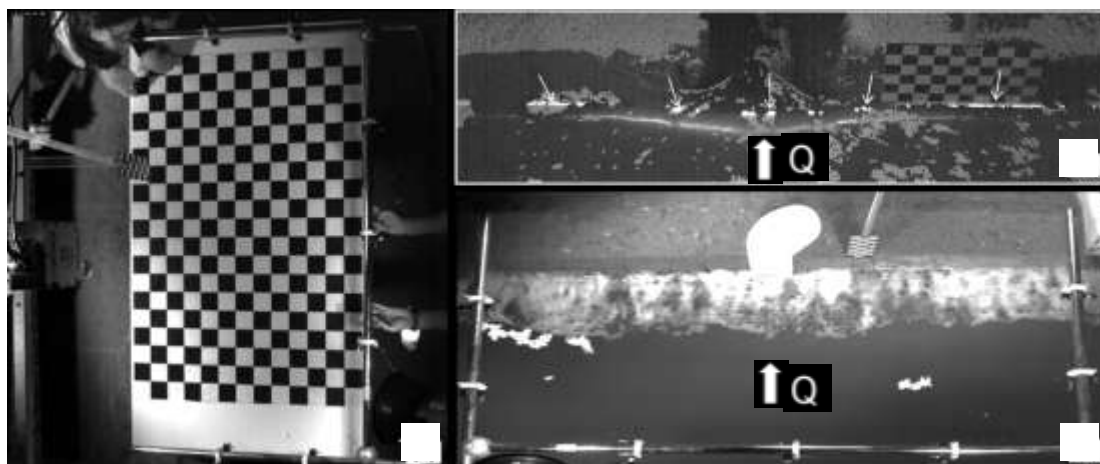


Figura 6. Calibração das imagens de base do LSPIV. (a) Placa de calibração; (b) Níveis de água sobre a brecha; (c) Posição de aquisição de níveis ao redor da brecha; (d) Superfície do escoamento no interior do domínio de análise (zona a azul escuro representa o local da brecha)

Na Figura 7 apresenta-se um exemplo de cálculo de um mapa de velocidades ilustrando-se a imagem de base com a definição do domínio de cálculo, o mapa de velocidades calculado com o software PIVlab (com a exclusão das áreas com pouco 'seeding' ou com reflexões de luz) e o mapa de velocidade final, convertido para unidades métricas após calibração e interpolação para determinação dos vetores nas áreas previamente excluídas. A velocidade média a considerar na determinação do HEB através da aplicação da Eq (1) corresponde à média das velocidades perpendiculares à linha de definição da brecha em planta nos métodos A e B (área transversal e área radial, respetivamente).

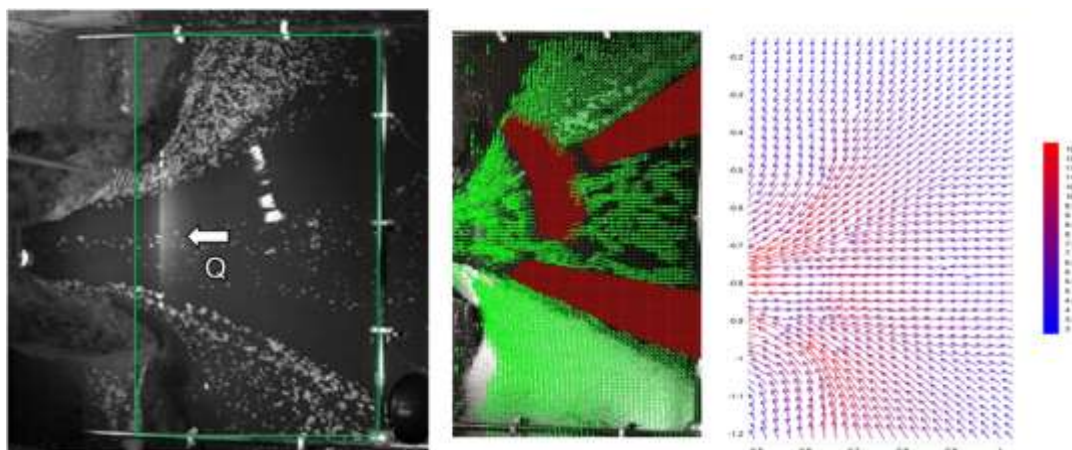


Figura 7. Aplicação do método de LSPIV. (a) definição do domínio de cálculo (linha verde); (b) vetores de velocidade calculados; (c) vetores de velocidade finais (calibrados e interpolados)

3.5 Resultados e comparação com as estimativas tradicionais do HEB

Na Figura 8 apresentam-se as estimativas do HEB baseadas em métodos clássicos (linhas contínuas a preto e cinzento) e baseadas nos métodos locais desenvolvidos no presente estudo (Métodos A e B, linhas a tracejado preto, grosso e fino, respetivamente). A linha a traço ponto vermelha assinala o instante de ocorrência de um EEG.

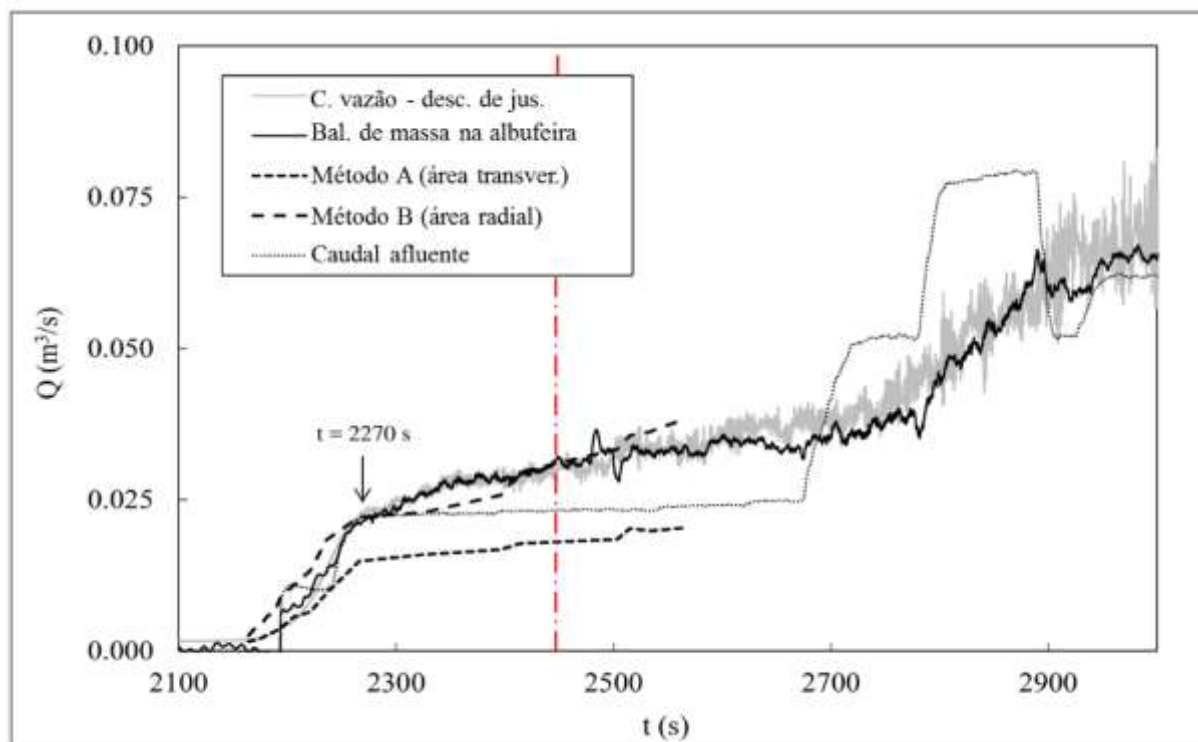


Figura 8. Estimativas do HEB. Estimativas clássicas e locais (métodos A e B). Linha a traço ponto vermelha – instante de ocorrência de EEG

Na Figura 8 observa-se que as estimativas locais A e B são concordantes entre si e que apresentam um andamento semelhante às estimativas *'não locais'*. A estimativa local B, em particular, é concordante com as estimativas *'não locais'*, tanto em termos de taxas de crescimento como em termos de valores. Esta concordância permite considerar como válidos os métodos locais de estimação do caudal aqui desenvolvidos.

Ambas as estimativas, *'não locais'* (clássicas) e locais (métodos A e B), foram concordantes na evolução contínua do caudal durante a evolução descontínua da brecha, *i.e.*, durante a ocorrência de EEG. Daqui se conclui que o caudal está a ser efetivamente bem medido, porque foi medido de duas formas distintas (estimativas *'não locais'* e *'locais'*) e ambas dão a mesma conclusão, ou seja: a não ocorrência de aumentos instantâneos no caudal efluente durante o destacamento de massas de solo do corpo da barragem não é uma simplificação das estimativas clássicas, mas sim um facto: *a erosão descontínua não causa descontinuidades no caudal (picos súbitos)*.

4. ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE A HIDRODINÂMICA DO ESCOAMENTO E A EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DA BRECHA

4.1 Variáveis monitorizadas, forma de medição e instrumentação adicional necessária

Na secção 3 ficou demonstrado que o caudal efluente está, de facto, a ser bem medido e que as erosões descontínuas na brecha, devido aos EEG, não causam descontinuidades no caudal. Como esta observação é contraintuitiva, motiva a seguinte questão: ‘Se o HEB está a ser bem medido, porque é que as erosões descontínuas não causam descontinuidades no caudal?’ A presente secção 4 responde a esta questão.

Foram monitorizadas as seguintes variáveis:

1. geometria do escoamento contraído (largura do escoamento não separado – linha a tracejado preto na Figura 9 – medida sobre a folha de laser);
2. campo cinemático junto aos EEG (velocidades em locais estratégicos – junto à queda dos blocos) - estimado com base em *Particle Tracking Velocimetry* (PTV);
3. local onde os EEG ocorrem, dimensão e porque é que ocorrem → caracterização da forma da erosão por baixo da brecha (Figura 10).

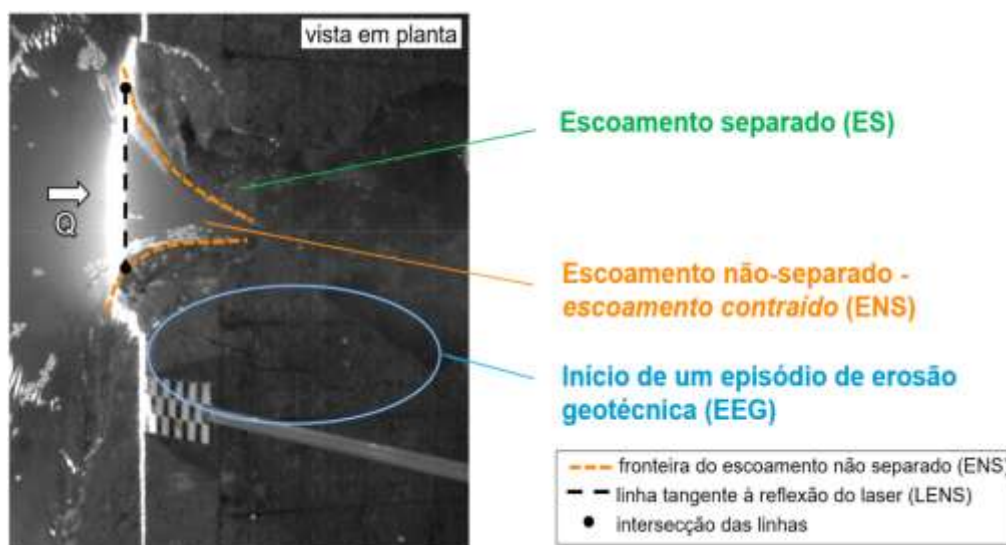


Figura 9. Estrutura do escoamento e morfologia do canal sobre a brecha

Os campos de velocidade obtidos por recurso ao método de LSPIV apresentado em 3.4 revelaram-se apropriados para efeitos das estimativas locais do HEB (§3), *i.e.* para avaliar as tendências do escoamento (velocidade média do escoamento na secção da brecha), mas não possuíam o rigor requerido para análises finas, como as necessárias nesta secção 4. Assim, o campo de velocidades foi analisado localmente, junto aos EEG, em áreas criteriosamente seleccionadas, por recurso à técnica de *Particle tracking Velocimetry* (PTV). Esta técnica, embora também seja um método ótico não intrusivo de visualização do escoamento, oferece uma visão mais detalhada da velocidade das partículas do que a obtida através de correlação cruzada baseada em PIV. Efetivamente, Orendorff et al. (2011) já havia observado que as velocidades estimadas com base em PTV aumentavam a

quantidade de informação fenomenológica que poderia ser extraída de um teste de rotura de barragens de aterro.

Para medir estas variáveis, para além da instrumentação apresentada em 3.2 foi ainda necessário adicionar um sensor Kinect (Microsoft), um dispositivo de deteção de movimento, composto por 2 câmaras internas (uma RGB e outra IR - gama dos infravermelhos). O sensor Kinect foi utilizado neste estudo na reconstrução de superfícies 3D, nomeadamente, na caracterização da evolução temporal da morfologia da brecha. Tal foi conseguido através de um varrimento da totalidade da barragem em rotura, nos instantes analisados, colocando o sensor em vários pontos focais, visualizando, para além da área a caracterizar, pontos alvo de coordenadas conhecidas para efeitos de alinhamento e georreferenciação (Figura 10).

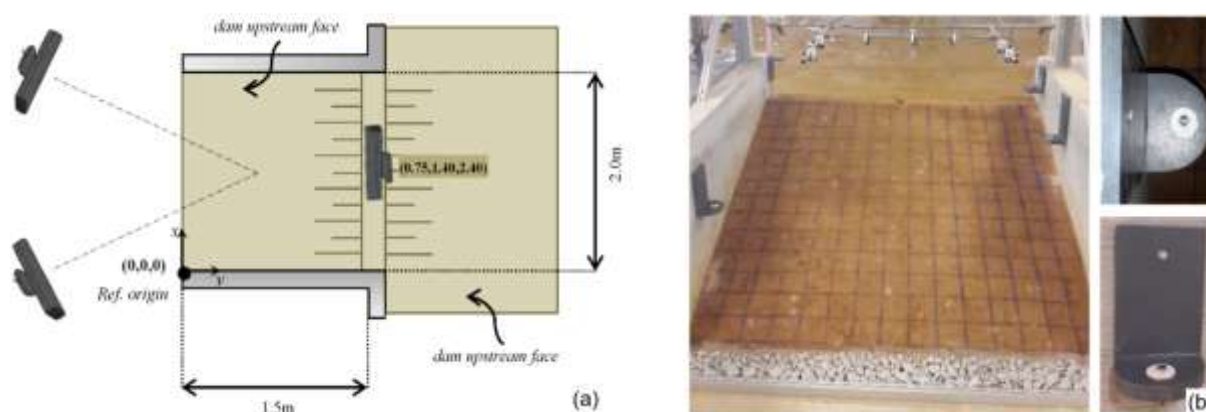


Figura 10. Disposição do Kinect sensor. (a) posições focais adotadas no varrimento da área a caracterizar; (b) posição dos alvos de coordenadas conhecidas

4.2 Avaliação do impacto dos EEG

A avaliação do impacto da ocorrência de EEG no escoamento local sobre brecha foi efetuada com base num modelo conceptual dependente da localização dos EEG em relação à posição da secção de controlo hidráulico (SCH). Assim, avaliou-se quando se dava a afetação do campo cinemático e da largura do escoamento não-separado (aumento do espaço ocupado pelo caudal efluente da brecha) – Figura 11.

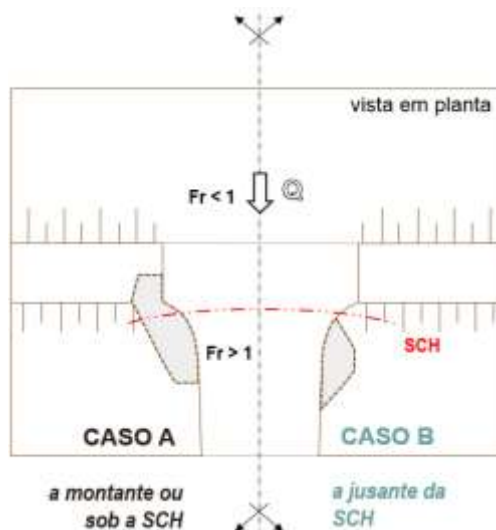
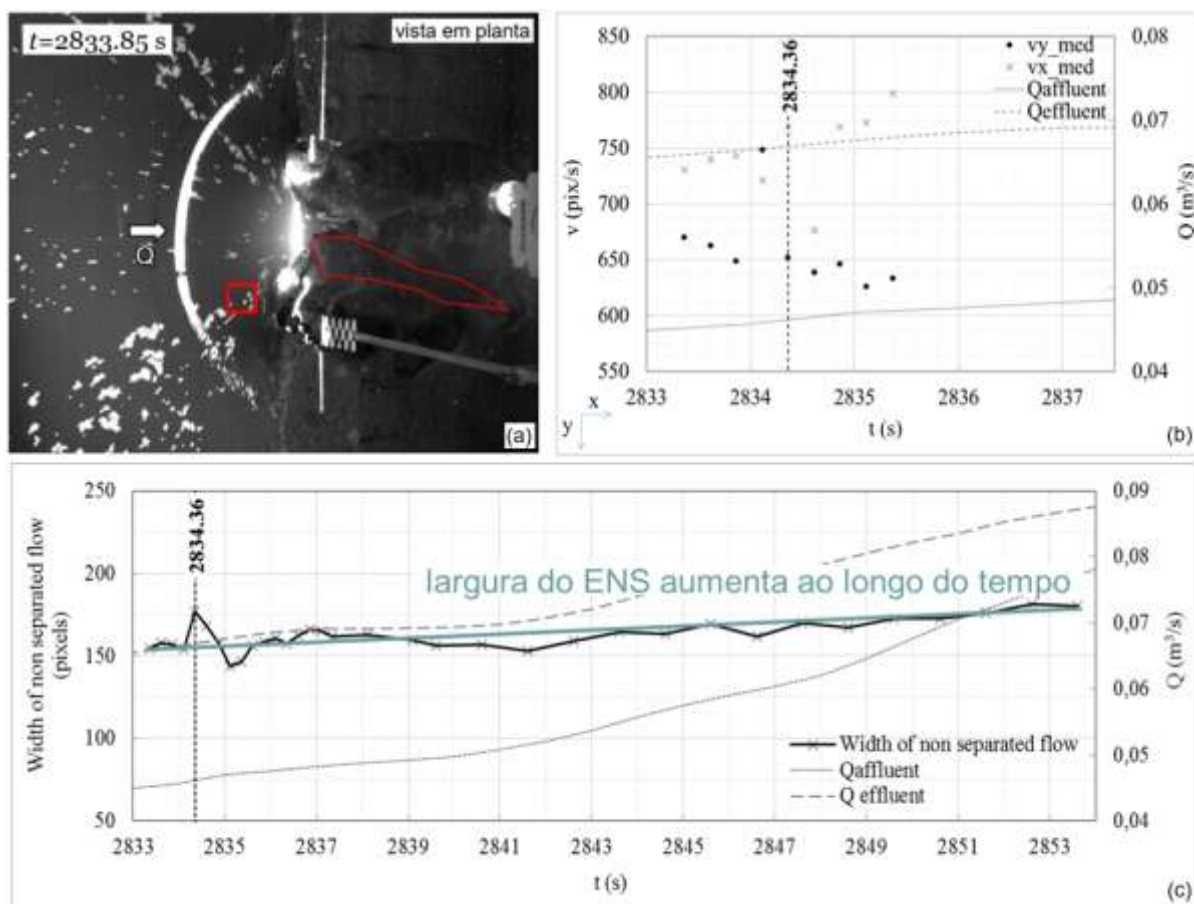


Figura 11. Modelo conceitual para avaliação do impacto dos EEG na hidrodinâmica do escoamento local (campo cinemático e largura do escoamento não separado)

Nas Figuras 12 e 13 ilustram duas situações diferentes (Caso A e B). Para cada caso apresentam-se uma imagem de topo (obtida com a CAV Mikrotron) com a respetiva localização das áreas de cálculo das velocidades com PTV (quadrado vermelho na imagem a)), as variações temporais dos vetores de velocidade e da largura do ENS (antes, durante e após o EEG – verticais a tracejado nas imagens (b) e (c), respetivamente).

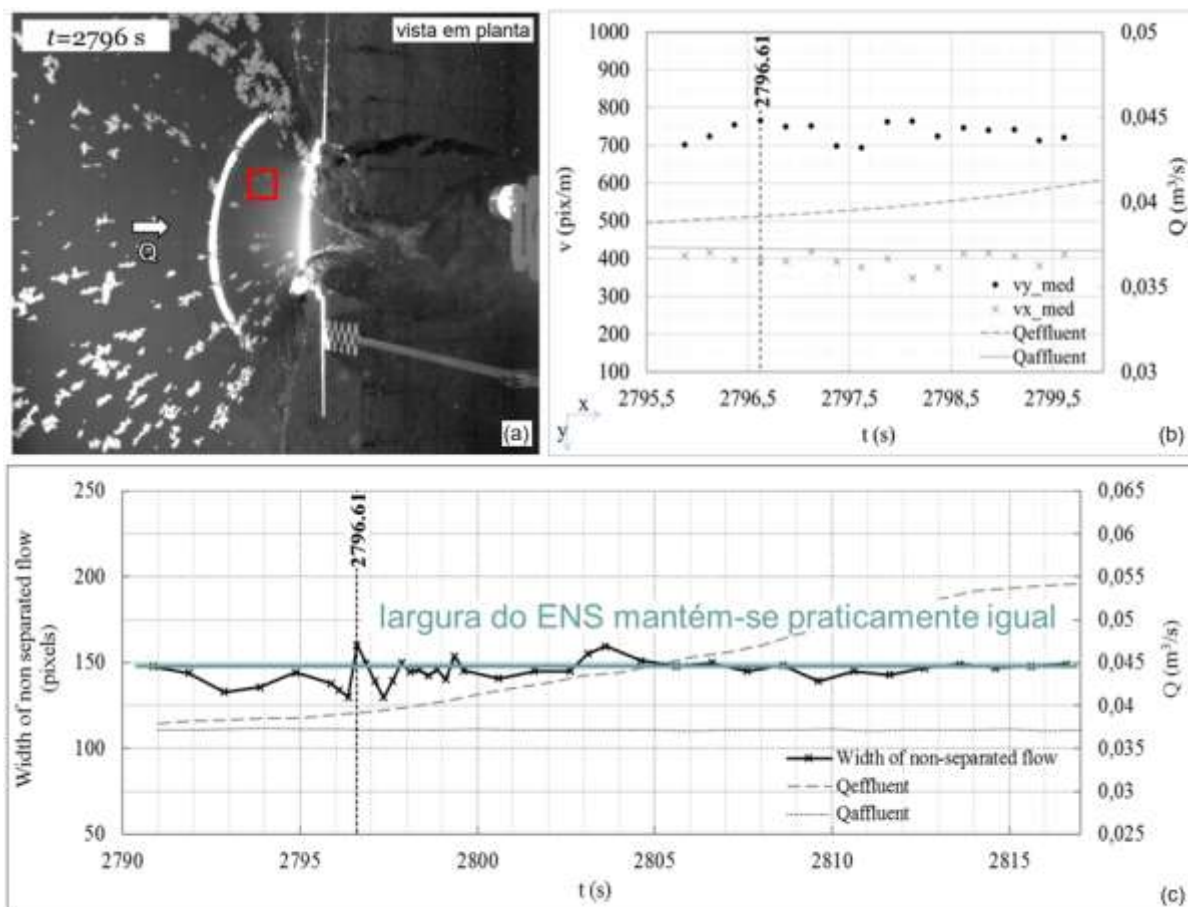
No **Caso A** observou-se que o EEG teve impacto na cinemática do escoamento embora o caudal efluente da brecha não tenha sido diretamente afetado pelo alargamento súbito da brecha devido a esta ocorrência (Figura 12, (b)). Já no **Caso B** observou-se que a velocidade longitudinal (v_x) não sofreu alterações e que a velocidade lateral (v_y) sofreu apenas pequenas oscilações que não se associam ao EEG (Figura 13, (b)), sendo que em geral, se conclui que, neste **Caso B** não houve impacto na cinemática do escoamento.

Quanto à análise da variação temporal da largura do ENS após a ocorrência de episódios de EEG, em ambos os casos A e B, observaram-se oscilações desta largura sendo que a mesma veio a aumentar gradualmente no Caso A (Figuras 12 e 13, (c)). Este aumento gradual foi atribuído a uma erosão hidráulica gradual das singularidades originadas pelos EEG.



v_x – velocidade longitudinal; v_y – velocidade lateral

Figura 12. CASO A. Avaliação do impacto dos EEG (a) EEG analisado com quadrado vermelho a ilustrar a área de aplicação do PTV. Variações temporais de: (b) velocidade no interior do quadrado vermelho; (c) largura do ENS



v_x – velocidade longitudinal; v_y – velocidade lateral

Figura 13. CASO B. Avaliação do impacto dos EEG (a) EEG analisado com quadrado vermelho a ilustrar a área de aplicação do PTV. Variações temporais de: (b) velocidade no interior do quadrado vermelho; (c) largura do ENS

4.3 Reconstrução 3D da barragem em rotura por recurso ao Kinect sensor

Conforme referido em 4.1, o sensor Kinect foi utilizado neste estudo para reconstruir superfícies 3D da barragem em rotura. A Figura 14, (a) apresenta uma vista frontal da barragem numa fase de pleno desenvolvimento da rotura, ilustrando a existência de duas cavidades de erosão. A Figura 14, (b) apresenta uma vista em planta da nuvem de pontos construída com as imagens de profundidade adquiridas com o sensor nas diversas posições do varrimento (Figura 10, (a)) e quatro perfis transversais, provando efetivamente a existência destas cavidades.

A reconstrução da superfície 3D da barragem em rotura permitiu observar que a evolução da rotura dos aterros ensaiados se deu predominantemente por **erosão ravinosa com infraescavação**, com aparecimento ocasional de cavidades laterais, o que está de acordo com os processos de rotura de barragens de aterro homogéneas reais (maioritariamente com frações finas elevadas como as barragens de aterro ensaiadas neste estudo).

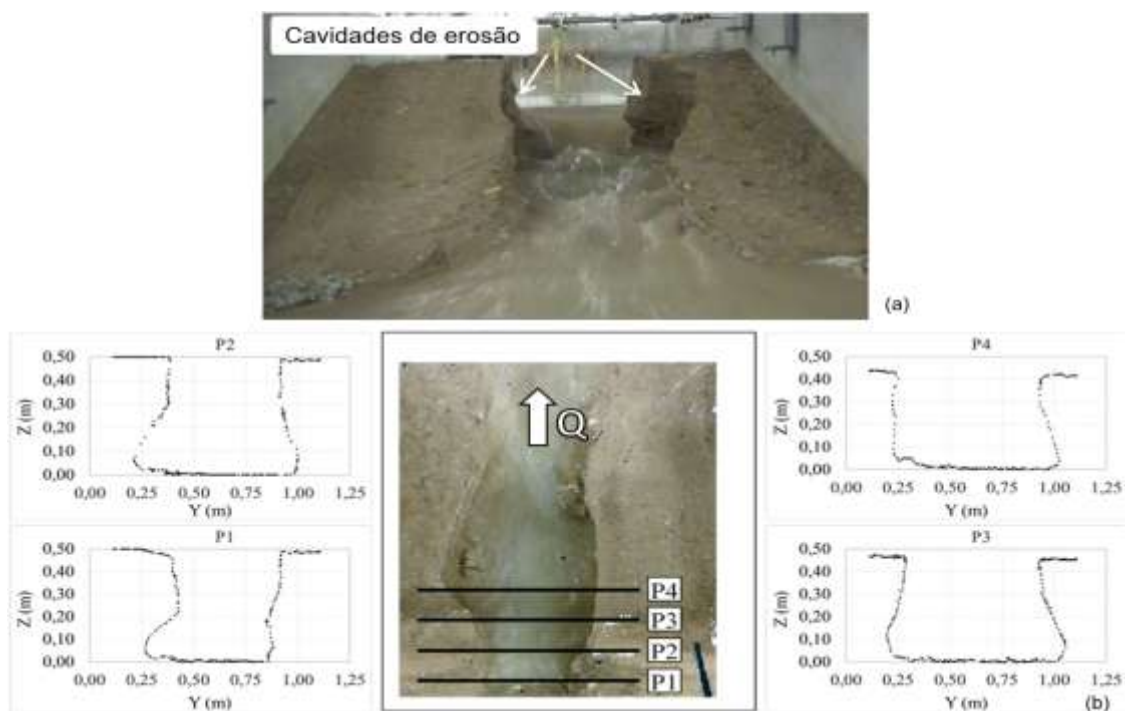


Figura 14. Reconstrução da barragem em rotura com o Kinect sensor. (a) vista frontal do paramento de jusante da barragem com 2 cavidades de erosão; (b) vista em planta da barragem (nuvem de pontos) com sinalização do local dos perfis transversais P1 a P4

5. CONCLUSÕES

A realização deste estudo permitiu concluir que ambas as estimativas, ‘*não locais*’ (clássicas) e locais (métodos A e B) são métodos confiáveis para a medição do caudal efluente de uma barragem em rotura porque são concordantes, tanto em taxas de aumento do caudal como em termos quantitativos. Como ambas não apresentaram aumentos instantâneos no caudal efluente durante o destacamento de massas de solo do corpo da barragem (EEG), provou-se que a *erosão descontínua não causa descontinuidades no caudal (picos súbitos)*. Por ser contraintuitivo, indagou-se o que motiva este acontecimento.

O estudo da relação entre a hidrodinâmica do escoamento e a evolução morfológica da brecha revelou que os EEG ocorrem devido à erosão por infraescavação e que estes acionam um movimento oscilatório do escoamento contraído (ENS) que não impõe um aumento súbito do caudal porque ocorrem numa zona do coroamento que não condiciona este escoamento. Assim, concluiu-se que o mecanismo de aumento do caudal é sempre gradual para este tipo de instabilidades geotécnicas (EEG) porque se dá por erosão gradual (hidráulica) das singularidades originadas pela queda dos blocos e que apenas a longo prazo o escoamento irá preencher o potencial aberto pelos EEG. Daqui decorre que, não se deve assumir que o caudal efluente de uma barragem em rotura pode ser descrito por uma lei de vazão de um descarregador ($Q = CA\sqrt{2gH}$) porque a área da brecha não é um parâmetro meramente geométrico mas sim um parâmetro indexado à hidrodinâmica do escoamento.



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
NOVOS
DESAFIOS

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Projeto FEDER, no âmbito do Programa COMPETE e pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), nomeadamente pelo Projeto RECI/ECM-HID/0371/2012 e pelas bolsas de doutoramento SFRH/BD /47694/2008 e PD/BD/127801/2016.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaral, S. (2017). Experiments on failure by overtopping of earth dams Characterization of the breach evolution process and the discharge hydrograph. PhD Thesis. IST, UL
- ASCE Task Committee on Dam/Levee breaching. (2011). Earthen embankment breaching. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(12), 1549–1564.
- Bento, A.M., Amaral, S., Viseu, T., Cardoso, R., & Ferreira, R.M.L. (2017). Direct Estimate of the Breach Hydrograph of an Overtopped Earth Dam. *Jour. of Hydr. Eng.*, 143(6), 6017004.
- Cestero, J.A., Imran, J., & Chaudhry, M.H. (2015). Experimental investigation of the effects of soil properties on levee breach by overtopping. *Jour. of Hydr. Eng.*, 141(4), 4014085.
- Frank, P.J. (2016). *Hydraulics of spatial dike breaches*. ETH Zurich.
- ICOLD (2003). In International Commission on Large Dams - Bulletin on Risk Assessment in Dam Safety Management (ICOLD).
- Muste, M., Fujita, I., & Hauet, A. (2008). Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Res. Res.*, 44(4).
- Orendorff, B., Rennie, C.D., & Nistor, I. (2011). Using PTV through an embankment breach channel. *Journal of Hydro-Envir. Res.*, 5(4), 277–287.
- Raffel, M., Willert, C. E., & Kompenhans, J. (2007). *Particle image velocimetry: a practical guide*. Springer Science & Business Media.
- Schmocker, L., & Hager, W. H. (2012). Plane dike-breach due to overtopping: Effects of sediment, dike height and discharge. *Jour. of Hydr. Res.*, 50(6), 576–586.
- Thielicke, W., & Stamhuis, E. (2014). PIVlab—Towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB. *Jour. of Open Res. Soft.*, 2(1).
- Tingsanchali, T., & Chinnarasri, C. (2001). Numerical modelling of dam failure due to flow overtopping. *Hydrolog. Scienc. Jour.*, 46(1), 113–130.
- Van Emelen, S., Zech, Y., Soares-Fraza, S., & others. (2015). Breaching in sand embankments: Flow-soil interaction. *La Houille Blanche*. 6, 21–28.
- Wahl, T. L. (2004). Uncertainty of Predictions of Embankment Dam Breach Parameters. *Jour. of Hydr. Eng.*, 130(5), 389–397.
- Walder, J.S., Iverson, R. M., Godt, J.W., Logan, M., & Solovitz, S. A. (2015). Controls on the breach geometry and flood hydrograph during overtopping of noncohesive earthen dams. *Water Res. Res.*, 51(8), 6701–6724.
- Yochum, S. E., Goertz, L.A., & Jones, P.H. (2008). Case study of the big bay dam failure: accuracy and comparison of breach predictions. *Jour. of Hydr. Eng.*, 134(9), 1285–1293.
- Zhu, Y., Visser, P. J., Vrijling, J. K., & Wang, G. (2011). Experimental investigation on breaching of embankments. *Science China Technological Sciences*, 54(1), 148–155.