



Alterações morfológicas induzidas pelo alargamento da foz de
um afluente numa confluência fluvial

Pedro Maria de Almeida Moreira Cameira de Abreu

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientador: Prof. Doutor António Heleno Cardoso

Júri

Presidente: Prof. Doutor António Alexandre Trigo Teixeira

Orientador: Prof. Doutor António Heleno Cardoso

Vogais: Doutora Elsa Cristina Tavares Lourenço Alves

Maio 2015

Agradeço penhoradamente à Fundação para a Ciência e a Tecnologia a oportunidade que me foi dada para a realização dos ensaios que sustentam a presente dissertação, através da disponibilização de verbas para a construção das instalações laboratoriais assim como o restante equipamento experimental, enquadradas no projecto PTDC/ECM/118775/2010 – Morfodinâmica de confluências fluviais.

Agradeço ao Instituto Superior Técnico, em particular, ao Departamento de Hidráulica, a possibilidade de ter desenvolvido o presente trabalho de investigação nas instalações do seu Laboratório de Hidráulica.

Agradeço ao Sebastián Guillén-Ludeña o excelente companheirismo durante a realização dos ensaios, a transmissão dos seus conhecimentos em diversas áreas e a sua constante disponibilidade para discutir e aprofundar os temas objecto desta dissertação.

O meu maior agradecimento vai para o Senhor Professor António Heleno Cardoso, pela sua permanente solicitude, o seu muito dedicado empenho a este projecto, em particular à presente dissertação, o tempo que despendeu no apoio à realização deste trabalho, a inesgotável paciência que lhe dispensou e a mim também e o grande sentido pedagógico com que proveitosamente me orientou.

Resumo

No presente trabalho, foram estudados os efeitos de um alargamento no trecho final de um canal afluente de modo a entender se esses efeitos se traduziam num aumento da heterogeneidade da morfologia e da hidrodinâmica da confluência quando comparados com os efeitos de uma configuração de confluência sem alargamento. Os estudos basearam-se em ensaios realizados numa confluência em laboratório, caracterizada por um ângulo de 70° , com alimentação em sedimentos, areia uniforme, nos dois canais confluentes, aspecto pouco considerado até à data em estudos experimentais.

Os ensaios de laboratório revelaram que o alargamento local do afluente induziu um estreitamento e alongamento da barra de deposição na margem interior do canal principal, imediatamente a jusante da confluência, um alteamento das cotas mínimas das cavidades de erosão na foz do afluente e na margem exterior do canal principal a jusante da confluência e uma diminuição do desnível entre fundos confluentes quando comparados com os registos da configuração sem alargamento.

A origem destas manifestações decorre de uma “entrada mais suave” do escoamento afluente no canal principal, devido ao alargamento da foz, e de uma menor deflexão do escoamento principal. Esta situação gera menor intensidade da actividade turbulenta na camada de mistura decorrendo daí menor poder erosivo do escoamento afluente. Por outro lado, a morfologia do canal afluente apresentou grande heterogeneidade com diversas zonas topográficas originando-se diferentes velocidades de escoamento, inexistentes na configuração sem alargamento.

Palavras-chave: Confluências fluviais, hidrodinâmica, morfodinâmica, transporte de sedimentos, reabilitação fluvial.

Abstract

Over the last 50 years, laboratory and field experiments have provided valuable information about confluence morphology and hydrodynamics. However, very few studies have examined the effects of sediment feeding in both confluent channels.

The present work was developed in this context, where the effects of a tributary mouth widening in a 70° junction angle laboratory confluence and of the use of uniform sand in both channels, as sediment substrate, were studied by comparing results between a widen confluence configuration and a non-widen confluence configuration. The widening was set in the downstream reach of the tributary channel with 0.45 m and 0.60 m long from the tributary mouth towards upstream direction whereas the non-widen configuration channel presented a 0.15 m width.

The present study revealed that the local widening induces a narrower but longer and slightly higher deposition bar at the inner bank of the post-confluence channel. Furthermore, the scour holes at the tributary mouth and in the outer bank of the post-confluence channel were shallower in the widening configuration test. In the tributary channel, the widening reach presented a diversity of morphologies and water levels not recorded in the non-widen configuration test.

The aforementioned results are conjectured to be caused by a “smoother” entrance of the tributary flow “jet” in the main flow. The tributary flow is less outwards directed therefore leading to a smaller intensity from the vortexes and mixing layer turbulence.

Key words: River confluences, hydrodynamics, morphodynamics, sediment transport, river rehabilitation.

Índice

Capítulo 1 - Introdução		
1.1	Considerações gerais	1
1.2	Objectivos e justificação	2
1.3	Organização da dissertação	3
Capítulo 2 - Revisão de literatura		5
2.1.	Introdução	5
2.2.	Variáveis e parâmetros de controlo da morfodinâmica das confluências	5
2.3.	Comportamento hidro-morfo-sedimentar das confluências	6
2.3.1.	Hidrodinâmica das confluências com fundo fixo e sem desnível entre fundos dos canais confluentes	6
2.3.2.	Hidrodinâmica das confluências com fundo fixo e com desnível entre fundos dos canais confluentes	8
2.3.3.	Hidrodinâmica e morfodinâmica das confluências com fundo móvel	8
2.4.	Efeito do alargamento da foz do afluente na morfodinâmica de confluências	15
Capítulo 3 - Instalação, equipamento de medição e procedimento experimental		19
3.1.	Considerações gerais	19
3.2.	Parâmetros e variáveis de controlo dos ensaios	19
3.3.	Canais e circuitos de alimentação de caudais líquido e sólido	22
3.4.	Equipamento de medição, de posicionamento de sondas e de controlo e aquisição	28
3.5.	Procedimento experimental	32
Capítulo 4 - Resultados experimentais		35
4.1.	Ensaio de referência	35
4.1.1.	Evolução da morfologia do fundo e do nível de água	35
4.1.2.	Outras observações	43
4.2.	Ensaio com a foz do afluente alargada	44
4.2.1.	Evolução da morfologia do fundo e do nível de água	44
4.2.2.	Outras observações relevantes	53
Capítulo 5 - Discussão de resultados		57
5.1	Introdução	57
5.2	Configuração de referência	57
5.2.1	Morfologia do fundo	57

5.2.2	Hidrodinâmica	60
5.2.3	Transporte sólido	63
5.3	Configuração com foz do afluente alargada	63
5.3.1	Morfologia do fundo	63
5.3.2	Hidrodinâmica	66
5.3.3	Transporte sólido	68
Capítulo 6 - Conclusões		71
Bibliografia		75

Lista de figuras

Figura 2.1 : Modelo descritivo da hidrodinâmica de uma confluência proposto por Best (1987)	6
Figura 2.2 : Modelo morfológico de confluências assimétricas segundo Best (1988)	9
Figura 2.3 : Modelo morfo-sedimentar proposto por Best (1988)	10
Figura 2.4 : Modelo hidro-morfo-sedimentar proposto por Leite Ribeiro (2012)	12
Figura 2.5 : Modelo de células helicoidais descritas por Mosley (1976) e por Rhoads e Kenworthy (1998)	14
Figura 3.1 : Curva granulométrica da areia utilizada nos ensaios	21
Figura 3.2 : Planta dos canais	23
Figura 3.3: Aspecto geral da instalação laboratorial	24
Figura 3.4: a) Reservatório de montante; b) imagem de pormenor do sistema de grelhas estabilizador do escoamento; c) imagem de pormenor (vista de montante) da rampa de PVC que delimita a secção de montante da caixa de sedimentos.	24
Figura 3.5: a) imagem de pormenor do bloco de betão que forma a secção de jusante da caixa de sedimentos; b) visão global da parte de montante do canal principal com o descarregador Bazin em T e tapete rolante; c) tapete rolante e rampa de madeira.	25
Figura 3.6: a) tremonha de captação de sedimentos, blocos de betão; b) primeiro e segundo reservatórios de jusante (esquerda e direita na imagem, respectivamente); c) comporta de jusante e orifício.	26
Figura 3.7: a) descarregador Bazin em T (visto de montante); b) descarregador Bazin em T (visto de jusante); c) descarregador Bazin instalado na parte de montante do canal afluente; d) tubagens dos circuitos de recirculação de água e sedimentos.	27
Figura 3.8: a) tela de alimentação de sedimentos do canal afluente; b) tela de alimentação de sedimentos do canal afluente e rampa descendente; c) regulador de velocidade da tela de alimentação de sedimentos.	28
Figura 3.9: a) pormenor do carro de suporte com interruptores de emergência; b) dispositivo de aquisição dos sinais ultrassónicos referentes à topografia; c) braço metálico onde estão instalados os dispositivos de medição; d) multímetro de processamento dos sinais ultrassónicos do nível de água.	29
Figura 3.10: a) imagem de pormenor do braço metálico amovível (n ^o 1); b) pormenor da parte de jusante do canal afluente em que se observa o eixo metálico de suporte (carril); c) pormenor da parte de montante do canal afluente em que constam o motor de alimentação (n ^o 2), o eixo metálico de suporte (n ^o 3) e o descarregador Bazin (n ^o 4).	30
Figura 3.11: a) braço metálico acoplado ao carro no qual estão montados o limnómetro e a sonda Mini-Echo Sounder; b) Mini-Echo-Sounder; c) limnómetro ultrassónico.	30
Figura 3.12: a) potenciómetro suspenso pelo cabo de aço; b) imagem de pormenor do potenciómetro.	31
Figura 3.13: a) confluência entre canais em que se observa a presença do degrau; b) canal principal durante a fase de enchimento do canal.	32
Figura 3.14: Gráfico da evolução do peso dos sedimentos medidos ao longo da duração dos testes	34
Figura 4.1: Perfis longitudinais do fundo e da superfície livre para T = 1 h e para a) Y = 0,93 m, b) Y = 0,49 m, c) Y = 0,09 m, d) segundo o eixo do canal afluente ; e) Topografia do fundo do canal.	36
Figura 4.2: Perfis longitudinais do fundo e da superfície livre para T = 4 h e para a) Y = 0,93 m, b) Y = 0,49 m, c) Y = 0,09 m, d) segundo o eixo do canal afluente; e) Topografia do fundo do canal.	38

Figura 4.3: Perfis longitudinais do fundo e da superfície livre para $T = 7$ h e para a) $Y = 0,93$ m, b) $Y = 0,49$ m, c) $Y = 0,09$ m, d) segundo o eixo do canal afluente ; e) Topografia do fundo do canal.	40
Figura 4.4: Perfis longitudinais do fundo e da superfície livre para $T = 12$ h e para a) $Y = 0,93$ m, b) $Y = 0,49$ m, c) $Y = 0,09$ m, d) segundo o eixo do canal afluente; e) Topografia do fundo do canal.	42
Figura 4.5: a) Foz do afluente antes do início do ensaio; b) foz do afluente, no estado de equilíbrio.	42
Figura 4.6: Imagem de pormenor da confluência em que se observa a dispersão de corante no escoamento.	43
Figura 4.7: Topografia do fundo do canal para $T = 12$ h.	44
Figura 4.8: Perfis longitudinais do fundo e da superfície livre para $T = 1$ h e para a) $Y = 0,93$ m, b) $Y = 0,49$ m, c) $Y = 0,09$ m, d) segundo o eixo do canal afluente; e) topografia do fundo do canal.	45
Figura 4.9: Imagem de pormenor da foz do afluente.	45
Figura 4.10: Perfis longitudinais do fundo e da superfície livre para $T = 7$ h e para a) $Y = 0,93$ m, b) $Y = 0,49$ m, c) $Y = 0,09$ m, d) segundo o eixo do canal afluente; e) topografia do fundo do canal.	47
Figura 4.11: Perfis longitudinais do fundo e da superfície livre para $T = 10$ h e para a) $Y = 0,93$ m, b) $Y = 0,49$ m, c) $Y = 0,09$ m, d) segundo o eixo do canal afluente e e) topografia do fundo do canal.	49
Figura 4.12: Perfis longitudinais do fundo e da superfície livre para $T = 12$ h e para a) $Y = 0,93$ m, b) $Y = 0,49$ m, c) $Y = 0,09$ m, d) segundo o eixo do canal afluente e e) topografia do fundo do canal.	51
Figura 4.13: Perfis longitudinais do fundo e da superfície livre para $T = 12$ h, nas configurações de referência e alargada, para a) $Y = 0,93$ m, b) $Y = 0,49$ m, c) $Y = 0,09$ m, d) segundo o eixo do canal afluente e e) topografia do fundo do canal.	52
Figura 4.14: Cinco zonas topográficas do alargamento no equilíbrio.	53
Figura 4.15: Imagem dos escoamentos confluentes com presença de corante.	54
Figura 4.16: Imagem da dispersão do corante no canal afluente.	54
Figura 4.17: Topografia do fundo dos canais em $T = 12$ h.	54
Figura 4.18: Formas do fundo no canal principal a) para a configuração de referência e b) para a configuração alargada	55
Figura 5.1: Imagem de pormenor da foz do canal afluente em que se observa a crista estacionária do fundo atravessando a largura do canal.	60
Figura 5.2: a) e b) Imagens de pormenor do canto de jusante da confluência.	61
Figura 5.3: Imagem de pormenor da foz do canal afluente.	62
Figura 5.4: Registo topográfico dos ensaios de referência e de configuração alargada na fase de equilíbrio .	64
Figura 5.5: Topografia e níveis de água para o ensaio de referência e com alargamento para a margem interior do canal principal em equilíbrio dinâmico.	65
Figura 5.6: Imagem de pormenor da confluência na configuração de referência.	67
Figura 5.7: Imagem de pormenor da confluência na configuração alargada.	67
Figura 5.8 : Imagem de pormenor do canal afluente e do alargamento com expansão do corante no canal afluente	68
Figura 5.9: Imagem de pormenor da confluência.	68

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Resumo dos estudos elaborados por diversos autores em função do desnível e da mobilidade do fundo do canal	5
Tabela 3.1 - Principais propriedades físicas da areia utilizada	20

Lista de símbolos e abreviações

Alfabeto latino

Símbolo	Descrição	Unidades
A	Área da secção transversal do canal	$[m^2]$
B	Largura de um canal	$[m]$
B_F	Largura de um canal	$[m]$
B_m	Largura do canal principal	$[m]$
B_t	Largura do canal afluente	$[m]$
d_{16}	Diâmetro de sedimentos para o qual 16 % dos sedimentos em peso são mais finos	$[m]$
d_{30}	Diâmetro de sedimentos para o qual 30 % dos sedimentos em peso são mais finos	$[m]$
d_{50}	Diâmetro de sedimentos para o qual 50 % dos sedimentos em peso são mais finos	$[m]$
d_{50}	Diâmetro de sedimentos para o qual 50 % dos sedimentos em peso são mais finos	$[m]$
$d_m(d_{65})$	Diâmetro de sedimentos para o qual 65 % dos sedimentos em peso são mais finos, considerado como diâmetro médio	$[m]$
d_{84}	Diâmetro de sedimentos para o qual 84 % dos sedimentos em peso são mais finos	$[m]$
d_{90}	Diâmetro de sedimentos para o qual 90 % dos sedimentos em peso são mais finos	$[m]$
Fr	Número de Froude	$[-]$
h	Altura de água uniforme do escoamento	$[m]$
K	Coeficiente de rugosidade do fundo	$[m^{1/3}.s^{-1}]$
Q	Caudal líquido	$[m^3.s^{-1}]$
Q_m	Caudal líquido do canal principal	$[m^3.s^{-1}]$
Q_r	Rácio entre os caudais líquidos do canal principal e afluente	$[-]$
Q_{rs}	Rácio entre os caudais sólidos do canal principal e afluente	$[-]$
Q_{sm}	Caudal sólido do canal principal	$[m^3.s^{-1}]$
Q_{st}	Caudal sólido do canal afluente	$[m^3.s^{-1}]$

Q_t	Caudal líquido no canal afluente	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
R_s	Raio hidráulico da secção transversal de um canal	[m]
S	Declive de um canal	[-]
X	Direcção longitudinal do eixo de coordenadas	[-]
Y	Direcção lateral do eixo de coordenadas	[-]
Z	Direcção vertical do eixo de coordenadas	[-]

Alfabeto grego

α	Ângulo de junção da confluência	[$^\circ$]
ρ_s	Peso volúmico dos sedimentos	$[kg \cdot m^{-3}]$
σ	Coefficiente de graduação dos sedimentos	[-]

Siglas

EPFL	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
IST	Instituto Superior Técnico
LCH	Laboratoire des Constructions Hydrauliques

Aos meus pais.

1. Introdução

1.1 Considerações gerais

As confluências fluviais são singularidades hidráulicas onde dois ou mais cursos de água se encontram, convergindo para um só. Geralmente, uma confluência implica a existência de um curso de água principal e de um afluente que se insere no primeiro, mediante um ângulo de confluência α .

Como as confluências são elementos integrantes dos sistemas fluviais, desempenham um papel central na circulação de fauna, no transporte de sedimentos, na hidrodinâmica e na morfologia dos cursos de água e ainda na dispersão de poluentes e outras substâncias (Bidaud, 2010).

Mosley (1976) classifica as confluências em dois tipos: (i) confluências assimétricas, em que o canal principal a jusante da confluência é uma extensão do canal principal de montante (ii) confluências simétricas, em que os dois cursos de água se juntam formando um novo curso de água, resultando uma configuração em Y.

Devido à complexidade dos padrões locais do escoamento e da morfologia do fundo das confluências, estas têm-se constituído em objecto de investigação muito activa desde a década de 1950. Os estudos compreendem ensaios laboratoriais, medições *in situ* (medições de campo) e modelos computacionais que fornecem informações importantes sobre a hidro-morfo-dinâmica sedimentar das confluências.

Os ensaios laboratoriais permitem o estudo da influência de variáveis como o ângulo de confluência ou os caudais, recriando os fenómenos naturais com maior ou menor rigor consoante a escala adoptada. Os estudos *in situ*, pelo seu lado, oferecem também, uma descrição rigorosa dos fenómenos naturais que aí ocorrem. Porém, a extrapolação de resultados para um modelo conceptual geral é difícil em face do elevado número de parâmetros que intervêm e que condicionam os resultados (morfologia, condições hidráulicas e hidrológicas, revestimento do leito e zonas ripícolas, vegetação, entre outros aspectos). Por último, os modelos numéricos oferecem a possibilidade de variar com facilidade os parâmetros de controlo do sistema e permitem a resolução rápida das equações matemáticas que descrevem o escoamento e o transporte sólido. Porém, devido à complexidade dos fenómenos envolvidos, essas equações não apresentam, muitas vezes, o rigor adequado.

Estas importantes ferramentas de análise e apoio à decisão de projectos têm permitido, em conjunto, fornecer informação relevante para enquadrar a filosofia actual de intervenção fluvial, muito focada na reabilitação, procurando conciliar o aumento do valor ecológico do meio fluvial com, designadamente, a melhoria da protecção contra cheias. A reabilitação de confluências é um aspecto central da reabilitação fluvial pelo facto de aquelas serem elementos associados a mudanças significativas na hidrodinâmica, no transporte de sedimentos e na morfologia do fundo.

Neste contexto, o alargamento da foz dos afluentes canalizados desde o início da era industrial facilita o ajustamento do rio às dinâmicas naturais perspectivando o aumento de heterogeneidade do substrato sedimentar e da profundidade e da velocidade do escoamento. Estas alterações favorecem o desenvolvimento de *habitats* (vegetação subaquática, vegetação ripícola, invertebrados, peixes, aves, anfíbios) e a melhoria da conectividade entre o rio principal e afluente, também conhecida como conectividade longitudinal (Leite Ribeiro, 2012).

O alargamento local da foz de um afluente tem em vista criar uma zona húmida rica em diversidade animal e vegetal constituindo assim um núcleo de biodiversidade num ambiente homogéneo, com dinâmicas naturais reduzidas e de baixo valor ecológico como são os rios intervencionados (Leite Ribeiro, 2012).

Por outro lado, em zonas de alargamento do afluente, também se desenvolvem zonas de estagnação do escoamento que servem de refúgio a várias espécies animais durante cheias ou durante fenómenos como o hydropeaking induzido pelas variações de caudal debitado pelas barragens e centrais hidroeléctricas (Meile *et al.*, 2010, Leite Ribeiro, 2012).

Os trabalhos de Leite Ribeiro (2012) permitiram alcançar novos patamares de conhecimento relativos à dinâmica de alargamentos da foz de afluentes mas ainda há aspectos por investigar. Foi, aliás, neste âmbito que surgiu a oportunidade de desenvolver a presente dissertação de mestrado.

1.2 Objectivos e justificação

O presente trabalho foi, ainda, desenvolvido no contexto do projecto Confluv, que enquadra igualmente uma dissertação de doutoramento focada no estudo experimental de confluências fluviais com fundo móvel sujeitas a reabilitação por alargamento, tendo em vista a síntese de recomendações práticas aplicáveis em projectos de reabilitação fluvial. No imediato, esta dissertação explora os resultados de dois ensaios completos de caracterização da morfologia de confluências com fundo móvel, tendo em vista contribuir para uma melhor identificação das diferenças morfológicas induzidas pelo alargamento do canal afluente junto à foz que, mais tarde, serão igualmente incorporados na referida dissertação de doutoramento.

As investigações realizadas por Leite Ribeiro (2012) e Guillén-Ludeña *et al.* (2015) no Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), na École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suíça), visaram o estudo do comportamento hidrodinâmico, morfodinâmico e do transporte de sedimentos em confluências fluviais, onde foram estudadas confluências (com e sem alargamento do trecho de jusante do canal afluente) com ângulos de 90° (Leite Ribeiro, 2012) e de 70° e 90° por Guillén-Ludeña *et al.* (2015) (igualmente para confluências com e sem alargamento). Nesses ensaios, aqueles autores tiveram uma abordagem diferente relativamente ao transporte e alimentação sedimentar do sistema.

Leite Ribeiro (2012) restringiu a alimentação sedimentar ao canal afluente, tendo inicialmente colocado uma mistura sedimentar mal graduada, com 80% de material arenoso (0,01 - 4 mm) e com

20% de seixo (4 - 8 mm) como leito dos canais e como material a prover ao canal afluente. Esta mistura foi escolhida por ser representativa da realidade do Alto Ródano, no qual se observa um diâmetro médio de 2,3 mm e um coeficiente de graduação $\sigma = 4,15$ (segundo Leite Ribeiro, 2012). A alimentação sedimentar desse rio é, maioritariamente, feita através dos afluentes (torrentes montanhosas) sendo o fornecimento de material sólido proveniente do rio principal pouco significativo. Essa razão levou Leite Ribeiro (2012) a optar por fornecer sedimentos apenas ao canal afluente.

Guillén-Ludeña *et al.* (2015) tirou partido dos resultados de Leite Ribeiro (2012) e completou a investigação abastecendo ambos os canais (principal e afluente) com sedimentos. A mistura granulométrica utilizada no canal afluente foi igual à utilizada por Leite Ribeiro (2012). No canal principal, a mistura foi composta unicamente pela mistura de areia e seixo (0,01 mm – 4,0 mm). A componente mais grosseira desta mistura (4,0 mm - 8,0 mm) não foi incluída de modo a evitar-se a formação da couraça de sedimentos com granulometria grosseira no leito do canal principal no trecho pós-confluência.

Nos ensaios que enformam a presente dissertação, realizados numa confluência com ângulo de 70° utilizou-se uma areia caracterizada por $D_{50} = 0,86 \text{ mm}$ e $\sigma = 1,36$, com o intuito de se identificarem eventuais diferenças morfológicas relativamente à caracterizada por Guillén-Ludeña *et al.* (2014) para $D_{50} = 0,8 \text{ mm}$ e $\sigma = 4,15$ no canal afluente e $\sigma = 3,15$ no canal principal, para o mesmo ângulo (70°).

Convirá ter presente que, tendo os ensaios sido feitos no laboratório de Hidráulica do Instituto Superior Técnico, a escolha de uma granulometria com um coeficiente de graduação abaixo de 1,5, pretende retratar a realidade de rios de planície, como alguns que existem em Portugal, em que o substracto sedimentar é mais uniforme do que nos rios alpinos. A manutenção de um diâmetro mediano praticamente igual em ambos os estudos permitiu discutir o efeito do coeficiente de graduação na morfodinâmica da confluência. Este aspecto concorre com a existência de transporte sólido no canal principal a montante da confluência para diferenciar o presente estudo do de Leite Ribeiro (2012).

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada em seis capítulos. O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura existente sobre confluências. No capítulo 3 descreve-se a instalação experimental, o equipamento de medição e ainda o procedimento experimental adoptado nos ensaios laboratoriais. A este capítulo segue-se o capítulo 4, no qual são apresentados os resultados dos ensaios, os quais são analisados e discutidos no capítulo 5. O capítulo 6 sintetiza os resultados mais importantes e a respectiva origem, sendo feita uma apreciação do interesse e do contributo do estudo desenvolvido no seu contexto.

2. Revisão de literatura

2.1 Introdução

Pretende-se neste capítulo dar uma perspectiva histórica da investigação conhecida sobre confluências fluviais.

A Tabela 2.1 sistematiza as contribuições de vários autores em função dos diversos tipos de estudos experimentais que se realizaram até à presente data. Os estudos cobriram situações caracterizadas pela existência de fundo móvel ou de fundo fixo. Em qualquer dos casos, foram estudadas confluências com ou sem discordância de níveis entre leitos dos canais confluentes.

Tabela 2.1: Resumo dos estudos elaborados por diversos autores em função do desnível e da mobilidade do fundo do canal

	sem discordância	com discordância
fundo fixo	Best (1987)	Biron <i>et al.</i> (1996)
fundo móvel	Mosley (1976),	Best (1988); Leite Ribeiro <i>et al.</i> (2012)

Os estudos em canais com fundo móvel referem-se a casos em que o fundo é constituído, tipicamente, por areia ou por seixo fino.

O desnível entre fundos dos canais confluentes é determinante para a hidrodinâmica, pois a sua existência induz aspectos característicos da estrutura do escoamento. Esses aspectos repercutem-se, por sua vez, na geometria do desnível entre fundos. Geralmente, este implica a existência de um talude de declive acentuado na foz do canal afluente, originando uma descida abrupta do nível do fundo do canal afluente para o do fundo do canal principal. Kennedy (1984) realçou que o desnível entre fundos nas confluências de rios ocorre com mais frequência do que a situação de fundos concordantes, razão pela qual a investigação sobre confluências se passou a centrar mais em confluências com fundo discordante.

Neste capítulo, listam-se, em primeiro lugar, as variáveis e parâmetros de controlo da morfologia das confluências. De seguida, apresenta-se uma visão histórica da investigação começando por identificar o comportamento de confluências com fundo fixo e sem desnível entre fundos confluentes para se abordar, depois, o comportamento de confluências com fundo móvel e com desnível entre fundos confluentes.

2.2 Variáveis e parâmetros de controlo da morfodinâmica das confluências

Os estudos da morfodinâmica de confluências desenvolvidos até à actualidade permitiram identificar

as principais variáveis e parâmetros que controlam os fenômenos e processos nestas zonas dos sistemas fluviais. São eles:

- O ângulo de junção dos cursos de água na confluência, α ;
- o rácio entre caudais líquidos dos cursos de água afluentes, $Q_r = \frac{Q_t}{Q_m}$, em que Q_t é o caudal proveniente do curso de água afluente (t advém do termo inglês *tributary*) e Q_m é o caudal do curso de água principal a montante da confluência (m advém do termo inglês *main*);
- o rácio de caudais sólidos, $Q_{rs} = \frac{Q_{st}}{Q_{sm}}$ em que Q_s representa caudal sólido e m e t mantêm o significado acima indicado;
- os declives dos canais confluentes;
- as larguras dos canais confluentes, B_m e B_t ;
- a granulometria do material de fundo, caracterizável pelo diâmetro mediano e pelo coeficiente de graduação.

2.3 Comportamento hidro-morfo-sedimentar das confluências

2.3.1 Hidrodinâmica das confluências com fundo fixo e sem discordância entre leitos dos canais confluentes

Os primeiros estudos de caracterização do escoamento em confluências devem-se a Taylor (1944). Este autor propôs um modelo de cálculo das alturas do escoamento em confluências com fronteiras fixas aplicável a escoamentos lentos.

Foi Best (1987) quem propôs o primeiro modelo de estruturas organizadas do escoamento para as confluências, distinguindo seis zonas (Figura 2.1): zona de estagnação, zona de deflexão, zona de separação, zona de velocidade máxima, zona de recuperação a jusante e camadas de corte ou de mistura. Segue-se a descrição das diferentes zonas.

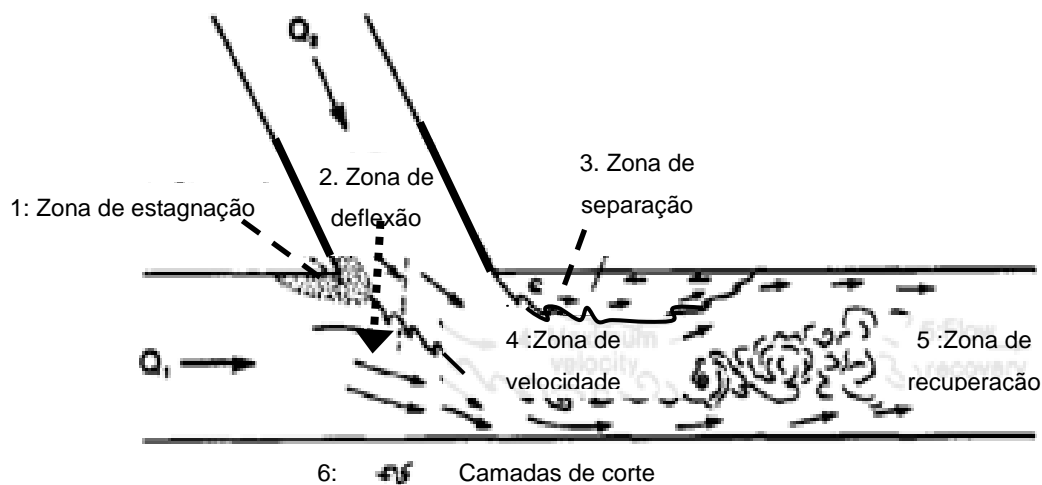


Figura 2.1: Modelo descritivo da hidrodinâmica de uma confluência proposto por Best (1987)

1. Zona de estagnação

A denominada zona de estagnação é uma zona que se localiza no canto de montante da confluência. A sua origem advém da interacção entre os dois escoamentos confluentes, isto é, da respectiva deflexão mútua. A deflexão, por sua vez, induz o aumento da altura do escoamento e, por isso, o aumento da pressão que acarreta diminuição das velocidades e diminuição das tensões de corte.

Leite Ribeiro (2011) assinala que o escoamento proveniente do canal afluente actua como um obstáculo ao escoamento principal induzindo uma zona de estagnação caracterizada pelo aumento do nível da água junto à margem interna assim como uma desaceleração do escoamento que é encaminhado no sentido da margem exterior do canal principal.

2. Zona de deflexão do escoamento

A zona de deflexão é uma zona que se cria entre os dois escoamentos convergentes. A sua ocorrência deve-se ao facto de o escoamento afluente tender a descolar de uma parede do canal à medida que entra na confluência por causa da mudança abrupta de geometria lateral da outra parede, nomeadamente em face do ângulo existente no canto de jusante da junção.

3. Zona de separação do escoamento

A zona de separação é originada pela mudança de direcção do escoamento que provém do canal afluente ao encontrar uma geometria diferente (mudança brusca de alinhamento do canal afluente para o canal principal). O escoamento descola da parede interior do canal na pós-confluência (no canal principal) para se voltar a juntar a esta parede mais a jusante, criando um espaço em que a velocidade da corrente é mais reduzida, podendo ocorrer recirculação.

4. Zona de velocidade máxima

Esta zona ocorre imediatamente a jusante do encontro dos dois escoamentos, na zona contraída (estrangulada) do canal, induzida pela zona de separação do escoamento (na margem interior). Por haver parte do canal ocupada pela zona de separação, a secção efectiva é contraída e, por isso, as velocidades são máximas.

5. Zona de recuperação do escoamento

Esta zona localiza-se a jusante da zona de separação dos escoamentos sendo o espaço onde o escoamento recupera da influência da dinâmica da confluência. Nesta zona, os dois escoamentos (principal e afluente) misturam-se gradualmente à volta da camada de mistura e verifica-se uma diminuição da turbulência. Best (1987) defende que a distribuição de velocidades assimétrica a partir da confluência (produto da aceleração do escoamento exteriormente à zona de separação) tende a diminuir, retomando um padrão em que as linhas de corrente voltam a ser paralelas às margens (paredes) do canal.

6. Camadas de mistura

As camadas de mistura são formadas pelo contacto entre as zonas de velocidades máximas e as zonas de separação (ver Figura 2.1), sendo caracterizadas por forte turbulência e fortes tensões de corte que se geram pela interação entre as diferentes zonas do escoamento.

Biron *et al.* (1996) corroborou o modelo hidrodinâmico de Best (1987), utilizando resultados de ensaios realizados em canais de leito fixo, e sem discordância entre leitos confluentes. Porém, realizou também ensaios em canais de leito fixo com discordância entre leitos confluentes, que permitiram estabelecer um termo de comparação com os anteriores.

2.3.2 Hidrodinâmica das confluências com fundo fixo e com discordância entre leitos dos canais confluentes

Biron *et al.* (1996) analisaram os efeitos do desnível entre fundos dos canais confluentes na hidrodinâmica de confluência em canais. Os autores chegaram à conclusão que não existe deflexão do escoamento junto ao fundo do canal. A esta observação junta-se o facto de, segundo os autores, o desnível entre fundos dos canais, caracterizados por cotas de fundo mais elevadas no canal afluente, poder inibir a existência da zona de separação de escoamentos imediatamente a jusante do canto de jusante da confluência e também reduzir a aceleração do escoamento junto do fundo do canal. Os efeitos precedentes criam um fluxo ascendente junto do canto de jusante da confluência a que chamaram “upwelling flow”, traduzido no presente trabalho por escoamento ascensional.

Biron *et al.*(1996) afirmaram ainda que a camada de mistura, que é, por definição, uma interface originada pela colisão dos escoamentos entre si, caracterizada por elevada turbulência, é enviesada ao interagir com a zona de separação. Deste desvio, sugerem os autores, resulta o escoamento ascensional e também uma mistura mais rápida entre os escoamentos confluentes (quando comparada com os ensaios em fundo concordante). Deste modo, os autores afirmam ser necessário ter em consideração a presença da discordância entre leitos dos canais confluentes em modelos de confluências.

O comportamento de confluências descrito até agora centrou-se em confluências com fundo fixo. Porém, vários autores estudaram confluências em canais de fundo móvel, permitindo perceber a configuração da topografia das confluências.

2.3.3 Hidrodinâmica e morfodinâmica das confluências com fundo móvel

O estudo de confluências com fundo móvel começou com os trabalhos de Mosley (1976), nos quais o autor estudou o comportamento de uma confluência simétrica.

Mais tarde, Best e Reid (1984) e Best (1987,1988) realizaram novos ensaios em canais de fundo móvel. Partindo do modelo de estruturas organizadas do escoamento em confluências apresentado em 2.3.1, Best (1987) apresentou um modelo morfológico que tem várias implicações para o transporte de sedimentos (e para o desenvolvimento da morfologia do fundo) em confluências, e que, no caso de confluências assimétricas, compreende três elementos principais, ilustrados na Figura 2.2:

- uma cavidade de erosão cujo talvegue apresenta uma orientação aproximadamente igual à a bissetriz do ângulo de junção;
- uma barra de deposição situada no canal principal, imediatamente após a confluência e que deve a sua existência à separação do escoamento a jusante do canto jusante da junção;
- frentes de deposição que se formam na foz de cada um dos canais confluentes.

Segundo o mesmo autor, a posição das frentes de deposição e, conseqüentemente, a profundidade da cavidade de erosão no canal principal assim como as dimensões da barra de deposição alteram-se em função dos valores das variáveis características do escoamento e da confluência, isto é, em primeira linha, do ângulo da confluência e do rácio entre caudais. Segue-se uma breve descrição dos três elementos supracitados.

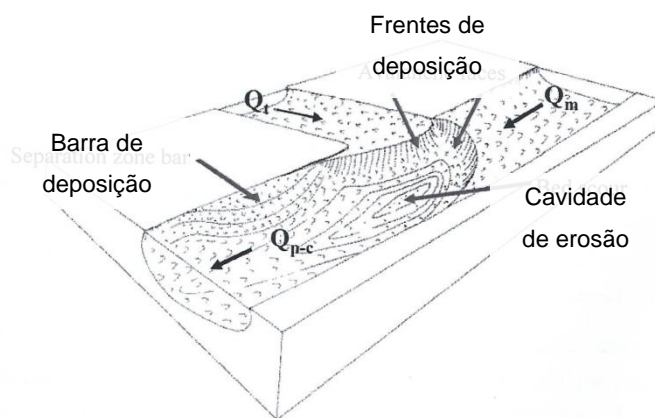


Figura 2.2: Modelo morfológico de confluências assimétricas segundo Best (1988)

1. Frentes de deposição

As frentes de deposição formam-se na embocadura ou foz dos dois canais (principal e afluente). Segundo Best (1987,1988), o declive das frentes de deposição assim como a profundidade da cavidade de erosão são mais pronunciados para ângulos de confluências maiores e para maiores rácios entre caudais devido à influência crescente do canal afluente. Para ângulos mais pequenos e rácios mais baixos, o declive da frente de deposição é menos marcado e é menos penetrante na confluência (ou seja, encontra-se mais para montante no canal afluente).

2. Cavidade de erosão

Esta região do canal situa-se na zona onde se manifestam as maiores tensões de arrastamento, encontrando-se confinada pelas frentes de deposição e pela barra de deposição. Esta cavidade é definida pelos taludes íngremes das frentes de deposição.

Segundo Best (1988), a cavidade de erosão começa no canto de montante da confluência e propaga-se para jusante, segundo, aproximadamente, a bissetriz do ângulo da confluência. Em rigor, a orientação do talvegue da cavidade varia também com o rácio de caudais, tendendo para a do canal

afluente à medida que o rácio aumenta. Segundo o mesmo autor, para ângulos inferiores a quinze graus (15°), não há desenvolvimento de cavidade de erosão.

Mosley (1976) destacou o facto de o aumento do ângulo da confluência se repercutir no aumento da profundidade da cavidade de erosão.

3. Barra de deposição de sedimentos

A barra de deposição forma-se no canal principal, imediatamente a jusante da confluência, na margem interna (na margem onde desagua o afluente), numa zona caracterizada por velocidades de escoamento mais baixas. A forma e a posição da barra variam em função dos parâmetros da confluência (ângulo e caudais) e dependem das trajectórias do material sólido transportado.

Best (1988) concluiu que as variáveis de maior importância nos processos morfológicos de confluências são o ângulo de junção e o rácio de caudais líquidos entre os dois canais confluentes. A Figura 2.3 ilustra um modelo de transporte de sedimentos proposto por Best (1988) que deixa transparecer a influência do rácio entre caudais líquidos. Segundo o autor, as mesmas consequências sobre os processos morfológicos seriam de prever para o aumento do ângulo da junção.

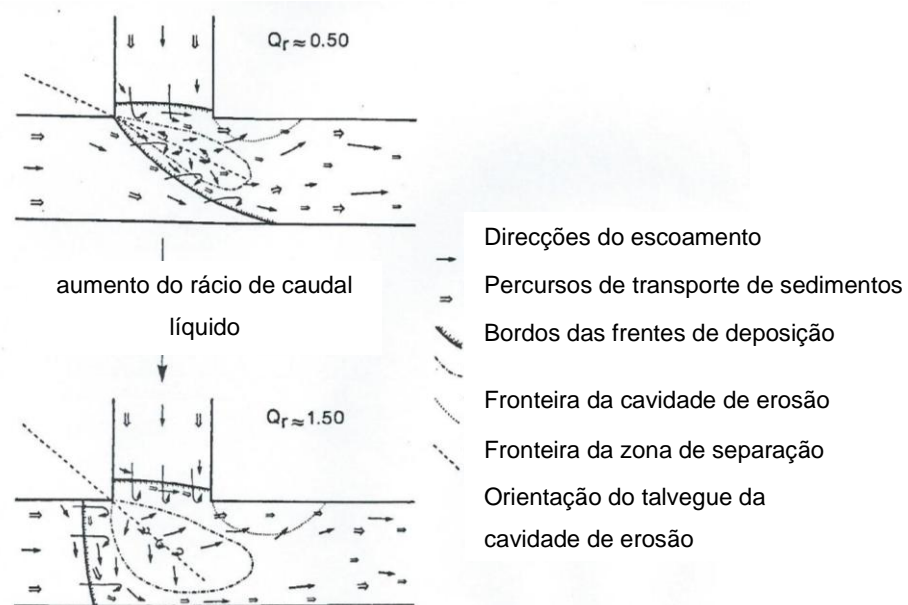


Figura 2.3: Modelo morfo-sedimentar proposto por Best (1988)

Segundo Best (1987), existem percursos preferenciais de transporte do material sólido confinados a pequenas zonas à volta da cavidade de erosão. Esta constatação implica que o transporte de sedimentos se faça essencialmente por estes corredores laterais em vez de passar pelo talvegue da cavidade de erosão.

Este modelo foi proposto por Best (1988) a partir de um modelo hidrodinâmico num canal de fundo fixo sem transporte sólido e em que os fundos eram concordantes e a partir de observações num

canal de fundo móvel com transporte sólido. Porém, como se referiu anteriormente, Kennedy (1984) constatou que a situação de desnível entre fundos confluentes é mais frequente do que a de situação de fundos concordantes, razão pela qual, Biron *et al.* (1996) sugeriram a revisão dos modelos da dinâmica dos escoamentos até então admitidos para confluências concordantes.

Segundo Best (1988), a deflexão mútua sofrida pelo escoamento e pelos sedimentos, conjugada com a presença de forte turbulência, causam segregação do material sólido ao chegar à confluência. Sendo o material sólido encaminhado por percursos laterais à cavidade de erosão, originam-se frentes de deposição que aceleram o processo erosivo da cavidade de erosão, ao criarem o desnível entre o leito dos canais e o talvegue da cavidade.

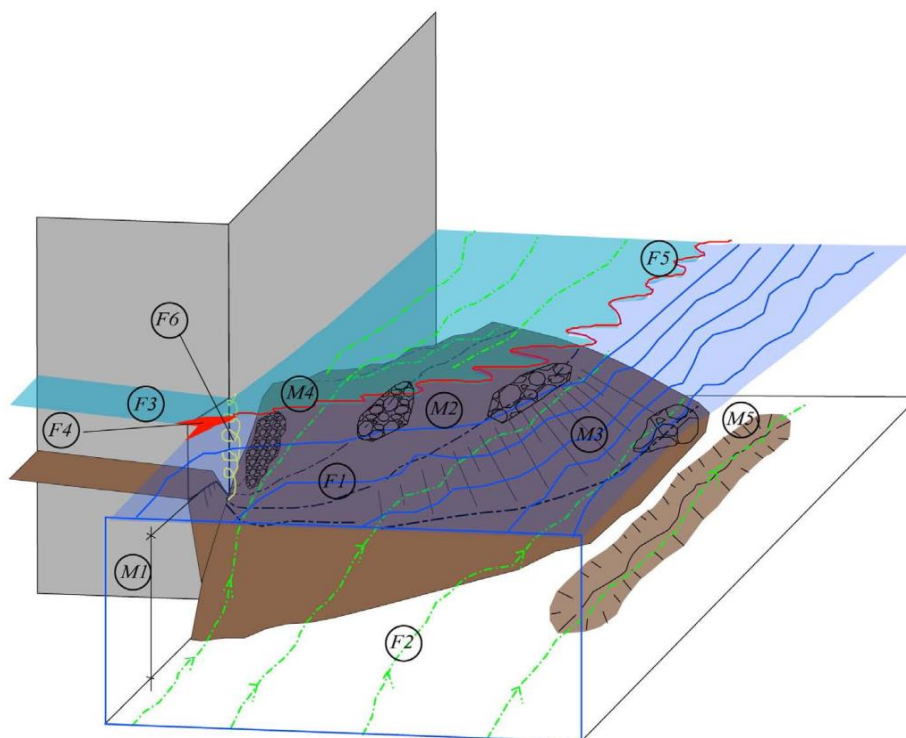
Best (1988) sugeriu que, para o aumento dos rácios de caudal líquido ou para o aumento do ângulo de junção, a penetração do escoamento afluente, assim como a deflexão dos escoamentos, aumentava. As consequências de tal ocorrência incidiam em cavidades de erosão mais profundas, barras de deposição mais compridas e o recuo (para montante) das frentes de deposição (no caso em que ocorre cavidade de erosão, haverá frente de deposição) na foz de cada canal confluyente (como se pode ver na Figura 2.3).

Best e Rhoads (2008) sugeriram um modelo revisto para a morfologia de confluências. Este modelo inclui cinco elementos principais:

- cavidade de erosão;
- frentes de deposição;
- barra de deposição lateral formada na zona de separação do escoamento;
- depósito de sedimentos junto ao canto de montante da confluência associado à zona de estagnação do escoamento;
- barra de deposição central (a meio do canal).

Os três primeiros elementos citados são idênticos aos apresentados por Best (1988). O depósito de sedimentos junto ao canto de montante foi citado muito sumariamente por Best (1988) enquanto a barra de deposição central é um elemento apenas detectado em confluências simétricas pelo que não se constitui como um elemento importante para a presente análise.

Na sequência dos estudos apresentados anteriormente, Leite Ribeiro (2012), propôs um novo modelo morfológico para confluências assimétricas, tendo, para tal, estudado o comportamento de um canal ao qual confluía um outro mais curto e com maior inclinação, alimentado a montante com material sólido constituído por uma mistura de sedimentos, enquanto o canal principal não era abastecido em sedimentos. O modelo morfológico assenta em cinco elementos característicos, ilustrados na Figura 2.4:



(M1)	Desnível entre fundos	(F1)	Escoamento superficial do canal principal
(M2)	Barra de deposição de sedimentos	(F2)	Escoamento junto ao fundo do canal principal
(M3)	Corredores de material grosseiro	(F3)	Escoamento afluente
(M4)	Corredores de material fino	(F4)	Zona de estagnação do escoamento
(M5)	Cavidade de erosão	(F5)	Camada de mistura
		(F6)	Vórtices que aspiram material fino no canto de jusante do canal afluente

Figura 2.4: Modelo hidro-morfo-sedimentar proposto por Leite Ribeiro (2012)

Os elementos característicos são os seguintes:

- a discordância, M1, entre fundos dos canais confluentes;
- a barra de deposição de sedimentos, M2, localizada ao longo da margem interior do canal principal, a jusante da confluência;
- o corredor de transporte de sedimentos grosseiros, M3;
- o corredor de transporte de sedimentos finos, M4, que se forma no topo da barra de deposição junto à margem interior;
- uma pequena cavidade de erosão junto à margem exterior, M5, que está associada a uma zona de velocidade máxima do escoamento

Segundo Leite Ribeiro (2012), o pronunciado desnível (M1) entre fundos na foz do afluente deve a sua existência à expressiva diferença entre alturas de escoamento no canal afluente e no canal principal. Esta discordância origina a formação de um escoamento em duas camadas na zona da confluência (F1, F2, F3). Observa-se uma projecção do escoamento afluente na parte superior da coluna de água que forma uma obstrução ao escoamento oriundo do canal principal e origina o seu

desvio para o extradorso do canal. O desnível entre fundos protege o escoamento proveniente do canal principal na parte inferior da coluna de água, permitindo que mantenha a direcção inicial sem sofrer deflexão significativa. Esta observação vai de encontro ao que foi referido por Biron *et al.* (1996) e que consistia na ausência de zona de separação (observada por Best, 1996) junto ao fundo do canal principal, a jusante da confluência.

Ao chegar à confluência, o escoamento junto ao fundo proveniente do canal principal encontra sedimentos de granulometria grosseira transportados pelo afluente e que constituem a camada superficial do talude inclinado da barra de deposição (M3). Este escoamento ascensional acelera ao mover-se sobre a face inclinada da barra. A força de arrastamento criada pelo escoamento ascensional equilibra a componente do peso dos sedimentos observando-se a respectiva segregação (a granulometria torna-se mais fina da base para o topo da barra) e incrementando o ângulo do talude relativamente ao ângulo de repouso.

De acordo com Leite Ribeiro (2012) também ocorre a camada de mistura nos termos do modelo de Best (1988). Aquele autor afirma, à semelhança dos precedentes, que se formam camadas de mistura ao longo da superfície de “colisão” entre os escoamentos afluente e principal. As camadas de mistura são caracterizadas por elevada turbulência e os respectivos limites exteriores coincidem, aproximadamente, com o sopé da barra de sedimentos (M2). No canto jusante da confluência, desenvolvem-se vórtices de eixo vertical (F6) que aspiram material fino em suspensão junto à margem interior do canal. Este material é depositado no topo da barra de deposição enquanto o material grosseiro é transportado ao longo do talude da barra de deposição, mormente junto ao sopé.

A presença de uma grande barra de deposição (M2) e a ausência de uma nítida cavidade de erosão (segundo Leite Ribeiro, 2012) junto à margem exterior (M5) são elementos típicos de confluências caracterizadas por uma provisão de sedimentos maioritariamente originada no canal afluente e por rácios entre caudais e quantidades de movimento relativamente baixos. Esta barra de deposição conduz à redução da área efectiva da secção transversal do canal, induzindo a aceleração do escoamento e aumentando a capacidade de transporte sólido de forma a garantir a transferência dos sedimentos do afluente para o canal de pós-confluência.

A formação de uma zona de estagnação (F4) no canto de montante da confluência causa uma distribuição assimétrica do escoamento líquido e sólido que leva a que a transferência de sedimentos do afluente para o canal principal seja feita junto ao canto de jusante da confluência.

Leite Ribeiro (2012) acrescenta que a capacidade de transporte sólido depende de três interações hidro-morfológicas. Em primeiro lugar, o desenvolvimento da barra de deposição, que causa a diminuição da altura local de escoamento na zona de separação de escoamentos, induz a aceleração do escoamento junto ao leito (resultando uma maior capacidade de transporte) e o seu desvio por influência da topografia e forma da referida barra. Em segundo lugar, o desnível topográfico entre os leitos principal e afluente gera um escoamento em duas camadas caracterizado por velocidades grandes na parte inferior da coluna de água junto ao fundo, advindo daí a elevada capacidade de

transporte. Estas velocidades altas junto ao leito previnem a formação de uma zona de recirculação (sugerida por Best, 1987) e de potencial deposição de sedimentos finos. Finalmente, Leite Ribeiro (2012) assinala a importância da turbulência (originada na camada de mistura) no transporte de sedimentos, referindo que a localização coincidente da camada de mistura e dos corredores de transporte de sedimentos grosseiros revela a contribuição que a actividade turbulenta tem na capacidade de transporte.

Finalmente, as zonas com maior intensidade da turbulência, designadamente a zona da camada de mistura (separação entre escoamentos), coincidente com a localização dos corredores preferenciais de transporte sólido, indicia a importante contribuição da turbulência no aumento local da capacidade de transporte.

O facto de Leite Ribeiro (2012) ter optado por não alimentar em sedimentos o canal principal levou a que Guillén-Ludeña (2014) explorasse o comportamento de uma confluência na qual ambos os cursos de água convergentes fossem alimentados em sedimentos.

Um outro aspecto importante consiste no facto de Mosley (1967) ter descrito a existência de movimentos helicoidais em confluências simétricas, fruto da convergência dos dois escoamentos que, ao encontrarem-se, mergulham criando um movimento helicoidal como mostra a Figura 2.5. A existência destes movimentos foi tema de debate científico, tendo sido confirmada a sua existência por Rhoads e Kenworthy (1998) e Fujita e Komura (1989) em trabalhos experimentais e em medições realizadas em rios. Weber (2001) sugere a existência de um movimento helicoidal, com base em trabalhos experimentais realizados num canal com fundo fixo, numa confluência de 90°. Leite Ribeiro (2011) sugere, por sua vez, a existência de quatro células helicoidais.

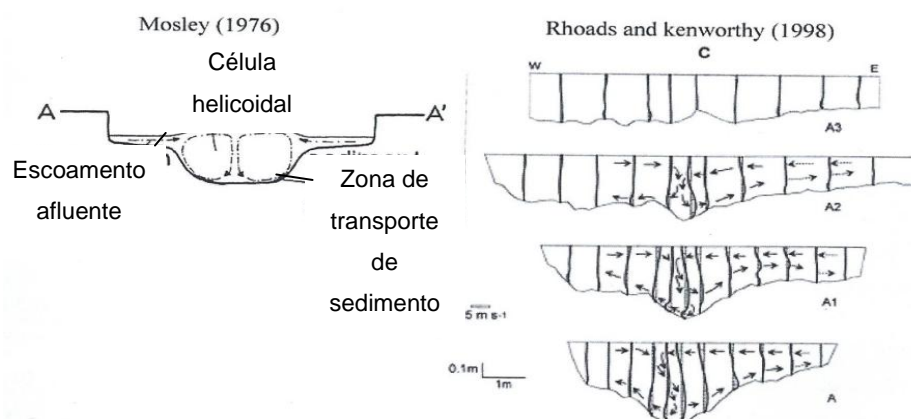


Figura 2.5: Modelo de células helicoidais descritas por Mosley (1976) e por Rhoads e Kenworthy (1998)

Na senda dos trabalhos realizados por Leite Ribeiro (2012), os estudos de Guillén-Ludeña (2014) incidiram no comportamento de confluências alargadas e não alargadas com ângulos de 90° e 70°, com alimentação nos dois canais, o que constitui a grande diferença para os ensaios de Leite Ribeiro (2012). O conceito de configuração de confluência alargada consiste no alargamento da largura de

um trecho final do canal afluente. Por configuração não-alargada entende-se a configuração da confluência em que o canal afluente não apresenta alargamento no respectivo trecho final.

Guillén-Ludeña (2014) reportou resultados semelhantes aos dos estudos anteriores no que se refere à morfologia da confluência, tendo identificado a barra de deposição a jusante da confluência, a discordância (ou desnível) entre fundos dos canais afluente e principal e a presença de uma cavidade de erosão a jusante da foz do canal afluente. Aquele autor refere ainda a presença de um ressalto hidráulico na foz do afluente devido à diferença entre regimes de escoamento (o escoamento afluente é rápido ($Fr > 1$) enquanto, no canal principal, é lento ($Fr < 1$) e a existência de um escoamento ascensional imediatamente a seguir ao canto de jusante da confluência.

As diferenças mais importantes entre os resultados de Guillén-Ludeña *et al.* (2015) e os de Leite Ribeiro (2012) assentam na presença de uma cavidade de erosão mais alargada e mais profunda junto à margem exterior do canal pós-confluência e de uma barra de deposição mais elevada e mais estreita do que nos trabalhos de Leite Ribeiro (2012). Este último autor afirma que praticamente não ocorre erosão (logo quase não há cavidade de erosão) na zona da confluência, e a cavidade de erosão não é referida nos trabalhos de Biron (1993).

Guillén-Ludeña (2014) justificou a presença de uma cavidade de erosão importante com o aumento dos caudais relativamente aos estudos precedentes, o que terá provocado uma maior aceleração do escoamento e conseqüentemente, a ocorrência de uma erosão mais marcada.

Nos trabalhos de Guillén-Ludeña (2014), o efeito de encouraçamento não existe ou é menos acentuado, o que, segundo este autor, se deve à existência de transporte sólido nos dois canais. Neste caso, os sedimentos finos deslocam-se continuamente no canal conjuntamente com os mais grosseiros. Nos ensaios de Leite Ribeiro (2012), o escoamento não tinha capacidade para transportar os sedimentos grosseiros, só transportava os mais finos e desenvolvia-se uma couraça em várias zonas do canal. Segundo Guillén-Ludeña *et al.* (2015), a presença de sedimentos finos no substracto sedimentar reduz a tensão crítica de arrastamento, facilitando por isso a mobilidade dos sedimentos mais grosseiros e dificultando, desta maneira, a formação da couraça.

2.4 Efeito do alargamento da foz do afluente na morfodinâmica de confluências

O alargamento da foz de um afluente provoca alterações na dinâmica desta zona que eram desconhecidas até ao estudo de Leite Ribeiro (2012). Nos seus trabalhos, este autor descreve em pormenor os fenómenos associados a confluências alargadas.

Leite Ribeiro (2012) comparou o comportamento de confluências alargadas com o de confluências não alargadas, tomadas como referência para essa comparação; afirma que as principais características morfológicas de uma confluência alargada são semelhantes às de uma confluência não alargada sendo elas (i) a existência de um desnível acentuado entre fundos do canal principal e do afluente (ii) a presença de uma barra de deposição a jusante da confluência, na margem interior do canal pós-confluência (iii) a formação de uma pequena cavidade de erosão junto à margem

exterior do canal pós-confluência. Ainda assim, o alargamento local do afluente provoca mudanças morfológicas sistemáticas nos canais afluente e principal e na pós-confluência.

Leite Ribeiro (2012) concluiu que, nas confluências alargadas, ocorre o aumento generalizado da cota do fundo do canal afluente, o qual leva à formação de duas zonas secas laterais e de uma zona de estagnação do escoamento. Observou ainda um aumento da cota da barra de deposição no canal pós-confluência. A confluência alargada é caracterizada por elevada variabilidade de profundidades de água e pela translação do talvegue do centro do afluente para a margem de jusante do alargamento.

Acresce a estas observações que a área da secção transversal do escoamento no afluente alargado não é significativamente maior do que na confluência de referência, em face da redução da altura do escoamento no canal afluente, o que, segundo o autor, induz um aumento das velocidades do canal afluente e o respectivo aumento na quantidade de movimento transversal incidente sobre o canal principal. Estes dois últimos factores são a razão de um aumento dos processos dinâmicos em toda a zona da confluência expondo a margem exterior a uma maior influência por parte do escoamento afluente (podendo ser prevista maior erosão nessa zona). Leite Ribeiro (2012) afirma ainda que estas constatações são confirmadas pelo aumento da altura do desnível entre fundos e da maior penetração do escoamento afluente sobre o do canal principal.

Leite Ribeiro (2012) refere também que o acréscimo de deposição junto à margem interior do canal pós-confluência é compensado por um aumento da erosão junto à margem exterior do canal.

Uma das razões para se observar a translação do talvegue para a margem de jusante do canal afluente alargado consiste no facto de, ao chegar ao alargamento, o escoamento afluente se expandir, perdendo potência. Em face do reduzido comprimento do alargamento, o escoamento do canal principal passa a exercer influência dentro do alargamento (a montante da foz do afluente), obrigando a que a expansão lateral do escoamento afluente não ocorra de forma simétrica e se mova para a margem de jusante da confluência. Desta forma, o escoamento só se volta a juntar à margem do alargamento na margem de jusante (interior) do alargamento.

Em relação às zonas secas e às zonas de estagnação do escoamento, Leite Ribeiro (2012) refere que a separação do escoamento das margens do alargamento provoca a criação de zonas de recirculação nos cantos exteriores de montante do alargamento. Estas zonas são alimentadas por sedimentos finos provenientes exclusivamente do afluente, tendendo a fixar-se aí e a enchê-las até à superfície da água.

Nas configurações alargadas, tanto para 70° como para 90°, Guillén-Ludeña (2014) confirmou um aumento da altura do desnível entre os fundos do canal afluente e do canal principal e um maior avanço da frente de deposição do canal afluente no canal principal, à semelhança do que referiu Leite Ribeiro (2012). Na zona alargada, Guillén-Ludeña *et al.* (2015) identificou duas zonas de estagnação (zonas de sedimentos finos), na parte de montante do alargamento, junto às margens laterais, que confinam o escoamento afluente ao centro do alargamento (onde se encontram os sedimentos de

granulometria mais grosseira) e levam a um aumento das velocidades do escoamento e da quantidade de movimento no afluente.

Deste modo, o alargamento da confluência proporciona heterogeneidade do substrato sedimentar, das velocidades do escoamento e das alturas de escoamento, deixando prever que seja um instrumento de promoção de *habitats* para fauna e flora ripária e aquática. Para além do mais, uma intervenção localizada deste género permite melhorar a conectividade lateral do afluente com a rede fluvial e daí podem surgir benefícios ecológicos.

Um aspecto importante deste tipo de intervenção prende-se com o a inexistência de efeitos nefastos no que se refere à protecção contra as cheias (nota-se um decréscimo generalizado, embora pouco significativo da altura do escoamento no afluente, no canal principal e no canal pós-confluência).

3. Instalação, equipamento de medição e procedimento experimental

3.1 Considerações gerais

Como se referiu no parágrafo 1.2, a presente dissertação explora os resultados de dois ensaios completos de caracterização da morfologia de confluências com fundo móvel, tendo em vista contribuir para uma melhor identificação das diferenças morfológicas induzidas pelo alargamento do canal afluente junto à foz. O alargamento é caracterizado pelo aumento da largura do canal afluente no seu trecho terminal (a largura perpendicular ao eixo do canal passa de 0,15 metros para 0,45 metros).

Neste estudo, caracterizam-se estados de equilíbrio dinâmico, razão pela qual foram adoptados caudais líquidos e caudais sólidos constantes na alimentação. Foi imposto um rácio de caudais líquidos igual a 0,11. A escolha deste valor deriva do facto de anteriores autores terem utilizado o mesmo valor (Leite Ribeiro, 2012 e Guillén-Ludeña *et al.*, 2015) para os respectivos trabalhos, permitindo, deste modo, estabelecer um termo de comparação que viabiliza a ilustração das diferenças e semelhanças entre os presentes resultados e os dos autores supracitados.

Por outro lado, nestes ensaios, o canal principal apresenta uma largura dupla da dos canais de Leite Ribeiro (2012) e Guillén-Ludeña *et al.* (2015), o que pode originar uma influência importante na morfodinâmica da confluência e, eventualmente, uma maior diversidade morfológica no sistema.

3.2 Parâmetros e variáveis de controlo dos ensaios

Os caudais líquidos utilizados no presente estudo foram 48,8 l/s no canal principal a montante da confluência e 5,6 l/s no canal afluente, respeitando o rácio de $Q_r = 0,11$.

Assim como se impôs o mesmo rácio de caudais líquidos, também os valores dos caudais sólidos foram escolhidos de acordo com Guillén-Ludeña (2015), que os obteve pela aplicação da fórmula de transporte sólido de Smart e Jaeggi (1983):

$$Q_b = B_F \times \rho_s \times \frac{4}{s-1} \times R_s \times U \times S^{0.6} \times \left(S - \frac{d_m}{12.1 \times R_s} \right) \times \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} \quad (1)$$

em que Q_b é o caudal sólido transportado (m^3/s), B_F é a largura do canal (m), ρ_s é a massa volúmica dos sedimentos ($2610 \text{ kg}/m^3$), s é a respectiva densidade (ρ_s/ρ), R_s é o raio hidráulico (m), U é a velocidade média do escoamento, S é o declive médio do leito do canal e d_m , d_{30} e d_{90} são diâmetros característicos dos grãos obtidos a partir da curva granulométrica da areia. Neste contexto, convém ter presente que d_x é o diâmetro de peneiração para o qual $x\%$ dos sedimentos em peso são mais finos. Foram arbitrados, a priori, os valores de 1% para o declive (sob condições de equilíbrio) do canal afluente e de 0,3% para o declive do canal principal.

A altura uniforme do escoamento foi calculada recorrendo à fórmula de Manning-Strickler:

$$Q = K \times A \times R_S^{2/3} \times S^{1/2} \quad (2)$$

em que Q é o caudal líquido (m^3/s), K é o coeficiente de rugosidade ($m^{1/3}/s$) dado por

$$K = \frac{26}{d_{90}^{1/6}}, \quad (3)$$

A é a área da secção transversal do escoamento (m^2), R_S é o respectivo raio hidráulico (m), S é o declive do canal e d_{90} é um diâmetro característico dos sedimentos do fundo (areia).

Nos ensaios que enformam a presente dissertação, utilizou-se uma areia caracterizada por $D_{50} = 0,86 \text{ mm}$ e $\sigma = 1,36$ com o intuito de se identificarem as diferenças morfológicas na confluência relativamente à caracterizada por Guillén-Ludeña *et al.* (2015). Este autor utilizou uma mistura granulométrica caracterizada por $D_{50} = 0,8 \text{ mm}$ e $\sigma = 4,15$ no canal afluente e outra definida por $D_{50} = 0,8 \text{ mm}$ e $\sigma = 3,15$ no canal principal. Ou seja, a distribuição granulométrica de Guillén-Ludeña *et al.* (2015) é muito mais extensa. As propriedades físicas da areia utilizada neste estudo encontram-se resumidas na tabela 3.1, onde constam também os valores da massa volúmica, ρ_s , os vários diâmetros característicos, d_x , e o coeficiente de graduação, σ .

Tabela 3.1: Principais propriedades físicas da areia utilizada.

Canal	ρ_s [kg/m^3]	d_{30} [mm]	d_{50} [mm]	$d_m(d_{65})$ [mm]	d_{90} [mm]	σ [-]
Afluente/Principal	2610	0,65	0,86	1,02	1,07	1,36

Os valores dos diferentes diâmetros característicos foram determinados a partir da curva granulométrica da areia utilizada (Figura 3.1) e o coeficiente de graduação da areia foi determinado recorrendo à fórmula:

$$\sigma = 0,5 \times (d_{84}/d_{50} + d_{50}/d_{16}) \quad (4)$$

Tendo presente o valor de d_{90} , calculou-se o valor de K pela equação (3) e a altura uniforme do escoamento a jusante da confluência pela equação (2), resultando o valor de 0,10 m para $Q = 54,4 \text{ l/s}$.

Os valores de caudal sólido obtidos com a equação (1) por Guillén-Ludeña *et al.* (2015) foram 0.3 kg/min para o canal principal e 0.5 kg/min para o canal afluente, para um canal principal com 0,5 metros de largura e $Q = 24,4 \text{ l/s}$. Uma vez que, no presente trabalho, a largura do canal era 1,00 m (o que perfaz o dobro da largura do canal em que Guillén-Ludeña trabalhou anteriormente), a alimentação em sedimentos teve de corresponder a essa alteração. O caudal sólido no canal principal era 0.6 kg/min, garantindo, desse modo, que se mantinham os mesmos caudais sólidos e líquido por

unidade de largura do canal principal. Deste modo, colocavam-se 54 kg de areia no tapete de sedimentos do canal principal a cada 1:30 h e 40 kg de areia na correia transportadora do canal afluyente a cada 1:20 h.

Na Figura 3.1, apresenta-se a curva granulométrica da areia utilizada nos ensaios.

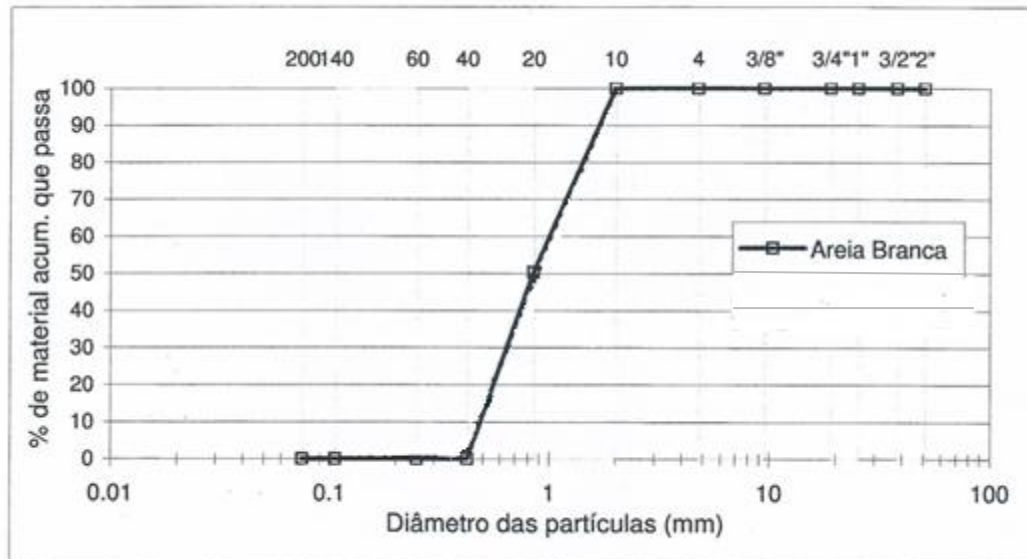


Figura 3.1: Curva granulométrica da areia utilizada nos ensaios.

De referir ainda que o ângulo de junção da confluência estudada, α , era igual a 70° , por sua vez, igual a um dos ângulos caracterizados por Guillén-Ludeña *et al.* (2015). Em resumo, os valores das principais variáveis de controlo dos ensaios eram os seguintes:

$$Q_m = 48,8 \text{ l/s}; Q_t = 5,6 \text{ l/s}; Q_r = 0,11; B_m = 1 \text{ m}; D_{50} = 0,86 \text{ mm}; \sigma = 1,36;$$

$$Q_{sm} = 0,6 \text{ kg/min}; Q_{st} = 0,5 \text{ kg/min}; h = 0,10 \text{ m};$$

em que B_m representa a largura do canal principal, Q_{sm} representa o caudal sólido no canal principal pré-confluência, Q_{st} representa o caudal sólido no canal afluyente e h representa a altura do escoamento na secção de jusante do canal principal.

Durante os ensaios, procedeu-se à monitorização das seguintes variáveis:

- caudais líquidos do caudal do canal principal (Q_m) e do caudal do canal afluyente (Q_t);
- caudais sólidos do canal principal (Q_{sm}) e do canal afluyente (Q_{st});
- níveis da superfície livre dos canais principal e afluyente;
- topografia do fundo do leito do canal principal e canal afluyente.

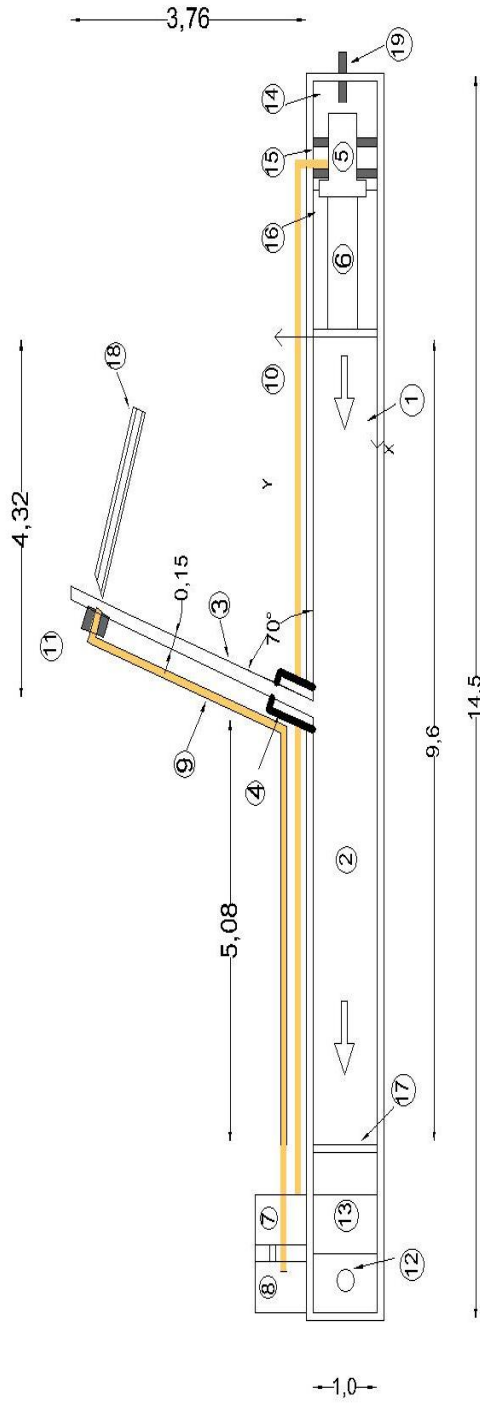
Apresenta-se a seguir a descrição da instalação experimental e dos equipamentos de medição utilizados.

3.3 Canais e circuitos de alimentação de caudais líquido e sólido

Os ensaios que constituem a base da presente dissertação, diferem entre si, como foi anteriormente mencionado, na configuração da confluência, residindo essa diferença no facto de se ter procedido ao alargamento do canal afluente no segundo ensaio, na largura do canal principal que era dupla da utilizada nos ensaios de Leite Ribeiro (2012) e de Guillén-Ludeña *et al.*(2015) e ainda num diferente valor do coeficiente de graduação dos sedimentos.

O canal principal é um canal rectangular com 15,0 m de comprimento (sendo o comprimento do fundo móvel igual a 9,6 metros), 1,0 m de largura e 0,5 m de altura, construído em betão armado, apoiado em pilares. O canal afluente é um canal construído em PVC com 4 m de comprimento e 0,15 m de largura que conflui com o canal principal 4,3 m a jusante da respectiva extremidade de montante da caixa de sedimentos (fundo móvel). O ângulo de junção dos dois canais é, como referido anteriormente, 70° (Figuras 3.2 e 3.3).

O canal principal inclui um reservatório de montante (Figura 3.4 a), onde dá entrada a tubagem do circuito de alimentação de caudal líquido, seguindo-se três grelhas entre as quais foi colocado seixo rolado. Este sistema de grelhas (Figura 3.4 b) destrói os vórtices que se formam no reservatório de entrada associados ao jacto proveniente da conduta de alimentação do canal, contribuindo para a repartição uniforme do escoamento na secção transversal do canal. A este sistema de grelhas, segue-se uma rampa em PVC (Figura 3.4 c), coberta por seixo rolado que tem em vista facilitar o desenvolvimento da camada limite. A extremidade de jusante da rampa, com 0,18 m de altura, corresponde à secção de montante da caixa de sedimentos (fundo móvel).



- Legenda:
- [1] Canal principal.
 - [2] Caixa de sedimentos.
 - [3] Canal afluente.
 - [4] Alargamento do canal afluente.
 - [5] Descarregador Bazin em T.
 - [6] Tela transportadora de sedimentos do canal principal.
 - [7] Primeiro reservatório de jusante.
 - [8] Segundo reservatório de jusante.
 - [9] Circuito de alimentação de caudal líquido do canal afluente.
 - [10] Circuito de alimentação de caudal sólido.
 - [11] Descarregador Bazin do canal afluente
 - [12] Orifício de descarga e de alimentação de 8.
 - [13] Tremonha de captação de sedimentos.
 - [14] Reservatório de montante.
 - [15] Sistema de grelhas estabilizador do escoamento.
 - [16] Rampa em PVC.
 - [17] Bloco de betão de jusante.
 - [18] Tela de alimentação de sedimentos ao canal afluente.
 - [19] Conduto de alimentação em líquido ao canal principal .

Figura 2.3: Planta dos canais

A Figura 3.3 oferece uma visão geral da instalação laboratorial, sendo possível identificar os canais confluentes, os sistemas de alimentação em caudal sólido e caudal líquido do canal afluente e vários dispositivos de medição.



Figura 3.3: Aspecto geral da instalação laboratorial.

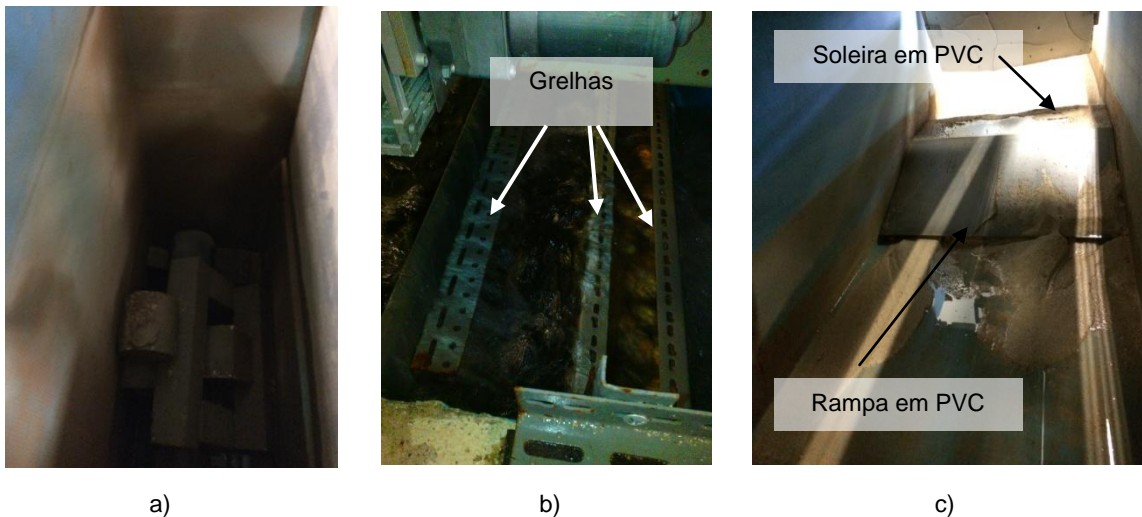


Figura 3.4: a) Reservatório de montante; b) imagem de pormenor do sistema de grelhas estabilizador do escoamento; c) imagem de pormenor (vista de montante) da rampa de PVC que delimita a secção de montante da caixa de sedimentos.

O fundo móvel, constituído pela areia já caracterizada, era igualmente limitado a jusante por uma soleira de betão com 0,15 m de altura, criando uma “caixa de sedimentos” entre a rampa de PVC e a

soleira de betão a jusante (Figura 3.5 a). A necessidade de os sedimentos se encontrarem encaixados deve-se ao facto de serem facilmente arrastados no início e no fim dos ensaios, impedindo o levantamento rigoroso da morfologia final e colmatando os circuitos hidráulicos e dos sedimentos. Convém ainda referir que a caixa de sedimentos garante um declive inicial de 0,3 % ao longo do canal principal, facilitando o estabelecimento do declive de equilíbrio do fundo do canal.

Por cima do reservatório de montante, foi instalado um tapete rolante (Figura 3.3, 3.5 b), movido por um motor, onde se colocava a areia que alimentava o canal principal. Esta caía do tapete e era encaminhada por uma rampa de madeira (Figura 3.3, 3.5 b,c) inclinada a 45° na direcção de jusante do canal, complementada com dois septos que garantiam uma repartição razoavelmente uniforme do caudal sólido em toda a largura do canal. Junto do tapete rolante existia um descarregador de Bazin em forma de “T”, onde os sedimentos provenientes de jusante, através de um circuito de recirculação, eram depositados o que permitia a pesagem dos mesmos e, conseqüentemente, o controlo do ensaio.

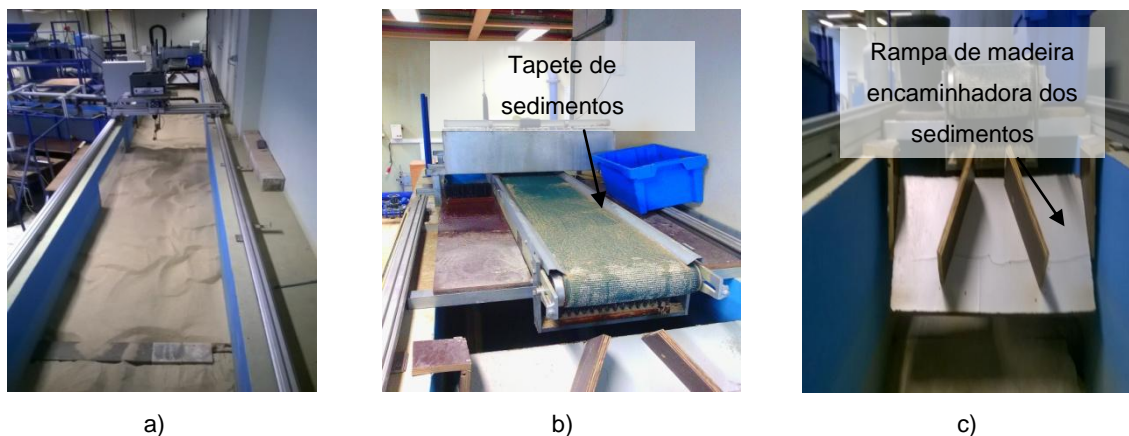


Figura 3.5: a) imagem de pormenor do bloco de betão que forma a secção de jusante da caixa de sedimentos; b) visão global da parte de montante do canal principal com o descarregador Bazin em T e tapete rolante; c) tapete rolante e rampa de madeira.

Na parte de jusante do canal principal encontram-se vários elementos importantes de regulação dos caudais líquidos e caudais sólidos. À “caixa de sedimentos” segue-se uma tremonha embutida no fundo do canal (Figura 3.6 a), inclinada para um dos seus lados. Esta tremonha funciona como “ratoeira” de sedimentos, dirigindo-os para um orifício, regulado por uma válvula, que descarrega o material sólido para um pequeno reservatório lateral, a que se chama “primeiro reservatório de jusante” (Figura 3.6 b). A jusante da tremonha, existe uma plataforma horizontal ao nível do fundo da caixa de sedimentos na qual existe um orifício (Figura 3.2, 3.6 a, c) regulado por outra válvula e por onde se escoia parte do caudal líquido para um reservatório adjacente ao primeiro reservatório de jusante (denominado “segundo reservatório de jusante”). Para que os sedimentos não penetrassem no segundo reservatório, foram colocados blocos de betão com 0,15 m de lado à entrada da plataforma (Figura 3.6 a). Esta medida de prevenção visa uma melhor contenção dos sedimentos transportados para o interior da tremonha de modo a evitar perdas de areia do sistema, o que

afectaria a avaliação do respectivo equilíbrio. Ao orifício segue-se a comporta de jusante (Figura 3.6 a, c), manobrada através de um manivela, que permite regular a altura do escoamento no canal principal (Figura 3.6 a, c).

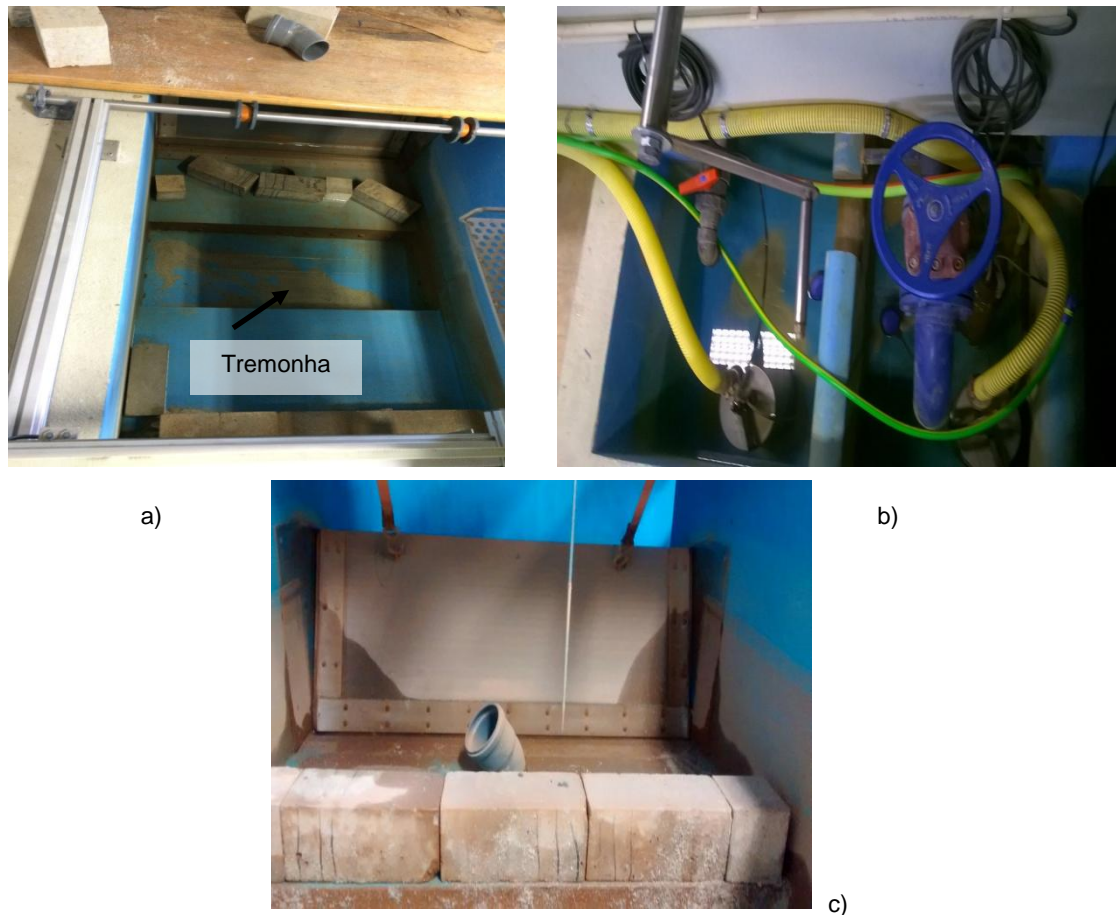


Figura 3.6: a) tremonha de captação de sedimentos, blocos de betão; b) primeiro e segundo reservatórios de jusante (esquerda e direita na imagem, respectivamente); c) comporta de jusante e orifício.

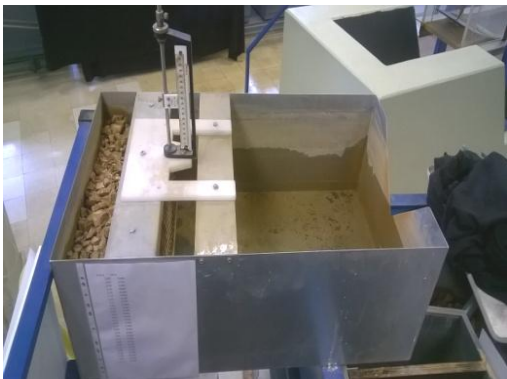
A tremonha de captação dos sedimentos transportados, assim como o primeiro reservatório de jusante, fazem parte do circuito de recirculação de caudal sólido. A Figura 3.6 b ilustra a existência de bombas submersíveis acopladas a tubagens amarelas. A bomba que se encontra no reservatório da esquerda (primeiro reservatório de jusante), movimenta água e areia, entre o reservatório e o descarregador Bazin em forma de “T” (Figura 3.7 a,b). O caudal da mistura era 4 l/s. A bomba que se encontra no segundo reservatório de jusante movimentava 5,6 l/s de água limpa para o Bazin que se encontra na secção de montante do canal afluente (Figura 3.7 c). Estes caudais são regulados recorrendo a válvulas (válvulas vermelhas acopladas às tubagens amarelas que se podem identificar na Figura 3.7 d). Os hidrómetros de ponta direita instalados nos descarregadores Bazin (Figura 3.7 a,b,c) permitem medir a altura do escoamento sobre os respectivos vértices triangulares e, desse modo, verificar se os caudais são os pretendidos e regulá-los pelo ajuste das válvulas, se necessário.



a)



b)



c)



d)

Figura 3.7: a) descarregador Bazin em T (visto de montante); b) descarregador Bazin em T (visto de jusante); c) descarregador Bazin instalado na parte de montante do canal afluente; d) tubagens dos circuitos de recirculação de água e sedimentos.

O canal afluente é alimentado em água pelo descarregador Bazin (Figura 3.7 c) e em sedimentos por uma tela transportadora de sedimentos. Esta tela tem 5,0 m de comprimento e 0,3 m de largura (Figura 3.8 a,b) e desloca-se com uma velocidade controlada por um regulador de velocidade (Figura 3.8 c). Para evitar que os sedimentos se aglomerem na rampa descendente de alimentação do canal afluente (Figura 3.8 b), fornece-se um caudal líquido muito pequeno, o qual garante o escorregamento regular da areia para a secção de montante do canal afluente.

O canal principal é alimentado em água pelo circuito geral de abastecimento do laboratório. Impôs-se o caudal de 44,8 l/s a que se soma o caudal proveniente do descarregador de Bazin em forma de “T” (aproximadamente 4 l/s) perfazendo o caudal líquido total de 48,8 l/s.

A configuração alargada da foz do afluente apresentava apenas uma diferença geométrica em relação à confluência descrita. A largura do canal (perpendicularmente ao eixo longitudinal do mesmo) passou de 0,15 m para 0,45 m. Tudo o resto, incluindo o ângulo da confluência, os caudais líquidos, os caudais sólidos e o material sólido fornecido ao sistema permaneceram inalterados.



a)



b)



c)

Figura 3.8: a) tela de alimentação de sedimentos do canal afluente; b) tela de alimentação de sedimentos do canal afluente e rampa descendente; c) regulador de velocidade da tela de alimentação de sedimentos.

Descritos os canais e os circuitos de alimentação de caudais líquidos e sólidos, passam a descrever-se os equipamentos de medição.

3.4 Equipamento de medição, de posicionamento de sondas e de controlo e aquisição

Nos ensaios realizados, procedeu-se à medição da topografia do fundo, dos níveis da superfície livre da água e dos caudais líquidos e sólidos.

As medições de níveis do fundo e da superfície livre no canal principal foram efectuadas através de sondas instaladas num carro que se desloca sobre carris (Figura 3.3, Figura 3.9 a), apoiados nas paredes verticais do canal. Os motores deste carro fazem parte integrante do carro (peças azuis presentes na Figura 3.9 a); os dispositivos de medição foram montados no braço metálico (Figura 3.9 c) do carro, ligados a um dispositivo de aquisição de dados (Figura 3.9 d). Este braço permite colocar as sondas em qualquer ponto no interior do canal, uma vez que se desloca nas três direcções do espaço (X,Y,Z).

As medições no canal afluente efectuavam-se através de sondas acopladas a um braço metálico amovível (Figura 3.10 a, b). Este último apoia-se num suporte móvel que se desloca ao longo de um carril instalado sobre o canal afluente (Figura 3.10 b, c). O deslocamento do suporte móvel (movimento em X) é garantido por um motor acoplado ao referido eixo metálico na extremidade de montante do canal afluente (Figura 3.10 a, c). O eixo metálico pode ser deslocado transversalmente com o auxílio de um sistema de eixos e cremalheiras actuável por um volante (movimento em Y). O suporte móvel pode ser ajustado verticalmente, o que confere ao conjunto mobilidade segundo Z.

Refira-se que os carros dos equipamentos de medição são controlados através do software ConFlume, concebido no IST, expressamente para o efeito. Entre outras funcionalidades, o carro do canal principal permite estabelecer o espaçamento entre perfis longitudinais a levantar.



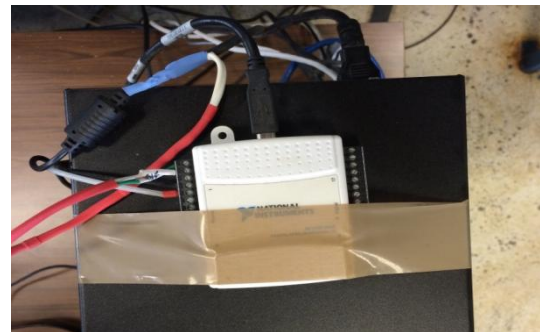
a)



b)



c)



d)

Figura 3.9: a) pormenor do carro de suporte com interruptores de emergência; b) dispositivo de aquisição dos sinais ultrassónicos referentes à topografia; c) braço metálico onde estão instalados os dispositivos de medição; d) multímetro de processamento dos sinais ultrassónicos do nível de água.

Para cada série de medições da topografia, foram levantados vinte e dois perfis longitudinais no canal principal, espaçados lateralmente 0,04 m (com uma resolução espacial de $\Delta x = 0,01$ m). No canal afluente foi registado um perfil ao longo do eixo; foram igualmente levantados nove (9) perfis na zona alargada junto à foz no caso em que tal se aplica. Estas medições (com precisão aproximada de 1 mm) foram realizadas por uma sonda Mini-Echo-Sounder (modelo UltraLab UWS da marca General Acoustics, Figuras 3.9 b e 3.11 a,b).

O Mini-Echo-Sounder é um dispositivo intrusivo, pois só funciona parcialmente submerso (Figura 3.11 a e 3.11 b). A membrana do sensor vibra com frequência definida para 1 MHz. Essa vibração emite ondas ultrassónicas que, ao incidirem numa superfície diferente (areia neste caso), são reflectidas e recebidas pelo sensor. O dispositivo (Figura 3.9 a, b) mede o tempo de viagem da onda reflectida. A distância entre o sensor e o alvo (areia) é calculada pois conhece-se o tempo de percurso e a velocidade de propagação da onda.

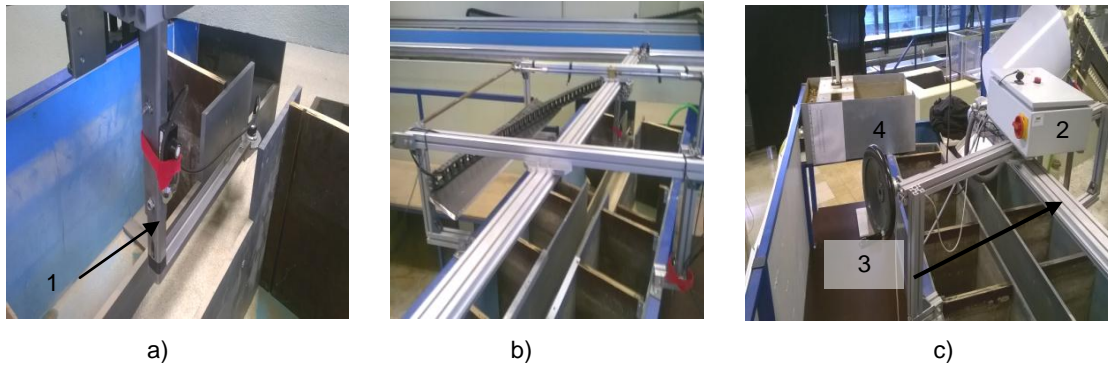


Figura 3.10: a) imagem de pormenor do braço metálico amovível (n^o 1); b) pormenor da parte de jusante do canal afluente em que se observa o eixo metálico de suporte (carril); c) pormenor da parte de montante do canal afluente em que constam o motor de alimentação (n^o2), o eixo metálico de suporte (n^o3) e o descarregador Bazin (n^o4).

Este sinal sonoro é transformado em sinal eléctrico (voltage correspondente à distância) graças a cristais piezoeléctricos que se encontram na membrana do sensor (e permitem fazer essa conversão), e são transmitidos ao programa Conflume por cabo através de uma tomada BNC.

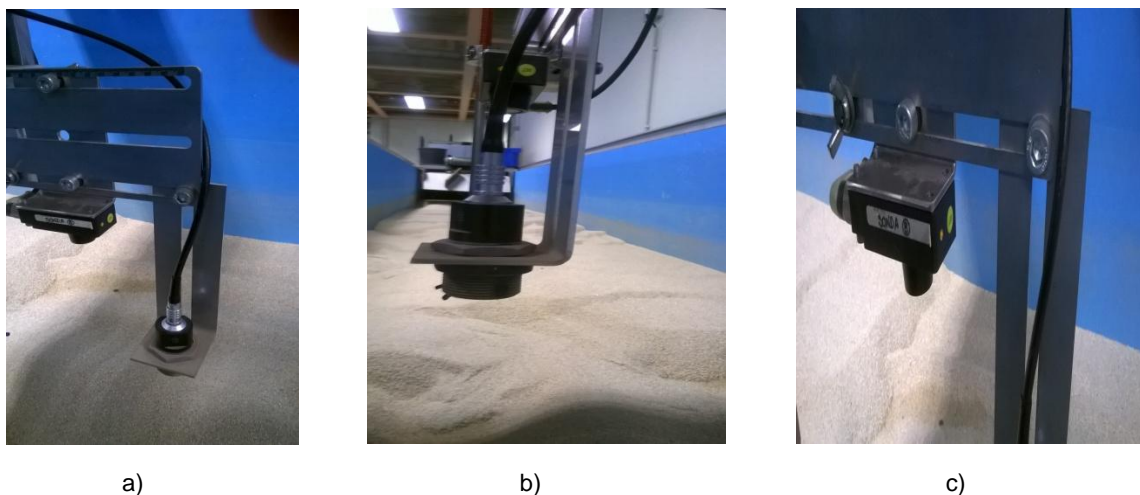


Figura 3.11: a) braço metálico acoplado ao carro no qual estão montados o limnómetro e a sonda Mini-Echo-Sounder; b) Mini-Echo-Sounder; c) limnómetro ultrassónico.

O sinal foi calibrado tomando por referência a altura do bloco de betão que marca a secção final do leito móvel do canal. Para o canal afluente, a calibração foi efectuada tomando por referência o leito fixo do canal (ou seja, retirou-se a areia até se encontrar o leito fixo do canal em PVC). Tal calibração permite relacionar os valores medidos pelas sondas com a topografia do fundo.

Os níveis da superfície livre foram medidos após uma, sete e dez horas de ensaio e no equilíbrio do sistema (12 h). Durante cada ensaio, levantaram-se quatro vezes os níveis da superfície livre. De cada vez, registaram-se vinte e dois perfis longitudinais, um perfil segundo o eixo do afluente na configuração de referência e nove perfis na configuração com alargamento. Para o efeito utilizaram-

se dois limnímetros ultrassónicos (Figura 3.11 b,c) com precisão aproximada de 1 mm (modelo UNDK 30U6103/S14 da marca Baumer).

Tal como os Mini-Echo-Sounders, os limnímetros, possuem membranas que vibram com uma dada frequência. Essa vibração, que transmite um impulso ultrassonoro, é emitido e atravessa o ar até incidir na superfície da água, é reflectido e posteriormente detectado pelo sensor. O tempo de viagem é medido pelo dispositivo, e a distância entre o sensor e o nível da água é obtida conhecendo-se a velocidade de propagação do sinal ultrassonoro e o tempo de percurso. Este sinal é transmitido ao programa Conflume através de um multímetro digital (caixa branca da marca National Instruments, Figura 3.9.d) que o traduz em sinal digital. O limnómetro distava, longitudinalmente (segundo o eixo X), 0,185 m do Mini-Echo-Sounder.

Os caudais líquidos associados aos dois descarregadores Bazin calcularam-se pelas respectivas leis de vazão previamente estabelecidas com o apoio de um medidor de caudais electromagnético (precisão de 0,5 % do fim de escala).

O caudal líquido que abastece o canal principal através do tanque de montante é medido pelo medidor electromagnético (Endress + Hauser, modelo IP67/ NEMA/ Type 4X), instalado na conduta de abastecimento do laboratório com uma precisão de 0,001 l/s.

O ritmo de alimentação de caudal sólido ao sistema, tanto na tela de alimentação do afluente como na de alimentação do canal, foi aferido pelo método volumétrico complementado com pesagem.

O caudal sólido que saía da tremonha de recolha de sedimentos, entendido como o caudal sólido que circula no canal principal a jusante da confluência, era quase instantaneamente transferido para o Bazin em T colocado sobre o reservatório de montante do canal pelo sistema de bombagem já referido. A areia decantava no interior do Bazin. Daí era regularmente retirada, colocada num balde e pesada num potenciómetro suspenso do tecto do laboratório (Figura 3.12 a, b). A pesagem permitiu estabelecer o caudal sólido em circulação nos canais.



a)



b)

Figura 3.12: a) potenciómetro suspenso pelo cabo de aço; b) imagem de pormenor do potenciómetro.

Descritos os equipamentos de medição, passa-se a descrever o procedimento experimental dos ensaios.

3.5 Procedimento experimental

Convirá nesta fase relembrar que o valor do caudal líquido do canal principal a montante da confluência foi 48,8 l/s e que o do canal afluente foi 5,6 l/s. O caudal sólido do canal principal era 0,6 kg/min enquanto o caudal sólido do canal afluente era 0,5 kg/min.

O procedimento experimental para os dois ensaios foi idêntico. Começou-se por preparar o leito do canal principal com o auxílio de um cabo esticado entre as soleiras de entrada (na secção montante do canal) e os blocos de betão de jusante (na secção de jusante do canal), impondo o declive aproximado do canal (0.3 %). Para acelerar o desenvolvimento da morfologia de equilíbrio, impôs-se um degrau com 0,03 m (Figura 3.13 a) na embocadura do canal afluente com o canal principal. Impôs-se finalmente um declive de 1% (aproximado) no canal afluente. Segundo Leite Ribeiro (2012) e Guillén-Ludeña *et al.*(2015), a morfologia inicial do leito não afecta a topografia final pois o declive inicial e o degrau inicial são menores do que os de equilíbrio.

Uma vez preparados os fundos dos canais, enchiam-se lentamente os canais com água (Figura 3.13 b), com um caudal entre 3 l/s e 5l/s, tendo as topografias de ambos os canais sido levantadas antes do início de cada ensaio ($t = 0$ h), com os canais cheios. No decurso do ensaio, realizaram-se outras medições da topografia após uma hora de ensaio ($t = 1$ h), após quatro horas ($t = 4$ h) para o ensaio de referência, após sete horas ($t = 7$ h), após dez horas ($t = 10$ h) para o ensaio com alargamento, e quando o sistema atingia o equilíbrio, o que aconteceu após doze horas de teste ($t = 12$ h). A medição da topografia obrigava sempre à interrupção do ensaio, uma vez que o dispositivo de medição (sensor do Mini-Echo-sounder) tinha de ser submergido por aumento do nível de água.



Figura 3.13: a) confluência entre canais em que se observa a presença do degrau; b) canal principal durante a fase de enchimento do canal.

Uma vez tomadas as topografias iniciais dos canais, ajustava-se o nível de água para a altura de 0,10 m sobre o bloco de betão na secção de jusante da caixa de sedimentos. Para tal, começava por se aumentar o caudal para os valores pretendidos (no caso do canal principal, o leitor indicava o caudal enquanto no canal afluente, era preciso regular o nível de água no descarregador de Bazin até que correspondesse ao nível indicado pelo hidrómetro de ponta direita). A seguir a este passo, baixava-se a comporta de jusante lentamente até que o nível de água no extremo de jusante da caixa de

sedimentos (na secção do bloco de betão) atingisse o valor pretendido de 0.10 m. Uma vez estabelecida a altura de água, ligavam-se as telas de alimentação de sedimentos e o teste iniciava-se.

Esperava-se uma hora e procedia-se à paragem do ensaio para medição da topografia, o que implicava subir a comporta de jusante, de modo a fazer subir o nível de água, e reduzir o caudal bombado de modo a reduzir a zero o caudal sólido. Para tal, diminuía-se o caudal de alimentação do canal principal para valores entre 10 a 15 l/s e desligava-se a bomba que alimentava em água o canal afluente através do descarregador de Bazin (esta bomba encontrava-se no segundo reservatório de jusante (Figura 3.6 b)) assim como a bomba que alimentava em água e sedimentos o descarregador de Bazin em "T" (Figura 3.7 a,b). Através do programa ConFLume e com o auxílio dos carros de instrumentos, registava-se a topografia do canal afluente e, de seguida, a topografia do canal principal. Quando os levantamentos dos dois canais eram completados, retomava-se o ensaio.

O processo de reinício do ensaio consistia em ajustar o caudal de alimentação do canal principal e do afluente para os valores pretendidos e, com o auxílio da comporta de jusante, nivelar a altura de escoamento (processo bastante demorado pois envolvia grandes massas de água e o abaixamento da comporta não podia ser brusco sob pena de originar inundações no laboratório) e ligar os tapetes de sedimentos. Ligavam-se igualmente as bombas dos circuitos secundários, submersos nos reservatórios de jusante.

As medições do nível de água, por serem não intrusivas (o limnómetro encontrava-se acima do nível da água), foram realizadas enquanto decorriam os ensaios, sem que houvesse necessidade de os parar. Estando o ensaio a decorrer, procedia-se à medição dos níveis da superfície livre (após uma hora).

O procedimento repetiu-se para as 4, 7 e 12 horas de ensaio para o ensaio de referência e para as 7, 10 e 12 horas de ensaio, para o ensaio com configuração alargada. Ao longo do ensaio, de duas em duas horas, pesavam-se os sedimentos acumulados no descarregador Bazin em forma de "T". Este procedimento envolvia desligar-se a bomba submersível localizada no primeiro reservatório de jusante, que movimentava um caudal de mistura de 4 l/s , e aumentar o caudal do circuito de abastecimento principal para 48,8 l/s na zona de montante, de modo a compensar o corte de caudal proveniente do primeiro reservatório de jusante. Quando o caudal estabilizava, abria-se uma válvula existente no fundo do descarregador Bazin, drenando-o, e pesava-se a areia nele retida utilizando o potenciómetro (Figura 3.12 a, b). Na sequência da pesagem, ligava-se a bomba de água e sedimentos, instalada no primeiro reservatório de jusante, diminuía-se o caudal do circuito principal para o valor de 44,8 l/s , e fechava-se a válvula do descarregador Bazin para evitar perdas de material sólido. Com os sucessivos valores de pesagem, monitorizava-se a evolução do ensaio até se atingir o estado de equilíbrio, determinado pela relação entre caudal sólido que entra e que sai do sistema (Figura 3.14).

A medição das referidas variáveis (topografia, nível de água e caudal sólido) era crucial para o desenrolar dos ensaios, na medida em que se considerou que o equilíbrio dinâmico se estabelece quando a quantidade de sedimentos de saída era praticamente igual à quantidade de sedimentos à entrada, ou seja, quando o rácio entre a quantidade de sedimentos recolhida no descarregador Bazin em T era superior ou igual a 90% da quantidade fornecida ao sistema.

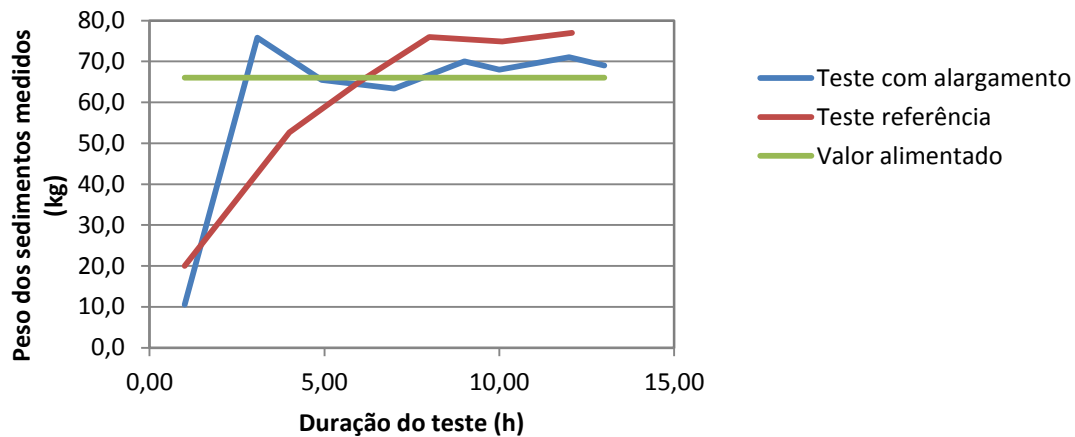


Figura 3.14: Gráfico da evolução do peso dos sedimentos medidos ao longo da duração dos testes.

No fim dos ensaios, a instalação era esvaziada através de um dreno existente no fundo do canal, actuado por uma válvula situada inferiormente ao mesmo. Devido à diferença de níveis entre o leito do canal afluente e o leito do canal principal, estabelecia-se um escoamento relativamente rápido do canal afluente para o canal principal, que tendia a erodir o degrau do afluente. Para evitar este fenómeno, fechava-se a válvula quase totalmente logo que o nível de água no canal se aproximava do nível do fundo do canal principal. Esta operação permitia reduzir o efeito de sucção do dreno e, desse modo, a velocidade da corrente no afluente, anulando a erosão da frente da discordância ou desnível entre canais.

4. Resultados experimentais

4.1 Ensaio de referência

4.1.1 Evolução da morfologia do fundo e do nível de água

As figuras do presente capítulo cobrem valores de X contidos no intervalo $1,5 \text{ m} \leq X \leq 9 \text{ m}$. Os valores da topografia e do nível de água para $X < 1,5 \text{ m}$ são pouco representativos uma vez que traduzem efeitos locais da adaptação do escoamento, designadamente, à transição da soleira em PVC para o fundo móvel e à entrada dos sedimentos provenientes da tela de alimentação. Não são, por isso, apresentados.

A morfologia do leito foi evoluindo ao longo do ensaio até atingir uma configuração de equilíbrio. No início do ensaio, após o enchimento lento dos canais, o leito do canal principal estava praticamente horizontal (declive aproximado de 0,3 % a 0,4 %), enquanto o leito do canal afluente apresentava o declive médio de 2,3% e um desnível de 0,03 m na respectiva foz (*i.e.*, na foz do canal afluente). Constatou-se que o declive do canal afluente aumentou em relação ao imposto a seco, que era 1 %. Tal aumento de declive correspondeu a um abaixamento generalizado das cotas do canal afluente de montante para jusante provocado pelo enchimento dos canais.

Segue-se a descrição das principais propriedades do fundo e da superfície livre do escoamento obtidas depois de 1, 4, 7, 12 h de ensaio.

1ª hora de ensaio

Após uma hora de ensaio ($t = 1 \text{ h}$), formou-se, na zona da confluência, uma cavidade de erosão centrada na secção $X \approx 4 \text{ m}$ (Figura 4.1.a) e que atravessa por completo o canal principal segundo uma direcção coincidente com a bissectriz do ângulo da confluência. A cota mínima desta cavidade no plano definido por $Y = 0,93 \text{ m}$ era $Z = -0,044 \text{ m}$. A menor cota mínima, $Z = -0,062 \text{ m}$, ocorria no ponto de coordenadas $X = 4,06 \text{ m}$ e $Y = 0,85 \text{ m}$.

Acresce que o fundo do canal pós-confluência se encontrava, em grande parte, abaixo da cota 0, tendo-se dado um fenómeno de erosão generalizada desta zona do fundo do canal (Figura 4.1.e). A esta erosão generalizada correspondeu a chegada de um grande volume de areia à tremonha de jusante, embutida no fundo do canal, e ao primeiro reservatório de jusante. Esta onda de sedimentos foi sendo transportada para a entrada do canal. Os volumes entrado e saído foram-se tornando, sucessivamente, mais próximos até se atingir o equilíbrio, como se verá mais adiante.

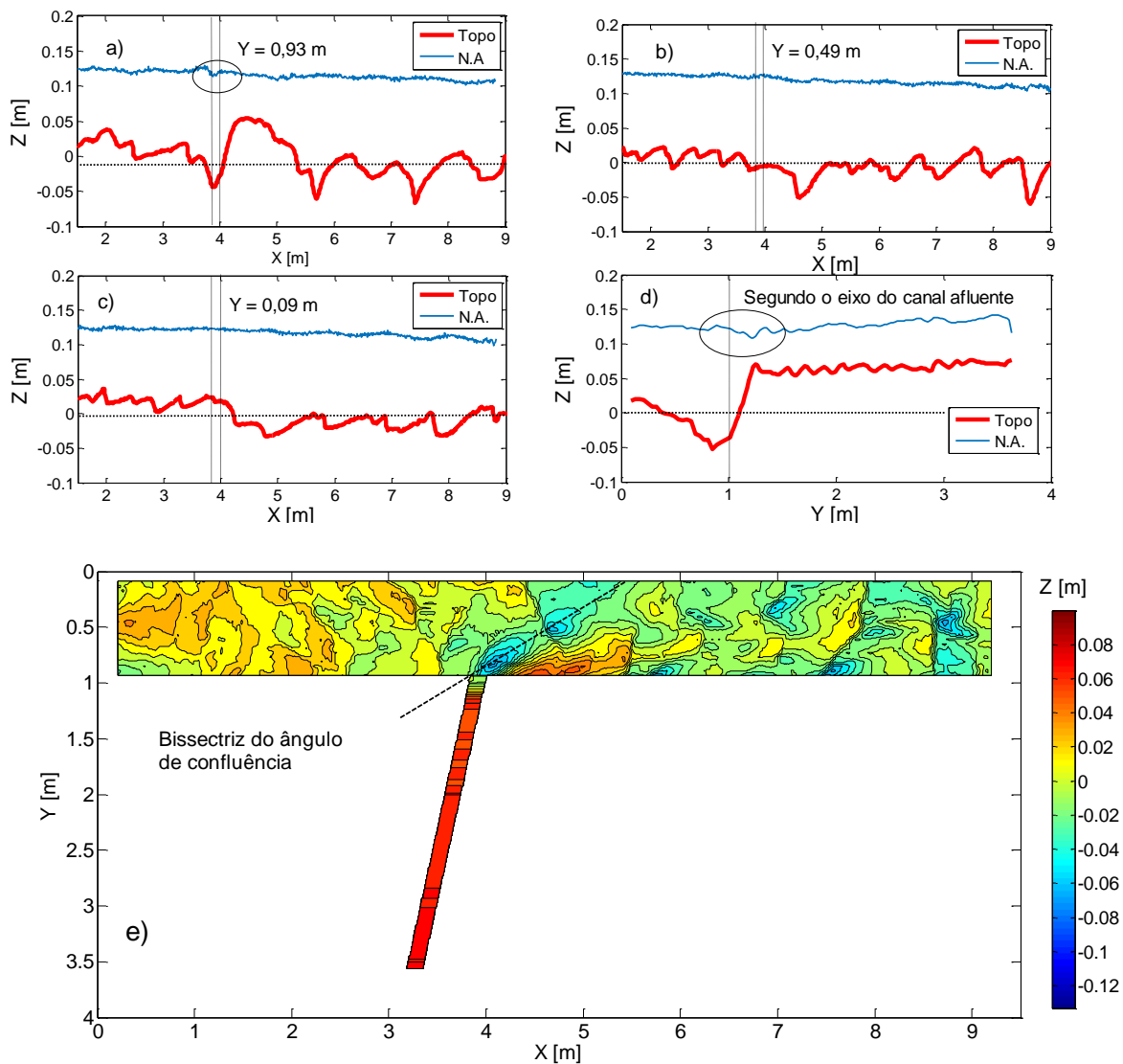


Figura 4.1: Perfis longitudinais do fundo e da superfície livre ⁽¹⁾ para $T = 1$ h e para a) $Y = 0,93$ m, b) $Y = 0,49$ m, c) $Y = 0,09$ m, d) segundo o eixo do canal afluente ; e) Topografia do fundo do canal.

Na margem interior do canal pós-confluência ($Y = 0,93$ m), começava a desenvolver-se uma barra de deposição imediatamente a jusante da cavidade de erosão. Observava-se ainda (Figura 4.1.e) o desenvolvimento de dunas no canal pós-confluência, amplificadas em relação às provenientes de montante, provavelmente, por acção da perturbação do escoamento associada à entrada do afluente (Figura 4.1.a).

Na superfície livre do escoamento identificou-se, sobre a cavidade de erosão, uma pequena onda estacionária, assinalada por um círculo na Figura 4.1 a. Esta onda é originada pela colisão entre escoamentos confluentes mas também reflete a redução local da altura cinética associada ao abaixamento do fundo.

⁽¹⁾ Nas legendas, “Topo” refere-se às cotas de fundo e “N.A.” às cotas da superfície livre

A meio do canal principal ($Y = 0,49$ m), as cotas do fundo eram decrescentes para jusante até à cavidade de erosão. Esta apresentava a cota mínima $Z = -0,051$ m. A jusante, o fundo tinha um declive médio muito pequeno ou nulo e estava coberto por dunas cujo comprimento médio era 0,8 m, ou seja, cerca de 7,3 vezes a altura do escoamento. Eram, assim, dunas completamente desenvolvidas (entre cerca de $5h$ e $7h$, sendo h a altura média do escoamento). Identificaram-se ainda pequenas ondas estacionárias na superfície livre, associadas às variações das cotas topográficas a partir de $X = 3,9$ m.

Na margem exterior do canal principal ($Y = 0,09$ m), a topografia do fundo apresenta uma queda média de cerca de 0,05 m em $X \approx 4,5$ m. Em $X = 4,8$ m ocorria uma cavidade de erosão ($Z = -0,033$ m), a que se seguiam configurações de fundo com um comprimento médio de 0,95 m ($\approx 8,6$ vezes a altura do escoamento), susceptíveis de se classificarem como dunas instáveis.

De acordo com a Figura 4.1.e, as configurações do fundo eram marcadamente tridimensionais e irregulares a montante da confluência. A partir daí, o escoamento do canal afluente parece induzir dunas muito mais desenvolvidas, com cavas localizadas alternadamente junto a cada uma das paredes do canal.

No canal afluente, observou-se a amplificação do desnível entre fundos dos canais confluentes, uma vez que, para $t = 1$ h, esse desnível entre leitos era 0,113 m enquanto, para $t = 0$ h, era 0,03 m. Por outro lado, observou-se a formação de ondulações de fundo, provavelmente antidunas incipientes, com cerca de 0,20 m de comprimento (Figura 4.1.d). Registou-se ainda, na foz do canal afluente, a formação de uma crista estacionária de fundo, em $Y = 1,18$ m, antecedida por um patamar quase horizontal entre $Y = 1,24$ m e $Y = 1,4$ m. Às referidas ondulações estava associada uma clara irregularidade da superfície livre do escoamento. Sobre a crista estacionária no fundo, a superfície livre apresentava uma cava (ilustrada pela elipse na Figura 4.1.d), o que indicia a presença de escoamento lento ($Fr < 1$) sobre a crista e a montante.

4ª hora de ensaio

A comparação das Figuras 4.1.e e 4.2.e permite discorrer sobre a evolução da topografia entre a primeira e quarta horas do ensaio. O fundo do canal principal tornou-se globalmente mais elevado. Observou-se, na margem interior do canal principal ($Y = 0,93$ m), um aumento significativo da volumetria da barra de deposição, compreendida entre $X = 4,13$ m e sensivelmente $X = 6,76$ m, decorrente do aumento das cotas (cota máxima $Z = 0,046$ m) e da área em planta, designadamente da largura e do comprimento. A cota mínima da cavidade de erosão (Figura 4.2 a) apresentava um valor muito próximo do registado na primeira hora ($Z = -0,041$ m). O alinhamento do talvegue da cavidade de erosão continuou a coincidir aproximadamente com a direcção da bissectriz do ângulo de junção. Concomitantemente com o aumento da volumetria da barra de deposição, o fundo foi sendo escavado paralelamente à margem exterior do canal (Figura 4.1.e e 4.2.e). A onda estacionária identificada em $Y = 0,93$ m para $t = 1$ h foi igualmente observada para $t = 4$ h (Figura 4.2.a).

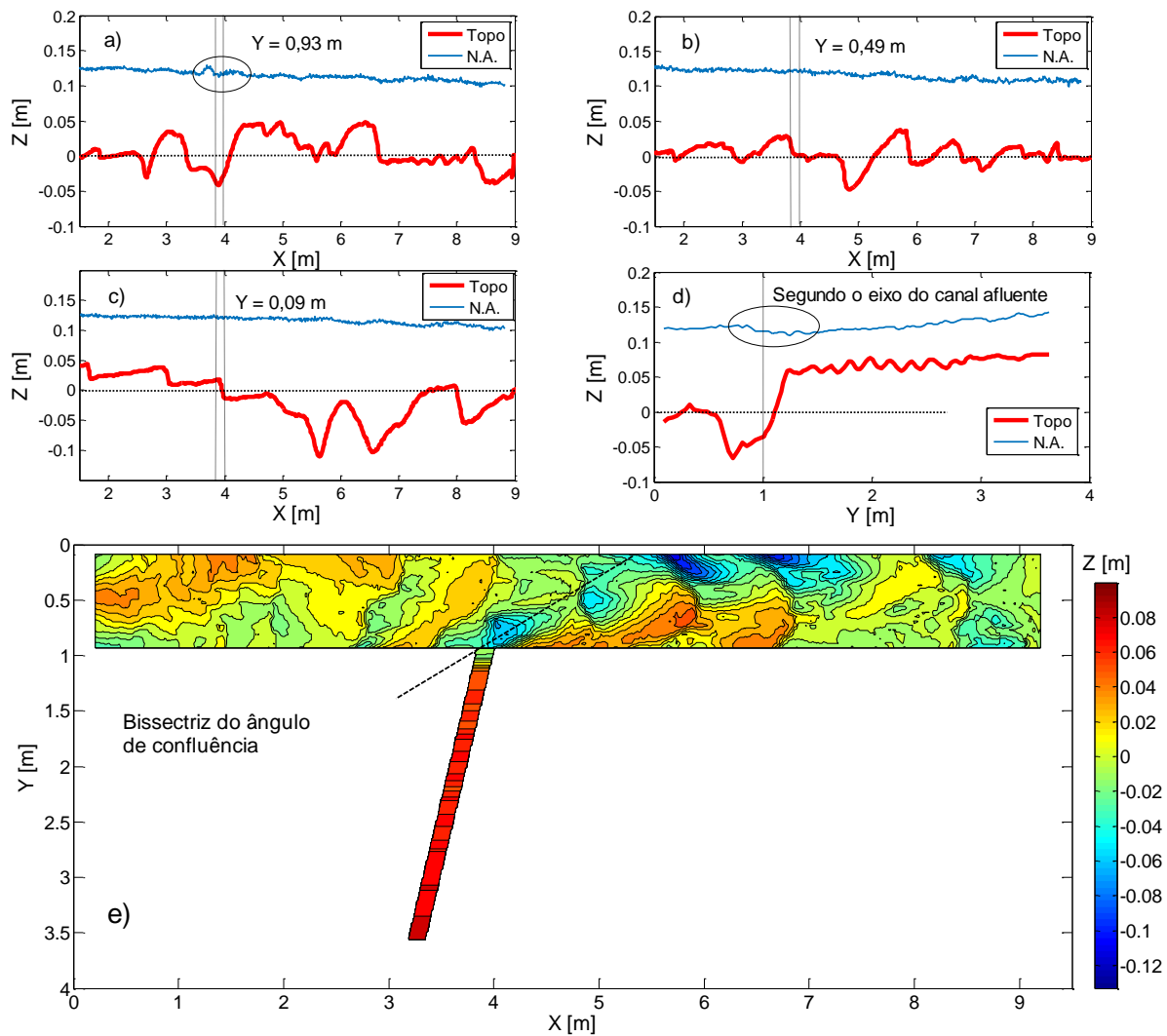


Figura 4.2: Perfis longitudinais do fundo e da superfície livre para $T = 4$ h e para a) $Y = 0,93$ m, b) $Y = 0,49$ m, c) $Y = 0,09$ m, d) segundo o eixo do canal afluente; e) Topografia do fundo do canal.

A meio do canal principal ($Y = 0,49$ m), a cota mínima da cavidade de erosão era ligeiramente mais elevada ($Z = -0,048$ m por comparação com $-0,051$ m), sendo esta cavidade seguida por dunas com comprimento médio igual a $0,8$ m, o que perfazia aproximadamente $7,3$ vezes a altura de água, (Figura 4.2.b), podendo-se falar, de novo, de dunas completamente desenvolvidas.

Na margem exterior do canal principal ($Y = 0,09$ m), o fundo apresentou cotas decrescentes para jusante até chegar a uma cavidade de erosão com $Z = -0,11$ m em $X = 5,5$ m. A esta cavidade de erosão seguiam-se duas cavas (Figura 4.2.c) cujas cotas mínimas eram respectivamente $Z = -0,10$ m e $Z = -0,055$ m.

No canal afluente, com declive de 1,5 %, as cotas do fundo do canal eram ligeiramente menores do que as verificadas após a primeira hora de ensaio (Figura 4.2.d). Os fundos do canal principal e do afluente eram marcados por uma discordância mais reduzida (0,10 m) do que ao fim de 1 h (em que atingiu 0,113 m). A crista estacionária de fundo que ocorre na foz do canal afluente era menos acentuada do que no primeiro registo. As configurações de fundo, possivelmente antidunas, apresentaram um perfil sinusoidal mais marcado do que na primeira hora de registos (Figura 4.2.d). O nível de água, no canal afluente, apresentava um declive de cerca de 1,4% e maior número de ondas estacionárias entre $Y = 2$ m e $Y = 3$ m, observando-se ainda um aumento do nível de água na junção com o escoamento do canal principal.

A partir de $X = 3$ m, as frentes das dunas começaram a apresentar-se curvas no canal principal. A vista em planta do canal, observável na Figura 4.2.e, permite constatar que a duna cuja crista se encontrava em $X \approx 3$ m (margem exterior do canal) não era perpendicular às paredes mas antes apresentava uma forma em “S”. A duna que se lhe seguia ($X = 3,9$ m) já se apresentava sob a forma de um arco, em que a curvatura aumentava junto à margem interior do canal, e era seguida por duas dunas com configuração curva (vista em planta). A referida configuração curva é mostrada na Figura 4.2.e. A curvatura tornou-se menos acentuada para jusante e observou-se uma frente de deposição que se apresentava com uma direcção oblíqua às margens do canal.

7ª hora de ensaio

Relativamente à situação descrita para $t = 4$ h, a barra de deposição continuou a aumentar de volume na margem interior do canal principal ($Y = 0,93$ m): a cota máxima era mais elevada ($Z = 0,054$ m para $X = 4,39$ m) e o comprimento era maior (Figura 4.3.a). Segundo este perfil ($Y = 0,93$ m), um outro aspecto importante residia no facto de a cavidade de erosão apresentar uma cota mínima mais pequena ($Z = -0,057$ m) do que a do registo precedente, tendo por isso aumentado o desnível entre a base da confluência e o topo da barra de deposição. O nível da superfície livre apresentou um andamento semelhante (subida e queda bruscas ao chegar à confluência) ao do registo anterior ($t = 4$ h).

A meio do canal principal ($Y = 0,49$ m), a cota mínima da cavidade de erosão registada para $t = 4$ h em $X \approx 5$ m era mais elevada ($Z = -0,019$ m para $X = 4,75$ m); observa-se que a cavidade recuou em direcção a montante em relação ao registo em $t = 4$ h. Este deslocamento segundo o eixo X deveu-se, provavelmente, ao alargamento e crescimento da barra de deposição (Figura 4.3 b). A jusante desta cavidade, o fundo apresentou um aspecto sinusoidal marcado por cavas cujas cotas mínimas eram $Z = -0,028$ m ($X = 6,08$ m), $Z = -0,045$ m ($X = 6,97$ m) e $Z = -0,013$ m ($X = 7,8$ m). Porém, as Figuras 4.3.b e 4.3.e permitem concluir que apenas a cavidade com cota mínima em $X = 6,97$ m é cavidade de erosão enquanto as outras duas cavas referidas se encontram, a primeira, no sopé da barra de deposição e a segunda, na cava de uma duna oblíqua.

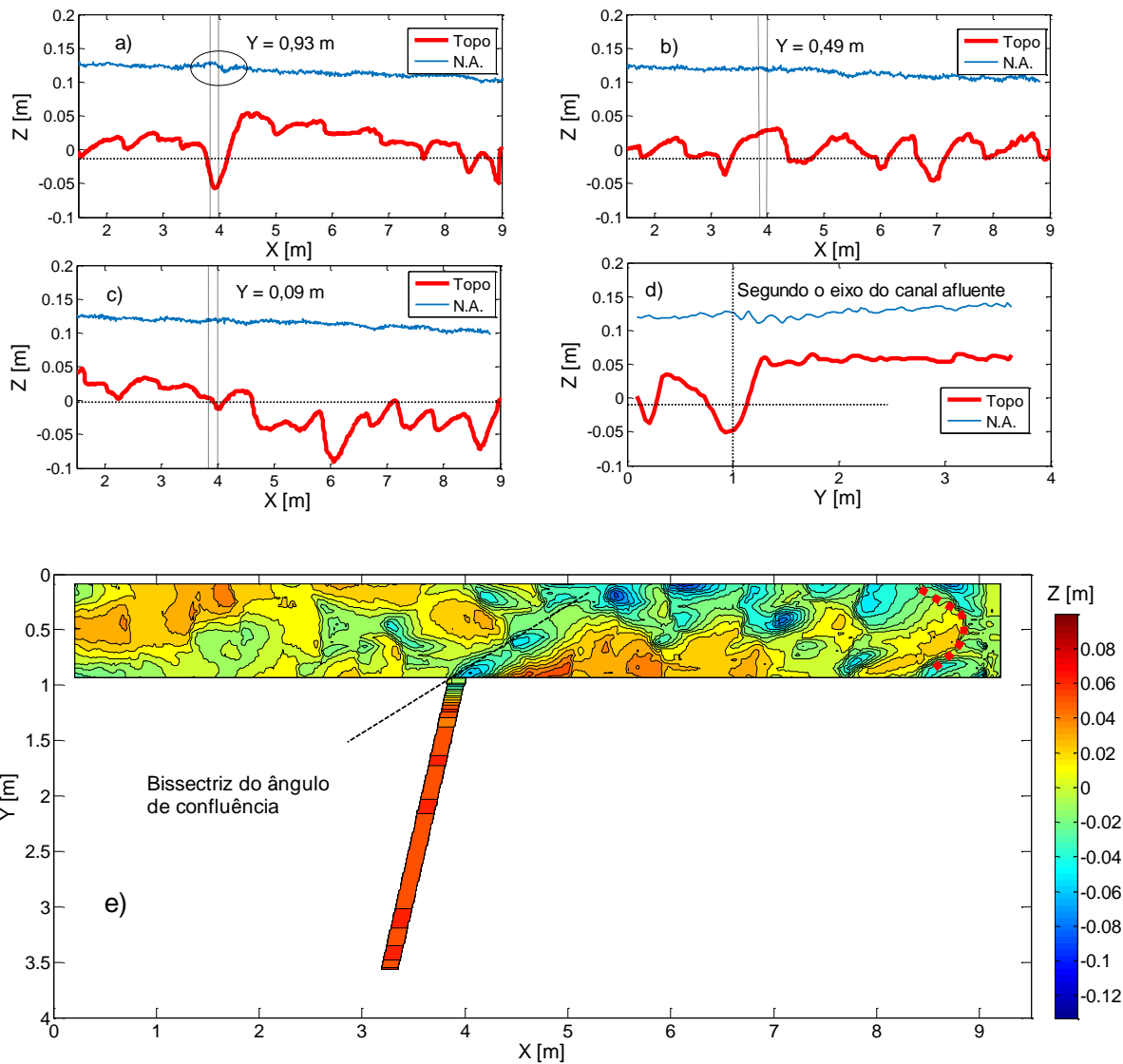


Figura 4.3: Perfis longitudinais do fundo e da superfície livre para $T = 7$ h e para a) $Y = 0,93$ m, b) $Y = 0,49$ m, c) $Y = 0,09$ m, d) segundo o eixo do canal afluente ; e) Topografia do fundo do canal.

Na margem exterior do canal principal ($Y = 0,09$ m), o fundo apresenta uma cota média semelhante à que ocorreu para $t = 4$ h. Porém as cavas e as cristas eram menos acentuadas (ver Figuras 4.2.c e 4.3.c). A cota mínima do fundo passou para $Z = -0,091$ m em $X = 6,13$ m, mais elevada do que as duas registadas anteriormente no mesmo perfil ($Z = -0,012$ m em $X = 5,72$ m para $t = 4$ h e $Z = -0,02$ m em $X = 7$ m para $t = 1$ h).

Pode-se admitir que o fundo do canal apresentava quatro dunas entre $X = 5,9$ m e $X = 8$ m (Figura 4.3.e), uma vez que o comprimento médio das configurações se encontrava dentro do intervalo característico das dunas.

Com o aumento da barra de deposição, quer em largura quer em comprimento, notou-se um certo desmembramento das cavidades de erosão, tornado-se estas menos largas (diâmetros menores).

No canal afluente, a topografia é substancialmente diferente das anteriores. Evidenciou-se desde logo, um abaixamento generalizado das cotas do fundo do canal (Figura 4.3.d). Por outro lado, notou-se que as ondulações do fundo apresentavam uma forma sinusoidal menos pronunciada, tendo o comprimento das mesmas aumentado para aproximadamente 0,40 m. Aparentemente, as antidunas incipientes observadas para $t = [1; 4]$ h deram lugar a fundo plano (ou praticamente plano) característico do regime de transição. A crista estacionária de fundo observada na foz do canal afluente era mais pronunciada do que para $t = 4$ h. Na superfície livre do escoamento observou-se um acréscimo do número de ondas na parte jusante do canal, podendo indiciar a presença ou a tendência para a formação de um ressalto ondulado.

12ª hora de ensaio

Na margem interior do canal principal ($Y = 0,93$ m), observou-se uma pequena redução global da cota do fundo (Figura 4.4.a). O desnível entre a cavidade de erosão e o topo da barra de deposição é menor do que para $t = 7$ h (0,103 m para $t = 12$ h contra 0,112 m para $t = 7$ h). A barra de deposição apresentou a cota mais elevada $Z = 0,473$ m, para $X = 4,54$ m, mais baixa do que para $t = 7$ h, apesar de ter aumentado a sua extensão na direcção perpendicular à do escoamento (Figura 4.4.e). A cavidade de erosão a jusante do afluente era, por sua vez, mais marcada ($Z = -0,071$ m contra $-0,051$ m). A superfície livre do escoamento apresentou características idênticas às registadas anteriormente, incluindo a onda estacionária assinalada na Figura 4.4.a.

A meio do canal principal ($Y = 0,49$ m), em $X = 5$ m, não se observou qualquer cavidade de erosão bem marcada, apesar de existirem duas cavas importantes em $X \approx 5,0$ m e $X \approx 8,2$ m, respectivamente (Figura 4.4.b). Estas cavas estão associadas ao sopé de dunas. A superfície livre do escoamento não sofreu alterações visíveis relativamente à registada em $t = 7$ h.

Na margem exterior do canal principal ($Y = 0,09$ m) foram registadas poucas diferenças de batimetria relativamente à observada para $t = 7$ h. Ainda assim, também se pode admitir que se desenvolveu um extenso “corredor” de erosão entre, aproximadamente, $X = 5,5$ m e $X = 7,9$ m junto à margem exterior do canal (Figura 4.4.c). Nos termos desta interpretação, a cota mínima do “corredor” foi $Z = -0,091$ m em $X = 5,78$ m.

As configurações de fundo a montante da confluência apresentavam-se perpendiculares às margens do canal, com espaçamentos compreendidos entre 0,3 m e 0,6 m.

Na extremidade de jusante do canal pós-confluência, parecem ter-se desenvolvido duas dunas ou barras, centradas, aproximadamente, em $X = 7,5$ m e em $X = 8,5$ m. Constatou-se, por outro lado, que as zonas de erosão se apresentaram globalmente mais extensas em planta. Na foz do canal afluente, a diferença é notória uma vez que as duas cavidades presentes entre $X = 4$ m e $X = 4,5$ m

para $t = 7$ h coalesceram. O mesmo aconteceu entre $X = 5,2$ m e $X = 6,2$ m junto à margem exterior (Figuras 4.3.e e 4.4.e).

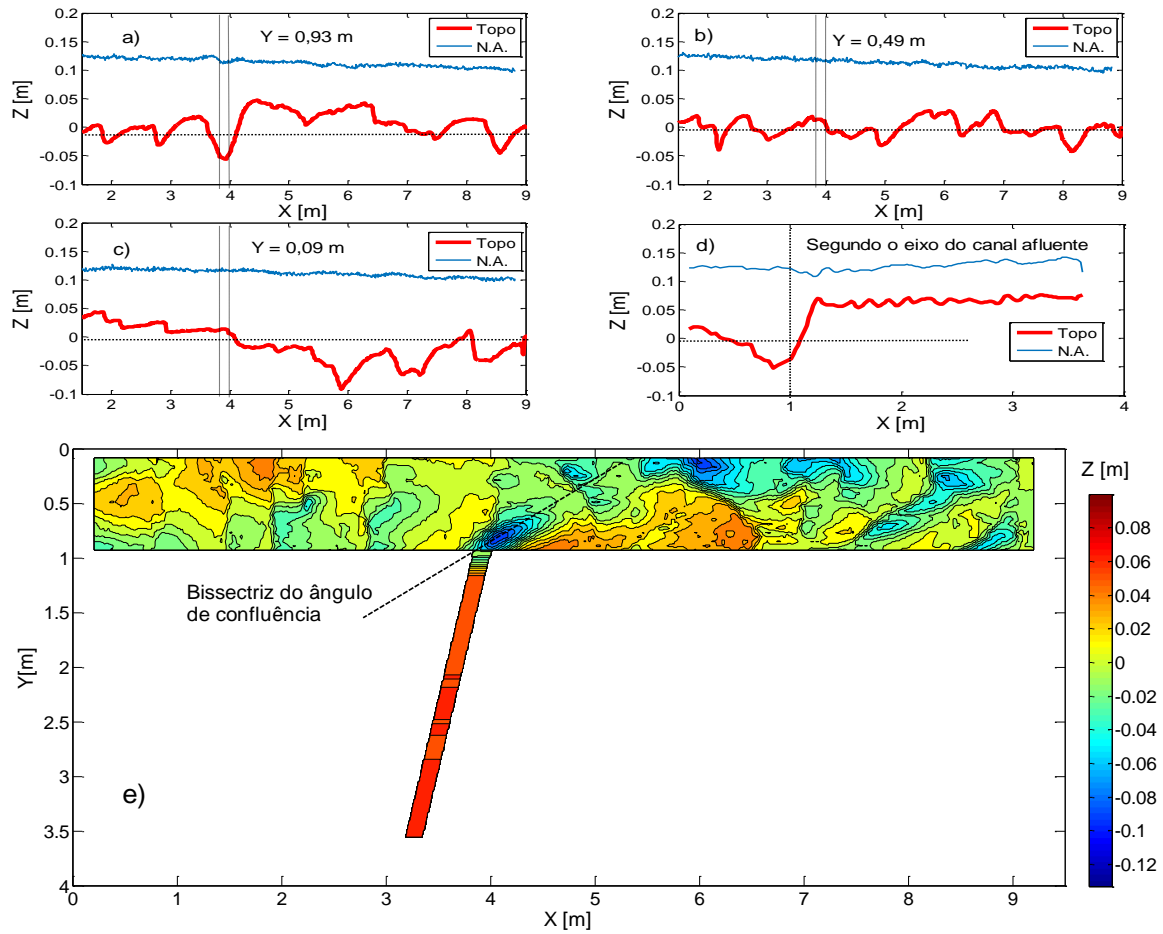


Figura 4.4: Perfis longitudinais do fundo e da superfície livre para $T = 12$ h e para a) $Y = 0,93$ m, b) $Y = 0,49$ m, c) $Y = 0,09$ m, d) segundo o eixo do canal afluente; e) Topografia do fundo do canal.

O fundo do canal afluente apresentou cotas mais elevadas, denotando-se, de novo, mais instabilidade, uma vez que as ondulações de fundo eram marcadamente mais sinusoidais do que para $t = 7$ h. O desnível entre leitos dos canais afluente e principal tomou o valor de $0,13$ m, muito superior ao valor inicialmente imposto, $0,03$ m (Figura 4.5 a, b).

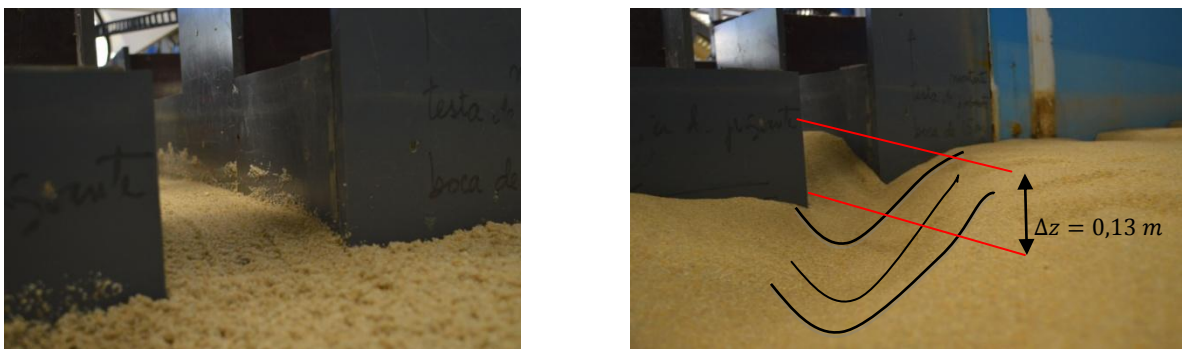


Figura 4.5: a) Foz do afluente antes do início do ensaio; b) foz do afluente, no estado de equilíbrio.

4.1.2 Outras observações

No final do ensaio, antes de se ter medido a topografia de equilíbrio, introduziu-se um corante na secção de montante do canal afluente, tendo em vista visualizar a junção dos escoamentos principal e afluente. Notou-se que o corante não se dispersava na totalidade da largura do canal principal, progredindo para jusante da confluência sempre junto à margem interior, como se mostra na Figura 4.6.

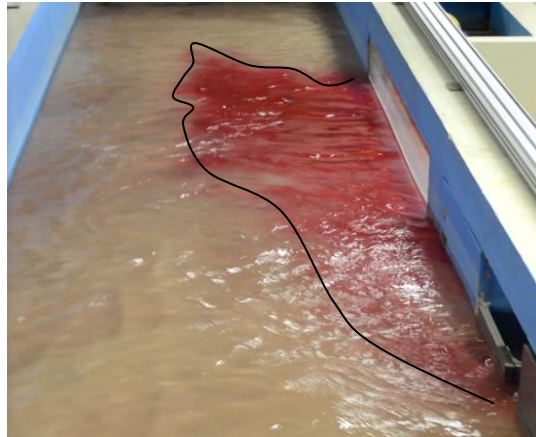


Figura 4.6: Imagem de pormenor da confluência em que se observa a dispersão de corante no escoamento.

O facto de o corante não se misturar na totalidade da largura do canal principal pode indiciar alguns aspectos hidrodinâmicos de relevo. Tendo o corante sido introduzido no trecho de montante do canal afluente, o corante permite traçar o percurso do escoamento afluente. Uma vez que este se encontra essencialmente junto da margem interior do canal pós-confluência, pode-se presumir que o corante é encaminhado para essa zona por imposição do escoamento principal, que o encosta às paredes do canal. Deste modo, pôde-se traçar aproximadamente o percurso do escoamento afluente dentro do canal principal, como ilustra a Figura 4.6.

Por outro lado, a observação da morfologia do canal principal ao longo do ensaio permite constatar a tendência de o canal em formar um traçado curvilíneo, próprio de um curso de água meandrizado.

As Figuras 4.1.e a 4.4.e mostram que, a partir de $t = 4$ h, a distribuição transversal de transporte sedimentar deixa de ser uniforme. Observa-se claramente, que, no canal principal, na margem exterior do mesmo, a montante da confluência, o fundo sofre deposição de sedimentos, sendo mais elevado do que na margem interna. Evidencia, inclusive, um desvio da distribuição transversal de transporte sedimentar na direcção da margem exterior do canal, originando um aumento da cota dessa margem. Ora, se se observarem as Figuras 4.2.e, 4.3.e e 4.4.e, é possível verificar que, na margem interior do canal principal pós-confluência, a barra de deposição (resultado da sedimentação de material transportado pelo canal afluente), apresenta uma continuidade com a topografia de montante da margem exterior na medida em que estas zonas apresentam cotas positivas mais elevadas. Esta continuidade apresentava-se, em planta, sob a forma de uma curva como indica a Figura 4.7.

Por outro lado, as cavidades de erosão registadas ao longo do ensaio encontravam-se localizadas aproximadamente nos mesmos locais nos diferentes registos horários. Essas localizações formavam uma configuração (em planta) em arco, coincidente com a zona de maiores velocidades do escoamento mas também com a zona de deflexão do escoamento.

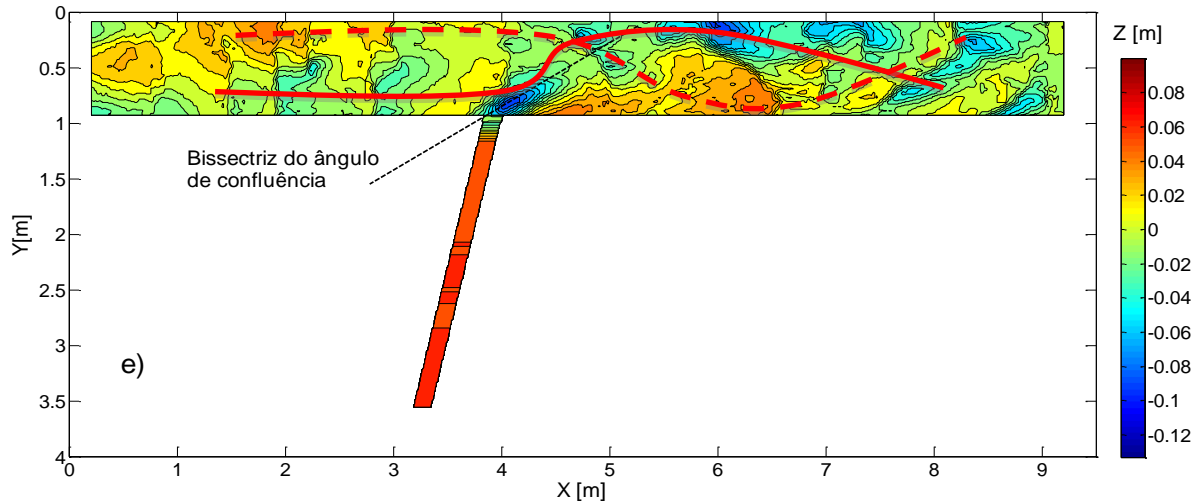


Figura 4.7: Topografia do fundo do canal para $T = 12$ h.

4.2 Ensaio com a foz do afluente alargada

4.2.1 Evolução da morfologia do fundo e do nível da água

O alargamento da foz do afluente induziu alterações morfológicas e hidrodinâmicas nos dois canais. Apresentam-se a seguir os resultados do ensaio correspondente.

Procedeu-se ao registo topográfico no ensaio com alargamento antes do início do ensaio ($t = 0$ h), após uma hora de ensaio ($t = 1$ h), após sete horas de ensaio ($t = 7$ h), após dez horas de ensaio ($t = 10$ h) e no estado de equilíbrio, que foi atingido após doze horas de ensaio ($t = 12$ h). São estes registos que se apresentam a seguir.

Na fase inicial, à imagem do que aconteceu para o ensaio de referência, impôs-se um fundo praticamente horizontal (declive entre 0,3 % e 0,4 %) no canal principal e um declive de 1 % no canal afluente. Na foz deste, adoptou-se um desnível de 0,04 m entre os dois canais.

1ª hora de ensaio:

Na margem interior do canal ($Y = 0,93$ m), observou-se a formação de uma cavidade de erosão (Figura 4.8.a) com uma profundidade de $Z = -0,05$ m (em $X = 3,93$ m), mais profunda do que a registada para a configuração de referência. A jusante desta cavidade começava a desenvolver-se uma barra de deposição com cota máxima $Z = 0,055$ m (para $X = 5,37$ m e $Y = 0,77$ m), mais alargada e mais comprida do que a do ensaio de referência. O nível da superfície livre da água apresenta uma ligeira sobrelevação na zona do alargamento ($X = 3,6$ m), comportamento semelhante

ao observado no ensaio de referência. Porém, este aumento do nível de água regista-se em patamar em vez de apresentar uma subida e uma queda bruscas como se observava no ensaio de referência, o que leva a pensar que seja devida à maior largura do afluente. Por outro lado, o registo fotográfico parece evidenciar a presença de uma onda estacionária, como indica a Figura 4.9.

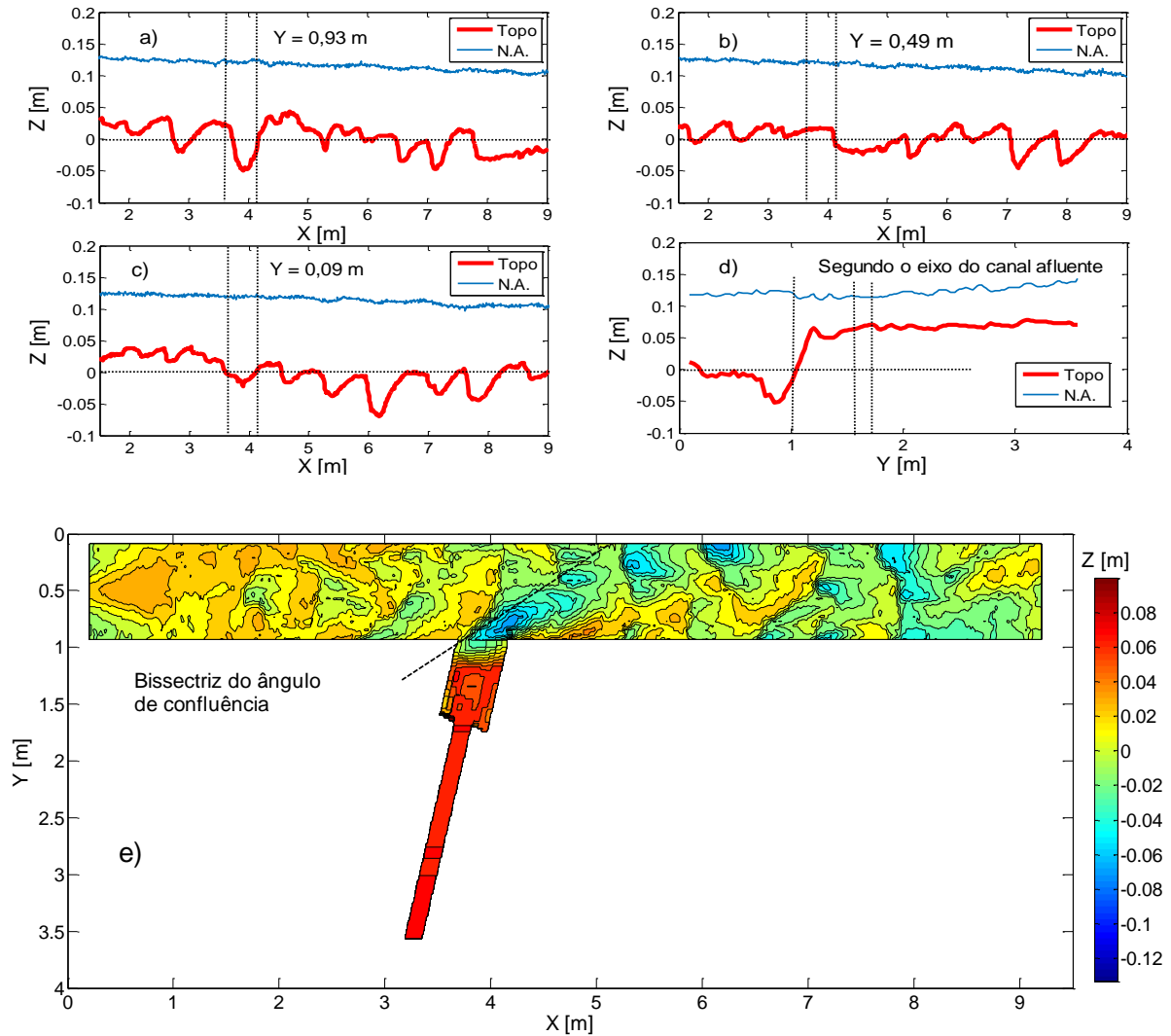


Figura 4.8: Perfis longitudinais do fundo e da superfície livre para $T = 1$ h e para a) $Y = 0,93$ m, b) $Y = 0,49$ m, c) $Y = 0,09$ m, d) segundo o eixo do canal afluente; e) topografia do fundo do canal.



Figura 4.9: Imagem de pormenor da foz do afluente.

Tal como para a situação de referência, a cavidade de erosão também se alinhou segundo, sensivelmente, a orientação da bissectriz do ângulo de junção entre os canais (Figura 4.8.e). O ponto mais profundo $Z = -0,069$ m encontrava-se em $X = 6,18$ m e $Y = 0,09$ m, junto à parede exterior do canal.

A meio do canal principal ($Y = 0,49$ m), a cavidade de erosão era incipiente e situava-se entre $X = 4$ m e $X = 5$ m; a respectiva cota mínima era mais elevada do que a do ensaio de referência, embora apresentasse uma largura maior (Figura 4.1.b e 4.8.b). A jusante observou-se a presença de dunas com cavas profundas em $X \approx 7,2$ m ($Z = -0,04$ m) e $X \approx 7,9$ m ($Z = -0,04$ m).

Na margem exterior do canal principal ($Y = 0,09$ m), detectou-se uma cavidade de erosão importante, como foi referido anteriormente ($Z = -0,069$ m em $X = 6,18$ m). Para montante desta cavidade, entre $X = 4$ m e $X = 5,5$ m, observaram-se duas dunas (cujo comprimento era aproximadamente 0,7 m). Para jusante, observaram-se outras três dunas, com cotas médias que reflectem um rebaixamento geral do fundo junto à parede externa do canal (Figura 4.8.c).

A Figura 4.8.d revelou amplificação do desnível entre fundos dos canais confluentes, o qual toma o valor de 0,117 m. Observou-se a formação de uma crista estacionária no fundo ($Y = 1,2$ m) precedida por uma cava. Porém, a grande diferença que ocorreu no canal afluente relativamente ao ensaio de referência encontrou-se no alargamento. Notou-se a existência de uma zona central (“corredor” central) ligeiramente mais baixa do que as zonas junto às margens (patamares de deposição). Nos cantos de montante do alargamento, observaram-se zonas com cotas abaixo das restantes, constituindo, desse modo, fundões dentro do alargamento. Notou-se ainda que o alargamento apresentava cotas abaixo de 0 numa distância de 0,2 m para montante da respectiva foz, podendo-se constatar que o desnível que separava o fundo do afluente dessas cotas negativas apresentava uma curvatura, em planta, crescente para jusante (ver Figura 4.8.e).

No canal afluente, o perfil da superfície livre apresentava-se irregular. Ao chegar ao alargamento, o nível de água estabilizava (baixando ligeiramente à volta de 0,01 m quando comparado com o mesmo registo para a configuração de referência) e, na foz, apresentava ondulações com duas cristas. Sobre a crista estacionária do fundo, a superfície livre apresentava uma crista em fase com o fundo, o que indicia a presença de uma onda estacionária.

7ª hora de ensaio:

Na margem interior do canal ($Y = 0,93$ m), observou-se, a jusante da confluência, a existência de uma barra de deposição, com cota máxima $Z = 0,052$ m em $X = 4,5$ m (Figura 4.10.a). A Figura 4.10.a revela a ausência de cavidade de erosão na foz do canal afluente. A Figura 4.10.e evidencia um aspecto interessante que residia no facto de a barra de deposição começar ainda dentro da confluência (em $X \approx 4$ m). Esta barra apresentava a cota mais elevada $Z = 0,058$ m no ponto de coordenadas $X = 5,52$ m e $Y = 0,73$ m. Para $X = 6,25$ m (entre $Y = 0,5$ m e $Y = 1$ m), a barra de

deposição apresentava cotas mais baixas. Porém, estendia-se para jusante, sensivelmente, até $X = 7,8$ m, e alargava na direcção da margem exterior do canal.

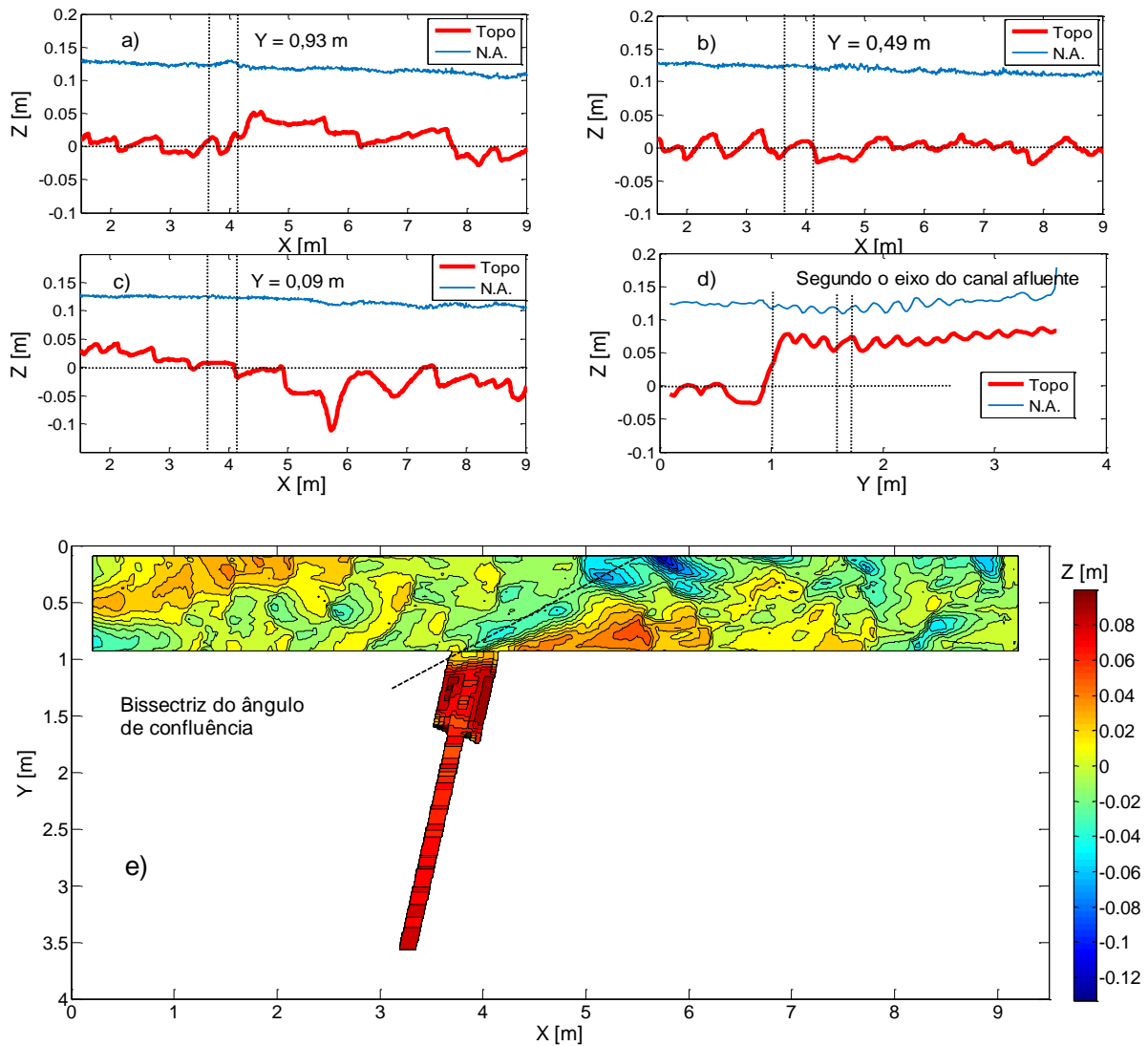


Figura 4.10: Perfis longitudinais do fundo e da superfície livre (para $T = 7$ h e para a) $Y = 0,93$ m, b) $Y = 0,49$ m, c) $Y = 0,09$ m, d) segundo o eixo do canal afluente; e) topografia do fundo do canal.

O escoamento do canal afluente irrompe pelo canal principal (tendo por direcção a bissetriz do ângulo de junção entre os canais), originando um “corredor” de erosão cujos pontos mais profundos se encontram perto da confluência ($X = 4,14$ m, $Y = 0,81$ m, $Z = -0,037$ m), e perto da margem exterior do canal principal ($X = 5,2$ m, $Y = 0,29$ m, $Z = -0,066$ m). O ponto de cota mais reduzida $Z = -0,11$ m, situava-se junto à margem exterior ($X = 5,74$ m e $Y = 0,09$ m).

A meio do canal principal ($Y = 0,49$ m), observou-se um patamar de fundo mais baixo ($Z = -0,022$ m), entre $X = 4,2$ m e $X = 4,8$ m, indicando uma cavidade de erosão incipiente. A jusante desta cavidade registou-se um fundo relativamente plano, continuado por uma duna bem desenvolvida à

saída do canal (Figura 4.10.b). O nível da superfície livre da água apresentou um ligeiro aumento entre $X = 4,5$ m e $X = 5,5$ m, reflectindo a redução local da altura cinética.

Na margem exterior do canal principal ($Y = 0,09$ m), registou-se, para além da já referida cavidade localizada em $X \approx 5,74$ m, uma outra cavidade menos profunda em $X = 6,79$ m com uma cota $Z = -0,052$ m (Figuras 4.10.c e 4.10.e).

A Figura 4.10.e evidenciou a elevação das cotas das zonas junto às margens do alargamento (patamares de deposição) no canal afluente, deixando transparecer mais claramente a presença de uma zona central (“corredor” central) com cotas mais baixas, constituindo o talvegue do alargamento. Os cantos do alargamento apresentavam, como anteriormente, cotas mais reduzidas, formando dois fundões. Observou-se ainda o desaparecimento da cavidade de erosão na foz do afluente e a presença de duas cavidades de erosão mais largas e profundas do que as do registo anterior perto da margem exterior. As configurações de fundo apresentavam alguma regularidade, entre $X = 1,1$ m e $X = 3,6$ m, sendo aproximadamente paralelas e tendo comprimentos compreendidos entre 0,5 m e 0,7 m (o que indica tratar-se de dunas). A jusante da confluência, a referida regularidade desapareceu, não se identificando quaisquer padrões de configuração de fundo.

No canal afluente, a superfície do fundo e a superfície livre do escoamento apresentavam-se com sinuosidade muito marcada. O desnível na foz do canal afluente era mais pequeno do que para $t = 1$ h (0,103 m às 7 h de ensaio e 0,118 m na primeira hora de ensaio). O nível da superfície livre apresentou uma diferença interessante: entre $Y = 1,6$ m e $Y = 2,4$ m, as ondulações estavam em fase com as ondulações do fundo, o que é compatível com a presença de antidunas; entre $Y = 1,2$ m e $Y = 1,6$ m, as ondulações da superfície livre estavam fora de fase, o que é uma indicação da presença de dunas.

10ª hora de ensaio

Na margem interior do canal principal ($Y = 0,93$ m), observou-se uma cavidade de erosão com cota mínima $Z = -0,049$ m em $X = 3,96$ m (Figura 4.11.a). A menor cota mínima era $Z = -0,075$ m no ponto de coordenadas $X = 4,18$ m e $Y = 0,81$ m (Figura 4.11.e). Também a barra de deposição apresentou uma cota máxima mais elevada $Z = 0,055$ m para $X = 4,6$ m (Figura 4.11.a). A barra de deposição expandiu-se para jusante, embora se tivesse estreitado.

A meio do canal principal ($Y = 0,49$ m), a cavidade de erosão alargou-se e o talvegue subiu apresentando a cota mínima $Z = -0,039$ m em $X = 4,7$ m (Figura 4.11.b).

Na margem exterior do canal principal ($Y = 0,09$ m), o fundo apresentou-se rebaixado, com cavas marcadas em $X = 6$ m, $X = 6,6$ m e $X = 7,7$ m apesar de a cota mínima ser mais elevada ($Z = -0,011$ m) do que após 7 h de ensaio (Figura 4.11.c).

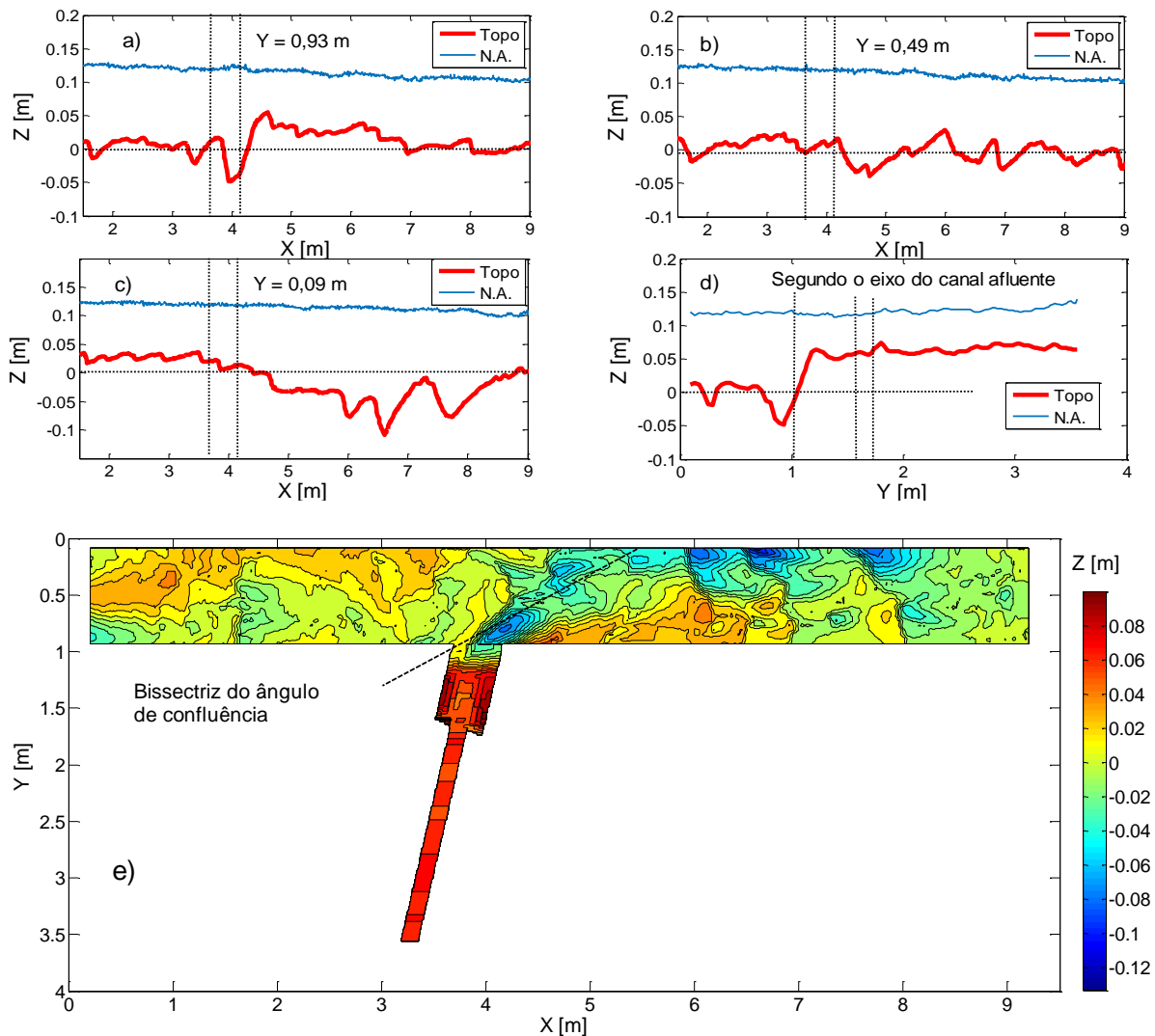


Figura 4.11: Perfis longitudinais do fundo e da superfície livre para $T = 10$ h e para a) $Y = 0,93$ m, b) $Y = 0,49$ m, c) $Y = 0,09$ m, d) segundo o eixo do canal afluente e e) topografia do fundo do canal.

Em síntese, a Figura 4.10.e permite constatar, em primeiro lugar, a presença de uma barra de deposição mais longa do que as registadas em $t = 1$ h e $t = 7$ h, tendo-se observado a sua propagação para jusante. Em segundo lugar, pode-se observar o reaparecimento da cavidade de erosão na foz do canal afluente. Observou-se também a presença de um “corredor” de erosão junto à margem exterior (mais marcado em $X = 6$ m, $X = 6,6$ m e $X = 7,7$ m). A disposição espacial deste “corredor” coincidia aproximadamente com a disposição anterior ($t = 7$ h), localizada na zona de maiores velocidades do escoamento. Em terceiro lugar, pode-se observar de novo que a cavidade de erosão penetrava o alargamento. Exceptuando este aspecto, esta situação é caracterizada pelo facto de as diferentes zonas do alargamento (“corredor” central de transporte, patamares de deposição e fundões), se terem tornado mais claramente definidas.

No canal afluente, desapareceram praticamente as ondulações do fundo que, excepto em $Y \approx 1,8$ m, se pode associar a leito plano superior. Observou-se ainda um patamar a montante da crista estacionária do fundo na foz do afluente. Também a superfície livre do escoamento se apresentava muito menos ondulada (Figura 4.11.d) do que para $t = 7$ h.

12ª hora de ensaio

Após doze horas de ensaio, o sistema tinha atingido o estado de equilíbrio dinâmico, tendo esta situação sido confirmada pela igualdade de caudal sólido a entrar e sair do sistema. Encontrando-se o sistema em equilíbrio dinâmico, a morfologia continuaria sujeita a alterações caso se prosseguisse o ensaio, mas tais alterações seriam pouco significativas, tendencialmente nulas, em média, ao longo do tempo.

É interessante verificar que a configuração da barra de deposição (em planta) se assemelha (na forma que apresenta) à registada na configuração de referência. Não tendo elas uma forma completamente curva, pareciam apresentar um traçado recto desde o canto de jusante da confluência ou desde a parte jusante do alargamento até um local onde descreviam uma trajectória curva, quase circular, do centro do canal principal para a margem interior do canal (Figura 4.12.e).

Na margem interior do canal principal ($Y = 0,93$ m), a barra de deposição apresentava uma cota máxima de 0,048 m enquanto a cavidade de erosão apresentava uma cota mínima de $-0,026$ m em $X = 3,68$ m (Figura 4.12.a). Por outro lado, os resultados obtidos para a configuração alargada mostram que as cotas topográficas da barra de deposição eram mais elevadas ($Z = 0,053$ m para $X = 4,64$ m e $Y = 0,89$ m) do que para a configuração de referência (cuja cota mais elevada era $Z = 0,049$ m para $X = 4,66$ m e $Y = 0,89$ m) e também que a barra de deposição da configuração alargada era mais extensa (ao longo do canal principal) que a do ensaio de referência (Figuras 4.4.e, 4.12.e).

No eixo do canal principal ($Y = 0,49$ m), observava-se uma cavidade de erosão em $X = 4,7$ m ($Z = -0,049$ m). Observavam-se ainda duas cavas em $X = 6$ m e $X = 7,3$ m (Figura 4.12.b). Os níveis de água não apresentavam alterações particulares relativamente aos que tinham sido registados em $t = 10$ h.

Na margem exterior do canal principal ($Y = 0,09$ m), em $X = 5,5$ m, $X = 6,5$ m, $X = 7,1$ m e $X = 8,2$ m foram observadas quatro cavas de um “corredor” de erosão, cujo valor mais reduzido foi $Z = -0,071$ m, enquanto o valor mais baixo registado na margem exterior do canal principal pós-confluência no ensaio de referência tinha sido $Z = -0,092$ m (para $X = 5,98$ m e $Y = 0,13$ m), o que mostra que as referidas cavas se apresentavam menos profundas do que as registadas no ensaio de referência (Figura 4.12.c). O nível de água não apresentava, em $t = 12$ h, alterações de relevo relativamente aos registos anteriores (Figura 4.12.c).

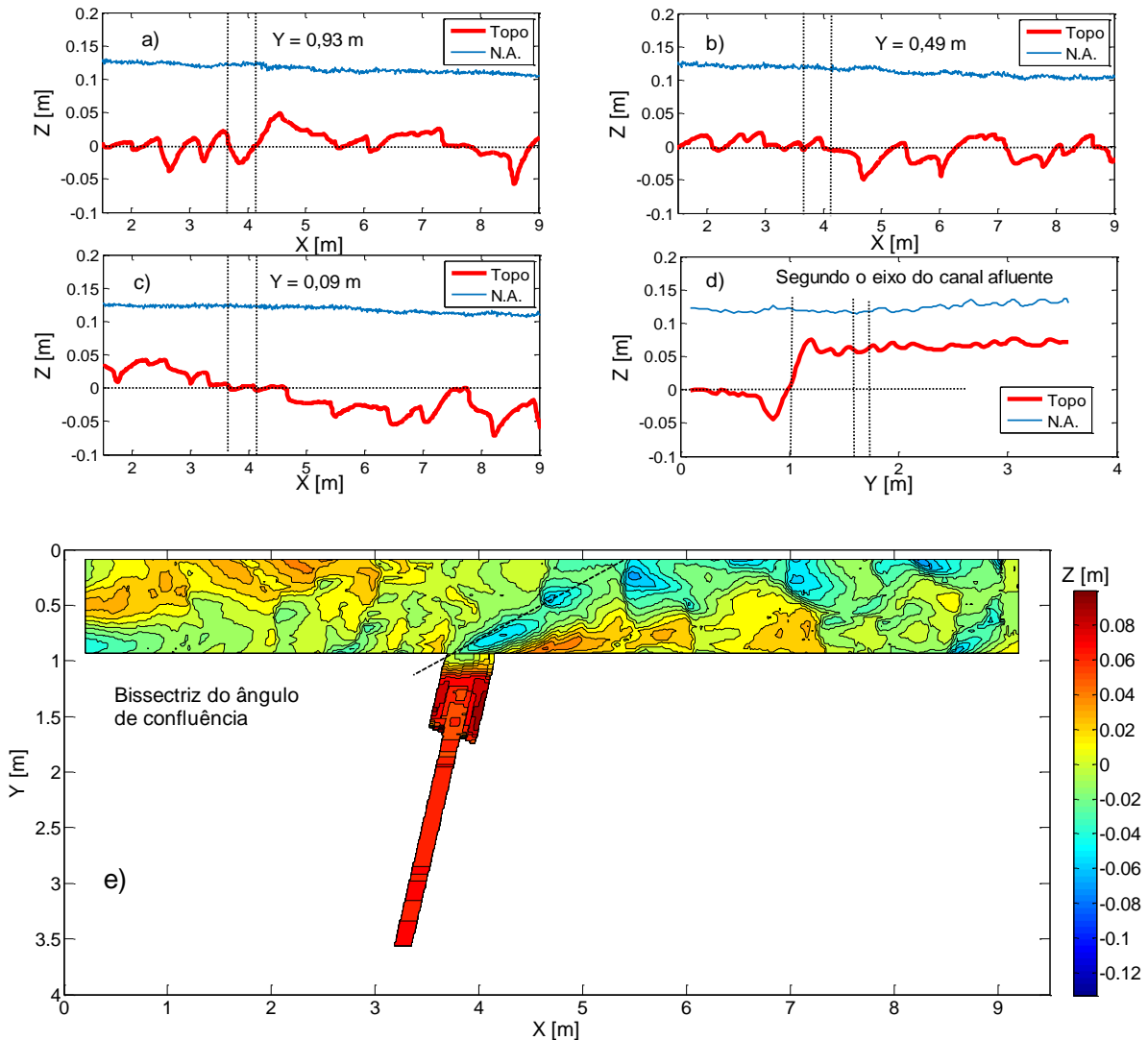


Figura 4.12: Perfis longitudinais do fundo e da superfície livre para $T = 12$ h e para a) $Y = 0,93$ m, b) $Y = 0,49$ m, c) $Y = 0,09$ m, d) segundo o eixo do canal afluente e e) topografia do fundo do canal.

Na margem exterior do canal principal ($Y = 0,09$ m), em $X = 5,5$ m, $X = 6,5$ m, $X = 7,1$ m e $X = 8,2$ m foram observadas quatro cavas de um “corredor” de erosão, cujo valor mais reduzido foi $Z = -0,071$ m, enquanto o valor mais baixo registado na margem exterior do canal principal pós-confluência no ensaio de referência tinha sido $Z = -0,092$ m (para $X = 5,98$ m e $Y = 0,13$ m), o que mostra que as referidas cavas se apresentavam menos profundas do que as registadas no ensaio de referência (Figura 4.12.c). O nível de água não apresentava, em $t = 12$ h, alterações de relevo relativamente aos registos anteriores (Figura 4.12.c).

As cavas do “corredor” de erosão alinhavam-se em planta segundo um arco resultante da interação dos escoamentos provenientes dos dois canais confluentes (Figura 4.12.e), tal como no ensaio de referência. A menor cota registada na zona da confluência (na foz do afluente) foi $Z = -0,051$ m (para $X = 4,21$ m e $Y = 0,77$ m), mais elevada do que na configuração de referência ($Z = -0,089$ m em $X = 4,07$ m e $Y = 0,81$ m).

No canal afluente, a superfície do fundo do canal voltou a apresentar-se ondulada (Figura 4.12.d) sendo de admitir que o fundo do canal afluente seja alternadamente constituído por antidunas (regime superior) e por fundo plano superior, como ocorreu para $t = 10$ h. Na foz, persistiu a crista estacionária do fundo. A superfície livre do escoamento exibiu ligeiras ondulações, à imagem do que acontecia com o fundo (Figura 4.12.d).

Em face do exposto, o efeito do alargamento consiste no alteamento e alargamento da barra de deposição (a Figura 4.13.a ilustra a diferença entre as topografias para $Y = 0,93$ m) e na redução da profundidade das cavidades de erosão no canal principal (Figura 4.13.c ilustra a diferença entre as topografias das duas configurações para $Y = 0,09$ m), quer na margem exterior do canal quer na foz do afluente (Figura 4.13.c e 4.13.d).

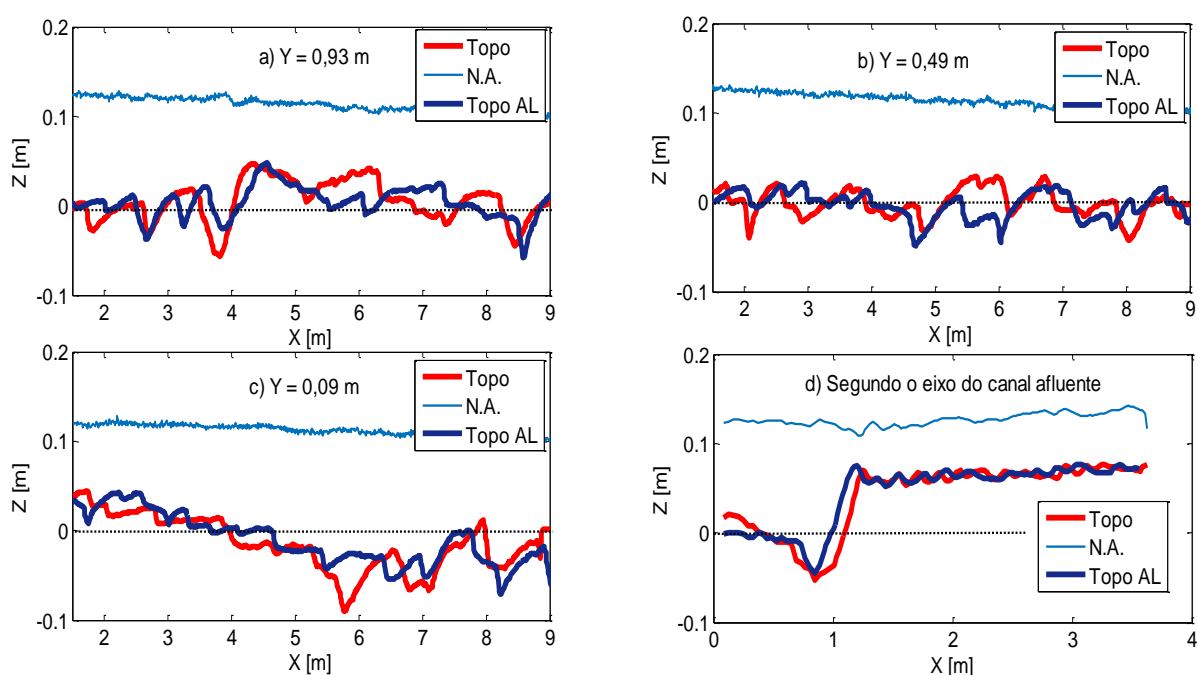


Figura 4.13: Perfis longitudinais do fundo e da superfície livre (²) para $T = 12$ h, nas configurações de referência e alargada, para a) $Y = 0,93$ m, b) $Y = 0,49$ m, c) $Y = 0,09$ m, d) segundo o eixo do canal afluente e e) topografia do fundo do canal.

No alargamento, a morfologia já caracterizada para $t = 10$ h manteve-se praticamente inalterada. A Figura 4.14 mostra cinco zonas distintas. Junto às margens do alargamento, registavam-se zonas de cotas mais elevadas (zonas 1 e 2), denominadas anteriormente por patamares de deposição. As zonas 3 e 4 constituem fundões. Finalmente, a zona 5 constitui o “corredor” central do escoamento de água e areia e que inclui o talvegue do alargamento.

(²) Nas legendas, “Topo” refere-se às cotas de fundo na situação de referência, “N.A.” às cotas da superfície livre e “Topo AL” refere-se às cotas do fundo no ensaio realizado com foz do afluente alargada

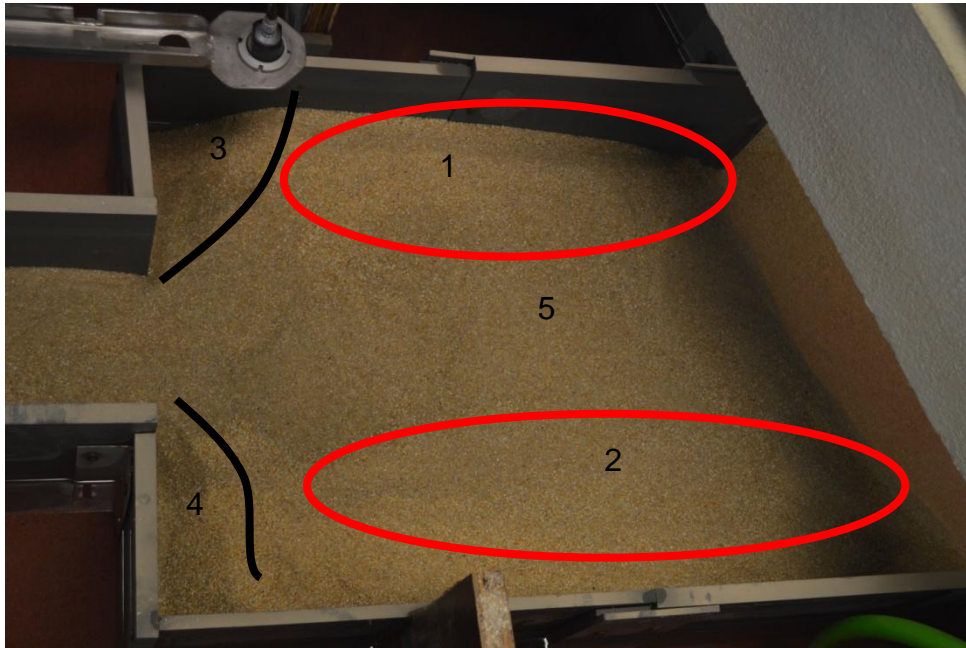


Figura 4.14: Cinco zonas topográficas do alargamento no equilíbrio.

4.2.2 Outras observações relevantes

À semelhança do que se fez no ensaio de referência, foi introduzido um corante na secção de montante do canal afluente para se visualizar a junção dos escoamentos principal e afluente. Nota-se também neste ensaio que o corante não se dispersava na totalidade da largura do canal principal, progredindo para jusante da confluência sempre junto à margem interior.

Em segundo lugar, foi interessante verificar que, em termos gerais, a repartição espacial (em planta) do corante ao longo do canal principal, coincidia com a localização da barra de sedimentos. A utilização do referido corante nos dois ensaios permitiu comparar a respectiva distribuição espacial. No ensaio com configuração alargada, o corante parece ter ocupado uma maior largura (ver Figuras 4.7 e 4.15). O facto de a foz ser alargada é razão quase exclusiva para essa situação. Uma vez que o corante permite traçar, aproximadamente, o percurso do escoamento afluente, revela-se uma maior intromissão (ocupando maior largura do canal principal) do escoamento afluente no canal principal.

Um terceiro aspecto de interesse é a distribuição do corante dentro do alargamento. Com efeito, o registo fotográfico permite concluir que não existe uma distribuição simétrica do corante neste espaço. A Figura 4.16 mostra um desvio do corante na direcção de jusante à medida que o escoamento se aproxima da confluência, fazendo-se desse modo sentir a influência de montante no escoamento afluente dentro do alargamento.



Figura 4.15: Imagem dos escoamentos confluentes com presença de corante.



Figura 4.16: Imagem da dispersão do corante no canal afluente.

Merece registo ainda, o facto de, a montante da confluência, a topografia do fundo do canal principal ser caracterizada por cotas mais elevadas junto à margem exterior do canal e menos elevadas junto à margem interior (Figura 4.17). A jusante da confluência, a situação inverte-se, uma vez que a barra de deposição se encontra na margem interior e o “corredor” de erosão se encontra na margem exterior. As duas situações conjugam-se, parecendo dar origem a meandrização incipiente, à imagem do que acontecia para a configuração de referência.

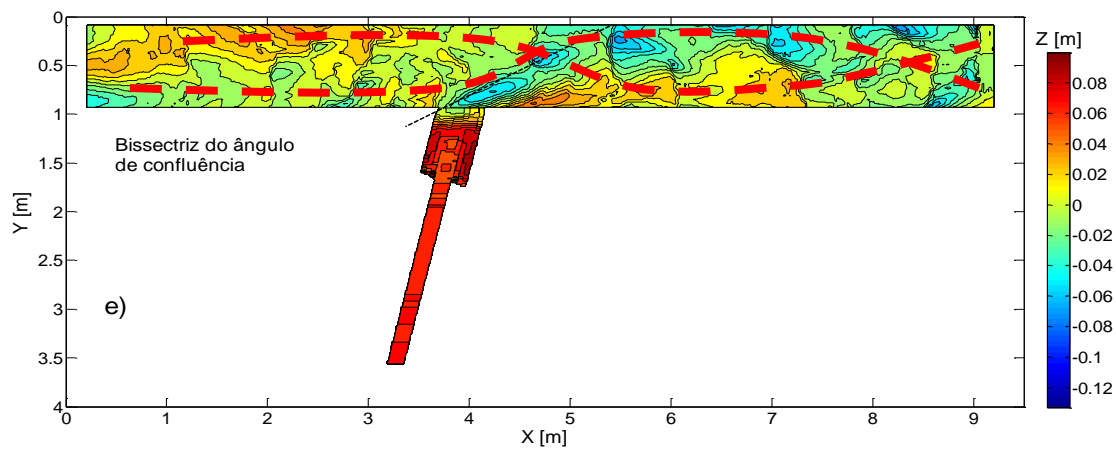


Figura 4.17: Topografia do fundo dos canais em $T = 12$ h.

Finalmente devem ser assinaladas formas do fundo particulares registadas tanto no ensaio de referência como no ensaio com configuração largada que se caracterizavam pela existência de semi-cilindros justapostos visíveis nas Figuras 4.18.a e 4.18.b.



a)



b)

Figura 4.18: Formas do fundo no canal principal a) para a configuração de referência e b) para a configuração alargada

A disposição espacial destas formas permitiu conjecturar que a origem das mesmas se encontra na existência de vórtices helicoidais com eixo horizontal segundo a direcção do canal principal. Ao embaterem, os vórtices levantam material sólido do fundo do canal formando as cristas observáveis na Figura 4.18 que definem os referidos semi-cilindros.

5. Discussão de resultados

5.1. Introdução

No presente capítulo procede-se à discussão dos resultados apresentados no capítulo 4, comparando-os entre si e ainda com os resultados de Leite Ribeiro *et al.* (2012) e de Guillén-Ludeña *et al.* (2015).

5.2 Configuração de referência

5.2.1. Morfologia do fundo

No início do ensaio com a configuração de referência ($t = 1$ h), o fundo do canal principal exibiu uma pequena cavidade junto da margem interior do canal ($Y = 0,93$ m), prolongando-se esta depressão cerca de 0,20 m para jusante da foz do canal afluente. Como, para $t = 1$ h, o material sólido abastecido ao afluente ainda não tinha chegado à confluência, a existência da cavidade de erosão junto ao canto de jusante prova, de acordo com Mosley (1976), que a estrutura do escoamento em confluências com elevados ângulos de junção, como é o caso, está na origem da referida cavidade de erosão. A esta cavidade está associado o facto de o escoamento no canal principal mergulhar sob o jacto formado pelo canal afluente. O jacto situa-se na parte superior do escoamento devido ao desnível entre fundos e esta estrutura em camadas origina vórtices com forte capacidade erosiva e, por isso, origina a própria cavidade.

O desnível entre os fundos dos dois canais acentuou-se com o passar do tempo. Guillén-Ludeña *et al.* (2015) defende que o desnível se deve a um maior caudal sólido no canal afluente, como no caso deste ensaio, uma vez que o caudal sólido por unidade de largura do canal afluente era 5,55 vezes maior do que o do canal principal ($\frac{Q_{st}}{b} = 3,33 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ e $\frac{Q_{sm}}{b} = 0,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$). Refira-se ainda que o desnível registado na fase de equilíbrio se aproximou de 0,11 m (0,108m) enquanto Leite Ribeiro (2012) e Guillén-Ludeña *et al.* (2015) registaram 0,09 m. Embora a diferença seja de apenas 0,02 m, constata-se que a discordância é mais acentuada. Relembrando os parâmetros e variáveis de controlo apresentados no capítulo 3, o caudal sólido imposto no canal afluente foi $0,5 \text{ kg}/\text{min}$, mais elevado do que o de Leite Ribeiro (2012) ($0,3 \text{ kg}/\text{min}$) e igual ao imposto por Guillén-Ludeña *et al.* (2014). Deste modo pode-se explicar o maior desnível entre fundos relativamente ao observado por Leite Ribeiro (2012). No entanto, tal justificação não é compatível com o maior desnível relativamente ao registado por Guillén-Ludeña *et al.* (2015) uma vez que os caudais sólidos de ambos os ensaios foram iguais. O desnível dependerá também do caudal líquido: no presente trabalho, o caudal do afluente foi $5,6 \text{ l}/\text{s}$ enquanto Leite Ribeiro (2012) utilizou $2 \text{ l}/\text{s}$ e o de Guillén-Ludeña *et al.* (2015) foi $3 \text{ l}/\text{s}$. Conjectura-se, deste modo, que o desnível depende do caudal sólido mas também do caudal líquido impostos ao canal afluente.

A importância do desnível foi estudada por vários autores, havendo alguma concordância quanto à influência deste acidente topográfico na hidrodinâmica e na restante morfologia do fundo,

nomeadamente 1) nas frentes de deposição junto à foz, 2) na ausência de uma zona de recirculação do escoamento que começaria a jusante do canto jusante da confluência se os fundos fossem fixos, planos e coplanares, 3) na presença de uma barra de deposição de sedimentos na margem interior do canal principal a jusante da confluência e 4) na presença de uma cavidade de erosão na zona da confluência no canal principal. Todos estes aspectos foram confirmados no ensaio discutido neste parágrafo.

Constatou-se ainda que, ao longo do ensaio, o alinhamento da cavidade de erosão gerada na foz do afluente pela junção dos escoamentos foi coincidindo com a bissetriz do ângulo de junção (Figura 4.1 a 4.4), tal como sugerido por Mosley (1976). Observou-se também que o alinhamento das várias cavidades de erosão registadas nos diferentes tempos de medição apresentaram uma disposição curva em planta, coincidente com a zona de velocidades máximas do escoamento (Figura 4.4.e), corroborando o modelo teórico de Best (1987), apresentado anteriormente no parágrafo 2.3.1.

Essa zona de erosão marcada na foz do canal afluente estava intimamente ligada à existência e à localização da camada vertical de mistura (mixing layer) assim como da zona de deflexão do escoamento. De facto, na camada de mistura, cuja localização coincide com as espaldas da cavidade de erosão, existe elevada actividade turbulenta (induzida pelos fenómenos de fricção entre escoamentos). Ora, nas sucessivas Figuras 4.1 a 4.4, constata-se que as frentes de deposição inclinadas que definem a forma em planta da cavidade de erosão se apresentam curvas, parecendo uma extensão do escoamento afluente, delimitado pelos cantos da confluência. Segundo Best (1988), na zona da confluência, os sedimentos passam preferencialmente pelo contorno da cavidade de erosão em vez de transitarem pelo talvegue da mesma, ou seja, os sedimentos são preferencialmente transportados ao longo das espaldas da cavidade, que se constituem como “corredores” de transporte. Leite Ribeiro (2012) afirma que os sedimentos vão sendo distribuídos pela barra de deposição em função da respectiva granulometria (o diâmetro diminui à medida que a cota da barra cresce) e que são transportados em faixas que coincidem com zonas de maior actividade turbulenta, constituindo-se essas faixas como os “corredores” preferenciais de transporte. Por serem “corredores” de transporte, são constantemente alimentados em sedimentos, levando a que parte destes vá sendo depositada e vá moldando a forma das cavidades de erosão. Esta foi a dinâmica que levou à formação das espaldas que delimitam as cavidades de erosão.

A barra de deposição observada ao longo do ensaio (Figuras 4.1 a 4.4) é uma característica morfológica própria das confluências, nos termos da proposta de Best (1987). Foi observada, entre outros, por Leite Ribeiro (2012) e por Guillén-Ludeña *et al.* (2015). No presente ensaio, a barra de deposição ocupou a quase totalidade da largura do canal principal como se pode ver, por exemplo, na Figura 4.4 para $X \approx 5,70$ m.

Segundo Leite Ribeiro (2012), as barras de deposição para rácios de caudais relativamente baixos são caracterizadas pela alimentação de sedimentos maioritariamente oriundos do canal afluente como aconteceu nos ensaios do presente trabalho. Guillén-Ludeña *et al.* (2014) acrescenta que a presença da referida barra de deposição na margem interior do canal principal, imediatamente a

jusante da confluência, está associada à zona de escoamento mais lento observada junto à margem interior. A formação da referida barra advém do facto de a provisão de sedimentos ser mais importante no canal afluente do que no principal, o que, conjugado com a deflexão do escoamento, obriga os sedimentos provenientes do canal afluente a depositarem-se na margem interior do canal principal a jusante da confluência.

Convirá, acima de tudo, referir que Leite Ribeiro (2012) afirma não ter observado cavidades de erosão nos ensaios que realizou, o que colide com os resultados apresentados por Guillén-Ludeña *et al.* (2015) e com os do presente trabalho, uma vez que, em ambos, foram observadas cavidades de erosão bem marcadas.

A justificação apresentada por Guillén-Ludeña *et al.* (2015) para explicar esta diferença baseou-se nos caudais adoptados nos respectivos ensaios, por sua vez mantidos no presente estudo. Aquele autor afirma que maiores caudais, confinados na mesma largura de canal que a utilizada por Leite Ribeiro (2012), originaram velocidades maiores assim como maiores acelerações na confluência, causando maior erosão, por sua vez, traduzida numa cavidade de erosão mais profunda.

Porém, as diferenças não se cingiram à ausência de cavidades de erosão: incluíam ainda uma couraça nos ensaios de Leite Ribeiro (2012). As partículas mais finas foram sendo arrastadas ao longo do ensaio enquanto as mais grosseiras permaneceram, formando o esqueleto de uma couraça, o que contribuiu para a menor erodibilidade do fundo. Foi anteriormente referido que a ausência de tal efeito nos ensaios de Guillén-Ludeña *et al.* (2015), se ficou a dever à provisão de sedimentos ao canal principal, a qual ajudou a manter a mistura sedimentar original ao longo do ensaio. A presença de sedimentos induziu a diminuição da tensão crítica de arrastamento da mistura sedimentar, o que, para as mesmas condições hidrodinâmicas, fez aumentar a mobilidade das partículas com granulometria mais grosseira e, conseqüentemente, aumentou também a erosão no fundo do canal. No presente estudo, a ausência de couraça ficou a dever-se, por sua vez, à utilização de uma areia praticamente uniforme, insusceptível de proporcionar o seu desenvolvimento.

No canal afluente, o fundo apresentou, alternadamente, ao longo do ensaio, dois tipos de configurações diferentes: ondulações do fundo com perfil sinusoidal acentuado, característico de antidunas, e fundo praticamente plano, próprio de regime de transição. Esta alternância é compatível com o escoamento da fase líquida, caracterizado por um número de Froude aproximadamente igual a 0,7. Ao referido fundo junta-se o facto de se formar, na foz do canal afluente, uma crista estacionária no fundo cuja altura é aproximadamente 0,01 m. Esta crista não foi reportada por Guillén-Ludeña *et al.* (2015), cujos níveis do fundo incluíam uma queda abrupta. A crista pode ser observada na Figura 5.1, em que é visível que a mesma atravessava, enviesadamente e por completo, a secção do canal afluente. Não se dispondo de campos de velocidades na confluência, pode-se especular que a crista resultará da existência de um escoamento secundário (vórtice de eixo horizontal com a direcção do canal principal) com componente ascensional segundo o plano do desnível ou degrau, que tende a dificultar a descarga dos sedimentos provenientes do afluente. A crista proporciona o aumento da energia potencial das partículas que, desse modo, podem progredir para jusante.

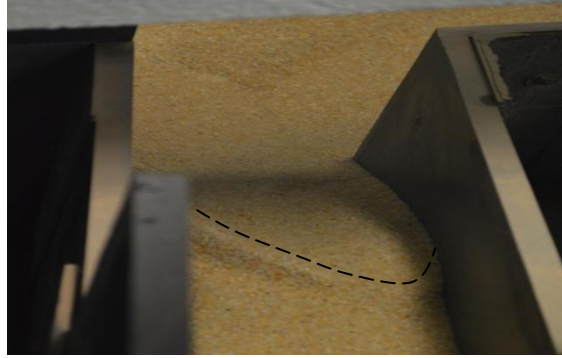


Figura 5.1: Imagem de pormenor da foz do canal afluente em que se observa a crista estacionária do fundo atravessando a largura do canal.

5.2.2 Hidrodinâmica

As características hidrodinâmicas observadas durante o ensaio apresentavam aspectos comuns com as de estudos anteriores. A ausência da zona de separação do escoamento a jusante da confluência e a presença do escoamento ascensional (up-welling flow) foram identificadas por Biron *et al.* (1993) como características típicas de confluências com fundos desnivelados.

A jusante do canto de jusante da confluência, observou-se uma zona de abrandamento do escoamento (não de recirculação). A superfície da água apresentava um carácter borbulhento junto ao canto, para, a seguir, aparentar menor velocidade sobre a barra de deposição. As bolhas de ar (ver tracejado oval nas Figura 5.2.a e 5.2.b) deslocavam-se no sentido ascensional, entre o fundo do canal e a superfície livre do escoamento, e cresciam em diâmetro de baixo para cima. Este fenómeno deve-se ao facto de, ao chegar ao canto de jusante da confluência, a lâmina líquida tender a separar-se da margem interior do canal principal. Essa tendência originará um vórtice de eixo vertical que induz perda de carga, um ligeiro abaixamento do nível da água (Figura 4.1.a a 4.4.a) e, conseqüentemente, uma zona de pressões mais baixas. Registava-se ainda um gradiente positivo do nível da água após a queda brusca, o que era consequência da acção do escoamento ascensional e do vórtice de eixo vertical.

No capítulo 4, referiu-se várias vezes que a superfície livre da água apresentava, na margem interior do canal principal, uma onda estacionária caracterizada pelo súbito aumento e queda do nível da superfície livre (Figuras 4.1.a a 4.4.a). A esta queda seguiu-se um novo aumento antes de o nível de água retomar o gradiente que apresentava a montante da confluência (ver Figura 4.4.a). Esta subida do nível de água é, provavelmente, consequência da acção do escoamento ascensional.

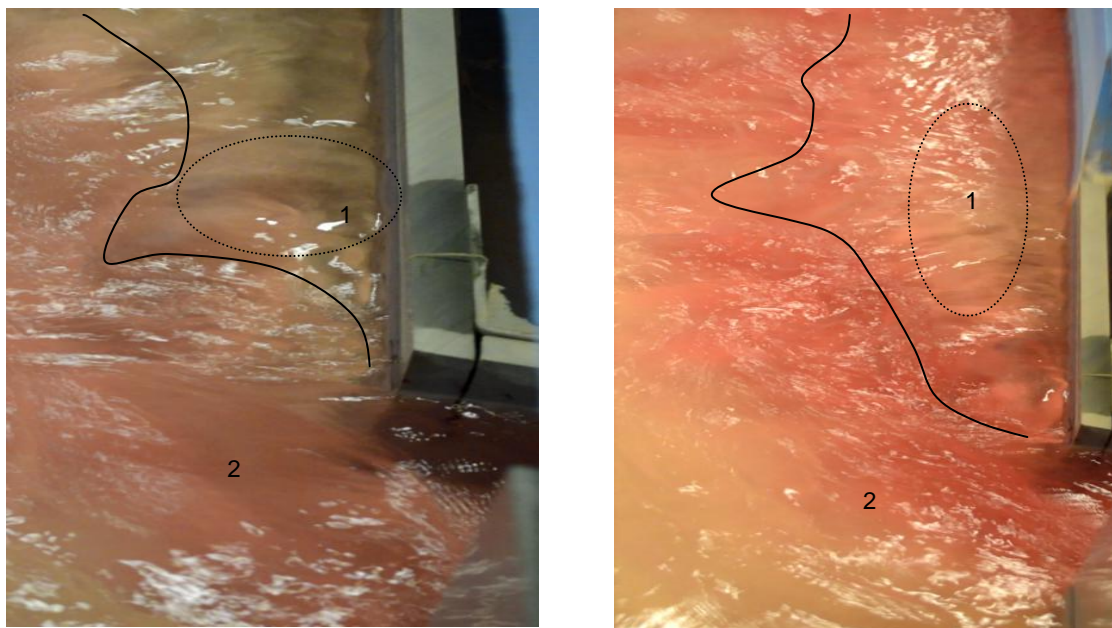


Figura 5.2: a) e b) Imagens de pormenor do canto de jusante da confluência.

Para além das estruturas do escoamento supracitadas, observou-se a presença da zona de deflexão do escoamento. Esta zona está associada à camada vertical de mistura (“mixing layer”) que coincidiu topograficamente com as espaldas da cavidade de erosão. A estes aspectos, junta-se o facto de se ter tornado nítida a zona de aceleração do escoamento junto à margem exterior do canal principal em consequência do estrangulamento provocado pela barra de deposição e pela convergência dos escoamentos afluentes. Também se observou a zona de recuperação do escoamento em que os dois escoamentos afluentes tendem a miscigenar-se e o fluido tende a homogeneizar-se em toda a secção transversal do canal, deixando de se notar a separação física entre escoamentos. Registou-se ainda a presença de uma curva de regolfo na foz do canal afluente (Figuras 4.1.d a 4.4.d). Ao longo do ensaio, o número de Froude do escoamento no canal afluente variou entre 0,72 e 0,93. Esta variação reflete o carácter instável do escoamento no canal afluente, o que permite postular a existência alternada de uma curva de regolfo do tipo f1 e de ondas estacionárias (ver Figura 5.3) como forma incipiente de um ressalto hidráulico.

Foi anteriormente referido que o escoamento no canal principal, na zona da confluência, se apresenta em duas camadas, em que o escoamento proveniente do canal principal constitui a parte inferior (mergulhando sob o escoamento do afluente) e o escoamento do canal afluente constitui a parte superior. Esta estrutura foi identificada por Leite Ribeiro (2012), tendo o autor afirmado ser uma característica de confluências caracterizadas por elevado desnível entre fundos de canais e rácios de caudal ≈ 0.1 e quantidade de movimento relativamente baixos (≈ 0.2). Esta estrutura traduz-se num escoamento mais acelerado junto ao fundo do canal principal que, segundo aquele autor, evita a formação de uma zona de recirculação do escoamento sobre a barra de deposição de sedimentos. Esta descrição encontra eco nos resultados obtidos no presente ensaio, uma vez que não se observou qualquer zona de recirculação do escoamento. Detectou-se, por observação visual, uma diferença de aspecto da superfície livre à saída do canal afluente: na zona 1 (Figura 5.2.a e 5.2.b),

adjacente à margem interior do canal, a superfície era relativamente mais lisa, apresentando bolhas de aspecto convexo; na zona 2, a superfície livre apresentava-se mais instável e agitada. Não foram identificados movimentos de recirculação na zona 1. A dispersão do corante parece, por sua vez, corresponder à expansão lateral do escoamento no sentido de jusante.

Não foi possível identificar visualmente a zona de estagnação do escoamento junto ao canto de montante da confluência porque era uma zona pequena. Ainda assim, verificou-se que, junto à margem interior do canal principal, a montante da confluência, a superfície da água se apresentava mais lisa devido à menor velocidade do escoamento (Figura 5.3). A superfície livre refletia igualmente a deflexão do escoamento proveniente do canal afluente no interior do canal principal, o que é compatível com o abrandamento nas imediações do canto montante da confluência e a aceleração do escoamento proveniente de montante no sentido da sua margem exterior. Esta estrutura do escoamento é igualmente compatível com as duas camadas já referidas, uma vez que o escoamento do afluente se constitui num jacto superficial, em consequência do desnível dos fundos.

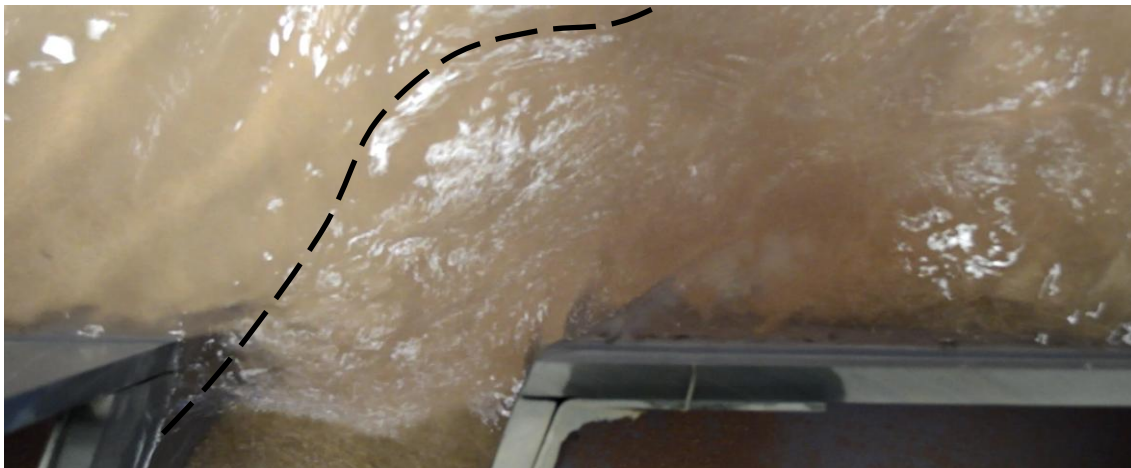


Figura 5.3: Imagem de pormenor da foz do canal afluente.

Não se tendo realizado medições de velocidades, não foi possível corroborar totalmente a hipótese de Leite Ribeiro (2012), que caracterizou a zona de estagnação do escoamento pelo aumento do nível de água, pela deflexão do escoamento e pela desaceleração do escoamento (nessa zona). Porém, a deflexão do escoamento foi claramente observada (Figura 5.2.a e 5.2.b) e o aumento do nível de água na confluência também foi registado (Figuras 4.1.a a 4.4.a), pelo que existem razões suficientes para se secundar a hipótese de Leite Ribeiro (2012).

Por outro lado, o aumento do nível de água imediatamente a jusante da foz do afluente, sobre a zona do desnível, traduz a recuperação da energia cinética na forma de energia potencial. Nalgumas situações, pode ainda refletir a presença de ondas estacionárias como formas incipientes de resalto hidráulico uma vez que a crista estacionária do fundo que se instala na foz do afluente pode ter forçado um escoamento localmente crítico ou rápido.

5.2.3 Transporte sólido

Os estudos realizados por Best (1988) revelaram um padrão de transporte de sedimentos que se caracteriza pela respectiva segregação na medida em que os sedimentos provenientes do canal principal se concentravam essencialmente na margem exterior do canal pós-confluência enquanto os sedimentos provenientes do canal afluente eram desviados principalmente para a barra de deposição. No presente caso, a transferência dos sedimentos do canal afluente para o canal principal ocorre, essencialmente, junto ao canto de jusante da confluência. As Figuras 4.1.e a 4.4.e deixam transparecer a presença de um “corredor” de transporte de sedimentos com origem naquele canto, em concordância com Best (1988). Leite Ribeiro (2012) afirma que essa transferência se faz pelo canto de jusante devido à formação da zona de estagnação no canto de montante da confluência causando uma distribuição assimétrica do escoamento, o que provoca um aumento das velocidades junto à margem de jusante do canal afluente e, conseqüentemente, uma maior capacidade local de transporte. Aquele autor afirma ainda que esse transporte se faz majoritariamente junto ao fundo, sobre a barra de deposição.

Segundo Leite Ribeiro (2012) e Guillén-Ludeña *et al.* (2015), existe, na barra de deposição, uma zona de menores pressões que coincide com um corredor de transporte dos sedimentos mais finos. Esses sedimentos finos são elevados desde o fundo até à superfície por vórtices de eixo vertical, gerados no canto de jusante da confluência, associados ao escoamento ascensional. Tal “corredor”, a existir, não foi identificado no presente ensaio porque a granulometria é uniforme e não se pode afirmar que exista um “corredor” de transporte preferencial de sedimentos finos.

Por outro lado, segundo Mosley (1967), Best (1988) e Leite Ribeiro (2012), o transporte sólido não se processa pelo talvegue da cavidade de erosão que se gera junto à foz do afluente mas por “corredores de transporte” em torno da mesma, nas faces inclinadas da cavidade de erosão. Aqueles autores afirmam serem estas as zonas de maior turbulência e, conseqüentemente, de maior capacidade de transporte sólido. A pertinência destas afirmações é reforçada pela presença de segregação de diâmetros dos sedimentos, uma vez que estes apresentam diâmetros mais grosseiros à medida que se desce do topo da barra de deposição para a sua base, como se verificou nos ensaios de Leite Ribeiro (2012). No presente estudo, como a areia era praticamente uniforme, não foi possível observar essa segregação dos sedimentos, não se podendo confirmar a existência dos “corredores de transporte” nas espaldas da cavidade de erosão.

5.3 Configuração com alargamento da foz do afluente

5.3.1 Morfologia do fundo

As principais propriedades morfológicas registadas no ensaio da configuração alargada não diferem muito das descritas na configuração de referência, incluindo, a presença de uma barra de deposição de sedimentos a jusante da confluência junto da margem interior do canal principal, a formação de um desnível ou degrau muito pronunciado entre leitos de canais confluentes, e zonas de erosão

marcada junto à margem exterior do canal principal e na foz do canal afluente. Contudo, o alargamento do canal afluente induziu mudanças morfológicas, quer no canal afluente quer no canal principal, que importa reportar e analisar.

O alargamento da foz do canal afluente levou a um aumento generalizado da cota do fundo deste canal e também da cota do canal principal. A Figura 5.4 é prova disso ao mostrar que, por um lado, a cavidade de erosão é menos marcada e que, por outro, a cota dos canais é mais elevada no ensaio da configuração alargada. Refira-se ainda a maior intrusão do fundo do canal afluente no sentido do canal principal. Esta observação (maior intrusão) corrobora os resultados de Leite Ribeiro (2012) e de Guillén-Ludeña *et al.* (2015) para um ângulo de junção de 90 °.

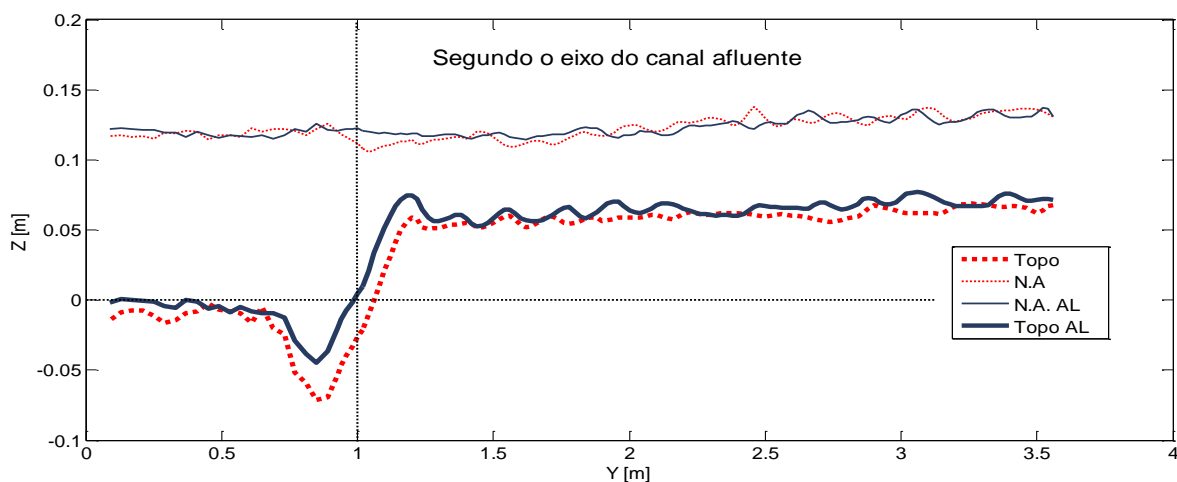


Figura 5.4: Registo topográfico dos ensaios de referência e de configuração alargada na fase de equilíbrio ⁽³⁾.

Em equilíbrio ($t = 12$ h), a face de montante da barra de deposição apresentava, na configuração com alargamento, um declive de 10,7 % para $Y = 0,93$ m enquanto, na configuração de referência, apresentava um declive mais marcado de 19,8 % (Figura 5.5). Este resultado é contrário ao de Leite Ribeiro (2012), que afirma que o declive da face montante da barra de deposição aumenta consideravelmente de 20 % para 27 % do ensaio de referência para o ensaio com configuração alargada. Esta diferença pode ser consequência das diferentes curvas granulométricas dos sedimentos. Nos ensaios de Leite Ribeiro (2012), os sedimentos de diâmetro mais grosseiro mantinham-se na parte inferior da barra de deposição, constituindo um suporte onde os sedimentos mais finos se iam acumulando, permitindo que se mantivessem estáveis para um declive mais íngreme do que o observado no presente ensaio, em que a areia é praticamente uniforme e as maiores granulometrias são muito mais pequenas, não potenciando o referido suporte.

⁽³⁾ Nas legendas, “Topo” refere-se às cotas de fundo na situação de referência, “N.A.” às cotas da superfície livre, “Topo AL” refere-se às cotas do fundo no ensaio realizado com foz do afluente alargada

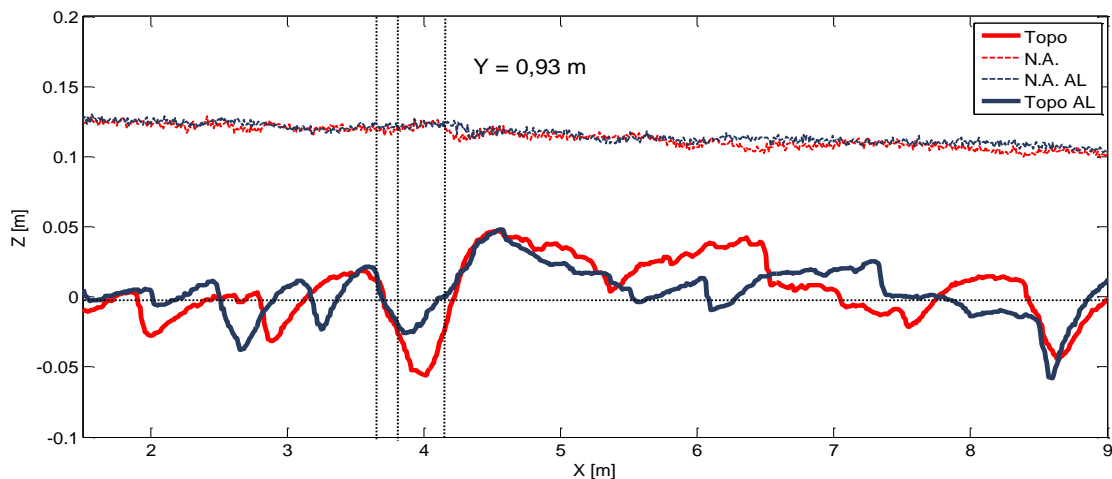


Figura 5.5: Topografia e níveis de água para o ensaio de referência e com alargamento para a margem interior do canal principal em equilíbrio dinâmico.

A barra de deposição registada em equilíbrio para o ensaio com configuração alargada era mais comprida, apresentava cotas mais altas e era menos larga do que no ensaio de referência (Figura 4.4.e e 4.12.e), tal como no estudo de Guillén-Ludeña *et al.* (2015). O andamento do talvegue no interior do alargamento apresentava-se curvo (Figura 4.4.e a 4.12.e), o que o aproximava da margem mais a jusante, reflectindo a influência do escoamento no canal afluente. Por esse motivo, os grãos de areia (tal como a água) apresentavam uma maior componente da velocidade segundo X, facilitando a respectiva entrada no canal principal, o que lhes transmitia menor quantidade de movimento segundo Y, facilitando a deposição imediatamente a jusante, junto à margem interior do canal principal.

Concomitantemente ao alteamento da barra de deposição, o alargamento induz a redução da profundidade das cavidades de erosão quer na foz do afluente quer na margem exterior do canal principal. Parece, por isso, existir uma perda do poder erosivo do escoamento. Esta perda será consequência da menor intensidade dos vórtices e da turbulência das camadas de mistura que decorre de uma “entrada mais suave do jacto” afluente no canal principal. As diferentes zonas topográficas no interior do alargamento (Figura 4.14) dão origem a diferentes alturas do escoamento. Junto à margem de jusante do alargamento (zona 2), as cotas encontram-se mais altas do que na zona central do alargamento e as velocidades são mais reduzidas, ainda que maiores do que na zona 1. Além disso, o escoamento pelo “corredor” central apresentava-se mais largo do que na configuração de referência, conduzindo a uma menor quantidade de movimento que, actuando numa direcção diferente da do canal principal, origina menor vorticidade do que no ensaio de referência. Penetrando menos segundo o canal principal, o “jacto” afluente dirige-se menos para a margem exterior e, acima de tudo, deflecte menos o escoamento principal. Daí decorre que a erosão na margem exterior do canal principal seja mais marcada no ensaio de referência do que no ensaio com configuração alargada.

No interior do alargamento, para além da zona do talvegue e dos patamares de deposição correspondentes às zonas 1 e 2 assinaladas na Figura 4.14, identificaram-se duas zonas de estagnação (zonas 3 e 4), associadas a cotas mais baixas.

As cinco zonas são qualitativamente semelhantes às referidas por Leite Ribeiro (2012) e Guillén-Ludeña *et al.* (2015), apresentando, no entanto, ligeiras diferenças, em particular, em relação a Leite Ribeiro (2012) que registou a existência de duas zonas secas à entrada do alargamento, onde se localizam as zonas 2 e 3 deste estudo.

Segundo Leite Ribeiro (2012), as diferenças morfológicas originadas na zona do alargamento constroem a largura efectiva do escoamento afluente a uma largura semelhante à existente na configuração da confluência sem alargamento. Tal situação obrigaria o escoamento a acelerar nessa largura efectiva, tornando as velocidades mais elevadas. A proposta de Leite Ribeiro (2012) é, assim, bastante diferente da que aqui se defende.

Segundo aquele autor, é o acréscimo de velocidades na foz do afluente que origina a maior penetração do fundo canal afluente no canal principal, que também ocorreu no presente estudo, e o maior desnível entre fundos de canais confluentes. Registava-se aqui uma diferença, uma vez que, no presente estudo, o desnível entre fundos confluentes foi maior na configuração de referência do que na configuração alargada. Segundo a proposta aqui apresentada é a menor intensidade dos vórtices e da turbulência decorrente do choque menos intenso dos dois escoamentos que explicam que o fundo do afluente alargado possa penetrar mais no leito principal e que a cavidade de erosão seja menos profunda, uma vez que a capacidade de transporte dos sedimentos (capacidade de limpeza) é menor.

Em face da redução da capacidade erosiva à saída da confluência, o alargamento do canal afluente induz um aumento da cota do canal afluente e um ligeiro aumento do nível de água nesse canal, como indica a Figura 5.5, o que garante que a areia é efectivamente entregue ao canal principal.

Embora o cálculo da média dos valores da profundidade do escoamento, no presente caso, tenha revelado uma profundidade de 0,084 m para a configuração de referência e uma profundidade de 0,074 m para a configuração alargada e que tal situação sugira a existência de maiores velocidades na foz do afluente no caso do ensaio com alargamento, convirá lembrar que esta medição foi feita segundo o eixo do canal afluente, não sendo representativa da globalidade do alargamento.

5.3.2 Hidrodinâmica

A presença do alargamento na foz do canal afluente só localmente alterou a hidrodinâmica no canal afluente e no canal principal. Não afectou de forma evidente o andamento da superfície livre do escoamento no canal principal a montante e a jusante da confluência. Constatou-se, ainda assim, como mostra a Figura 5.6, uma ligeira diferença em $X \approx 4$ m: no ensaio de referência, a superfície livre do escoamento apresentou a onda estacionária profusamente documentada para $Y = 0,93$ m enquanto, no ensaio com alargamento, essa onda era menos evidente e ocorria mais a jusante, em X

≈ 4,34 m. Como seria expectável, o alargamento não reduz, assim, a segurança no escoamento de cheias.

A este aspecto acrescentou-se o facto de, na foz do canal afluente, existir, tal como acontecia para a configuração de referência, uma onda como forma incipiente de um ressalto hidráulico (ver Figuras 5.6 e 5.7).

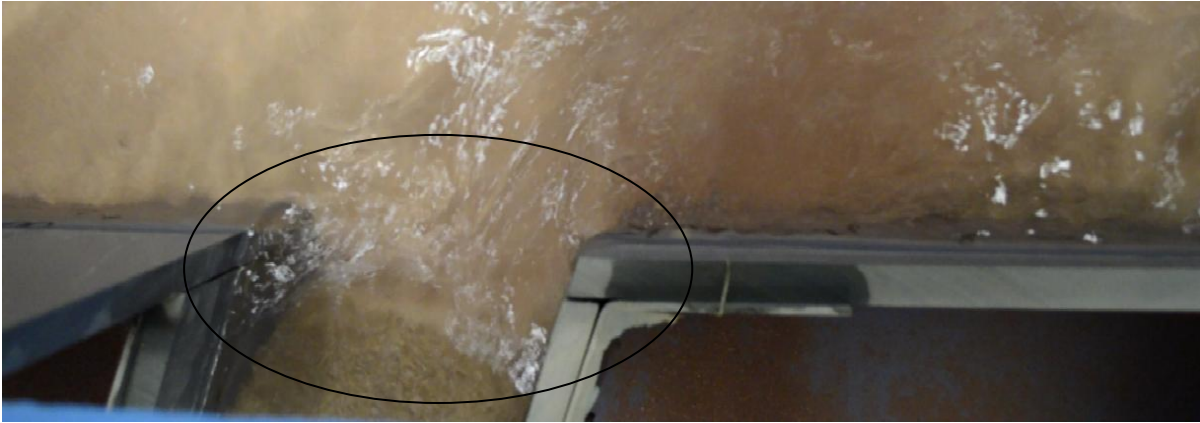


Figura 5.6: Imagem de pormenor da confluência na configuração de referência.

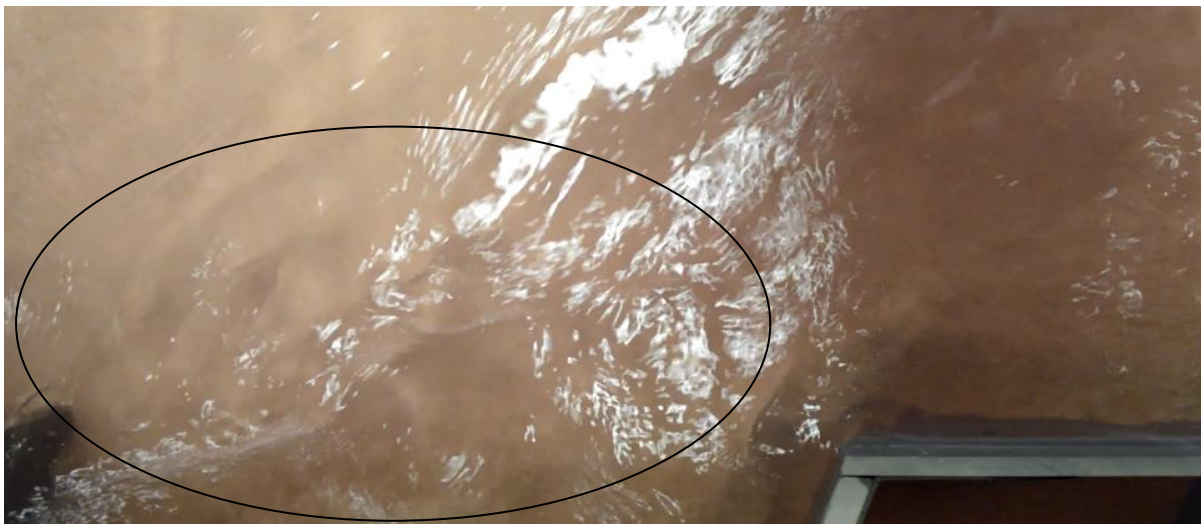


Figura 5.7: Imagem de pormenor da confluência na configuração alargada.

A Figura 5.8 revela, através da configuração da superfície corada, que o escoamento se separava das paredes do alargamento, junto ao aumento brusco de largura, e se expandia lateralmente para jusante. Porém, em face do curto comprimento do alargamento, o escoamento não era simétrico devido à influência do escoamento no canal principal: só voltava a colar à parede de jusante do alargamento, corroborando a descrição apresentada por Leite Ribeiro (2012).

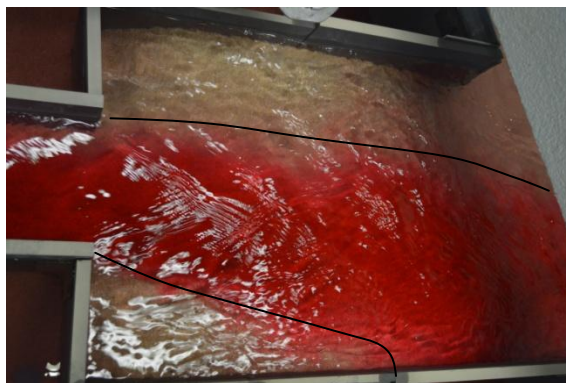


Figura 5.8: imagem de pormenor do canal afluente e alargamento com expansão do corante no canal afluente.

O fenómeno da separação do escoamento e correspondente estagnação nas zonas 1 e 2 pode explicar parte do aumento do nível da superfície livre na foz do afluente alargado (mais 0,01 m) por comparação com o nível observado no ensaio de referência.

5.3.3 Transporte sólido

A topografia do alargamento ajudou a entender melhor os padrões de transporte sólido. As zonas 3 e 4 presentes na Figura 5.9 eram as que apresentavam maiores profundidades dentro do alargamento. Estas zonas apresentavam-se como fundões e advêm da hidrodinâmica local. Ao chegar ao alargamento, o escoamento separa-se das paredes e é encaminhado para jusante sem que o filão contacte os cantos de montante do alargamento. Poucos são os sedimentos que aí se depositam, uma vez que seguem aproximadamente a trajectória do escoamento líquido. Por outro lado, como as zonas 3 e 4 são zonas de recirculação de água, criam-se vórtices de eixo vertical que, apesar de serem de fraca intensidade, vão impedindo a sedimentação nestas zonas.

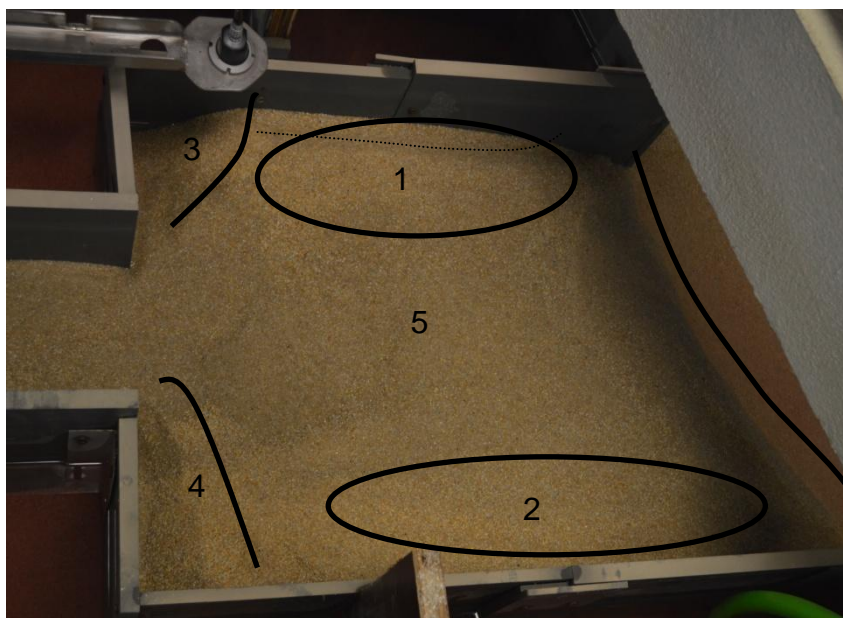


Figura 5.9: Imagem de pormenor da confluência.

As zonas 1 e 2 constituem-se como os patamares dentro do alargamento. O comprimento da zona 1 é ligeiramente menor do que o da zona 2. Esta diferença é visível e ilustrada na Figura 5.9, onde a linha curva da direita define aproximadamente a base do desnível que ocorre na foz do alargamento. Por outro lado, o filão do escoamento no interior do alargamento tende a aproximar-se da respectiva margem mais a jusante. Como se referiu previamente, este desvio decorre da influência do escoamento do canal principal sobre o canal afluente, contribuindo para que o percurso do material sólido também seja desviado no mesmo sentido.

Este efeito não é suficiente para se fazer sentir junto da margem de jusante do alargamento, o que leva a que os sedimentos depositados lateralmente estabeleçam um patamar mais comprido na zona 2 do que na zona 1. Por outro lado, em face da curvatura do filão, do talvegue e, por consequência, da trajectória das partículas de areia, a frente de deposição é mais longa a jusante da zona, intrometendo-se mais no espaço do canal principal.

Convirá, ainda, ter presente que a margem lateral de jusante do alargamento é mais comprida do que a de montante, uma vez que o canal afluente faz um ângulo de 70° com o canal principal a montante, o que contribui para o mesmo efeito.

Como corolário do exposto, a zona de maior caudal sólido situa-se relativamente perto da parede lateral de jusante da embocadura, alimentando maioritariamente a barra de deposição, imediatamente a jusante do canto de jusante da foz da confluência.

Conclusões

A canalização dos cursos de água naturais, enquadrada em projectos de protecção contra cheias, tem causado a perda de valor ecológico dos habitats naturais, ripícolas e aquáticos, no conjunto da rede fluvial. A existência de traçados de rio lineares e monótonos, onde falta diversidade estrutural, como é o caso de fundões (pegos), bancos de sedimentos ou rápidos, evidencia essas situações de maior degradação ecológica, que tendem a traduzir-se posteriormente numa perda de diversidade em termos de fauna e flora. Em face do exposto, a filosofia actual de intervenção fluvial tem procurado conjugar o aumento do valor ecológico dos meios aquáticos com a melhoria da protecção contra cheias. A reabilitação de confluências constitui-se como um elemento central da filosofia de preservação do ambiente fluvial, uma vez que pretende contribuir para a formação de morfologias de fundo heterogéneas, permitindo o desenvolvimento de habitats naturais diferenciados, contribuindo desse modo para um aumento da biodiversidade. Foi com o propósito de sintetizar recomendações práticas a aplicar em futuros projectos de reabilitação fluvial que se desenvolveu o presente trabalho.

Nos ensaios a que respeita a presente dissertação foi estudada a morfologia de uma confluência, instalada em laboratório, caracterizada por um ângulo de junção de 70°, tendo em vista a identificação das diferenças morfológicas induzidas pelo alargamento do canal afluente junto à foz. Os ensaios que enformam a presente dissertação permitiram ainda identificar diferenças morfológicas e hidrodinâmicas relativamente aos resultados apresentados por Leite Ribeiro (2012) e por Guillén-Ludeña (2015).

Os testes efectuados confirmaram a presença de características morfológicas próprias de confluências definidas por Best (1987), Biron *et al.* (2008) e Leite Ribeiro (2012), tendo, no entanto, revelado algumas diferenças.

No ensaio realizado com a configuração alargada, a barra de deposição que se encontrava na margem interior do canal principal a jusante da confluência, para o ensaio de referência, era menos larga, mais comprida e ligeiramente mais alta do que para o ensaio de referência. O alargamento induziu ainda a redução da profundidade das cavidades de erosão, quer na foz do afluente quer na margem exterior do canal principal. A estas observações acrescenta-se o facto de o alargamento ter apresentado uma diversidade topográfica, caracterizada por fundões, patamares e por um filão por onde passava o talvegue do alargamento. Nestas zonas topográficas encontravam-se zonas de estagnação ou de escoamento mais rápido, inexistentes no canal afluente para a configuração de referência.

Os resultados dos ensaios analisados e discutidos no presente trabalho reiteram a existência do escoamento ascensional (“upwelling flow”) sugerido por Biron *et al.* (2008). No entanto, a existência de um ressalto hidráulico na foz do afluente registada por Leite Ribeiro (2012) e por Guillén-Ludeña *et al.* (2015) não foi observada de forma clara no presente trabalho. Foram registadas ondas estacionárias oblíquas, que esporadicamente se constituíam como formas incipientes de ressalto hidráulico, uma vez que a crista estacionária de fundo, na foz do afluente, pode ter forçado um

escoamento localmente crítico ou rápido nesse local. A novidade neste aspecto reside no facto de a referida crista ter sido um elemento topográfico registado pela primeira vez no presente trabalho.

Perante o exposto, a análise desenvolvida no presente trabalho revelou a presença de uma maior diversidade estrutural no canal afluente, traduzida na existência de diferentes zonas topográficas, velocidades de escoamento variadas e distintas trajectórias de transporte sólido, propícia a uma maior conectividade lateral e longitudinal da confluência (interacção entre meio aquático, ripário e terrestre).

O canal principal e a confluência apresentaram ainda uma topografia distinta entre os dois ensaios, reflexo da menor intensidade do efeito de “jacto” por parte do escoamento afluente, ao penetrar no canal principal, tendo a erosão diminuído junto da foz do afluente, assim como junto da margem exterior do canal principal, enquanto a barra de deposição se apresentou mais longa. Estes resultados sugerem uma amplificação das características morfológicas e hidráulicas de confluências com fundos desnivelados, fruto de uma maior diversidade de velocidades de escoamento e uma menor deflexão do escoamento principal. Por outro lado, uma vez que a barra de deposição, a jusante da confluência, na margem interior do canal principal, é mais estreita, o escoamento principal sofre menor deflexão.

Os resultados do presente trabalho convergem com os de Leite Ribeiro (2012) e de Guillén-Ludeña (2015) na medida em que todos revelam um aumento da heterogeneidade morfológica da confluência. No entanto, o presente estudo distinguiu-se pelo facto de ter sido realizado numa instalação em que o canal principal apresentava o dobro da largura dos canais utilizados pelos autores precedentes. Este é um factor de contraste entre estudos, que pode estar na origem da disparidade dos resultados observados, uma vez que foi considerado neste estudo haver uma menor intensidade do efeito de “jacto” por parte do escoamento afluente, hipótese que colide com a explicação de Leite Ribeiro (2012) que consiste num aumento da quantidade de movimento e por isso um aumento da intensidade da turbulência na confluência.

Este estudo sugere que o alargamento dá origem a zonas de refúgio para a fauna aquática em ocasiões de cheias, o que concorre com Grift *et al.* (2001), quando este defende que as zonas pouco profundas e com baixas velocidades de escoamento oferecem condições adequadas à desova e à criação de espécies reofílicas (espécies que nadam contra a corrente para amadurecer sexualmente e reproduzir).

As zonas de estagnação e de águas rápidas que se encontram no alargamento servem de refúgio a espécies aquáticas e sub-aquáticas e garantem condições adequadas à procriação de múltiplas espécies animais e vegetais. Os patamares junto das margens do alargamento facilitam o crescimento de vegetação ripícola, gerando, conseqüentemente, núcleos de biodiversidade. Esta conectividade lateral é essencial ao desenvolvimento de certas espécies anfíbias, artrópodes e insectos aquáticos que necessitam dessa variedade de *habitats* para poderem completar o seu ciclo de vida.

A temática analisada ao longo estudo focou-se essencialmente no plano da reabilitação ecológica dos cursos de água. No entanto, o estudo da morfologia das confluências pode apresentar grande interesse noutros projectos de intervenção fluvial como são a existência de barragens em rios afluentes, nomeadamente aqueles em que a barragem se encontre próxima da foz do afluente (caso da barragem de Foz Tua) e que alteram o regime de transporte de sedimentos.

Convirá ainda referir que o modelo empregue nos ensaios analisados na presente dissertação era um modelo à escala de uma confluência fluvial, no entanto, as margens neste modelo eram rígidas (betão ou PVC), o que nem sempre é verificado nos rios intervencionados. Esta situação impede que a morfologia estabeleça contacto com as margens e desenvolva uma zona ripária mais diversificada.

Em síntese, o alargamento do trecho terminal de um curso de água afluente previamente intervencionado constitui uma solução eficaz para o desenvolvimento e melhoria de processos morfológicos e ecológicos em confluências fluviais, o que vai ao encontro do objectivo procurado no projecto em que se insere a presente dissertação.

Bibliografia

- Best, J.L. 1987. *Flow dynamics at river channel confluences: Implications for sediment transport and bed morphology*, The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists
- Best, J.L. 1988. *Sediment transport and bed morphology at river channel confluences*. *Sedimentology* 35, 481-498
- Bidaud, L. (2010). *Etude morphologique de confluences alpines. Application à la jonction du Rhône et de la Borgne*. Master Project. LCH-EPFL.
- Biron, P., Best, J.L., & Roy, A.G. 1996. *Effects of bed discordance on flow dynamics at open channel confluences*. 676 *Journal of Hydraulic Engineering/ December 1996*
- Biron, P., Roy, A.G., Best, J.L., and Boyer, C.J. (1993). *Bed Morphology and sedimentology at the confluence of unequal depth channels*, *Geomorphology*, 8, 115-129.
- Biron, P., Roy, A.G. and Best, J.L. (1996). *Turbulent Flow Structure at concordant and discordant open-channel confluences*, *Experiments in Fluids*, 21, 437-446.
- Boyer, C., Roy, A.G., & Best, J.L. 2006. *Dynamics of a river channel confluence with discordant beds: Flow turbulence, bed load sediment transport, and bed morphology*. *Journal of Geophysical Research*, 111, 1-22
- Bradbook, K.F., Lane, S.N., Richards, K.S., Biron, P.M., and Roy, A.G. (2001). *Role of bed discordance at asymmetrical river confluences*, *Journal of Hydraulic Engineering*, 127, 351-368.
- Cardoso, A.H., 1998. *Hidráulica Fluvial*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1998
- Fujita, I., and Komura, S. (1989). *Visualization of flow at a confluence*, in *Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements*, International
- Guillén-Ludeña, S., Franca, M.J., Schleiss, A.J., and Cardoso, A.H. (2014). *Morphodynamic differences induced by different confluence angles in widen confluences*, In A. J. Schleiss, G. de Cesare, M. J. Franca, & M. Pfister (Eds.), *River Flow 2014* (pp. 983–988). CRC Press 2014. doi:10.1201/b17133-133
- Grift, R.E.; Buijse, A.D., Van Densen, W.L.T., Klein Breteler, J.T. (2001). *Restoration of the river-floodplain interaction: benefits for the fish community in the River Rhine*. *Archiv fur Hydrobiologie – Supplement* 135: 173-185.
- Kennedy, B.A. (1984), *On Playfair's law of accordant junctions*, *Earth Surface Processes & Landforms*, 9, 153-173.
- Julien, P.Y., and Klaassen, G.J., 1995. *Sand-Dune Geometry of Large River During Floods*, *Journal of Hydraulic Engineering*, September 1995 / 663.

- Leite Ribeiro, M. (2011). *Influence of Tributary Widening on Confluence Morphodynamics*. École Polytechnique Fédéral de Lausanne, Lausanne, Switzerland.
- Leite Ribeiro, M., Blanckaert, K., Boillat, J.-L., Schleiss, A., 2012: *Elargissement local des embouchures*. In: *Fiches sur l'aménagement et l'écologie des cours d'eau*, OFEV, Berne. Fiche 5.
- Leite Ribeiro, M., Blanckaert, K., Roy, A.G., & Schleiss, A.J. 2012a. *Flow and sediment dynamics in channel confluences*. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 117,1-19.
- Leite Ribeiro, M., Blanckaert, K., Roy, A.G., & Schleiss, A.J. 2012b. *Hydromorphological implications of local tributary widening for river rehabilitation*. *Water Resources Research* 48, 1-19.
- Meile, T. (2006). *Hydropeaking in Watercourses*, in EAWAG News, edited, pp 28-29.
- Mosley, M.P. 1976. *An Experimental Study of Channel Confluences*. *The Journal of Geology* 84, 535-562.
- Rhoads, B.L., and Kenworthy, S.T. (1995). *Flow structure at an asymmetrical stream confluence*, *Geomorphology*, 11, 273-293.
- Rhoads, B.L., and Kenworthy, S.T. (1998). *Time-averaged flow structure in the central region of a stream confluence*, *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 171-191.
- Rhoads, B.L., and Sukhodolov, A.N. (2004). *Spatial and temporal structure of shear layer turbulence at a stream confluence*, *Water Resources Research*, 40.
- Rhoads, B.L., and Sukhodolov, A.N. (2008), *Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow within a confluence mixing interface*, *Water Resources Research*, 44.
- Roy, A.G., and Bergeron, N. (1990). *Flow and particle paths at a natural river confluence with coarse bed material*, *Geomorphology*, 3, 99-112.
- Scheidegger, C., Werth, S., Gostner, W., Schleiss, A., Peter, A., 2012: *Amélioration de la dynamique*. In: *Fiches sur l'aménagement et l'écologie des cours d'eau*, OFEV, Berne. Fiche 1.
- Schleiss, A.J. (2006), *River Dynamics and Flood Protection: a Contradiction in Terms?*, in EAWAG News, edited, pp. 18-20.
- SRCE (2008), *Troisième Correction du Rhône. Sécurité pour le futur. Rapport de Synthèse du Plan d'Aménagement.*, 157 pp, Canton du Valais. Service de Routes et Cours d'Eaux.
- Sukhodolov, A.N., and Rhoads, B.L. (2001). *Field investigation of the three-dimensional flow structure at stream confluences 2. Turbulence*, *Water Resources Research*, 37, 2411-2424.

Wampfler, S., Leite Ribeiro, M., and Schleiss, A.J. (2014). *Morphodynamic changes in a natural river confluence due to a hydropower modified flow regime*, Swiss Competences in River Engineering and Restoration – Schleiss, Speerli & Pfammatter (Eds), Taylor and Francis Group, London

Weber, C., Schager, E., & Peter, A. 2009. *Habitat diversity and fish assemblage structure in local river widening: A case study on a swiss river*. River Research and Publications, 25: 687-701.

Werth, S., Alp, M., Karpati, T., Gostner, W., Weibel, D., Scheidegger, C., Peter, A., 2012: *Biodiversité dans les cours d'eau*. In: *Fiches sur l'aménagement et l'écologie des cours d'eau*, OFEV, Berne. Fiche 2.

Werth, S., Alp, M., Junker, J., Karpati, T., Weibel, D., Peter, A., Scheidegger, C., 2012: *Connectivité des cours d'eau*. In: *Fiches sur l'aménagement et l'écologie des cours d'eau*, OFEV, Berne. Fiche 4