

20 ANOS DE EXPERIÊNCIA EM APLICAÇÕES COM ANEMOMETRIA LASER DOPPLER 20 Years of Experience in Laser Doppler Anemometry

F. TAVEIRA-PINTO ⁽¹⁾, M. FERNANDA PROENÇA ⁽²⁾, RODRIGO MAIA ⁽³⁾,
J. PEDRO PÊGO ⁽⁴⁾, MARIA MANUELA LIMA ⁽⁵⁾,
ANA CRISTINA NEVES ⁽⁶⁾ e ELSA CARVALHO ⁽⁷⁾

⁽¹⁾ Professor Associado com Agregação, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, fpinto@fe.up.pt

⁽²⁾ Professor Auxiliar, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, fproenca@fe.up.pt

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

⁽⁴⁾ Professor Auxiliar Convidado, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, jppego@fe.up.pt

⁽⁵⁾ Professor Auxiliar, Escola de Engenharia da Universidade do Minho,
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães

⁽⁶⁾ Doutorada em Engenharia Civil, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, acneves@fe.up.pt

⁽⁷⁾ Assistente Estagiária, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, elsac@fe.up.pt

Resumo

O desenvolvimento da anemometria laser Doppler (LDA-Laser Doppler Anemometry) teve um impacto significativo na investigação nas áreas da Mecânica dos Fluidos e da Hidráulica, obtendo desde o início de um bom acolhimento por parte da comunidade científica. As características desta técnica de medição (não intrusiva, com elevada resolução temporal e espacial) foram determinantes para o aprofundar do conhecimento dos escoamentos de fluidos, o que vem sendo realizado desde o início dos anos setenta. A anemometria laser Doppler foi e é, também, o complemento ideal para as técnicas de computação numérica que o início da era digital trouxe ao estudo dos fluidos, porquanto permite uma aproximação euleriana aos problemas de Hidráulica. Desde cedo, o Laboratório de Hidráulica, da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto apostou nesta técnica para realizar estudos científicos que permitiram aprofundar o conhecimento dos fenómenos de escoamento de fluidos, nas mais diversas áreas.

Neste artigo serão apresentados vários exemplos correspondentes a estudos enquadrados em teses de doutoramento, realizadas neste Laboratório ou com a sua colaboração.

Palavras-chave: Laboratório de hidráulica da FEUP, anemometria laser doppler, mecânica dos fluidos.

Abstract

The development of Laser Doppler Anemometry (LDA) technique had a significant impact on the areas of fluid mechanics and Hydraulics and was immediately welcomed by the scientific community. The characteristics of this measuring technique (non-intrusive, high spatial and temporal resolution) were determinant to improve the knowledge of fluid flows since the seventies. Laser Doppler Anemometry was and still is complementary to the numerical computation techniques which the digital era brought, since it allows an Eulerian approach to the Hydraulics' problems. Since the beginning the Hydraulics Laboratory, of the Hydraulics, Water Resources Environment Division, of the Faculty of Engineering of the University of Porto applied this technique to scientific research on several areas.

In this paper, several examples corresponding to studies fitted into PhD's made in this laboratory or with its help, will be presented.

Keywords: FEUP hydraulics laboratory, laser doppler anemometry, fluid mechanics.

1. Introdução

As primeiras referências à técnica posteriormente designada como Anemometria laser Doppler (no original inglês Laser Doppler Anemometry, LDA ou Laser Doppler Velocimetry, LDV) surgem com os trabalhos de Cummins *et al.* (1964) e Yeh e Cummins (1964).

A este primeiro sistema, do tipo "reference beam anemometry", foram adicionadas configurações alternativas que permitiram otimizar e tornar mais robusta e eficaz a medição de velocidades através da anemometria laser Doppler.

No final da década de 1960, Lehmann (1968) e vom Stein e Pfeifer (1969) apresentam a configuração “dual-beam mode”, que estabelece, quase em definitivo, o formato dos sistemas de LDA modernos.

A anemometria laser Doppler é um processo óptico que se baseia na aplicação do efeito Doppler para a determinação da velocidade de partículas contidas no meio fluido, determinando indirectamente, desta forma, a velocidade local do fluido. A primeira condição necessária para o sucesso da aplicação desta técnica de medição é que as partículas tenham uma densidade parecida com a do meio fluido e que fluem com este. Em Hidráulica esta é a regra geral, já que a água contém impurezas que actuam como partículas dispersoras da luz.

Os elementos essenciais da configuração “dual-beam mode” estão representados na Figura 1.

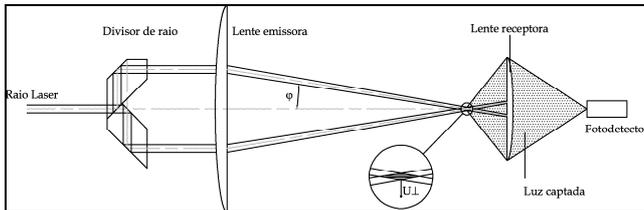


Figura 1. Elementos essenciais de um sistema de anemometria laser Doppler.

De acordo com a figura, um raio laser (luz polarizada e coerente) é dividido em dois raios paralelos, que uma lente convexa foca num ponto do espaço. O volume de intersecção dos dois raios laser denomina-se volume de controlo e é caracterizado por um padrão de planos paralelos de alta e baixa intensidade luminosa. Qualquer partícula que atrevesse o referido volume de controlo dispersa luz em todas as direcções, cuja frequência característica é ligeiramente diferente da luz emitida pelo raio laser original. A diferença entre as frequências da luz emitida e da luz dispersa pela partícula é designada como frequência Doppler, f_D , e é directamente proporcional à velocidade da partícula na direcção normal aos planos de luz no volume de controlo, ou seja, :

$$U_{\perp} = \frac{\lambda}{2 \sin \varphi} \cdot f_D' \quad [1]$$

em que U_{\perp} representa a velocidade normal aos planos de luz, λ o comprimento de onda da luz laser e φ o semi-ângulo formado pelos dois raios laser. Através de um sistema óptico mais ou menos complexo, a luz dispersa pelas partículas é recolhida na superfície sensível de um fotodetector que transforma o sinal luminoso no equivalente sinal eléctrico, de cuja análise se extrai a frequência Doppler.

De entre as vantagens comumente atribuídas à anemometria laser Doppler salientam-se as seguintes:

1. **processo não é intrusivo.** Em oposição a outros métodos, como o tubo de Pitot ou a anemometria a fio quente, o escoamento não é perturbado ou condicionado pelo instrumento de medida, já que a luz não afecta o comportamento dos fluidos em escoamentos isotérmicos.

2. **Elevada precisão espacial e temporal.** O volume de controlo tem um diâmetro de cerca de poucas dezenas de micrómetros, dimensões claramente inferiores às de outros aparelhos de medida, como por exemplo o tubo de Pitot ou uma sonda de pressão. A precisão com que se pode analisar a frequência Doppler é actualmente tão elevada que se torna virtualmente possível medir todas as escalas temporais do escoamento, desde que esteja assegurada a existência de partículas em número suficiente. Esta característica torna a anemometria laser Doppler a técnica por excelência para a medição de escoamentos altamente turbulentos, com qualidades muito superiores a outras técnicas.

3. **Não requer calibração do instrumento.** À parte a determinação do semi-ângulo entre os raios laser, φ , e que é determinável de forma precisa, esta técnica não depende da calibração dos instrumentos, sendo nesse aspecto invulgarmente única. A linearidade entre a frequência Doppler e a velocidade ortogonal são também asseguradas sem recurso a nenhum tipo de condicionamento.

4. **Medição das três componentes do campo de velocidade.** Com recurso a dois ou três pares de raios laser com comprimentos de onda diferentes é possível medir, em simultâneo, duas ou três componentes do vector velocidade.

No primeiro caso, é possível construir uma configuração óptica robusta e simples, de fácil manuseamento.

No segundo caso, a construção óptica é claramente mais complicada, razão pela qual é menos frequentemente utilizada, recorrendo-se, em alternativa, a medições não simultâneas das três componentes do vector velocidade.

5. **Determinação da direcção.** Sempre que no escoamento de verifique a existência de zonas de recirculação é necessário saber em que direcção o escoamento se processa. Um processo óptico-mecânico de condicionamento da frequência Doppler permite identificar facilmente em que direcção se processa o escoamento, o que corresponde, uma vez mais, a uma das propriedades invulgares desta técnica e que a tornam tão relevante para o estudo dos fluidos.

De entre as desvantagens atribuídas à técnica encontram-se a necessidade de acesso óptico e a necessidade de existência de partículas no fluido.

No entanto, as suas características invulgares fazem da anemometria laser Doppler um instrumento por excelência para o estudo dos escoamentos turbulentos.

Nesta comunicação serão apresentadas as contribuições de docente/investigadores da SHRHA para o estudo da Mecânica dos Fluidos que empregaram a anemometria laser Doppler como técnica de medida.

Na secção 2 os trabalhos serão apresentados por ordem cronológica, nomeadamente Proença (1987), Maia (1992), Lima (2000), Taveira-Pinto (2001), Pêgo (2007), Neves (2008) e Carvalho (em curso). Na secção 3 será feito um resumo dos trabalhos realizados.

2. A Aplicação da Anemometria Laser Doppler no Laboratório de Hidráulica da SHRHA-FEUP

2.1. Estudo de campos de velocidades e de pressões num escoamento sob uma comporta: sua influência na estabilidade do escoamento

2.1.1. Introdução

Proença (1987) procurou, usando novas técnicas de medição em Mecânica dos Fluidos, aprofundar o conhecimento da forma como o escoamento se desenvolve em torno de uma comporta, tentando avaliar as características de interacção estrutura-fluido.

Em Engenharia Hidráulica é frequente a necessidade de utilização de dispositivos de regulação de caudais, entre os quais se encontram as comportas, cujo estudo envolve o conhecimento das acções a que estão sujeitas.

Estas acções são essencialmente de dois tipos: hidrostáticas e hidrodinâmicas, sendo, a análise destas últimas acções, variáveis no tempo, o objectivo da tese de doutoramento realizada, Proença (1987).

Tendo em atenção o tipo de escoamento originado pela presença da comporta no escoamento foram tidos em conta os estudos feitos por vários autores sobre a instabilidade de "camadas de atrito" ("shear layers"), entre os quais os de Michalke.

Este autor relacionou a forma dos perfis de velocidade com a capacidade de amplificação, por parte do escoamento, de perturbações que aí surjam, tendo considerado os perfis de velocidade genéricos da Figura 2 e estabelecido os respectivos factores de crescimento das perturbações em função da sua frequência, Figura 3.

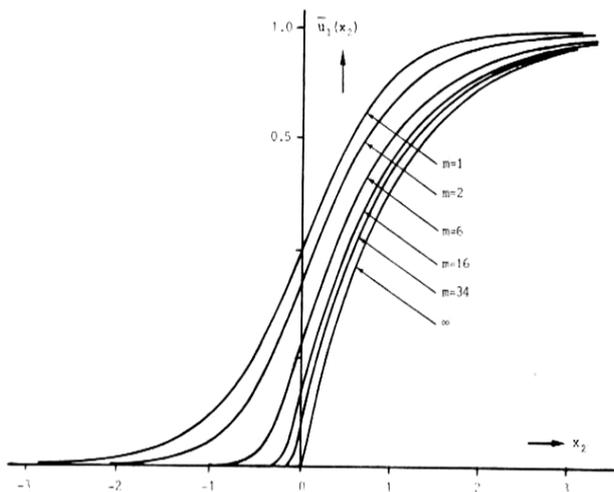


Figura 2. Perfis genéricos de velocidades médias, $\bar{u}_1(x_2)$ para diferentes valores do parâmetro de perfil m .

Com o objectivo de aplicar das conclusões obtidas pelo autor acima referido foram determinados campos de velocidades e respectivas flutuações em torno da estrutura, para diferentes caudais escoados.

Foram igualmente medidas as pressões e respectivas flutuações no bordo inferior da comporta, para as mesmas condições de escoamento e estabelecidos os valores da correlação entre estes valores e os valores da velocidade do escoamento em diversos pontos.

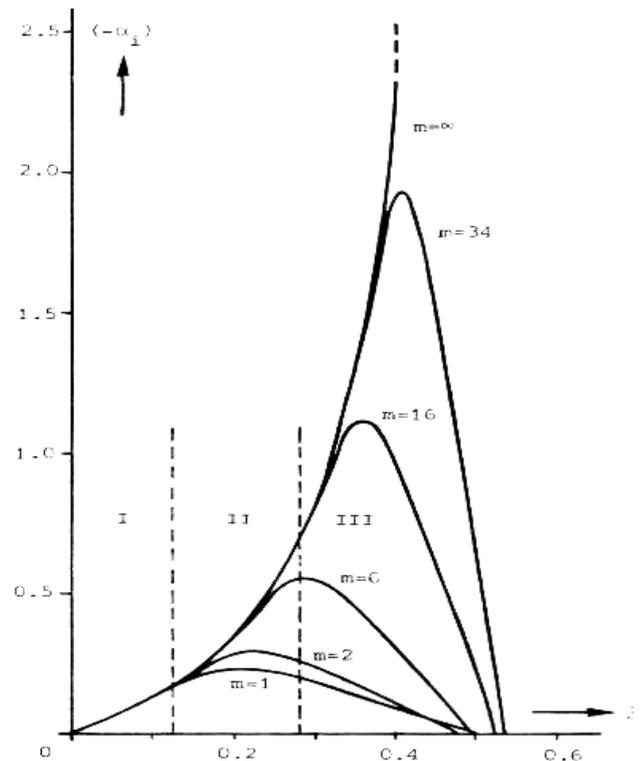


Figura 3. Cálculo do factor de crescimento ($-\alpha_i$) em função da frequência, β , para perfis de velocidades obtidos do perfil genérico por utilização de diferentes valores do parâmetro de perfil m

2.1.2. Instalação experimental

A parte experimental do trabalho foi realizada no canal hidráulico do LSTM - Erlangen (Instituto de Mecânica dos Fluidos da Universidade de Erlangen-Nürnberg, Alemanha), Figura 4, funcionando em circuito fechado, com secção rectangular de 60 cm x 40 cm e comprimento de 3,00 m, com paredes e fundo de vidro transparente, permitindo acesso visual a qualquer ponto no seu interior e onde foi instalada uma comporta plana construída em PVC.

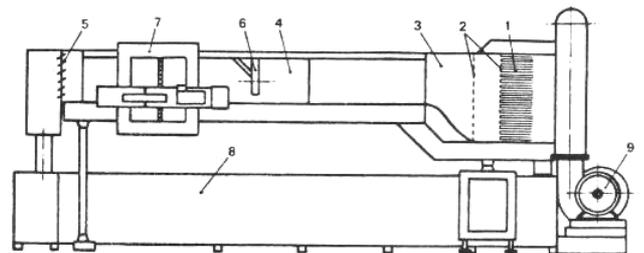


Figura 4. Canal do L.S.T.M. da Universidade de Erlangen. (1- filtro em favo de abelha; 2- redes de malha fina; 3- transição entre a câmara de tranquilização e o canal propriamente dito; 4- secção de ensaio; 5- conjunto de lâminas paralelas ajustáveis; 6- comporta; 7- carril transportador de anemómetro Laser-Doppler; 8- reservatório com 4m³ de capacidade)

O sistema de medição de velocidades, usando a anemometria Laser-Doppler era constituído por uma fonte Laser de 15mW (modelo 106 da Spectra-Physics), um módulo óptico de transmissão de luz e um módulo óptico de recepção de luz. No módulo de transmissão situavam-se, para além de componentes ópticas como os prismas e as lentes convergente para obtenção do volume de controlo, as células de Bragg que permitiam originar uma diferença de frequência entre raios luminosos, variando entre 100 KHz e 700 KHz.

No módulo óptico de recepção de luz uma lente de 150mm de distância focal permitia a captação da luz difractada e uma segunda lente de 40mm de distância focal fazia a focagem dessa luz no orifício de entrada do fotomultiplicador.

A medição de velocidades em diversos pontos do canal era possível devido ao facto do anemómetro Laser-Doppler estar montado num carril que permitia o seu deslocamento ao longo do canal, e a colocação do volume de controlo em todas as secções do canal. Assim, era possível percorrer a totalidade das secções devido ao facto deste poder ser deslocado horizontal e verticalmente. Os movimentos do carril eram executados através de motores passo-a-passo, permitindo movimentos de 0,01mm por passo. As medições de pressões foram realizadas por meio de um transdutor piezoeléctrico de alta sensibilidade - Modelo 7261 da Kistler. O sinal Doppler proveniente da saída do fotomultiplicador, após filtragem era processado por um "frequency tracker"- Cambridge Consultants tipo CCO8. O sinal fornecido pelo transdutor de pressão (pC=pico Coulomb) era transformado em tensão que lhe era proporcional, pelo amplificador de carga Kistler tipo 5007.

2.1.3. Medições e resultados

Foram medidos os campos de velocidades médias em diversas secções do canal e para diversos caudais, apresentando-se, na Figura 5, a medição para o caudal de 29 l/s, altura de escoamento a montante e a jusante da comporta, de $H_{up}=365\text{mm}$ e $H_{do}=255\text{mm}$, respectivamente e uma abertura da comporta de $h=53\text{mm}$. Os perfis foram adimensionalizados através do valor de abertura da comporta, h .

Foram igualmente medidas as flutuações de velocidade do escoamento nas mesmas secções do canal, apresentando-se na Figura 6 os correspondentes perfis, adimensionalizados da forma já referida.

A quantificação de pressões foi realizada apenas no que respeita às suas flutuações, com vista à pesquisa de correlação com as correspondentes flutuações de velocidade.

Foi igualmente feita, para um melhor entendimento do escoamento, a análise estatística das frequências presentes no sinal, apresentando-se, na Figura 7, os espectros de energia relativos às flutuações de pressão.

Foram igualmente medidas as flutuações de velocidade do escoamento nas mesmas secções do canal, apresentando-se na Figura 6 os correspondentes perfis, adimensionalizados da forma já referida.

A quantificação de pressões foi realizada apenas no que respeita às suas flutuações, com vista à pesquisa de correlação com as correspondentes flutuações de velocidade. Foi igualmente feita, para um melhor entendimento do escoamento, a análise estatística das frequências presentes no sinal, apresentando-se, na Figura 7, os espectros de energia relativas às flutuações de pressão.

A determinação da correlação entre flutuações de pressão e velocidade foi realizada para diversos caudais, em relação à componente horizontal de velocidade, tendo-se considerado os diferentes perfis de velocidades em torno da comporta. A Figura 8 representa os valores de correlação obtidos para as mesmas condições de escoamento anteriormente referidas.

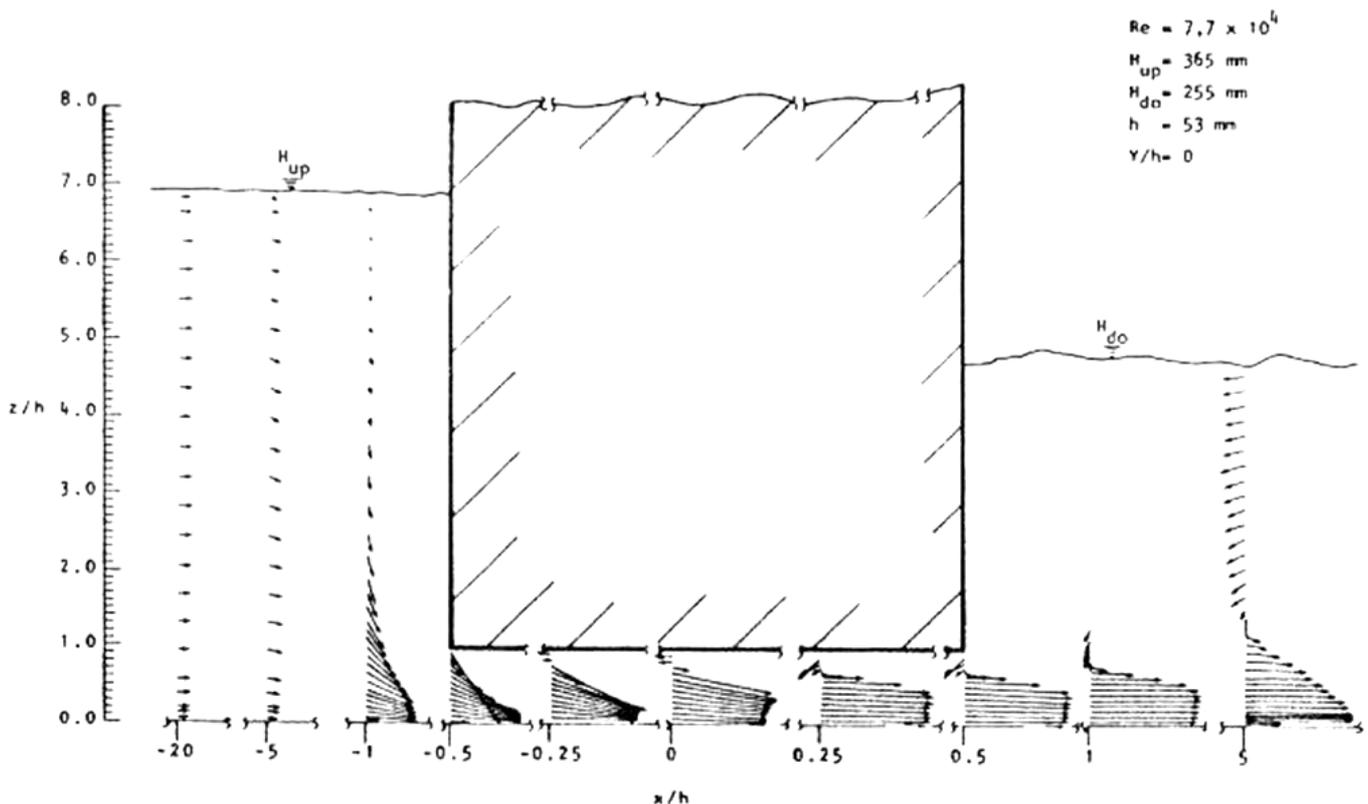
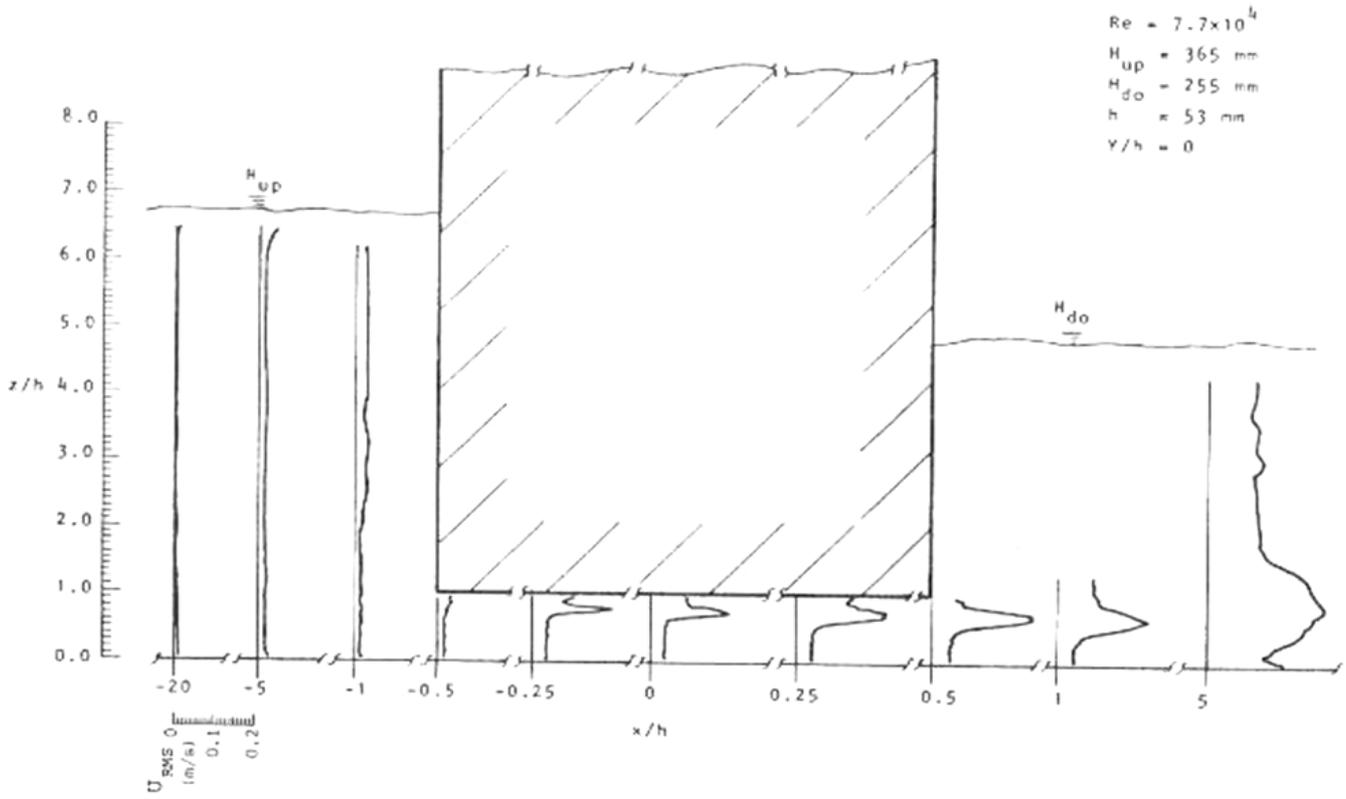


Figura 5. Campo de velocidades do escoamento.

a)



b)

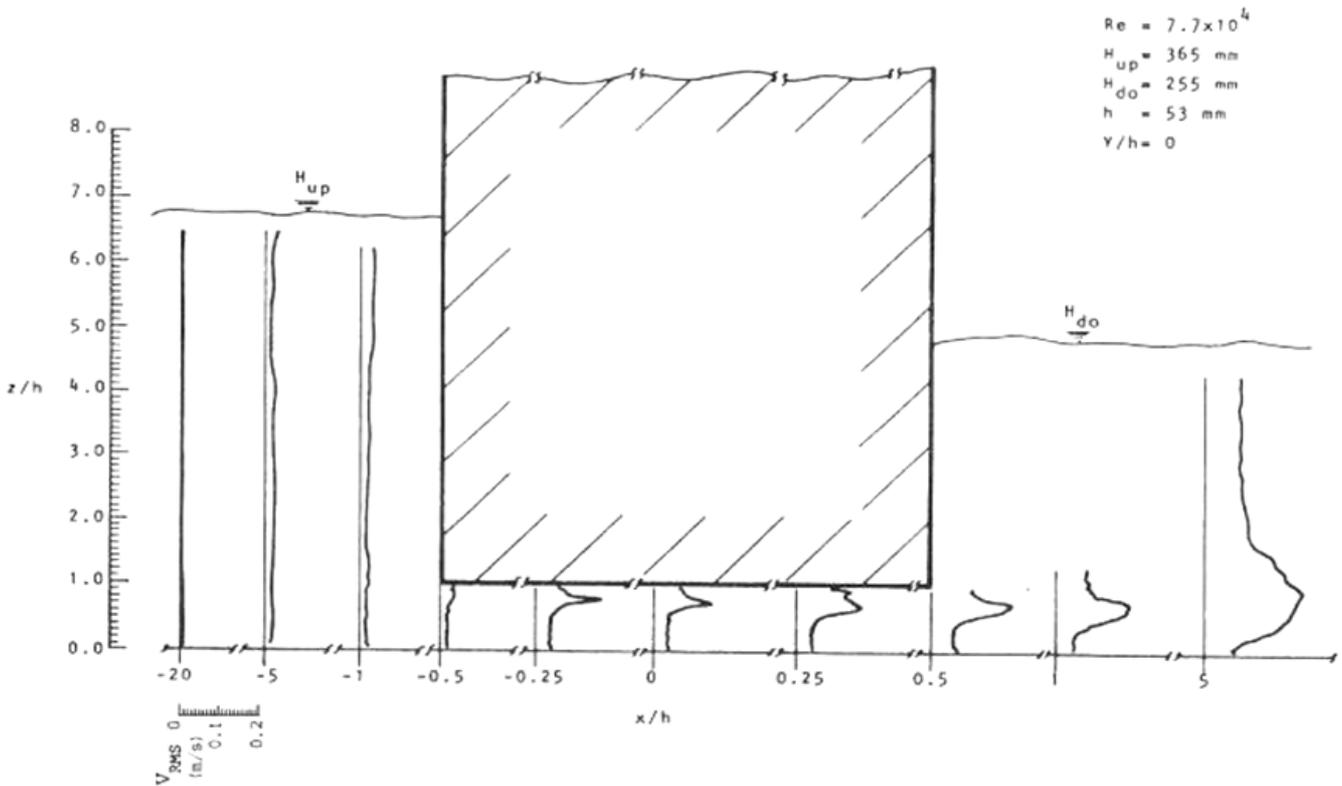


Figura 6. Perfis de flutuações de velocidades do escoamento: a) componente horizontal; b) componente vertical.

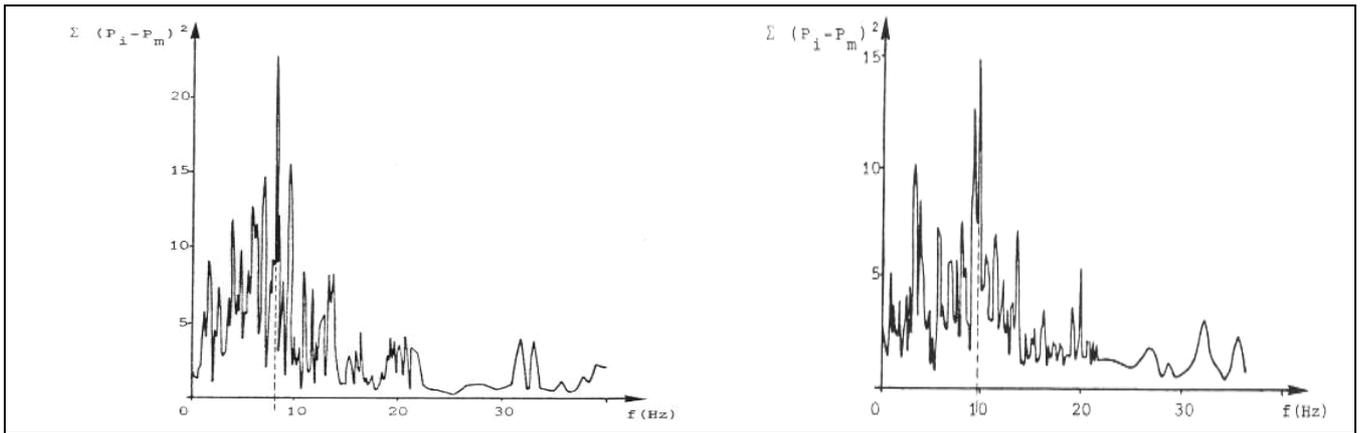


Figura 7. Espectros de energia das flutuações de pressão.

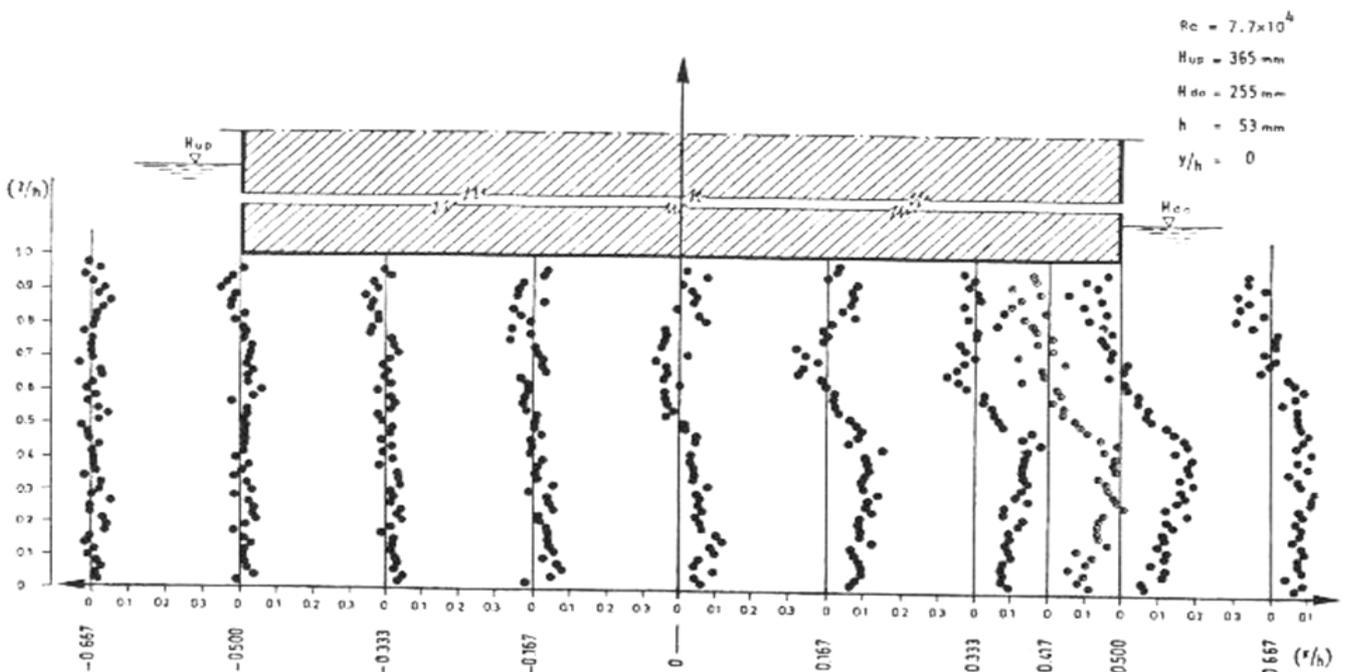


Figura 8. Valores dos coeficientes de correlação entre flutuações de velocidade e pressão para $Q=291/s$.

2.1.4. Análise de resultados

Da análise dos campos de velocidades foi possível constatar a existência de três regiões de recirculação, localizadas, respectivamente a montante, a jusante e sob a comporta. Esta última é originada pela separação do escoamento na parte inferior da comporta, no seu bordo de montante, criando-se o que foi denominado como “camada de atrito” (“shear layer”). Esta camada comporta-se de tal forma, para os escoamentos estudados, que essa separação se mantém para lá da extremidade de jusante da comporta. O escoamento desenvolvido é um escoamento paralelo, com componente vertical da velocidade de muito pequeno valor. Os perfis de velocidade, relativos à componente horizontal, são caracterizados por fortes gradientes de velocidade em determinada zona e um ponto de inflexão.

Os valores quadráticos médios das flutuações dessa mesma componente de velocidade são aí mais elevados, atingindo-se os máximos, para cada perfil, em pontos vizinhos dos pontos de inflexão referidos.

A observação dos valores obtidos para os coeficientes de correlação permitiu concluir que os valores mais elevados de correlação ocorrem sob a comporta, atingindo-se o máximo nas imediações da sua extremidade inferior de jusante. A análise estatística das frequências presentes no sinal mostrou, para os escoamentos estudados, que essas frequências se situavam na gama dos 8 a 10 ciclos. A observação dos resultados experimentais relativos a medição de velocidades, permitiu concluir que as características dos perfis sob a comporta, permitem isolar determinadas zonas pertencentes à anteriormente denominada “camada de atrito” (“shear layer”) que se assemelham às indicadas por Michalke. Foram assim feitos ajustes matemáticos aos perfis das velocidades médias horizontais de forma a adaptá-los aos perfis genéricos apresentados por aquele autor os quais se encontram representados na Figura 9 e que permitiu assim definir os seus parâmetros e a correspondente curva tradutora dos valores do coeficiente de amplificação de perturbações, Figura 10.

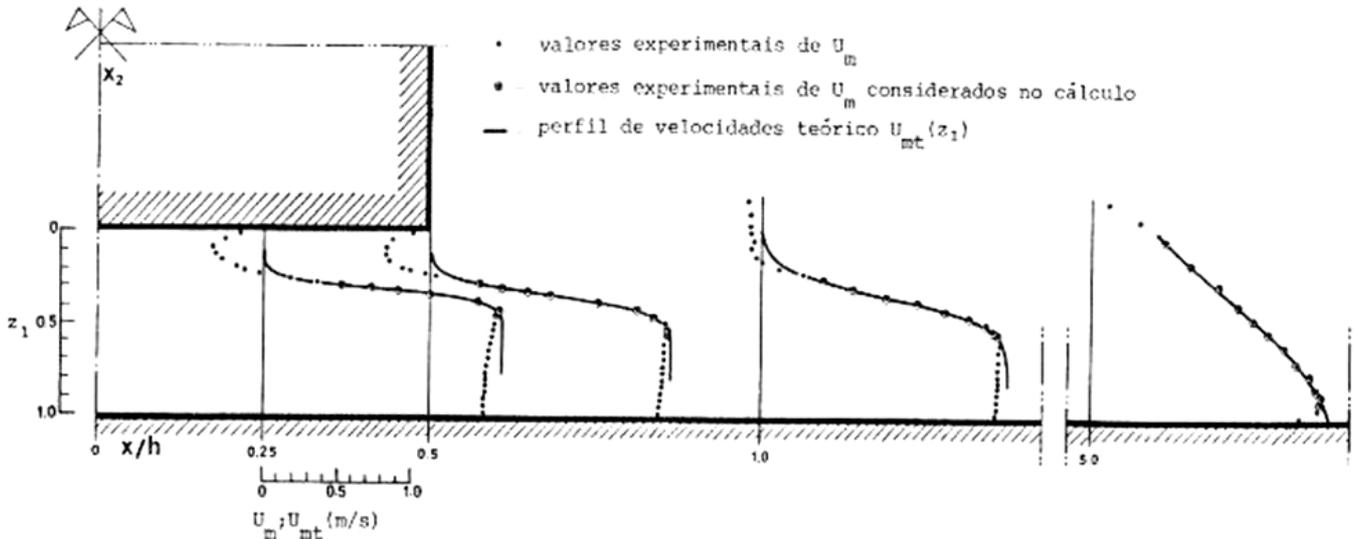


Figura 9. Ajuste matemático dos perfis de velocidades médias do escoamento (componente horizontal).

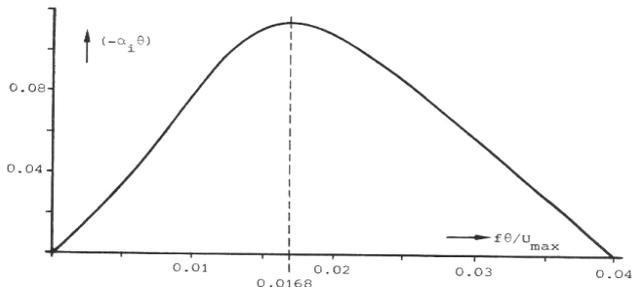


Figura 10. Valores do factor de amplificação $(-\alpha_i)$ em função de $f\theta/U_{\max}$ calculados para o perfil de velocidades teórico genérico em que $m=1$.

Foi então possível concluir que o valor máximo daquele coeficiente corresponde a frequências de 10,78 Hz e 6,745 Hz, para os perfis onde os valores de correlação eram mais elevados, perfis de coordenadas x/h iguais a 0,5 e 1,0, valores da ordem de grandeza das flutuações de pressão, o que poderá explicar a existência desses valores de correlação mais elevados. Este estudo foi feito para todos os escoamentos considerados e tiradas conclusões sobre características de perfis e coeficientes de amplificação de perturbações do escoamento

2.2. Investigações numéricas e experimentais do efeito das perdas de carga localizadas em sistemas de tubagens: métodos e técnicas para o seu estudo sistemático. O caso particular do Tê a 90°

2.2.1. Introdução

Maia (1992) realizou investigação experimental para caracterização das perdas de carga localizadas em algumas componentes dos sistemas emalhados de tubagens. Esse objectivo foi iniciado com o estudo do componente mais típico desses sistemas, o tê de derivação a 90°, com base na caracterização do campo de pressões (para diferentes configurações de escoamento e duas geometrias) e do campo de velocidades (uma configuração de escoamento, para cada uma daquelas geometrias), esta última através da utilização da Anemometria Laser-Doppler (ALD).

Este trabalho, para além do estudo (para uma dada geometria) da designada configuração de escoamento no tê divergente, procurou também estabelecer as bases metodológicas e as técnicas para um estudo sistemático das perdas de carga localizadas dos componentes e acessórios correntes de sistemas de tubagens.

Este texto descreve assim, fundamentalmente, os estudos realizados e os resultados então obtidos para uma bifurcação (divergente) de escoamento a 90°, com as tubagens de todos os ramais de igual diâmetro (relação unitária entre a área do ramal de derivação e do ramal principal, $A_d/A_p=1$) e com bordos da inserção desses ramais em aresta viva ($r/D=0$).

Trabalhos posteriores (Maia *et al.*, 1998; Maia *et al.*, 2000; Costa e Maia, 2004), também com recurso à ALD, deram a continuidade ao estudo sistemático do acessório Tê de derivação, através do estudo de diferentes geometrias (ângulos de inserção, diferentes diâmetros dos ramais e diferentes tipos de arredondamento dos bordos de inserção das tubagens).

2.2.2. Caracterização do campo de pressões

O estudo do campo de pressões foi conduzido para duas diferentes geometrias da inserção do ramal de derivação no ramal principal em aresta viva ($r/D=0$) e com bordo arredondado com raio definido ($r/D=0.725$), em ambos os casos para igual diâmetro de todos os ramais ($A_d/A_p=1$).

A instalação experimental específica para esta parte do estudo, realizada na Faculdade de Engenharia do Porto (Maia, 1992), permitiu levar a efeito a caracterização do campo de pressões para as quatro possíveis configurações do escoamento: duas simétricas e outras duas não simétricas sendo, em qualquer desses casos, uma convergente e outra divergente.

No caso em apreço, como foi referido, será dado especial relevo à configuração de escoamento em que também foi estudado (e será descrito) o campo de velocidades: (bifurcação a 90° de) escoamento não-simétrico divergente (comumente designada por configuração em tê divergente).

As perdas de carga associadas a uma bifurcação de escoamento são geralmente definidas como:

$$\Delta H_{13} = K \frac{U_1^2}{2g} \quad e \quad \Delta H_{12} = K \frac{U_1^2}{2g} \quad [1]$$

sendo a primeira relativa à perda de carga entre a tubagem de alimentação e a de derivação e a segunda entre as tubagens do ramal principal. A Figura 11 elucida a nomenclatura utilizada e apresenta os coeficientes de perda de carga obtidos para as diferentes possíveis partições (entre o ramal de derivação e de alimentação) de caudal, para as duas geometrias estudadas.

Da comparação dos valores obtidos pode confirmar-se e obter-se (i) a diminuição do coeficiente de (e portanto da) perda de carga entre o ramal principal e o ramal de derivação (para qualquer relação de partição dos caudais) e (ii) constatar a (praticamente) independência desse facto para a perda de carga associada ao escoamento para o ramal de continuidade.

A fiabilidade dos resultados obtidos permitiu uma comparação com valores propostos por outros autores, alguns utilizando técnicas já ultrapassadas, fazer uma análise crítica aos mesmos e propor fórmulas para uso corrente. No entanto, pôde constatar-se que um verdadeiro progresso neste domínio não seria possível sem uma explicação física mais detalhada dos fenómenos associados ao escoamento localizado na zona de derivação, para o que foi efectuada a caracterização dos campos de velocidades e das zonas de separação associadas.

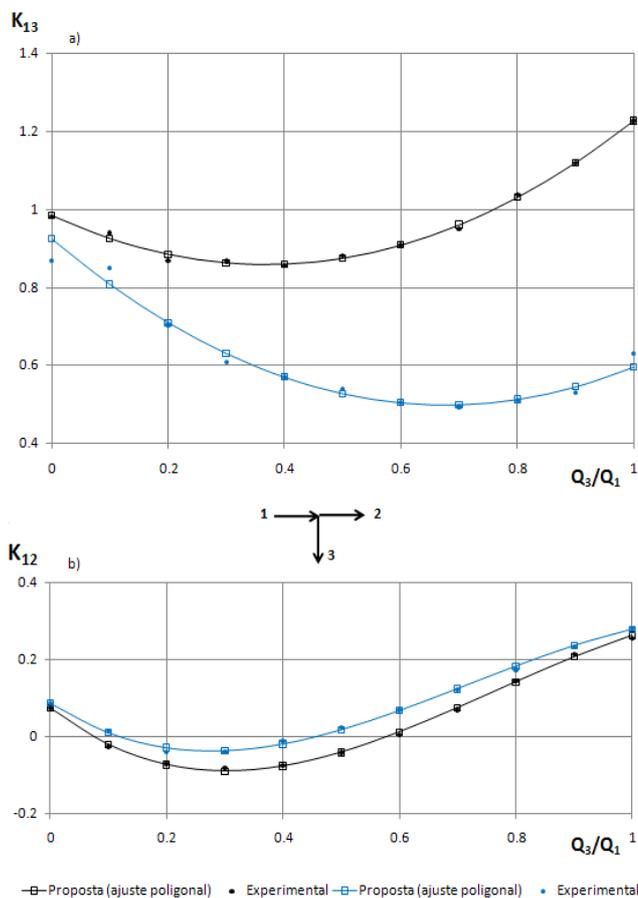


Figura 11. Configuração tê divergente. Tê a 90°: variação dos coeficientes de perda de carga localizada, para $r/D=0$ (a preto) e $r/D=0.725$ (a azul): a) K_{13} ; b) K_{12} (adaptado de Maia, 1992).

2.2.3. Caracterização do campo de velocidades e das zonas de separação

2.2.3.1. Instalação experimental

As experiências foram conduzidas no LSTM - Erlangen, na Alemanha, utilizando o circuito hidráulico esquematizado na Figura 12.

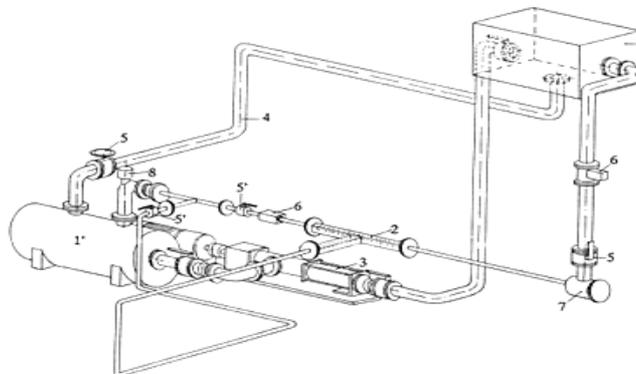


Figura 12. Esquema do circuito hidráulico (Maia, 1992) (1- reservatório aberto; 1'- reservatório fechado; 2- Tê a 90° [zona de ensaio]; 3- bomba; 4- "by-pass"; 5- válvula; 5'- válvula; 6- medidor de caudal; 7- cone redutor; 8- dispositivo de aquecimento).

O escoamento efectuou-se em circuito fechado ligando o reservatório de alimentação (aberto), a zona de ensaio e o reservatório de restituição (fechado), de onde o líquido retornava, por bombagem, ao reservatório de alimentação. A bombagem foi efectuada através de um grupo motobomba, constituído por uma bomba de eixo horizontal excêntrico (Netzsch NE 60A) adequada para bombagem de líquidos e misturas líquidas industriais de diferente natureza e temperatura, com regime de funcionamento ajustável por dispositivo de controlo da velocidade de rotação. A distribuição de caudais a jusante da derivação era ajustada através de duas válvulas - uma localizada no ramal de derivação e outra no ramal de continuidade. O caudal escoado era controlado através de dois medidores (mássicos) de caudal, um (Bopp & Reuter) imediatamente a jusante do reservatório de alimentação e outro (Flowtec DQ 600) no ramal de continuidade, a jusante da derivação. A zona de ensaio (Tê a 90°) foi realizada em perspex, por união de peças com a secção transversal de 50 x 50 mm², maquinados interiormente de forma a corporizar troços de tubagem (e a derivação) de secção circular com diâmetro interior de 25mm. O fluido usado foi uma mistura de dois óleos especialmente preparados, misturados em proporção estudada para possibilitar o ajuste do índice de refração da mistura ao do material perspex ($n=1.49$).

2.2.3.2 Equipamento de medida específico

O trabalho experimental realizado, pensado para a análise de zonas com limitações de acesso óptico (zona da bifurcação), pôde beneficiar da disponibilidade no LSTM-Erlangen de um sistema de pequenas dimensões, de desenvolvimento recente à data (início da década de 90). Esse sistema de anemometria laser, designado por DFLDA ("diode fiber laser Doppler anemometer"), esquematizado na Figura 13, é constituído por duas componentes: uma unidade óptica base e um sensor óptico, ligados por fibras ópticas.

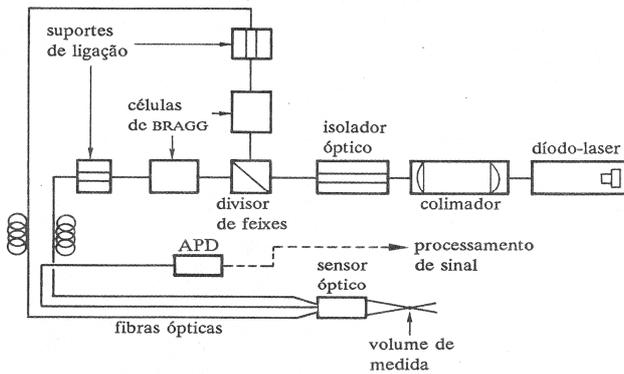


Figura 13. Esquema do sistema DFLDA (Maia, 1992).

A unidade óptica base inclui a fonte laser e todos os restantes elementos ópticos (excepto sensor), que foram montados em base de alumínio, de forma a facilitar o seu transporte e manuseamento (Figura 14).

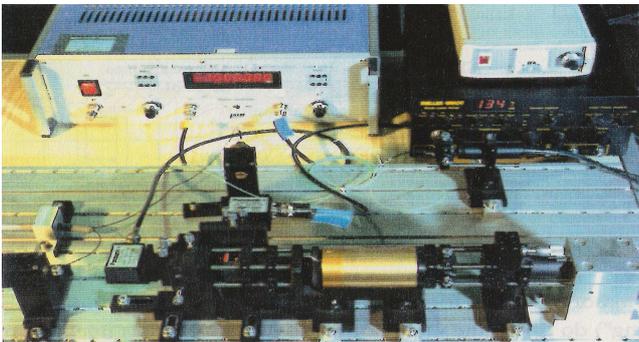


Figura 14. Unidade óptica-base e equipamento de processamento de sinal (Maia, 1992).

A fonte laser (Melles-Griot D6 DLL 505), de potência nominal igual a 30mW, emitindo luz num comprimento de onda de 838 nm, era provida de componentes ópticos e de colimação, de correcção de astigmatismo e de "circularização" do feixe de características elípticas, de modo a que o feixe de saída do laser apresentava um formato circular, de diâmetro 5.6 mm, associado a uma potência de saída de 23 mW. O diâmetro do feixe era seguidamente reduzido (por nova colimação) para 1.2 mm, à saída do módulo laser, após o que passava por um isolador óptico do tipo Faraday, permitindo suprimir as eventuais reflexões de luz para a fonte laser. Seguiu-se a passagem por um prisma não-polarizador ("beam splitter"), com a função dividir o feixe incidente em dois feixes de igual intensidade, cada um deles dividido em dois (um de ordem zero, outro de 1.^a ordem) através de uma célula de Bragg (Matsushita EFL-D250 R) operando entre 50 e 55 MHz. A separação dos feixes de ordem zero e de 1.^a ordem, à saída da unidade era rápida, dado o ângulo de desvio ser relativamente grande (6°). A focagem de cada feixe incidente na respectiva fibra óptica foi feita utilizando uma lente Selfoc (SLN 20-025-083), acoplada a uma extremidade da fibra em suporte de ligação, de posicionamento ajustável. O diâmetro do feixe de entrada na lente Selfoc era assim reduzido para 5.5 µm, compatível com os núcleos das fibras transmissoras.

Tal permitia que as duas fibras transmissoras (monomodo, de polarização mantida do tipo Panda, com núcleo circular de diâmetro 5.5 µm) pudessem conduzir, como pretendido, os feixes de luz à unidade sensora, a seguir descrita.

Finalmente, a luz difractada era transportada através de uma fibra óptica de índice gradual 50/125 µm (diâmetro do núcleo/casca), sendo colectada num fotodiodo de avalanche (APD). Quanto ao sensor óptico, este incluía as extremidades das duas fibras ópticas transmissoras, a extremidade da fibra óptica receptora, a lente receptora de luz difractada ($f=40\text{mm}$), perfurada para permitir a passagem dos feixes de luz incidente, e a lente transmissora e de focagem ($f=80\text{mm}$). A fixação da extremidade das fibras e das lentes, feita de forma mecânica, permitia uma fácil substituição de qualquer elemento, facilitando também o seu alinhamento. Mais especificamente, a separação entre eixos das fibras transmissoras era de 14 mm o que, combinado com as características do sistema óptico-base anteriormente referidas, originou:

- um semiângulo de intersecção dos feixes, $\theta = 5^\circ$,
- um diâmetro do volume de medida, $d_m = 78 \mu\text{m}$, e
- um comprimento do volume de medida, $l_m = 0.89 \text{ mm}$.

Convém referir que a intensidade de luz em cada feixe e no volume de medida era cerca de 18 mW, o que correspondeu a uma eficiência global do sistema de, perto de 60%. Relativamente ao processamento de sinal, há a referir que o sinal amplificado do APD, após filtragem prévia, foi processado através de um contador (TSI 1980B) operando no modo SM/B ("single measurement per burst") com 16 ciclos de validação e 1% de erro de comparação. A gama de filtragem (efectuada por filtros passa-banda integrados no próprio contador) foi ajustada e otimizada manualmente na gama de 300 kHz a 3 MHz. O número de amostras variou entre 1500 a 40 000 com velocidades de amostragem variando de 10 a 600Hz.

2.2.3.3 Resultados obtidos

Foram obtidos os perfis das componentes da velocidade média, e também dos correspondentes desvios quadráticos médios (valores rms), na direcção longitudinal e transversal ao longo de dois planos diametrais ortogonais para diferentes secções, quer no ramal principal, quer no ramal de derivação, para uma dada relação de partição de caudais para a tubagem de derivação ($Q_d/Q_p = 0.45$) e para um valor de caudal de alimentação fixo na tubagem principal (Q_p), correspondente a um n.º de Reynolds de 500. A localização dessas secções (em termos de número de diâmetros da tubagem, D), relativamente ao bordo de montante da inserção da tubagem de derivação na tubagem de alimentação (com os valores negativos a denotarem as secções a montante dessa origem), é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1. Localização dos perfis medidos (adaptado de Durst *et al.*, 1992).

Secção	Localização em termos de D (25mm)
Tubagem de continuidade	-10, -3, -1, 0, 1, 2, 3, 5, 10, 19
Tubagem de derivação	0, 0.25, 0.5, 0.8, 1.2, 2, 5, 10, 14

A Figura 15 apresenta a evolução dos perfis de velocidade média longitudinal ao longo da zona de bifurcação e dos ramos de continuidade e de derivação, ao longo do plano diametral horizontal da bifurcação, para essa relação de bifurcação ($Q_a/Q_p = Q_3/Q_1 = 0.45$).

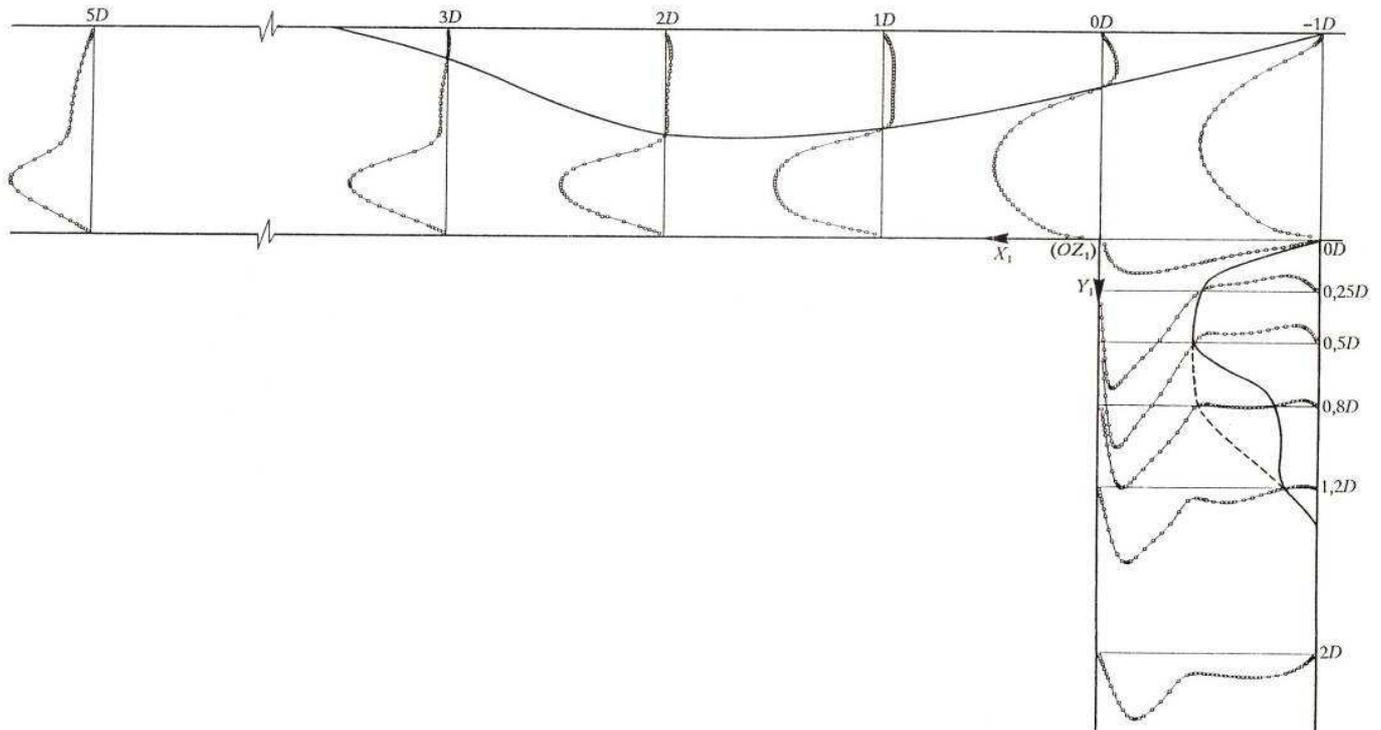


Figura 15. Configuração tê divergente. Tê 90°; Plano diametral horizontal; $Re=487$; $Q_3/Q_1=0.45$: Caracterização das linhas ($U=0$) na tubagem principal e no ramal de derivação (Maia, 1992).

Esses perfis permitiram, para além da caracterização local dos campos de velocidades associados à bifurcação do escoamento:

- avaliar os (diferentes) comprimentos de restabelecimento do escoamento nas tubagens principal e de derivação,
- identificar e delimitar as duas zonas de separação de escoamento formadas, devido à partição do escoamento: uma (mais extensa) formada na tubagem principal, na zona oposta à bifurcação de escoamento; outra na tubagem de derivação, na zona mais próxima da parede de montante (relativamente ao escoamento da tubagem de alimentação).

As correspondentes linhas de velocidade média nula são também referenciadas na Figura 15.

As duas zonas de separação detectadas no estudo da configuração do escoamento referida foram posteriormente caracterizadas, ao longo do plano diametral horizontal, para: as diferentes possíveis partições do escoamento (Q_3/Q_1), para idêntico número de Reynolds ($Re \approx 500$) na tubagem da alimentação e para uma gama mais alargada de números de Reynolds, para duas partições do escoamento ($Q_3/Q_1 = 0.45$ e 0.15).

A Figura 16 representa os valores dos comprimentos de separação para $Q_3/Q_1 = 0.45$ para ambos os ramos. Esses valores foram obtidos através da caracterização dos pontos de separação e de “recolamento” da veia líquida com a parede. Foi também obtida e sistematizada informação relativa ao posicionamento das zonas de separação relativamente à zona de intersecção das tubagens da bifurcação bem como acerca das correspondentes dimensões (e correspondente “obstrução” ao escoamento) dessas zonas de separação.

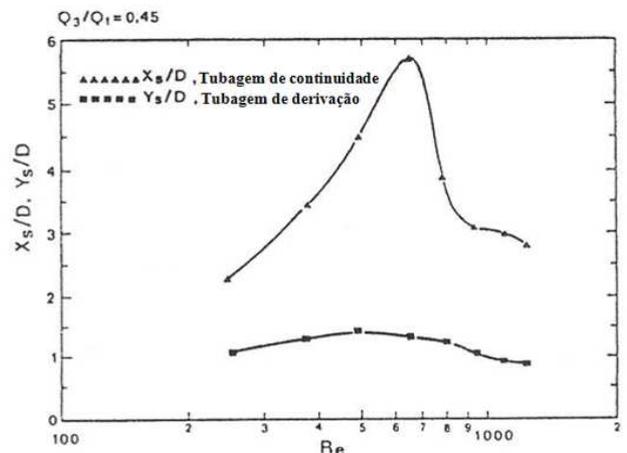


Figura 16. Configuração tê divergente. Tê 90°: Comprimentos de separação para $Q_3/Q_1=0.45$ (Maia, 1995).

2.2.4. Conclusões

A investigação conduzida permitiu definir uma nova metodologia para o estudo das perdas localizadas correspondentes a acessórios de redes de tubagens, com base no uso de equipamentos e técnicas actualmente comuns e fiáveis.

Pôde concluir-se que a caracterização do campo de velocidades e, em particular, do desenvolvimento das zonas de separação, eventualmente cobrindo secções não-diametraes do escoamento e uma gama mais alargada de números de Reynolds, deverá constituir o caminho para justificar as variações dos coeficientes de perda de carga, nomeada e especificamente, através da inter-relação dessas variações com as características das zonas de separação e/ou as variações da intensidade de turbulência nessa zona.

2.3. Medição simultânea de velocidade e concentração através de Anemometria Laser Doppler e fluorescência induzida por Laser

2.3.1. Introdução

Lima (2000), desenvolveu a técnica de Fluorescência Induzida por Laser (LIF) e aplicou-a conjuntamente com a técnica de Anemometria Laser Doppler (LDA), para medição simultânea de concentração e velocidade em meios líquidos. Numa primeira fase, utilizando soluções de concentração homogênea de rodamina B, determinaram-se os procedimentos, instrumentação e parâmetros experimentais mais adequados à técnica de LIF, e na segunda fase demonstrou-se a aplicabilidade da utilização conjunta da LIF/LDA no estudo do escoamento de dois jactos coaxiais confinados. Neste texto é apresentado um breve resumo do estudo do escoamento de jactos coaxiais.

2.3.2. Instalação experimental

A secção de teste consistia no escoamento de dois fluxos coaxiais confinados no interior de um tubo *Perspex*, com 2 m de comprimento e com 42 mm de diâmetro interno (D). O jacto interior, com 19 mm de diâmetro (d_o) e confinado no mesmo tubo de *Perspex*, consistia numa solução aquosa de rodamina B com 0.04 mgL^{-1} de concentração.

O acesso óptico era efectuado através de uma caixa óptica, cheia de água para reduzir os efeitos de refração.

A instalação experimental (Figura 17) era operada em circuito aberto, sendo os escoamentos interior e anelar alimentados por uma bomba centrífuga. O escoamento do jacto interior, com uma concentração conhecida de rodamina B era obtido injectando um caudal conhecido de uma concentração base no circuito de água do jacto interior. Utilizou-se a rodamina B como traçador fluorescente porque as suas características não se alteram quando a solução aquosa é continuamente agitada, apresentando ainda uma baixa difusividade molecular e elevado número de Schmidt, o que a torna adequada para estudos de mistura turbulenta.

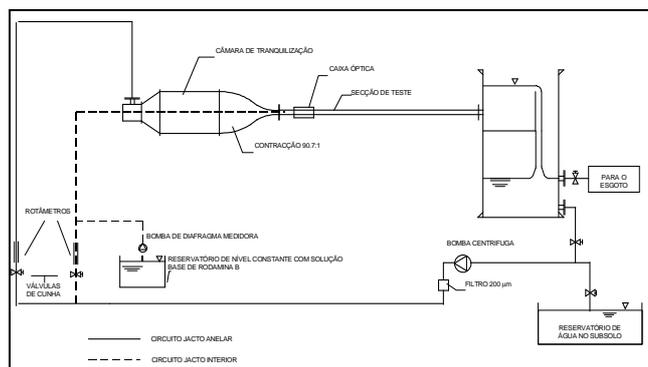


Figura 17. Esquema da instalação experimental de jactos coaxiais confinados.

Um separador de cor dividia a luz recolhida em dois comprimentos de onda, superior e inferior a 590 nm, que eram filtrados antes de chegarem aos fotomultiplicadores (Dantec, modelo 57×08) para o sinal de velocidade (filtro de interferência de 514.5 nm, Dantec 55×37) e para o sinal de concentração (filtro de banda passa alto de 570 nm, Melles Griot OG570).

Os fotomultiplicadores eram alimentados por duas fontes de alimentação separadas (Dantec, modelo 55L97), em que no caso da medição de fluorescência a fonte de alimentação convencional foi alterada e propositadamente concebida para a presente aplicação, com cuidados especiais para evitar interferências e reduzir o ruído electrónico para níveis abaixo da intensidade do sinal de concentração (Lima, 2000). Esta configuração óptica garantia que o sinal de velocidade e o sinal de concentração eram originários exactamente da mesma posição do escoamento, e para além disso facilitava a focagem do sinal de concentração.

O processamento do sinal de LDA foi efectuado recorrendo a um contador TSI (1990C) operado no modo *single measurement per burst* (SM/B), para 1% de comparação entre frequências estimadas com 8 e 5 ciclos de medição.

A aquisição de dados foi efectuada recorrendo a uma placa de velocimetria Zeche Electronics (1400A), conjuntamente com um módulo de conversão de sinal analógico em digital (ADCM Daughter Board, Analog/Digital Converter Module), instalados num computador (Dell, modelo 325 Sx).

Os sinais de velocidade e concentração eram adquiridos simultaneamente, sempre que o contador validava o sinal de velocidade.

Uma descrição mais detalhada da instalação experimental, equipamento de medida, metodologia experimental desenvolvida, assim como a quantificação da incerteza experimental pode ser encontrada em Lima (2000).

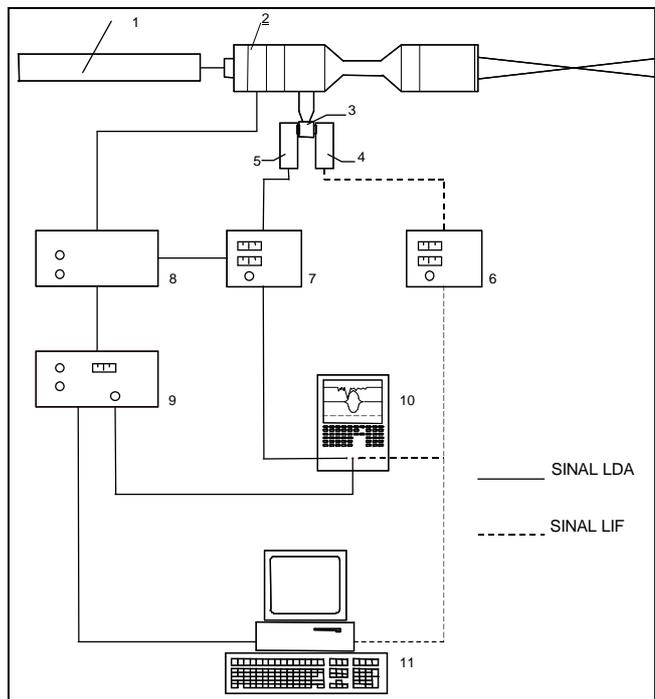


Figura 18. Equipamento de medição simultânea por LDA e LIF (1: Laser; 2: Sistema óptico; 3: Separador de cor com filtros; 4: Fotomultiplicador para LIF (>590 nm); 5: Fotomultiplicador para LDA (<590 nm); 6: Fonte de alimentação do fotomultiplicador de LIF; 7: Fonte de alimentação do fotomultiplicador de LDA; 8: Frequency shifter; 9: Contador; 10: Osciloscópio, 11: Computador Pessoal com placa de velocimetria e módulo ADCM).

O escoamento de jactos coaxiais confinados foi estudado para quocientes de U_a/U_{inv} , entre as velocidades anelar média e interior média, situados entre 0,8 e 6,5.

O escoamento era sempre turbulento, com um número de Reynolds da ordem de 3×10^4 , baseado na velocidade média e no diâmetro interno (D) do tubo de *Perspex*.

2.3.3. Resultados

A figura 19 mostra a visualização da região inicial do escoamento, para uma razão de velocidades $U_a/U_{in}=3.2$.

O jacto interior é identificado pela luz amarelo-alaranjada do traçador fluorescente, e o escoamento anelar ocupa toda a região envolvente, a negro.

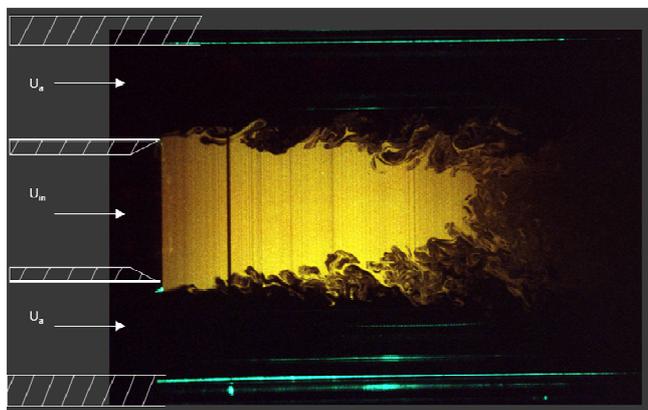


Figura 19. Secção de teste e visualização do escoamento de jactos coaxiais ($U_a/U_{in}=3.2$).

2.3.4. Condições experimentais

A título de exemplo apresentam-se nas figuras 20 e 21 os perfis médios e instantâneos de velocidade e concentração, medidos para posições axiais $x/d_0 < 2$.

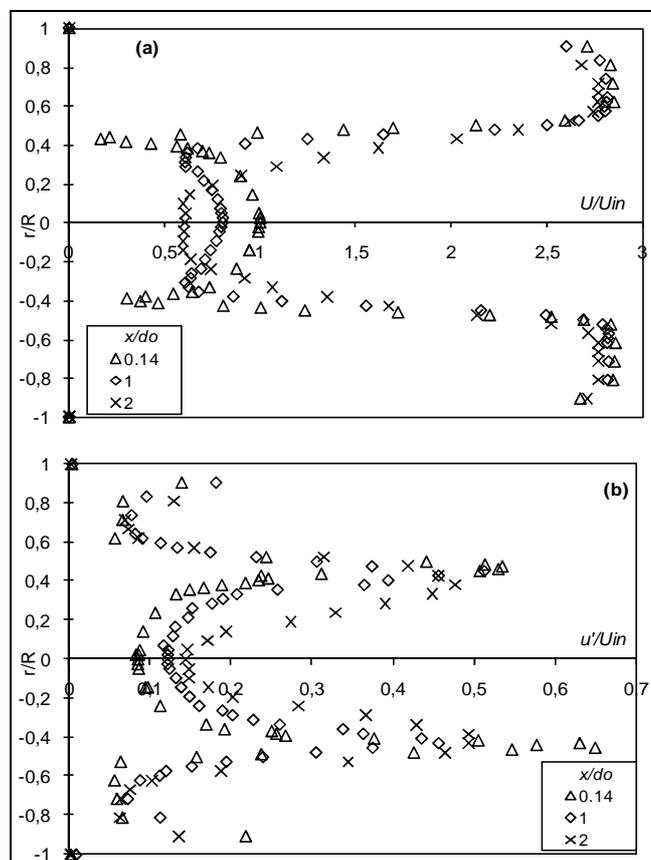


Figura 20. Perfis radiais de velocidade axial média (a) e intensidade axial de turbulência (b) em três secções transversais, para $U_a/U_{in}=3.2$

Observa-se que o escoamento evoluiu de dois fluxos coaxiais iniciais para o escoamento completamente desenvolvido no interior de um tubo.

Na região inicial do escoamento o desenvolvimento da camada de corte entre os escoamentos interior e anelar provoca a diminuição da velocidade média do escoamento interior, à medida que se observa a destruição do núcleo central do escoamento interior.

A concentração média evolui de um perfil uniforme inicial, observando-se a diminuição da concentração média no eixo e o correspondente aumento da concentração instantânea na camada de corte entre escoamentos.

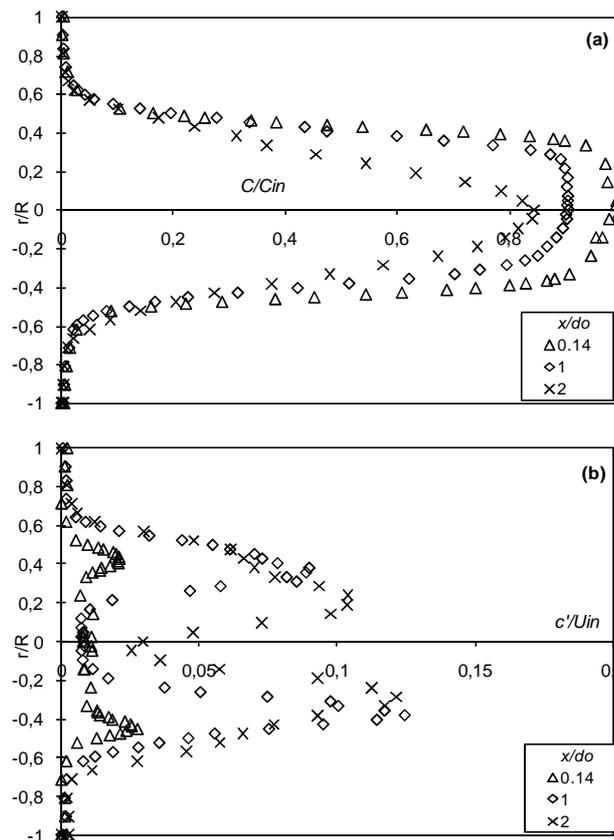


Figura 21. Perfis radiais de concentração média (a) e concentração instantânea (b) em três secções transversais, para $U_a/U_{in}=3.2$

O campo escalar evolui para o escoamento completamente desenvolvido no interior de um tubo a uma taxa mais lenta do que o campo de velocidade.

As medições para diferentes razões de velocidades médias do escoamento anelar e do escoamento interior (U_a/U_{in}) permitiram concluir que a mistura entre os jactos é mais intensa para razões de velocidade (U_a/U_{in}) diferentes de 1, indicando a dependência entre a mistura e a intensidade da camada de corte entre os dois escoamentos coaxiais.

2.3.5. Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido sob a orientação da Secção de Fluidos e Calor do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da FEUP, no âmbito do projecto PEAM/C/APR/132/91, intitulado *Dispersion Studies in Liquid Flows by Laser Induced Fluorescence*. M.M.C.L. Lima beneficiou das Bolsas BD/2033/92/RN/CIÊNCIA e BD/5623/95/PRAXIS XXI.

2.4. Análise das oscilações e dos campos de velocidade nas proximidades de quebra-mares submersos sob a acção da agitação marítima

Os quebra-mares destacados constituem uma das possíveis soluções para os problemas de protecção costeira causados pela acção da agitação marítima. Devido à pouca altura da estrutura, não eliminam o transporte de sedimentos em direcção a terra e são uma das soluções viáveis para os problemas de protecção costeira quando as condições ambientais naturais têm de ser preservadas. A sua concepção exige a definição das dimensões, forma, tipo e características da estrutura a ser construída.

O projectista deverá tentar conseguir com o mais baixo custo, a maior eficiência da estrutura no que diz respeito à dissipação do fluxo de energia e garantir a sua estabilidade, mediante as condições associadas à agitação marítima de projecto.

Os quebra-mares destacados podem ser de diversos tipos, dependendo da sua forma, dimensões e tipo de construção. Os mais comuns apresentam uma forma trapezoidal, com valores variáveis da inclinação dos seus taludes, extensão e altura. As características de permeabilidade e rugosidade necessitam também de ser definidas. Características como a altura e extensão revestem-se de grande importância para o seu comportamento no que respeita à dissipação de energia.

Um aumento na eficiência pode ser conseguido através de um aumento da altura e extensão do quebra-mar mas, em alguns casos, por razões estéticas e económicas tal pode não ser aceitável. A verificação dos efeitos da interferência do fluxo com a estrutura e do fluxo sobre ele mesmo, pode fornecer informação importante para uma melhor avaliação das acções a ter em conta para atingir a solução mais aconselhável para a sua construção.

A interferência do fluxo da agitação na estrutura causa a dissipação da energia da onda incidente, que é parcialmente reflectida, parcialmente transmitida e parcialmente absorvida pela própria estrutura.

Os coeficientes de dissipação são, normalmente, usados para a avaliação da eficiência dos quebra-mares. Estes coeficientes são expressos em função da altura da onda incidente, reflectida e transmitida.

De facto, a maioria dos estudos experimentais realizados com estruturas costeiras, incluindo quebra-mares destacados, estão relacionados com a medição dos níveis de agitação e da sua relação, para cada tipo de agitação, com as características do quebra-mar.

Testes experimentais realizados por Seelig, 1983 e por Allsop, 1988, deram origem a relações entre os coeficientes de reflexão e as características da agitação sobre o quebra-mar. Taveira Pinto *et al.*, 1998a, executaram também várias experiências com quebra-mares destacados lisos de forma a obterem coeficientes de reflexão, transmissão e dissipação, para diferentes condições de teste.

Van der Meer, 1991, expressou os coeficientes de transmissão em função da altura do coroamento e da altura da onda incidente.

D'angremond *et al.*, 1996, estabeleceram uma equação que define os coeficientes de transmissão em função da largura do coroamento, da inclinação do talude do quebra-mar e da altura do coroamento. Yamashiro *et al.*, 1999, realizou um estudo sobre o campo de agitação a sotamar de um quebra-mar destacado. As experiências realizadas num tanque de ondas permitiram a medição da elevação da superfície da água e a sua caracterização detalhada.

A reflexão e a transmissão da agitação marítima foram também estudadas por Kriezi *et al.*, 1999. Foi elaborado um estudo teórico e experimental sobre a reflexão e transmissão da agitação em quebra-mares destacados e a aproximação numérica foi comparada com os resultados experimentais obtidos.

Os coeficientes de dissipação podem também ser calculados através da energia da onda incidente, reflectida e transmitida considerando o conceito da energia total, como foi demonstrado por Taveira Pinto *et al.*, 1998a, 1998b, 1999a, 1999b. Nestes estudos foram testados vários tipos de agitação regular e irregular. Os coeficientes obtidos foram comparados com os acima mencionados obtidos por Seelig, 1983 e Allsop, 1988, 1990. A análise destes coeficientes mostra que a eficiência dos quebra-mares destacados depende de vários parâmetros relacionados com as características do quebra-mar, tais como a sua altura, a inclinação do fundo, rugosidade da sua superfície e permeabilidade, e também, com as características do fluxo de agitação, nomeadamente a profundidade da água e as características da onda (altura e período).

A avaliação da energia reflectida e transmitida (cinética e potencial) na presença de diferentes modelos de quebra-mares foi feita em secções localizadas a barlar e a sotamar da estrutura. Os resultados obtidos mostram que os diferentes tipos de modelos de quebra-mares e os fluxos de agitação conduzem a diferentes valores dessas energias, dependendo do fenómeno de interferência ocorrido entre o fluxo e a estrutura. A reflexão, a transmissão e a absorção da energia da onda devido à presença da estrutura ocorre de diferentes modos, dependendo do fluxo e das características do modelo de quebra-mar. Estudos teóricos recentes sobre quebra-mares destacados avaliam o movimento do fluido nas imediações dos diferentes tipos de estruturas.

Watanabe *et al.*, 1999, simulou numericamente o campo de velocidades e o campo de agitação com galgamento sobre um quebra-mar de secção rectangular. Estes autores também realizaram estudos sobre a turbulência e a transmissão da agitação marítima.

2.4.1. Instalações de teste e técnica de medição LDA

2.4.1.1. Instalações de teste

As medições foram realizadas no antigo tanque de ondas unidireccional do Laboratório de Hidráulica, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O tanque de ondas, representado esquematicamente na Figura 22., possuía 4.8m de largura e 24.5m de comprimento com uma profundidade máxima de 0.60 e 0.40m junto ao gerador de ondas e na secção de teste, respectivamente.

Uma janela na parede lateral do tanque permitia a visualização da secção de teste.

Um gerador de ondas do tipo pistão instalado no tanque permitia a geração da agitação, podendo ser produzidos diferentes tipos de ondas, tais como, ondas regulares de frequência e amplitude específica ou sequências aleatórias.

O sistema assume que as ondas são para ser geradas em modelo, requerendo certos "inputs" relativamente ao protótipo, tais como, a escala do modelo, a altura e período da onda e a profundidade da água. Neste trabalho foram consideradas ondas regulares. Foi construída, no final do tanque, uma praia para absorção da energia das ondas, constituída por areia e gravilha e colocada no lado oposto ao do gerador de ondas para reduzir ao mínimo as ondas reflectidas.

Foi colocada na secção de teste uma fina parede divisória, de forma a evitar efeitos tridimensionais na propagação da onda.

A utilização de sondas hidrodinâmicas permitiu a medição dos níveis de água em diferentes secções de teste. Estas sondas operam segundo o princípio de medição da corrente do fluxo numa sonda submersa, o que consiste essencialmente num par de fios de aço inoxidável.

A corrente que flui entre os fios das sondas é proporcional à profundidade de submersão e é convertida numa voltagem de saída, proporcional à profundidade instantânea de imersão. Esta voltagem de saída permite a execução de um gráfico de calibração em função da altura de onda, através da variação de profundidade de submersão da sonda em águas calmas, por uma quantidade conhecida e registando as alterações no sinal de saída.

As sondas podem ser colocadas em qualquer ponto do tanque de ondas para que possam registar instantaneamente a elevação da superfície livre da água. Uma destas sondas esteve sempre localizada na secção onde as medições de velocidade estavam a ser realizadas.

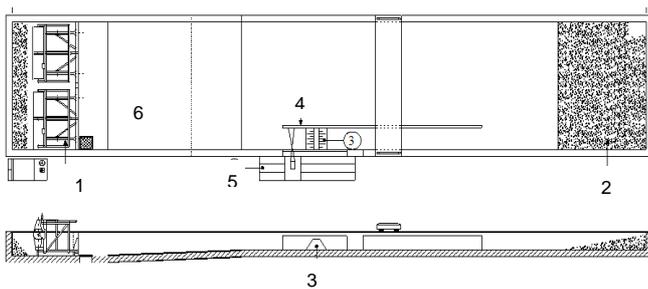


Figura 22. Tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica, comprimento: 24.5m; largura: 4.8m. (1) gerador de ondas; (2) praia para absorção das ondas; (3) modelo de quebramar; (4) parede divisória; (5) mesa de coordenadas; (6) área de controlo de sistema.

2.4.1.2. Técnica de medida LDA

Para a medição das velocidades, foi utilizada como fonte de luz um laser Physics Stabilité 2017s árgon-ion operando no modo simples com uma potência de 2W. O sistema óptico era constituído por um módulo óptico LDA baseado num sistema de fibras-ópticas de uma componente Dantec, com uma sonda de 60mm, trabalhando numa configuração de retrodispersão.

Uma mesa de coordenadas tridimensional, localizada em frente à janela do tanque suportava a sonda de fibra óptica e permitia o posicionamento do volume de controlo em cada ponto da secção de teste. Para melhorar o alinhamento das ópticas e para reduzir o volume de controlo, foi utilizado um beam expander (Dantec 55 x 12) à frente da lente frontal de 600 mm. A luz dispersada era recolhida por um foto multiplicador (PM). Um cartão AT-MIO-10 fazia a ligação entre o BSA e a sonda de registo da agitação na secção de medição. De forma a obter dados A/D coincidentes com os dados LDA, a aquisição de dados análogos foi feita com uma amostra de frequência de aproximadamente 2-3 vezes a frequência média de amostragem LDA. Foram usados filtros de coincidência para fazer corresponder os dados de LDA. As características principais do LDA utilizado são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2. Características principais do LDA.

Comprimento de onda	514.5 nm
Semi-ângulo dos raios medidos no ar	3.588°
Dimensão do volume de controlo no ar:	
Eixo Maior	2.349 mm
Eixo Menor	0.1475 mm
Espaçamento entre franjas	4.111 μm

2.4.2. Discussão e resultados

Neste conjunto de testes foram realizadas medições para um profundidade de água de 22 cm, para ondas regulares, com uma altura e um período de 3.5 cm e 1.25 s, respectivamente, as quais correspondem (à escala) a situações comuns do estado do mar da costa portuguesa. A celeridade C da onda, definida como a razão entre o comprimento e o período da onda, era igual a 1.3 m/s. Foi utilizado um modelo de quebramar com uma superfície lisa e de secção trapezoidal. As características e dimensões do modelo de quebramar e a localização dos perfis medidos na secção de teste são mostrados na Figura 23.

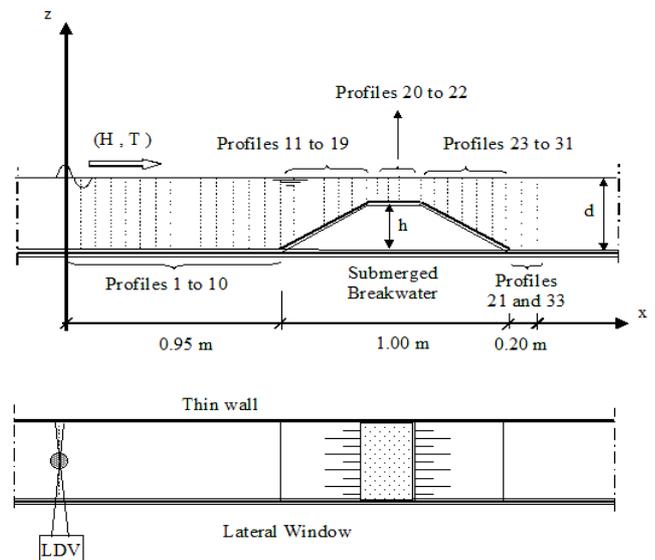


Figura 23. Secção de teste e posicionamento dos perfis medidos. ($h=0.20m$; $d=0.22m$; $b=0.10m$; $h=3.5cm$; $T=1.25s$).

Para cada um dos 33 perfis e para cada um dos níveis de água (d), foram avaliados 50 valores de velocidade correspondentes a 50 intervalos de período da onda.

Para cada perfil foi definido o campo de velocidades em função da fase da onda. Na figura 24, são mostrados os campos de velocidades em função da fase da onda para dois dos perfis medidos.

Os valores dos níveis da água e da velocidade foram normalizados pela profundidade da água (d) e pela celeridade da onda (C), respectivamente.

Os dados obtidos permitem a definição do campo de velocidade em volta do quebramar submerso em 50 situações diferentes, correspondendo a 50 diferentes valores da fase da onda.

Na Figura 25, são apresentadas algumas destas situações. Foram também avaliadas as flutuações de velocidade (rms) através das suas componentes vertical e horizontal de velocidade.

Os valores de rms (u' e v') em cada perfil e em cada nível foram normalizados pelo valor médio da componente da velocidade local correspondente (u e v).

Relativamente aos valores médios da velocidade, foram analisadas 50 situações diferentes que correspondem a 50 fases da onda. Nas Figuras 26 e 27 são apresentadas duas destas situações.

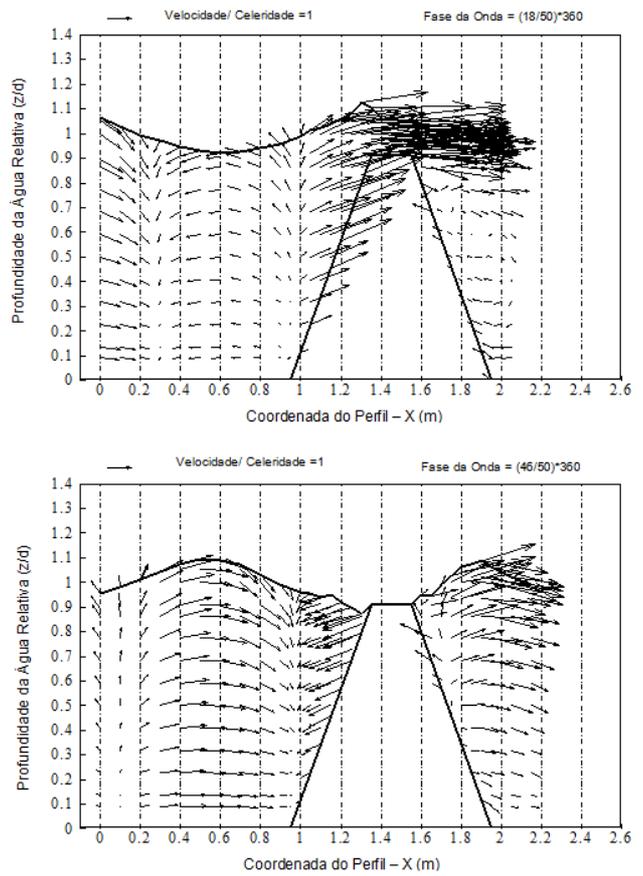


Figura 25. Flutuações de velocidade para diferentes fases da onda.

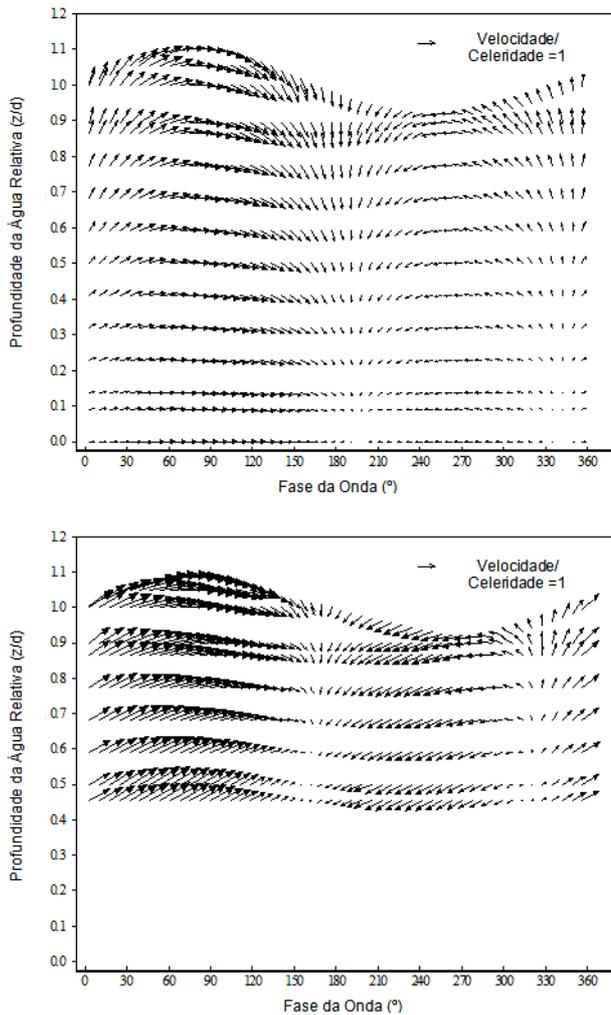


Figura 24. Campos de velocidades em função da fase da onda.

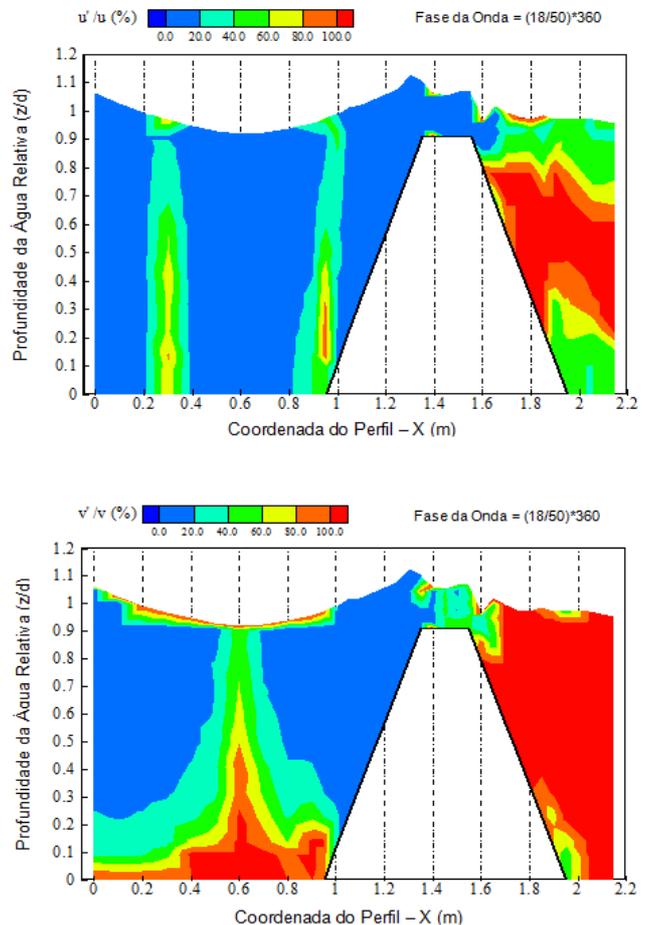


Figura 26. Flutuações verticais e horizontais de velocidade para diferentes fases de onda.

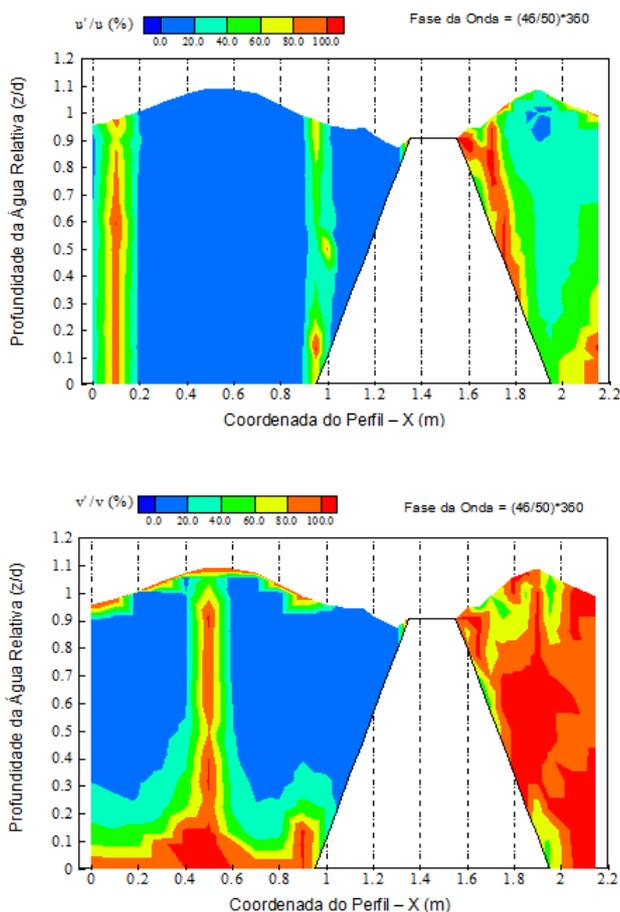


Figura 27. Flutuações verticais e horizontais de velocidade para diferentes fases de onda.

Desta forma foi possível caracterizar o movimento do fluido perto do quebramar destacado em função da fase da onda, permitindo a identificação de regiões de recirculação a barlar e a sotamar da estrutura. Os campos de flutuação da velocidade mostram que a presença do quebramar conduz a um aumento na turbulência, sendo a localização da região de mais elevada turbulência dependente do valor da fase da onda.

2.5. Advanced fluid mechanics studies of ship propulsion systems

Pêgo (2007a) estudou a optimização de sistemas de propulsão de navios do tipo “pod drive”.

Tratando-se de uma configuração que apresenta dois hélices em sequência, o objectivo da investigação, para além da determinação da geometria do “pod” mais eficiente, visou a influência da contra-rotação e da co-rotação para a melhoria de eficiência do sistema.

A primeira parte da investigação focou a optimização da geometria do “pod” que conduz à melhor eficiência do sistema. A determinação da eficiência foi conseguida medindo o impulso gerado e o momento necessário para fazer rodar os hélices a diferentes velocidades de avanço do sistema. Os 24 modelos analisados evidenciaram um aumento de eficiência substancial pela introdução da contra-rotação e que foi anteriormente documentado, Pêgo (2007), Pêgo e Maia (2007).

Após os estudos de eficiência foram feitos estudos detalhados do campo de velocidades na esteira de dois modelos, nomeadamente os dois modelos com maior eficiência na configuração de co- e contra-rotação. A medição dos campos de velocidades foi feita recorrendo a um sistema de análise de partículas da firma Aerometrics (Phase Doppler Particle Analyser - PDPA) adaptado para funcionar como um sistema de anemometria laser Doppler, a funcionar em modo de retrodispersão (backscatter LDA).

A sonda gera um volume de controlo com um diâmetro aproximado de 100 μm , à distância de 665 mm da lente frontal, dentro de água. Este equipamento permitiu a medição simultânea de duas componentes do campo de velocidades. Os sinais Doppler foram processados por duas unidades Dantec 57N20 BSA Enhanced, a operar em modo síncrono. A instalação experimental usada durante as medições do campo de velocidades está representada na Figura 29.

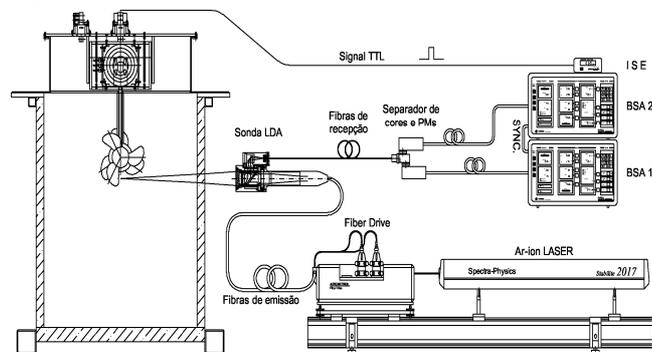


Figura 29. Instalação do sistema de anemometria laser Doppler.

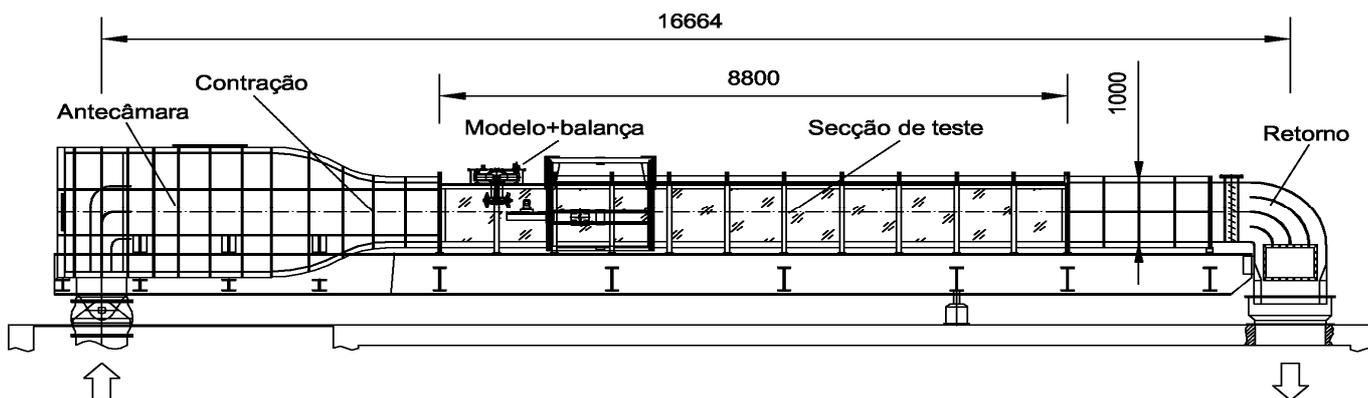


Figura 28. Localização do modelo do propulsor da balança no túnel de água.

Os resultados mais relevantes das medições do campo de velocidades na esteira dos modelos são apresentados na Figura 30 e Figura 31. As figuras mostram o campo de velocidades médio na esteira dos dois modelos.

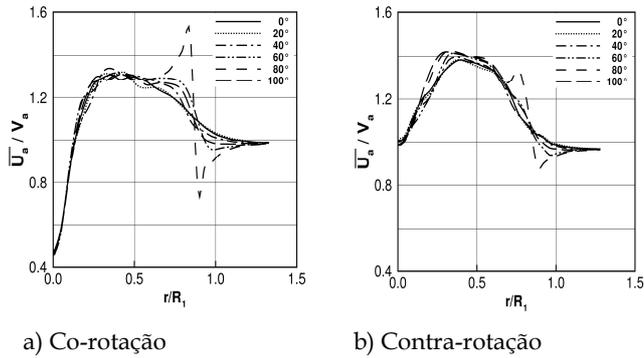


Figura 30. Distribuição radial da velocidade média axial na esteira dos modelos de propulsor.

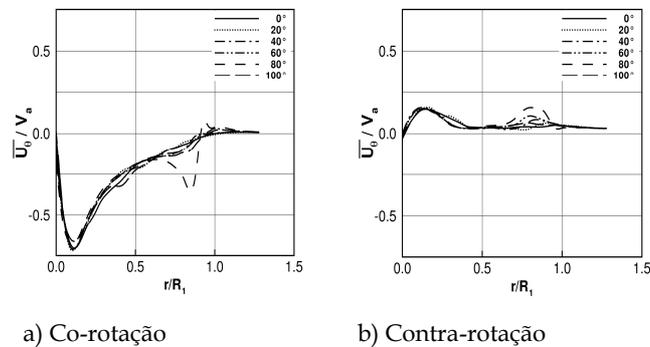


Figura 31. Distribuição radial da velocidade média tangencial na esteira dos modelos de propulsor.

A conclusão evidente da observação dos resultados é que o modelo em contra-rotação produz um impulso axial mais intenso e homogénio e ao mesmo tempo praticamente não produz vórtice de esteira, como é evidenciado pela pequena amplitude da velocidade tangencial.

Por sua vez, o modelo em co-rotação apresenta um comportamento típico dos hélices de navio, com impulso pouco homogénio (gerado pela periodicidade da passagem das pás) e apresentando um vórtice de esteira intenso.

Como conclusão, foi possível verificar que a contra-rotação tem maior eficiência e há uma compensação dos vórtices produzidos pelos hélices sequenciais, resultando num maior impulso para a mesma quantidade de momento disponível aos hélices.

Os resultados das medições do campo de velocidades foram anteriormente publicados em Pêgo *et al.* (2007) e Pêgo e Maia (2007).

2.6. Análise do campo de pressões em quebramares submersos

Neves (2008) analisou experimentalmente o campo de pressões e de velocidades em torno de modelos de quebramares submersos, quando sujeitos à acção de diferentes condições de agitação marítima.

Com este trabalho analisaram-se e avaliaram-se as pressões actuantes e os fenómenos físicos associados à interacção fluido-estrutura, nos taludes e no coroamento de modelos de quebramares submersos induzidos pela acção da agitação marítima, uma vez que um estudo pormenorizado da sua distribuição e uma avaliação da sua magnitude podem constituir uma abordagem do maior interesse e potencialmente úteis no seu dimensionamento hidráulico e na formulação de critérios de dimensionamento.

O programa de ensaios realizado visou, essencialmente, a determinação do campo de pressões e de velocidades em torno deste tipo de estruturas, uma vez que se considera que estas duas grandezas interferem com a funcionalidade da estrutura e com a sua estabilidade, tendo igualmente consequências ao nível da circulação de sedimentos e na evolução morfodinâmica das praias que lhe são adjacentes.

A variação do campo de oscilações, de velocidades e de pressões exercidas sobre modelos de quebramares submersos foi analisada em modelos com características distintas e sob a acção de diferentes condições de agitação, quer do tipo regular, quer para estados de agitação irregulares.

Os ensaios bidimensionais foram realizados no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP. Destacam-se os ensaios onde foram avaliadas as pressões e as velocidades tangenciais na superfície das estruturas, visando uma melhor compreensão da acção do escoamento sobre as estruturas, bem como a identificação de potenciais zonas críticas relativamente à sua estabilidade, em termos de pressões e de velocidades máximas resultantes da acção de diferentes condições de agitação marítima.

A medição das pressões foi efectuada através de tomadas de pressão situadas no coroamento e nos taludes dos modelos (à superfície do quebramar), onde foram colocados os sensores de pressão, tendo sido igualmente medidas as velocidades paralelas à superfície das estruturas nos mesmos pontos.

A medição simultânea destas duas grandezas foi feita com o intuito de avaliar a sua possível correlação. As velocidades nas proximidades da estrutura foram avaliadas em diferentes secções, através da anemometria Laser-Doppler.

A Figura 32 ilustra a localização das tomadas de pressão ou onde estão representados os pontos de medição, medidos um a um, para cada um dos estados de agitação.

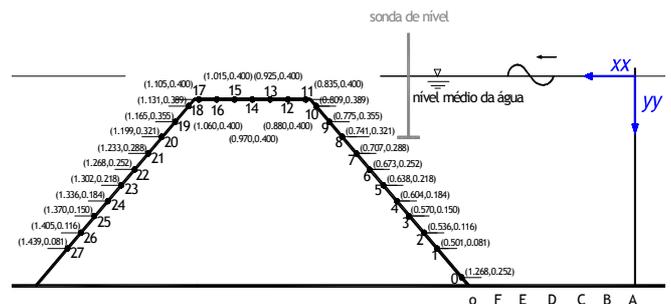


Figura 32. Distribuição vertical das velocidades horizontais máximas, médias e mínimas registadas no perfil C, $H_i=0.065m$, $T=1.5s$, $d=0.45m$.

Um sensor de pressão era colocado na respectiva tomada, correspondente ao ponto onde se pretendia medir a pressão, fazendo-se coincidir, o ponto de cruzamento dos raios laser com o ponto em questão. A sonda laser foi posicionada de modo a que o plano formado pelos raios ficasse tangencial ao talude dos modelos. Uma sonda de nível localizada na mesma secção vertical permitiu o registo da elevação da superfície livre.

Foi usado o sistema óptico LDA Modular Optics 55X da Dantec, de duas componentes, na configuração de retro-dispersão (*backscatter*). A utilização de um colimador permitiu ajustar as propriedades do raio no volume de controlo. Num deles, através de uma célula de Bragg, foi introduzida uma alteração da frequência de um valor de 40 MHz (modelo 55X29) com o intuito de determinar o sinal da velocidade medida (obviando a dificuldade resultante da ambiguidade direccional do sistema de medição).

A transmissão era realizada através de um cabo de fibras ópticas que transmitia os feixes de laser de saída paralelos a uma sonda 2D de 60mm de diâmetro. A sonda possuía uma lente frontal colectora, de distância focal igual a 600mm, que fazia com que ambos os feixes se cruzassem entre si e formassem o volume de controlo.

Antes da lente frontal foi ainda colocado um expensor de feixes (*beam expander*) com um quociente de expansão igual a 1.98, que permitia diminuir o volume de controlo para a distância de medição utilizada, ao mesmo tempo que melhorava a razão sinal-ruído para essa mesma distância.

As dimensões do volume de controlo eram iguais a 0.148mm x 0.147mm x 1.194mm, sendo o espaçamento entre feixes igual a 75.24mm e o seu diâmetro igual a 1.35mm.

Na Figura 33 podem observar-se alguns dos constituintes do sistema de medição de velocidades. O volume de controlo era movimentado na parte exterior da secção de teste, através da deslocação da mesa de coordenadas onde se posicionaram os elementos ópticos.



Figura 33. Mesa de coordenadas, sonda e módulos ópticos instalados.

Neste tipo de ensaios, foi utilizado como sistema de aquisição e tratamento de sinais, o Burst Spectrum Analyser (BSA), que permitia adquirir simultaneamente os sinais analógicos da pressão e/ou da elevação da superfície livre e o sinal Doppler.

O sistema permitia que a cada valor da velocidade medida em determinado instante e em determinado ponto do escoamento, pudesse ser atribuído um valor da posição da superfície livre e/ou da pressão, nesse mesmo instante.

O processamento dos dados consistiu na determinação do valor médio da pressão, da elevação da superfície livre e da velocidade tangencial ao talude, para 50 fases distintas da onda e os respectivos desvios em relação à média, tendo esta análise sido feita para cada um dos pontos de medição, com o auxílio de um programa de cálculo elaborado para o efeito.

O programa de medições foi repetido para os diferentes modelos e as diferenças entre os valores obtidos foram notórias. Verificou-se uma redução geral do valor, quer da pressão dinâmica, quer da velocidade tangencial nos registos relativos ao modelo rugoso permeável, face aos que dizem respeito aos modelos impermeáveis.

A Figura 34 ilustra os resultados obtidos no ponto n.º9. A execução de ensaios com modelos de rugosidades e de permeabilidades distintas permitiu ainda a análise da influência destes factores nas características do escoamento.

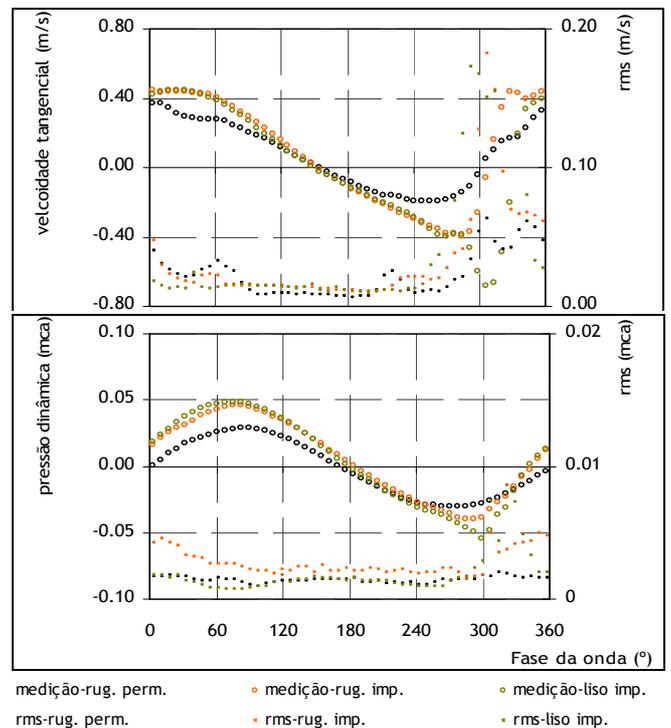


Figura 34. Variação da pressão dinâmica e da velocidade tangencial médias e respectivos desvios-padrão em função da fase da onda, tomada de pressão n.º 9 ($H_i=0.065m$, $T=1.5s$, $d=0.45m$).

A influência da submersão dos modelos no valor destas variáveis, fortemente relacionada com a eficiência destas estruturas, foi também analisada através da execução de ensaios com diferentes profundidades de água. Foi também investigada a influência de outras características da agitação incidente.

Muito resumidamente, concluiu-se que a zona superior dos modelos e, nomeadamente, a extremidade exposta do coroamento, eram as secções mais críticas, quer em termos de pressões dinâmicas, quer em termos de velocidades registadas.

O decréscimo genérico da pressão dinâmica a que se assistiu nas restantes tomadas de pressão, localizadas no talude posterior, e resultante da energia dissipada e transmitida nesta zona, é também observável. A rugosidade da superfície dos modelos e, particularmente a sua permeabilidade, mostraram afectar consideravelmente o valor destas grandezas, permitindo assim confirmar igualmente o seu papel relevante na atenuação da energia da agitação incidente. Os ensaios descritos foram realizados com condições de agitação regular, tendo sido efectuados igualmente ensaios com agitação irregular que pretenderam validar as conclusões retiradas dos ensaios anteriores e complementá-las através da determinação dos espectros de energia da elevação da superfície livre, da pressão e das velocidades.

2.7. Fenómenos de Sedimentação e Transporte - Novas Perspectivas de Análise

Com este estudo pretende-se estudar o início do movimento dos sedimentos de diferentes leitos granulares, analisando os critérios existentes e investigando uma nova aproximação teórica, tendo em conta a influência das flutuações turbulentas no mecanismo do início do movimento. Os critérios existentes para estabelecer as condições de início do movimento, designadas como condições críticas, podem envolver a velocidade média crítica, U_{cr} , ou a tensão crítica de arrastamento, τ_c (por exemplo o critério de Shields), pelo que é necessário, numa primeira fase, determinar a tensão de arrastamento. A tensão de arrastamento é uma grandeza difícil de determinar pois baseia-se no conhecimento do gradiente de velocidade no fundo do canal, dada por,

$$\tau = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0}, \quad [2]$$

Esta grandeza pode ser determinada a partir de dois tipos de métodos: os métodos directos e os métodos indirectos. Os primeiros são baseados na medição directa da tensão de arrastamento e os segundos permitem determinar a tensão de arrastamento a partir do conhecimento do perfil de velocidade e/ou do perfil das tensões de Reynolds $u'v'$.

Relativamente aos métodos indirectos estes baseiam-se na aplicação de leis conhecidas ao perfil de velocidade do escoamento, com especial destaque para a conhecida lei logarítmica. A partir desta lei é possível ainda derivar o método de Clauser. Outras leis passíveis de ser aplicadas são nomeadamente a lei linear (na região interior) e a lei de esteira de Coles, na denominada região exterior. Este grupo de métodos indirectos está sujeito à existência das referidas leis, o que nem sempre é o caso (Carvalho *et al.*, 2007).

Conforme foi referido anteriormente é possível determinar a tensão de arrastamento a partir do perfil das tensões de Reynolds, o qual para um escoamento 2D em canal, se pode escrever:

$$-\overline{u'v'} = u_*^2 \left(1 - \frac{y}{h} \right), \quad [3]$$

em que $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$ representa a velocidade de atrito, função da tensão de arrastamento.

Este método tem a vantagem de se basear em medições das flutuações turbulentas das componentes u (horizontal) e v (vertical), as quais são facilmente medidas com um LDA de duas componentes.

A Figura 35 mostra os perfis da componente u da velocidade média, em coordenadas de parede, para diferentes condições de escoamento, obtidos sobre fundo liso.

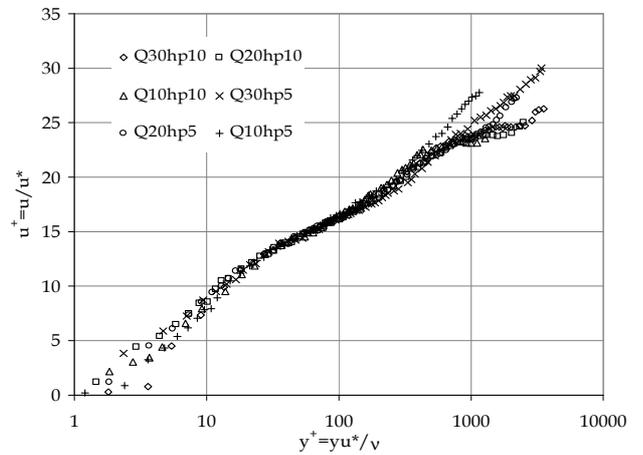


Figura 35. Perfis de velocidade em coordenadas de parede para diferentes condições de escoamento.

A sonda óptica, método directo utilizado neste estudo, baseia-se, também, no efeito Doppler e permite a determinação directa da tensão de arrastamento. A sonda é instalada no fundo do canal, não perturbando o escoamento, e emite um padrão de franjas que formam o volume de controlo, localizado a uma pequena distância da parede (174µm), o qual deverá estar situado na subcamada viscosa.

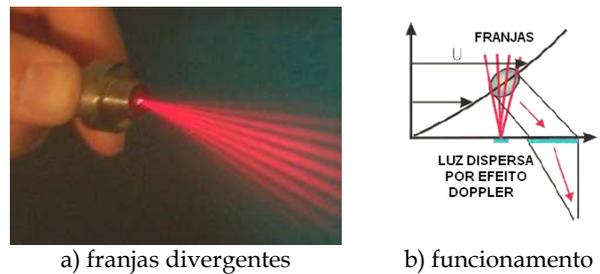


Figura 36. Imagem das franjas divergentes (a) e esquema de funcionamento da sonda óptica (b) (adaptado de Fourquette *et al.*, 2004).

As partículas ao atravessarem o volume de controlo emitem luz que é recolhida pelo fotodetector incorporado na sonda (Figura 36).

A luz recolhida tem uma frequência própria, designada de frequência Doppler, sendo possível demonstrar que a tensão de arrastamento é proporcional a essa frequência (Fourquette *et al.*, 2004):

$$\tau = \mu k f_D, \quad [4]$$

em que k representa um parâmetro que depende das características ópticas da sonda. Tem-se assim um dispositivo que permite medir directamente a tensão de arrastamento baseado no efeito Doppler, o qual possui as mesmas vantagens de um LDA, anteriormente descritas.

A Figura 37 mostra a comparação dos valores do coeficiente de atrito $C_f = \tau / \left(\frac{1}{2} \rho U_0^2 \right)$ obtidos com a sonda óptica, com os valores obtidos pelos métodos indirectos e com os valores retirados da literatura (Chow, 1959).

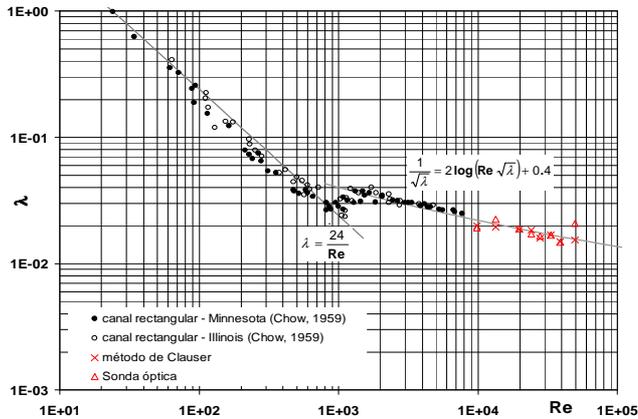


Figura 37. Diagrama de coeficientes de resistência.

Verificou-se que as medições realizadas com a sonda, em leito liso, estão de acordo com os valores esperados (Carvalho *et al.* 2006). No entanto, medições mais recentes efectuadas com a sonda em escoamento sobre fundos rugosos permitiram concluir que a tensão de arrastamento medida pela sonda não correspondia aos valores esperados.

3. Considerações Finais

Os estudos apresentados ilustram diferentes aplicações da tecnologia laser para a medição de perfis de velocidades e das suas flutuações. Através desta análise, torna-se também evidente um concreto domínio desta técnica por parte dos vários investigadores que realizaram estes estudos, maioritariamente no Laboratório de Hidráulica da SHRHA-FEUP. As conclusões principais relativas a cada um dos estudos foram já apresentadas em cada um dos subcapítulos anteriores. Contudo, é ainda de realçar que todos os estudos realçam as vantagens desta tecnologia, referidas na introdução: processo não-intrusivo, precisão espacial e temporal, audência de calibração, possibilidade de medições das três componentes e da direcção do escoamento.

Referências

- Allsop, N.W.H. (1983). Low-crested breakwaters, studies in random waves, ASCE, Proc. Specialty Conference on the Design, Maintenance and Performance of Coastal Structures, Arlington, Virginia, USA, 94-107.
- Allsop, N.W.H., 1990. Reflection performance of rock armoured in random waves, ASCE, Proc. of the 22nd Int. Conference on Coastal Engineering, Delft, Netherlands, Vol. 2, 1460-1472.
- Allsop, N.W.H. e Hettiarachchi, S.S.L. (1988). Reflections from coastal structures, ASCE, Proc. of the 21st Int. Conference on Coastal Engineering, ASCE, NewYork, Malaga, Spain, 1, 782-794.
- AquaStress. (2007). Water stress and mitigation options already applied in the test sites - towards defining the Case Studies, FEUP, Porto
- Carvalho, E., Maia, R. e Proença, M. F. (2006) *Fenómenos de Sedimentação e Transporte – Novas perspectivas de análise*, 1as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP/IHRH.
- Carvalho, Elsa; Maia, R. e Proença, M.F (2007), *Fenómenos de Sedimentação e Transporte – Início do movimento*. 2ªs Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, Porto
- Chow, V. (1959). *Open-channel hydraulics*, MacGraw-Hill International Editions.
- Costa, C., Maia, R., (2008) Analysis of water management strategies for the left margin of the Guadiana River basin, FEUP, Porto
- COTR. (2003). Guia de Rega. Necessidades Hídricas das Culturas. Considerações gerais, COTR, Beja
- COTR. (2005). Inventário das explorações regadas com mais de 5 hectares, COTR, Beja
- Cummins H. Z., Knable N., e Yeh Y. (1964) , *Observation of Diffusion Broadening of Rayleigh Scattered Light*, Phys. Rev. Lett. 12, 150 – 153
- D’Angremond, K., Van der Meer, J.W. e De Jong, R.J.(1996). Wave transmission at low-crested structures, ASCE, Proc. of the 25th Int. Conference on Coastal Engineering, Orlando, Florida, USA, 2, 2418-2427.
- Durst, F., Maia, R., Sender, J., Stieglmeier, M. (1992). Semiconductor LDA- Measurements of the Laminar Flow in a Pipe T - Junction. Sixth International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisboa, Portugal.
- Fourquette, D., Gonzalez, P., Modarress, D., Arik. E. (2004). *Optical Measurement of Wall Shear Stress With Emphasis on Flows Near Separation*, 24th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference.
- Iñigo J. Losada, Balkema, Coastal Structures '99, Santander, Spain, Vol. 2, 689-696. ISBN 90 5809 092 2.
- Kriezi, E.E., Karambas, Th.V., Prinos, P., Tilegrafos, Ach., Gironella, X. e Mosso, C. (1999). Reflection and transmission for submerged and rubble-mound breakwater,
- Lehmann, B. (1968), *Geschwindigkeitsmessung mit Laser-Doppler-Anemometer Verfahren*. Wissenschaftlicher Berichte AEG-Telefunken 41:141-145
- Lima, Maria Manuela Carvalho de Lemos (2000) – *Medição simultânea de velocidade e concentração através de Anemometria Laser Doppler e fluorescência induzida por Laser*. Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, Portugal
- Maia, R. (1995). *Experimental Study of the Flow in a Pipe Tee Junction*. Colloquium 330, organized by Euromech, Praga, República Checa.

- Maia, R., Costa, N. (2004). *Turbulent Dividing Flow on 60° Bifurcations*. 2004 International Conference on Computational and Experimental Engineering and Science (ICCES'04), Madeira, Portugal.
- Maia, R., Pereira da Costa, N., Proença, M.F. e Pinho, F.T. (2000). *Asymmetric Diverging Flow on a 90° Tee Junction*. 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisboa, Portugal.
- Maia, R., Pinho, F. T., Proença, M.F. e Schulte, A. (1998). *Energy Losses on a 90° Tee Junction*. 9th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, pp 137-144, Lisboa, Portugal.
- Maia, Rodrigo Jorge Fonseca de Oliveira (1992) – Investigações numéricas e experimentais do efeito das perdas de carga localizadas em sistemas de tubagens: Métodos e técnicas para o seu estudo sistemático. O caso particular do Tê a 90°. Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, Portugal
- Neves, Ana Cristina Gomes Rodrigues Valente (2008) - *Análise do Campo de Pressões em Quebramares Submersos*. Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, Portugal
- Pêgo, João Pedro (2007) – *Advanced Fluid Mechanics Studies of Ship Propulsion Systems*, Tese de Doutoramento, Universidade de Erlangen-Nürnberg, Alemanha
- Pêgo, João Pedro, Lienhart, Hermann, Durst, Franz, Badran, Omar (2006), *Construction of a test facility for the research of ship propulsion systems*, Emirates Journal For Engineering Research, Vol.10 n° 2, pp.1-8, 2006
- Pêgo, João Pedro, Lienhart, Hermann, Durst, Franz (2007), *Mean velocity and moments of turbulent velocity fluctuations in the wake of a model ship propulsor*, Experiments in Fluids, Vol.43, pp.463-473
- Pêgo, João Pedro, Maia, Rodrigo (2007), *Medições de forças e campos de velocidade em sistemas de propulsão de navios*, 2ªs Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, Porto, ISBN 978-989-95557-1-6
- Proença, M. F. (1987) – Estudo de campos de velocidades e de pressões num escoamento sob uma comporta: Sua influência na estabilidade do escoamento. Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, Portugal
- Seelig, W.N., 1983. Wave reflection from coastal structures, ASCE, Proc. of the Int. Conference on Coastal Structures '83, Arlington, Virginia, USA, 1, 961-973.
- Taveira Pinto, F. (2001) – Análise das oscilações e dos campos de velocidade nas proximidades de quebramares submersos sob a acção da agitação marítima. Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, Portugal.
- Taveira Pinto, F., Proença, M. F. e Veloso Gomes, F. 1998a. Energy dissipation study of submerged breakwaters using velocity measurements, Proc. of the 9th Int. Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, 39.1.1-39.1.8.
- Taveira Pinto, F., Proença, M. F. e Veloso Gomes, F. 1999a. Dissipation analysis on submerged breakwaters using laser Doppler velocimetry, for regular and random waves, Proc. of the 8th Int. Conf. on Laser Anemometry Advanced and Applications, Rome, Italy, 253-265.
- Taveira Pinto, F., Proença, M.F. e Veloso Gomes, F., 1999b. Experimental analysis of the energy reflected from submerged breakwaters, Iñigo J. Losada, Balkema, Proc. of the Int. Conf. On Coastal Structures '99, Santander, Spain, Vol. 2, 683-688. ISBN 90 5809 092 2.
- Taveira Pinto, F., Veloso Gomes, F. e Avilez Valente, P., 1998b. Performance of submerged breakwaters, in H. Kim, S.H. Lee and S.J. Lee Editors/ASCE, Proc. of the 3rd Int. Conference on Hydrodynamics, Seoul, Korea, Vol. 1: Theory and Applications, 401-406. ISBN 89-7472-211-9.
- vom Stein, H. D. E Pfeifer, H.J. (1969) A Doppler difference method for velocity measurements, Metrologia 5:59-61
- Watanabe, Y., Wang, Y. Saeki, H. e Hayakawa T., 1999. Fluid motion with wave overtopping behind a breakwater, Iñigo J. Losada, Balkema, Proc. of the Int. Conf. on Coastal Structures '99, Santander, Spain, Vol. 2, 183-191. ISBN 90 5809 092 2.
- WaterStrategyMan. (2004). The WaterStrategyMan DSS, ProGEA, Italy.
- Yamashiro, M.; Yoshida, A. e Irie, I., 1999. Experimental study on wave field behind a submerged breakwater, Iñigo J. Losada, Balkema, Coastal Structures' 99, Santander, Spain, Vol. 2, 675-682. ISBN 90 5809 092 2.
- Yeh Y. e Cummins H. Z. (1964) Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer, Appl Phys Lett 4:176-178