

# EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PROFUNDIDADE DE EROÇÃO LOCALIZADA JUNTO DE PILARES COMPLEXOS

**Mario MORENO**

*Bolseiro de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, mcastiblanco@lnec.pt  
Doutorando, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, dec10007@fe.up.pt*

**Lúcia COUTO**

*Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, lcouto@lnec.pt*

**Rodrigo MAIA**

*Professor Associado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, rmaia@fe.up.pt*

## **Resumo:**

A evolução temporal da profundidade máxima de erosão localizada junto de pilares simples em escoamentos sem transporte sólido generalizado segue uma tendência logarítmica, de acordo com o constatado na maioria dos estudos experimentais. No entanto, no caso de pilares complexos, constituídos por uma coluna fundada num maciço de encabeçamento suportado por um grupo de estacas, essa evolução pode ter diferentes tendências. A progressão do desenvolvimento da cavidade junto deste tipo de pilares é ditada pela presença e exposição relativa ao escoamento dos três elementos estruturais. Na presente comunicação apresentam-se os resultados de evolução temporal da profundidade máxima de erosão em três ensaios de longa duração, conduzidos durante cerca de 20 dias numa instalação experimental do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Estes três ensaios são representativos das três situações em que se podem distinguir as alterações na tendência da evolução temporal dos ensaios em pilares complexos relativamente a pilares simples. Assim, numa primeira situação, os três elementos estruturais estão todos expostos ao escoamento, numa segunda situação, o maciço de encabeçamento está parcialmente enterrado na areia e, numa última, o maciço está completamente enterrado. Na segunda e terceira situações o processo erosivo, na fase principal de evolução, tem distintas etapas, sendo estas associadas à exposição parcial dos diferentes elementos estruturais na cavidade de erosão entretanto já formada. Os ensaios conduzidos permitiram também aferir o tempo de duração adequado para este tipo de estudos. Na realidade, alguns dos autores que conduziram estudos com pilares complexos utilizam como critério de paragem dos ensaios que a variação da profundidade de erosão seja inferior a 5% do diâmetro das estacas durante um período de 24 horas. Claramente no presente estudo os resultados provaram a necessidade de conduzir ensaios com maior duração, contrariando a metodologia geralmente utilizada.

## **Palavras-chave:**

Hidromorfologia fluvial, pontes em leitos fluviais, erosão localizada, pilares complexos, evolução temporal.

## 1. INTRODUÇÃO

As erosões localizadas junto das fundações de pilares de pontes podem conduzir à rotura parcial ou à queda destas estruturas. Nas últimas seis décadas, tem havido estudos de erosão correspondentes a pilares simples, sem considerar o efeito dos elementos de fundação associados (ou admitindo que a fundação é do mesmo tipo, coluna da figura 1) para aprofundar o conhecimento dos fenómenos envolvidos no processo de erosão, a influência da estrutura de escoamento na proximidade da fundação, a evolução temporal da profundidade máxima de erosão, obter formulações para a determinação da profundidade das cavidades de erosão e a modelação matemática do processo erosivo. Apenas nas últimas duas décadas têm sido realizados estudos específicos correspondentes a diferentes tipos de fundação de pilares de pontes e/ou do conjunto pilar/fundação de secção não uniforme (i.e. grupo de estacas, pilar fundado em maciço ou sapata e os designados pilares complexos, ver figura 1). De todos esses, os designados pilares complexos (englobando a coluna de suporte, o grupo de estacas de fundação e o respectivo maciço de encabeçamento) são os que têm ainda uma abordagem menos desenvolvida, e a merecer estudo, nomeadamente pela complexidade da estrutura de escoamento nas proximidades do pilar e da presença de vários elementos estruturais da fundação no escoamento.

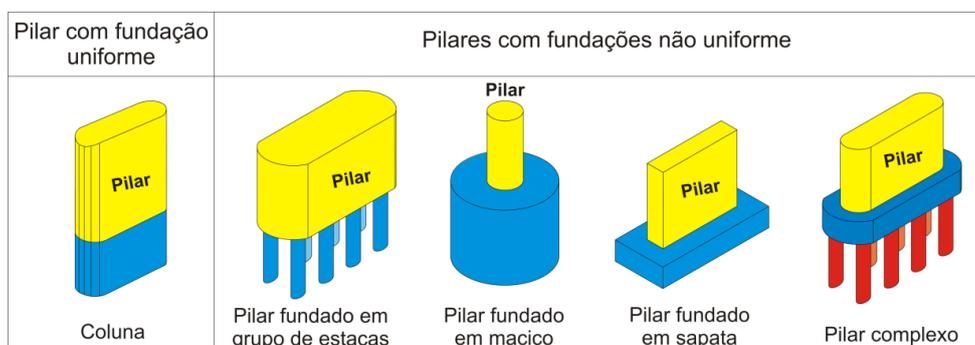


Figura 1: Tipo de fundações de pilares de pontes

Esta comunicação pretende contribuir para o aprofundamento do conhecimento da evolução temporal da profundidade máxima de erosão localizada junto de pilares complexos de pontes. Para atingir esse objectivo efectuaram-se ensaios experimentais de longa duração numa instalação experimental com diferentes configurações do pilar complexo.

## 2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

### 2.1. Evolução da profundidade de erosão em pilares simples

A evolução temporal da profundidade máxima de erosão localizada junto de pilares simples, em escoamentos sem transporte sólido generalizado segue uma tendência logarítmica, de acordo com o constatado na maioria dos estudos experimentais, i.e. ETTEMA (1980), FRANZETTI *et al.* (1982), MELVILLE e COLEMAN (2000). De acordo com COUTO e CARDOSO (2001), nesta situação podem ser identificadas três fases do processo erosivo: uma fase inicial, em que a profundidade máxima da cavidade de erosão aumenta muito rapidamente; uma fase principal, em que a profundidade e extensão da cavidade se acentuam de forma sistemática, embora a um ritmo progressivamente decrescente; e uma fase de equilíbrio, em que a cavidade de erosão deixa praticamente de evoluir temporalmente, conforme se ilustra na figura 2 (baseada nos resultados de LANÇA *et al.* (2010)).

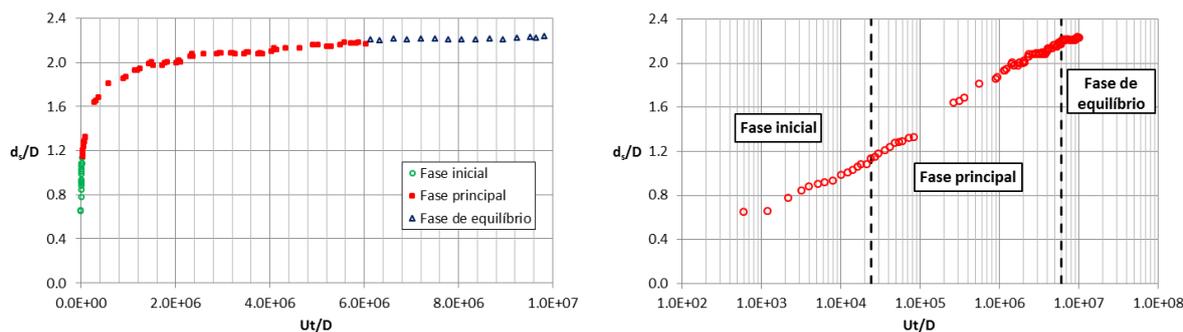


Figura 2: Evolução temporal da profundidade de erosão em pilares simples

## 2.2. Evolução da profundidade de erosão em pilares com fundações não uniforme

Nos ensaios experimentais com pilares de pontes com fundações não uniforme, a evolução da profundidade máxima de erosão pode apresentar diferentes tendências. Estas tendências estão associadas ao número e tipo de elementos estruturais da fundação expostos ao escoamento, à medida que se desenvolve a cavidade de erosão, o que será função do posicionamento relativo dos elementos da fundação relativa ao leito. No caso particular de pilares complexos de pontes, a questão da evolução temporal da profundidade de erosão não tem sido muito explorada. A presente comunicação pretende apresentar uma contribuição para este tema.

UMEDA *et al.* (2010) estudaram a evolução temporal da profundidade de erosão correspondente a pilar fundado num maciço cilíndrico espesso, para três posições relativas do coroamento da base da coluna em relação ao nível inicial do leito,  $H_c$ , correspondentes a topo do maciço acima do leito ( $H_c = 0,67D_c$ ), ao nível do leito ( $H_c = 0,00D_c$ ) e enterrado no leito ( $H_c = -0,67D_c$ ). A evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão para as três referidas posições encontra-se esquematizada nas figuras 3 a 5, em que a profundidade de erosão foi normalizada com o diâmetro da coluna,  $D_c$ . Na primeira posição (figura 3), a evolução temporal da profundidade de erosão segue a mesma tendência que no processo erosivo desenvolvido junto a pilares simples, evidenciando as três fases de evolução anteriormente descritas (em 2.1). Poderá antecipar-se (e comprovar, por comparação da figura 3 com as figuras 4 e 5) que a profundidade máxima de erosão é superior à que é obtida para as outras duas posições.

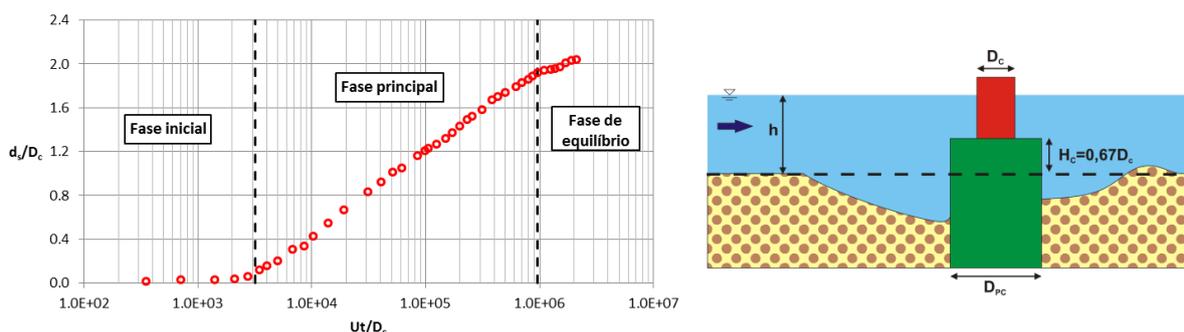
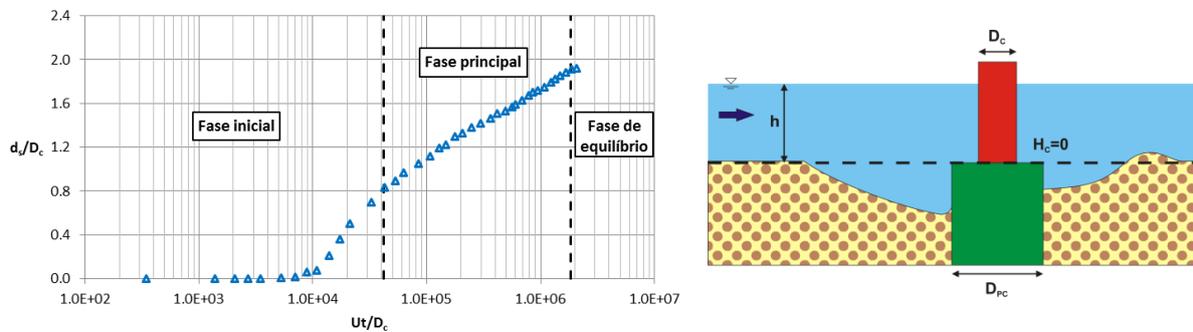


Figura 3: Evolução temporal da profundidade de erosão na posição 1,  $H_c = 0,67D_c$ , adaptada de UMEDA *et al.* (2010)

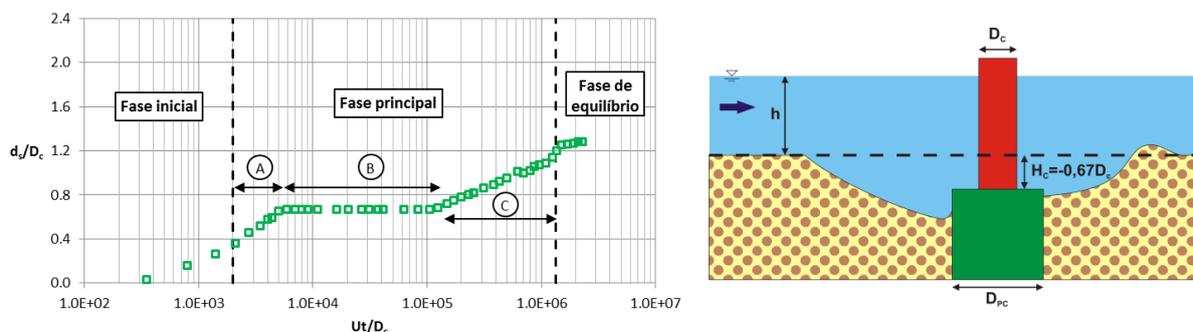
Para a segunda posição (figura 4), a evolução temporal da profundidade de erosão apresenta uma variação na fase inicial comparativamente com a primeira posição, em que se podem distinguir

duas tendências: uma primeira, correspondente ao processo erosivo desenvolvido só pela coluna onde o início do processo erosivo é retardado pela presença do topo do maciço; uma segunda, caracterizada pelo desenvolvimento da cavidade em frente do maciço, onde o processo se torna mais rápido, pela presença e contribuição dos dois elementos estruturais. As outras duas fases mantêm a mesma tendência detectada na posição 1.



**Figura 4: Evolução temporal da profundidade de erosão na posição 2,  $H_c = 0,00D_c$ , adaptada de UMEDA *et al.* (2010)**

Na terceira posição (figura 5), a evolução temporal da profundidade de erosão na fase inicial só é influenciada pela coluna. A evolução temporal apresenta uma variação na fase principal, onde são identificadas três etapas. Uma primeira (A) correspondente ao processo de erosão em frente da coluna até que a cavidade atinge o topo do maciço; seguida de uma etapa (B) onde a profundidade de erosão não é alterada até que toda a face superior do maciço fique totalmente exposta ao escoamento; e uma última etapa (C), correspondente ao processo em frente do maciço. A fase de equilíbrio é semelhante ao exposto para as posições 1 e 2. LU *et al.* (2011) estudaram uma configuração análoga a esta última para assinalar as três etapas acabadas de descrever.



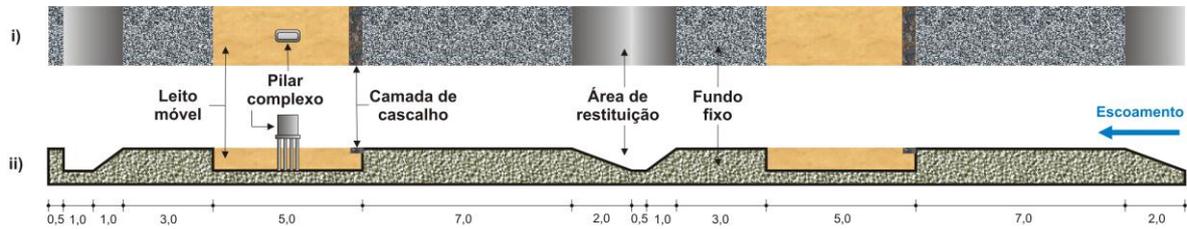
**Figura 5: Evolução temporal da profundidade de erosão na posição 3,  $H_c = -0,67D_c$ , adaptada de UMEDA *et al.* (2010)**

### 3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Instalação

A evolução temporal da profundidade máxima de erosão em pilares complexos foi estudada num canal rectangular de inclinação variável instalado no Pavilhão de Hidráulica Fluvial do Departamento de Hidráulica do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC. O canal tem 40,0 m de comprimento, 2,0 m de largura e 1,0 m de profundidade máxima (figura 6). A inclinação do fundo do canal foi

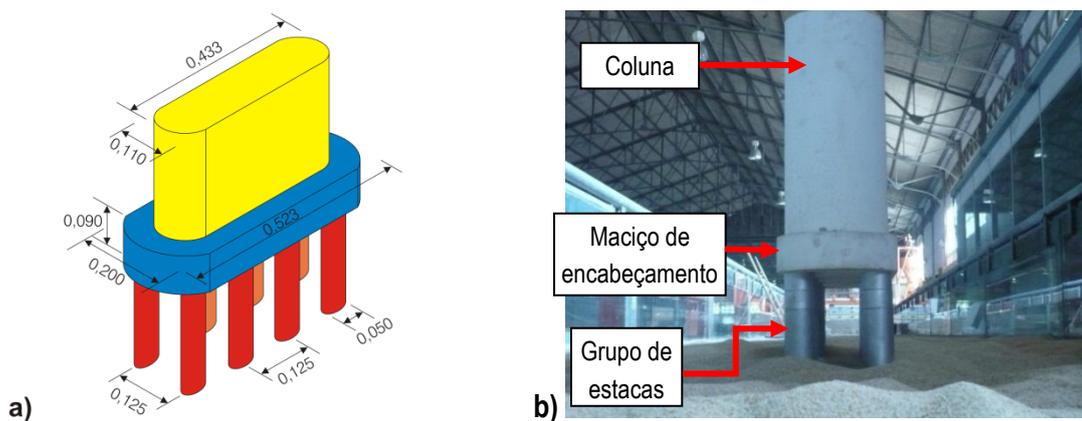
estabelecida com 0,2%. O caudal é monitorizado através de um medidor de caudal magnético. No canal foram construídas duas caixas de areia, com 5,0 m de comprimento, 0,4 m de altura e uma largura igual à do canal. As caixas foram preenchida com areia uniforme de diâmetro mediano das partículas,  $d_{50}$ , de 0,86 mm. Nos presentes ensaios foi utilizada a caixa do jusante.



**Figura 6: Vista esquemática do canal de ensaios (i) em planta e (ii) em corte longitudinal**

### 3.2. Modelo do pilar complexo

O modelo do pilar complexo utilizado nos ensaios é constituído por uma coluna rectangular com extremidades semicirculares (figura 7a) de 0,110 m de largura e 0,433 m de comprimento, um maciço de encabeçamento de 0,090 m de espessura, 0,200 m de largura e 0,523 m de comprimento, e um conjunto de 8 estacas com 0,050 m de diâmetro, agrupadas em dois alinhamentos idênticos, paralelos ao eixo do canal, e espaçadas entre si (entre eixos, no sentido transversal e longitudinal) de 0,125 m. Este modelo foi implantado no leito de areia, conforme se apresenta nas figuras 6 e 7b.

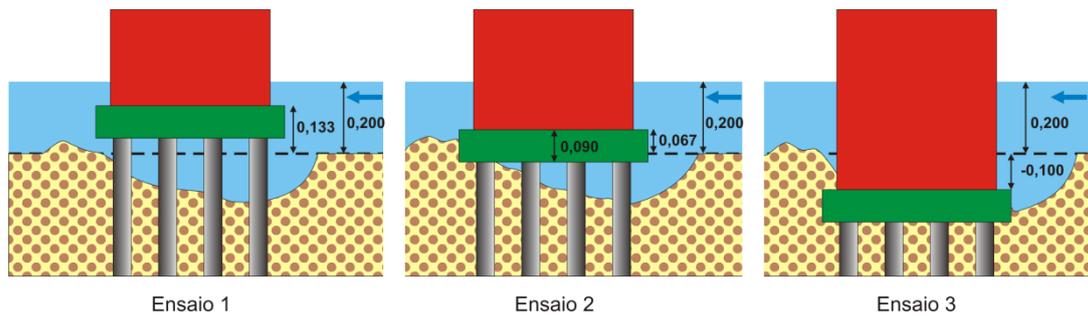


**Figura 7: Pilar complexo: a) Dimensões do modelo (unidades em metros); b) Implantação no leito de areia (de jusante) do canal**

### 3.3. Ensaios experimentais

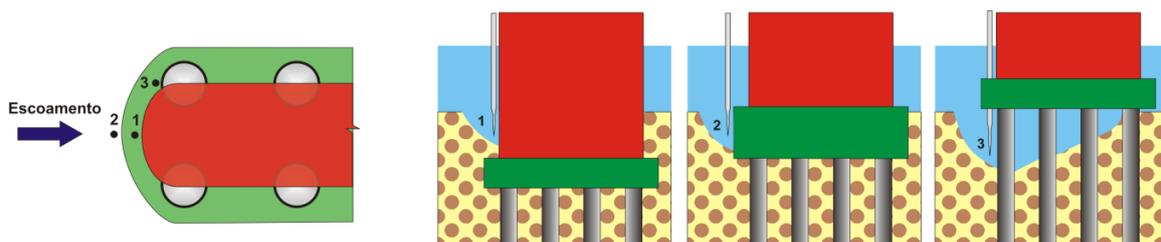
Foram efectuados três ensaios experimentais em condições de escoamento sem transporte sólido generalizado com o modelo nas posições que se ilustra na figura 8. Estes ensaios são representativos das três situações em que se podem distinguir as alterações da lei da evolução temporal dos ensaios correspondente a pilares simples. Assim, numa primeira situação, os três elementos estruturais estão inicialmente expostos ao escoamento, estando apenas o grupo de estacas (na correspondente parte enterrada) em contacto com a areia, encontrando-se o topo do maciço de encabeçamento (0,133 m) acima do nível inicial da areia (figura 8, ensaio 1). Na segunda situação, o maciço de encabeçamento está parcialmente enterrado na areia, estando o seu topo (0,067 m) acima do nível inicial da areia e o grupo de estacas completamente enterrado (figura 8, ensaio 2). Na última

situação, o maciço está completamente enterrado pelo que só a coluna está exposta ao escoamento; o topo do maciço encontra-se (0,100 m) abaixo do nível inicial da areia (figura 8, ensaio 3).



**Figura 8: Configurações dos três ensaios experimentais**

Dado que no conjunto das situações ensaiadas, qualquer dos elementos estruturais do pilar complexo (coluna, maciço de encabeçamento e grupo de estacas) poderia estar em contacto com o leito de areia, foi necessário considerar três distintos pontos de medição da profundidade de erosão, um em frente de cada um dos elementos estruturais, e que correspondem às posições assinaladas na planta e perfis esquematizados na figura 9. O hidrómetro utilizado nas medições de profundidade de erosão, foi suspenso a partir da parte superior da coluna através de um dispositivo que permite posicionar aquele dispositivo em qualquer das três posições referidas.



**Figura 9: Pontos de medição da profundidade de erosão (vista em planta e perfil)**

### 3.4. Condições experimentais

Para obter a condição de escoamento sem transporte sólido generalizado fixou-se a profundidade de escoamento em 0,20 m e o caudal em 134 l/s obtendo uma velocidade média de escoamento de 0,333 m/s. Como a velocidade crítica é 0,345 m/s, tal corresponde a uma relação de  $U/U_c = 0,95$ , o que garante uma condição de escoamento suficientemente próxima da crítica e sem transporte sólido generalizado.

### 3.5. Procedimento

O procedimento experimental teve em conta os seguintes passos:

- Colocação do pilar complexo e nivelamento do leito de areia;
- Submersão lenta da secção de teste e do canal, através de um caudal de baixo valor (em média 3 – 4 l/s), por forma a não provocar o transporte de sedimentos na vizinhança do pilar;
- Depois de atingida metade da altura de água do escoamento desejada, procedeu-se ao aumento gradual do caudal até ao valor pretendido, controlando a profundidade de escoamento pelo descarregador localizado na secção de jusante do canal;

- Quando atingidos os valores da altura de água e do caudal requeridos, procedeu-se à remoção das chapas de protecção da areia que haviam sido colocadas junto ao pilar após o nivelamento da areia antes referido, dando-se início ao ensaio;
- As medições de profundidade de erosão foram feitas ao fim de 6 min, 12 min, 24 min, 36 min, 48 min, 1 h, 1,5 h, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h, 6 h, 7 h, 8 h durante o primeiro dia, e nos dias seguintes 3 medições por dia (i.e. 9:00, 14:00 e 18:00).

## 4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1. Resultados

Para os três ensaios apresentados foi feito um registo (medições e fotografias) da evolução temporal da erosão. As medições da profundidade de erosão na cavidade foram efectuadas com base em cada uma das três posições de medição descritas na figura 9, em correspondência com os elementos estruturais em contacto com o leito de areia. Nas três situações ensaiadas, o processo de erosão apresentou fases de evolução distintas, com marcadas descontinuidades em correspondência com o início da exposição directa ao escoamento de cada um dos diferentes elementos de acordo com a evolução da cavidade formada. Por esta razão, os ensaios foram conduzidos durante períodos temporais relativamente longos com o objectivo de procurar obter as diferentes fases de evolução.

#### 4.1.1. Ensaio 1

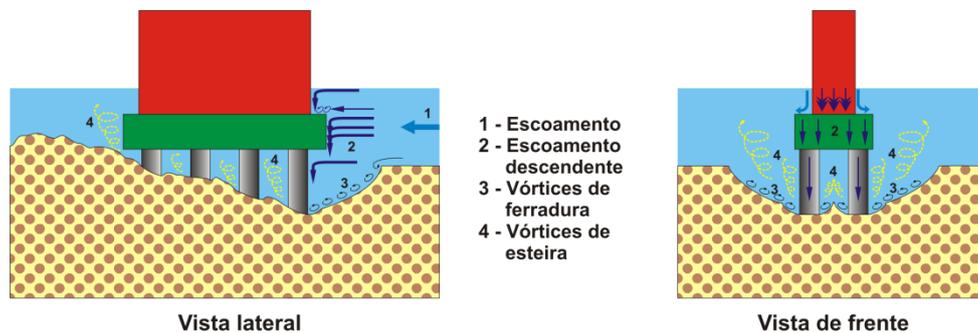
Na primeira situação, em que os três elementos estavam inicialmente expostos ao escoamento, o processo de erosão começou com uma cavidade de erosão localizada junto às duas estacas da frente do grupo. Durante os primeiros instantes do processo formaram-se cavidades independentes em torno das estacas do grupo, sendo mais rápida a erosão nas estacas de montante do grupo do que nas da parte de jusante, como se apresenta na figura 10 (tempo de ensaio = 1 hora). O processo continuou até que as duas cavidades de montante se juntaram no interior do grupo de estacas. A partir desse momento começou a formar-se uma cavidade maior na frente do grupo de estacas. Esta terá sido causada pela mudança da velocidade de escoamento na frente do pilar complexo e pela turbulência gerada pelo grupo de estacas conforme se ilustra na figura 10 (tempo de ensaio = 3 dias). O processo prosseguiu até se atingir as condições de equilíbrio (cavidade de erosão estável, sem progredir nem regredir) como se apresenta na figura 10 (tempo de ensaio = 14 dias).



**Figura 10: Fotografias da cavidade de erosão no ensaio 1**

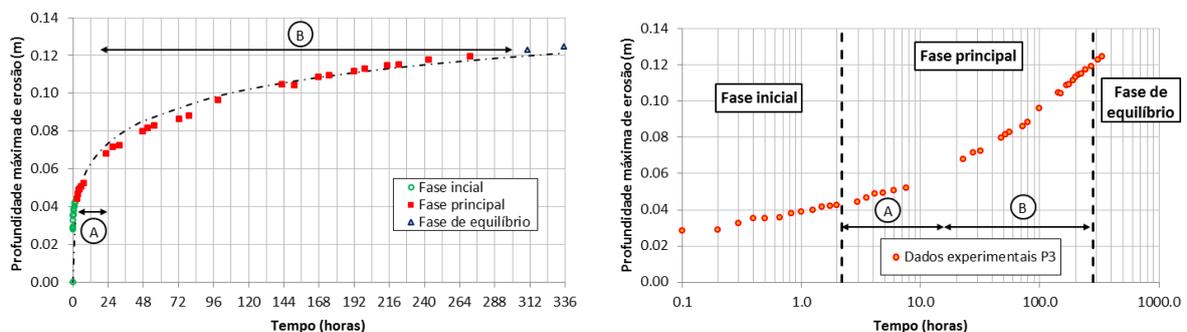
O processo erosivo apresentou as mesmas características que o correspondente a pilares simples, sendo o mesmo atribuído à combinação do escoamento descendente e dos vórtices de ferradura formados; adicionalmente, os vórtices de esteira ajudam no processo através de um efeito de sucção transportando o material para jusante. Na figura 11 inclui-se uma representação da estrutura de escoamento nas proximidades dos elementos estruturais do pilar complexo, de acordo com os

fenômenos antes mencionados. Há que salientar que o escoamento descendente é alterado pela presença do maciço de encabeçamento. Na zona do interior do grupo de estacas, os vórtices de esteira perdem força pela presença do maciço, reduzindo o efeito de sucção.



**Figura 11: Representação da estrutura de escoamento junto ao pilar complexo no ensaio 1**

Assim, nesta situação, naturalmente a evolução temporal da profundidade de erosão segue uma tendência similar que a do processo erosivo junto de pilares simples (figura 2), ou seja, é caracterizada por uma expressão logarítmica (única). No entanto, na fase principal podem ser identificadas duas etapas conforme se ilustra na figura 12: uma primeira (A), correspondente ao tempo que dura o processo de junção das cavidades individuais correspondentes às duas primeiras estacas do grupo, conforme anteriormente exposto; e uma segunda (B), onde o processo é influenciado pela presença dos três elementos estruturais no escoamento, e especialmente pelo grupo de estacas com as características descritas acima. A fase de equilíbrio é caracterizada por uma evolução temporal da profundidade de erosão muito lenta. A profundidade máxima da cavidade formada é sempre na frente (montante) das duas primeiras estacas do grupo, pelo que as medições foram feitas no ponto de medição número 3 (figura 9). A profundidade máxima observada no final do ensaio foi de 0,125 m.

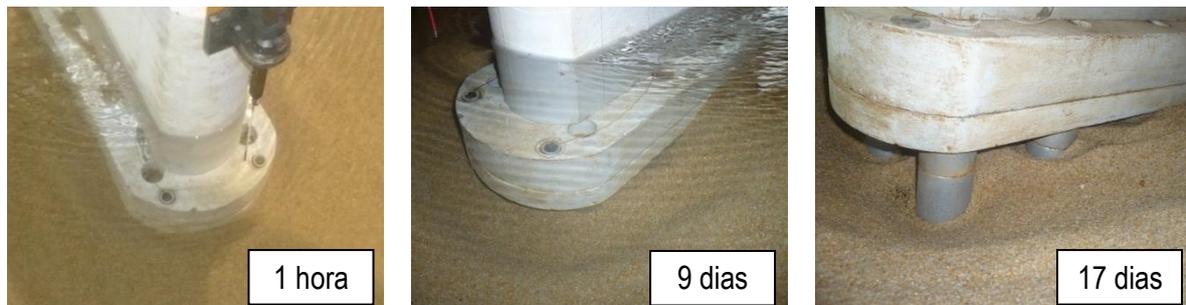


**Figura 12: Evolução temporal da profundidade máxima de erosão no ensaio 1**

#### 4.1.2. Ensaio 2

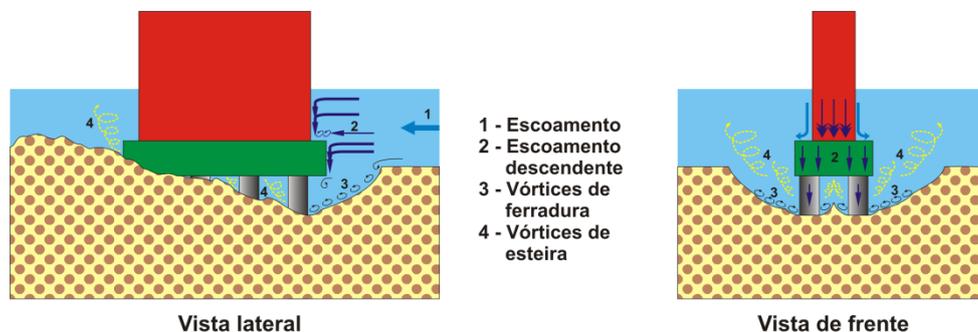
Na segunda situação, em que o maciço de encabeçamento estava parcialmente enterrado no leito de areia, o processo de erosão começou com uma erosão localizada junto às extremidades de montante do maciço de encabeçamento progredindo até formar uma cavidade a montante do maciço, como se apresenta na figura 13 (tempo de ensaio = 1 hora). A velocidade com que evolui a cavidade está relacionada com a altura do maciço que fica acima do leito de areia. O processo erosivo teve as mesmas características anteriormente apresentadas, ou seja, escoamento descendente, vórtices de

ferradura e vórtices de esteira. A cavidade desenvolveu-se a montante do maciço até que a parte de jusante do mesmo ficasse completamente exposta ao escoamento. Nesse momento a cavidade começou a desenvolver-se por baixo do maciço conforme se ilustra na figura 13 (tempo de ensaio = 9 dias), com a particularidade de o processo erosivo nesta zona ser muito lento por duas razões: velocidades baixas e pela obstrução do mesmo maciço, o que impede o desenvolvimento dos vórtices de esteira. A cavidade progrediu até atingir a zona imediatamente em frente às estacas onde se formaram cavidades independentes em torno destas na cavidade já existente, como se apresenta na figura 13 (tempo de ensaio = 17 dias).



**Figura 13: Fotografias da cavidade de erosão no ensaio 2**

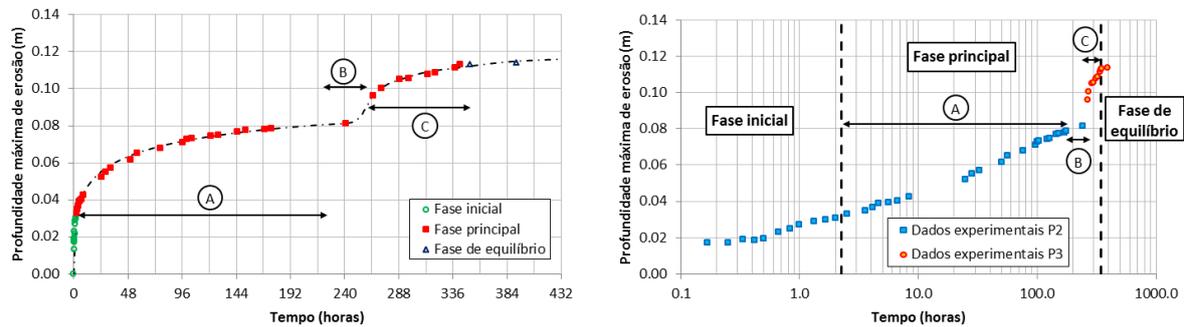
Na figura 14 inclui-se uma representação da estrutura de escoamento junto aos elementos estruturais do pilar complexo. Os vórtices de esteira produzidos no interior do grupo de estacas (figura 14) têm dificuldade em se desenvolver pela presença da base do maciço, pelo que o material transportado nestes vórtices deve sair da cavidade pelas zonas laterais do pilar retardando o processo erosivo.



**Figura 14: Representação da estrutura de escoamento junto ao pilar complexo no ensaio 2**

Nesta situação, a evolução temporal da profundidade de erosão apresenta uma variação na fase principal conforme se ilustra na figura 15, onde são identificadas três etapas. Uma primeira (A), correspondente ao processo de erosão na parte de montante do maciço de encabeçamento; seguida de uma etapa (B), correspondente a uma transição da localização do ponto de máxima profundidade entre o ponto 2 e 3 da figura 9; e uma última etapa (C), correspondente ao processo erosivo na frente das duas primeiras estacas do grupo. A fase de equilíbrio segue a mesma tendência da exposta para a primeira situação, tendo-se obtido uma profundidade máxima de 0,114 m na frente das duas primeiras estacas do grupo. De acordo com a figura 9, as primeiras medições (fase inicial, etapas A e B da fase principal de acordo com a figura 15) foram feitas no ponto de medição número 2 (P2), na frente do

maciço, e logo as restantes medições (etapa C da fase principal e fase de equilíbrio de acordo com a figura 15) foram feitas no ponto de medição número 3 (P3), na frente do grupo de estacas.



**Figura 15: Evolução temporal da profundidade máxima de erosão no ensaio 2**

### 4.1.3. Ensaio 3

Na terceira situação, em que inicialmente o maciço estava completamente enterrado e só a coluna estava exposta ao escoamento, o processo de erosão começou com uma cavidade de erosão localizada a montante da coluna, como se apresenta na figura 16 (tempo de ensaio = 1 dia). O processo erosivo tem a mesma estrutura de escoamento do que a que se observa em pilares simples: escoamento descendente, vórtices de ferradura e vórtices de esteira, até que a cavidade atinge o topo do maciço. Nessa etapa a cavidade manteve a mesma profundidade de erosão (profundidade à que se encontra enterrado o topo do maciço); no entanto, as dimensões da cavidade iam aumentando em planta conforme se ilustra na figura 16 (tempo de ensaio = 5 dias). O processo continuou até que o topo do maciço, na parte de montante da coluna, ficou totalmente exposto. A partir daquele momento, o maciço ficou também exposto ao escoamento, contribuindo para o processo erosivo como se apresenta na figura 16 (tempo de ensaio = 25 dias).



**Figura 16: Fotografias da cavidade de erosão no ensaio 3**

Na figura 17 inclui-se uma representação da estrutura de escoamento junto aos elementos estruturais do pilar complexo. A presença da cavidade de erosão junto à zona de montante do maciço é determinada pela profundidade a que se encontra enterrado o maciço,  $H_c$ , e pela distância entre o início do maciço e o início da coluna,  $f$ .

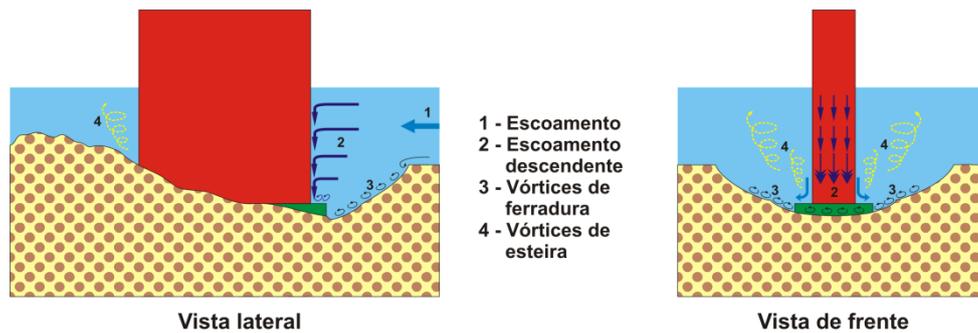


Figura 17: Representação da estrutura de escoamento junto ao pilar complexo no ensaio 3

Nesta situação, a evolução temporal da profundidade de erosão apresenta uma variação na fase principal conforme se ilustra na figura 18, onde são identificadas três etapas. Uma primeira (A), correspondente ao processo de erosão a montante da coluna até que a cavidade atinge o topo do maciço; seguida de uma etapa (B), correspondente a descobrimento do topo do maciço até ficar totalmente exposto, sendo a profundidade de erosão igual a 0,100 m; e uma última etapa (C), correspondente ao processo em frente ao maciço. De acordo com a figura 9, as primeiras medições (fase inicial, etapas A e B da fase principal de acordo com a figura 18) foram feitas no ponto de medição número 1 (P1), a montante da coluna, e as restantes medições (etapa C da fase principal e fase de equilíbrio de acordo com a figura 18) foram feitas no ponto de medição número 2 (P2), a montante do maciço. A profundidade máxima obtida no final do ensaio foi de 0,115 m junto ao maciço.

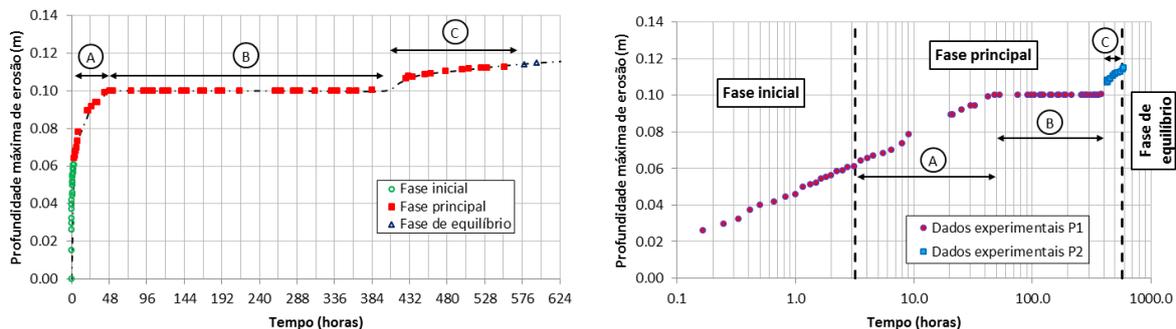


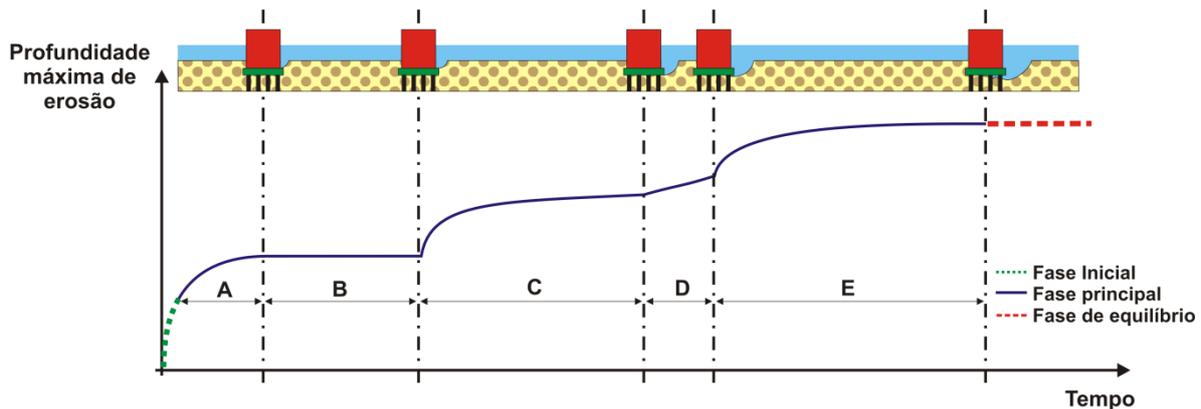
Figura 18: Evolução temporal da profundidade máxima de erosão no ensaio 3

## 4.2. Fases de evolução

Conforme os resultados obtidos nos três ensaios experimentais verificou-se que a evolução da profundidade máxima de erosão apresenta diferentes tendências em comparação com a tendência logarítmica encontrada para pilares simples. Estas tendências variam, dependendo da localização relativa do maciço de encabeçamento em relação ao leito (acima, parcialmente ou completamente enterrado). As principais variações da evolução ocorrem na fase principal, onde se podem observar diferentes etapas dependendo do número de elementos estruturais do pilar complexo expostos ao escoamento à medida que se desenvolve a cavidade de erosão. Em termos da fase de equilíbrio vale a pena mencionar que esta fase pode ocorrer junto à zona de montante das estacas (ensaios 1 e 2) ou junto à zona de montante do maciço (ensaio 3).

Para a terceira situação, em que o maciço e o grupo de estacas estavam inicialmente enterrados, dependendo da configuração do pilar complexo, particularmente da altura e posição do

maciço de encabeçamento, em relação ao nível inicial do leito de areia, o processo de erosão pode chegar a ter cinco etapas na fase principal da evolução temporal conforme se ilustra na figura 19. As duas primeiras etapas (A e B da figura 19) são idênticas às descritas na secção 3.3. A terceira etapa (C), corresponde à progressão da cavidade em frente do maciço, até que a superfície vertical do maciço de encabeçamento venha a ficar completamente exposta ao escoamento. A quarta etapa (D), corresponde ao desenvolvimento da cavidade por baixo do maciço até que a cavidade progride e atinge a zona imediatamente em frente às estacas. A última etapa (E), corresponde ao processo de erosão a montante das duas estacas da frente do grupo. Nas duas últimas etapas podem observar-se as características do escoamento expostas na secção 3.2.



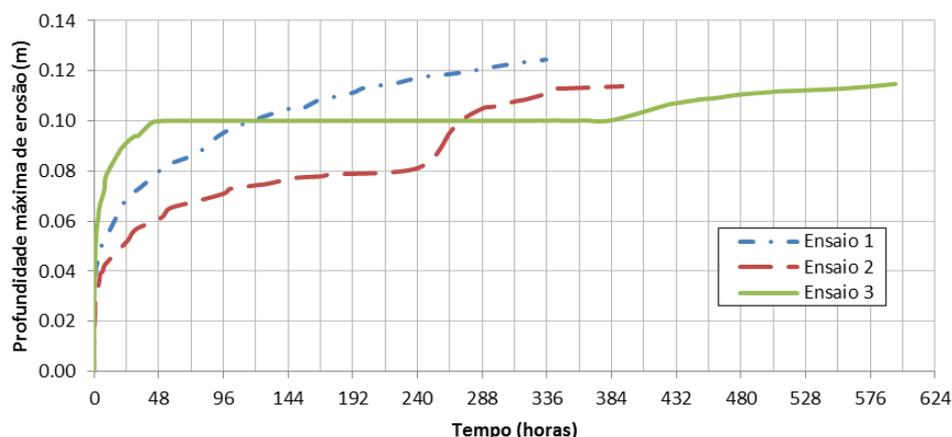
**Figura 19: Fases de evolução na situação de pilares complexos com o maciço completamente enterrado**

Efectivamente, o terceiro ensaio conduzido no âmbito do presente estudo, durante 25 dias, para estudo da terceira situação, não permitiu confirmar que a cavidade de erosão desenvolvida viesse a deixar exposta toda a zona de montante do maciço. Isto deve-se a que a configuração do pilar complexo, diâmetro da coluna, altura e posição do maciço (profundidade a que se encontra enterrado o topo do maciço), leva a ter uma profundidade de erosão de equilíbrio menor que a profundidade a que se encontra enterrada a base do maciço.

### 4.3. Processo erosivo e profundidade de erosão

No processo erosivo junto de pilares simples, a combinação do escoamento descendente com o escoamento desenvolvido a montante da fundação dá origem aos vórtices em ferradura, os quais são, de acordo com muitos autores, os principais geradores do processo erosivo. No entanto, no processo erosivo junto de pilares complexos, a presença do maciço de encabeçamento constitui uma obstrução ao escoamento descendente formado junto à coluna, o que, possivelmente, terá como consequência uma redução dos vórtices em ferradura conforme se ilustra nos esquemas das figuras 11, 14 e 17.

Em termos de vórtices de esteira, que são responsáveis pelo transporte do material erodido a jusante da cavidade, pode-se constatar a diminuição destes pela presença e pelo grau de enterramento do maciço de encabeçamento. Na figura 20 observa-se que o processo erosivo (profundidade de erosão) é maior no ensaio 1 que no ensaio 2, devido à redução dos vórtices de esteira pela presença do maciço, inicialmente parcialmente enterrado. No ensaio 3, a profundidade de erosão é maior durante as primeiras 48 horas, tempo no qual o maciço não está presente no processo erosivo, depois o maciço é um obstáculo para o desenvolvimento da cavidade de erosão.



**Figura 20: Evolução da profundidade máxima de erosão**

#### 4.4. Critério de finalização dos ensaios experimentais

Para atingir a última fase de evolução (fase de equilíbrio) nos ensaios experimentais em pilares de pontes com fundações não uniformes, diversos autores (i.e. COLEMAN 2005, MELVILLE et al. 2006 e ATAIE-ASHTIANI et al. 2010) sugerem o mesmo critério usado em pilares simples - estabelecido por MELVILLE e CHIEW, (1999) - para calcular o tempo necessário para atingir as condições de equilíbrio. Esse critério estabelece que o tempo de equilíbrio é atingido quando a taxa de erosão é menor que 5% do diâmetro das estacas (ou da profundidade de escoamento, se de menor valor) num período de 24 horas. A profundidade de erosão de equilíbrio corresponde à profundidade de erosão obtida no tempo de equilíbrio.

Em concordância com os resultados dos três ensaios experimentais em termos de variação temporal da profundidade máxima de erosão pode-se determinar se o critério de finalização dos ensaios acima descrito é válido para pilares complexos. Na figura 21 representa-se a taxa de variação da profundidade máxima de erosão normalizada com o diâmetro das estacas para os diferentes dias de duração dos ensaios. Esta figura permite evidenciar que ao utilizar o critério de finalização de 5% (MELVILLE e CHIEW, 1999) obtêm-se tempos de equilíbrio de 8,5 dias para o ensaio 1, 5 dias para o ensaio 2 e 2,5 dias para o ensaio 3. Para estas durações as profundidades de erosão corresponderam a cerca de 91,2% da profundidade final (0,114 m), cerca de 64,9% da profundidade final (0,074 m) e cerca de 87,0% da profundidade final (0,100 m) respectivamente.

De acordo com a figura 21, se o ensaio 2 tivesse terminado em 5 dias (segundo o critério) não poderia ter sido alcançada a evolução da cavidade a montante do grupo de estacas, a qual iniciou cerca do décimo dia; se o ensaio 3 tivesse terminado em 2,5 dias (segundo o critério) não poderia ter sido alcançada a evolução da cavidade a montante do maciço de encabeçamento, a qual se iniciou cerca do décimo sétimo dia. Claramente os resultados do presente estudo provam que o critério descrito para finalização dos ensaios experimentais não é adequado para pilares complexos. Para este tipo de fundação de pilares é necessário conduzir ensaios com maior duração, especialmente nas situações em que o maciço se encontra parcialmente ou completamente enterrado no leito de areia.

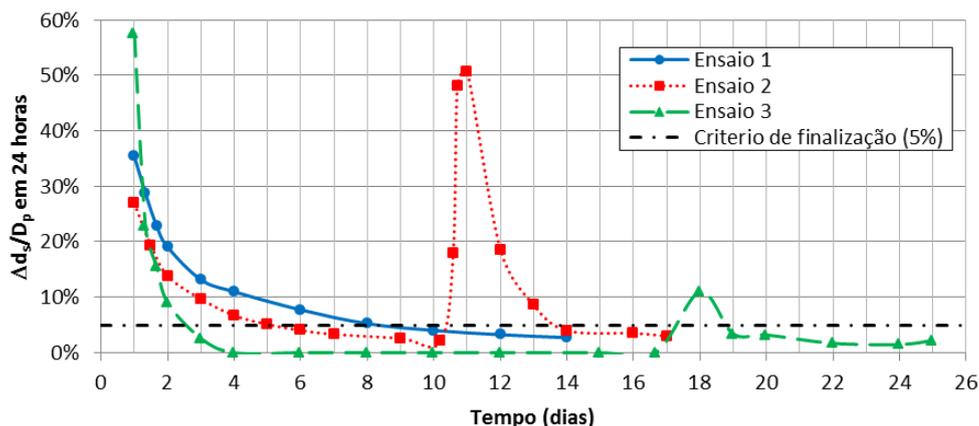


Figura 21: Comparação do critério de finalização dos ensaios

## 5. CONCLUSÕES

As seguintes conclusões sobre o processo de desenvolvimento da cavidade de erosão junto de pilares complexos baseiam-se nos três ensaios experimentais com posições diferentes do maciço de encabeçamento relativas ao nível inicial do leito de areia.

- Verificou-se que a tendência (única) logarítmica da evolução da profundidade máxima de erosão em ensaios com pilares simples apresenta variações para o caso específico dos pilares complexos. Em geral, as variações mais notórias ocorrem na fase principal do processo de evolução, podendo este processo englobar até cinco fases/etapas (figura 19). Estas etapas estão condicionadas pela presença dos três elementos estruturais do pilar complexo em contacto com o escoamento.
- Observou-se que a estrutura de escoamento junto ao pilar complexo apresenta os mesmos componentes já estudados em pilares simples; no entanto, estes componentes podem sofrer variações pela presença do maciço de encabeçamento, o qual interrompe o escoamento descendente da coluna e bloqueia o desenvolvimento dos vórtices de esteira a jusante. Este bloqueio afecta o transporte do material erodido, em especial quando o processo erosivo ocorre no grupo de estacas (situações 1 e 2 anteriormente estudadas).
- Confirmou-se que o critério de finalização dos ensaios estabelecido por MELVILLE e CHIEW (1999) não é aplicável para o caso de pilares complexos, já que com a sua utilização se obteriam tempos de ensaio menores aos necessários para obter as diferentes fases de evolução, incluindo as distintas etapas na fase principal. Portanto, para ensaios experimentais com modelos semelhantes aos do presente estudo devem ser utilizados tempos de duração de pelo menos duas semanas; no entanto, os ensaios podem ter de ser ainda conduzidos com maior duração, tendo atenção o progresso das diversas fases e etapas descritas a fim de obter a mais completa expressão das mesmas.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projecto de investigação “Estudo experimental de erosões localizadas junto de pilares complexos” (PTDC/ECM/101353/2008) co-financiado pela FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Portugal.

## BIBLIOGRAFIA

- ATAIE-ASHTIANI, B.; BARATIAN-GHORGHI, Z.; BEHESHTI, A.A. – “Experimental investigation of clear-water local scour of compound piers”. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **136**, 6, Junho 2010, pp. 343 - 351.
- COLEMAN, S.E. – “Clearwater local scour at complex piers”. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **131**, 4, Abril 2005, pp. 330 - 334.
- COUTO, L.T.; CARDOSO, A.H. – “Erosões localizadas junto de encontros e pilares de pontes, Parte I - Caracterização da situação de referência”. *Recursos Hídricos*, **22**, 1, Maio 2001, pp. 75 - 86.
- ETTEMA, R. - Scour at bridge piers: Report No. 236. University of Auckland, School of Engineering (New Zealand), 1980.
- FRANZETTI, S.; LARCAN, E.; MIGNOSA, P. – “Influence of tests duration on the evaluation of ultimate scour around circular piers”. *Proceedings of International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures, Coventry (England)*, 22 – 24 Setembro 1982.
- LANÇA, R.; FAEL, C.; CARDOSO, A. – “Assessing equilibrium clear water scour around single cylindrical piers”. *Proceedings of River Flow 2010, Braunschweig (Germany)*, 8 – 10 Setembro 2010, pp. 1207 – 1213.
- LU, J.-Y.; SHI, Z.-Z.; HONG, J.-H.; LEE, J.-J.; RAIKAR, R.V. – “Temporal variation of scour depth at nonuniform cylindrical piers”. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **137**, 1, Janeiro 2011, pp. 45 - 56.
- MELVILLE, B.W.; CHIEW, Y.M. – “Time scale for local scour at bridge piers”. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **125**, 1, Janeiro 1999, pp. 59 - 65.
- MELVILLE, B.W.; COLEMAN, S.E. - Bridge Scour. Colorado (USA), Water Resources Publications, LLC, 2000.
- MELVILLE, B.; COLEMAN, S.; PRIESTLEY, S. – “Local scour at complex piers”. *Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2006, ASCE, Nebraska (USA)*, 21 - 25 Maio. 2006
- UMEDA, S.; YAMAZAKI, T.; YUHI, M. - “An experimental study of scour process and sediment transport around a bridge pier with foundation”. *Proceedings of International Conference on Scour and Erosion 2010, ASCE, San Francisco (USA)*, 7 – 10 Novembro 2010, pp. 66 - 75.