

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM ESCOAMENTO DE RUPTURA DE BARRAGEM Experimental Analysis of a Dam-Break Flow

RUI ALEIXO ⁽¹⁾, SANDRA SOARES-FRAZÃO ⁽²⁾ e YVES ZECH ⁽³⁾

⁽¹⁾ *Estudante de Doutoramento, Institute of Mechanics Materials and Civil Engineering – Université Catholique de Louvain, Place du Levant 1, B-1348 Belgique, rui.aleixo@student.uclouvain.be*

⁽²⁾ *Fonds de la Recherche Scientifique-FNRS, Institute of Mechanics Materials and Civil Engineering – Université Catholique de Louvain, Place du Levant 1, B-1348 Belgique, sandra.soares-fraza@uclouvain.be*

⁽³⁾ *Professor, Institute of Mechanics Materials and Civil Engineering – Université Catholique de Louvain, Place du Levant 1, B-1348 Belgique, yves.zech@uclouvain.be*

Resumo

Um escoamento associado à uma ruptura de uma barragem (dam-break) é um exemplo extremo de um escoamento transitório. A variedade de escalas temporais e espaciais presentes neste escoamento contribuem para a complexidade do fenómeno. A complexidade aumenta se, ao invés de um leito rígido, se considerar um leito móvel constituído por sedimentos. Até recentemente a análise experimental deste tipo de escoamento limitava-se à determinação de grandezas como a celeridade de propagação da onda e a evolução temporal da superfície livre. A determinação do campo de velocidades do escoamento, por exemplo, ficava fora do alcance das técnicas de medição então existentes. Recentemente, com a generalização de técnicas de medição de velocidade baseadas em aquisição e processamento de imagem, como a Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV) a determinação do campo de velocidades tornou-se possível. Neste artigo apresentam-se os resultados de medição do campo de velocidades num escoamento de ruptura de barragem sobre um leito móvel de sedimentos recorrendo à técnica PIV. As limitações da técnica PIV para este tipo de escoamento são debatidas e a sua aplicação à determinação do campo de velocidades dos sedimentos é discutida.

Palavras-chave: Campo de velocidades, PIV, leito móvel.

Abstract

A dam-break flow is an extreme example of a severe transient flow. The variety of time and spatial scales involved in this flow contribute for the complexity of this phenomenon. Complexity increases if, instead of a rigid bed, ones consider a movable bed of sediments. Until recently the experimental analysis of this kind of flow was limited to the measurement of variables such as the wave celerity and water elevation evolution. The flow's velocity field was out of reach for the existing measurement techniques. Recently with the generalization of image-based measurement techniques, such as the Particle Image Velocimetry (PIV), the determination of the dam-break velocity field became possible. In this paper the obtained results for the velocity field of a dam-break over movable sediment bed are presented using PIV are presented. The PIV limitations regarding this type of flow are presented is also discussed.

Keywords: Velocity field, PIV, movable bed.

1. Introdução

Um escoamento associado à ruptura de uma barragem é um escoamento fortemente transiente que resulta da libertação súbita de uma enorme massa de água retida, por exemplo, numa albufeira de uma barragem. Este escoamento tem sido estudado desde os finais do século XIX, nomeadamente por Ritter (1892), que propôs uma solução analítica para a propagação da onda de inundação sobre um leito fixo, aqui designado de caso hidrodinâmico puro. Dressler (1954) e Witham (1955) usaram a teoria da camada limite para obterem soluções mais realistas para a propagação da frente da onda de inundação considerando, por exemplo, a existência de um coeficiente de atrito no fundo.

Apesar de serem mais realistas que a solução de Ritter, por considerarem o efeito do atrito, ficam ainda muito aquém do desejável.

Em aplicações reais, onde o leito é sedimentar, irregular e com vários acidentes geomorfológicos a complexidade do fenómeno é acrescida pela presença de fenómenos de transporte e deposição de sedimentos.

A interacção entre a água e o leito sedimentar é complexa, ainda para mais quando se considera um regime fortemente transitório.

Para melhor compreensão da física do problema é possível recorrer a experiências de laboratório, nas quais um escoamento de ruptura de barragem é processado sobre um leito de sedimentos.

Neste artigo apresentam-se alguns resultados experimentais obtidos em laboratório relativos ao escoamento de ruptura de barragem sobre um leito sedimentar.

Considere-se o esquema de uma barragem como o indicado na Figura 1, onde um reservatório de água de altura inicial h_0 é mantido por uma barragem situada em $x = 0$.

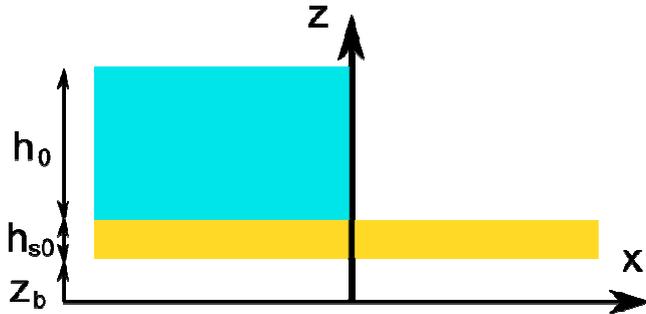


Figura 1. Esquema de um modelo simplificado de uma barragem. x designa a abcissa e z a ordenada. A barragem é considerada como estando em $x = 0$.

Pressupõe-se a existência de um leito de sedimentos de altura h_{s0} sobre um fundo fixo situado ao nível z_b . Considera-se que $z = 0$ corresponde o leito inicial não perturbado. Admite-se que no instante $t = 0$ a barragem colapsa instantaneamente. O volume de água irá propagar-se para jusante erodindo e transportando uma porção do leito.

Neste escoamento gravítico as variáveis principais serão o nível inicial no reservatório, h_0 e a aceleração da gravidade, g . As escalas características de tempo e velocidade do escoamento de ruptura de barragem são dadas respectivamente pelas seguintes expressões:

$$t_0 = \sqrt{\frac{h_0}{g}} \quad [1]$$

$$c_0 = \sqrt{gh_0} \quad [2]$$

Com estas variáveis introduzem-se os seguintes parâmetros adimensionais para o tempo, T , a abcissa X , e a ordenada, Z :

$$T = \frac{t}{t_0}, \quad X = \frac{x}{h_0}, \quad Z = \frac{z}{h_0} \quad [3]$$

Para as componentes do vector de velocidade, u (horizontal) e w (vertical), obtém-se,

$$U = \frac{u}{c_0}, \quad W = \frac{w}{c_0} \quad [4]$$

Para este caso há que considerar não só o campo de velocidades na fase líquida, mas também o campo de velocidades dos sedimentos. Um modelo simplificado utilizado para a descrição do escoamento da fase líquida e do leito de sedimentos é o modelo de duas camadas, Spinewine (2005) e Zech *et al.*, (2008) e ilustrado na Figura 2. Neste modelo considera-se que o escoamento pode ser dividido em duas camadas, uma para a água, h_w e outra para os sedimentos, h_s . Os perfis de velocidades da água e dos sedimentos são assumidos como constantes, embora diferentes. A assumpção de perfis de velocidade constantes tanto na camada de água como na camada de sedimentos é uma hipótese discutível. Estudos anteriores feitos separadamente para cada camada mostraram que, de acordo com Van Goethem e Villers (2000), o perfil de velocidades na camada de sedimentos afigura-se linear, enquanto na camada de água o perfil de velocidade (componente horizontal) é constante durante a sua fase inicial (Voisin e Greindl, 2007).

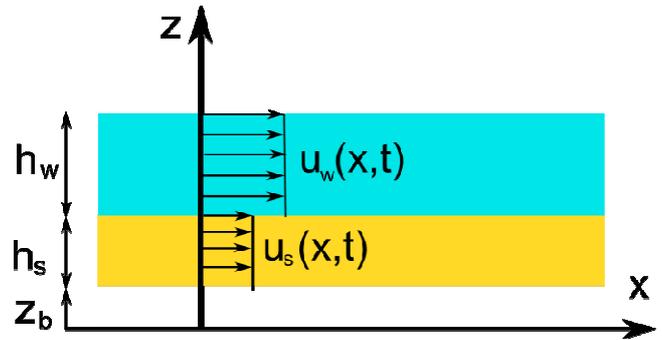


Figura 2. Esquema pertinente ao modelo de duas camadas. O escoamento é dividido em duas camadas, uma para descrever o movimento da massa de água e outra para descrever a camada de transporte.

O escoamento de ruptura de barragem é um escoamento que, sendo transiente, terá características que serão função do tempo e também do espaço. Assim, é possível dividir este escoamento consoante as características espaço-temporais do mesmo. Duas classificações possíveis são o campo próximo (*near field*) e o campo longínquo (*far-field*), sendo a primeira referente aos instantes iniciais após a ruptura da barragem, e a segunda referente aos instantes muito posteriores à ruptura da barragem. Quando considerados os instantes imediatamente após a ruptura, tais que $T < 2.5$ s, a designação campo muito próximo (*very near-field*) é também utilizada (Aleixo *et al.*, 2011). Não há limites precisos para definir o campo próximo e o campo longínquo. Uma forma de distinguir o campo próximo do campo longínquo, proposta em Aleixo *et al.*, (2011) utiliza o instante em que as hipóteses de St. Venant começam a ser válidas (linhas de corrente paralelas e distribuição de pressão hidrostática).

2. Medição do Campo de Velocidades

As características do escoamento de ruptura de barragem, nomeadamente o seu carácter transitório e a existência de uma superfície livre constituem fortes restrições às técnicas experimentais a utilizar. Técnicas como o tubo de Pitot não são adequadas porque são intrusivas e técnicas como a Anemometria Laser por efeito Doppler (LDA) embora não intrusivas ficam limitadas pelo seu carácter pontual. As técnicas susceptíveis de serem utilizadas devem assim aliar uma boa resolução espacial a uma resolução temporal adequada às diferentes escalas do fenómeno mas também possuírem a capacidade de analisarem uma secção significativa do escoamento. Estes constrangimentos abrem a porta à utilização de técnicas baseadas na aquisição e processamento de imagem. No presente caso a medição do campo de velocidades foi feita utilizando a técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas, PIV (do inglês Particle Image Velocimetry). Esta técnica de medição é baseada na aquisição de pares de imagens consecutivas de um escoamento ao qual foram adicionados pequenos traçadores (*seeding*), que serão iluminados por um laser e cujas imagens serão capturadas por um meio fotossensível, regra geral, digital. Entende-se aqui por imagens consecutivas como duas imagens separadas por um intervalo de tempo dt , considerado pequeno quando comparado com as escalas de tempo do escoamento.

Esta técnica é baseada na correlação de imagens e os seus fundamentos foram estabelecidos nos anos 80 do século XX nomeadamente por Meynart (1982), Keane e Adrian (1992) entre outros (Adrian, 2005). Uma referência bibliográfica abrangente sobre PIV é o livro de Raffel *et al.* (2007). Na Figura 3 duas imagens consecutivas do escoamento de ruptura de barragem, $dt = 1.5$ ms, são apresentadas. Saliente-se a presença dos traçadores com uma concentração significativa.

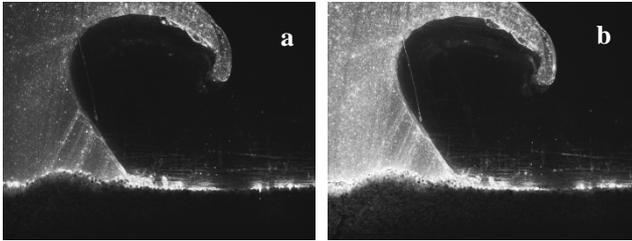


Figura 3. Duas imagens consecutivas, imagem A e imagem B, separadas por $dt = 1.5$ ms do escoamento de ruptura de barragem.

Para aplicar a correlação cruzada (*cross correlation*) o par de imagens consecutivas é dividido em pequenas janelas conforme ilustrado na Figura 4. Estas janelas designam-se de janelas de interrogação e a janela $J_i(t)$, onde um determinado padrão de traçadores é isolado, será correlacionada com a área de busca, S , centrada sobre a janela $J_i(t+dt)$, conforme ilustrado na Figura 4.

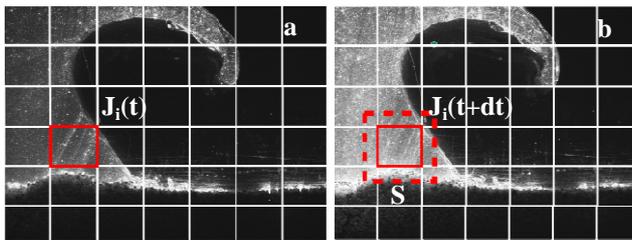


Figura 4. Divisão do par de imagens em janelas de interrogação. Na figura 4a) a indicação da janela de interrogação $J_i(t)$ e em 4b) a janela $J_i(t+dt)$ e da área de busca, S , a tracejado.

O resultado da operação de correlação é uma função cujo pico indica a posição na imagem b) do padrão de traçadores mais similar ao padrão de traçadores isolado pela janela $J_i(t)$ da imagem a). A posição do pico de correlação, $\Delta \bar{x}$, será a medida mais provável do deslocamento das partículas na janela $J_i(t)$. O vector velocidade associado à janela $J_i(t)$ será então dado por:

$$\bar{v}_i = \frac{\Delta \bar{x}}{dt} \quad [5]$$

Aplicando o mesmo procedimento às restantes janelas de interrogação obtém-se o campo de velocidades do escoamento. Actualmente os algoritmos de PIV recorrem à deformação das janelas de interrogação para, por exemplo, serem capazes de descrever os gradientes locais de velocidade.

No presente caso utilizou-se um processamento multi-passo começando com janelas de interrogação de 256×256 pixels e terminando em janelas de 32×32 pixels. Utilizou-se ainda uma sobreposição de 75%, resultando numa resolução espacial de cerca de 2 mm.

Uma questão importante para a determinação da velocidade com exactidão suficiente é a determinação da posição do pico de correlação, a qual deve ser feita com resolução sub-pixel, isto é, com resolução inferior à unidade de medida de uma imagem (Raffel *et al.*, 2007). Por meio de um ajuste gaussiano ao pico de correlação é possível determinar com resolução sub-pixel, regra geral cerca de 0.1 pixel, a sua posição.

O algoritmo de processamento usado, Davis® 7.2 da Lavisvision implementa uma solução análoga. As imagens têm como unidades de largura e comprimento os pixels (pixel = picture element) os quais necessitam de ser convertidos em unidades físicas (metros) por meio de uma calibração adequada. No presente caso utilizou-se um alvo de calibração como ilustrado na Figura 5. Uma rotina no programa de aquisição e processamento permitiu fazer a calibração e assim obter a conversão pixels-metro. A calibração consistiu no presente caso em fazer passar pelos pontos do alvo de calibração (Figura 5) um polinómio do 3º grau. A calibração necessita de ser realizada nas mesmas condições da experiência, assim a calibração foi feita no reservatório, imediatamente antes da comporta, trasladando-se depois a câmara de forma rígida para a sua posição final.

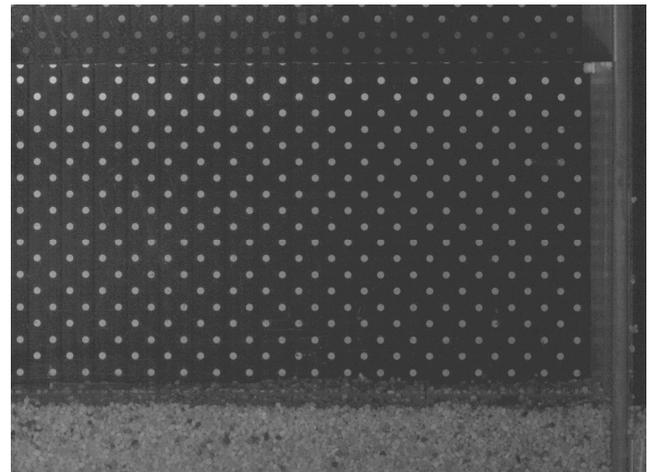


Figura 5. Alvo de calibração utilizado para a conversão de pixels em unidades físicas de distância. Os pontos são equidistantes e a distância é conhecida, a rotina de calibração faz passar um plano de calibração pelos pontos o qual permite fazer a conversão entre pixels e metros.

A necessidade de iluminar pequenos traçadores que sigam o escoamento implica a utilização de uma potente fonte de luz.

A escolha recai usualmente num laser que permite gerar dois pulsos consecutivos que, sendo canalizados para o escoamento, permitirão iluminar os traçadores. O laser pulsado é sincronizado com a câmara para que cada pulso seja coincidente com cada imagem adquirida.

Para permitir intervalos de tempo dt pequenos as câmaras são tipicamente de dupla-imagem (*double frame*) permitindo adquirir duas imagens muito próximas no tempo sobre a mesma matriz CCD (Raffel *et al.*, 2007). Este sistema de laser pulsado é uma das componentes mais dispendiosas do sistema. As características do laser e da câmara são descritas no Quadro 1.

Quadro 1. Parâmetros do PIV utilizados nas experiências.

PARÂMETROS	VALOR
DISTÂNCIA FOCAL E ABERTURA MÁXIMA DA LENTE	50mm/f1.7
RESOLUÇÃO DA CÂMARA	1.92 Mpix
ENERGIA DE CADA PULSO	30 mJ
INTERVALO DE TEMPO ENTRE PULSOS LASER	(1.0 < dt < 1.5) ms
FREQUÊNCIA DE AQUISIÇÃO NOMINAL	15 Hz

3. Metodologia Experimental

3.1. O Canal de ruptura de barragens

As experiências foram realizadas no canal de ruptura de barragens do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do Instituto de Engenharia Mecânica, Materiais e Civil (IMMC) da Université Catholique de Louvain, Bélgica. Este canal tem seis metros de comprimento e é dividido em duas partes iguais através de uma comporta. A sua largura é de 0.25 m e a sua altura de 0.5 m. Possui ainda janelas de vidro que permitem o acesso óptico ao escoamento, Figura 6. A comporta tem sentido descendente e é movimentada por um sistema pneumático que permite tempos de queda na ordem de 120 ms. Este tempo está de acordo com o critério proposto por Lauber e Hager (1998). Segundo o referido critério a ruptura é considerada instantânea se:

$$T_q < \sqrt{\frac{2h_0}{g}} = 0.25 \text{ s} \quad [5]$$

em que T_q representa o tempo de queda da barragem, h_0 a altura inicial de água no reservatório e g a aceleração da gravidade.

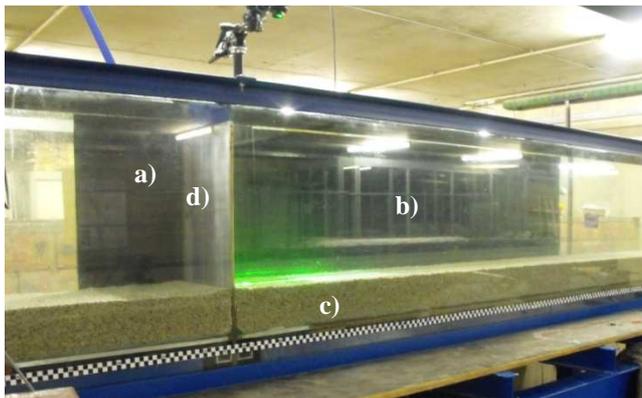


Figura 6. Canal de ruptura de barragens: a) reservatório, b) secção de teste, c) leito sedimentar, d) comporta.

3.2. O leito móvel

Para realizar o leito móvel foi utilizada areia com uma massa volúmica de $\rho_s = 2.63 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ com um diâmetro característico, $d_{50} = 1.72 \times 10^{-3} \text{ mm}$. A areia foi colocada sobre o fundo do canal, nivelada e compactada até atingir os 0.10 m de altura. A compactação foi feita por meio de um pilão de 14 kg com base quadrada, compactando-se sucessivamente troços de $25 \times 25 \text{ cm}^2$. Antes de cada ensaio o leito a jusante foi saturado de água para garantir sempre as mesmas condições. Na Figura 6 é possível ver o leito móvel sedimentar colocado no canal de ruptura de barragens.

No reservatório de montante foi considerado um nível de água, acima do leito de sedimentos, igual a 0.325 m. O Quadro 2 resume as condições estudadas.

Quadro 2. Resumo das variáveis e respectivos valores utilizados na experiência de ruptura de barragens.

	VALOR
ALTURA INICIAL DE ÁGUA NO RESERVATÓRIO, h_0	0.325 m
ALTURA DO LEITO DE SEDIMENTOS, h_s	0.10 m
MASSA VOLÚMICA, ρ_s	$2.63 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$
DIÂMETRO CARACTERÍSTICO, d_{50}	$1.72 \times 10^{-3} \text{ m}$

4. Resultados Experimentais

O tempo necessário à preparação da experiência, associado ao tempo disponível para a utilização do sistema PIV permitiu que se realizassem três experiências.

A ausência de um sistema de sincronização entre a comporta e o sistema PIV resultou em três conjuntos de medições, os quais não podem ser comparados directamente entre si.

No entanto, uma vez que o escoamento tem boa repetibilidade (Soares-Frazão e Zech, 2008), é possível agrupar os três conjuntos de dados como se fossem de um só, conseguindo assim, de forma artificial, uma resolução temporal maior que a dada pelo sistema usado, que se cifra em $\Delta T = 0.67$ (Aleixo *et al.*, 2010).

A estratégia utilizada passou por lançar a aquisição do sistema PIV, accionando posteriormente o mecanismo da comporta.

Uma calibração feita previamente com uma câmara de alta velocidade permitiu que, a partir da posição da porta nas imagens de PIV, fosse possível determinar o instante $t = 0$, isto é, o instante para o qual a comporta é completamente removida.

Esta estratégia é descrita em Aleixo *et al.* (2010). No presente artigo optou-se por fazer a análise mais detalhada de uma destas experiências.

4.1. O campo muito próximo (the very near-field)

Como definido anteriormente o campo muito próximo de um escoamento de ruptura de barragem refere-se aos primeiros instantes do escoamento junto à comporta, tais que $T < 2.5$.

É possível constatar pelo registo que a onda de inundação se divide em duas (Figura 7) antes de colapsar (Figura 8), este efeito depende de factores como a altura de água inicial no reservatório e do atrito exercido pela camada de sedimentos na camada de água.

Nas experiências de Aleixo *et al.* (2009), realizadas para fundo fixo e liso, e para a mesma altura de água ($h_0 = 0.325 \text{ m}$) tal efeito não se verifica.

As Figuras 7, 8 e 9 ilustram o escoamento e o campo de velocidades correspondente aos instantes $T = 0.73$, $T = 1.09$ e $T = 1.46$, respectivamente. Na Figura 7 é possível constatar a existência de uma significativa componente vertical, sobretudo para $Z > 0.25$, componente essa que vai diminuindo com o passar do tempo, como mostra a Figura 9 ($T = 1.46$).

Verifica-se também que, na Figura 7, para $T = 0.73$ e $Z < 0.15$ o escoamento é praticamente horizontal, característica essa que se vai mantendo ao longo do tempo.

De salientar que o escoamento faz erodir o leito e que a evolução deste é visível nas imagens do escoamento.

Nos primeiros instantes do escoamento (Figura 7) são bem visíveis as diferentes velocidades presentes no escoamento, entre o fluido quase em repouso, situado em $X < -0.2$ e a frente de onda onde $|\mathbf{v}| \approx 1.4c_0$.

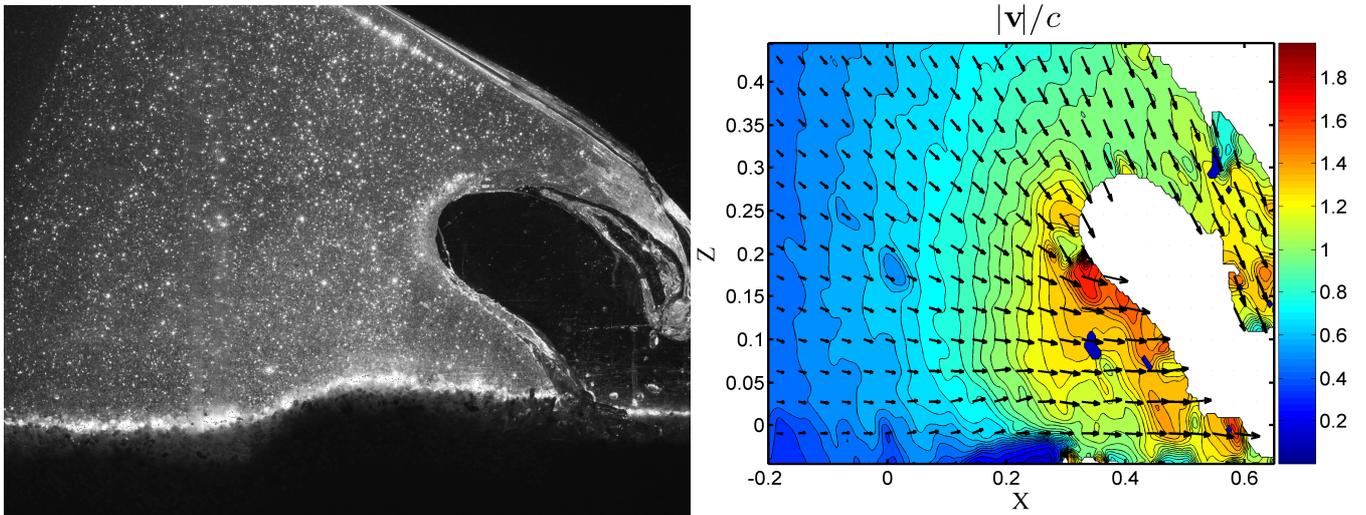


Figura 7. Imagem do escoamento e respectivo campo de velocidade para $T = 0.73$ (apenas 1 vector em cada 8 é mostrado).

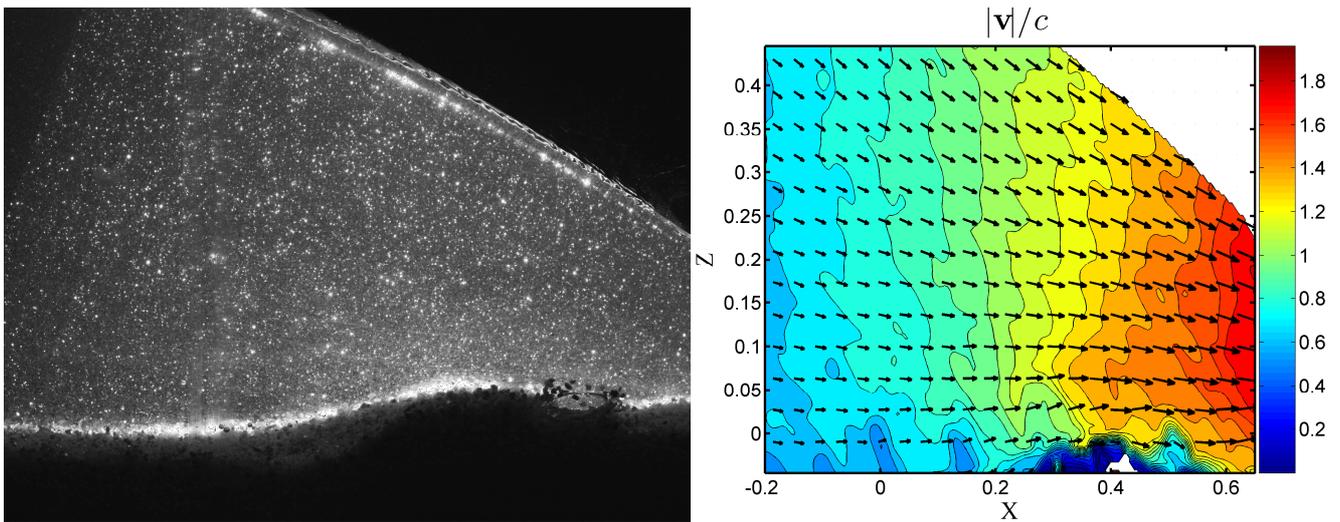


Figura 8. Imagem do escoamento e respectivo campo de velocidades para $T = 1.09$ (apenas 1 vector em cada 8 é mostrado).

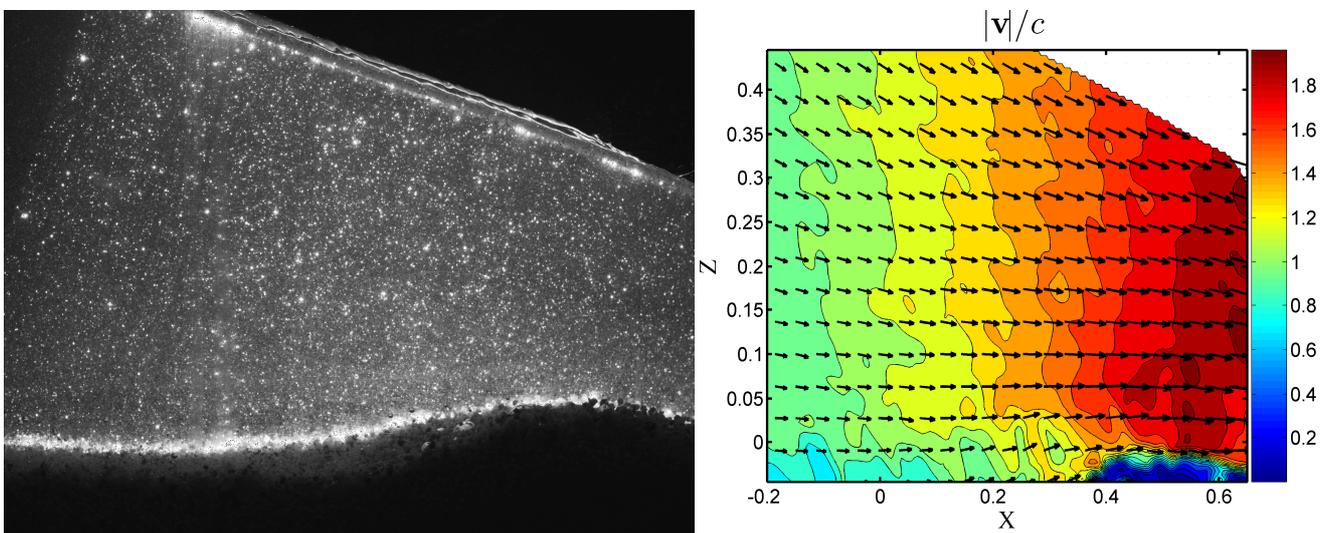


Figura 9. Imagem do escoamento e respectivo campo de velocidades para $T = 1.46$ (apenas 1 vector em cada 8 é mostrado).

4.1.1. Campo de velocidades da camada de sedimentos

As imagens obtidas incluem também o movimento da camada de sedimentos. Os sedimentos em si podem ser utilizados como traçadores para o algoritmo de PIV, tornando assim possível a determinação do campo de velocidades. Na Figura 10 apresenta-se um zoom do campo de velocidades junto à camada de sedimentos em $T = 1.09$. Salienta-se a forma como o campo de velocidades segue a forma do leito presente entre $0.2 < X < 0.6$. De salientar também que, como é visível nas imagens do escoamento, não é possível distinguir com toda a exactidão onde termina a camada de transporte e onde começa a camada de água.

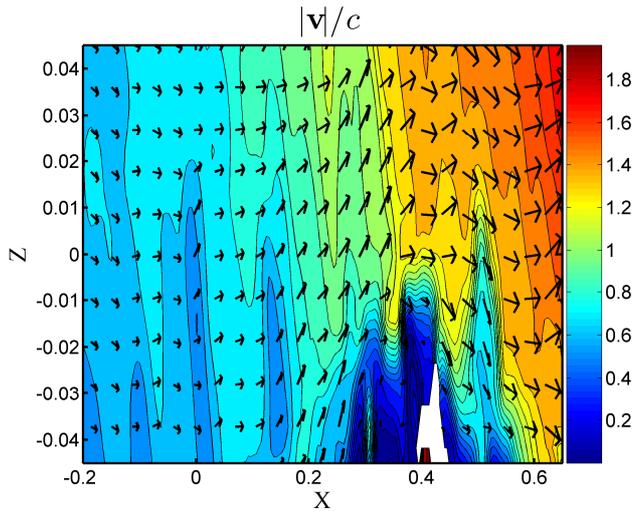


Figura 10. Zoom da região junto ao leito para $T = 1.09$ (apenas 1 vector em cada 8 é mostrado).

4.1.2. Evolução espacial dos perfis de velocidade

Para além do campo de velocidades apresentam-se aqui os perfis de velocidade, componente horizontal e vertical, medidos em 5 secções do escoamento compreendidas entre $-0.20 < X < 0.20$, considerando ainda as condições de campo muito próximo. As Figura 11 e 12 ilustram respectivamente a componente horizontal e vertical da velocidade para $T = 1.09$. Como é possível ver pela Figura 11, a componente U é maior perto da frente de onda.

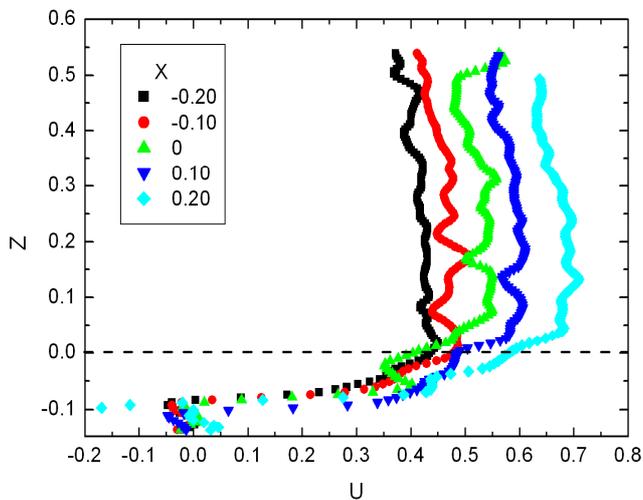


Figura 11. Perfis da componente horizontal da velocidade, medidos em diferentes secções, $X = -0.20, -0.10, 0, 0.10$ e 0.20 para $T = 1.09$.

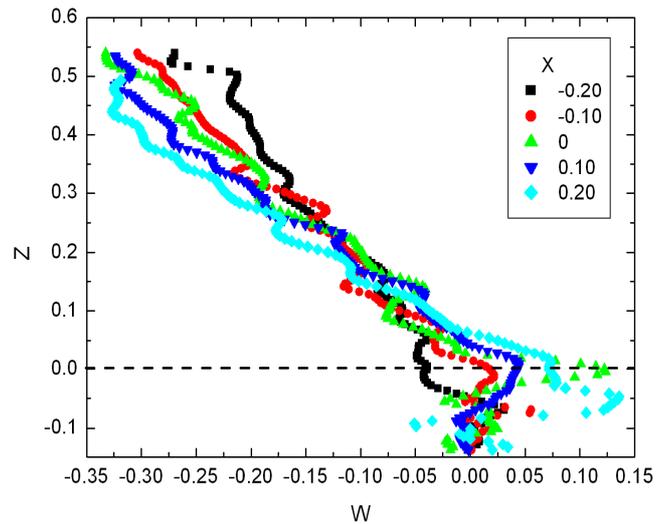


Figura 12. Perfis da componente vertical da velocidade, medidos em diferentes secções, $X = -0.20, -0.10, 0, 0.10$ e 0.20 para $T = 1.09$.

De salientar a quasi-linearidade dos perfis de velocidade na camada de sedimentos. Por outro lado verifica-se que a componente vertical tem um valor máximo significativo em módulo, cerca de $0.35c_0$.

4.2. Evolução do escoamento para o campo longínquo

Com o avançar do tempo o escoamento vai também evoluindo. Nas Figuras 13, 14 e 15 é mostrado o escoamento e o campo de velocidades para os instantes de tempo $T = 4.76, 5.13$ e 5.49 , respectivamente. Nesta fase do escoamento as variações no tempo da superfície livre não são tão significativas como no início do escoamento, comportamento também presente na solução de Ritter (1892). O campo de velocidades é agora praticamente horizontal e o leito não sofre alterações significativas, existindo no entanto uma camada de transporte de sedimentos. Ao contrário do que ocorria no campo muito próximo, neste caso, os vectores do campo de velocidades tendem a ser horizontais e paralelos, conforme se constata nas Figuras 13, 14 e 15.

4.2.1 Campo de velocidades da camada de sedimentos

Para o instante $T = 5.49$ apresenta-se o zoom do campo de velocidades junto à camada de sedimentos. Pelas imagens mostradas verifica-se que a forma do leito, que se cria com a libertação da coluna de água, já foi erodida, e que a mesma zona $Z < 0$, onde antes se encontravam sedimentos (Figura 10), é agora preenchida pela camada de água dada a erosão daqueles. Verifica-se que a ordem de grandeza das velocidades em jogo é superior à registada para o caso do campo muito próximo (Figura 10).

4.2.2 Evolução espacial dos perfis de velocidade

Para o campo longínquo apresenta-se nas Figuras 17 e 18 a variação espacial da componente horizontal e vertical da velocidade.

Ao contrário do que ocorria no campo muito próximo (Figura 11) as diferenças entre perfis são menos acentuadas (Figura 17). Por outro lado, a componente vertical tende agora para zero.

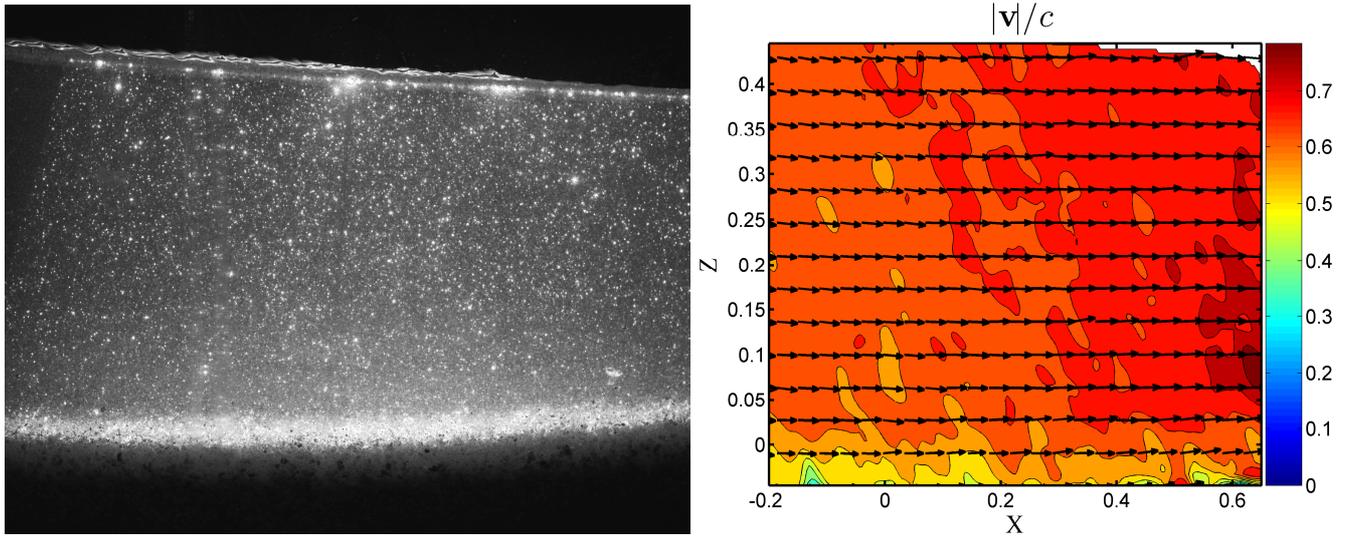


Figura 13. Imagem do escoamento e respectivo campo de velocidades para $T = 4.76$, (apenas 1 vector em cada 8 é mostrado).

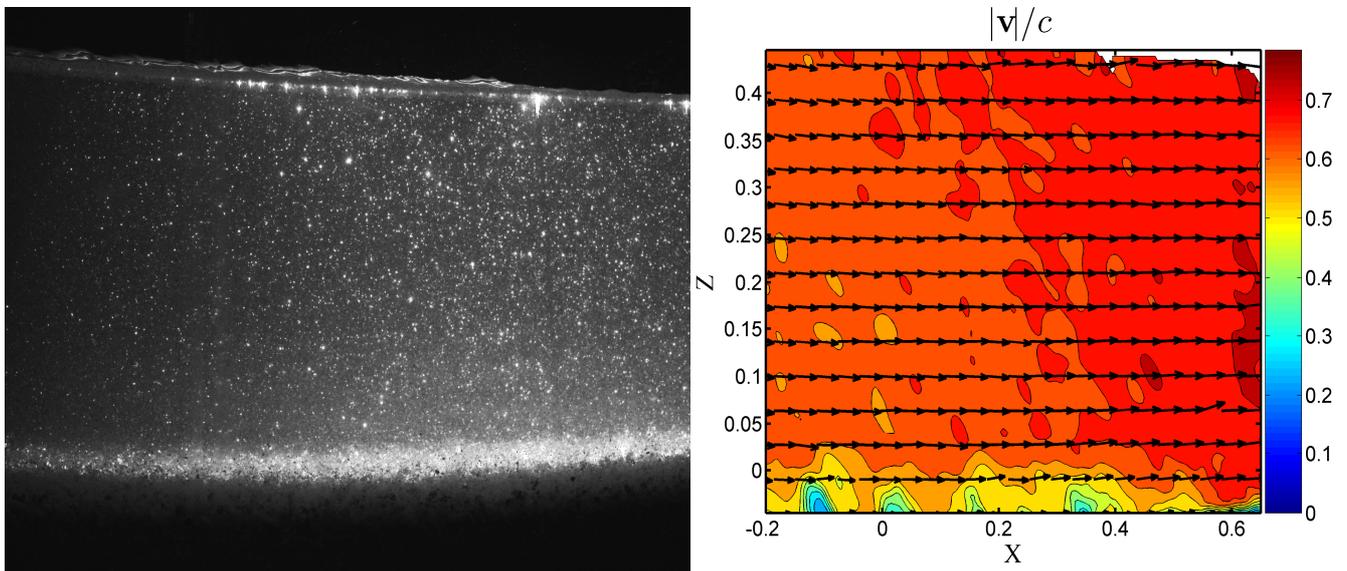


Figura 14. Imagem do escoamento e respectivo campo de velocidades para $T = 5.13$, (apenas 1 vector em cada 8 é mostrado).

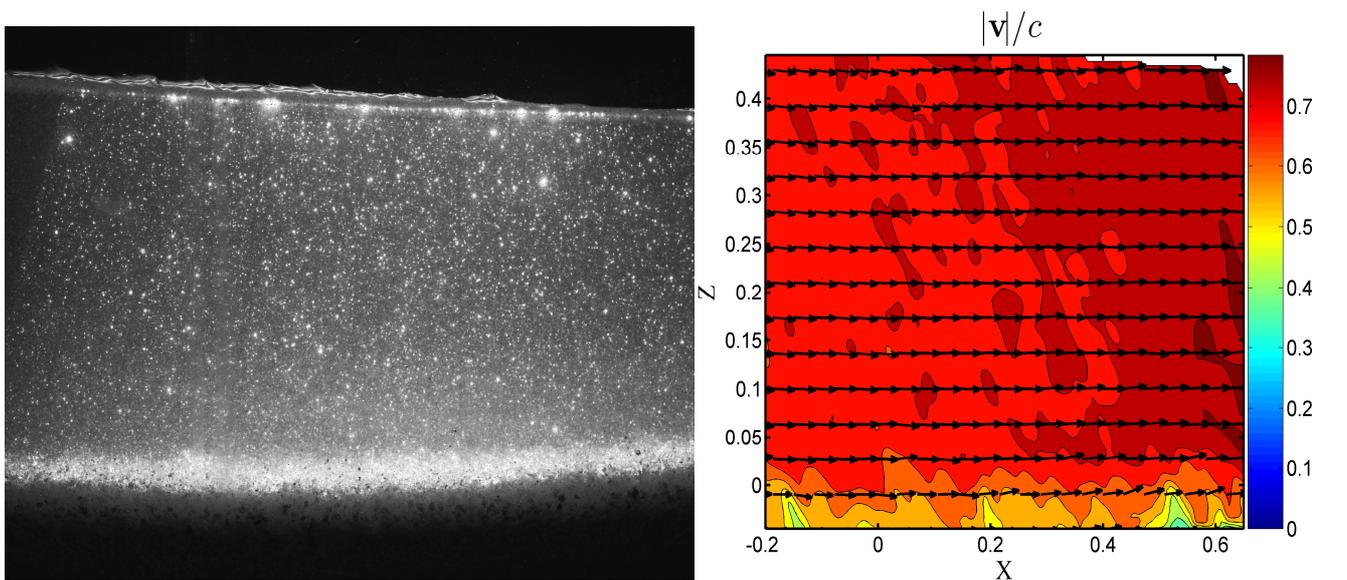


Figura 15. Imagem do escoamento e respectivo campo de velocidades para $T = 5.49$, (apenas 1 vector em cada 8 é mostrado).

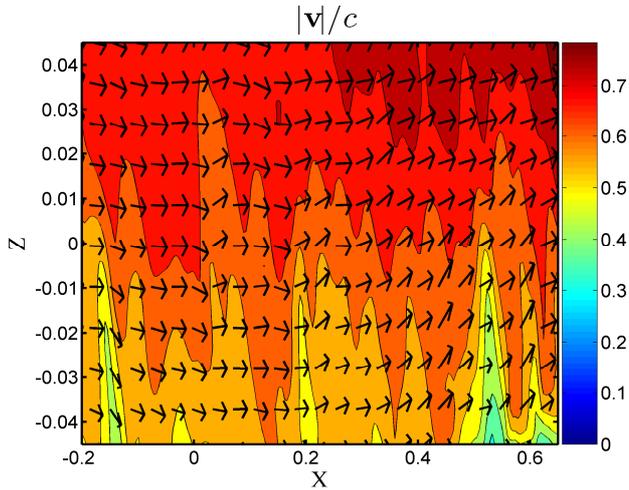


Figura 16. Zoom da região junto ao leito para $T = 1.09$, (apenas 1 vector em cada 8 é mostrado).

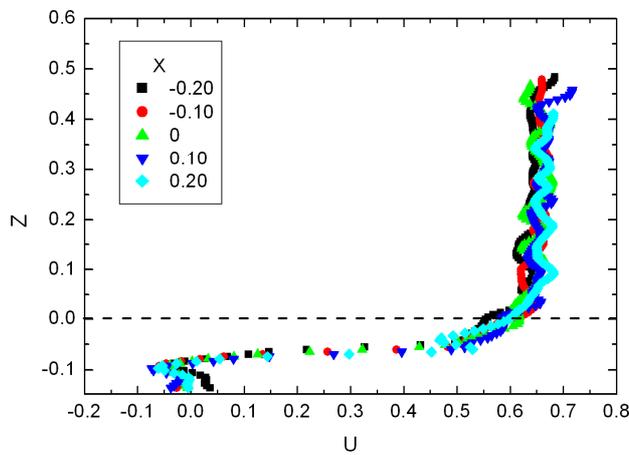


Figura 17. Perfis da componente horizontal da velocidade, medidos em diferentes secções, $X = -0.20, -0.10, 0, 0.10$ e 0.20 para $T = 5.49$.

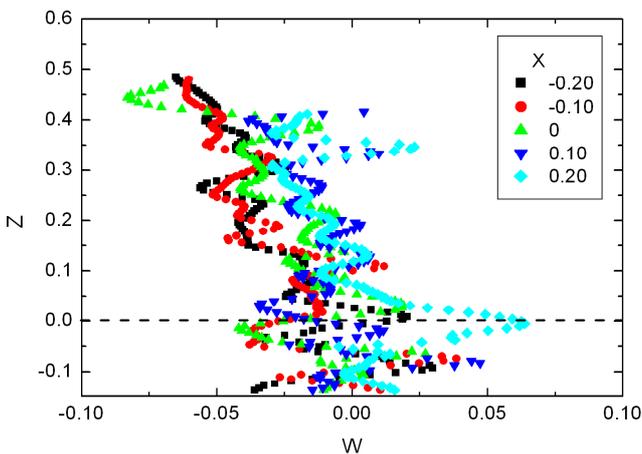


Figura 18. Perfis da componente vertical da velocidade medidos em diferentes secções, $X = -0.20, -0.10, 0, 0.10$ e 0.20 para $T = 5.49$

4.3. Evolução Temporal dos Perfis de Velocidade

Os resultados obtidos e mostrados nas secções anteriores permitem analisar a evolução temporal dos perfis de velocidade em cada secção considerada. Analisam-se aqui os resultados correspondentes às secções $X = -0.2$, $X = 0$ (secção da comporta) e $X = 0.2$. Nas Figuras 19 e 20 apresentam-se, respectivamente, os perfis das componentes horizontal e vertical da velocidade, para a secção $X = -0.20$.

É possível ver que houve uma aceleração do escoamento na componente horizontal mas que a componente vertical se aproximou de zero. O mesmo comportamento é observado nas outras secções (Figura 21 e 22, Figura 23 e 24). De salientar que para a secção mais a jusante considerada ($X = 0.2$), não se verifica uma tão grande aceleração como nos casos anteriormente mencionados.

Longe do leito, isto é, para $Z > 0.1$ verifica-se que o valor do perfil da componente horizontal tende a ser constante, indicando que a camada limite não atingiu ainda a superfície livre.

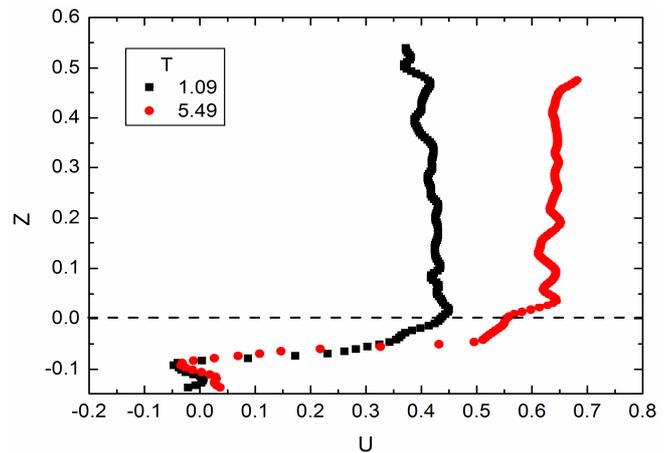


Figura 19. Perfis da componente horizontal da velocidade medidos em $X = -0.20$ para $T = 1.09$ e $T = 5.49$.

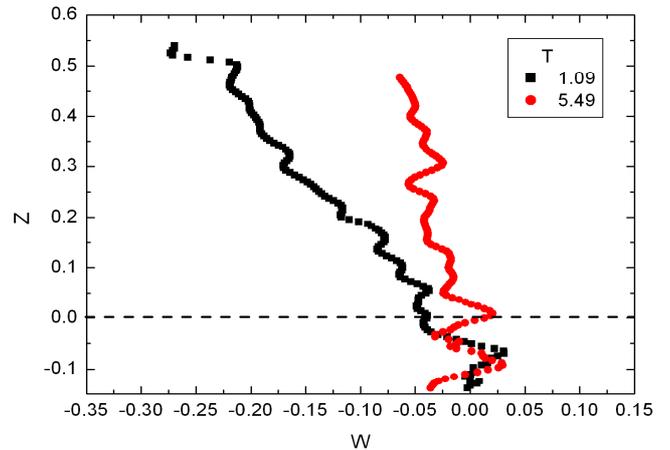


Figura 20. Perfis da componente vertical da velocidade medidos em $X = -0.20$ para $T = 1.09$ e $T = 5.49$.

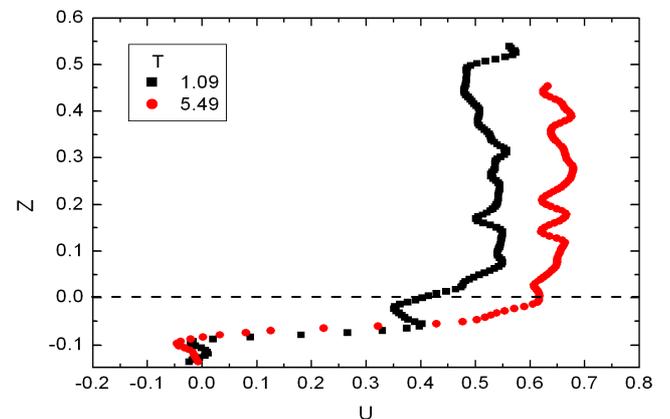


Figura 21. Perfis da componente horizontal da velocidade medidos em $X = 0$ para $T = 1.09$ e $T = 5.49$.

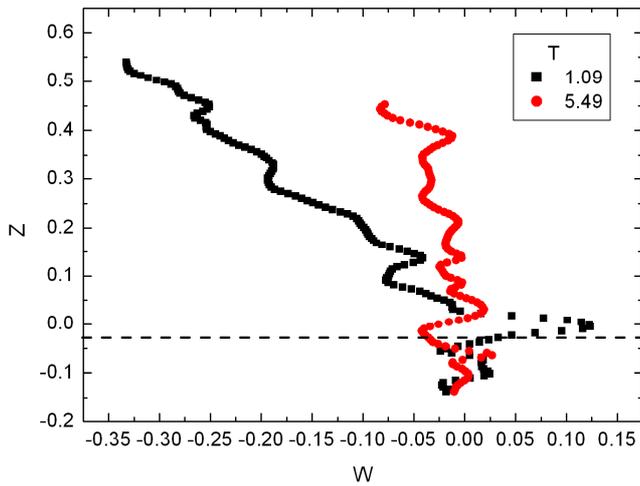


Figura 22. Perfis da componente vertical da velocidade medidos em $X = 0$ para $T = 1.09$ e $T = 5.49$.

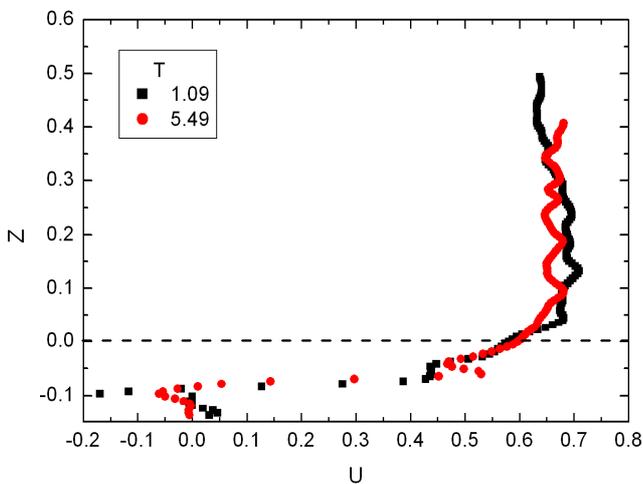


Figura 23. Perfis da componente horizontal da velocidade medidos em $X = 0.20$ para $T = 1.09$ e $T = 5.49$.

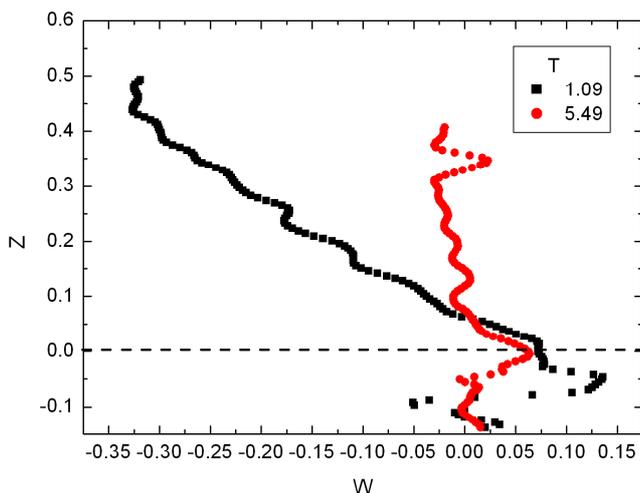


Figura 24. Perfis da componente vertical da velocidade medidos em $X = 0.20$ para $T = 1.09$ e $T = 5.49$.

5. Conclusões

Um estudo experimental do escoamento de ruptura de uma barragem foi apresentado, incidindo sobre a medição simultânea do campo de velocidades dos sedimentos e da camada de água.

A técnica de medição utilizada, a Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV) revelou-se adequada para este escoamento.

Foi possível verificar a existência de dois regimes distintos no escoamento de ruptura da barragem, designados de campo próximo e campo longínquo que permitiram ser distinguidos devido à resolução temporal do sistema PIV. Dentro do campo próximo a análise dos instantes correspondentes ao campo muito próximo foi realizada, verificando-se que o escoamento tem uma gama de variação de velocidades maior que no campo longínquo. Por outro lado, a componente vertical da velocidade é mais significativa no campo próximo que no campo longínquo no qual tende para zero. As variações da superfície livre são também muito mais significativas no campo próximo que no longínquo.

A variação dos perfis da componente horizontal da velocidade no espaço mostrou ser mais significativa para o campo próximo que para o campo longínquo, verificando-se valores mais elevados perto da frente da onda.

Longe do leito verifica-se que o perfil da componente horizontal da velocidade tende a ser praticamente constante, significando que o desenvolvimento da camada limite ainda não atingiu a superfície livre. Junto ao leito verifica-se que o escoamento é afectado pelas formas de fundo que existam, observando-se localmente a variação da componente vertical da velocidade.

As imagens da camada de sedimentos foram utilizadas com o algoritmo de PIV para obter o campo de velocidades da referida camada de sedimentos. Consta-se que na camada de sedimentos o perfil da componente horizontal tende a ser linear. Este ponto deverá ser alvo de atenção de futuros estudos uma vez que nem todas as partículas de areia terão a dimensão adequada. Por outro lado, a presença de sedimentos entre a secção da folha laser e a parede lateral do canal pode contribuir para uma avaliação incorrecta do campo de velocidades na camada de sedimentos. Deve também ser referido que a interface entre a camada de sedimentos móvel e a camada de água não é facilmente distinguível por várias razões. Primeiro a água encontra-se repleta de traçadores que se confundem com os sedimentos do leito e segundo a reflexão do laser no fundo impede a correcta identificação da interface fluido-sedimentos.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela bolsa de doutoramento SFRH/BD/36023/2007 concedida ao primeiro autor pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Portugal.

O equipamento PIV foi financiado pela Convenção 2.4.526.08 do Fonds de la Recherche Fondamentale Collective (Fonds de la Recherche Scientifique), Bélgica.

Referências

Adrian RJ (2005). Twenty years of particle image velocimetry, *Experiments in Fluids*, 39, 159-169.

- Aleixo R; Spinewine B; Soares-Frazão S; Zech Y (2009) Non-intrusive measurements of water surface and velocity profiles in a dam-break flow, Proceedings of the 33rd IAHR Conference, Vancouver, 6898-6905.
- Aleixo Rui, Soares Frazao Sandra, Spinewine Benoît, Zech Yves, "Velocity profiles in dam-break flows: Water and sediment layers", In: Proceedings of the River Flow 2010 Conference, Braunschweig, Germany, 2010, 2010, pp.533-540 (Vol. 1).
- Aleixo R; Soares-Frazão, S; Zech Y. (2011). Velocity-field measurements in a dam-break flow using a PTV Voronoi Technique. Experiments in Fluids. (aceite para publicação: DOI: 10.1007/s00348-010-1021-y).
- Dressler, RF (1954) Comparison of theories and experiments for the hydraulic dambreak wave. In Assemblée General de Rome, vol. 3, pp. 319-328. Intl Assoc. of Hydrology.
- Keane RD, Adrian, R.J. (1992). *Theory of Cross-correlation analysis of PIV images*, Applied Scientific Research 49, 191-215.
- Lauber G; Hager WH (1998). *Experiments to dambreak wave: horizontal channel*, J Hyd Res, 36, 291-307.
- Meynart, R (1982). *Digital image processing for speckle flow velocimetr.*, Rev. Sci. Instrum. 53, 110-111
- Raffel M; Willert C; Wereley S; Kompenhans J (2007). *Particle Image Velocimetry – A Practical Guide*, 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin..
- Ritter, A. (1892). *Die Fortpflanzung der Wasserwellen*. Zeitschrift Verein Deutscher Ingenieure, Vol. 36, No. 2, 33, 13 Aug., pp. 947-954 (em Alemão).
- Soares-Frazão S; Zech Y; (2008) *Dam-break flow through an idealised city*. J Hyd Res, 46 (5): 648-658.
- Spinewine B. (2005). *Two-layer flow behaviour and the effects of granular dilatancy in dam-break induced sheet-flow*. PhD thesis, Université catholique de Louvain, Belgium.
- Van Goethem, J-L., Villers, L. (2000). *Modélisation du transport solide associé à l'onde de rupture d'un barrage : développement d'un schéma numérique aux voutes fines et analyse de mesures expérimentales par techniques d'imagerie digitale*. MSc. thesis, Université catholique de Louvain. Belgium (em Francês).
- Voisin, T., Greindl, A. (2007). *Analyse expérimentale et théorique du profil vertical de vitesse: étude en écoulement permanent et en écoulement transitoire sévère*, MSc. thesis, Université catholique de Louvain. Belgium (em Francês).
- Witham, GB (1955) *The effects of Hydraulic Resistance in the Dam-Break Problem*. Proc. Roy. Soc. Of London, ser. A, vol 227, pp 399-407.
- Zech, Y., Soares-Frazão, S., Spinewine, B., le Grelle, N. 2008. *Dam-break induced sediment movement: Experimental approaches and numerical modeling*. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 46 (2), 176-190.