

## MODELAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO EM TORNO DE UM PILAR Numerical Simulation of the Flow around a Pier

PEDRO XAVIER RAMOS <sup>(1)</sup>, JOÃO PEDRO PÊGO <sup>(2)</sup> e RODRIGO MAIA <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Mestre em Engenharia Civil, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, ec07147@fe.up.pt

<sup>(2)</sup> Professor Auxiliar, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, jpego@fe.up.pt

<sup>(3)</sup> Professor Associado, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, rmaia@fe.up.pt

### Resumo

A presença de um obstáculo no seio do escoamento propicia a ocorrência de fenómenos erosivos no fundo de rios ou canais, com implicações para a estabilidade de estruturas, como pilares e encontros de pontes. Os métodos de previsão da erosão localizada em pilares são ainda demasiados empíricos, baseados em experiências realizadas em laboratório. Com o presente estudo, através do uso ferramentas de cálculo automático de escoamentos, pretende-se complementar os conhecimentos obtidos experimentalmente com mais informação sobre os fenómenos do escoamento que contribuem para o processo erosivo.

Numa primeira fase, foi simulado numericamente o escoamento em torno de um pilar circular (50 mm de diâmetro), num fundo plano, correspondendo ao início do processo erosivo. Neste processo, foram testados dois modelos de turbulência distintos: o LES e o SST  $k-\omega$ . Posteriormente, realizou-se um ensaio laboratorial de um escoamento em torno do pilar, fundado num leito arenoso, de modo a possibilitar a caracterização da geometria da cavidade de erosão que se forma em torno do dito obstáculo. Após a atividade experimental, efetuou-se a modelação numérica do escoamento com uma configuração análoga à geometria de fundo correspondente à profundidade de equilíbrio medida em laboratório, onde foram empregues os modelos de turbulência acima mencionados. Uma última simulação numérica do escoamento em torno de um pilar foi realizada, também ele em fundo plano, com a diferença de o diâmetro ser o dobro daquele utilizado anteriormente. Em todas as simulações foi utilizado o *software ANSYS Fluent*, para o cálculo do campo de velocidades do escoamento.

**Palavras-chave:** Erosão localizada, modelação física e numérica, CFD, LES, SST  $k-\omega$ .

### Abstract

The presence of an obstacle in a flow causes a scour hole in the rivers or channels bed, with implications on the structures stability, as piers or bridges abutments. The prediction methods of the local scour around the piers are still too empirical, based on experiments performed in the controlled environment of a laboratory. With this research, based on flow simulation tools, this study is aimed to obtain more information about the flow structures which contribute to this important phenomenon.

Firstly, it was simulated a flow around a pier (with 50 mm of diameter) in a flat bed, corresponding to the beginning of the scour process. In this process, two different turbulence models have been tested: the LES and the SST  $k-\omega$ . Subsequently it was developed one laboratorial test of a flow around a pier, founded on a sand bed, in order to characterize the geometry of the cavity created by the scour around the pier. After the experimental activity, the numerical simulation of the flow was performed with the background geometry configuration corresponding to the measured equilibrium depth, where the above mentioned models were used. It was made one last numerical simulation of the flow around the pier, also in a flat bed. There was only a difference in the diameter, which was twice the size of the one previously used. In all of the simulations, ANSYS Fluent was used to calculate the flow velocities.

**Keywords:** Local scour, physical and numerical modelling, CFD, LES, SST  $k-\omega$ .

### 1. Introdução

Na generalidade dos casos, a estrutura de uma ponte tem os seus pilares fundados no leito do rio que transpõe. A presença destes obstáculos na água é responsável por fenómenos que propiciam o surgimento de uma cavidade de erosão no leito do rio ou canal.

A erosão localizada junto de pilares pode comprometer a sua estabilidade e, consequentemente, a da ponte que suporta. O estudo deste fenómeno tem sido maioritariamente de carácter experimental, mas será demonstrado neste artigo que a modelação numérica de escoamentos se apresenta como uma alternativa económica e fiável.

## 2. Objetivos

O objetivo primordial deste estudo passa pela modelação numérica do escoamento em torno de um pilar, em duas configurações diferentes de fundo fixo: na primeira, o pilar assenta sobre um fundo plano (configuração A), enquanto na segunda assenta sobre um fundo erodido, onde é possível observar a cavidade de erosão (configuração B).

A configuração com fundo plano representa uma situação inicial de arranque do processo erosivo. Já a segunda configuração representa uma situação em que é atingida a profundidade de equilíbrio. Para gerar a segunda geometria, foi necessário definir as dimensões da cavidade de erosão. Para isso, foi realizado um ensaio laboratorial no canal do Laboratório de Hidráulica da SHRHA/DEC da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Campo de velocidades, pressões e tensões de arrastamento são alguns dos parâmetros que se pretendem quantificar com a simulação numérica, permitindo, assim, caracterizar as ações que o escoamento exerce nas suas fronteiras e no obstáculo que, no caso vertente, é um pilar circular. Os conhecimentos obtidos com este estudo poderão ajudar a melhor interpretar o fenómeno de erosão localizada e potenciar a criação de medidas para a sua mitigação.

## 3. Erosão Localizada de Pilares

A presença do pilar no escoamento introduz uma alteração no campo de velocidades à sua volta. Essas velocidades aumentam do fundo para a superfície (Figura 1). À medida que o escoamento se aproxima do pilar, a sua velocidade decresce, até ao ponto em que se anula na face de montante do obstáculo. Este fenómeno é denominado de efeito de estagnação e faz com que a pressão sofra um incremento, igual a

$$\Delta p = \frac{\rho[U(y)]^2}{2} \quad [1]$$

em que  $\rho$  representa a massa volúmica da água e  $U(y)$  a velocidade do escoamento à distância  $y$  do fundo do rio ou canal (Cardoso, 1998).

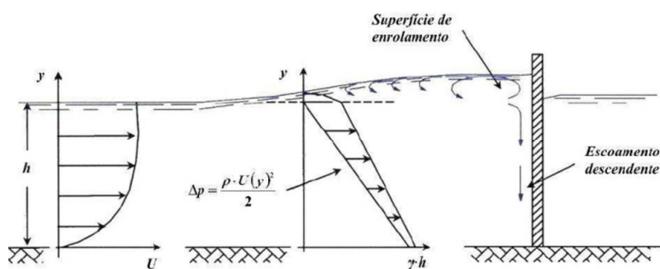


Figura 1. Alteração do campo de pressões do escoamento a montante de um pilar (Fael, 2007).

Como consequência da alteração do campo de pressões, pode observar-se o aumento do nível da superfície livre a montante do pilar e a formação de uma superfície de enrolamento. Também se verifica a existência de um escoamento descendente em forma de jacto, no sentido das maiores para as menores pressões. Este escoamento, ao incidir no leito, é parcialmente deflectido para montante.

O jato resultante do escoamento descendente tende a erodir a fundação do pilar, imediatamente a montante deste (Figura 2).

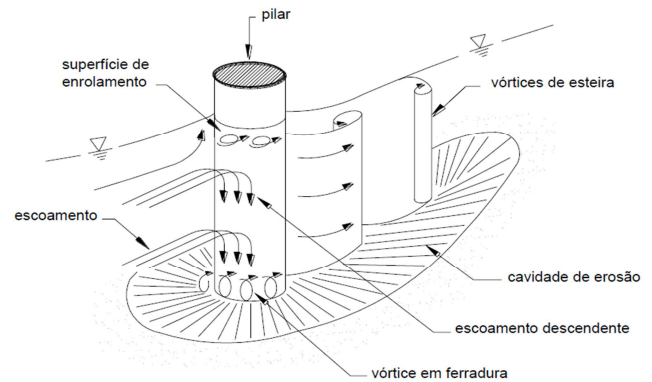


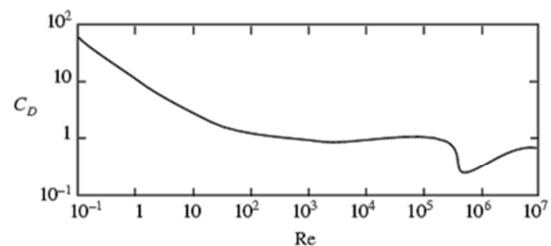
Figura 2. Estrutura do escoamento na proximidade de um pilar cilíndrico (Cardoso, 1998)

A ação combinada do escoamento descendente deflectido e do escoamento separado dá origem ao chamado vórtice em ferradura, considerado como o primeiro responsável pela formação do processo de erosão. Os vórtices de ferradura dissipam-se para jusante do pilar desempenhando, assim, um papel importante na escavação do leito, dado que arrastam o material do fundo (Cardoso, 1998). A jusante do pilar observa-se a presença de vórtices de esteira, que se evidenciam na cavidade de erosão. Enquanto o vórtice em ferradura provoca, essencialmente, o arrastamento do material do fundo, os vórtices de esteira arrancam esse material através do efeito de sucção e transportam-no, depois, em suspensão (Pinheiro, 2010). O escoamento provoca uma força no pilar, designada por força hidrodinâmica, que pode ser decomposta na componente de arrasto ( $F_D$ ), na direção longitudinal, e na componente de sustentação ( $F_L$ ). Estas forças são correntemente representadas pelos coeficientes adimensionais,  $C_D$  e  $C_L$ , calculados pelas seguintes equações (White, 2006):

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_v} \quad [2]$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_h} \quad [3]$$

em que  $A_v$  e  $A_h$  representam as respetivas áreas de projeção frontal e longitudinal do pilar, e  $\rho$  a massa volúmica da água. Para escoamentos simétricos, o coeficiente de sustentação,  $C_L$ , é nulo (White, 2006). Na Figura 3, é apresentada a variação do coeficiente  $C_D$  com o número de Reynolds (em cima) e altura do pilar (em baixo)."



L/D	1	2	5	10	20	40	∞
$C_o$	0.64	0.68	0.74	0.82	0.91	0.98	1.2

Figura 3. Variação de  $C_D$  com o número de Reynolds (White, 2006).

A máxima profundidade de erosão é obtida para condições do escoamento próximas da velocidade crítica ( $U \approx U_c$ ), isto é, a velocidade média do escoamento que corresponde ao início do movimento das partículas (Pinheiro, 2010).

Esta grandeza pode ser obtida pela fórmula de Neil, traduzida pela seguinte equação (Neil, 1967):

$$\frac{U_c^2}{(\gamma_s - 1)g D_{50}} = 2.5 \left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{0.2} \quad [4]$$

em que  $h$  representa a altura do escoamento,  $D_{50}$  e  $\gamma_s$  são, respetivamente, o diâmetro mediano e o peso volúmico das partículas do material do fundo e  $\gamma$  o peso volúmico da água.

Shields (1936) estudou as condições críticas de arrastamento junto ao fundo de leitos móveis, através do valor da tensão a partir do qual as partículas do leito iniciam o seu movimento. Pelo Diagrama de *Shields* (Figura 4) é possível prever se ocorrerá, ou não, movimento de partículas.

A partir do conhecimento do diâmetro  $D$  e da massa volúmica do material  $\rho$ , e da viscosidade cinemática da água,  $\nu$ , é possível determinar o valor da tensão de arrastamento crítica,  $\tau_c$  (Quintela, 2000).

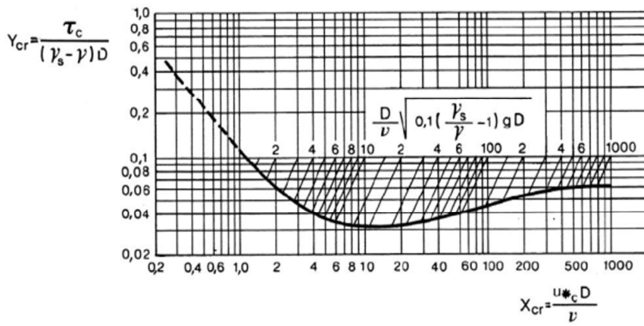


Figura 4. Diagrama de *Shields* (Quintela, 2000).

Este diagrama relaciona dois parâmetros adimensionais representados por  $X_{cr}$  e  $Y_{cr}$ .

O primeiro,  $X_{cr}$ , representa o número de Reynolds das partículas definido através da velocidade de atrito junto ao fundo,  $U_{*c}$ , e o segundo,  $Y_{cr}$ , designado por parâmetro de *Shields*, tem em conta a tensão entre os sedimentos e o escoamento.

As curvas, desenvolvidas experimentalmente, representam a função  $Y_{cr} = \varphi(X_{cr})$ , cujos parâmetros são dados pelas seguintes equações (Quintela, 2000):

$$X_{cr} = \frac{U_{*c} D}{\nu} = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \frac{D}{\nu} \quad [5]$$

$$Y_{cr} = \frac{\rho U_{*c}^2}{\gamma_s D} = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) D} \quad [6]$$

Se os valores de  $X_{cr}$  e  $Y_{cr}$ , obtidos para as condições do escoamento real, corresponderem a um ponto situado na zona do gráfico acima da curva representada, o escoamento ocorre com transporte de partículas do material de fundo, enquanto que se esse ponto estiver situado na zona inferior do diagrama, as partículas não são transportadas (Silva, 2008).

## 4. Modelação Numérica de Escoamentos

### 4.1. Introdução

A Modelação Numérica de Fluidos ou Dinâmica de Fluidos Computacional (na literatura inglesa *Computational Fluid Dynamics* - CFD) é o ramo da mecânica dos fluidos responsável pela simulação numérica dos fenómenos que ocorrem num determinado escoamento (Anderson, 1995).

A sua aplicabilidade é vasta e o seu uso tem tendência a crescer com o aparecimento de computadores cada vez mais rápidos, capazes de dar resposta às exigências de processamento e armazenamento de dados.

O princípio básico do CFD passa por dividir o escoamento em pequenos elementos, constituindo uma malha de volumes finitos.

A cada elemento é aplicado um conjunto de equações resultante de três princípios governativos da dinâmica de fluidos (Anderson, 1995):

- Lei da Conservação da Massa;
- Lei da Quantidade de Movimento (Segunda Lei de Newton);
- Lei da Conservação da Energia (Primeira Lei da Termodinâmica).

Para aplicar os princípios enumerados, é necessário recorrer a métodos de discretização numérica, expostos mais à frente.

### 4.2. Equações governativas e modelos de turbulência

#### 4.2.1. Conservação da Massa

A equação da continuidade representa, matematicamente, o princípio da conservação da massa, aplicado a um volume infinitesimal de fluido num escoamento, sendo descrito pela seguinte equação (Azevedo, 2011).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0 \quad [7]$$

em que  $\rho$  representa a massa volúmica do fluido e  $U_i$  a componente da velocidade na direção  $i$ . Para fluidos incompressíveis, como é o caso em estudo, a massa volúmica é constante, donde resulta que  $\partial \rho / \partial t = 0$ .

Simplificando-se a equação anterior, esta fica com a seguinte forma (Azevedo, 2011):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad [8]$$

#### 4.2.2. Equação da quantidade de movimento

A 2ª Lei de Newton, aplicada a um elemento de fluido (na forma diferencial), relaciona as forças externas com as grandezas de massa e de aceleração,  $\bar{a} = D\bar{V}/Dt$ .

Substituindo o tensor das tensões viscosas pela relação entre a tensão e a taxa de deformação para fluidos newtonianos e isotrópicos, obtém-se a equação de *Navier-Stokes*:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} (-\overline{\rho u'_i u'_j}) \quad [9]$$

em que  $\mu$  representa a viscosidade dinâmica do fluido (Azevedo, 2011) e  $(-\overline{\rho u_i' u_j'})$  representa a variação de tensões. Esta equação é aplicável a todos os escoamentos não-permanentes de fluidos newtonianos.

Assim, representa-se o balanço entre o produto da massa pela correspondente aceleração, isto é, a taxa de variação da quantidade de movimento, e também o conjunto de forças (gravíticas, de pressão e de atrito viscoso) a que essa massa se encontra sujeita e, ainda, às variações de tensão aparente  $(-\overline{\rho u_i' u_j'})$  devido ao campo de velocidades flutuantes, geralmente referidas como tensões de Reynolds.

O número de incógnitas ultrapassa o de equações para as determinar e, por isso, recorre-se a expressões com forte carga empírica, visando relacionar as novas incógnitas, as referidas tensões de Reynolds, com variáveis do escoamento médio. Estas relações são conhecidas por modelos de turbulência (Azevedo, 2011) (Figura 5).

A resolução das equações de Navier-Stokes é tão complexa que só para escoamentos muito simples é possível obter uma solução analítica.

Para os restantes casos, é necessária uma solução computacional, que exige uma capacidade de armazenamento e de velocidade de cálculo extraordinárias. Apenas recentemente a tecnologia computacional tem sido capaz de trabalhar com tais grandezas (Pinto, 2008).

No entanto, a simulação direta da equação de *Navier-Stokes*, (DNS - *Direct Numerical Simulation* na terminologia inglesa) continua a ser uma tarefa complexa e muito demorada, estando limitada a sua aplicação a escoamentos com número de *Reynolds* baixo (Anderson, 1995). Para escoamentos turbulentos (situação mais habitual, tal como no presente caso), onde o número de *Reynolds* é bastante elevado, a resolução direta da equação de *Navier-Stokes* é inviável, motivo pelo qual foram desenvolvidos métodos alternativos, como os que a seguir se descrevem (Anderson, 1995). Para a resolução numérica das equações de *Navier-Stokes* de escoamentos turbulentos existem vários modelos, normalmente divididos em dois grandes grupos (Anderson, 1995);

- RANS - *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (Modelos baseados nas Equações Médias de Reynolds):
  - o Modelo *k-ε*;
  - o Modelo *k-ω*;
  - o Modelo *SST k-ω*.
- LES - *Large Eddy Simulation* (Método da Simulação das Grandes Escalas da Turbulência);

A adequação das técnicas a empregar para as várias situações é muito importante quando se deseja representar os fenómenos físicos de acordo com a realidade. Um resumo comparativo das características dos modelos de resolução mais populares está representado na Figura 5.

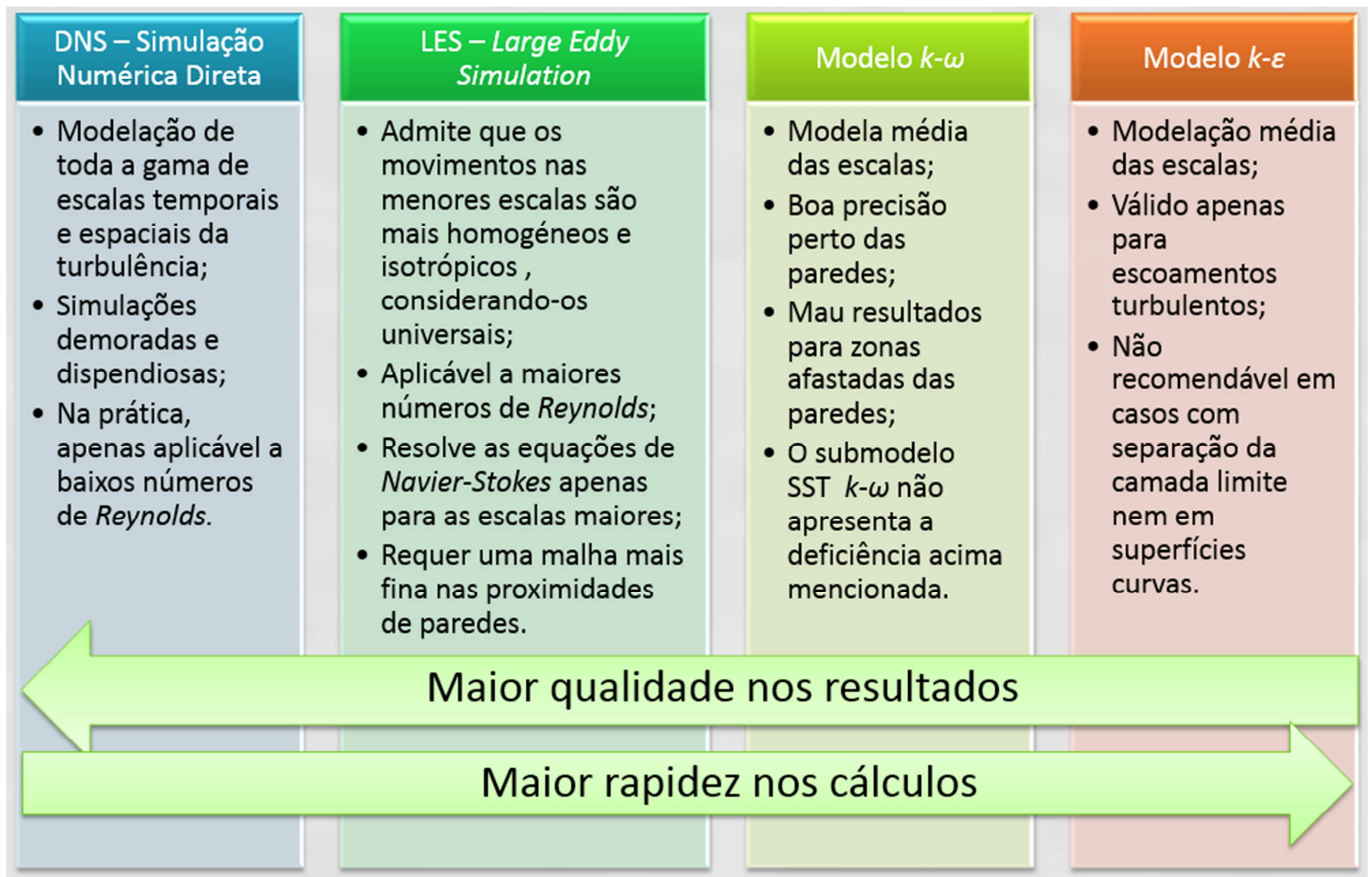


Figura 5. Comparação dos modelos numéricos mais utilizados.

## 5. Ensaio Laboratorial

### 5.1. Caracterização da instalação e materiais

O canal onde se realizou o ensaio localiza-se no Laboratório de Hidráulica da SHRHA/DEC da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, tem 1 m de largura e 32,2 m de comprimento. É dotado de uma caixa de sedimentos, com 3.30 m de comprimento e 35 cm de profundidade, onde se instalou o pilar fundado em areia, e ainda outra, a jusante, para reter os sedimentos transportados (Figura 6).

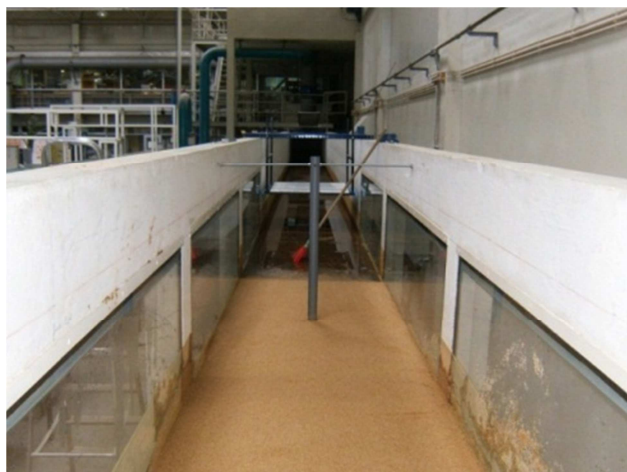


Figura 6. Instalação do pilar no fundo arenoso do canal.

Para além de permitir a deposição do material granular, a caixa de retenção permite proteger os grupos eletrobomba, evitando a passagem dos sedimentos para o circuito hidráulico, o que poderia provocar danos. Para uma adequada visualização do ensaio, as paredes do canal possuem janelas de vidro.

Como pilar, foi usado um tubo de PVC com 50 mm de diâmetro exterior e 1.2 m de comprimento. O pilar foi instalado mais próximo da extremidade de montante da caixa de sedimentação, já que que a cavidade de erosão se estende para jusante. Para garantir a verticalidade do tubo e evitar possíveis movimentos que fossem perturbar a fiabilidade dos resultados a obter, optou-se por fixar a zona inferior e a zona superior da tubagem, minimizando-se, deste modo, possíveis movimentos de rotação que poderiam ocorrer, caso só existisse uma fixação, tal como foi descrito em trabalhos anteriores (Silva (2008), Pinheiro (2010), Brito (2011)). Após a fixação do pilar, a caixa de sedimentação foi preenchida com areia, a qual foi compactada e alisada. Depois de concluída a regularização da superfície do fundo de areia, protegeu-se a zona em redor do pilar com duas grelhas metálicas revestidas a geotêxtil, a fim de evitar erosão antes do escoamento atingir as características pretendidas.

A areia utilizada como material de fundo para a realização dos ensaios foi obtida por peneiração a partir de areia retirada do rio Tejo. A caracterização granulométrica da areia foi conduzida em ensaio laboratorial, usando os procedimentos e especificações da norma NP-EN-933-1-2000.

Do ensaio granulométrico resultaram os seguintes valores característicos: diâmetro mediano,  $D_{50}=0.86$  mm, coeficiente de graduação,  $\sigma_D=1.4$ . A massa volúmica,  $\rho_s$ , é igual a 2650  $\text{kgm}^{-3}$ . Esta areia foi classificada como areia regular, pois possui um  $\sigma_D < 1.5$  (Brito, 2011).

### 5.2. Caracterização do escoamento

O ensaio foi realizado com uma altura de água de 0.2 m. Recorrendo à fórmula de Neil (Equação 3), para as condições laboratoriais do ensaio, o valor estimado para a velocidade crítica de arrastamento é de 0.32 m/s.

Assim, dadas as dimensões do canal (1 m de largura) e altura de escoamento, o caudal a fornecer pelas bombas será de 64 L/s, resultando numa velocidade média do escoamento próximo da crítica ( $U \approx U_c$ ).

A tensão crítica de arrastamento, para as características do presente caso, toma o valor de 0.5 Pa, calculado pelo Diagrama de Shields (Figura 4).

O número de Reynolds, calculado com base no diâmetro do pilar (50 mm), é dado pela seguinte equação,

$$Re = \frac{D U}{\nu} \quad [10]$$

A temperatura média da água, registada ao longo do ensaio, é de aproximadamente 20°C. Para este valor, a viscosidade cinemática,  $\nu$ , é de  $1.01 \times 10^{-6}$   $\text{m}^2/\text{s}$  (Lencastre, 1972). Portanto, o escoamento apresentou um número de Reynolds de 15841. Assim, esperava-se a ocorrência uma esteira de vórtices completamente turbulenta, sendo que a camada limite sobre o pilar continua a ser laminar (Pinto, 2008).

### 5.3. Caracterização da geometria da cavidade de erosão

Na realização deste ensaio, admitiu-se que a cavidade de erosão atinge o equilíbrio quando o aumento da profundidade da mesma, em 24 horas, é igual ou inferior a 1 mm (Brito, 2011).

O ensaio terminou ao fim de aproximadamente uma semana. A profundidade máxima da cavidade de erosão foi de 12.2 cm.

Para a caracterização geométrica da cavidade de erosão, foi adotado um método simples mas que conduziu a resultados muito satisfatórios, Figura 7.

O nível da água foi reduzido até este coincidir com a posição inicial do fundo arenoso do canal, através da comporta de regulação.

Depois, através do dreno existente no fundo da caixa de sedimentos, diminuiu-se ainda mais o nível da água e de uma maneira muito gradual.

A água depositada na cavidade de erosão permite visualizar os limites da mesma para um determinado nível da água (Figura 8).

Para diferentes instantes deste processo, associado a cada nível de água registado, foram tiradas fotografias da cavidade de erosão, com as quais foi possível obter as curvas de nível que caracterizam a geometria da cavidade de erosão.

De modo a obter, pelo menos, uma curva de nível por cada centímetro de profundidade, foi considerado um número suficiente de fotografias.



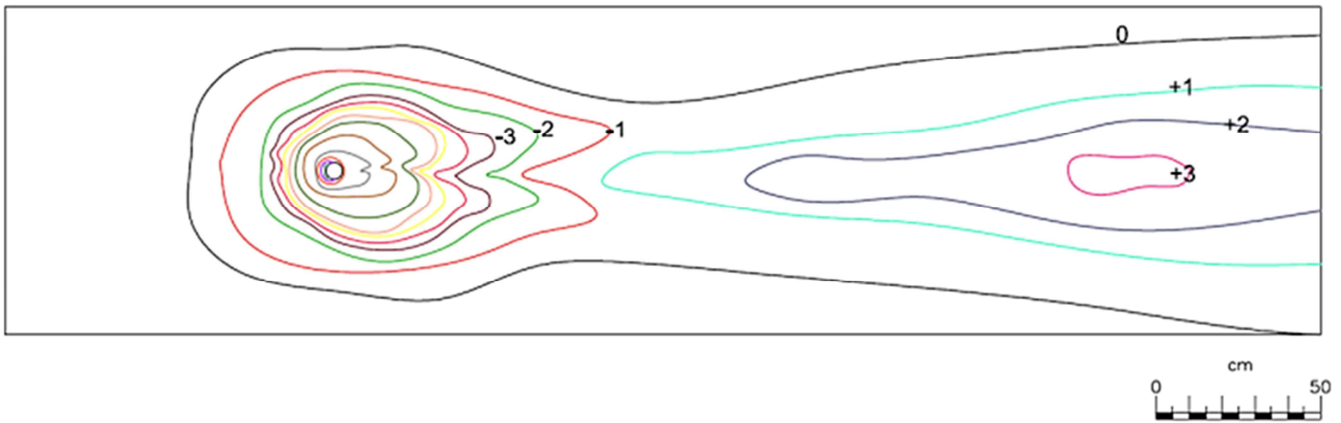


Figura 7. Caracterização geométrica do fundo do canal, no final do ensaio laboratorial.

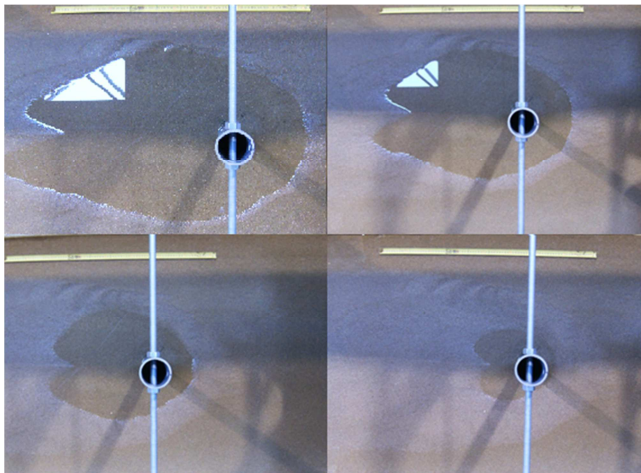


Figura 8. Diferentes níveis da água na cavidade de erosão durante a sua drenagem, em 4 instantes diferentes.

Com o intuito de aumentar a precisão deste método, foram medidas as profundidades, em vários pontos da cavidade de erosão, recorrendo a um limnómetro, de modo a comprovar os dados obtidos através das fotografias. As fotografias foram processadas em *AutoCAD*, onde se contornou a superfície da água depositada na cavidade de erosão, gerando assim várias curvas de nível. Após a sobreposição das várias curvas, obteve-se o mapeamento topográfico representado na Figura 7.

Pode verificar-se que o escoamento transportou os sedimentos que retirou do local da cavidade de erosão para uma zona a jusante desta, resultando num assoreamento cuja elevação ultrapassou os 3 cm.

Tal como apresentado na bibliografia, verificou-se que a zona onde se observava a profundidade máxima da cavidade de erosão ocorria junto à face de montante do pilar.

Com estes dados foi possível construir um modelo tridimensional para a modelação numérica do escoamento com o fundo erodido. Verifica-se, na Figura 7, uma ligeira assimetria na cavidade de erosão, que se encontra dentro do expectável para um ensaio laboratorial. No entanto, na construção do modelo numérico, foi gerada uma geometria simétrica para que os resultados numéricos das simulações não fossem influenciados pela eventual assimetria.

## 6. Simulações Numéricas

Numa primeira fase foram realizadas duas simulações, com dois modelos de turbulência diferentes (*Large Eddy Simulation* e *SST k- $\omega$* ) para a configuração inicial de fundo plano. A caracterização da geometria obtida no ensaio laboratorial foi transposta para um modelo geométrico tridimensional, através das linhas e pontos obtidos pelo método atrás descrito. Assim, realizaram-se mais duas simulações, análogas às anteriores, nas quais só mudou a configuração geométrica, novamente com os dois modelos já utilizados. Adicionalmente, para uma geometria com um pilar de diâmetro de 100 mm, foi também simulado o escoamento, utilizando o modelo *Large Eddy Simulation*. Assim, foram efetuadas, na totalidade, 5 simulações numéricas distintas:

- Simulação nº1: Configuração A, modelo LES;
- Simulação nº2: Configuração A, modelo *SST k- $\omega$* ;
- Simulação nº3: Configuração B, modelo LES;
- Simulação nº4: Configuração B, modelo *SST k- $\omega$* ;
- Simulação nº5: Configuração extra, modelo LES.

### 6.1. Simulação nº1: configuração A, modelo LES

Na Figura 9 apresenta-se o campo de velocidades correspondente a um corte horizontal a 10 cm da superfície livre. O pilar, situado a 1 m da entrada do canal é responsável pela perturbação na distribuição das velocidades do escoamento, como se pode notar.

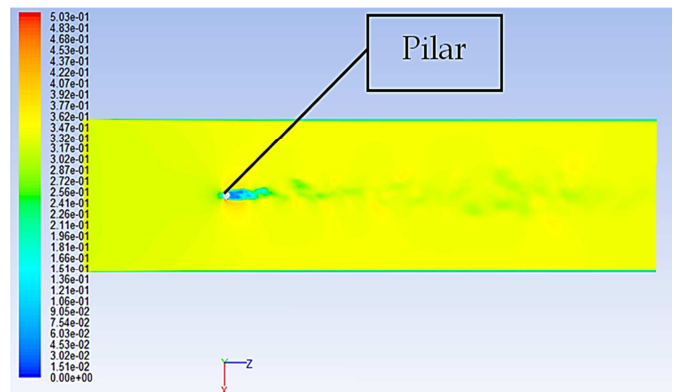


Figura 9. Campo de velocidades a 10 cm da superfície livre.

Através da análise da trajetória das partículas do escoamento no corte coincidente com o eixo de simetria do canal, imediatamente a montante do pilar (Figura 10), é notório o desenvolvimento do vórtice em ferradura e do escoamento descendente.

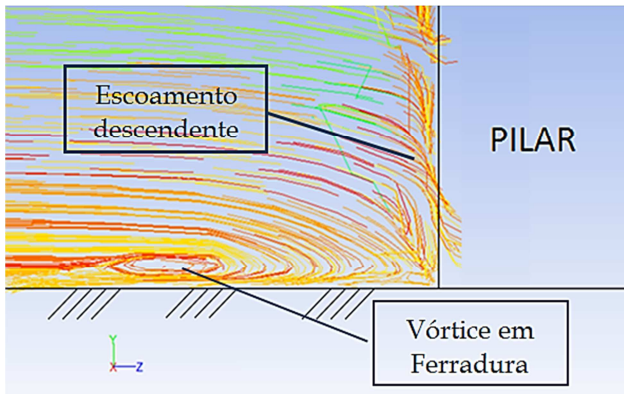


Figura 10. Campo de trajetórias a montante do pilar.

Como resultado das perturbações introduzidas pelo pilar, o fundo arenoso do canal experimenta tensões que, segundo a presente simulação assumem a distribuição exposta na Figura 11, atingindo o valor máximo de 1.8 Pa.

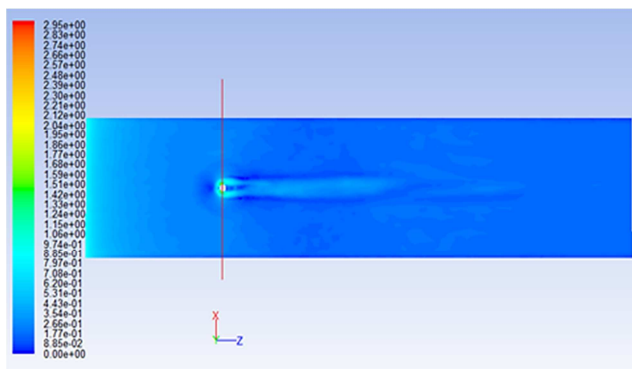


Figura 11. Tensões de arrastamento no fundo do canal.

### 6.2. Simulação nº2: configuração A, modelo SST $k-\omega$

O modelo de turbulência utilizado nesta simulação não resolve todas as escalas de turbulência, isto é, todas as escalas são modeladas como uma única, média, que é representativa de toda a turbulência.

Por isso, não é tão notório o desenvolvimento dos vórtices de esteira no campo de velocidades correspondente ao plano horizontal a 10 cm da superfície livre (Figura 12), comparativamente à simulação anterior.

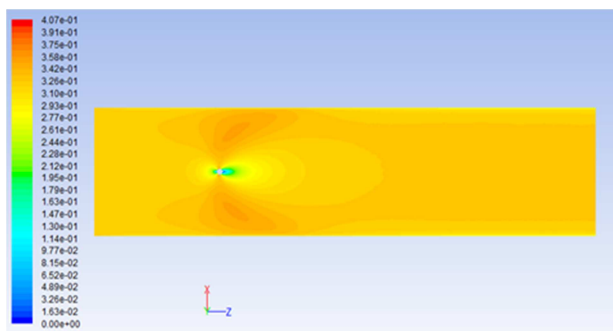


Figura 12. Campo de velocidades a 10 cm da superfície livre.

### 6.3. Simulação nº3: configuração B, modelo LES

Nesta simulação, foi estudado o escoamento com a cavidade de erosão desenvolvida no fundo do canal, como pode ver-se pela vista lateral da distribuição das velocidades no plano de simetria longitudinal do canal (Figura 13). A montante do pilar (lado esquerdo), é notório o efeito do vórtice de ferradura na distribuição das velocidades.

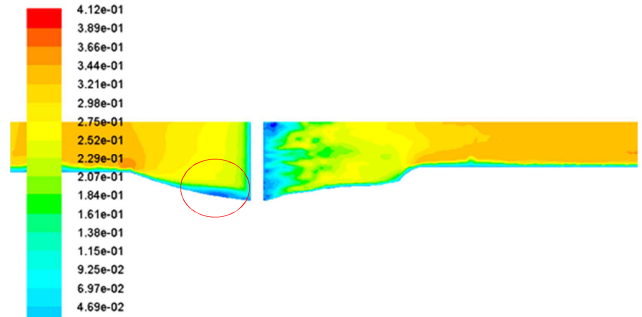


Figura 13. Velocidade longitudinal no eixo de simetria do canal.

Através da Figura 14, é perceptível a diminuição da velocidade no plano paralelo à superfície livre, a 10 cm desta, em resultado do aumento de profundidade da água, devido à formação da cavidade de erosão.

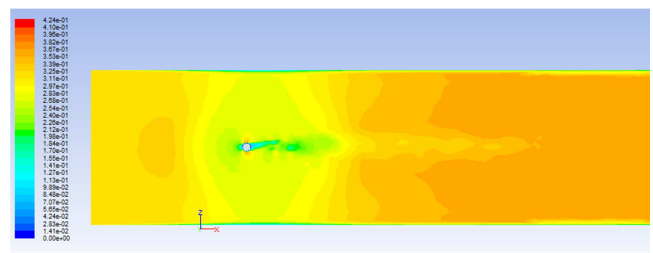


Figura 14. Campo de velocidades a 10 cm da superfície livre.

Através da trajetória das partículas do escoamento (Figura 15), assiste-se, uma vez mais, à formação do vórtice em ferradura. As tensões de arrastamento assumiram o valor máximo de 0.49 Pa.

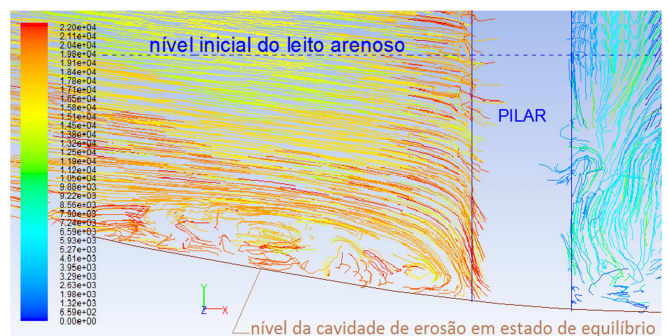


Figura 15. Trajetória das partículas a montante do pilar, na cavidade de erosão.

### 6.4. Simulação nº4: configuração B, modelo SST $k-\omega$

Com a complexidade da geometria e as simplificações do modelo de turbulência, acresce a dificuldade em representar as diversas estruturas responsáveis pelo processo erosivo. Assim, a distribuição de velocidades da Figura 16 não é tão realista como a da simulação nº3.

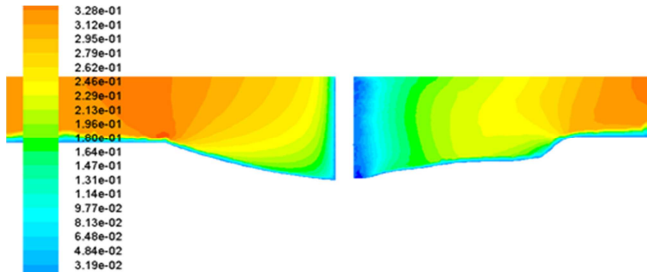


Figura 16. Velocidade longitudinal no eixo de simetria do canal.

Apesar da menor precisão desta simulação, a diminuição de velocidade do escoamento na zona da cavidade de erosão é notória (Figura 17).

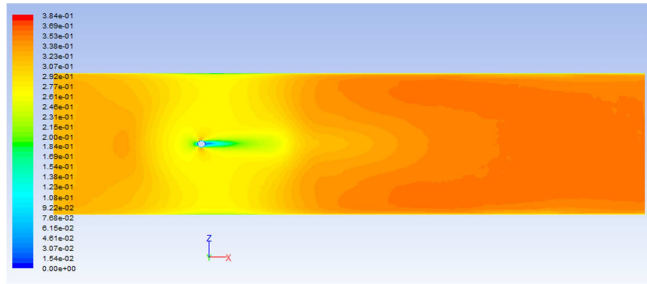


Figura 17. Campo de velocidades a 10 cm da superfície livre.

### 6.5. Simulação nº5: configuração extra, modelo LES

Com esta simulação, é mais nítido o desenvolvimento dos vórtices de esteira, assim como a sua influência na distribuição das tensões de arrastamento no fundo do canal (Figuras 18 e 19).

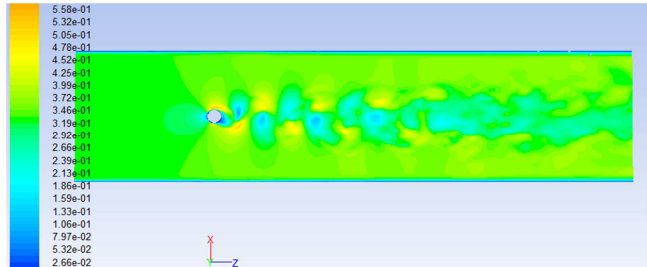


Figura 18. Campo de velocidades a 10 cm da superfície livre.

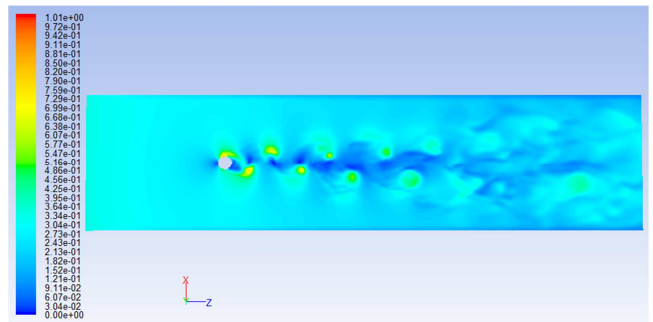


Figura 19. Tensões de arrastamento no fundo do canal.

### 6.6. Análise e comparação de resultados

No Quadro 1, apresentam-se as diferentes durações das respectivas simulações numéricas e a tensão de arrastamento máxima calculada em cada uma.

O valor obtido para a força de arrastamento no pilar,  $F_D$ , e a sua comparação com o valor que seria de esperar segundo a bibliografia estudada encontra-se também exposto na tabela acima referida.

A primeira simulação, com o modelo *Large Eddy Simulation*, reproduziu o escoamento sob o fundo plano com elevada fidelidade. A força de arrastamento no pilar calculada diferia em menos de 1.72% do valor esperado, sendo que este parâmetro é, em parte, um indicador da qualidade da simulação.

Para a mesma configuração de fundo, efetuou-se uma segunda simulação, diferenciando da anterior apenas no modelo de turbulência, já que, desta vez, o modelo SST  $k-\omega$  foi o escolhido. Uma menor exigência em tempo de processamento computacional foi, desde logo, evidente.

A força de arrastamento obtida através do cálculo numérico apresentou menor concordância com o esperado, mas ainda assim com um desvio aceitável de 15.8%. Em ambas as simulações acima referidas, as maiores tensões ocorreram na zona onde se forma a cavidade de erosão. Igualmente, as primeiras tensões acima da crítica apareceram na zona do vórtice em ferradura.

Quadro 1. Comparação dos resultados das simulações numéricas.

Parâmetro	Simulação nº 1 Conf. A LES	Simulação nº 2 Conf. A SST $k-\omega$	Simulação nº 3 Conf. B LES	Simulação nº 4 Conf. B SST $k-\omega$	Simulação nº 5 Conf. Extra LES	
Tempo de cálculo (h)	68	37	73	42	65	
Tensão de arrastamento máxima (Pa)	1.80	2.10	0.49	0.80	0.85	
Força de Arrastamento no pilar (N)	A - Valor teórico <sup>1</sup>	0.348	0.380	0.253	0.253	0.7
	B - Valor obtido na simulação	0.382	0.44	0.2576	0.41	0.59
	Diferença relativa A e B	1.72%	15.79%	1.82%	62.06%	-15.71%

<sup>1</sup> Valor obtido experimentalmente por White (2003).



Assim, conclui-se que, apesar da diferença de modelos, as simulações são coerentes entre si.

A força de arrastamento no pilar,  $F_D$ , foi, uma vez mais, caracterizada com uma grande aproximação, na simulação n°3, onde se utilizou o modelo LES (menos de 2% de diferença ao valor esperado).

Na outra simulação, com o modelo SST  $k-\omega$ , o erro associado à força de arrastamento é relevante, ao contrário de outros parâmetros, como o padrão de velocidades, por exemplo.

## 7. Conclusões

No âmbito desta publicação, realizou-se a modelação numérica do escoamento em torno de um pilar cilíndrico com duas configurações de fundo fixo, a primeira correspondendo a um fundo plano (início do processo erosivo) e a segunda correspondendo à situação de equilíbrio da cavidade de erosão.

Para cada configuração foram utilizados dois modelos de turbulência distintos. Assim, resultou um total de quatro simulações.

Numa perspetiva de alargar este estudo, foi ainda desenvolvida uma quinta simulação do escoamento em torno de um pilar com o dobro do diâmetro inicial, em fundo plano.

Para as simulações números 3 e 4, foi necessário construir um modelo geométrico que representasse a configuração do fundo, após o processo erosivo ter atingido a fase de equilíbrio. A caracterização da sua geometria foi um dos maiores desafios deste trabalho.

O método fotográfico utilizado revelou ser de baixo custo e eficaz na caracterização da geometria de equilíbrio do fundo do canal. Foi possível comprovar que os gradientes de velocidade aumentam com o diâmetro, assim como a tensão de arrastamento das partículas do material de fundo.

Na globalidade dos critérios, o modelo LES foi o que mostrou melhor desempenho. Embora a modelação experimental continue a ser uma ferramenta valiosa e fiável no estudo da erosão localizada em pilares, a sua combinação com a modelação numérica, como foi feito neste estudo, apresenta vantagens muito relevantes para o desenvolvimento desta área do conhecimento.

## Referências

- Anderson, J. (1995). *Computational Fluid Dynamics – The Basics with Applications*. McGraw-Hill, Maryland.
- Brito, L. R. (2011). *Estudo Experimental de Erosões Localizadas Junto de Pilares Complexos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, Porto.
- Cardoso, A.H. (1998). *Erosões localizadas junto de esporões fluviais e de encontros e pilares de pontes*. Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, texto de apoio didático, IST, Lisboa.
- Fael, C. M. (2007). *Erosões Localizadas junto de Encontros de Pontes e Respetivas Medidas de Proteção*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior.
- Lencastre, A. (1972). *Hidráulica Geral*. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Pinheiro, R. C. (2010) *Estudo Experimental da Erosão de Pilares de Pontes*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, Porto.
- Pinto, L. C. (2008). *Análise por Simulação Numérica do Desprendimento de Vórtice de um Cilindro Circular em Movimento Forçado*. Dissertação de Pós-Graduação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Quintela, A. (2000). *Hidráulica*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- Shields (1936) *Anwendung der Aenlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die schiebbewegung*. PhD thesis, Berlin.
- Silva, R. P. (2008). *Estudo da Erosão de Pilares de Pontes*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, 2008.
- White, F. (2006). *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill Companies; 6th edition, South Kingstown.