

# **MODELAÇÃO EXPERIMENTAL DE EROSÕES LOCALIZADAS JUNTO DE PILARES COMPLEXOS**

**JOSÉ CARLOS SÁ LEITÃO TEIXEIRA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA**

---

Orientador: Professor Doutor Rodrigo Jorge Oliveira Maia

---

Coorientador: Professor Doutor João Pedro Gomes Moreira Pêgo

JULHO 2013

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais, e todos aqueles que gostam de mim

*“I Will Always Choose a Lazy Person to Do a Difficult Job... Because He will Find an Easy Way to Do it!”*

*Bill Gates*



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor Doutor Rodrigo Maia pela orientação dada durante o decorrer da dissertação.

Desejo agradecer aos Engenheiros Pedro Ramos e Nuno Figueiredo por toda a ajuda e correções apresentadas a partir da leitura de sucessivas versões da dissertação.

Agradeço a Paul Chabas e mais uma vez ao Engenheiro Pedro Ramos por todo o auxílio na preparação e realização dos ensaios laboratoriais presentes nesta dissertação.

Um grande agradecimento a todos os meus amigos por me terem obrigado a manter focado no trabalho e a descansar do mesmo.

E finalmente, o maior obrigado aos meus pais, por tudo.



## **RESUMO**

A erosão em cursos de água ocorre quando ocorrem velocidades suficientemente elevadas para que haja arrastamento de sedimentos. Quando existe um obstáculo ao escoamento, como por exemplo um pilar, ocorre erosão localizada.

Nesta dissertação pretende-se estudar a erosão localizada na base de pilares complexos, para diferentes disposições, e quantificar o efeito de cada um dos elementos que o constituem por um método de decomposição de efeitos. O estudo considera que um pilar complexo é constituído por uma coluna, maciço de encabeçamento e um grupo de estacas.

No âmbito desta dissertação, foram realizados ensaios no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em que se analisou a profundidade de erosão máxima da cavidade de erosão provocada em cada configuração de ensaio. Além disso foram considerados dados laboratoriais obtidos anteriormente no âmbito do projeto onde este trabalho se insere.

Foram aplicadas ao pilar complexo metodologias de previsão de erosão baseadas na sobreposição das componentes da erosão propostas por diversos autores para permitir uma comparação com os dados obtidos laboratorialmente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Hidráulica, fluvial, pilar, complexo, erosão





**ABSTRACT**

Erosion in a stream occurs when there are velocities high enough to allow sediment transportation. When an element obstructs the flow, a bridge pier for example, local scour can occur.

This thesis intends to study local scour on the base of complex piers with different settings and evaluate the effect of each of its components. This study considers a complex pier made of a column, a pile cap and a pile group made of four piles aligned with the flow.

For this thesis, several experiments in the Hydraulics Laboratory of the “Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto” were undertaken, where the maximum local scour depth was measured for each pier setting. Experimental data from previous experiments in the same project was also considered.

Scour prediction methods developed by several authors were computed with the pier characteristics allowing comparison with the experimental data.

**KEYWORDS:** Hydraulics, River, Pier, Complex, Scour



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL .....	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	1
<b>2. EROSÃO EM PILARES</b> .....	3
2.1. EROSÃO GENERALIZADA .....	3
2.2. EROSÃO LOCALIZADA .....	4
2.2.1. EFEITO DA INTENSIDADE DO ESCOAMENTO E DA UNIFORMIDADE DOS SEDIMENTOS DO LEITO .....	6
2.2.1.1. Método de Neil, 1967 .....	9
2.2.1.2. Método de Garde, 1970 .....	9
2.2.1.3. Método do FDT, 2010 .....	9
2.2.2. EFEITO DA ALTURA DO ESCOAMENTO E LARGURA DO PILAR .....	10
2.2.3. EFEITO DA DIMENSÃO DOS SEDIMENTOS DO LEITO .....	11
2.2.4. EFEITO DA ORIENTAÇÃO DO ESCOAMENTO .....	13
2.2.5. EFEITO DA GEOMETRIA DO PILAR .....	14
2.3. EROSÃO EM PILARES COMPLEXOS .....	15
<b>3. MÉTODOS DE PREVISÃO DE EROSÕES EM PILARES COMPLEXOS</b> .....	19
3.1. ENQUADRAMENTO GERAL .....	19

<b>3.2. MÉTODO RICHARDSON E DAVIS (2001)</b> .....	20
3.2.1. DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE EROÇÃO ASSOCIADA À COLUNA DO PILAR COMPLEXO.....	23
3.2.2. DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE EROÇÃO ASSOCIADA AO MACIÇO DE ENCABEÇAMENTO.....	24
3.2.3. DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE EROÇÃO ASSOCIADA AO GRUPO DE ESTACAS.....	25
<b>3.3. MÉTODO FDT (2010)</b> .....	28
3.3.1. CALCULO DA PROFUNDIDADE MÁXIMA DE EROÇÃO PARA O CASO 1 .....	33
3.3.2. CALCULO DA PROFUNDIDADE MÁXIMA DE EROÇÃO PARA O CASO 2.....	39
3.3.3. CALCULO DA PROFUNDIDADE MÁXIMA DE EROÇÃO PARA O CASO 3.....	41
<b>4. ENSAIOS LABORATORIAIS</b> .....	45
<b>4.1. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL</b> .....	47
<b>4.2. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO</b> .....	50
4.2.1. MEDIÇÃO DOS CAUDAIS (CAUDALÍMETROS) .....	50
4.2.2. MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE EROÇÃO (LIMNÍMETRO).....	51
<b>4.3. CONDIÇÕES DE ENSAIO</b> .....	51
4.3.1. CARATERIZAÇÃO DA VELOCIDADE CRÍTICA DE INÍCIO DE MOVIMENTO .....	51
4.3.2. CARATERIZAÇÃO DO TEMPO DE EQUILÍBRIO .....	52
<b>4.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	52
4.4.1. PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS .....	52
4.4.2. INÍCIO DO ENSAIO.....	54
4.4.3. MEDIÇÕES E TERMO DO ENSAIO .....	54
<b>4.5. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS</b> .....	54
4.5.1. ENSAIOS DA SÉRIE 3.....	54
4.5.2. ENSAIOS DA SÉRIE 2 .....	55

<b>5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	57
<b>5.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SÉRIE 3</b> .....	57
5.1.1. ENSAIO A3 .....	58
5.1.2. ENSAIO B3 .....	60
5.1.3. ENSAIO C3 .....	61
5.1.4. ENSAIO D3 .....	62
5.1.5. ENSAIO E3 .....	63
5.1.6. ENSAIO F3 .....	64
<b>5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SÉRIE 2</b> .....	65
<b>5.3. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS LABORATORIAIS</b> .....	68
5.3.1. ANÁLISE DA CONTRIBUIÇÃO DE CADA ELEMENTO DO PILAR COMPLEXO NO PROCESSO EROSIVO .....	68
5.3.2. ANÁLISE COMPARATIVA COM OS MÉTODOS DE PREVISÃO .....	70
<b>6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> .....	73
<b>6.1. CONCLUSÕES</b> .....	73
<b>6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> .....	74
<b>Bibliografia</b> .....	75
<b>Anexos</b> .....	77



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. – escoamento de aproximação a montante de um pilar: a) pressões; b) velocidades (Lança, 2012) .....	5
Figura 2.2. – escoamento na envolvente de um pilar (adaptado de Melville e Coleman, 2000) .....	5
Figura 2.3. – Variação da profundidade considerando a não uniformidade dos sedimentos do leito de um rio em função da velocidade do escoamento (adaptado de Melville e Coleman, 2000) .....	8
Figura 2.4. – Variação das profundidades de erosão em função da altura do escoamento e largura do pilar (adaptado de Melville e Coleman, 2000) .....	11
Figura 2.5. – Variação da profundidade de erosão em função da granulometria do fundo (Melville e Coleman, 2000) .....	12
Figura 2.6. – Variação da profundidade de erosão em função da granulometria do fundo (Lança, 2012) .....	13
Figura 2.7. – Esboço das cavidades de erosão em pilares alinhados e desalinhados com o escoamento (Adaptado de Breusers e Raudviki, 1991) .....	13
Figura 2.8. – Variação da profundidade de erosão num pilar em função do angulo de aproximação do escoamento (Melville e Coleman, 2000).....	14
Figura 2.9. – Diferentes formas e tipologias de pilares (adaptado de Melville e Coleman, 2000) .....	15
Figura 2.10. – Representação de um pilar complexo (adaptado de Melville e Coleman, 2000) .....	16
Figura 2.11. – Representação das diferentes disposições de pilares complexos (adaptado de Melville e Coleman, 2000) .....	17
Figura 2.12. – Variação da profundidade de erosão em pilares complexos (adaptado de Melville e Coleman, 2000) .....	17
Figura 3.1. – Simplificação do pilar complexo (adaptado de Richardson e Davis, 2001) .....	22
Figura 3.2. – Valores de $K_{\text{hpier}}$ (adaptado de Richardson e Davis, 2001) .....	23
Figura 3.3. – Gráfico para a obtenção de $a^*_{pc}$ (adaptado de Richardson e Davis, 2001) .....	24
Figura 3.4. – Esboço para explicação da altura e velocidade na secção exposta do maciço (adaptado de Richardson e Davis, 2001) .....	25
Figura 3.5. – Largura projetada das estacas (adaptado de Richardson e Davis, 2001) .....	26
Figura 3.6. – Gráfico para determinação de $K_{sp}$ (Richardson e Davis, 2001) .....	27

Figura 3.7. – Gráfico para a determinação de $K_m$ (Adaptado de Richardson e Davis, 2001) .....	27
Figura 3.8. – Gráfico para a determinação de $K_{hpg}$ (Richardson e Davis, 2001).....	28
Figura 3.9. – Divisão das componentes de um pilar complexo (adaptado de FDT, 2010) .....	30
Figura 3.10. – Diâmetros equivalentes de cada elemento do pilar complexo (adaptado de FDT, 2010)	31
Figura 3.11. – Diâmetro equivalente para o pilar complexo completo (adaptado de FDT, 2010).....	32
Figura 3.12. – Esboço dos três casos possíveis (adaptado de FDT, 2010).....	32
Figura 3.13. – Esquema do pilar complexo para o caso 1, vista fronta (esquerda) e vista em planta (direita) (adaptado de FDT, 2010).....	33
Figura 3.14. – Representação das distancias $f_1$ e $f_2$ (adaptado de FDT, 2005).....	34
Figura 3.15. – Exemplificação do cálculo de $W_p$ (adaptado de FDT, 2010).....	37
Figura 3.16. – Esquema do pilar complexo para o caso 2, vista frontal (esquerda) e vista em planta (direita) (adaptado de FDT, 2010).....	39
Figura 3.17. – Esquema do pilar complexo para o caso 3, vista frontal (esquerda) e vista em planta (direita) (adaptado de FDT, 2010).....	41
Figura 4.1. – Plano de ensaios.....	46
Figura 4.2. – Vista geral do canal da instalação experimental .....	47
Figura 4.3. – Esquema da instalação experimental .....	48
Figura 4.4. – Esquema do canal de ensaios – esquema longitudinal (Pinheiro, 2010) .....	48
Figura 4.5. – Curva granulométrica do material de fundo .....	49
Figura 4.6. – Modelo do pilar complexo utilizado nos ensaios.....	49
Figura 4.7. – Dimensões do modelo experimental em metros .....	50
Figura 4.8. – Caudalímetros para medição de valores instantâneos.....	50
Figura 4.9. – Limnómetro para medição de profundidades de erosão aplicado na estrutura de suporte.	51
Figura 4.10. – Aspeto final da regularização da areia .....	53
Figura 4.11. – Proteções têxteis aplicadas em volta dos elementos a ensaiar .....	53
Figura 4.12. – Esquema das configurações da série 3.....	55
Figura 4.13. – Esquema das configurações da série 2.....	56



Figura 5.1. – Evolução da profundidade de erosão para cada ensaio da série 3.....	57
Figura 5.2. – Esquematisação da configuração do pilar no ensaio A3 (vista de montante para jusante unidades em metros) .....	59
Figura 5.3. – Fotografia do leito no ensaio A3.....	59
Figura 5.4. – Esquematisação da configuração do pilar no ensaio B3 (vista de montante para jusante unidades em metros) .....	60
Figura 5.5. – Fotografia do ensaio B3.....	60
Figura 5.6. – Esquematisação da configuração do pilar no ensaio C3 (vista de montante para jusante unidades em metros) .....	61
Figura 5.7. – Fotografia do ensaio C3 (face montante do maciço) .....	61
Figura 5.8. – Esquematisação da configuração do pilar no ensaio D3 (vista de montante para jusante unidades em metros) .....	62
Figura 5.9. – Fotografia do ensaio D3 (face de montante do maciço) .....	62
Figura 5.10. – Esquematisação da configuração do pilar no ensaio E3 (vista de montante para jusante unidades em metros) .....	63
Figura 5.11. – Fotografia do ensaio E3 (face de montante do maciço).....	63
Figura 5.12. – Esquematisação da configuração do pilar no ensaio F3 (vista de montante para jusante unidades em metros) .....	64
Figura 5.13. – Fotografia do ensaio F3 (face de montante do maciço).....	64
Figura 5.14. – Evolução da profundidade de erosão do ensaio F3 e identificação do patamar associado ao maciço de encabeçamento .....	65
Figura 5.15. – Esquematisação da configuração do pilar nos ensaios E2 (à esquerda) e F2 (à direita) (vista de montante para jusante).....	65
Figura 5.16. – Fotografia do ensaio E2, instantes antes de retirar a coluna .....	66
Figura 5.17. – Evolução temporal da profundidade de erosão do ensaio E2 .....	67
Figura 5.18. – Fotografia do ensaio F2, instantes antes de retirar a coluna .....	67
Figura 5.19. – Evolução temporal da profundidade de erosão do ensaio F2.....	68
Figura 5.20. – Representação das configurações C1, D1 e E1 (vista de montante para jusante).....	69
Figura 5.21. – Esquematisação da estrutura do escoamento num pilar complexo (adaptado de Moreno, 2012) .....	69

Figura 5.22. – Quantificação da contribuição de cada elemento em função da disposição do maciço de encabeçamento(à esquerda – configuração E, no meio – configuração D, à direita – configuração C) 70

Figura 5.23. – Evolução da profundidade em função da distância do maciço de encabeçamento ao fundo .....71

Figura A.1 – Evolução temporal do ensaio B3 .....78

Figura A.2 – Evolução temporal do ensaio C3 .....80

Figura A.3 – Evolução temporal do ensaio D3 .....82

Figura A.4 – Evolução temporal do ensaio E3.....85

Figura A.5 – Evolução temporal do ensaio F3.....88

Figura A.6 – Evolução temporal do ensaio E2.....90

Figura A.7 – Evolução temporal do ensaio F2.....92

## ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Quadro 2.1. – Classificação do processo de erosão em função da altura do escoamento e largura do pilar (adaptado de Melville e Coleman, 2000).....	11
Quadro 2.2. – Valores para o coeficiente de forma de pilares (adaptado de Melville e Coleman, 2000).....	15
Quadro 3.1. – Determinação do coeficiente de forma (adaptado de Richardson e Davis, 2001).....	21
Quadro 3.2. – Determinação do coeficiente do ângulo de ataque (adaptado de Richardson e Davis, 2001) .....	21
Quadro 3.3. – Determinação do coeficiente da configuração dos fundos (adaptado de Richardson e Davis, 2001) .....	21
Quadro 4.1. – Grupos elevatórios da instalação experimental .....	47
Quadro 4.2. – Valores de velocidade crítica calculados pelos métodos propostos por diferentes autores .....	52
Quadro 5.1. – Profundidades máximas em cada ensaio realizado .....	58
Quadro 5.2. – Profundidades máximas no fim de cada ensaio.....	68
Quadro 5.3. – Valores da profundidade de erosão medidos e valores previstos .....	71
Quadro A.1. – Valores medidos laboratorialmente no ensaio B3 .....	78
Quadro A.2. – Valores medidos laboratorialmente no ensaio C3 .....	79
Quadro A.3. – Valores medidos laboratorialmente no ensaio D3.....	81
Quadro A.4. – Valores medidos laboratorialmente no ensaio E3 .....	83
Quadro A.5. – Valores medidos laboratorialmente no ensaio F3.....	86
Quadro A.6. – Valores medidos laboratorialmente no ensaio E2 .....	89
Quadro A.7. – Valores medidos laboratorialmente no ensaio F2.....	91

## **SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS**

$a$  – largura das estacas [m]

$a_{\text{prog}}$  – largura projetada do grupo de estacas [m]

$b$  – largura do pilar [m]

$b_{\text{col}}$  – largura da coluna do pilar [m]

$b_{\text{pc}}$  – largura do maciço de encabeçamento

$b^*$  - largura da fundação do pilar [m]

$b_{\text{pc}}$  – largura do maciço de encabeçamento [m]

$b_{\text{pier}}$  – largura da coluna do pilar [m]

$b^*_{\text{pc}}$  – largura equivalente do maciço de encabeçamento [m]

$b^*_{\text{pg}}$  – largura equivalente do grupo de estacas [m]

$B$  – largura do canal [m]

$d_{50}$  – dimensão mediana dos sedimentos de fundo [mm]

$d_s$  – profundidade de erosão [m]

$D^*$  - diâmetro equivalente do pilar complexo [m]

$D^*_{\text{col}}$  – diâmetro equivalente da coluna do pilar [m]

$D^*_{\text{pc}}$  – diâmetro equivalente do maciço de encabeçamento [m]

$D^*_{\text{pg}}$  – diâmetro equivalente do grupo de estacas [m]

$D^*_{(\text{col})+(\text{pc})}$  – diâmetro equivalente da coluna do pilar e do maciço de encabeçamento [m]

$f$  – distância entre as faces do maciço de encabeçamento e a coluna do pilar [m]

$Fr$  – numero de Froude

$g$  – aceleração da gravidade [ $\text{m/s}^2$ ]

$h$  – altura do escoamento [m]

$h_0$  – distância desde a base do maciço de encabeçamento ao fundo [m]

$h_1$  – distância desde o fundo até à base do maciço de encabeçamento após erosão associada ao pilar [m]

$h_3$  – distância desde o fundo até à base do maciço de encabeçamento após erosão associada à coluna do pilar e ao maciço de encabeçamento [m]

$h_{pg}$  – altura exposta das estacas do grupo de estacas após a erosão associada à coluna e ao maciço de encabeçamento [m]

$H$  – distância do topo do maciço ao fundo [m]

$H_{pc}$  – distância da base do maciço de encabeçamento ao fundo [m]

$H_{pg}$  – distância do topo das estacas ao fundo [m]

$H_{pg(corr)}$  – distancia do topo das estacas ao fundo corrigida para o efeito das estacas [m]

$K_1$  – coeficiente de forma do pilar

$K_2$  – coeficiente do ângulo de incidência do escoamento no pilar

$K_3$  – coeficiente da configuração dos fundos

$K_D$  – coeficiente das características dos sedimentos

$K_f$  – coeficiente do bordo saliente do maciço de encabeçamento

$K_f K_a$  – coeficiente para grupos de estacas dispostas em duas linhas

$K_t$  – coeficiente do efeito do tempo

$K_g$  – coeficiente de forma da secção do escoamento

$K_h$  – coeficiente da relação entre as dimensões do pilar e a profundidade de escoamento

$K_h$  (FDT, 2010) – coeficiente da posição do grupo de estacas em relação ao escoamento

$K_l$  – coeficiente da intensidade do escoamento

$K_{hpier}$  – coeficiente que tem em conta a altura de pilar acima do leito do rio e da largura do maciço que se encontra à frente do pilar

$K_{hpg}$  – coeficiente de altura das estacas

$K_m$  – coeficiente do numero de colunas de estacas

$K_{sp}$  – coeficiente do espaçamento entre estacas

$l$  – comprimento do pilar [m]

$m$  – numero de filas de estacas do grupo de estacas

$n$  – numero de colunas de estacas do grupo de estacas

$sg$  – razão entre os pesos volúmicos do material de fundo e da água

$S$  – espaçamento entre estacas [m]

$S_0$  – inclinação do leito

$S_f$  – inclinação da linha de energia

$t$  – tempo associado à erosão a calcular [s]

$t_e$  – tempo associado à ocorrência da erosão de equilíbrio [s]

$T$  – altura do maciço de encabeçamento [m]

$U$  – velocidade média do escoamento [m/s]

$U_1$  – velocidade inicial do escoamento [m/s]

$U_2$  – velocidade do escoamento associada ao maciço de encabeçamento [m/s]

$U_3$  – velocidade do escoamento associada ao grupo de estacas [m/s]

$U_a$  – velocidade que leva à rotura da camada de encouraçamento (*Threshold velocity*)

$U_c$  – velocidade crítica [m/s]

$U_f$  – velocidade média na secção exposta [m/s]

$\nu$  – viscosidade cinemática da água

$y$  – distância ao fundo [m]

$y_1$  – altura inicial do escoamento, imediatamente a montante do pilar [m]

$y_{1(\text{corr})}$  – altura inicial do escoamento corrigida para o efeito das estacas [m]

$y_2$  – altura do escoamento após erosão associada à coluna do pilar [m]

$y_{2(\text{max})}$  – profundidade limite associada à coluna do pilar [m]

$y_3$  – altura do escoamento após erosão associada à coluna do pilar e ao maciço de encabeçamento [m]

$y_{3(\text{max})}$  – profundidade limite associada ao maciço de encabeçamento [m]

$y_f$  – altura do maciço exposto ao escoamento [m]

$y_s$  – profundidade de erosão associada ao diâmetro  $D^*$  [m]

$y_{\text{spc}}$  – profundidade de erosão associada ao maciço de encabeçamento [m]

$y_{\text{spier}}$  – profundidade de erosão associada à coluna do pilar [m]

$y_{\text{spg}}$  – profundidade de erosão associada ao grupo de estacas [m]

$y_{\text{so pier}}$  – erosão provocada num pilar simples sobre as mesmas condições que o pilar complexo relativamente à coluna do pilar [m]

$y_{\text{so pg}}$  – erosão provocada num pilar simples sobre as mesmas condições que o pilar complexo relativamente ao grupo de estacas [m]

$\alpha$  – ângulo de incidência do escoamento no pilar [°]

$\sigma_D$  – coeficiente de gradação

$\gamma_s$  – peso volúmico do material do fundo [ $\text{KN/m}^3$ ]

$\gamma$  – peso volúmico da água [ $\text{KN/m}^3$ ]

$\rho$  – massa volúmica da água [ $\text{Kg/m}^3$ ]

$\rho_s$  - massa volúmica do material de fundo [ $\text{Kg/m}^3$ ]

DEC – Departamento de Engenharia Civil

FCT – Fundação para Ciência e Tecnologia

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FDT – Florida Department of Transportation





# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

O fenómeno de erosão ocorre em rios sempre que, em primeira análise, se verifique uma velocidade de escoamento suficiente para gerar tensões com capacidade de arrastar sedimentos. A erosão pode ser causada por uma grande diversidade de fenómenos, como por exemplo, a variação dos caudais naturais, as características topográficas do curso de água e a existência de obstáculos que alteram o curso natural.

Na realidade, desde tempos remotos, que devido à necessidade de travessia entre margens de cursos de água, as pontes têm uma grande importância para o ser humano. Na generalidade dos casos, a ponte tem os 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 no leito do rio, denominada cavidade de erosão. A erosão localizada junto de pilares de pontes pode comprometer a estabilidade destes elementos e, conseqüentemente, a da ponte.

As erosões provocadas pela existência de obstáculos são as chamadas erosões localizadas, temática que tem vindo a merecer interesse desde sempre mas que tem sido alvo de mais estudo nos últimos anos. A maioria dos estudos sobre a erosão localizada em pilares incide sobre o efeito de pilares simples no leito do rio. No entanto, e cada vez mais, a construção de pilares complexos aparenta ser uma opção mais viável do ponto de vista económico já tendo sido utilizados na construção de pontes em Portugal, como, por exemplo, a ponte Vasco da Gama no rio Tejo. Um pilar complexo, ao contrário dos pilares simples, é composto por uma coluna de pilar fundada num grupo de estacas encabeçado por um maciço de encabeçamento.

Os ensaios realizados no âmbito desta tese têm como objetivo contribuir para a caracterização da erosão localizada em pilares complexos. Este estudo insere-se no projeto de investigação “Estudo experimental de erosões localizadas junto de pilares complexos” (referência PTDC/ECM/101353/2008), apoiado pela Fundação para Ciência e a Tecnologia (FCT), do qual fazem parte várias instituições de ensino superior. No âmbito desta dissertação realizaram-se alguns dos ensaios previstos nesse projeto, com o objetivo de quantificar as profundidades de erosão associadas a pilares complexos por um método de decomposição de efeitos de cada uma das componentes dos pilares de algumas das disposições consideradas no referido projeto. A análise de resultados foi, assim, feita por comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os previstos por diferentes métodos, propostos por vários autores, que consideram uma metodologia de sobreposição de efeitos, ao contrário da metodologia de decomposição de efeitos considerada para analisar os resultados experimentais.

## **1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

A presente dissertação está dividida em 6 capítulos, sendo este o primeiro, de carácter introdutório.

No segundo capítulo é apresentado o fenómeno de erosão em pilares assim como os fatores que o influenciam. Além disso, é descrito mais especificamente o fenómeno no caso de pilares complexos.

No capítulo 3 são apresentados os métodos de previsão de erosão em pilares complexos.

No quarto capítulo é descrito todo o processo associado aos ensaios laboratoriais.

No capítulo 5 são analisados os dados obtidos laboratorialmente e comparados com métodos de previsão de profundidades de erosão

No sexto e último capítulo são apresentadas conclusões sobre o trabalho desenvolvido.

## 2

# EROSÃO EM PILARES

O processo de erosão é dividido, de acordo com a literatura existente, em dois processos diferentes: erosão geral e erosão localizada. A erosão geral é causada por caudais elevados, existência de curvas ou confluências de escoamento, sendo independente de quaisquer obstáculos ao escoamento. A erosão localizada ocorre quando existem obstáculos ao escoamento ou quando ocorrem diminuições da secção natural do rio.

A ação do Homem tem um efeito acentuado na erosão que ocorre em rios, visto que este é a causa de muitas alterações ao escoamento natural de um rio. Exemplos desta influência são obras que provocam contrações do escoamento ou mesmo retenção de água. A extração de materiais do fundo é, também, um processo artificial que pode afetar negativamente um curso de água natural se não existir um controlo eficaz sobre quem exerce essa atividade.

Quando existe um pilar fundado no leito de um rio poderá verificar-se a ocorrência de erosão localizada, sendo esta causada por diversos efeitos.

No presente capítulo serão abordados os diferentes tipos de erosão que ocorrem num rio, com especial atenção ao fenómeno da erosão localizada, mais especificamente em pilares complexos.

### 2.1 – EROSÃO GENERALIZADA

A erosão generalizada ocorre independentemente da existência de obstáculos ao escoamento e pode ser associada a fenómenos de curta duração, como fenómenos de cheia, ou longa duração, como o assoreamento. Alguns dos mais importantes são o assoreamento e desassoreamento natural, presença de curvas no leito, confluência de cursos de água e a configuração natural dos fundos. Estes fenómenos são descritos aprofundadamente por Silva (2008).

O assoreamento consiste na subida generalizada do fundo do rio devido à deposição de sedimentos arrastados. O assoreamento é um fenómeno que pode representar a tendência morfológica natural do leito do rio, sendo assim considerado um efeito de longa duração. Por outro lado o desassoreamento é o fenómeno da descida generalizada das cotas do fundo de um rio.

A existência de uma curva no escoamento de um rio afeta a erosão e assoreamento do fundo. O fundo dos rios apresenta uma sequência de fundões e baixios alternados. Os fundões originam-se no extradorso das curvas, por ação de correntes secundárias. No intradorso existe uma tendência para deposição de material originando zonas de menor profundidade (Lencastre e Franco, 1984).

Tal como a existência de curvas, a confluência de rios ou de leitos do mesmo rio é um fenómeno que afeta a erosão do leito. Nesta situação a erosão ocorre devido ao encontro de dois escoamentos com características diferentes. Este tipo de erosão pode desenvolver-se ao longo de grandes períodos de tempo ou em caso de cheias isoladas (Yeo, 1991). Devido à concentração de caudais num ponto, a capacidade de transporte é aumentada para jusante o que pode levar à amplificação de erosões localizadas que existam no escoamento.

## **2.2 – EROSÃO LOCALIZADA**

A erosão localizada ocorre quando é inserido um obstáculo ao escoamento natural do rio, como são exemplo os pilares de pontes, ou quando ocorre uma contração horizontal da secção ou do escoamento. As cavidades de erosão formadas em redor de obstáculos são formadas em função do comportamento do escoamento em redor deste e das características dos fundos dum curso de água.

Os fenómenos mais relevantes que ocorrem no escoamento na envolvente de um pilar são a superfície de enrolamento, o escoamento descendente, os vórtices em ferradura e os vórtices de esteira, que podem ser observados nas figuras 2.1 e 2.2. A estagnação do escoamento a montante do pilar leva a um acréscimo das pressões que origina, por sua vez, a formação de um escoamento descendente. Na base do pilar o escoamento descendente enrola, formando vórtices em ferradura que se dissipam pela lateral do pilar mantendo a velocidade máxima do escoamento descendente no interior da cavidade de erosão. Na superfície livre, imediatamente a montante do pilar forma-se uma superfície de enrolamento com sentido contrário ao dos vórtices em ferradura. O aumento da velocidade em frente e dos lados do pilar resulta num aumento da capacidade de transporte do escoamento levando ao aparecimento de uma cavidade de erosão (Lança, 2012).

O acréscimo de pressões gerado leva a um aumento das velocidades de escoamento na envolvente do pilar que conduz à formação de vórtices de esteira quando interage com o escoamento da secção imperturbada a jusante do pilar. Os vórtices de esteira têm um funcionamento semelhante ao de um tornado, sugando o material de fundo para a superfície livre, sendo esse material transportado em suspensão para jusante. A intensidade dos vórtices de esteira diminui à medida que estes se afastam do pilar, levando a que o material arrastado se deposite para jusante (Lança, 2012).

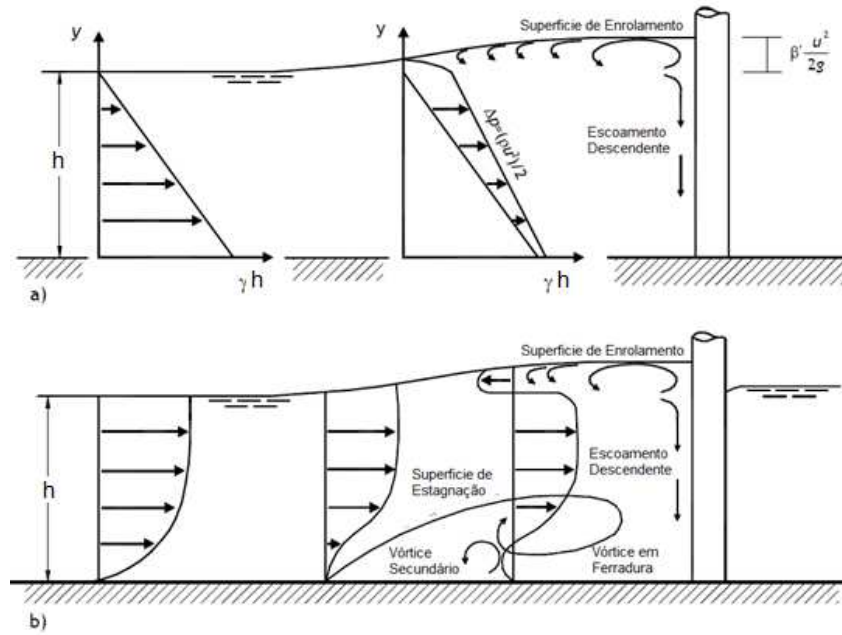


Figura 2.1 – escoamento de aproximação a montante de um pilar: a) pressões; b) velocidades (adaptado de Lança, 2012)

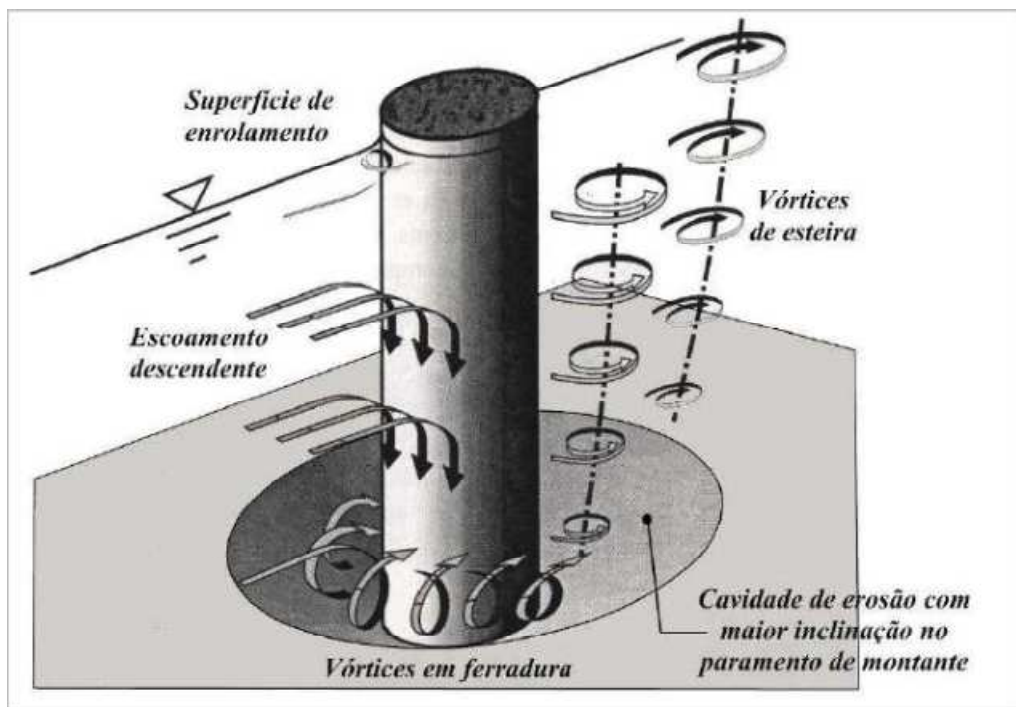


Figura 2.2 – escoamento na envolvente de um pilar (adaptado de Melville e Coleman, 2000)

A cavidade de erosão criada pela presença do pilar no escoamento é normalmente caracterizada por ter uma inclinação elevada a montante. A profundidade máxima da cavidade de erosão ocorre no ponto imediatamente a montante do pilar. A inclinação do paramento de jusante da cavidade de erosão é menor que a de montante que tem a inclinação igual ao ângulo de atrito, pelo que, a cavidade de erosão tem um maior desenvolvimento para jusante do pilar (Pinheiro, 2010).

O processo de erosão em pilares isolados é caracterizado por uma panóplia de variáveis independentes, entre elas (Fael, 2007):

- Variáveis do escoamento imperturbado: altura do escoamento do escoamento,  $h$ ; inclinação da linha de energia,  $S_f$  e aceleração da gravidade,  $g$ ;
- Variáveis do fluido: massa volúmica,  $\rho$  e viscosidade cinemática,  $\nu$ ;
- Variáveis do material do fundo: dimensão mediana,  $d_{50}$ ; coeficiente de gradação,  $\sigma_D$  e massa volúmica,  $\rho_s$ ;
- Variáveis descritivas do pilar: largura do pilar,  $b$ ; coeficiente de forma do pilar,  $K_1$  e coeficiente do ângulo de incidência do escoamento no pilar,  $K_2$ ;
- Variáveis que descrevem a geometria do canal: largura do canal,  $B$ ; inclinação do leito,  $S_0$  e coeficiente de forma da secção do escoamento,  $K_g$ ;
- Tempo associado à erosão,  $t$ .

Em que  $\sigma_D$  é definido como  $0,5 \cdot (d_{84,1}/d_{50} \cdot d_{50}/d_{15,9})$  e que  $d_x$  é o diâmetro do peneiro com uma percentagem  $x$  de passados. O coeficiente de forma,  $K_1$ , é definido como a razão entre as profundidades de equilíbrio medidas num pilar com uma forma específica e num pilar cilíndrico. O coeficiente do ângulo de incidência do escoamento no pilar,  $K_2$ , é a razão entre as profundidades de erosão de equilíbrio medidas num pilar em que o escoamento incide com um ângulo  $\alpha \neq 0$  e um pilar com o escoamento alinhado com o pilar. O coeficiente de forma da secção do escoamento,  $K_g$ , é a razão entre a profundidade de erosão de equilíbrio medida num pilar instalado num canal com uma forma específica e a profundidade de equilíbrio medida num pilar com as mesmas características instalado num canal com uma secção retangular.

É de referir que a velocidade crítica,  $U_c$ , não é incluída nesta lista visto que pode ser completamente definida como função das variáveis listadas.

Foi demonstrado por Lança (2012), através de análise dimensional e a partir das variáveis referidas acima, em função de que fatores é que pode ser definida a profundidade de erosão, como se pode verificar na equação (2.1).

$$\frac{d_s}{b} = \varphi \left( \frac{h}{b}, \frac{U}{U_c}, \frac{U \cdot D_{50}}{\nu}, \frac{b}{D_{50}}, \sigma_D, K_1, K_2 \right) \quad (2.1)$$

O efeito que cada uma destas variáveis tem para a profundidade da cavidade de erosão é explicado nos subcapítulos seguintes.

## 2.2.1 – EFEITO DA INTENSIDADE DO ESCOAMENTO E DA UNIFORMIDADE DOS SEDIMENTOS DO LEITO

Em leitos de rio, apenas ocorre erosão quando as ações associadas ao escoamento aplicam forças nos sedimentos que ultrapassam as forças estabilizadoras associadas ao efeito da gravidade (Breusers e Raudviki, 1991).

Em escoamentos sem transporte sedimentar e com um fundo composto por sedimentos uniformes a profundidade de erosão aumenta em função da velocidade do escoamento, até ser atingida a

velocidade crítica (*threshold velocity*) para a qual se verifica a profundidade máxima de erosão (*threshold peak*).

A erosão localizada num pilar inserido num leito de rio pode ocorrer em condições com ou sem transporte sólido generalizado. É importante esta distinção visto que o desenvolvimento da cavidade de erosão é diferente para cada uma das situações (Melville e Coleman, 2000).

A diferença entre os dois tipos pode ser caracterizada da seguinte forma por:

- Erosão sem transporte sólido generalizado: Este cenário ocorre quando não existe movimento do material de fundo a montante do obstáculo, onde não existe perturbação associada ao obstáculo. Nesta situação, a tensão de arrastamento no fundo é no máximo igual à tensão crítica de arrastamento. Não ocorre reposição do material erodido, atingindo-se assim a profundidade máxima, ou de equilíbrio, de erosão quando já não houver capacidade de remoção, atingindo-se o equilíbrio estático. Este é o cenário que é normalmente reproduzido em ensaios laboratoriais, tal como os realizados no âmbito desta tese, mencionados adiante no capítulo 4 (Chabert, 1956).
- Erosão com transporte sólido generalizado: Este cenário ocorre quando existe alimentação da cavidade de erosão com sedimentos arrastados de montante. Nesta situação o equilíbrio é atingido quando a capacidade de remoção do material a montante da cavidade de erosão é igual à capacidade de transporte de sedimentos para o interior desta, atingindo-se o equilíbrio dinâmico. Verifica-se que a velocidade média do escoamento é superior à velocidade crítica de início de movimento (Chabert, 1956).

Para os casos em que existe uniformidade do material de fundo (para solos aluvionares considera-se que existe uniformidade quando o coeficiente de gradação for inferior a 1,5) as curvas granulométricas podem ser descritas por apenas uma dimensão, a dimensão mediana. Para situações em que não existe uniformidade é necessário ter em consideração o coeficiente de gradação além da dimensão mediana.

Além de ser necessário considerar a velocidade média do escoamento é necessário ter em consideração a não uniformidade do fundo, visto que as partículas maiores podem formar camadas de proteção alterando o desenvolvimento da cavidade de erosão. Foi apresentado por Melville e Coleman (2000) um gráfico que apresenta a variação da profundidade de erosão em função da intensidade do escoamento e da curva granulométrica do material de fundo (figura 2.3)

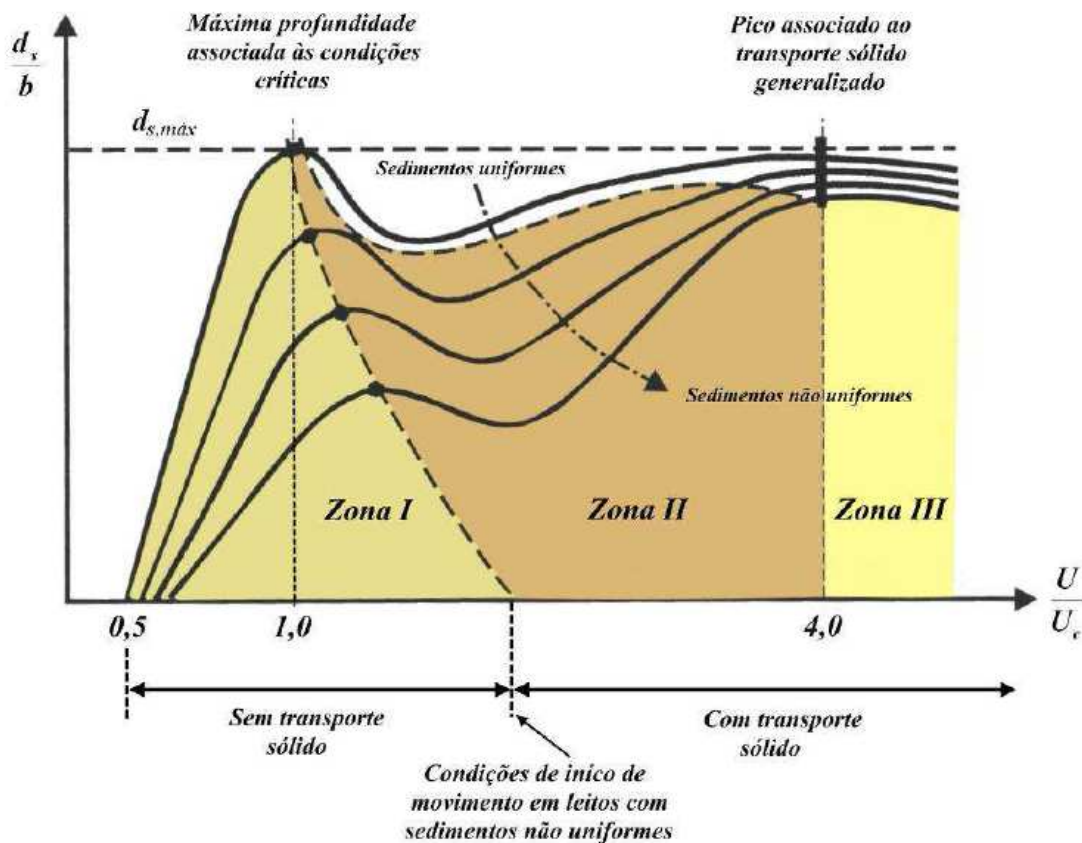


Figura 2.3 – Variação da profundidade considerando a não uniformidade dos sedimentos do leito de um rio em função da velocidade do escoamento (Adaptado de Melville e Coleman, 2000)

Por análise da figura 2.3 pode-se concluir que a profundidade de erosão diminui, de forma significativa, nos casos em que os fundos são constituídos por sedimentos não uniformes e que essa redução é tanto maior quanto mais variáveis forem as dimensões do material de fundo. Pode-se também concluir, através da análise da mesma figura, que em caso de fundos constituídos por sedimentos uniformes a profundidade máxima de erosão ocorre para velocidades do escoamento iguais ou muito próximas da velocidade crítica. O coeficiente de gradação é um parâmetro redutor pelo que quanto maior este for, menor será a profundidade de erosão máxima.

Para que se possa fazer o estudo da erosão a montante de um pilar é então necessário conhecer intimamente as características do fundo de modo a ser possível definir qual a velocidade crítica associada a esse sedimento. A velocidade crítica é um fator de extrema importância para estimar as profundidades de erosão que ocorrem em leitos de rio já que permite determinar se ocorre ou não transporte generalizado.

De seguida são apresentadas algumas metodologias para o cálculo da velocidade crítica.



### 2.2.1.1. Método de Neil, 1967

O cálculo da velocidade crítica proposto por Neil (1967) pode ser feito a partir de:

$$\frac{U_c^2}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma}-1\right).g.d_{50}} = 2,5 \cdot \left(\frac{h}{d_{50}}\right)^{0,2} \quad (2.2)$$

Em que:

$\gamma_s$  – Peso volúmico do material do fundo;

$\gamma$  – Peso volúmico da água

$U_c$  – Velocidade crítica do escoamento;

$d_{50}$  – Dimensão mediana do material de fundo;

$h$  – Altura do escoamento.

### 2.2.1.2. Método de Garde, 1970

O método proposto por Garde (1970) também se resume a uma única equação, como em Neil (1967), que é a seguinte:

$$\frac{U_c}{\sqrt{\frac{(\gamma_s-\gamma).d_{50}}{\rho}}} = 0,5 \cdot \log\left(\frac{h}{d_{50}}\right) + 1,63 \quad (2.3)$$

Em que:

$\gamma_s$  – Peso volúmico do material do fundo;

$\gamma$  – Peso volúmico da água

$U_c$  – Velocidade crítica do escoamento;

$d_{50}$  – Dimensão mediana do material de fundo;

$h$  – Altura do escoamento;

$\rho$  – Massa volúmica da água.

### 2.2.1.3. Método do FDT (2010)

$$U_c = 2,5 \cdot u_{*c} \cdot \ln\left(\frac{y_1}{2,72 \cdot z_0}\right) \quad (2.4)$$

Em que:

$$u_{*c} = \sqrt{\theta_c \cdot (sg - 1) \cdot g \cdot d_{50}} \quad (2.5)$$

$$\theta_c = \begin{cases} 0,25 - 0,1 \cdot \sqrt{d_*}, & \text{se } 0,01 < d_* < 3 \\ 0,0023 \cdot d_* - 0,000378 \cdot d_* \cdot \ln(d_*) + \frac{0,23}{d_*} - 0,005, & \text{se } 3 < d_* < 150 \\ 0,0575, & \text{se } d_* > 150 \end{cases} \quad (2.6)$$

$$d_* = d_{50} \cdot \left[ \frac{(sg-1) \cdot g}{v^2} \right]^{1/3} \quad (2.7)$$

$$z_0 = \begin{cases} \frac{v}{9 \cdot u_{*c}}, & \text{se } 0 < Re_c < 5 \\ k_s \cdot 10^{-3} \cdot \left[ -6 + 2,85 \cdot Re_c - 0,58 \cdot Re_c \cdot \ln(Re_c) + 0,002 \cdot Re_c^2 + \frac{111}{Re_c} \right], & \text{se } 5 < Re_c < 70 \\ \frac{k_s}{30}, & \text{se } Re_c > 70 \end{cases} \quad (2.8)$$

$$Re_c = \frac{u_{*c} \cdot k_s}{v} \quad (2.9)$$

$$k_s = \begin{cases} 2,5 \cdot D_{50}, & \text{para } D_{50} \geq 0,6 \text{ mm} \\ 5 \cdot D_{50}, & \text{para } D_{50} < 0,6 \text{ mm} \end{cases} \quad (2.10)$$

Onde,

$D_{50}$  – Dimensão mediana do material de fundo;

$v$  – Viscosidade cinemática da água;

$sg$  – Razão entre os pesos volúmicos do material de fundo e da água.

### 2.2.2. EFEITO DA ALTURA DO ESCOAMENTO E LARGURA DO PILAR

A altura do escoamento e a largura do pilar são dois fatores que têm um efeito preponderante no desenvolvimento da cavidade de erosão. A análise da evolução da cavidade de erosão deverá ter em conta a relação entre estes dois fatores visto que existe uma dependência entre eles (Melville e Coleman, 2000).

O processo de erosão foi dividido por Melville e Coleman (2000) em classes que são função da relação entre a largura do pilar e a altura do escoamento. Esta divisão é apresentada no quadro seguinte.

Quadro 2.1 – Classificação do processo de erosão em função da altura do escoamento e largura do pilar  
(Adaptado de Melville e Coleman, 2000)

Classe do Pilar	b/h	Função da profundidade de erosão
Estreito	$b/h < 0,7$	b
Intermédio	$0,7 < b/h < 5$	$(b.h)^{0,5}$
Largo	$b/h > 5$	h

Para os casos em que existe um pilar esbelto, ou situações de escoamentos profundos, a intensidade do vórtice em ferradura e do escoamento descendente dependem da largura do pilar. Por esse motivo a profundidade da cavidade de erosão depende da dimensão do pilar (Melville e Coleman, 2000).

Em escoamentos com pilares largos, ou escoamentos pouco profundos, a profundidade de erosão depende da altura do escoamento e não da largura do pilar. Num estudo realizado para um pilar vertical com uma largura elevada verificou-se a existência de uma zona alinhada com o centro do pilar onde o escoamento se processa de uma forma muito lenta, não produzindo erosão. Neste caso formam-se duas zonas de erosão nas extremidades e uma menor profundidade na zona central. Os autores concluíram que a profundidade de erosão para este tipo de situações depende apenas da altura do escoamento (Melville e Coleman, 2000).

Para pilares de classe intermédia a profundidade de erosão é dependente da altura de escoamento e da largura do pilar sendo ambos fatores influenciadores, como pode ser verificado na figura 2.4 (Melville e Coleman, 2000).

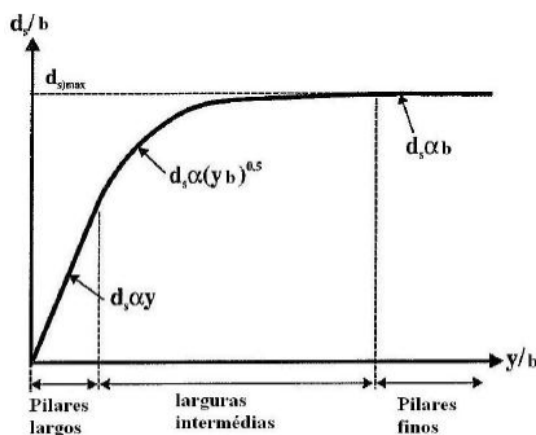


Figura 2.4 – Variação das profundidades de erosão em função da altura de escoamento e largura do pilar  
(Adaptado de Melville e Coleman, 2000)

### 2.2.3. EFEITO DA DIMENSÃO DOS SEDIMENTOS DO LEITO

A relação entre a dimensão dos sedimentos e a largura do pilar é mais um fator que influencia o desenvolvimento da cavidade de erosão. Quando o leito é constituído por sedimentos uniformes a profundidade de erosão não é afetada pela existência de material com grandes dimensões, a não ser que  $b/d_{50} < 50$  (figura 2.5). Ensaio realizados levaram a concluir que a profundidade de erosão não é

afetada pela dimensão dos sedimentos para casos em que a largura do pilar seja superior a cinquenta vezes a dimensão média dos sedimentos.

A figura 2.5 representa a variação da profundidade de erosão em função da largura do pilar e do tamanho médio dos sedimentos. Esse gráfico foi desenvolvido por diversos autores, nomeadamente Ettema, Chiew e Dongol (Melville e Coleman, 2000).

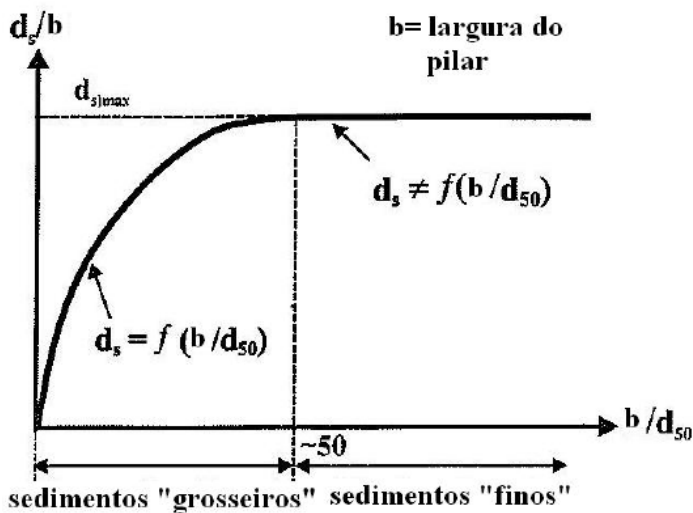


Figura 2.5 – Variação da profundidade de erosão em função da granulometria do fundo (adaptado de Melville e Coleman, 2000)

É referido por Ettema (1980) que, caso a largura do pilar e a dimensão média dos sedimentos sejam da mesma ordem de grandeza, a dimensão da cavidade de erosão será menor, porque a grande dimensão dos sedimentos leva a que os vórtices em ferradura sejam dissipados graças à porosidade do fundo.

Em estudos posteriores aos referidos anteriormente neste subcapítulo foi concluído que o gráfico da figura 2.5 pode não representar a evolução correta da cavidade de erosão em função da dimensão dos sedimentos do leito, representada na figura 2.6. Ao contrário do que é representado na figura anterior pode-se verificar que a profundidade de erosão diminui quanto maior a razão entre a largura do pilar e a dimensão mediana dos sedimentos de fundo. Este facto foi, provavelmente, ignorado anteriormente devido a não terem sido realizados ensaios suficientes em pilares de grandes dimensões (Lança, 2012).

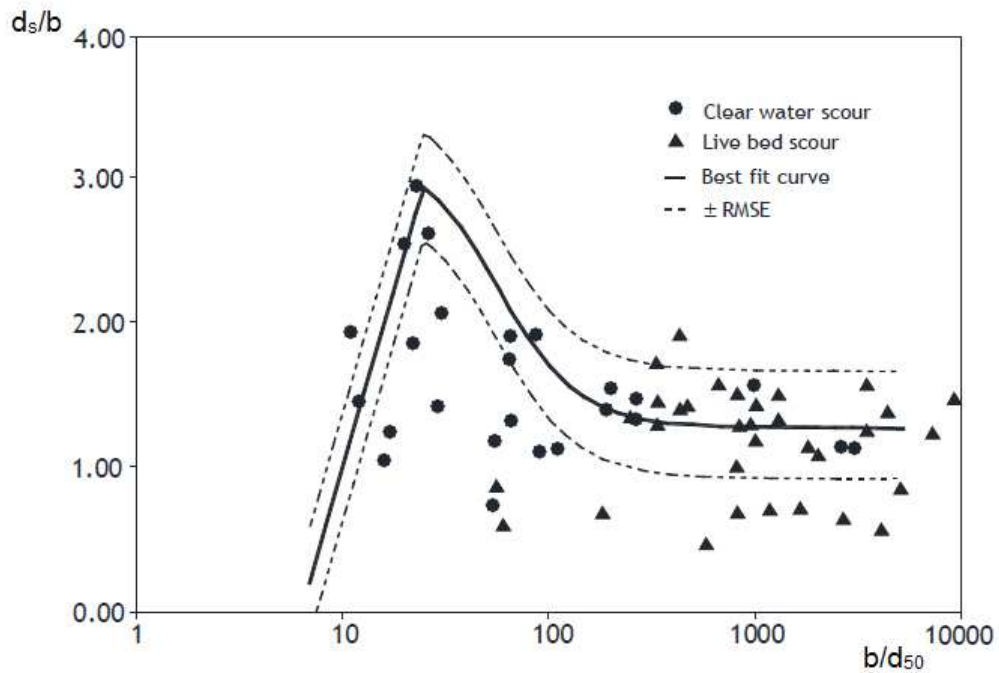


Figura 2.6 – Variação da profundidade de erosão em função da granulometria do fundo (Lança, 2012)

#### 2.2.4. EFEITO DA ORIENTAÇÃO DO ESCOAMENTO

Para pilares com uma forma não cilíndrica a orientação do escoamento em relação ao pilar tem uma grande influência na profundidade de erosão. À medida que o ângulo de incidência do escoamento sobre o pilar aumenta, a profundidade de erosão aumenta também devido à superfície normal ao escoamento ser maior (Melville e Coleman, 2000).

Com o aumento do ângulo de incidência do escoamento no pilar o ponto de erosão máxima desloca-se progressivamente para a parte de trás do pilar. O ponto para o qual se verifica a profundidade máxima depende, então, da razão entre o comprimento do pilar e a sua largura e do ângulo de incidência (Breusers e Raudviki, 1991).

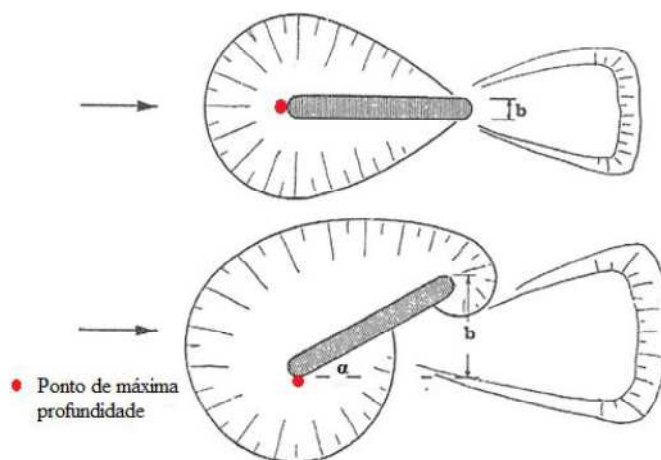


Figura 2.7 – Esboço das cavidades de erosão em pilar alinhado e desalinhado com o escoamento (Adaptado de Breusers e Raudviki, 1991).

Em 1956 foi proposto por Laursen e Toch um gráfico que relaciona a profundidade de erosão com o ângulo de incidência do escoamento no pilar, através de um coeficiente,  $K_\theta$ . Este estudo incidiu sobre pilares retangulares mas pode ser utilizado para outras formas de pilar (Melville e Coleman, 2000).

Quando o pilar não se encontra alinhado com o escoamento podem verificar-se ampliações significativas à dimensão da cavidade de erosão (Melville e Coleman, 2000).

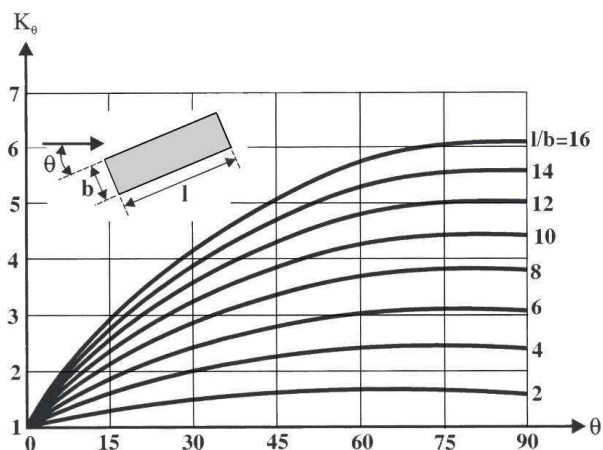


Figura 2.8 – Variação da profundidade de erosão num pilar em função do ângulo de aproximação do escoamento (Melville e Coleman, 2000)

O ângulo de incidência do escoamento no pilar é variável, este ângulo pode sofrer alterações significativas em casos de ocorrência de cheias principalmente em pilares localizados a jusante de confluências e curvas do escoamento. De modo a contornar este problema recomenda-se a utilização de pilares circulares ou com uma relação Comprimento/Largura pequena (Melville e Coleman, 2000).

#### 2.2.5. EFEITO DA GEOMETRIA DO PILAR

A forma dos pilares de uma ponte e dos seus elementos de fundação afetam a profundidade de erosão local. Na figura seguinte são apresentadas algumas das formas e disposições mais correntemente utilizadas em pilares de pontes.

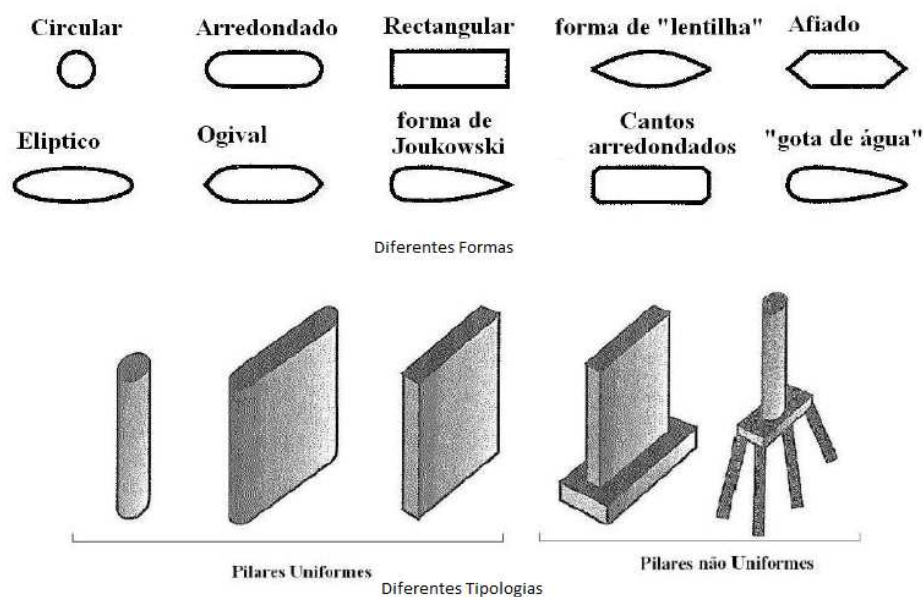


Figura 2.9 – Diferentes formas e tipologias de pilares (adaptado de Melville e Coleman, 2000)

A influência da forma do pilar é traduzida normalmente pela utilização de um coeficiente de forma que representa a relação entre o pilar com a forma em estudo comparativamente a um pilar com uma forma cilíndrica sobre as mesmas condições (Couto e Cardoso, 2001).

Quadro 2.2 – Valores para o coeficiente de forma de pilares (adaptado de Melville e Coleman, 2000)

Forma do Pilar	$K_f$
Cilíndrico	1.0
Arredondado a Montante	1.0
Retangular	1.1
Em Quilha a Montante	0.9

Segundo Melville e Coleman (2000), o coeficiente de forma apenas deve ser considerado para pilares que estão alinhados com o escoamento ou muito próximo disso. Caso contrário deve ser considerado o coeficiente do ângulo de incidência do escoamento no pilar em seu detrimento.

Além disso é necessário ter em consideração se se trata de um pilar simples ou complexo. Esse assunto será desenvolvido no subcapítulo 2.3.

### 2.3. EROSIÃO EM PILARES COMPLEXOS

A construção de pilares simples, por motivos estruturais, geotécnicos e económicos, torna-se cada vez menos viável. Assim, na construção de pontes têm sido utilizados pilares complexos constituídos por coluna de pilar fundada num grupos de estacas encabeçado por um maciço de encabeçamento (figura 2.9).

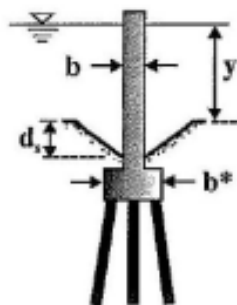


Figura 2.10 – Representação de um pilar complexo (adaptado de Melville e Coleman, 2000)

A dimensão da cavidade de erosão que se forma em pilares complexos pode, em certos casos, ser menor do que a de um pilar simples sob as mesmas condições dependendo da disposição de cada um dos elementos do pilar complexo (Melville e Coleman, 2000).

As estimativas de erosão em pilares complexos são baseadas, tal como em pilares simples, na largura dos elementos que contribuem para a erosão, na altura do escoamento e na velocidade do escoamento. Para além desses fatores, é necessário ter em conta a disposição de cada um dos elementos, pois a sua posição em relação ao escoamento vai alterar o efeito que cada elemento tem na profundidade de erosão. Estão previstas, pelos autores, quatro disposições tipo para pilares complexos, cada uma dando origem a diferentes profundidades de erosão previstas (Melville e Coleman, 2000).

- Caso I – Este caso é caracterizado pelo maciço se encontrar a uma profundidade grande o suficiente para que não seja intersectada pela cavidade de erosão;
- Caso II – Caso caracterizado pelo maciço estar enterrado a uma profundidade pequena o suficiente de modo que seja intersectado pela cavidade de erosão;
- Caso III – Neste caso o topo do maciço de encabeçamento encontra-se desenterrado;
- Caso IV – Nesta situação a face superior do maciço de encabeçamento encontra-se acima do nível da superfície livre do escoamento.



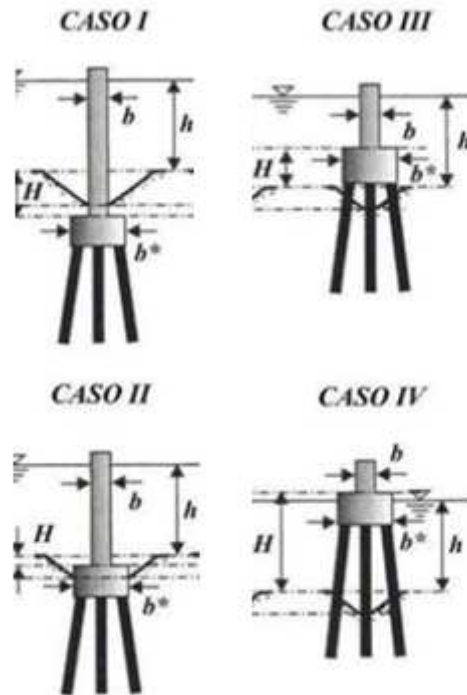


Figura 2.11 – Representação das diferentes disposições de pilares complexos (adaptado de Melville e Coleman, 2000)

É considerado por Melville e Coleman (2000) um cenário adicional em que apenas as estacas se encontram expostas ao escoamento, este cenário apresenta erosões muito variáveis e dependentes da largura das estacas, do número de estacas do grupo e do espaçamento entre elas.

Na figura 2.12 apresenta-se a evolução prevista da cavidade de erosão em função da disposição do pilar complexo, segundo Melville e Coleman (2000).

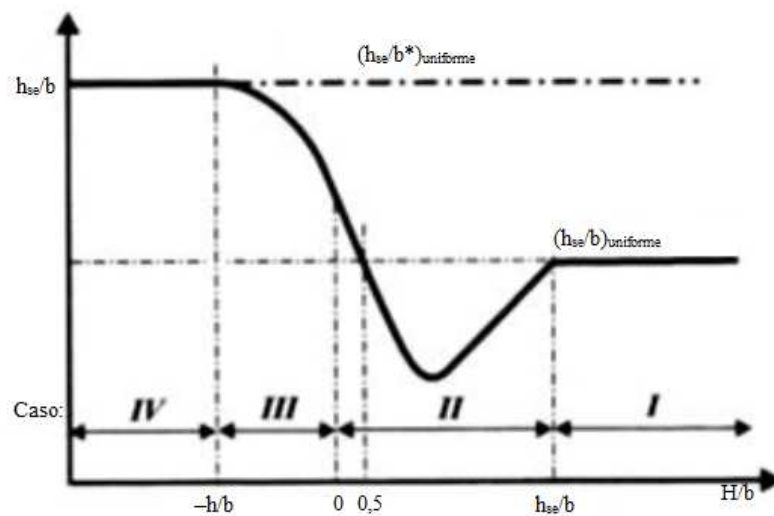


Figura 2.12 – Variação da profundidade de erosão em pilares complexos (adaptado de Melville e Coleman, 2000)



# 3

## MÉTODOS DE PREVISÃO DE EROSÕES EM PILARES COMPLEXOS

### 3.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Nesta dissertação pretende-se estudar as profundidades de erosão resultantes da ação do escoamento em torno de pilares complexos, visando conhecer qual a influência de cada elemento pertencente a um pilar complexo para a profundidade de erosão (coluna do pilar, maciço de encabeçamento e grupo de estacas). A determinação da influência de cada elemento será feita por decomposição dos efeitos de cada elemento constituinte do pilar complexo.

Os resultados obtidos dessa análise serão apresentados no capítulo 5 e comparados com métodos de previsão de erosão em pilares complexos propostos por diferentes autores, apresentados de seguida.

Para o dimensionamento estrutural de uma ponte, interessa particularmente conhecer a previsão da profundidade máxima das cavidades de erosão. Ainda assim, os métodos de previsão propostos não permitem indicar com exatidão a profundidade máxima das cavidades de erosão localizada. Tal deve-se aos inúmeros parâmetros que influenciam o processo, estando alguns deles relacionados entre si.

Neste trabalho, para efeitos de comparação com os resultados obtidos experimentalmente, foram utilizados os métodos de Richardson e Davis (2001) e do FDT (2010). Estes métodos propõem equações que derivam de comparações com dados de campo de modo a proporcionar um adequado grau de segurança.

Os métodos expostos neste capítulo têm como base a *Superposition of the Scour Components*, isto é, a sobreposição das componentes da erosão.

O modelo HEC-18, desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center no Federal Highway Administration (FHWA), nos Estados Unidos de America, baseia-se nos dados laboratoriais de pilares circulares de Chabert e Engeldinger (1956) e de Shen et al. (1969) e em estudos recentes na Universidade do Colorado. A última versão revista do manual da FHWA foi apresentada por Richardson e Davis (2001), pelo que, a este método será chamado pelo nome de estes dois autores, nesta dissertação.

O método de Richardson e Davis (2001) considera a separação conceptual de cada um dos elementos do pilar complexo e, nele, é adotada a profundidade de erosão de cada elemento individual, sendo posteriormente feito o somatório de cada uma das profundidades individuais para obter a profundidade total de erosão.

O método desenvolvido pelo grupo de Sheppard na Universidade da Florida para o Florida Department of Transportation (FDT) é sintetizado no manual de erosão de pontes do FDT (Sheppard e Renna, 2010). Este método é empírico e baseado em resultados de ensaios experimentais obtidos no laboratório do Turner Fairbank Highway Research Center do Federal Highway Administration, no laboratório da Universidade da Florida e no laboratório do U.S. Geological Survey.

O método do FDT (2010) admite que a influência que cada componente do pilar complexo tem na profundidade de erosão pode ser avaliada como a erosão que um pilar simples cilíndrico com um diâmetro equivalente provocaria. O diâmetro total do pilar complexo pode ser calculado através do somatório dos diâmetros equivalentes de cada elemento. As expressões matemáticas utilizadas foram estabelecidas a partir de resultados experimentais realizados na Florida.

### 3.2. MÉTODO DE RICHARDSON E DAVIS (2001)

Este método é apresentado na 4ª edição do *Evaluating Scour at Bridges* do Hec-18, após essa publicação já foi lançada uma 5ª edição do mesmo documento com uma revisão do método de Richardson e Davis por outros autores, que desenvolveram a 5ª edição: Arneson, Zevenbergen, Lagasse e Clopper.

O método para a previsão da erosão máxima em pilares complexos não sofreu alterações entre as edições mencionadas do HEC-18, mas é de referir que na 5ª edição é salientado que para o caso de pilares largos o método do FDT (2010) apresenta melhores previsões que o método de Richardson e Davis (2001).

O método de Richardson e Davis (2001) baseia-se na sobreposição de efeitos de cada um dos elementos que constituem o pilar complexo. Essa sobreposição é efetuada, calculando a profundidade de erosão associada a cada um dos elementos por ordem, começando com a coluna do pilar, seguidamente com o maciço de encabeçamento e finalmente calculando a profundidade de erosão associada ao grupo de estacas. Após obtidas todas as profundidades de erosão isoladas faz-se o somatório destas. O método de cálculo é:

$$\frac{d_s}{h} = 2,0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \left(\frac{b}{h}\right)^{0,65} \cdot F\gamma^{0,43} \quad (3.1)$$

Em que:

$d_s$  – Profundidade máxima de erosão

$h$  – Altura do escoamento

$K_1$  – Coeficiente de forma do pilar

$K_2$  – Coeficiente do ângulo de incidência do escoamento no pilar

$K_3$  – Coeficiente da configuração dos fundos

b – Largura do pilar

Fr – Numero de Froude,  $Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot h}}$ , em que g é a aceleração gravítica e U a velocidade média de escoamento

Os diferentes coeficientes são apresentados de seguida:

Quadro 3.1 – Determinação do coeficiente de forma (adaptado de Richardson e Davis, 2001)

Forma do Pilar	$K_1$
Cilíndrico	1,0
Grupo de Cilindros	1,0
Arredondado a Montante	1,0
Retangular	1,1
Em Quilha a Montante	0,9

Quadro 3.2 – Determinação do coeficiente do ângulo de incidência do escoamento no pilar (adaptado de Richardson e Davis, 2001)

Ângulo de Ataque ( $K_2$ )	$l/b = 4$	$l/b = 8$	$l/b \geq 12$
0°	1,0	1,0	1,0
15°	1,5	2,0	2,5
30°	2,0	2,75	3,5
45°	2,3	3,3	4,3
90°	2,5	3,9	5,0

O coeficiente de forma,  $K_1$ , apenas é considerado para ângulos de incidência do escoamento no pilar inferiores aos 5° , nas situações em que este é superior, o coeficiente do ângulo de incidência do escoamento no pilar,  $K_2$ , é considerado dominante e por isso  $K_1 = 1.0$ , qualquer que seja a forma.

Quadro 3.3 – Determinação do coeficiente da configuração dos fundos (adaptado de Richardson e Davis, 2001)

Configurações do Fundo	$K_3$
Leito Plano e Antidunas	1,1
Pequenas Dunas	1,1
Dunas de Desenvolvimento Médio	1,2
Dunas Completamente Desenvolvidas	1,3

Para aplicar este método a pilares complexos os autores consideram a decomposição do pilar em três componentes: coluna do pilar, maciço de encabeçamento e grupo de estacas.

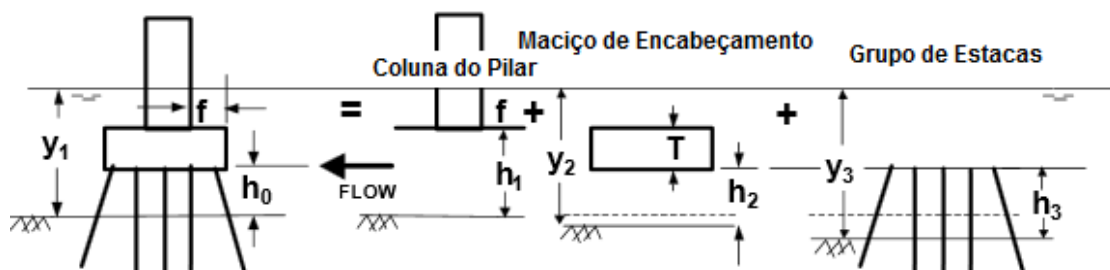


Figura 3.1 – Simplificação do pilar complexo (Adaptado de Richardson e Davis 2001)

Onde,

$f$  – Distância entre as faces do maciço de encabeçamento e da coluna do pilar;

$h_0$  – Distância desde a base do maciço de encabeçamento ao leito inicial;

$h_1 = h_0 + T$  – Distância desde o leito ao topo do maciço de encabeçamento inicial;

$h_2 = h_0 + y_{spier}/2$  – Distância desde o leito até à base do maciço de encabeçamento após a erosão associada à coluna do pilar;

$h_3 = h_0 + y_{spier}/2 + y_{spc}/2$  – Distância desde o leito até à base do maciço de encabeçamento após a erosão associada à coluna do pilar e ao maciço de encabeçamento;

$T$  – Altura do maciço de encabeçamento;

$y_1$  – Altura inicial do escoamento, imediatamente a montante do pilar;

$y_2 = y_1 + y_{spier}/2$  – Altura do escoamento após erosão associada à coluna do pilar;

$y_3 = y_2 + y_{spc}/2$  – Altura do escoamento após erosão associada à coluna do pilar e ao maciço de encabeçamento;

$U_1$  – Velocidade do escoamento;

$U_2 = U_1 \cdot (y_1/y_2)$  - Velocidade do escoamento associada ao maciço de encabeçamento

$U_3 = U_1 \cdot (y_1/y_3)$  – Velocidade do escoamento associada ao grupo de estacas

A profundidade total da erosão deste método é dada por:

$$d_s = y_{spier} + y_{spc} + y_{spg} \quad (3.2)$$

Em que,

$d_s$  – Profundidade total de erosão;

$y_{spier}$  – Profundidade de erosão associada à coluna do pilar;

$y_{spc}$  – Profundidade de erosão associada ao maciço de encabeçamento;

$y_{spg}$  – Profundidade de erosão associada ao grupo de estacas.

### 3.2.1. DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE EROÇÃO ASSOCIADA À COLUNA DO PILAR COMPLEXOS

Para determinar a erosão provocada por um pilar complexo, o primeiro passo é o cálculo da erosão associada à coluna do pilar. Desde que o escoamento incida sobre a coluna do pilar é necessário proceder ao cálculo da erosão associada a este elemento através da equação (3.3)

$$\frac{y_{spier}}{y_1} = K_{hpier} \cdot 2,0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \left(\frac{b_{pier}}{y_1}\right)^{0,65} \cdot Fr^{0,43} \quad (3.3)$$

Em que,

$b_{pier}$  – Largura da coluna do pilar complexo;

$K_{hpier}$  – Coeficiente que tem em conta a distância da base da coluna ao leito e a largura do maciço que se encontra à frente do pilar,  $f$ . Função de  $h_1$ ,  $f$  e  $b_{pier}$  e pode ser obtido a partir do seguinte gráfico.

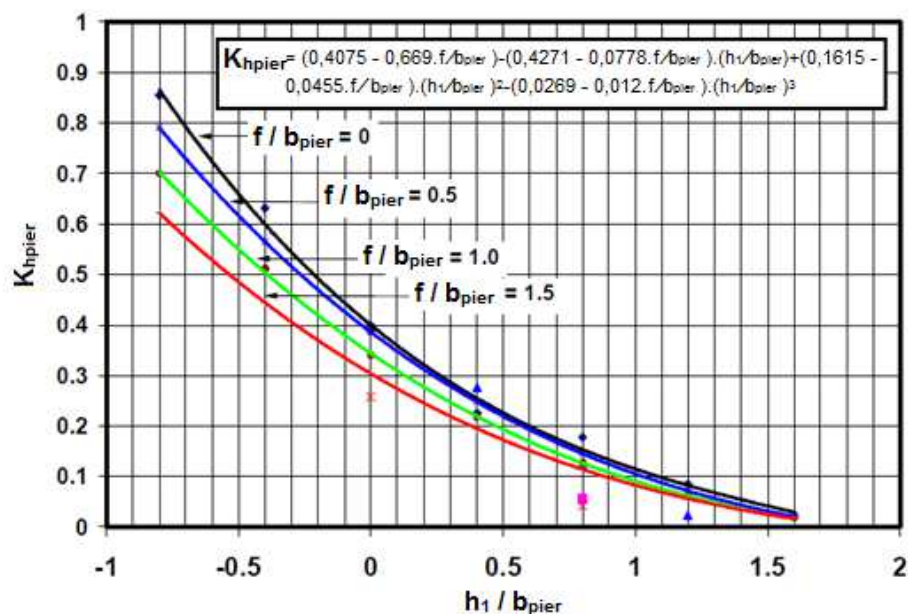


Figura 3.2 – Valores de  $K_{hpier}$  (Adaptado de Richardson e Davis, 2001)

### 3.2.2. DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE EROÇÃO ASSOCIADA AO MACIÇO DE ENCABEÇAMENTO

A consideração da profundidade de erosão associada ao maciço é necessária quando este se encontra, desde o momento inicial, exposto ao escoamento ou quando, devido a erosões, este fica descoberto

contribuindo para a formação da cavidade de erosão. Para o cálculo desta componente é preciso considerar dois dos casos propostos por Richardson e Davis, 2001.

Para o primeiro caso, em que a base do maciço de encabeçamento se encontra acima do fundo a abordagem é reduzir a largura do maciço,  $b_{pc}$ , a uma largura equivalente de um pilar,  $b^*_{pc}$ . Para o cálculo de  $y_{spc}$ , substituem-se respetivamente pela largura equivalente, pela altura de escoamento corrigida,  $y_2$ , e pela velocidade corrigida,  $U_2$ , os valores de  $b$ ,  $y_1$  e  $U_1$  na equação geral do método. O valor de  $b^*_{pc}$  pode ser obtido a partir do gráfico seguinte:

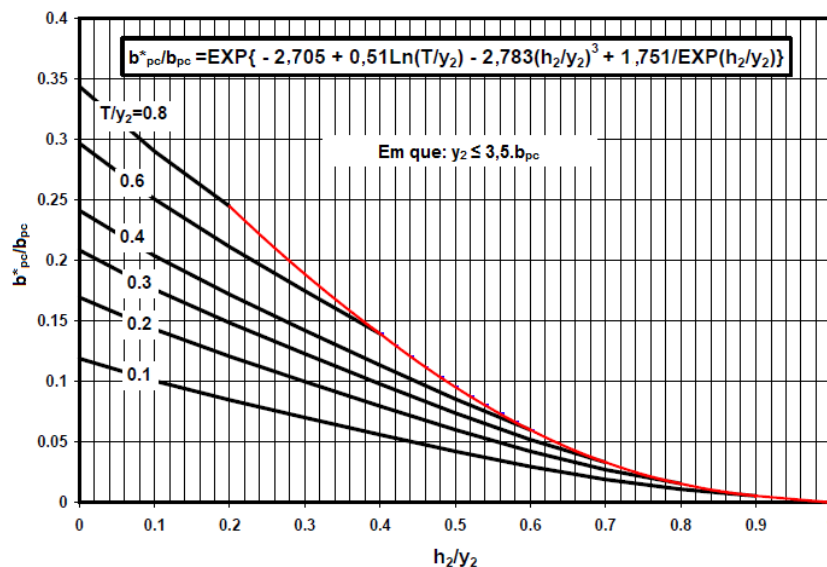


Figura 3.3 – Gráfico para obtenção de  $b^*_{pc}$  (adaptado de Richardson e Davis, 2001)

Para o segundo caso, em que o topo do maciço de encabeçamento se encontra alinhado com o fundo do canal, ou mais enterrado, a abordagem para o cálculo da profundidade associada ao maciço passa por considerar que a zona exposta do maciço se comporta como um pilar de pequenas dimensões, num escoamento com uma profundidade igual à distância desde o fundo até ao topo do maciço. Neste caso, para o cálculo de  $y_{spc}$  considera-se na equação geral a largura equivalente do maciço,  $b^*_{pc}$ , a altura de maciço exposto após erosão associada à coluna,  $y_f$ , e a velocidade média na secção exposta do maciço (figura 3.4),  $U_f$ , em vez de  $b$ ,  $y_1$  e  $U_1$ .



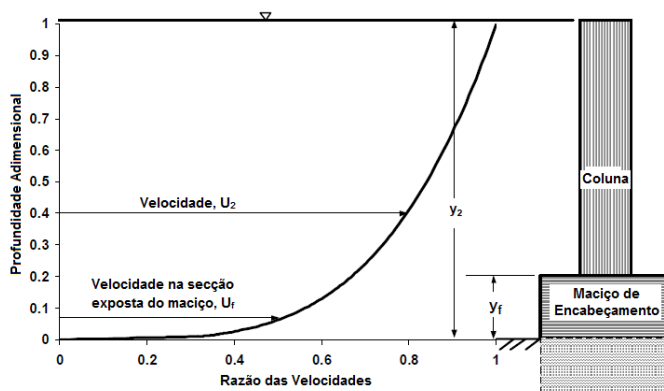


Figura 3.4 – Esboço para explicação da altura e velocidade na secção exposta do maciço. (adaptado de Richardson e Davis, 2001)

A velocidade  $U_f$  é calculada em função de  $U_2$  a partir da equação (3.4)

$$\frac{U_f}{U_2} = \frac{\ln\left(10,93 \cdot \frac{y_f}{k_s} + 1\right)}{\ln\left(10,93 \cdot \frac{y_2}{k_s} + 1\right)} \quad (3.4)$$

$$\frac{y_{spc}}{y_f} = 2,0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \left(\frac{b^*_{pc}}{y_f}\right)^{0,65} \cdot \left(\frac{U_f}{\sqrt{g \cdot y_f}}\right)^{0,43} \quad (3.5)$$

Deste modo, e caso as estacas não tenham influência na formação da cavidade de erosão, a profundidade total de erosão apenas é influenciada pela coluna e pelo maciço, sendo  $y_s$ :

$$y_s = y_{spier} + y_{spc} \quad (3.6)$$

### 3.2.3. DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE EROÇÃO ASSOCIADA AO GRUPO DE ESTACAS

Neste método a erosão é calculada com base no espaçamento entre estacas, no número de “colunas” da estrutura matricial do grupo de estacas e num fator de altura que tem em conta a altura das estacas que estão expostas ao escoamento. Podem ser distinguidos 2 casos:

- Estacas alinhadas entre elas e com o escoamento;
- Estacas desalinhadas entre si e com o escoamento, com ângulos de ataque diferentes de zero.

A abordagem ao cálculo é feita da mesma forma para os dois casos, mas a técnica utilizada para o caso de estacas alinhadas é mais simples. Visto ser este o caso dos ensaios realizados no âmbito desta tese (apresentados no capítulo 4), será, de seguida, explicitado o método correspondente para este caso.

Para prever a profundidade de erosão em grupos de estacas alinhadas entre si e com o escoamento começa por se projetar a largura das estacas num plano normal ao escoamento, a partir daí determina-se a largura total das estacas ignorando os espaçamentos entre elas,  $a_{proj}$ . De seguida, ajusta-se a altura do escoamento, a velocidade e a altura exposta do grupo de estacas tendo em conta a profundidade de erosão associada à coluna e ao maciço previamente calculados. Determina-se o fator de altura do grupo de estacas baseado na altura das estacas exposta ao escoamento. Finalmente aplica-se a equação geral do método aplicando também os coeficientes relativos ao grupo de estacas.

A determinação da largura efetiva do grupo de estacas,  $a_{proj}$ , é feita da forma apresentada na figura seguinte:

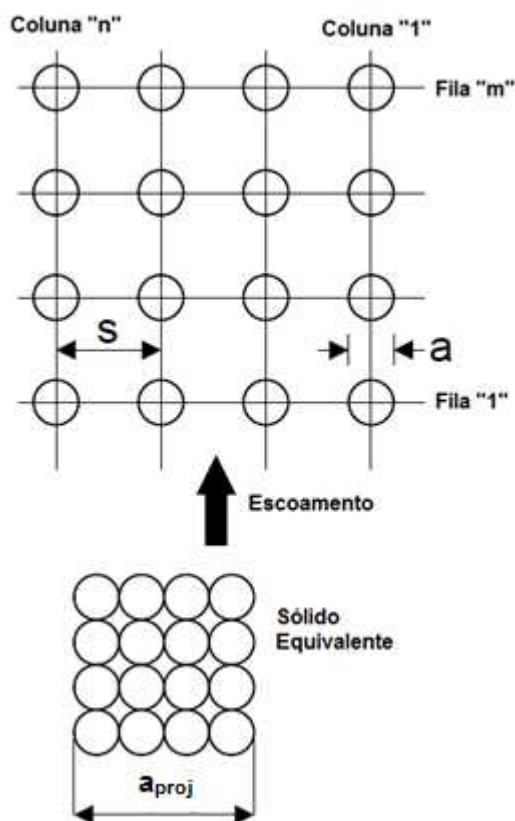


Figura 3.5 – Largura projetada das estacas (Adaptado de Richardson e Davis, 2001)

O cálculo da largura do pilar equivalente,  $b^*_{pg}$ , é feito a partir da largura efetiva do grupo de estacas corrigido por meio de dois coeficientes, o coeficiente de espaçamento entre estacas,  $K_{sp}$ , e o coeficiente do número de “colunas” de estacas,  $K_m$ . O primeiro toma valores menores quanto maior for o espaçamento entre estacas, o que leva a menores larguras equivalentes do grupo de estacas. Já o segundo coeficiente aumenta quanto mais “colunas” existirem, pelo que a largura efetiva do grupo de estacas será maior. O cálculo é feito a partir de:

$$b^*_{pg} = a_{proj} \cdot K_{sp} \cdot K_m \tag{3.7}$$

Em que os coeficientes são obtidos a partir dos gráficos seguintes:

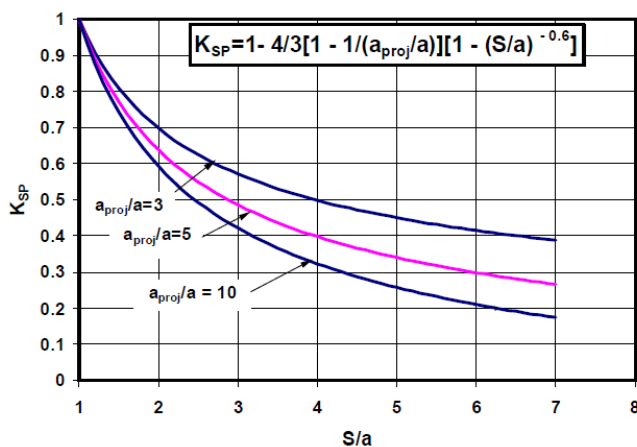


Figura 3.6 – Gráfico para determinação de  $K_{sp}$  (Richardson e Davis, 2001)

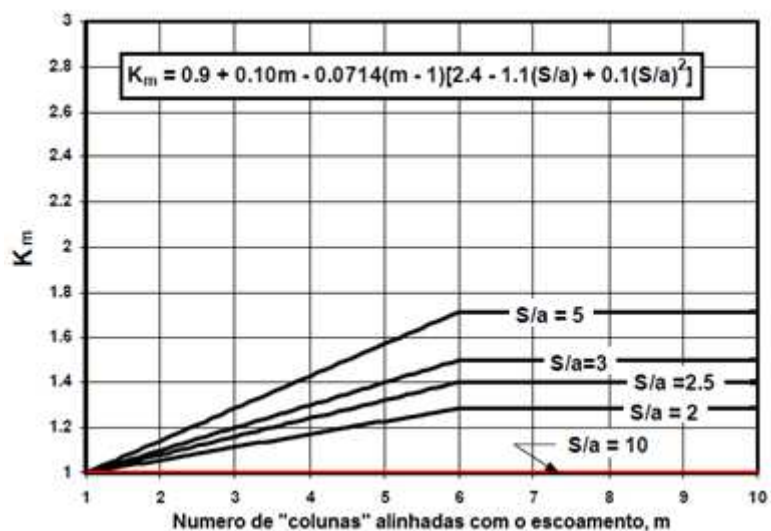


Figura 3.7 – Gráfico para determinação de  $K_m$  (Adaptado de Richardson e Davis, 2001)

O cálculo da profundidade de erosão para o grupo de estacas é feito utilizando a equação geral do método:

$$\frac{y_{spg}}{h_3} = K_{hpg} \cdot 2,0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \left(\frac{b^*_{pg}}{h_3}\right)^{0,65} \cdot \left(\frac{U_3}{\sqrt{g \cdot h_3}}\right)^{0,43} \tag{3.8}$$

Em que,

$K_{hpg}$  – Coeficiente que tem em conta a altura exposta do grupo de estacas, função de  $h_3$  e  $y_3$ , é definido a partir do gráfico:

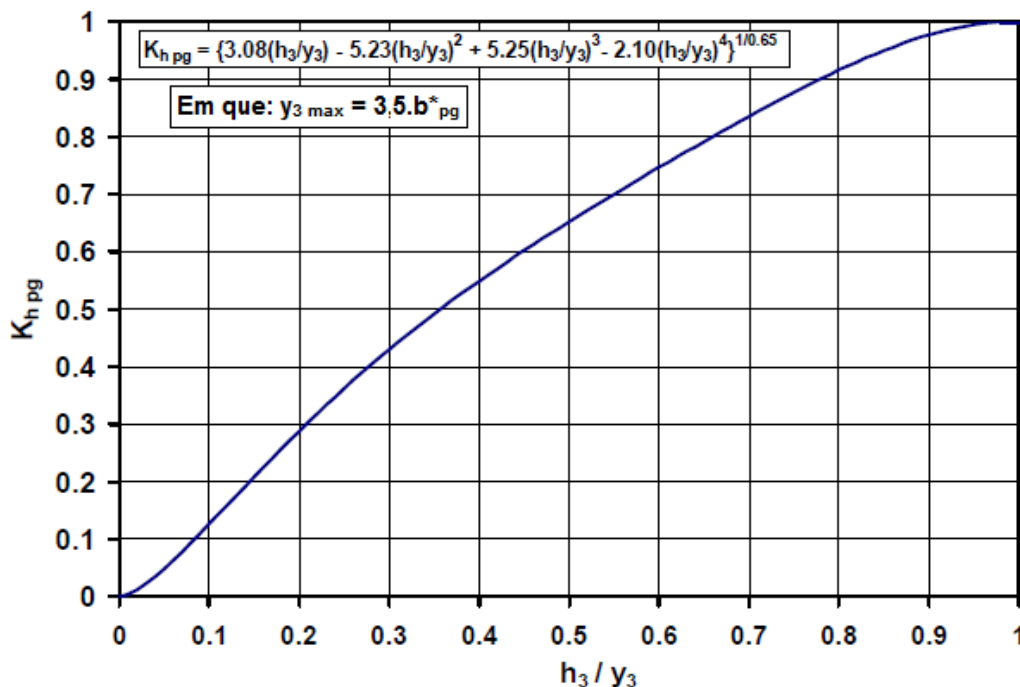


Figura 3.8 – Gráfico para a determinação de  $K_{hpg}$  (Richardson e Davis, 2001)

Uma vez determinados os valores da profundidade de erosão relativa a cada elemento, para obter o valor da profundidade de erosão associada ao pilar complexo, aplica-se a equação (3.2).

### 3.3. MÉTODO DO FDT (2010)

Este método propõe que para o cálculo das cavidades de erosão criadas na base de pilares complexos se determine o diâmetro equivalente do pilar complexo,  $D^*$ . As equações apresentadas por este método são de carácter empírico e são baseadas num número significativo de ensaios laboratoriais. Este método é uma revisão do apresentado pelo FDT, 2005.

Este método considera-se válido para intensidades de escoamento no intervalo  $0,40 < U/U_c < 1$ , tendo a seguinte equação geral,

$$\frac{y_s}{D^*} = 2,5 \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \quad (3.9)$$

Em que:

$y_s$  – Profundidade de erosão para o diâmetro  $D^*$ ;

$D^*$  - Diâmetro equivalente do pilar complexo ;

$f_1 = \tanh \left[ \left( \frac{y_1}{D^*} \right)^{0,4} \right]$ ; em que  $y_1$  representa a altura de escoamento inicial:

$f_2 = \left( 1 - 1,2 \cdot \left[ \ln \left( \frac{U}{U_c} \right) \right]^2 \right)$ ; em que  $U$  é a velocidade do escoamento e  $U_c$  é a velocidade crítica do escoamento

$$f_3 = \left[ \frac{\left( \frac{D^*}{d_{50}} \right)}{0,4 \cdot \left( \frac{D^*}{d_{50}} \right)^{1,2} + 10,6 \cdot \left( \frac{D^*}{d_{50}} \right)^{-0,13}} \right]$$

Ou seja;

$$\frac{y_s}{D^*} = 2,5 \cdot \tanh \left[ \left( \frac{y_1}{D^*} \right)^{0,4} \right] \cdot \left( 1 - 1,2 \cdot \left[ \ln \left( \frac{U}{U_c} \right) \right]^2 \right) \cdot \left[ \frac{\left( \frac{D^*}{d_{50}} \right)}{0,4 \cdot \left( \frac{D^*}{d_{50}} \right)^{1,2} + 10,6 \cdot \left( \frac{D^*}{d_{50}} \right)^{-0,13}} \right] \quad (3.10)$$

Em que  $D^*$  representa o diâmetro efetivo do pilar, que no caso de ser um pilar circular é igual ao seu diâmetro. O diâmetro equivalente pode ser definido através do somatório dos diâmetros equivalentes de cada uma das componentes do pilar. Isto é:

$$D^* = D^*_{col} + D^*_{pc} + D^*_{pg} \quad (3.11)$$

Em que,

$D^*_{col}$  é o diâmetro equivalente da coluna do pilar,  $D^*_{pc}$  é o diâmetro equivalente do maciço de encabeçamento e  $D^*_{pg}$  é o diâmetro equivalente do grupo de estacas.

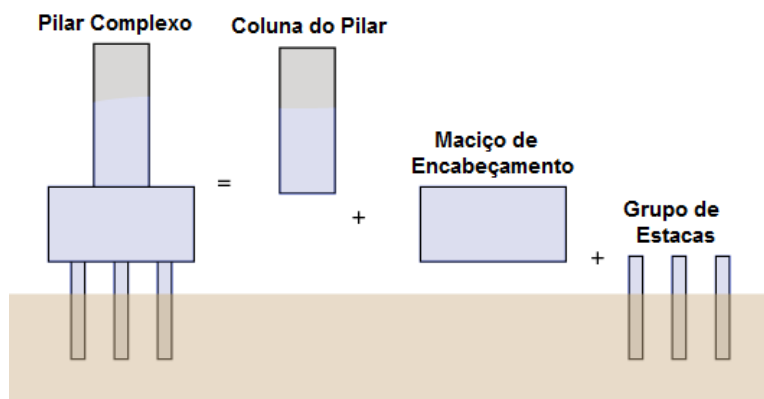


Figura 3.9 – Divisão das componentes de um pilar complexo (Adaptado de FDT, 2010)

O diâmetro equivalente de cada elemento é definido a partir da forma, tamanho e posicionamento do elemento em relação ao fundo e à superfície livre. Para calcular a dimensão da cavidade de erosão, este método consiste na substituição de cada elemento do pilar complexo por um pilar simples que daria origem a uma erosão da mesma dimensão.

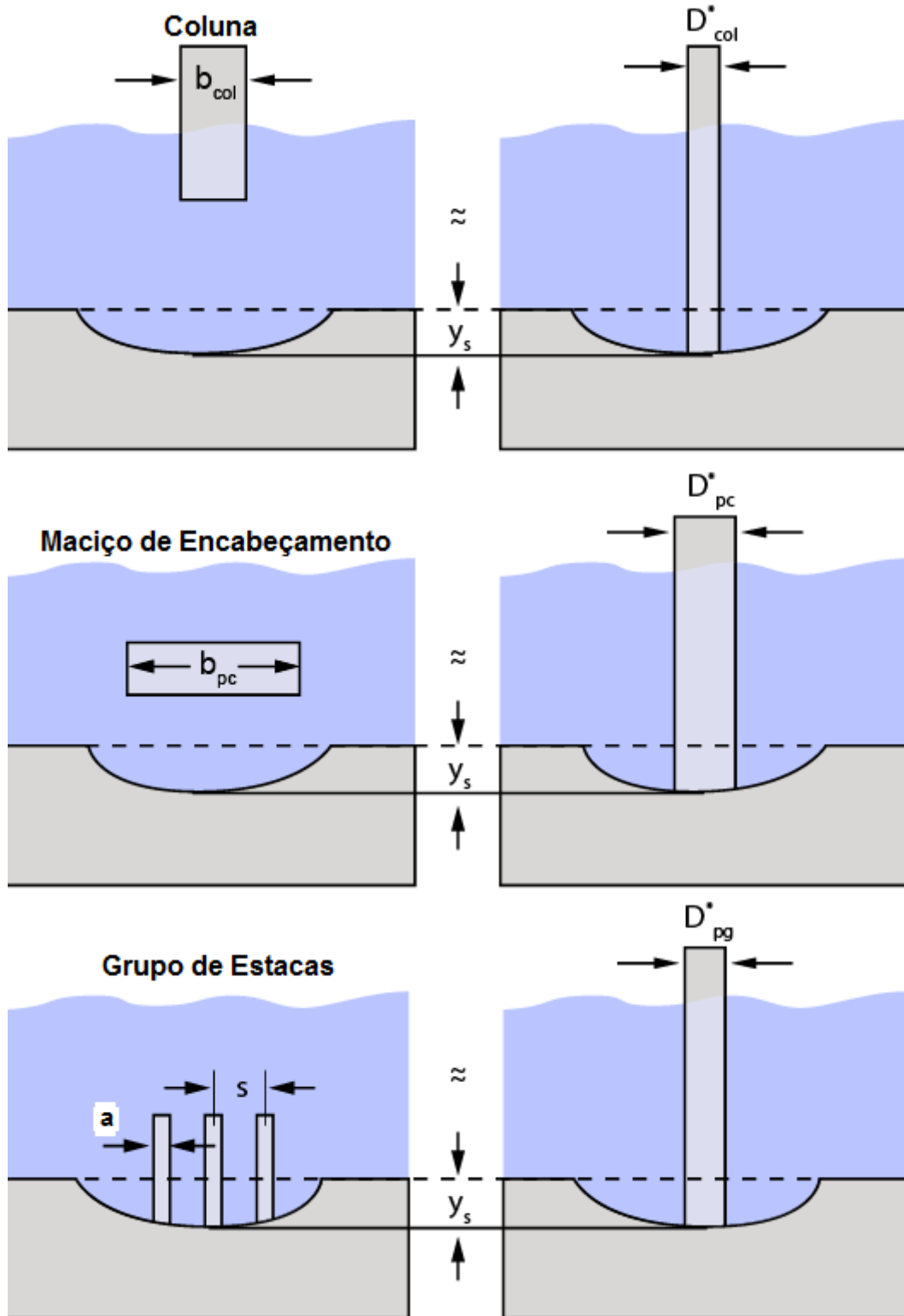


Figura 3.10 – Diâmetros equivalentes de cada elemento do pilar complexo (adaptado de FDT, 2010)

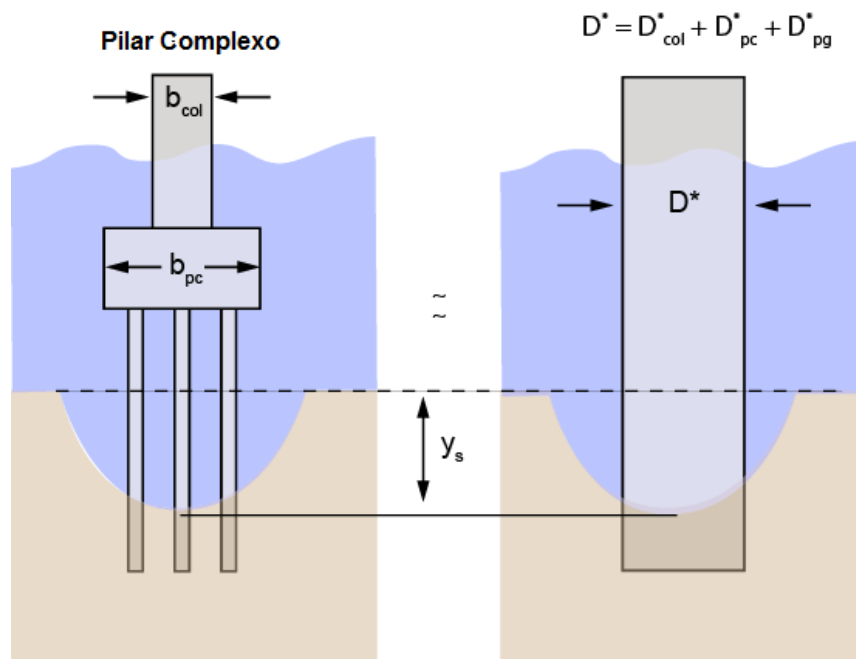


Figura 3.11 – Diâmetro equivalente para o pilar complexo completo (Adaptado de FDT, 2010)

O cálculo de  $D^*$  pode ser um processo algo demorado, visto que, devido à alteração sucessiva dos fundos e conseqüente variação das áreas expostas de cada elemento, é necessário aplicar um processo iterativo para a determinação dos diferentes diâmetros equivalentes à medida que se calculam as contribuições de cada componente.

Para a aplicação do método consideram-se apenas três configurações para o pilar complexo, que são:

- Caso 1 – A base do maciço de encabeçamento está posicionada a uma cota superior à do leito do rio;
- Caso 2 – O maciço de encabeçamento está parcialmente enterrado;
- Caso 3 – O maciço de encabeçamento está completamente enterrado.

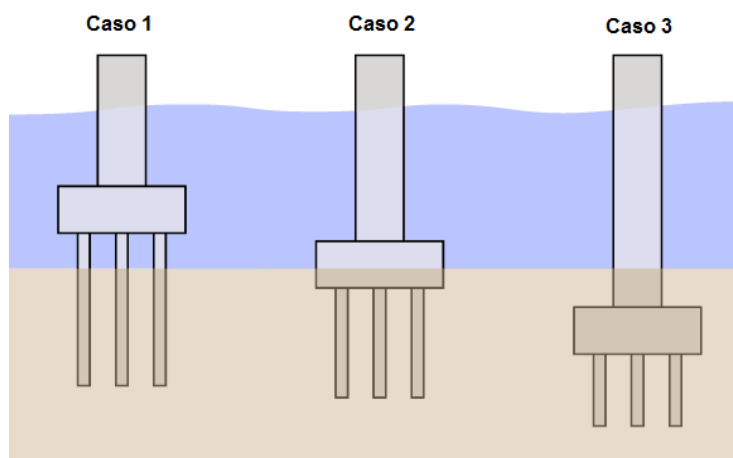


Figura 3.12 – Esboço dos três casos possíveis (Adaptado de FDT, 2010)



### 3.3.1. CÁLCULO DA PROFUNDIDADE MÁXIMA DE EROÇÃO PARA O CASO 1

O procedimento para calcular o diâmetro efetivo para o caso 1 é apresentado de seguida. Começa-se o processo definindo o diâmetro efetivo para os elementos, do elemento mais acima para o mais abaixo.

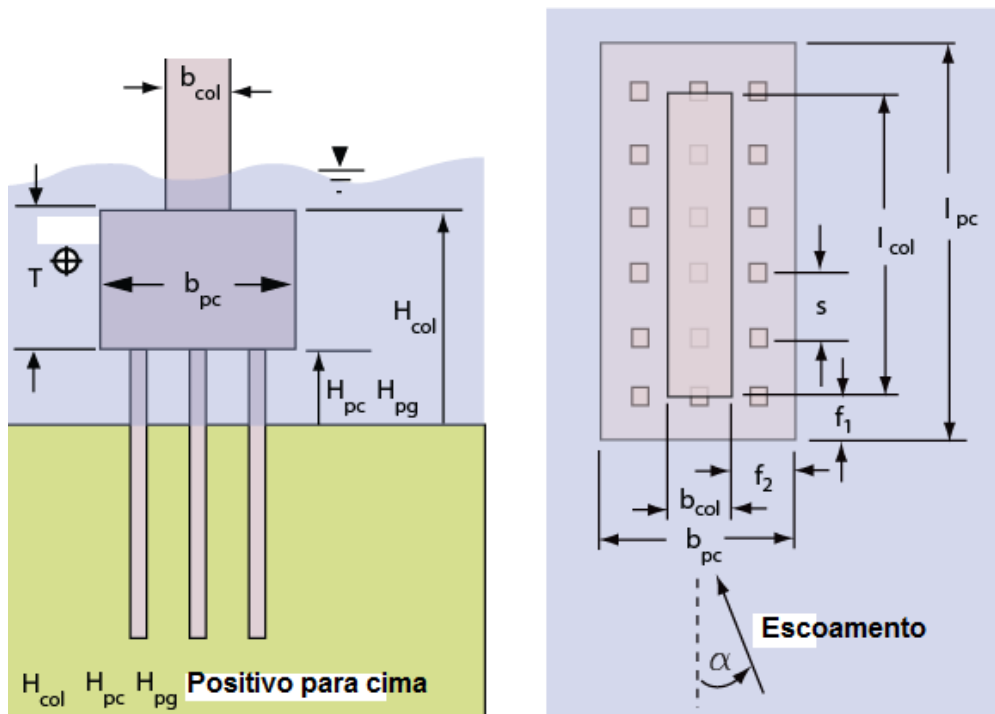


Figura 3.13 – Esquema do pilar complexo para o caso 1, vista frontal (esquerda) e vista em planta (direita) (Adaptado de FDT, 2010)

Para calcular o diâmetro equivalente da coluna do pilar seguem-se os passos A a G que são apresentados a seguir.

- A. Calcular coeficiente de forma da coluna do pilar,  $K_1$

$$K_1 = \begin{cases} 1, & \text{para colunas circulares} \\ 0,86 + 0,97 \cdot \left| \alpha \cdot \frac{\pi}{180^\circ} - \frac{\pi}{4} \right|^4, & \text{para colunas retangulares} \end{cases} \quad (3.12)$$

Em que  $\alpha$  é o ângulo de incidência do escoamento. Esta equação aplica-se para ângulos entre o raso e o reto.

- B. Calcular do coeficiente de incidência do escoamento,  $K_2$

$$K_2 = \frac{b_{col} \cdot \cos \alpha + l_{col} \cdot \sin \alpha}{b_{col}} \quad (3.13)$$

- C. Calcular  $y_{1(max)}$  para a coluna. A profundidade de erosão de equilíbrio de uma estrutura depende da altura do escoamento. Esta profundidade limite, denominada  $y_{1(max)}$ , depende das dimensões da estrutura e da sua localização relativamente ao leito.

$$y_{2(max)} = \begin{cases} 3 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot b_{col} , se y_1 \geq 3 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot b_{col} \\ y_1 , se y_1 < 3 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot b_{col} \end{cases} \quad (3.14)$$

- D. Comparar a altura a que se encontra a base da coluna com o valor de  $y_{2(max)}$ . Se a altura da base da coluna for maior que  $y_{2(max)}$  então  $D^*_{col} = 0$ , e passa-se para o cálculo de  $D^*_{pc}$ .

$$se \begin{cases} H \geq y_{2(max)}, D^*_{col} = y_{s(col)} = 0 , passa - se para o calculo de D^*_{pc} \\ H < y_{2(max)}, passa - se para o passo E \end{cases} \quad (3.15)$$

- E. Calcular o valor de  $y_{s(col)(max)}$  utilizando  $D^*_{col(max)}$  na equação (3.9)

$$D^*_{col(max)} = K_1 \cdot K_2 \cdot b_{col} \quad (3.16)$$

- F. Calcular o efeito do bordo saliente do maciço de encabeçamento,  $f$ , e definir o valor do coeficiente que tem em consideração o bordo saliente do maciço,  $K_f$ . A contribuição da coluna considera-se nula para valores de  $f/b_{col} > 3$ .

$$f = \begin{cases} \frac{3 \cdot f_1 + f_2}{4} , se \alpha \leq 45^\circ \\ \frac{3 \cdot f_2 + f_1}{4} , se \alpha > 45^\circ \end{cases} \quad (3.17)$$

$$K_f = \begin{cases} 1 , para 0 \leq \frac{f}{b_{col}} \leq 1 \\ -0,25 \cdot \left(\frac{f}{b_{col}}\right)^2 + 0,5 \cdot \left(\frac{f}{b_{col}}\right) + 0,75 , para 1 \leq \frac{f}{b_{col}} \leq 3 \\ 0 , para \frac{f}{b_{col}} > 3 \end{cases} \quad (3.18)$$

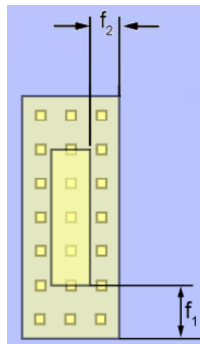


Figura 3.14 – Representação das distâncias  $f_1$  e  $f_2$  (adaptado de FDT, 2005)

G. Depois de calculados todos os coeficientes, o valor do diâmetro equivalente pode ser calculado a partir de:

$$K_1 \cdot K_2 \cdot K_f \cdot b_{col} \cdot \left\{ \begin{array}{l} D^*_{col} = \\ -1,65 \cdot \left[ \frac{H}{(y_{2(max)} + y_{s(col)(max)})} \right]^4 + 1,4 \cdot \left[ \frac{H}{(y_{2(max)} + y_{s(col)(max)})} \right]^3 \\ + 0,86 \cdot \left[ \frac{H}{(y_{2(max)} + y_{s(col)(max)})} \right]^2 - 1,34 \cdot \left[ \frac{H}{(y_{2(max)} + y_{s(col)(max)})} \right] + 0,41 \end{array} \right\} \quad (3.19)$$

Depois de calculado o diâmetro equivalente da coluna do pilar segue-se o cálculo do diâmetro equivalente para o maciço de encabeçamento. A forma de cálculo para este diâmetro fictício é apresentada de seguida nos passos A a F.

A. Determinar o coeficiente de forma do maciço,  $K_1$

$$K_1 = \begin{cases} 1, & \text{para maciços circulares} \\ 0,86 + 0,97 \cdot \left| \alpha \cdot \frac{\pi}{180^\circ} - \frac{\pi}{4} \right|^4, & \text{para maciços retangulares} \end{cases} \quad (3.20)$$

B. Determinar o coeficiente de incidência do escoamento,  $K_2$

$$K_2 = \frac{b_{pc} \cdot \cos \alpha + l_{pc} \cdot \sin \alpha}{b_{pc}} \quad (3.21)$$

C. Calcular o valor de  $y_{3(max)}$

$$y_{3(max)} = \begin{cases} D^*_{col} + 1,5 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot b_{pc}, & \text{para } y_0 \geq D^*_{col} + 1,5 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot b_{pc} \\ y_1, & \text{para } y_1 < D^*_{col} + 1,5 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot b_{pc} \end{cases} \quad (3.22)$$

D. Determinar se o maciço de encabeçamento tem efeito na profundidade de erosão

$$\text{se } \begin{cases} H_{pc} \geq y_{3(max)}, D^*_{pc} = 0 & \text{passa - se para o calculo de } D^*_{pg} \\ \text{Caso contrário} & \text{passa - se ao passo E} \end{cases}$$

E. Calcular o valor de  $y_{s(pc)(max)}$  utilizando  $D^*_{pc(max)}$  na equação (3.9)

$$D^*_{pc(max)} = K_1 \cdot K_2 \cdot b_{pc} \quad (3.23)$$

- F. Calcular o valor do diâmetro equivalente do maciço de encabeçamento,  $D^*_{pc}$ . Se o valor de H for maior que  $y_{2(max)}$  considera-se  $H=y_{3(max)}$ .

$$D^*_{pc} = K_1 \cdot K_1 \cdot b_{pc} \cdot \left[ -1,65 \cdot \left\{ \left[ \frac{H_{pc}}{(y_{3(max)} + y_{s(pc)(max)})} \right]^4 - \left[ \frac{H}{(y_{3(max)} + y_{s(pc)(max)})} \right]^4 \right\} + 1,40 \cdot \left\{ \left[ \frac{H_{pc}}{(y_{3(max)} + y_{s(pc)(max)})} \right]^3 - \left[ \frac{H}{(y_{3(max)} + y_{s(pc)(max)})} \right]^3 \right\} + 0,86 \cdot \left\{ \left[ \frac{H_{pc}}{(y_{3(max)} + y_{s(pc)(max)})} \right]^2 - \left[ \frac{H}{(y_{3(max)} + y_{s(pc)(max)})} \right]^2 \right\} - 1,34 \cdot \left\{ \left[ \frac{H_{pc}}{(y_{3(max)} + y_{s(pc)(max)})} \right] - \left[ \frac{H_{col}}{(y_{3(max)} + y_{s(pc)(max)})} \right] \right\} \right] \quad (3.24)$$

Calculados os diâmetros equivalentes da coluna e do maciço falta apenas calcular o diâmetro equivalente do grupo de estacas. O efeito do grupo de estacas na erosão é tanto maior quanto maior for a área exposta ao escoamento. Por esse motivo para conseguir definir a contribuição do grupo de estacas para a erosão é necessário calcular a erosão provocada pela coluna e pelo maciço de modo a saber qual é a altura de estacas que está exposta. Para isso considera-se o diâmetro equivalente do conjunto maciço + coluna:  $D^*_{(col)+(pc)} = D^*_{col} + D^*_{pc}$ . A profundidade,  $y_{s(col+pc)}$ , é calculada pela equação (3.9) utilizando esse diâmetro equivalente.

Esta profundidade é somada a  $H_{pg}$  e  $y_0$  para corrigir esses valores para o cálculo do diâmetro equivalente do grupo de estacas.

$$H_{pg(corr)} = H_{pg} + y_{s(col+pc)} \quad (3.25)$$

$$y_{0(corr)} = y_0 + y_{s(col+pc)} \quad (3.26)$$

$H_{pg(corr)}$  é a distância total do fundo, após a erosão associada ao maciço e coluna, ao topo do grupo de estacas e  $y_{0(corr)}$  é a altura do fundo à superfície livre.

O grupo de estacas difere fortemente dos outros dois elementos no aspeto em que este não é constituído apenas por um elemento, mas sim, um conjunto de estacas. O procedimento para o cálculo do diâmetro equivalente do grupo de estacas é apresentado de seguida nos passos A a I.

- A. Calcular  $y_{s(col+pc)}$  como descrito anteriormente.
- B. Calcular os valores de  $H_{pg(corr)}$  e  $y_{1(corr)}$ .
- C. Calcular o coeficiente de forma através das equações seguintes.

$$K_1 = \frac{K_{1(pile)} - K_{1(pilegroup)}}{9} \cdot \frac{s}{w_{pi}} + K_{s(pile)} - \frac{10}{9} \cdot (K_{1(pile)} - K_{1(pilegroup)}) \quad (3.27)$$

Em que:

$W_{pi}$  – representa a largura projetada de uma única estaca;

$S$  – é o valor mínimo de  $s_n$  e  $s_m$  (figura 3.15)

$$K_1 = \begin{cases} 1, & \text{para estacas circulares e} \\ & \text{grupos de estacas com } \frac{s}{b} > 3 \text{ ou } n = 1 \\ 0,86 + 0,97 \cdot \left| \alpha \cdot \frac{\pi}{180^\circ} - \frac{\pi}{4} \right|^4, & \text{para estacas quadradas e} \\ & \text{grupos de estacas com } \frac{s}{b} \leq 3 \text{ e } n > 1 \end{cases} \quad (3.28)$$

- D. Calcular a largura projetada do grupo de estacas,  $W_p$ . A largura projetada é a soma da projeção das larguras das estacas individuais.

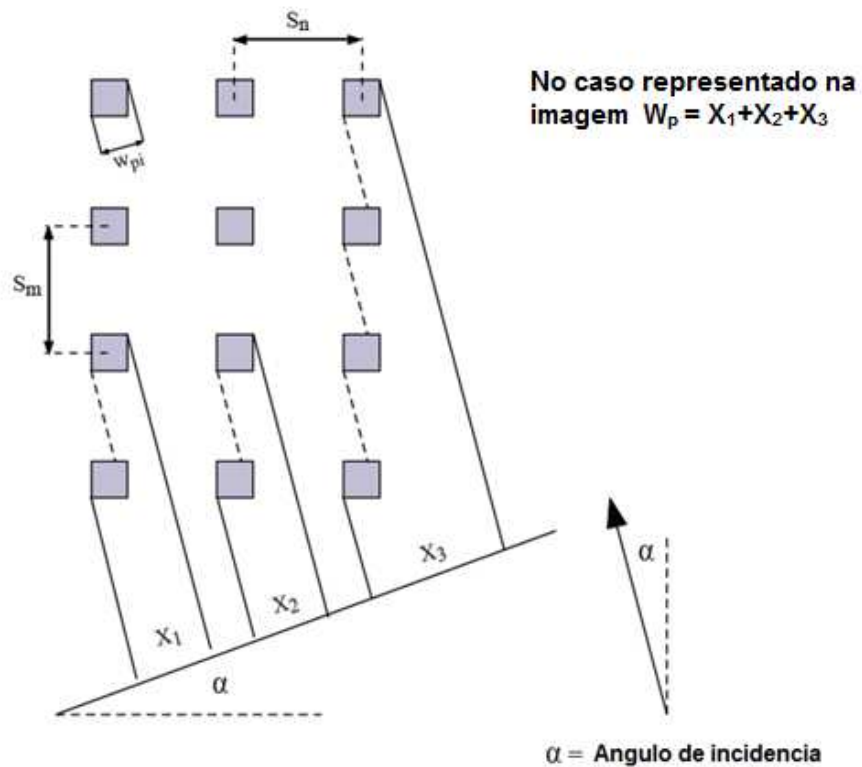


Figura 3.15 – Exemplificação do cálculo de  $W_p$  (adaptado de FDT, 2010)

- E. Calcular o coeficiente de espaçamento do grupo de estacas,  $K_{sp}$ . Caso  $s_n$  e  $s_m$  sejam diferentes considera-se o mínimo como o valor de  $s$ .

$$K_{sp} = \frac{4}{3} \cdot \left(1 - \frac{w_{pi}}{W_p}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{\left(\frac{s}{w_{pi}}\right)^{0,6}}\right) \quad (3.29)$$

- F. Calcular o valor de  $K_m$ , coeficiente que tem em conta o numero de estacas alinhadas para ângulos de incidência pequenos, se  $\alpha > 5$  então o coeficiente toma o valor de 1. Na equação seguinte se  $m > 5$  então considera-se  $m=5$

$$K_m = \begin{cases} 1, & \text{se } \alpha > 5 \text{ ou } \frac{s}{b} > 10 \text{ ou } m = 1 \\ 0,056 \cdot m - 0,056 \cdot m \cdot \frac{s}{b} + 0,0056 \cdot m + 0,95, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.30)$$

- G. Calcular  $y_{3(max)(corr)}$

$$y_{3(max)(corr)} = \begin{cases} y_{1(corr)}, & \text{se } y_{1(corr)} \leq K_1 \cdot W_p \cdot K_{sp} \cdot K_m \\ K_1 \cdot W_p \cdot K_{sp} \cdot K_m, & \text{se } y_{1(corr)} > K_1 \cdot W_p \cdot K_{sp} \cdot K_m \end{cases} \quad (3.31)$$

- H. O diâmetro equivalente do grupo de estacas depende de onde o topo do grupo de estacas se encontra em relação ao escoamento. O coeficiente que tem em conta essa localização,  $K_h$ . Caso a altura a que o topo do grupo se encontra seja maior que  $y_{3(max)(corr)}$  considera-se que a razão entre estes é 1.

$$K_h = \left(\frac{H_{pg(corr)}}{y_{3(max)(corr)}}\right)^{0,1} \quad (3.32)$$

- I. Calcular  $D^*_{pg}$

$$D^*_{pg} = K_{sp} \cdot K_h \cdot K_m \cdot K_1 \cdot W_p \quad (3.33)$$

Tendo definido todos os diâmetros equivalentes pode-se calcular o diâmetro equivalente do pilar complexo, fazendo o somatório das componentes. Aplicando a equação 3.4.1 com esse valor obtém-se a profundidade de erosão para qualquer situação que se enquadre no caso 1.

3.3.2. CÁLCULO DA PROFUNDIDADE MÁXIMA DE EROÇÃO PARA O CASO 2

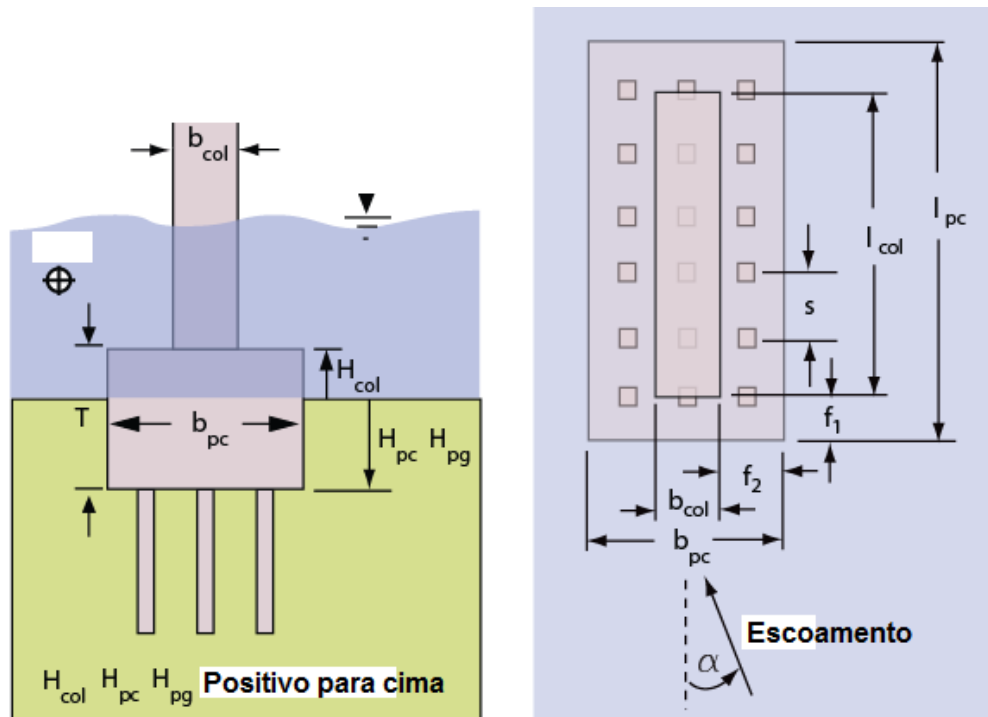


Figura 3.16 – Esquema do pilar complexo para o caso 2, vista frontal (esquerda) e vista em planta (direita) (Adaptado de FDT, 2010)

O procedimento adotado para determinar o diâmetro equivalente neste caso segue o mesmo procedimento que para o Caso 1. Neste caso, no entanto, a forma de calcular o diâmetro equivalente associado ao maciço de encabeçamento é feito de uma forma diferente que no Caso 1, como o maciço se encontra parcialmente enterrado a sua área exposta ao escoamento varia com a profundidade da cavidade de erosão.

Existem duas situações possíveis neste caso:

- Ocorre infraescavação do maciço;
- A erosão criada pela coluna não é suficiente para escavar o maciço.

Para prever se ocorre infraescavação determina-se a profundidade associada ao pilar,  $y_{s(col)}$ , e se esta tiver um valor igual ou maior que a distância entre o leito e a base do maciço, ocorre infraescavação. Então procede-se à determinação de  $D_{pc}$  da mesma forma que para o caso 1.

Caso não se verifique infraescavação tem de se apurar o valor de  $T'$ , distância vertical entre o topo do maciço de encabeçamento e o ponto de maior profundidade da cavidade de erosão e a distância entre o nível do leito corrigido e a base do maciço de encabeçamento, até que seja atingida a profundidade de equilíbrio ou até que ocorra infraescavação, trata-se assim, de um processo iterativo.

Para o cálculo de  $D_{col}^*$  seguem-se os mesmos passos que no caso 1. Para o cálculo de  $D_{pc}^*$  seguem-se os passos A a K apresentados a seguir.

- A. Calcular o coeficiente de forma, da mesma forma que no caso 1.
- B. Calcular o coeficiente do ângulo de incidência, da mesma forma que no caso 1.
- C. Calcular  $y_{2(\max)}$  da mesma forma que no caso 1.
- D. Calcular  $y_{s(pc)(\max)}$  utilizando  $D^*_{pc(\max)}$ , tal como no caso 1. Mas define-se agora esta como sendo a iteração 0,  $i=0$ .
- E. Calcular  $H'_{pc}$

$$H'_{pc} = \begin{cases} H_{pc} , caso Y_{s(col+pc(i))} \geq |H_{pc}| \\ - Y_{s(col+pc(i))} , caso Y_{s(col+pc(i))} < |H_{pc}| \end{cases} \quad (3.34)$$

Em que o valor de  $Y_{s(col+pc(i))} = y_{s(col)}$  para  $i=0$

- F. Calcular o diâmetro equivalente para o maciço tendo em consideração que se  $H_{col} > y_{2(\max)}$  considera-se  $H_{col} = y_{2(\max)}$ .

$$D^*_{pc} = K_1 \cdot K_2 \cdot b_{pc} \cdot \left[ -1,65 \cdot \left\{ \left[ \frac{H'_{pc}}{(y_{2(\max)} + y_{s(pc)(\max)})} \right]^4 - \left[ \frac{H}{(y_{2(\max)} + y_{s(pc)(\max)})} \right]^4 \right\} + 1,40 \cdot \left\{ \left[ \frac{H'_{pc}}{(y_{2(\max)} + y_{s(pc)(\max)})} \right]^3 - \left[ \frac{H}{(y_{2(\max)} + y_{s(pc)(\max)})} \right]^3 \right\} + 0,86 \cdot \left\{ \left[ \frac{H'_{pc}}{(y_{2(\max)} + y_{s(pc)(\max)})} \right]^2 - \left[ \frac{H}{(y_{2(\max)} + y_{s(pc)(\max)})} \right]^2 \right\} - 1,34 \cdot \left\{ \left[ \frac{H'_{pc}}{(y_{2(\max)} + y_{s(pc)(\max)})} \right] - \left[ \frac{H}{(y_{2(\max)} + y_{s(pc)(\max)})} \right] \right\} \right] \quad (3.35)$$

- G. Calcular o diâmetro equivalente inicial da coluna e da parte desenterrada do maciço

$$D^*_{(col+pc(i))} = D^*_{col} + D^*_{pc(i)} \quad (3.36)$$

- H. Passar para a próxima iteração,  $i=i+1$ . Reaplicar o método para determinar a nova parte exposta do maciço.
- I. Verificar a convergência



$$\Delta = \left| \frac{Y_{s(col+pc(i))} - Y_{s(col+pc(i+))}}{Y_{s(col+pc(i))}} \right| \quad (3.37)$$

Se  $\Delta > 0,05$  regressar ao passo E, se for menor passar para o passo J

J. Atingida a convergência das iterações, definir

$$D_{pc}^* = D_{pc(i)}^*$$

$$D_{(col+pc)}^* = D_{(col+pc(i))}^*$$

$$Y_{s(col+pc)} = Y_{s(col+pc(i))}$$

K. Verificar se o grupo de estacas se encontra exposto. Se  $y_{s(col+pc)} \leq |H_{pg}|$  então o grupo de estacas não tem influência, e passa-se diretamente para o cálculo da erosão criada pelo pilar complexo. Se o grupo de estacas afetar a erosão procede-se ao cálculo para o grupo de estacas

Calculados os diâmetros efetivos da coluna e do maciço de encabeçamento, podemos obter o valor da erosão provocada por estes elementos. Caso o grupo de estacas não esteja exposto, a erosão calculada é a erosão máxima associada a esse pilar complexo. Se o grupo de estacas ficar exposto procede-se ao cálculo do seu diâmetro efetivo como no caso 1.

### 3.3.3. CÁLCULO DO DIÂMETRO EFETIVO PARA O CASO 3

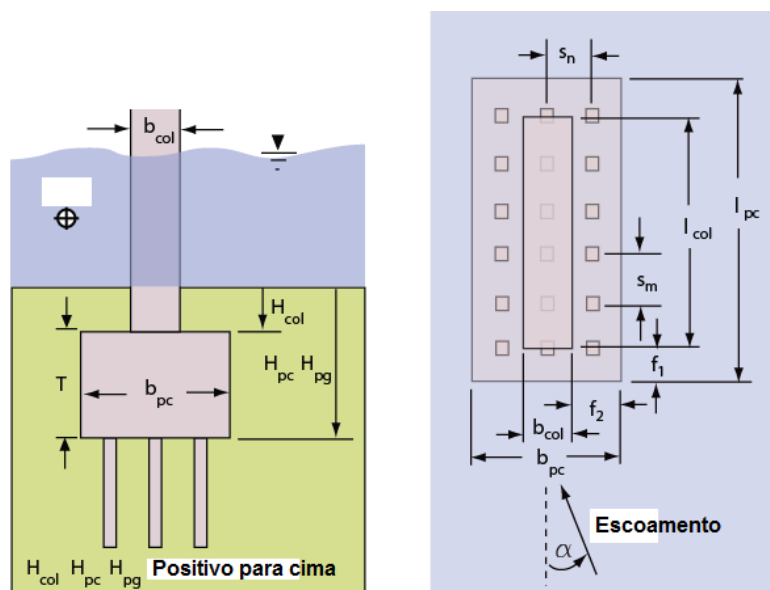


Figura 3.17 – Esquema do pilar complexo para caso 3, vista frontal (esquerda) e vista em planta (direita) (Adaptado de FDT, 2010)

O método para calcular a erosão quando o maciço de encabeçamento está completamente enterrado é descrito neste subcapítulo. Tal como no caso dois a parte exposta da estrutura varia com a erosão, por esse motivo é necessário aplicar um método iterativo para determinar o diâmetro efetivo de cada uma das componentes.

O procedimento para o cálculo do diâmetro efetivo da coluna é apresentado de seguida nos passos A a I.

- A. Calcular o coeficiente de forma como para os casos 1 e 2;
- B. Calcular o coeficiente do ângulo de incidência como para os casos 1 e 2;
- C. Calcular  $y_{s(col)(max)}$  utilizando  $D^*_{col(max)}$  na equação (3.9), em que  $D^*_{com(max)}=K_1 \cdot K_2 \cdot b_{col}$ ;
- D. Comparar a profundidade de erosão calculada no passo C com a distância do fundo à base da coluna inicial. Caso a profundidade não seja elevada o suficiente para atingir a base da coluna, o diâmetro equivalente do pilar complexo é o mesmo que o da coluna. Caso a profundidade de erosão seja suficiente para atingir o fundo da coluna continua-se para o passo E;
- E. Determinar o valor mínimo de  $D^*_{col}$ ,  $D^*_{col(min)}$ . Este valor é obtido a partir da equação (3.9) considerando  $y_s$  como a distância do leito inicial à base da coluna;
- F. Calcular o coeficiente que tem em conta parte saliente do maciço.

$$f = \begin{cases} \frac{3 \cdot f_1 + f_2}{4}, & \text{se } \alpha \leq 45^\circ \\ \frac{3 \cdot f_2 + f_1}{4}, & \text{se } \alpha > 45^\circ \end{cases} \quad (3.38)$$

$$K_f = \begin{cases} 1, & \text{para } 0 \leq \frac{f}{b_{col}} \leq 1 \\ -0,25 \cdot \left(\frac{f}{b_{col}}\right)^2 + 0,5 \cdot \left(\frac{f}{b_{col}}\right) + 0,75, & \text{para } 1 \leq \frac{f}{b_{col}} \leq 3 \\ 0, & \text{para } \frac{f}{b_{col}} > 3 \end{cases} \quad (3.39)$$

- G. Calcular  $y_{1(max)}$  para a coluna;

$$y_{1(max)} = \begin{cases} 3 \cdot K_s \cdot K_\alpha \cdot b_{col}, & \text{se } y_0 \geq 3 \cdot K_s \cdot K_\alpha \cdot b_{col} \\ y_0, & \text{se } y_0 < 3 \cdot K_s \cdot K_\alpha \cdot b_{col} \end{cases} \quad (3.40)$$

- H. Calcular  $D^*_{col(f)}$ ;

$$D^*_{col(f)} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_f \cdot b_{col} \cdot \left\{ -1,65 \cdot \left[ \frac{H}{(y_{1(max)} + y_{s(col)(max)})} \right]^4 + 1,4 \cdot \left[ \frac{H}{(y_{1(max)} + y_{s(col)(max)})} \right]^3 + 0,86 \cdot \left[ \frac{H}{(y_{1(max)} + y_{s(col)(max)})} \right]^2 - 1,34 \cdot \left[ \frac{H}{(y_{1(max)} + y_{s(col)(max)})} \right] + 0,41 \right\} \quad (3.41)$$

- I. Calcular o diâmetro efetivo da coluna, que é, o máximo dos valores de  $D^*_{col(min)}$  e  $D^*_{col(f)}$ ;
- J. Calcular a profundidade associada à coluna do pilar.

O cálculo dos diâmetros equivalentes para o maciço de encabeçamento e do grupo de estacas é feito de forma análoga aos casos anteriores.



# 4

## ENSAIOS LABORATORIAIS

No âmbito desta dissertação foram realizados oito ensaios laboratoriais inseridos no projeto de investigação “Estudo experimental de erosões localizadas junto de pilares complexos” (referência FCT: PTDC/ECM/101353/2008), no qual a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) se encontra inserida.

Os ensaios realizados, neste projeto, diziam respeito a três séries (de 1 a 3) tendo cada uma delas seis configurações diferentes (de A a F). Foram ainda realizados dois ensaios complementares, T1 e T2. As séries de ensaio distinguem-se pelo número de elementos, que constituem o pilar completo, que são testados. Assim, na série 1 foi testado o pilar complexo na sua totalidade (grupo de estacas + maciço de encabeçamento + coluna do pilar). Nas outras duas séries foi retirado um dos elementos sendo que na série 2 foi retirada a coluna do pilar e na série 3 o grupo de estacas. Entre as diferentes configurações de ensaio a distância vertical entre o leito inicial e o topo do maciço de encabeçamento ia sendo modificada desde a posição em que o topo do maciço coincidia com a superfície livre do escoamento (configuração A) até uma profundidade de 6 cm para além do leito inicial (configuração F). Para os ensaios da série T consideraram-se posições extremas. Para o ensaio T1 o maciço e a coluna do pilar estariam totalmente fora de água havendo apenas influência do grupo de estacas para o processo erosivo e, no ensaio T2 o maciço de encabeçamento estaria a uma distância de 30 cm da configuração inicial do leito.

O plano de ensaios que foi seguido, pela FEUP no âmbito do projeto, pode ser consultado na figura 4.1. No entanto, no âmbito desta dissertação apenas foram realizados da série 2 os ensaios E2 e F2 e todas as configurações de ensaio da série 3 (assinalados pelo contorno vermelho na figura 4.1).

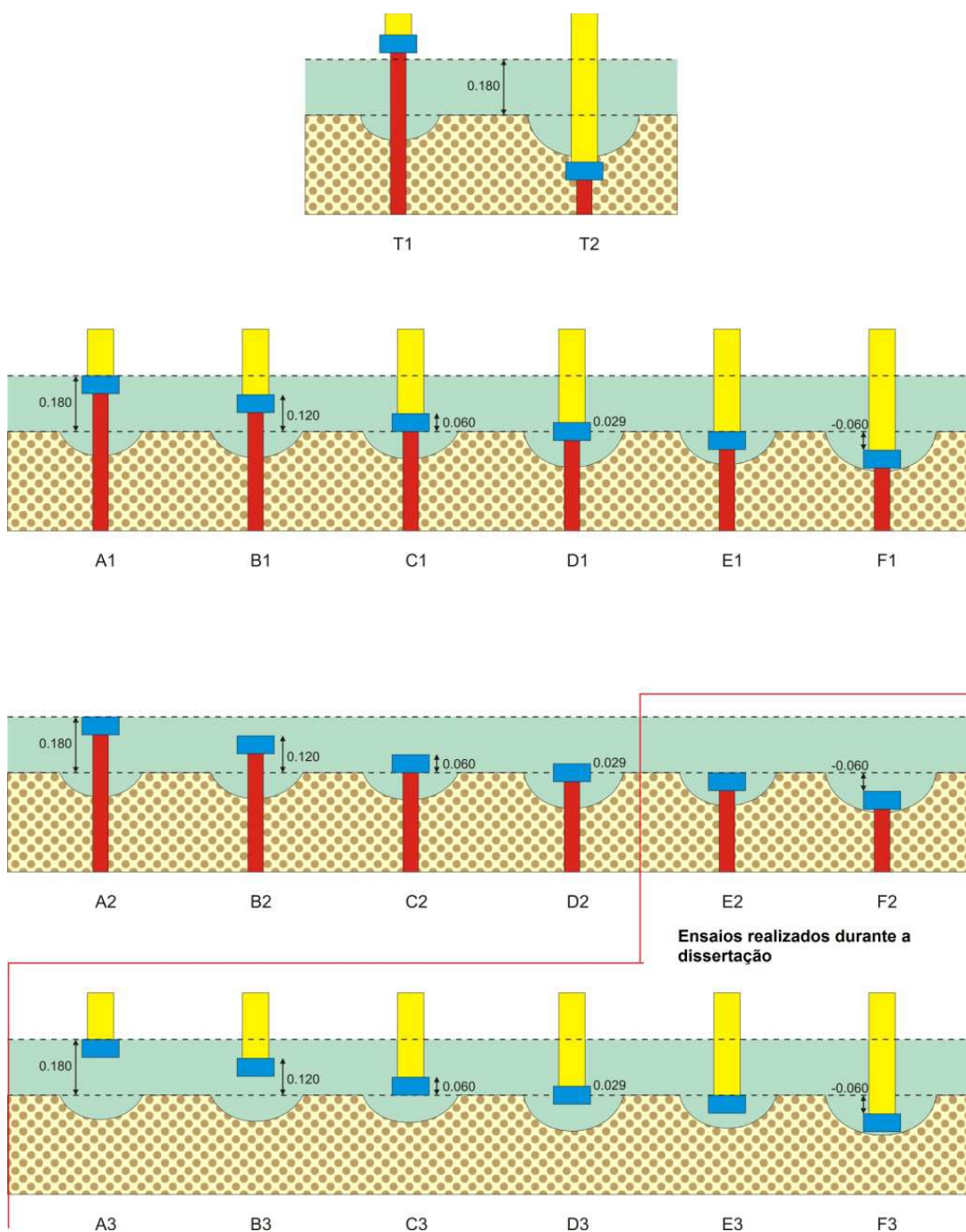


Figura 4.1 – Plano de ensaios

Neste capítulo é descrita a instalação experimental, o equipamento de medição utilizado, as condições de ensaio e respetivo procedimento experimental e são, ainda, descritos os ensaios realizados.

#### 4.1. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais relativos a esta dissertação foram levados a cabo numa instalação já existente no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Figura 4.2).



Figura 4.2 – Vista geral do canal da instalação experimental

A instalação, que funciona em circuito hidráulico fechado, é constituída por quatro grupos de elevação em série que se encontram a montante. Os grupos elevatórios têm as capacidades indicadas no quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Grupos elevatórios da instalação experimental

Grupo elevatório	Caudal bombado (l/s)
GE1	22
GE2	20
GE3	20
GE4	40

Através da utilização das bombas indicadas a água é transportada para um reservatório de alimentação a um nível superior. A partir deste reservatório a água é introduzida num conjunto de duas tubagens em série que alimentam o canal onde são realizadas os ensaios (figura 4.3). As tubagens de alimentação estão munidas de dois caudalímetros eletromagnéticos para registo dos caudais afluentes.

O canal utilizado, construído em betão e munido de janelas laterais que permitem visualizar o desenvolvimento da cavidade de erosão, tem 32,3 metros de comprimento e 1 metro de largura. No canal foram instaladas duas caixas de sedimentos através da realização de um fundo falso. A de montante, onde é implantado o pilar complexo para realização dos ensaios, terá a largura do canal, uma altura de 0,36 metros e comprimento de 3,20 metros. As dimensões da caixa de sedimentos, onde será feita apenas a retenção do material transportado, são iguais à de montante na sua largura e altura variando apenas quanto ao comprimento (2,50 metros). No extremo de jusante do canal existe uma comporta ajustável que permite regular a altura do escoamento. A água descarregada afluí a um reservatório que alimenta os grupos elevatórios encerrando, assim, o circuito hidráulico. Nas figuras 4.3 e 4.4 apresentam-se, respetivamente, um esquema da instalação experimental utilizada e um esquema detalhado só do canal de ensaio para melhor compreensão.

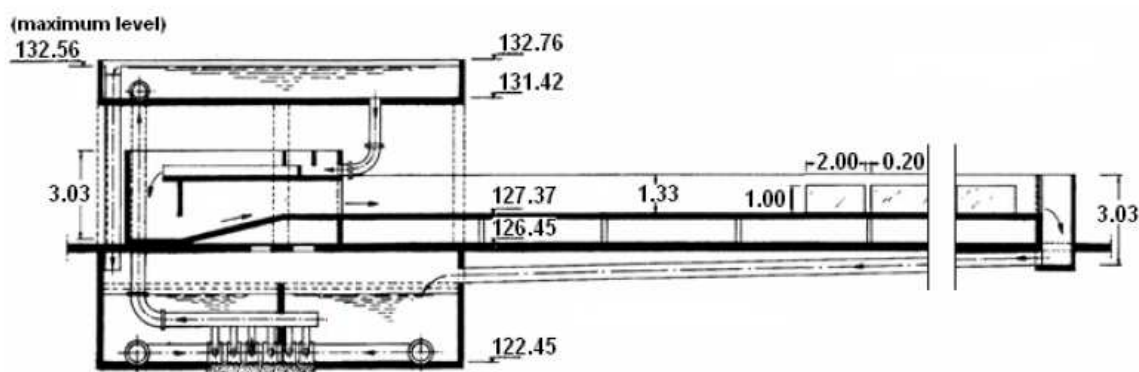


Figura 4.3 – Esquema da instalação experimental

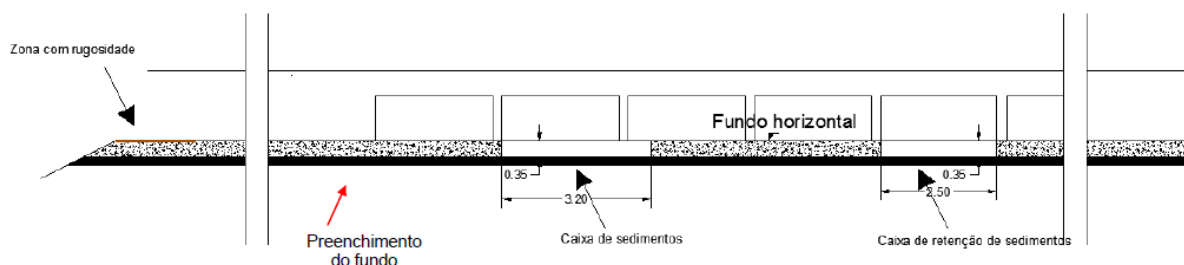


Figura 4.4 – Esquema do canal de ensaios – esquema longitudinal (Pinheiro, 2010)

A caixa de sedimentos de montante foi preenchida com areia de quartzo obtida por peneiração a partir de areia retirada do rio Tejo, tendo sido cedida pela Universidade da Beira Interior à FEUP. Este material tem os seguintes valores característicos: Diâmetro mediano,  $D_{50} = 0,86\text{mm}$ ; coeficiente de graduação,  $\sigma_D = 1,4$  e massa volúmica  $\rho_s = 2650\text{ kgm}^{-3}$ . Esta areia pode ser classificada como uniforme visto que  $\sigma_D < 1,5$ . Na figura 4.5 pode-se observar a curva granulométrica da areia.



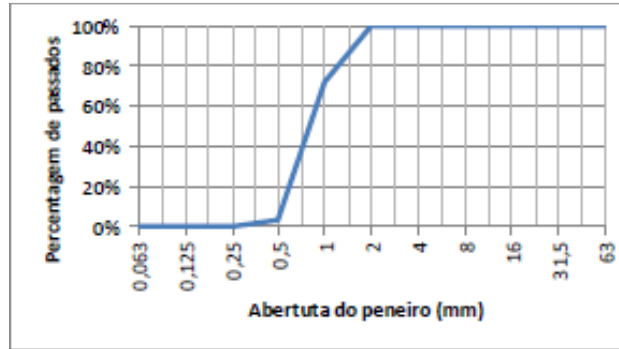


Figura 4.5 – Curva granulométrica do material de fundo

O pilar complexo utilizado nos ensaios (Figura 4.6) é constituído por três elementos:

- Coluna do pilar retangular com extremidades semicirculares (em perspex);
- Maciço de encabeçamento retangular também com extremidades semicirculares (em perspex);
- Grupo de quatro estacas circulares alinhadas e paralelas ao eixo do canal (em PVC).



Figura 4.6 – Modelo do pilar complexo utilizado nos ensaios

São apresentadas na figura 4.7 as dimensões do pilar complexo.

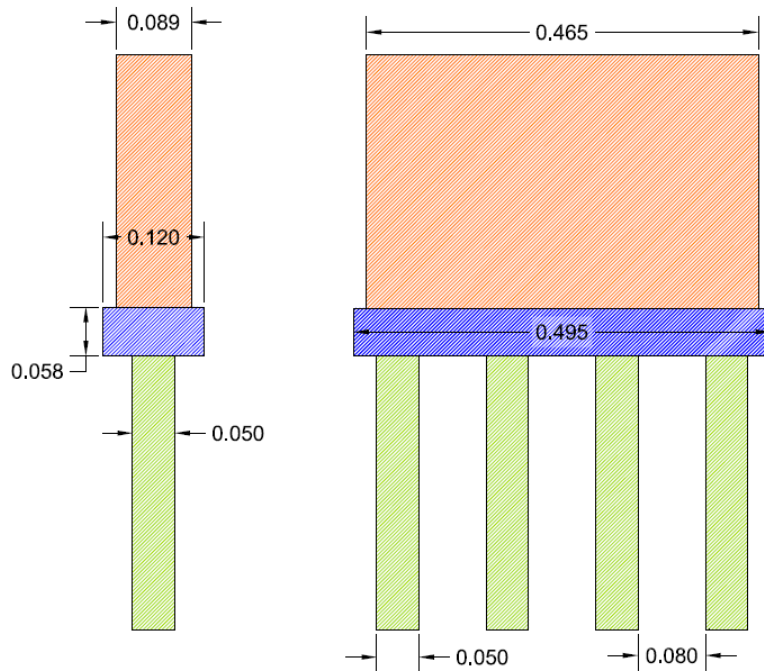


Figura 4.7 – Dimensões do modelo experimental em metros

## 4.2. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

### 4.2.1. MEDIÇÃO DOS CAUDAIS (CAUDALÍMETROS)

Para a medição dos caudais que alimentam o canal foram utilizados dois caudalímetros eletromagnéticos com visor digital permitindo, assim, a leitura do caudal instantâneo.



Figura 4.8 – Caudalímetros para medição de valores instantâneos

Os caudalímetros são da marca Sparling, modelo Waterhawk, com precisão ao decilitro/segundo e incerteza de 2% do caudal passado.

#### 4.2.2. MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DE EROÇÃO (LIMNÍMETRO)

Para se realizar a medição das profundidades de erosão foi utilizado um limnómetro com precisão na ordem da décima de milímetro (Figura 4.9). A medição é realizada descendo manualmente a agulha até penetrar totalmente a parte cónica na areia e proceder à leitura na régua.



Figura 4.9 – Limnómetro para medição de profundidades de erosão aplicado na estrutura de suporte

### 4.3. CONDIÇÕES DE ENSAIO

#### 4.3.1. CARATERIZAÇÃO DA VELOCIDADE CRÍTICA DE INÍCIO DE MOVIMENTO

Os ensaios foram realizados em condições de escoamento sem transporte sólido generalizado. Para que tal se verificasse foi necessário determinar anteriormente a velocidade crítica do início do movimento para que fosse utilizada, nos ensaios, uma velocidade média de escoamento menor do que a crítica. Em seguida comparam-se as velocidades calculadas pelos métodos de cálculo de velocidade crítica referidos no subcapítulo 2.2.1.

Quadro 4.2 – Valores de velocidade crítica calculados pelos métodos propostos por diferentes autores

Autor	$U_c$ (m/s)
Neil (1967)	0,318
Garde (1970)	0,329
FDT (2005)	0,357

De acordo com Pinheiro (2010), a velocidade crítica de início de movimento deve ser calculada através do método FDT (2005) pelo que neste trabalho assumiu-se o valor de 0,357 m/s. A partir deste e fixando uma altura de escoamento de 18 cm conclui-se que o canal deverá ser alimentado com um caudal de 59 l/s e conhecida a secção do escoamento obtém-se uma velocidade de 0,328 m/s que fica abaixo da velocidade crítica calculada. Nestas condições a relação de intensidade do escoamento é  $U/U_c=0,914$ , o que garante as condições sem transporte sólido generalizado.

#### 4.3.2. CARATERIZAÇÃO DO TEMPO DE EQUILÍBRIO

Nesta dissertação utilizou-se como critério de paragem do ensaio o proposto por Pinheiro (2010). Assim, quando se verificar que o aumento da profundidade de erosão da cavidade, em 24 horas, é igual ou inferior a 1 mm será assumido que foi atingida a profundidade de equilíbrio dando-se por terminado o ensaio. Pinheiro (2010) refere que este critério respeita o proposto por Fael (2007) que, para o material utilizado ( $D_{50} = 0,86$  mm), consideraria que se atingia o equilíbrio quando o aumento da profundidade fosse menor que 1,72mm em 24 horas. Assim, o critério adotado para este estudo configura-se adequado.

#### 4.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho, cada um dos ensaios, foi dividido em três fases principais sendo elas:

- Preparação do ensaio;
- Início do ensaio;
- Medições e término do ensaio.

Em todas elas se exigiu o maior rigor possível de forma a evitar erros humanos e decorrentes efeitos anómalos no comportamento dos ensaios obtendo assim os melhores resultados possíveis. Refere-se ainda que sempre que no decorrer dos ensaios se verificaram situações anómalas o ensaio foi imediatamente terminado sendo repostas as condições iniciais e reiniciados os ensaios.

##### 4.4.1. PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS

- 1- Abrir a válvula do dreno existente no fundo da caixa de sedimentos de montante de forma a auxiliar a manipulação do material granular entre ensaios;
- 2- Retirar a areia existente na zona do pilar complexo facilitando assim o acesso ao sistema de fixação do grupo de estacas;
- 3- Instalar a configuração de ensaio pretendida (série 2 – maciço de encabeçamento + estacas, série 3 – coluna do pilar + maciço de encabeçamento);

- 4- Preencher a caixa de sedimentos com a areia retirada anteriormente e compactar, para não se verificarem abatimentos significativos na fase de início do ensaio;
- 5- Regularizar a areia obtendo uma superfície plana em concordância com o fundo do canal a montante e jusante da caixa de sedimentos (Figura 4.10);



Figura 4.10 – Aspeto final da regularização da areia

- 6- Retirar, com o limnómetro, a medição da configuração inicial do leito para comparação com os valores registados no decorrer do ensaio;
- 7- Colocar as proteções têxteis de forma a evitar fenómenos de erosão antes de se obterem as condições de escoamento pretendidas (Figura 4.11).



Figura 4.11 – Proteções têxteis aplicadas em volta dos elementos a ensaiar

#### 4.4.2. INÍCIO DO ENSAIO

- 1- Fechar a válvula do dreno existente na caixa de sedimentos;
- 2- Acionar os grupos elevatórios necessários para que o canal seja alimentado com 59 l/s, e verificar se o reservatório superior se encontra cheio;
- 3- Colocar a comporta a pelo menos 20 cm de altura acima do fundo do canal garantindo o lento enchimento do canal para que ao longo da estabilização do escoamento não ocorram velocidades superiores às requeridas;
- 4- Abrir as válvulas de forma a que um caudal baixo, cerca dos 2 l/s, seja fornecido ao canal até este se encontrar totalmente coberto por uma lâmina de água, com cerca de 8 cm de espessura, expulsando assim o ar dos espaços intersticiais da areia;
- 5- O preenchimento dos vazios entre a areia com água leva a que ocorram assentamentos do leito, de modo que deve ser parado o enchimento e realizado novamente o processo do subcapítulo 4.4.1.;
- 6- Aumentar lentamente o caudal até obter o pretendido;
- 7- Regular a comporta gradualmente até se verificar a altura do escoamento desejado;
- 8- Iniciar o ensaio retirando as proteções têxteis.

#### 4.4.3. MEDIÇÕES E TERMO DO ENSAIO

- 1- Registrar os valores medidos periodicamente através do limnómetro. Refere-se que na primeira hora de ensaio eram efetuadas medições com intervalos de tempo de 5 a 10 minutos visto que neste período a erosão tem um desenvolvimento muito rápido. Após esta primeira etapa eram realizadas medições mais espaçadas no tempo. A partir do final do primeiro dia do ensaio verifica-se que apenas será necessário realizar entre uma a duas medições diárias de forma a que o escoamento não seja significativamente perturbado;
- 2- Verificando-se que é cumprido o critério de equilíbrio é terminado o ensaio, fecham-se as válvulas e desligam-se os grupos elevatórios.

### **4.5. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS**

#### 4.5.1. ENSAIOS DA SÉRIE 3

No âmbito desta dissertação, foram realizados os ensaios relativos a todas as configurações de ensaio da série 3. Os elementos ensaiados nesta série foram o maciço de encabeçamento e a coluna do pilar (Figura 4.12).

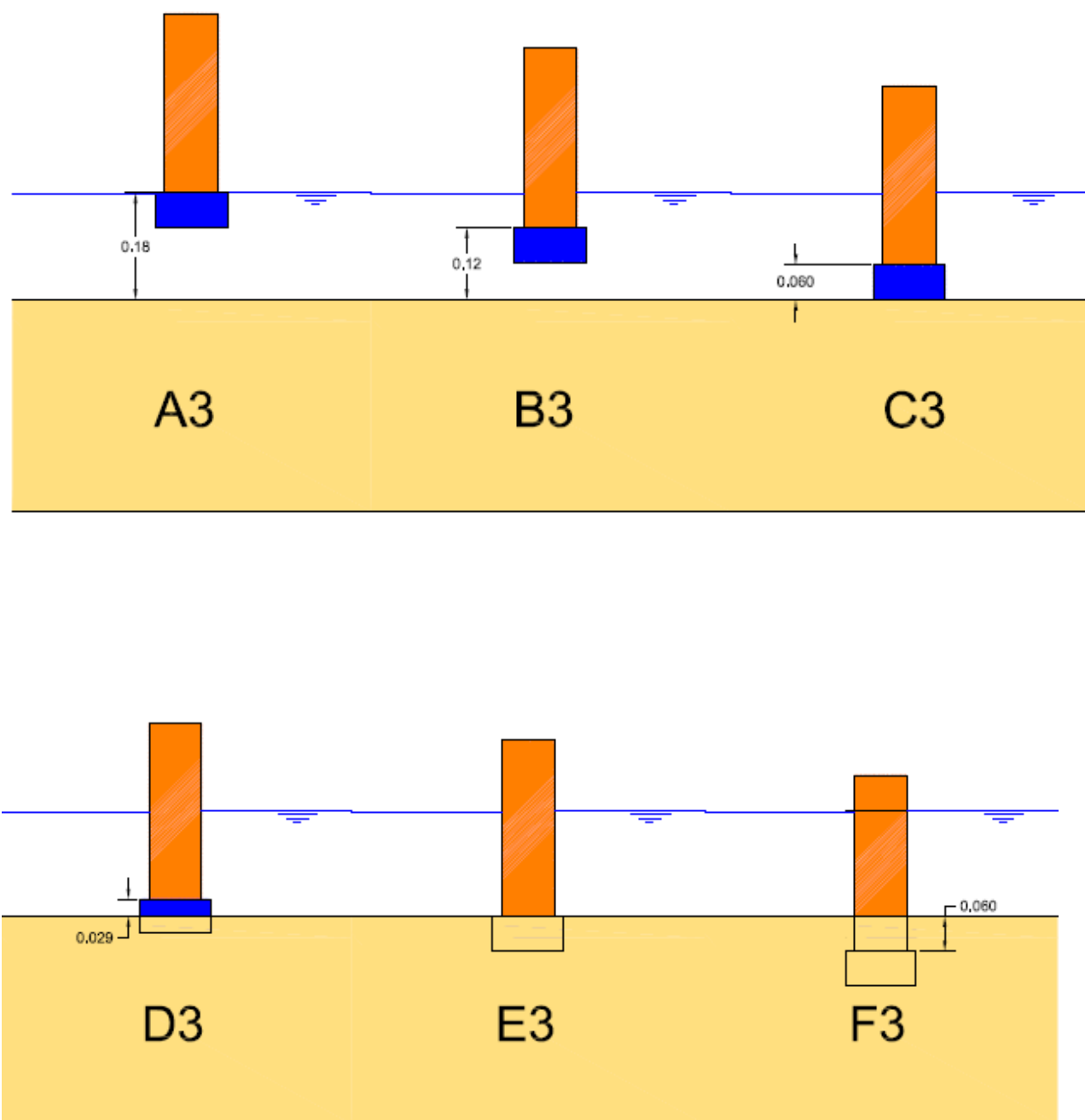


Figura 4.12 – Esquema das configurações da série 3

#### 4.5.2. ENSAIOS DA SÉRIE 2

Nesta dissertação, da série 2, apenas foram realizados os ensaios da configuração E e F visto que ainda não tinham sido realizados no âmbito do projeto de investigação. Nesta série os elementos testados foram o maciço de encabeçamento e o grupo de estacas tendo sido retirada a coluna do pilar (Figura 4.13)



Figura 4.13 – Esquema das configurações da série 2

No entanto, quando foram realizados estes dois ensaios verificou-se que, como o maciço de encabeçamento se encontra, em ambos os casos, completamente enterrado, não se verificava qualquer fenómeno erosivo. Tal deve-se à não existência de um obstáculo ao escoamento normal que possibilite a criação dos vórtices de ferradura. Assim, para que fosse possível estudar a contribuição do maciço e do grupo de estacas para o processo erosivo foi necessário colocar, numa primeira fase, a coluna do pilar até ao instante em que o maciço de encabeçamento se encontrasse exposto à ação do escoamento.



# 5

## APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos durante os ensaios laboratoriais. Primeiramente, são expostos os resultados referentes aos ensaios realizados no âmbito desta dissertação. Depois, de modo a possibilitar uma análise global do efeito no processo erosivo de cada componente do pilar (coluna, maciço de encabeçamento e estacas) e a comparação dos resultados com os métodos de previsão expostos no capítulo 3 (aplicáveis apenas a pilares complexos completos), serão também considerados outros ensaios, realizados anteriormente pela equipa de investigação da FEUP, no projeto onde esta dissertação se insere (referência FCT: PTDC/ECM/101353/2008).

### 5.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SÉRIE 3

Como já foi exposto no capítulo anterior, a série 3 consiste num conjunto de ensaios em que o obstáculo não possui estacas de fundação, sendo constituído apenas pela coluna e pelo maciço de encabeçamento. No gráfico da figura 5.1, representa-se a evolução temporal da profundidade associada a cada um dos ensaios que dizem respeito a esta série.

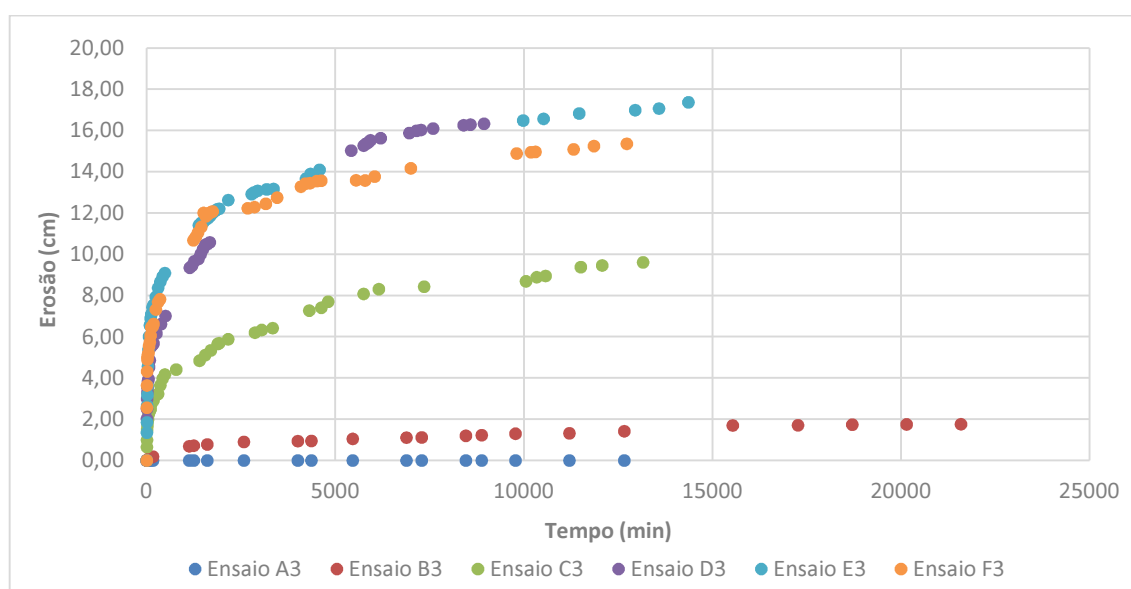


Figura 5.1 – Evolução da profundidade de erosão para cada ensaio da série 3

No quadro 5.1 indica-se a profundidade máxima registada em cada ensaio. De salientar que nem sempre o seu valor máximo ocorre no mesmo ponto, ao contrário do que acontece, por exemplo, num pilar simples (profundidade máxima sempre no alinhamento da face de montante do pilar). Devido à ausência de estacas, ocorreram situações em que a profundidade de erosão máxima foi verificada debaixo do maciço, como se indica na última coluna da seguinte tabela, isso deve-se a não existir um elemento que conduza o escoamento descendente para o ponto de alinhamento da face de montante do maciço. O ponto vermelho representa, em planta, onde se mediu a profundidade, com o limnómetro, após terminado o ensaio.

Quadro 5.1 – Profundidades máximas em cada ensaio realizado

Ensaio	Duração aproximada (h)	Profundidade máxima (cm)	Ponto de medição (visto em planta)
A3	360	0,0	
B3	360	2.8	
C3	220	13.5	
D3	149	16,3	
E3	239	17,4	
F3	212	15,4	

### 5.1.1. ENSAIO A3

Como pode ser constatado na figura 5.2, na configuração do ensaio A3, a superfície livre do escoamento coincide com a face superior do maciço, fazendo assim com que este seja o único elemento do pilar que fica submerso.

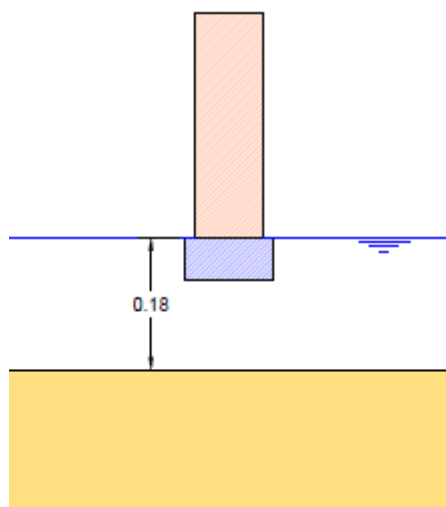


Figura 5.2 – Esquematização da configuração do pilar no ensaio A3 (vista de montante para jusante, unidades em metros)

De todos os ensaios realizados, este foi o único no qual não se observou qualquer erosão no leito de sedimentos, tal como pode ser verificado na figura 5.3. Apesar da pequena sombra visualizada na fotografia provocada pelo maciço, constatou-se visualmente que o leito não sofreu nenhuma erosão e também através de várias medições de valor nulo tiradas ao longo do ensaio, que demorou cerca de 360 horas (15 dias). Na perspetiva do autor, isto pode ser explicado pelo facto da distância do maciço de encabeçamento ao leito (12 cm) ser suficientemente grande de modo a que a perturbação provocada pelo obstáculo no escoamento não chegue a atingir o fundo sedimentar.



Figura 5.3 – Fotografia do leito no ensaio A3

### 5.1.2. ENSAIO B3

A configuração inicial do ensaio B3, que se esquematiza na Figura 5.4, tem a face superior do maciço a 12 cm do fundo arenoso, e provocou alguma erosão, o que vem de encontro ao que foi mencionado anteriormente sobre o efeito desta distância no processo erosivo.

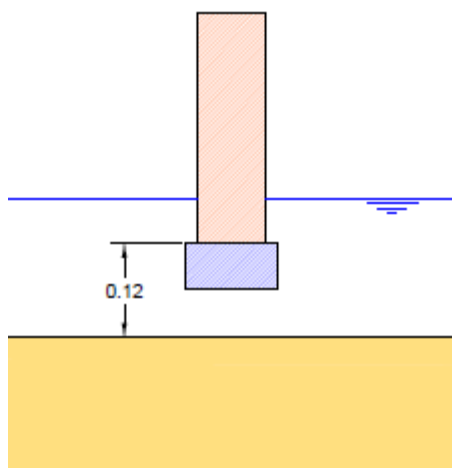


Figura 5.4 – Esquematização da configuração do pilar no ensaio B3 (vista de montante para jusante, unidades em metros)

À exceção do ensaio A3, onde não se registou nenhuma erosão, o ensaio B3 foi aquele onde se verificou a menor profundidade de erosão. Durante o ensaio, a profundidade medida no alinhamento

da face a montante do maciço registou o valor máximo de 1.8 cm. Contudo, como se pode constatar na Figura 5.5 e como é mostrado no quadro 5.1, a profundidade de erosão máxima não ocorre para aquele ponto, mas sim mais para jusante, debaixo do maciço. Após finalizado o ensaio, retirando a coluna e o maciço, foi possível medir a profundidade no ponto onde esta é máxima (11.5 cm a jusante do ponto onde foi medida durante o ensaio), chegando-se ao valor de 2.84 cm.



Figura 5.5 – Fotografia do ensaio B3

### 5.1.3. ENSAIO C3

O ensaio C3 é o primeiro ensaio da série 3 para o qual o comportamento inicial do obstáculo é o mesmo de um pilar complexo completo, visto que para a mesma configuração com estacas (ensaio C1), estas não estariam expostas ao escoamento no início do ensaio.

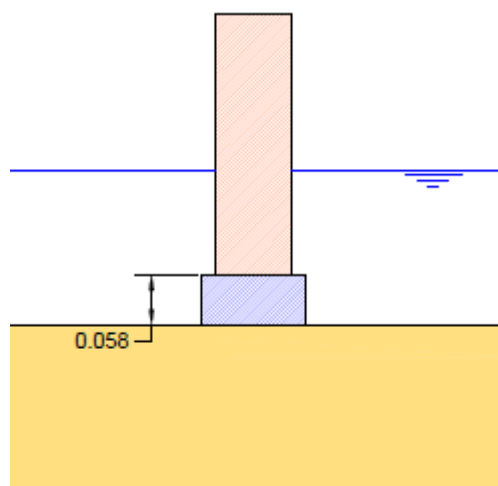


Figura 5.6 – Esquemática da configuração do pilar no ensaio C3 (vista de montante para jusante, unidades em metros)

Nesta disposição volta-se a verificar que a profundidade máxima de erosão não se encontra a montante do pilar, mas sim debaixo deste. A profundidade máxima de erosão registada foi de 13,50 cm, medida 7,1 cm a jusante do ponto das restantes medições.



Figura 5.7 – Fotografia do ensaio C3 (face de montante do maciço)

#### 5.1.4 ENSAIO D3

No ensaio D3, o maciço encontra-se semienterrado no leito arenoso (Figura 5.8). Nos instantes iniciais do processo erosivo (até a face de montante do maciço de encabeçamento ficar completamente exposta) o pilar (coluna e maciço) funciona como se fosse um pilar complexo completo, porque, nesta fase, as estacas ainda não estariam expostas ao escoamento. Depois disso, a cavidade de erosão continua a aumentar quer para montante, quer para jusante, sendo que, neste ensaio, o ponto de erosão máxima ocorre no ponto do alinhamento da face de montante do maciço de encabeçamento, como mostrado na Tabela 5.1.

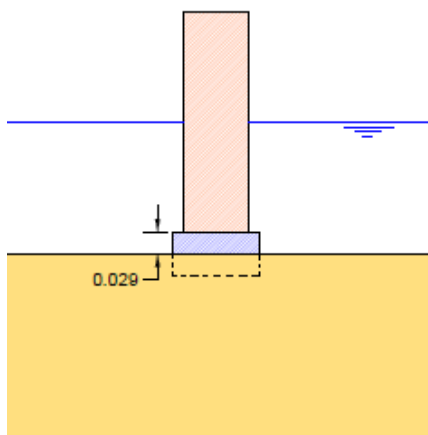


Figura 5.8 – Esquemática da configuração do pilar no ensaio D3 (vista de montante para jusante, unidades em metros)

Neste ensaio, registou-se uma profundidade máxima bastante superior (16.3 cm) aos ensaios anteriores. Apesar do maciço de encabeçamento funcionar como colar de proteção para o escoamento defletido pela coluna, ele próprio também origina um escoamento descendente e vórtices que erodem o fundo arenoso. Como se pode ver pela figura 5.9, ocorre um processo de infraescavação debaixo do maciço, em resultado do escoamento defletido por este e pela coluna, contribuindo, assim para que o pilar ficasse completamente suspenso, no fim do ensaio, sem qualquer apoio no leito de sedimentos.

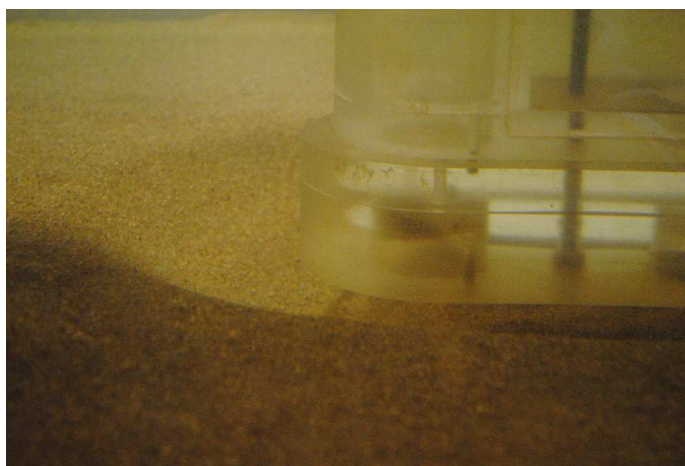


Figura 5.9 – Fotografia do ensaio D3 (face de montante do maciço)

#### 5.1.5. ENSAIO E3

O ensaio E3 é o primeiro para o qual o maciço de encabeçamento se encontra completamente enterrado, sendo este ensaio aquele em que se verificou a profundidade de erosão máxima da série 3.

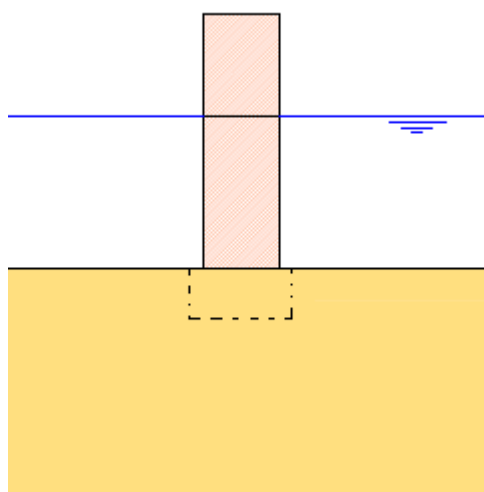


Figura 5.10 – Esquematização da configuração do pilar no ensaio E3 (vista de montante para jusante)

Neste ensaio, o maciço está completamente enterrado, e o escoamento, numa fase inicial, é defletido apenas pela coluna do pilar. Depois, o maciço vai ficando cada vez mais exposto, contribuindo também para o aumento da erosão, resultando numa cavidade de erosão mais profunda (Figura 5.11)

que todos os ensaios anteriores. No entanto, a cavidade não se desenvolveu tanto para jusante, pelo que o maciço não fica completamente desenterrado, ao contrário do que ocorreu no ensaio E3.



Figura 5.11 – Fotografia do ensaio E3 (face de montante do maciço)

#### 5.1.6. ENSAIO F3

O último ensaio da série, em que a face superior do maciço se encontra a 6 cm de profundidade, (Figura 5.11), registou-se uma profundidade máxima de 15.4 cm. Até o maciço ficar exposto ao escoamento, este não influencia o processo erosivo, fazendo com que o obstáculo funcione como um pilar simples. No entanto, ao longo do tempo, o maciço vai ficar completamente descoberto e a cavidade de erosão atinge profundidades para além do nível da face inferior deste (Figura 5.12).

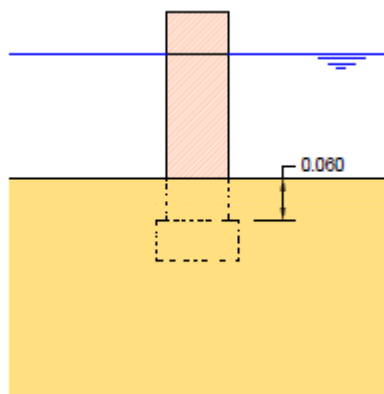


Figura 5.12 – Esquematisação da configuração do pilar no ensaio F3 (vista de montante para jusante, unidades em metros)





Figura 5.13 – Fotografia do ensaio F3 (face de montante do maciço)

No gráfico da figura 5.14 é visível o efeito que o maciço provoca na evolução temporal, quando os sedimentos que o protegiam começam a deixá-lo exposto. Pode verificar-se na figura seguinte, assinalado a vermelho, que existe um patamar em que a erosão foi quase inexistente. Durante este período, o maciço de encabeçamento funcionou como um colar de proteção, abrigando o leito arenoso do escoamento descendente originado pela perturbação que a coluna provoca no escoamento. Depois da face montante do maciço ficar completamente exposta, este elemento contribui, também, para o processo erosivo.

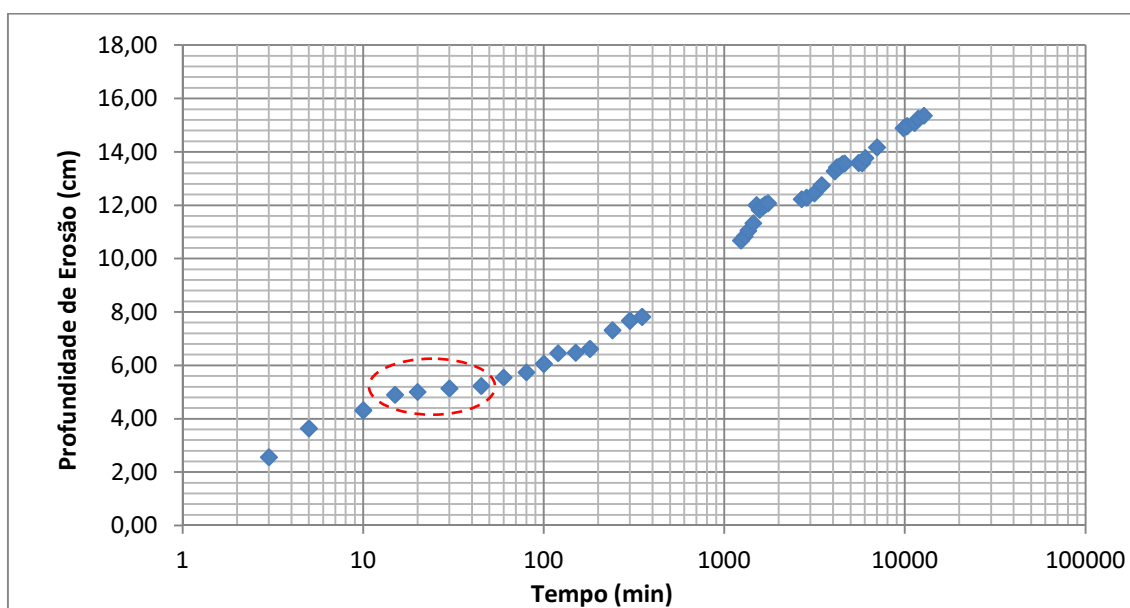


Figura 5.14 – Evolução da profundidade de erosão do ensaio F3 e identificação do patamar associado ao maciço de encabeçamento

## 5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SÉRIE 2

Como se pode constatar pela figura 5.14, toda a estrutura se encontra enterrada, pelo que, se os ensaios fossem iniciados com esta configuração, não haveria qualquer erosão em nenhum deles. Assim, na fase inicial dos ensaios, ao maciço e às estacas foi acoplada a coluna, constituindo o pilar complexo completo, de modo a que se possa iniciar o processo erosivo. O momento em que seria retirada a coluna do pilar foi definida antes de iniciado o ensaio por análise de ensaios realizados anteriormente, para a altura em que o maciço de encabeçamento se encontra-se meio desenterrado.

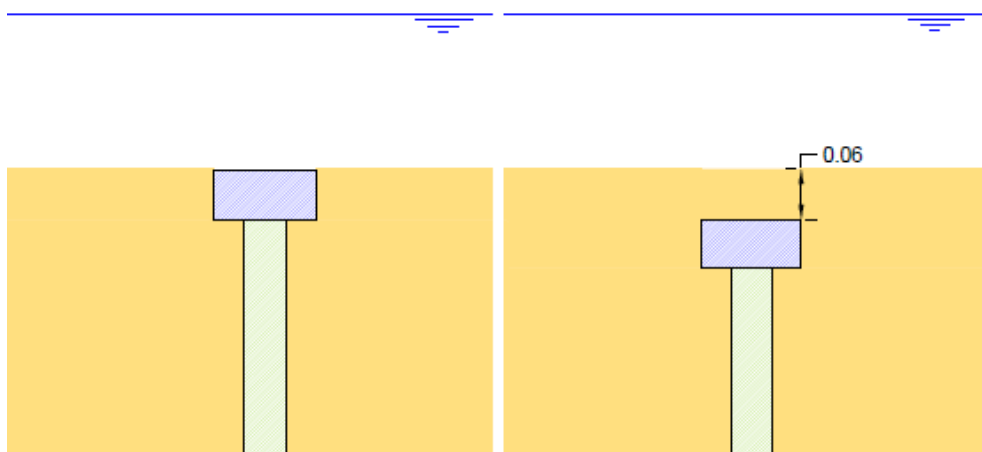


Figura 5.15 – Esquematização da configuração do pilar nos ensaios E2 (à esquerda) e F2 (à direita) (vista de montante para jusante)

No ensaio E2, a coluna foi retirada, cuidadosamente, 1 hora após o início do ensaio e com uma profundidade de erosão de 6.53 cm, instante em que a face de montante do maciço fica exposta ao escoamento (Figura 5.15).



Figura 5.16 – Fotografia do ensaio E2, instantes antes de retirar a coluna

Depois de retirada a coluna, no ensaio E2, a profundidade de erosão aumentou 2.8 mm, o que corresponde a 2.7 % da erosão máxima, registada ao fim do ensaio. Não foi, portanto, um aumento significativo de erosão e, assim, pode dizer-se que, para esta configuração, o maciço não contribui de uma forma preponderante para a profundidade da cavidade de erosão. O segundo referencial, assinalado a vermelho no gráfico da figura 5.17, marca a segunda fase do ensaio, após ter sido retirada a coluna.

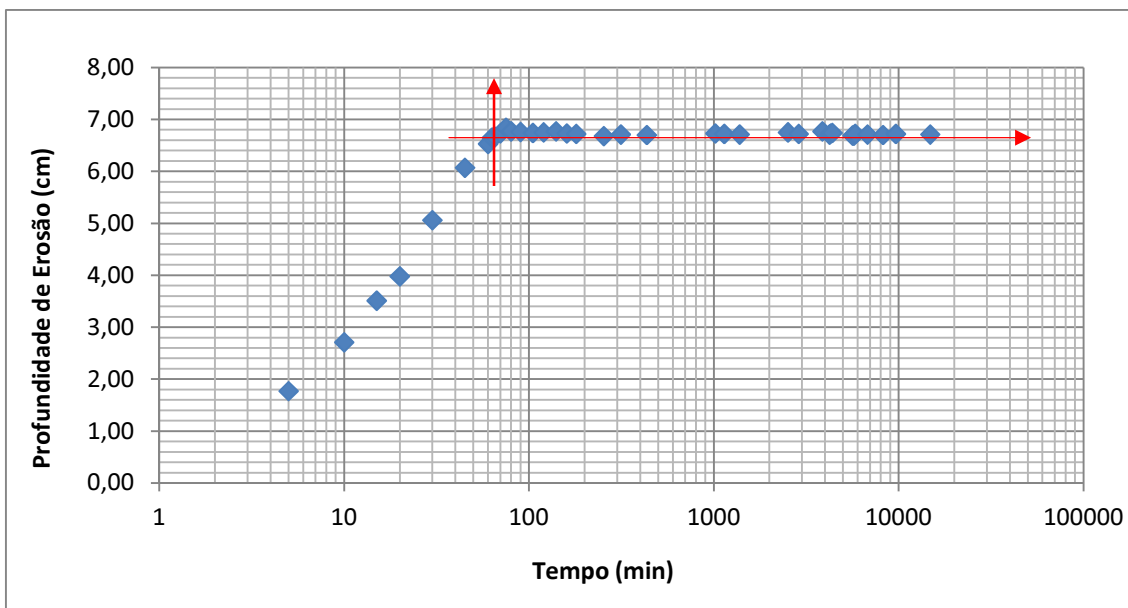


Figura 5.17 – Evolução temporal da profundidade de erosão do ensaio E2

No ensaio F2, como o maciço estava a uma cota mais baixa, a coluna foi retirada depois de 48 horas de ensaio e da profundidade de erosão ter atingido os 10,7 cm. Como é visível no gráfico da figura 5.19, depois de se retirar a coluna, a profundidade de erosão não aumentou. Assim, conclui-se que, para esta disposição, o maciço, não influencia, por si só, o processo erosivo. O facto de este estar abaixo do nível do leito arenoso faz com que não perturbe suficientemente o escoamento para provocar erosão significativa.



Figura 5.18 – Fotografia do ensaio F2, instantes antes de retirar a coluna

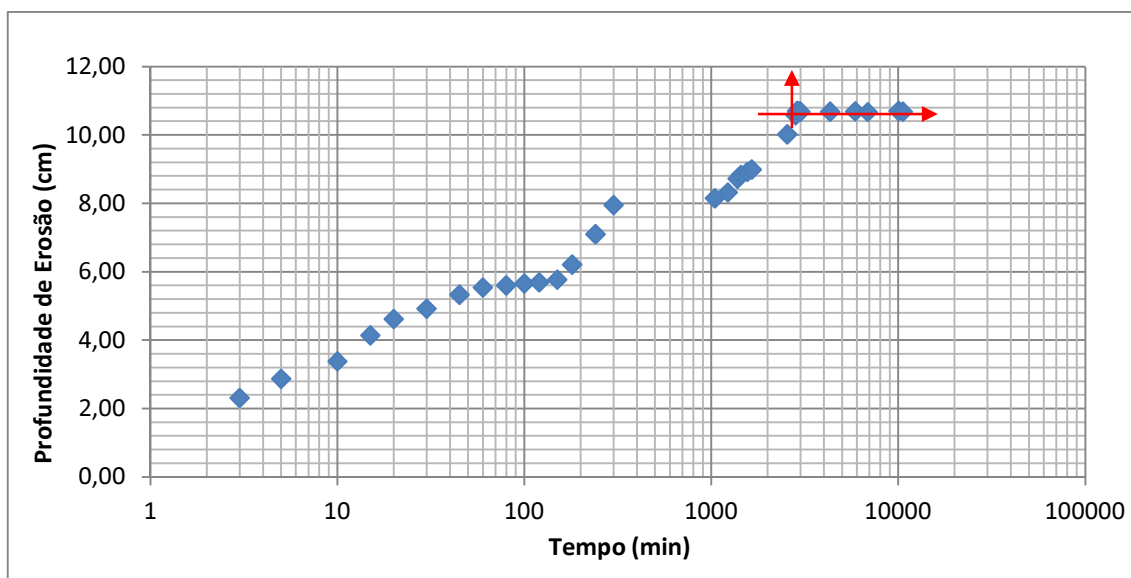


Figura 5.19 – Evolução temporal da profundidade de erosão do ensaio F2

### 5.3. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS LABORATORIAIS

#### 5.3.1. – ANÁLISE DA CONTRIBUIÇÃO DE CADA ELEMENTO DO PILAR COMPLEXO NO PROCESSO EROSIVO

Para efetuar um estudo de decomposição de efeitos, visando compreender a contribuição de cada componente do pilar complexo para o processo erosivo, para além dos dados obtidos com os ensaios realizados no âmbito desta dissertação, foram usados outros valores, obtidos pela equipa de investigação do projeto na FEUP (Quadro 5.2).

Quadro 5.2 – Profundidades máximas no fim de cada ensaio

Ensaio	Erosão máxima (cm)
C1	17,8
D1	20,8
E1	17,8
C2	15,3
D2	9,4
E2	0,2
C3	9,6*
D3	16,3
E3	17,4

\*o valor máximo (13.5 cm) foi registado debaixo do maciço, a 7.1 cm do ponto habitual de medição. Para permitir uma comparação coerente com os outros valores de erosão máxima obtidos pela evolução temporal registada, utilizou-se o valor (9.6 cm) medido no ponto onde habitualmente se mede (no alinhamento da face de montante do pilar)

Das séries de ensaios realizadas na FEUP, no âmbito do projeto onde a tese se insere, resulta óbvio para o autor que a configuração que deve ser estudada é aquela para a qual se registou maior erosão (Ensaio D1). Adicionalmente, de modo a estudar o efeito da altura do maciço no processo erosivo, analisar os resultados relativos às configurações C e E é igualmente interessante.

De um ponto de vista mais prático, a escolha das configurações vem coincidir com uma situação que acontece muitas vezes em obra: assentamentos sofridos pelo leito do rio, fazendo com que a área de exposição do pilar se altere ao longa da sua vida útil.

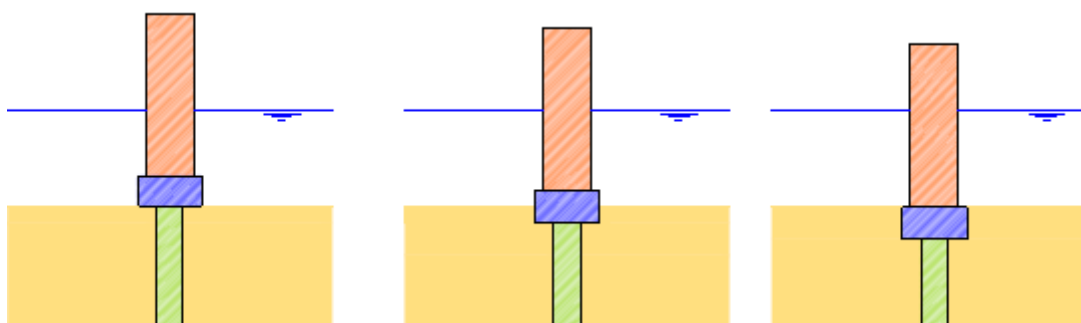


Figura 5.20 – Representação das configurações C1, D1 e E1 (vista de montante para jusante)

Nos ensaios C e D a erosão inicia-se principalmente por efeito do maciço e da coluna, sendo o efeito das estacas sentido posteriormente, após estas ficarem descobertas. O processo erosivo tem, desta forma, diferentes etapas na fase principal de evolução associadas à exposição parcial dos diferentes elementos. Na configuração E o pilar não funciona sempre do mesmo modo, uma vez que ao início o maciço não interfere no escoamento, mas à medida que o processo erosivo se desenvolve este vai ficando cada vez mais exposto.

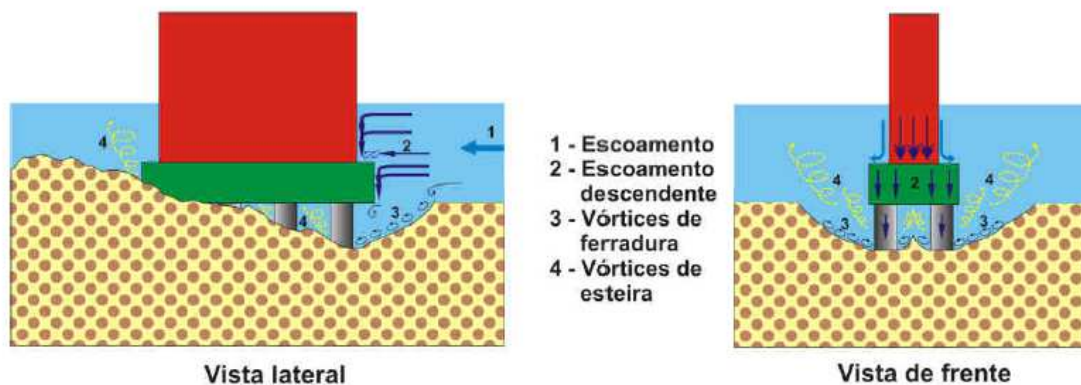


Figura 5.21 – Esquemática da estrutura do escoamento num pilar complexo (adaptado de Moreno, 2012)

Conjugando os resultados dos ensaios das configurações C, D e E de cada uma das séries (1, 2 e 3), é possível obter a contribuição de cada elemento do pilar complexo para o processo de erosão. Para obter a contribuição da coluna do pilar para o valor de profundidade de equilíbrio subtrai-se os resultados da profundidade de erosão da série 2 aos da série 1. A importância do maciço de encabeçamento neste processo é determinada subtraindo os valores relativos à contribuição do pilar, determinados anteriormente, à série 3. Por fim, para obter os dados referentes ao grupo de estacas

terão que ser retirados os valores da série 3 aos da série 1. No gráfico da figura 5.22 são sintetizados os resultados da decomposição de efeitos tendo por base os dados de cada ensaio.

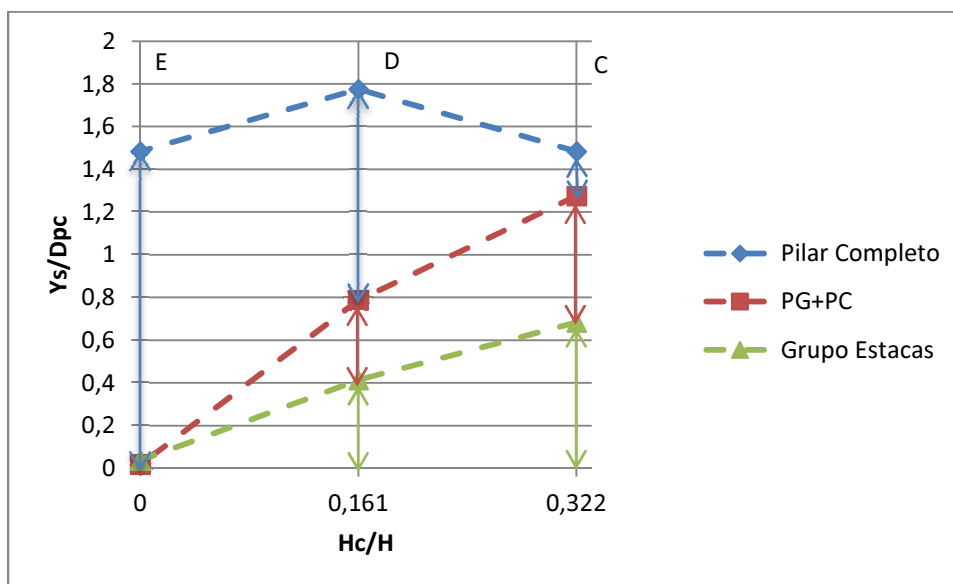


Figura 5.22 – Quantificação da contribuição de cada elemento em função da disposição do maciço de encabeçamento (à esquerda – configuração E, no meio – configuração D, à direita – configuração C)

No gráfico anterior é possível identificar a profundidade de erosão associada a cada elemento,  $Y_s$ , em função da distância do topo do maciço ao fundo,  $H_c$ . A profundidade de erosão provocada pela coluna do pilar é representada pela área entre as linhas azul e vermelha, a relativa ao maciço de encabeçamento entre as linhas vermelha e verde, e a associada ao grupo de estacas entre a linha verde e o eixo.

Como seria de esperar, no caso em que o maciço de encabeçamento e o grupo de estacas se encontram inicialmente enterrados a coluna do pilar tem a maior influência na profundidade de erosão. O maciço de encabeçamento tem maior influência na profundidade de erosão quanto maior for a sua altura exposta ao escoamento. O grupo de estacas tem uma influência tanto maior quanto maior for a altura das estacas exposta ao escoamento, como seria de esperar.

### 5.3.2. ANÁLISE COMPARATIVA COM OS MÉTODOS DE PREVISÃO

Uma vez que os métodos de previsão expostos no capítulo 3 são válidos apenas para pilares complexos completos, usaram-se os resultados dos ensaios C1, D1 e E1 (quadro 5.2) para serem validados pelos dados obtidos a partir daqueles métodos.

Para fazer a análise comparativa foram aplicados dois métodos de previsão: Richardson e Davis (2001) e FDT (2010). O cálculo da velocidade crítica foi feito a partir do método FDT (2010). Os valores laboratoriais e obtidos pelas fórmulas dos métodos mencionados estão expostos no quadro 5.3e figura 5.23.

Quadro 5.3 – Valores da profundidade de erosão medidos e valores previstos

Ensaio	Profundidade Medida (m)	FDT (2010)		Richardson e Davis (2001)	
		Profundidade (m)	Variação* (%)	Profundidade (m)	Variação* (%)
C1	0.178	0.187	5.1	0.218	22.5
D1	0.213	0.198	-7.2	0.205	-3.5
E1	0.178	0.208	16.7	0.192	7.7

\*em relação à profundidade medida experimentalmente

Como se pode verificar pela tabela anterior, pode-se admitir que os valores obtidos a partir dos métodos de previsão estão bastante próximos dos dados experimentais, sendo que a maior discrepância foi observada na previsão de Richardson e Davis (2001) para a profundidade de erosão do ensaio C3, que apresentou uma diferença percentual de 22.5%.

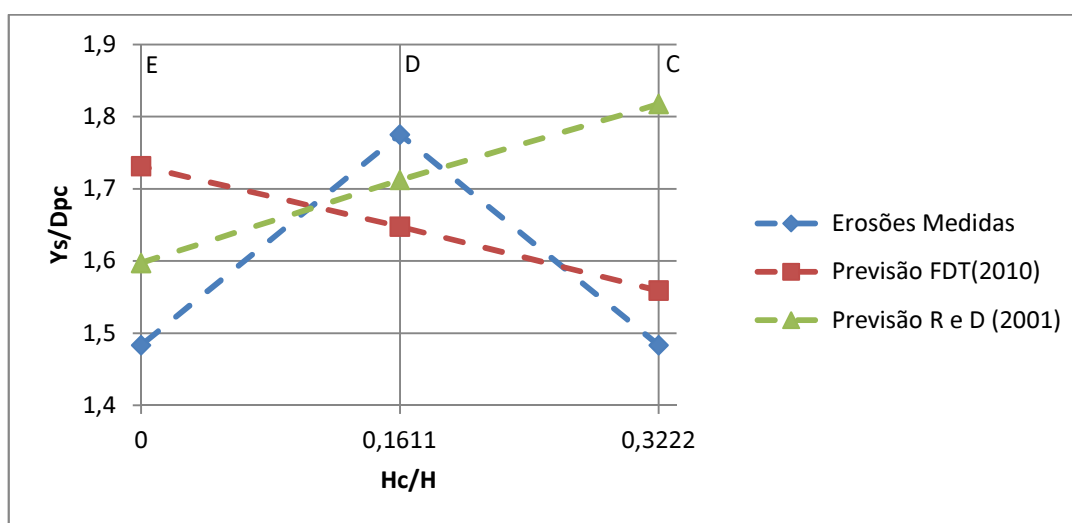


Figura 5.23 – Evolução da profundidade em função da distância do maciço de encabeçamento ao fundo

A discrepância entre os valores experimentais e dos métodos de previsão não é, portanto, muito significativa. No entanto, o comportamento da profundidade de erosão em relação à distância do maciço ao leito arenoso registada laboratorialmente não foi confirmado por nenhum dos métodos de previsão. Além disso, pelo gráfico da figura 5.23, entende-se que os dois métodos apresentam relações diferentes entre aquelas duas grandezas. Por Richardson e Davis (2001), a profundidade de erosão aumenta com a distância do maciço ao fundo arenoso. Pelo método FDT, observa-se a relação inversa e, surpreendentemente, os valores experimentais não coincidem com nenhum dos métodos. No laboratório, foi observado que a erosão máxima ocorre para a configuração D1, na qual o maciço encontra-se semienterrado ( $H_c/H=0.161$ ), sendo menor para as outras duas configurações. Isto coincide com trabalhos de outros autores (Moreno, 2012), que testaram configurações similares e em que a erosão máxima foi obtida quando o maciço se encontrava semienterrado.

Do presente estudo não resulta evidente qual dos métodos de previsão a ser utilizado pelo projetista. Se ambos estão do lado da segurança para as configurações C e E, o mesmo não acontece para a situação que é mais gravosa (configuração D), segundo os dados obtidos experimentalmente. No entanto, foi mostrado que os valores fornecidos pelos dois métodos não se afastam muito daqueles obtidos no laboratório, pelo que podem ser úteis para o projetista.



# 6

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 6.1. CONCLUSÕES

Esta dissertação insere-se no projeto de investigação em curso “Estudo experimental de erosões localizadas junto de pilares complexos” (referência FCT: PTDC/ECM/101353/2008) e pretende alargar o conhecimento acerca da erosão localizada em torno de pilares complexos.

No âmbito desta dissertação foram realizados 8 ensaios laboratoriais, reproduzindo o escoamento em torno de duas combinações de elementos constituintes do pilar complexo: coluna + maciço de encabeçamento e maciço + grupo de estacas.

Com base nos resultados experimentais neste trabalho e no realizado anteriormente pela equipa de investigação do projeto onde esta dissertação se insere, estabeleceu-se uma relação entre cada componente do pilar complexo e a profundidade da cavidade de erosão.

Relativamente aos ensaios realizados, como esperado, conclui-se que para situações em que o maciço se encontra acima do leito arenoso, quanto maior a sua distância a este, menor é a sua contribuição para a profundidade de erosão, até a um ponto que, aparentemente, deixa de ter qualquer efeito. De modo semelhante, verifica-se que quanto maior a profundidade a que o maciço se encontra enterrado, menor a sua contribuição para a profundidade de erosão.

De todos os dados disponíveis foram seleccionadas 3 configurações para análise: com o maciço assente no leito (configuração C), com o maciço semienterrado (configuração D) e com a face superior do maciço alinhada com o leito (configuração E). Após uma análise baseada na decomposição de efeitos, foi possível concluir que o elemento do pilar complexo que mais contribui para a profundidade de erosão na configuração C foi o grupo de estacas. Já nas configurações D e E, é a coluna que exerce maior influência no processo erosivo. O maciço de encabeçamento tem a sua influência máxima na configuração C.

Nos ensaios laboratoriais verificaram-se profundidades de erosões com valores próximos aos obtidos pela aplicação dos dois métodos de previsão: Richardson e Davis (2001) e FDT (2010). Por outro lado, os dois métodos aplicados prevêm evoluções da profundidade de erosão com a distância relativa do maciço ao leito arenoso diferentes entre si e da verificada laboratorialmente.

## **6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Após o estudo desenvolvido ao longo desta dissertação e das conclusões apresentadas no subcapítulo anterior, resulta para o autor deste trabalho a necessidade de alargar os conhecimentos nesta área.

Desta forma, recomendam-se as seguintes propostas para futuros estudos:

- Estudo experimental de mecanismos de proteção em pilares complexos;
- Análise do efeito do fenómeno de cheias para a evolução das dimensões da cavidade de erosão, através da variação de caudais;
- A estrutura do escoamento em torno do pilar complexo deverá ser estudada com recurso a técnicas de medição como o PIV, LDA, etc.;
- Introdução de novas técnicas de medição da evolução temporal da profundidade de erosão que sejam menos intrusivas quer para o escoamento quer para o leito arenoso;
- De forma a ser possível o estabelecimento de correlações mais robustas deverão ser estudadas configurações intermédias entre as que foram estudadas nesta dissertação.

## BIBLIOGRAFIA

- Arneson, L.A.; Zevenbergen, L.W.; Lagasse, P.F.; Clopper, P.E. (2012). *Evaluating Scour At Bridges – Fifth Edition*, Hydraulic Engineering Circular N°18, Publication, N° FHWA HIF 12-003, U.S. Department of Transportation, USA.
- Breusers, H.N.N.; Raudviki, A.J. (1991). *Scouring*. Hydraulic Structures Desing Manual, Rotterdam.
- Brito, L. F. da R. (2011). *Estudo Experimental de Erosões Localizadas Junto de Pilares Complexos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Cardoso, António Heleno (1998). *Hidráulica Fluvial*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- Cardoso, A.H., Bettess, R. (1999). *Effects of time and channel geometry on scour at bridge abutments*. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125 n° 4 , Abril.
- Chabert, J. ; Engeldinger, P. (1956). *Ettude des affouillements autor des piles des ponts*. Laboratoire d'Hydraulique, Chatou, France.
- Couto, L. T.; Cardoso, A. H. (2001). *Erosões Localizadas junto de Encontros e Pilares de Pontes. Parte I – Caracterização da Situação de Referência*. Revista da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Volume 22, Número 1, Páginas 65-74, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa.
- Couto, L.T. (2005). *Erosões Localizadas Junto de Esporões Fluviais e Encontros de Pontes*. Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2005.
- Ettema, R., (1980). *Scour at bridge piers*. Ph.D. Thesis, Auckland University, Auckland, New Zealand.
- Ettema, R.; Kirkil, G.; Muste, M. (2006). *Similitude of Large-Scale Turbulence in Experiments on Local Scour at Cylinders*. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 132, Janeiro, Páginas 33-40, American Society of Civil Engineers, ASCE, New York.
- Fael, C. M. (2007). *Erosões Localizadas junto de Encontros de Pontes e Respectivas Medidas de Protecção*. Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior.
- FDT (2005). *Bridge Scour Manual*, Florida Department of Transportation, State of Florida.
- FDT (2010). *Bridge Scour Manual*, Florida Department of Transportation, State of Florida.
- Garde, R.J. (1970). *Initiation of motion on a hydrodynamically rough surface. Critical Velocity approach*, JIP (India), vol.6, no.2.
- Jones, J. Sterling; Sheppard, D. Max (1998). *Local scour at complex pier geometries*. Federal Highway Administration; University of Florida
- Lança, Rui; Fael, C.; Cardoso, A. (2010). *Assessing Equilibrium Clear-Water Scour Around Single Cylindrical Piers*. Portugal.
- Lança, R. (2012). *Clear-water scour at single piers and pile groups*. Tese para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior
- Lencastre, A.; Franco, F. M. (1992). *Lições de Hidrologia*. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

- Lima, M. M- (2008). *Estudo experimental da erosão localizada na proximidade de pilares de pontes*. Universidade do Minho.
- Neil, C.R. (1967). *Mean Velocity criterion for scour of coarse uniform bed material*, Proceedings of the XII IAHR, Fort Collins, Colorado.
- Melville, Bruce W.; Coleman, Stephen E. (2000). *Bridge Scour*. Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado.
- Melville, B.W.; Chiew Y.M. (1999). *Time scale for local scour at bridge piers*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.125, N°1, 59–65.
- Melville, B.W.; Raudkivi, A. J. (1996). “*Effects of foundation geometry on bridge pier scour.*” J. Hydraul. Eng.
- Moreno, M.; Maia, R.; Couto, L; Cardoso, A (2012). *Evaluation of local scour depth around complex bridge piers*. Portuguese Foundation for Science and Technology
- Pinheiro, Rui Correia (2010). *Estudo experimental da erosão de pilares de pontes*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ramos, C. M., (1990). *Dimensionamento de pontes: aspectos hidráulicos*. LNEC, Portugal.
- Richardson, E.V.; Davis, S.R. (2001). *Evaluating Scour At Bridges – Fourth Edition*, Hydraulic Engineering Circular N°18, Publication, N° FHWA NHI 01-001, U.S. Department of Transportation, USA.
- Shen, H.W., Schneider, V.R. and Karaki, S.S. (1969). Local scour around bridge piers. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 95 (6), 1919 – 1940.
- Silva, R. P. (2008). *Estudo da Erosão de Pilares de Pontes*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Yeo, E. H. (1991). *General Scour at Bridge Sites. Volume I*. University of Auckland, Auckland.

**ANEXOS**

### ENSAIO B3

Quadro A.1 – Valores medidos laboratorialmente no ensaio B3

Ensaio 8 (1ª) h=180 Q=59l/s			Leituras		Erosões	
horas	Tempo (h)	T. min	Estaca 1	Lim.	Estaca 1	Lim.
02-05-13 15:15	0:00	0		28,12		-
02-05-13 15:30	0:15	15		28,09		0,03
02-05-13 16:00	0:45	45		28,04		0,08
02-05-13 17:00	1:45	105		27,98		0,14
02-05-13 18:00	2:45	165		27,93		0,19
03-05-13 10:00	18:45	1125		27,43		0,69
03-05-13 12:00	20:45	1245		27,40		0,72
03-05-13 18:00	26:45	1605		27,34		0,78
04-05-13 10:10	42:55	2575		27,22		0,90
05-05-13 10:00	66:45	4005		27,18		0,94
05-05-13 16:00	72:45	4365		27,17		0,95
06-05-13 10:15	91:00	5460		27,07		1,05
07-05-13 10:00	114:45	6885		27,01		1,11
07-05-13 16:45	121:30	7290		27,00		1,12
08-05-13 12:15	141:00	8460		26,92		1,20
08-05-13 19:15	148:00	8880		26,89		1,23
09-05-13 10:11	162:56	9776		26,82		1,30
10-05-13 10:00	186:45	11205		26,80		1,32
11-05-13 10:15	211:00	12660		26,70		1,42
13-05-13 10:10	258:55	15535		26,42		1,70
14-05-13 15:00	287:45	17265		26,41		1,71
15-05-13 15:00	311:45	18705		26,38		1,74
16-05-13 15:00	335:45	20145		26,37		1,75
17-05-13 15:00	359:45	21585		26,36		1,76

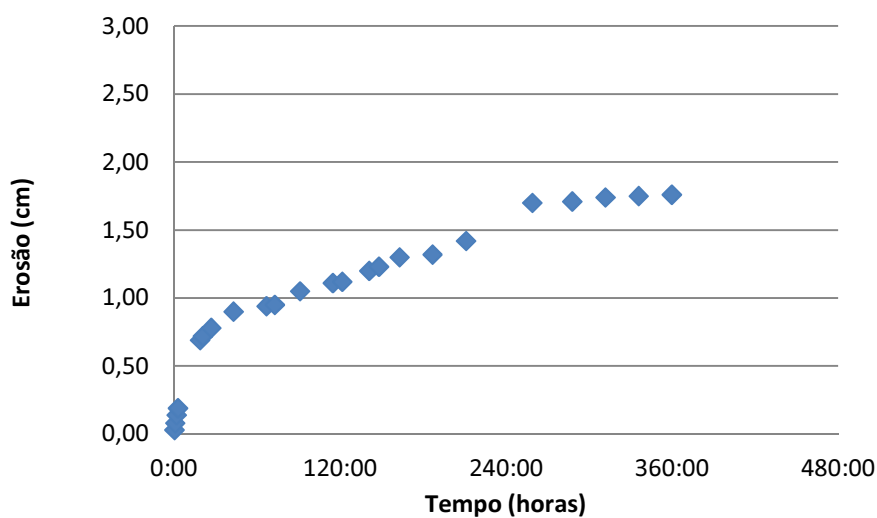


Figura A.1 – Evolução temporal do ensaio B3

**ENSAIO C3**

Quadro A.2 – Valores medidos laboratorialmente no ensaio C3

1Ensaio 8 (1ª) h=180 Q=59l/s			Leituras		Erosões	
horas	Tempo (h)	T. min	Estaca 1	Lim.	Estaca 1	Lim.
08-04-13 10:12	0:00	0		27,50		-
08-04-13 10:15	0:03	3		26,85		0,65
08-04-13 10:17	0:05	5		26,51		0,99
08-04-13 10:22	0:10	10		26,01		1,49
08-04-13 10:27	0:15	15		25,80		1,70
08-04-13 10:32	0:20	20		25,60		1,90
08-04-13 10:42	0:30	30		25,51		1,99
08-04-13 10:57	0:45	45		25,28		2,22
08-04-13 11:12	1:00	60		25,17		2,33
08-04-13 11:32	1:20	80		25,09		2,41
08-04-13 11:52	1:40	100		25,01		2,49
08-04-13 12:12	2:00	120		24,75		2,75
08-04-13 12:42	2:30	150		24,61		2,89
08-04-13 13:12	3:00	180		24,58		2,92
08-04-13 14:12	4:00	240		24,33		3,17
08-04-13 15:12	5:00	300		24,27		3,23
08-04-13 16:12	6:00	360		23,85		3,65
08-04-13 17:12	7:00	420		23,53		3,97
08-04-13 18:12	8:00	480		23,33		4,17
08-04-13 23:12	13:00	780		23,09		4,41
09-04-13 09:30	23:18	1398		22,66		4,84
09-04-13 12:00	25:48	1548		22,39		5,11

09-04-13 14:30	28:18	1698	22,16	5,34
09-04-13 17:30	31:18	1878	21,85	5,65
09-04-13 18:10	31:58	1918	21,81	5,69
09-04-13 22:10	35:58	2158	21,62	5,88
10-04-13 10:00	47:48	2868	21,30	6,20
10-04-13 13:00	50:48	3048	21,17	6,33
10-04-13 17:50	55:38	3338	21,08	6,42
11-04-13 10:00	71:48	4308	20,23	7,27
11-04-13 15:20	77:08	4628	20,09	7,41
11-04-13 18:20	80:08	4808	19,80	7,70
12-04-13 10:00	95:48	5748	19,42	8,08
12-04-13 16:45	102:33	6153	19,19	8,31
13-04-13 12:45	122:33	7353	19,07	8,43
15-04-13 09:45	167:33	10053	18,81	8,69
15-04-13 14:30	172:18	10338	18,61	8,89
15-04-13 18:25	176:13	10573	18,55	8,95
16-04-13 10:00	191:48	11508	18,12	9,38
16-04-13 19:25	201:13	12073	18,04	9,46
17-04-13 13:30	219:18	13158	17,89	9,61

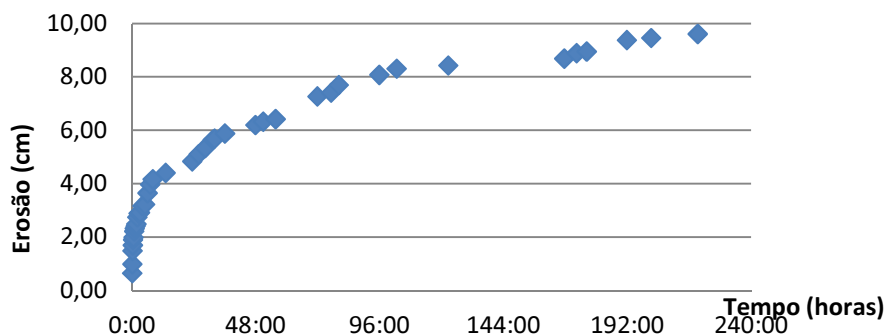


Figura A.2 – Evolução temporal do ensaio C3



### ENSAIO D3

Quadro A.3 – Valores medidos laboratorialmente no ensaio D3

Ensaio 8 (1ª) h=180 Q=59l/s			Leituras		Erosões	
horas	Tempo (h)	T. min	Estaca 1	Lim.	Estaca 1	Lim.
14-03-13 14:29	0:00	0		27,80		-
14-03-13 14:32	0:03	3		25,78		2,02
14-03-13 14:34	0:05	5		25,30		2,50
14-03-13 14:39	0:10	10		24,81		2,99
14-03-13 14:44	0:15	15		24,50		3,30
14-03-13 14:49	0:20	20		24,28		3,52
14-03-13 14:59	0:30	30		23,95		3,85
14-03-13 15:14	0:45	45		23,84		3,96
14-03-13 15:29	1:00	60		23,27		4,53
14-03-13 15:49	1:20	80		22,94		4,86
14-03-13 16:09	1:40	100		22,30		5,50
14-03-13 16:29	2:00	120		22,24		5,56
14-03-13 16:59	2:30	150		22,20		5,60
14-03-13 17:29	3:00	180		22,12		5,68
14-03-13 18:45	4:16	256		21,64		6,16
14-03-13 20:45	6:16	376		21,19		6,61
14-03-13 22:45	8:16	496		20,79		7,01
15-03-13 09:29	19:00	1140		18,45		9,35
15-03-13 10:29	20:00	1200		18,35		9,45
15-03-13 11:29	21:00	1260		18,14		9,66
15-03-13 13:19	22:50	1370		18,02		9,78
15-03-13 14:19	23:50	1430		17,79		10,01
15-03-13 15:19	24:50	1490		17,55		10,25
15-03-13 16:19	25:50	1550		17,34		10,46
15-03-13 17:19	26:50	1610		17,30		10,50
15-03-13 18:19	27:50	1670		17,22		10,58
18-03-13 08:49	90:20	5420		12,77		15,03
18-03-13 14:19	95:50	5750		12,53		15,27
18-03-13 15:19	96:50	5810		12,44		15,36
18-03-13 16:19	97:50	5870		12,38		15,42
18-03-13 17:19	98:50	5930		12,27		15,53
18-03-13 21:50	103:21	6201		12,17		15,63
19-03-13 10:30	116:01	6961		11,92		15,88
19-03-13 13:40	119:11	7151		11,81		15,99
19-03-13 15:40	121:11	7271		11,77		16,03
19-03-13 21:00	126:31	7591		11,70		16,10
20-03-13 10:30	140:01	8401		11,54		16,26
20-03-13 13:30	143:01	8581		11,51		16,29
20-03-13 19:30	149:01	8941		11,47		16,33

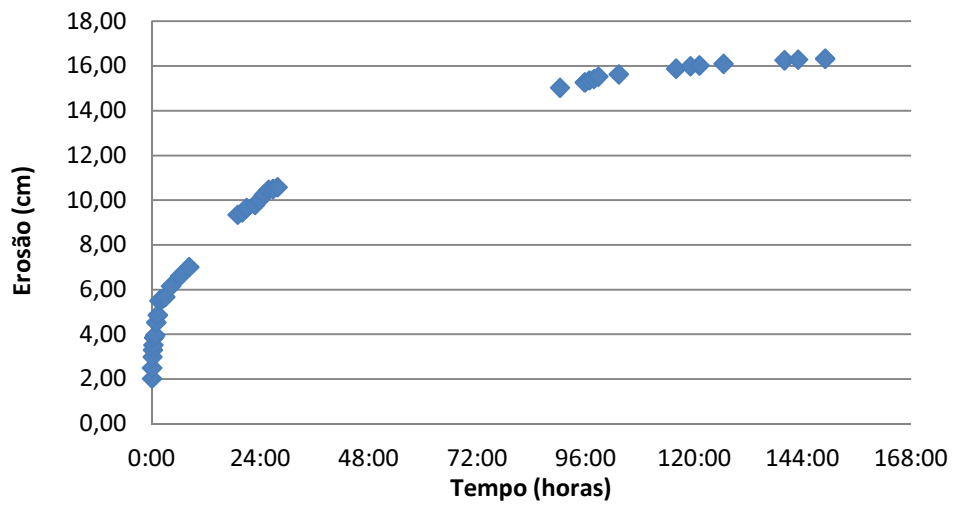


Figura A.3 – Evolução temporal do ensaio D3

**ENSAIO E3**

Quadro A.4 – Valores medidos laboratorialmente no ensaio E3

Ensaio 8 (1ª) h=180 Q=59l/s			Leituras		Erosões	
horas	Tempo (h)	T. min	Estaca 1	Lim.	Estaca 1	Lim.
25-03-13 11:10	0:00	0		27,91		-
25-03-13 11:13	0:03	3		26,56		1,35
25-03-13 11:15	0:05	5		26,06		1,85
25-03-13 11:20	0:10	10		25,25		2,66
25-03-13 11:25	0:15	15		24,73		3,18
25-03-13 11:30	0:20	20		24,30		3,61
25-03-13 11:40	0:30	30		23,34		4,57
25-03-13 11:55	0:45	45		22,52		5,39
25-03-13 12:10	1:00	60		21,90		6,01
25-03-13 12:30	1:20	80		21,35		6,56
25-03-13 12:50	1:40	100		21,02		6,89
25-03-13 13:10	2:00	120		20,82		7,09
25-03-13 13:40	2:30	150		20,48		7,43
25-03-13 14:10	3:00	180		20,36		7,55
25-03-13 15:10	4:00	240		19,97		7,94
25-03-13 16:10	5:00	300		19,54		8,37
25-03-13 17:10	6:00	360		19,24		8,67
25-03-13 18:10	7:00	420		18,99		8,92
25-03-13 19:10	8:00	480		18,82		9,09
26-03-13 10:10	23:00	1380		16,50		11,41
26-03-13 11:10	24:00	1440		16,39		11,52
26-03-13	25:00	1500		16,35		11,56

12:10					
26-03-13 13:10	26:00	1560		16,22	11,69
26-03-13 14:10	27:00	1620		16,16	11,75
26-03-13 15:10	28:00	1680		16,05	11,86
26-03-13 16:10	29:00	1740		15,91	12,00
26-03-13 17:10	30:00	1800		15,82	12,09
26-03-13 18:10	31:00	1860		15,74	12,17
26-03-13 19:10	32:00	1920		15,70	12,21
26-03-13 23:10	36:00	2160		15,28	12,63
27-03-13 09:30	46:20	2780		14,99	12,92
27-03-13 10:30	47:20	2840		14,91	13,00
27-03-13 12:10	49:00	2940		14,83	13,08
27-03-13 16:10	53:00	3180		14,76	13,15
27-03-13 19:10	56:00	3360		14,74	13,17
28-03-13 09:30	70:20	4220		14,24	13,67
28-03-13 11:30	72:20	4340		14,01	13,90
28-03-13 15:30	76:20	4580		13,81	14,10
01-04-13 09:30	166:20	9980		11,42	16,49
01-04-13 18:30	175:20	10520		11,34	16,57
02-04-13 10:15	191:05	11465		11,08	16,83
03-04-13 11:00	215:50	12950		10,92	16,99
03-04-13 21:30	226:20	13580		10,84	17,07
04-04-13 10:30	239:20	14360		10,54	17,37

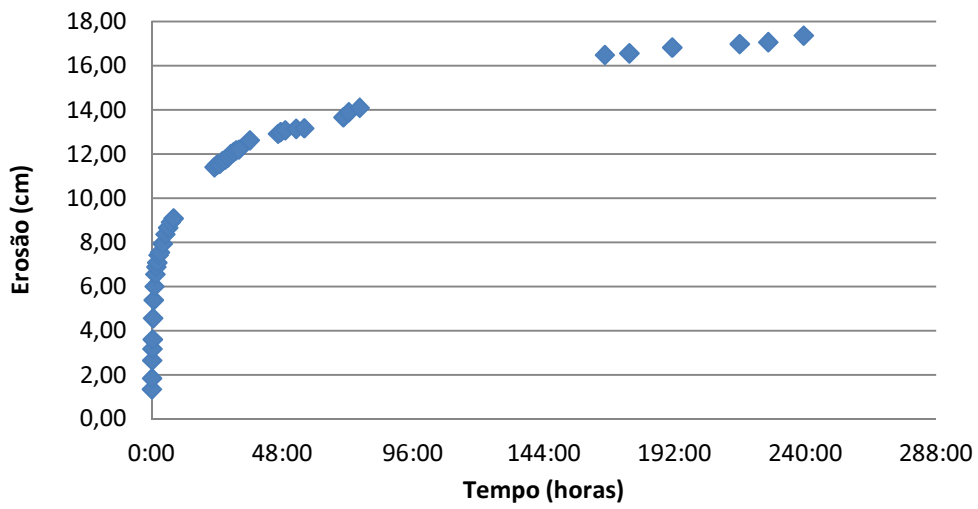


Figura A.4 – Evolução temporal do ensaio E3

### ENSAIO F3

Quadro A.5 – Valores medidos laboratorialmente no ensaio F3

Ensaio 8 (1ª) h=180 Q=59l/s			Leituras		Erosões	
horas	Tempo (h)	T. min	Estaca 1	Lim.	Estaca 1	Lim.
04-03-13 13:24	0:00	0		28,80		-
04-03-13 13:27	0:03	3		26,24		2,56
04-03-13 13:29	0:05	5		25,16		3,64
04-03-13 13:34	0:10	10		24,48		4,32
04-03-13 13:39	0:15	15		23,90		4,90
04-03-13 13:44	0:20	20		23,79		5,01
04-03-13 13:54	0:30	30		23,66		5,14
04-03-13 14:09	0:45	45		23,57		5,23
04-03-13 14:24	1:00	60		23,25		5,55
04-03-13 14:44	1:20	80		23,06		5,74
04-03-13 15:04	1:40	100		22,74		6,06
04-03-13 15:24	2:00	120		22,34		6,46
04-03-13 15:54	2:30	150		22,32		6,48
04-03-13 16:24	3:00	180		22,18		6,62
04-03-13 17:24	4:00	240		21,48		7,32
04-03-13 18:24	5:00	300		21,12		7,68
04-03-13 19:14	5:50	350		20,98		7,82
05-03-13 10:00	20:36	1236		18,12		10,68
05-03-13 11:00	21:36	1296		17,96		10,84
05-03-13 12:00	22:36	1356		17,75		11,05
05-03-13 13:30	24:06	1446		17,47		11,33
05-03-13	25:06	1506		16,79		12,01

14:30					
05-03-13	26:06	1566		16,96	11,84
15:30					
05-03-13	27:06	1626		16,85	11,95
16:30					
05-03-13	28:06	1686		16,77	12,03
17:30					
05-03-13	29:06	1746		16,72	12,08
18:30					
06-03-13	44:36	2676		16,57	12,23
10:00					
06-03-13	47:36	2856		16,51	12,29
13:00					
06-03-13	52:36	3156		16,35	12,45
18:00					
06-03-13	57:36	3456		16,05	12,75
23:00					
07-03-13	68:06	4086		15,52	13,28
09:30					
07-03-13	70:06	4206		15,37	13,43
11:30					
07-03-13	72:06	4326		15,35	13,45
13:30					
07-03-13	75:06	4506		15,25	13,55
16:30					
07-03-13	77:06	4626		15,23	13,57
18:30					
08-03-13	92:28	5548		15,21	13,59
09:52					
08-03-13	96:28	5788		15,22	13,58
13:52					
08-03-13	100:41	6041		15,03	13,77
18:05					
09-03-13	116:41	7001		14,63	14,17
10:05					
11-03-13	163:26	9806		13,91	14,89
08:50					
11-03-13	169:46	10186		13,85	14,95
15:10					
11-03-13	171:46	10306		13,83	14,97
17:10					
12-03-2013	188:36	11316		13,71	15,09
10:00					
12-03-2013	197:36	11856		13,55	15,25
19:00					
13-03-2013	212:06	12726		13,44	15,36
09:30					

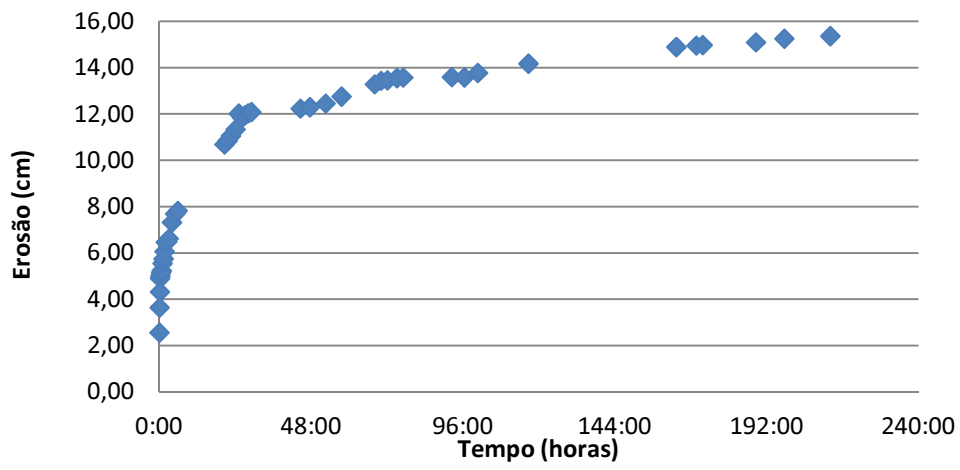


Figura A.5 – Evolução temporal do ensaio F3



**ENSAIO E2**

Quadro A.6 – Valores medidos laboratorialmente no ensaio E2

Ensaio 5 (1ª) $s=1,5xD$ $h=180$ $Q=59l/s$			Leituras		Erosões	
horas	Tempo (h)	T. min	Estaca 1	Lim.	Estaca 1	Lim.
31-05-13 17:01	0:00	0		29,17		0,00
31-05-13 17:04	0:03	3		28,02		1,15
31-05-13 17:06	0:05	5		27,40		1,77
31-05-13 17:11	0:10	10		26,46		2,71
31-05-13 17:16	0:15	15		25,66		3,51
31-05-13 17:21	0:20	20		25,19		3,98
31-05-13 17:31	0:30	30		24,11		5,06
31-05-13 17:46	0:45	45		23,10		6,07
31-05-13 18:01	1:00	60		22,64		6,53
31-05-13 18:04	1:03	63		22,52		6,65
31-05-13 18:06	1:05	65		22,50		6,67
31-05-13 18:11	1:10	70		22,44		6,73
31-05-13 18:16	1:15	75		22,33		6,84
31-05-13 18:21	1:20	80		22,40		6,77
31-05-13 18:31	1:30	90		22,41		6,76
31-05-13 18:46	1:45	105		22,43		6,74
31-05-13 19:01	2:00	120		22,42		6,75
31-05-13 19:21	2:20	140		22,40		6,77
31-05-13 19:41	2:40	160		22,44		6,73
31-05-13 20:01	3:00	180		22,45		6,72
31-05-13 21:15	4:14	254		22,49		6,68
31-05-13 22:15	5:14	314		22,46		6,71
01-06-13 00:15	7:14	434		22,47		6,70
01-06-13 10:00	16:59	1019		22,44		6,73
01-06-13 12:00	18:59	1139		22,45		6,72
01-06-13 16:00	22:59	1379		22,46		6,71
02-06-13 11:00	41:59	2519		22,42		6,75
02-06-13 17:00	47:59	2879		22,45		6,72
03-06-13 09:30	64:29	3869		22,40		6,77
03-06-13 15:30	70:29	4229		22,46		6,71
03-06-13 16:30	71:29	4289		22,44		6,73
03-06-13 18:00	72:59	4379		22,43		6,74
04-06-13 15:00	93:59	5639		22,48		6,69
04-06-13 16:30	95:29	5729		22,48		6,69
04-06-13 18:00	96:59	5819		22,45		6,72
05-06-13 10:00	112:59	6779		22,46		6,71
06-06-13 10:15	137:14	8234		22,47		6,70
07-06-13 10:00	160:59	9659		22,45		6,72
11-06-13 00:00	246:59	14819		22,46		6,71

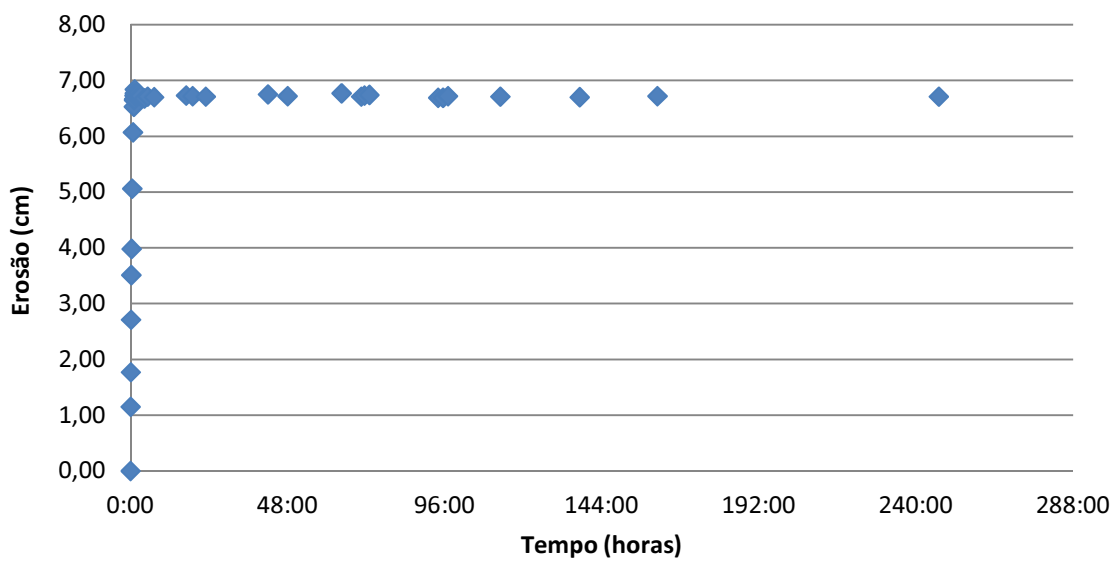


Figura A.6 – Evolução temporal do ensaio E2

**ENSAIO F2**

Quadro A.7 – Valores medidos laboratorialmente no ensaio F2

Ensaio 8 (1ª) h=180 Q=59l/s			Leituras		Erosões	
horas	Tempo (h)	T. min	Estaca 1	Lim.	Estaca 1	Lim.
17-06-13 15:35	0:00	0		28,73		-
17-06-13 15:38	0:03	3		26,42		2,31
17-06-13 15:40	0:05	5		25,86		2,87
17-06-13 15:45	0:10	10		25,35		3,38
17-06-13 15:50	0:15	15		24,59		4,14
17-06-13 15:55	0:20	20		24,11		4,62
17-06-13 16:05	0:30	30		23,81		4,92
17-06-13 16:20	0:45	45		23,40		5,33
17-06-13 16:35	1:00	60		23,19		5,54
17-06-13 16:55	1:20	80		23,13		5,60
17-06-13 17:15	1:40	100		23,07		5,66
17-06-13 17:35	2:00	120		23,04		5,69
17-06-13 18:05	2:30	150		22,96		5,77
17-06-13 18:35	3:00	180		22,52		6,21
17-06-13 19:35	4:00	240		21,63		7,10
17-06-13 22:00	6:25	300		20,78		7,95
18-06-13 09:00	17:25	1045		20,58		8,15
18-06-13 12:00	20:25	1225		20,41		8,32
18-06-13 14:35	23:00	1380		20,01		8,72
18-06-13 15:35	24:00	1440		19,90		8,83
18-06-13 17:35	26:00	1560		19,81		8,92
18-06-13 19:00	27:25	1645		19,74		8,99
19-06-13 10:00	42:25	2545		18,71		10,02
19-06-13 14:35	47:00	2820		18,15		10,58
19-06-13 15:35	48:00	2880		18,03		10,70
19-06-13 16:35	49:00	2940		18,04		10,69
19-06-13 17:35	50:00	3000		18,05		10,68
20-06-13 15:35	72:00	4320		18,05		10,68
21-06-13 17:35	98:00	5880		18,04		10,69
22-06-13 10:00	114:25	6865		18,06		10,67
24-06-13 15:00	167:25	10045		18,03		10,70
25-06-13 00:00	176:25	10585		18,05		10,68

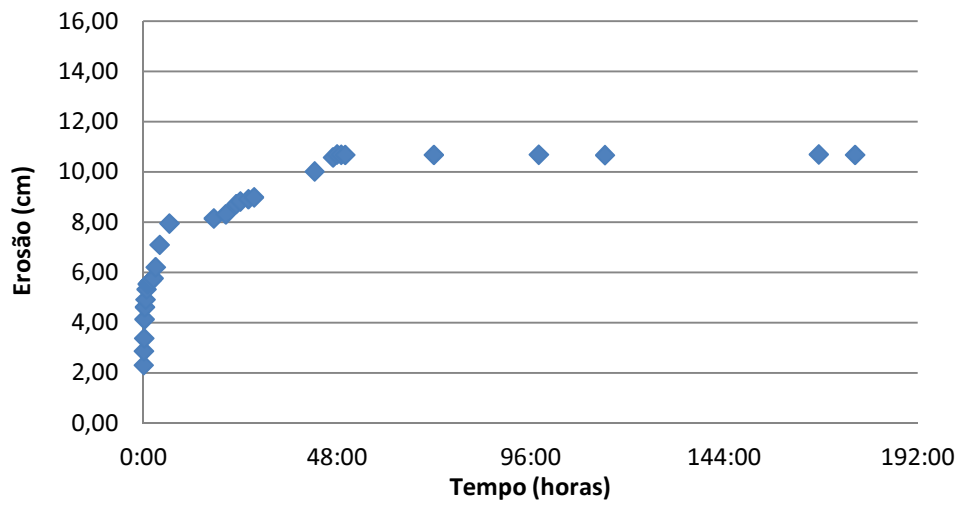


Figura A7 – Evolução temporal do ensaio F2