



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

Área Departamental de Engenharia Civil

## **Estudo de uma tomada de água em modelo reduzido**

**JOANA ISABEL CABRITA GONÇALVES**

Licenciada em Engenharia Civil

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Especialização em Hidráulica

Orientador(es):

Doutora Maria Teresa Fontelas Santos Viseu Sarrico Santos

Doutora Sandra Maria Mendes de Carvalho Martins

Júri:

Presidente: Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos

Vogais: Mestre Alexandre Almeida Mendes Borga

Doutora Maria Teresa Fontelas Santos Viseu Sarrico Santos

Doutora Sandra Maria Mendes de Carvalho Martins

**Dezembro 2013**



## RESUMO

O presente estudo tem como objetivo avaliar experimentalmente - no modelo físico do aproveitamento hidroelétrico do Foz Tua (LNEC) - o campo de velocidades do circuito hidráulico na vizinhança da tomada de água e interpretar, com base nos resultados obtidos, as razões da assimetria observada na restituição dos caudais bombados à albufeira.

A preparação teórica do estudo experimental envolveu um trabalho de revisão bibliográfica sobre as tomadas de água e, ainda sobre o impacto de singularidades no campo de velocidades dos escoamentos pressurizados.

A medição do campo de velocidades desenvolvida numa das duas condutas que modela o circuito hidráulico dos grupos geradores para o funcionamento hidráulico em bombagem e turbinagem foi efetuado através do sistema de velocimetria Doppler ultrassónico (UDV). Tendo por base os perfis diametrais de velocidades registados com as diferentes posições do sensor (espaçamentos angulares de 45°), a aplicação de uma técnica numérica de interpolação linear-polar, permitiu a caracterização 2D do campo de velocidades nas diferentes secções do circuito. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos. Verifica-se que a constatada assimetria com que se processa a restituição dos caudais bombados na albufeira, está relacionada com o efeito da curva do circuito hidráulico, a montante, que ainda se faz sentir na secção do plano das grades da tomada de água.

**Palavras-chave:** tomada de água, circuito hidráulico, velocimetria Doppler, campo de velocidades, efeito de curva.



## **ABSTRACT**

The present study aims to evaluate experimentally - at the existing physical Foz Tua dam model at (LNEC) - the velocity field of the hydraulic conduits in the water intake and interpret the results obtained to explain the reasons for the observed asymmetry in the restitution for pumping cycle.

The theoretical preparation of the experimental study involved a research review about water intakes and also on the impact of singularities in the velocity field of the pressurized flow.

The velocity field measurements were made using the electronic system of ultrasonic Doppler velocimetry (UDV) for 2 flow situations (pumping and generation cycles hydraulic) in one of the two pipelines that models the hydraulic circuit for power production. Based on the diametrical velocity profiles registered with the different positions of the transducer (angular spacing of  $45^\circ$ ), the 2D characterization of the velocity field in the different sections of the circuit was allowed by the application of a linear-polar interpolation .

The results obtained are presented and discussed. It is found that the observed asymmetry which is processed in the restitution for pumping cycle is related to the effect of the upstream curve of the hydraulic circuit and it remains until the section of the plan bars of the water intake.

**Keywords:** water intake, hydraulic circuit, Doppler velocimetry, velocity field, curve effect.



## **AGRADECIMENTOS**

À Doutora Sandra de Carvalho Martins (Professora Adjunta do ISEL) e à Doutora Teresa Viseu Sarrico Santos (Investigadora Auxiliar do LNEC) pela orientação científica, esclarecimentos e correções concedidas no decorrer do presente estudo. Pela total disponibilidade, dedicação e carinho demonstrados durante esta fase de trabalho. Em especial, gostaria ainda de agradecer a oportunidade que me foi proporcionada para desenvolver este trabalho, enriquecido de uma componente experimental, no NRE (Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas) do LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil).

À EDP (Energias de Portugal), em particular aos Eng.ºs José Dias da Silva e Fernando Barbosa Teixeira, por me permitirem usar o modelo físico da barragem de Foz-Tua, construído no âmbito de um estudo solicitado pela EDP ao LNEC, sem o que teria sido impossível realizar a presente dissertação.

Ao LNEC pelo acolhimento e por todo o suporte prestado nomeadamente na disponibilidade e acesso às instalações no âmbito desta dissertação.

Ao IST (Instituto Superior Técnico), nomeadamente à Doutora Helena Ramos, pela facilitação do equipamento de medição UDV (Velocímetro Doppler Ultrassónico).

À secção de modelagem do DHA (Departamento de Hidráulica e Ambiente) no LNEC, em especial ao Nuno Aido, pela elaboração da peça abraçadeira para o posicionamento e fixação do transdutor.

Ao Engº Lourenço Mendes pelo ensinamento de inúmeros conhecimentos e inteira disponibilidade para o esclarecimento de dúvidas. Pela total dedicação e acompanhamento do estudo. Um especial agradecimento pela elaboração e adaptação do código MatLab integrante do presente estudo.

À Adelaide Gonçalves pelos ensinamentos, apoio e disponibilidade. Não tenho palavras suficientes para agradecer todo o acolhimento, acompanhamento e amizade.

A toda a equipa do NRE, pelo acolhimento e carinho concedidos durante esta fase de trabalho.

À minha família, que sempre me apoiou.



## INDICE DE TEXTO

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento geral do aproveitamento de Foz Tua.....	1
1.2	Objetivos do trabalho .....	3
1.3	Estrutura da tese .....	4
2	Síntese de conhecimentos.....	5
2.1	Aproveitamentos hidráulicos fluviais - enquadramento geral.....	5
2.2	Tomadas de água.....	6
2.2.1	Aspetos gerais.....	6
2.2.2	Classificações .....	7
2.2.3	Grelhas de proteção .....	12
2.2.4	Formação de vórtices.....	19
2.2.5	Submersão .....	23
2.3	Impacto das singularidades dos circuitos hidráulicos no campo de velocidades do escoamento.....	27
2.3.1	Campo de velocidades dos escoamentos uniformes: laminar e turbulento (caracterização geral) .....	27
2.3.2	Entrada do escoamento num tubo.....	31
2.3.3	Escoamento em curvas .....	34
3	Trabalho experimental.....	41
3.1	Descrição do modelo reduzido .....	41
3.2	Princípios de medição Doppler .....	43
3.3	Metodologia e plano de medições .....	46
4	Análise e discussão de resultados.....	51
4.1	Perfis médios das velocidades registadas com o sistema Doppler .....	51
4.2	Tratamento numérico, apresentação e discussão de resultados .....	59
4.2.1	Tratamento numérico .....	59
4.2.2	Apresentação e discussão dos resultados numéricos.....	59

5	Síntese e conclusões do estudo e propostas para desenvolvimentos complementares .....	67
5.1	Síntese do estudo e principais conclusões .....	67
5.2	Proposta para desenvolvimentos complementares .....	68
	Referências bibliográficas .....	69
	ANEXOS.....	I

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Confluência entre o rio Tua e o rio Douro. Local de construção do aproveitamento de Foz Tua (fonte: <a href="http://portugalfotografiaaerea.blogspot.pt">http://portugalfotografiaaerea.blogspot.pt</a> ).....	1
Figura 1.2: Esquema da exploração do aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua (adaptado de EDP, 2008).....	2
Figura 1.3: Antevisão da implantação da barragem e da sub-estação do aproveitamento hidroelétrico do Foz Tua (fonte: <a href="http://www.a-nossa-energia.edp.pt">http://www.a-nossa-energia.edp.pt</a> ).....	2
Figura 1.4: Esquema planimétrico das principais estruturas do aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua (adaptado de <a href="http://www.engenheiromaestri.com">http://www.engenheiromaestri.com</a> ). ....	3
Figura 2.1: Esquema, em planta, de uma tomada de água do tipo lateral (adaptado de ESHA, 2004). ..	9
Figura 2.2: Esquema dos cortes a-a, b-b e c-c de uma tomada de água do tipo lateral (adaptado de ESHA, 2004). ....	9
Figura 2.3: Tomada de água do tipo Tirolês (ESHA, 2006).....	10
Figura 2.4: Tomada de água do tipo Tirolês (Ramos et al., 2000). ....	10
Figura 2.5: Efeito de Venturi e da curvatura na vazão através da grelha (Ramos et al., 2000).....	11
Figura 2.6: Esquema em planta do canal (adaptado de I.I. Kukhianidze e F.I. Ezernitskaya, 1970). ...	11
Figura 2.7: Grelha de proteção (Lencastre, 1996). ....	13
Figura 2.8: Secções transversais das barras e orientação do escoamento em relação à grelha (Lencastre, 1996).....	15
Figura 2.9: Características da grelha de proteção (adaptado de Ramos et al., 2000). ....	17
Figura 2.10: Número de Strouhal $St$ para diferentes tipos de secção transversal das barras (Pinheiro, 2006).....	18
Figura 2.11: Evolução do fenómeno da vorticidade (Visher e Hager, 1998). ....	21
Figura 2.12: Solução construtiva de parede anti-vórtice em tomada de água de energia (adaptado de Roberson et al., 1998).....	21
Figura 2.13: Altura de submergência $h_{0min}$ e diâmetro do túnel $D$ (adaptado de S.M. Taghvaei et al., 2012).....	22
Figura 2.14: Dispositivos anti-vórtice com melhor performance, sendo L o comprimento do dispositivo (S.M. Taghvaei et al., 2012). ....	23
Figura 2.15: Esquema de definição das alturas de submergência mínima. ....	24
Figura 2.16: Configurações típicas da entrada da tomada de água: a) $\varphi = 0$ ; b) $\varphi = \pi/2$ ; c) $\varphi = \pi$ (adaptado de Visher e Hager, 1998). ....	25
Figura 2.17: Vórtice livre e distribuição de velocidades (Visher e Hager, 1998). ....	26
Figura 2.18: Submersão mínima para tomadas de água com condições de aproximação de escoamento apropriadas e sem dispositivos especiais para a supressão de vórtices (adaptado de Kauss, 1987).....	27

Figura 2.19: Esquema do tubo de vidro no tanque (Massey, 2002): (a) regime laminar, (b) transição e (c) regime turbulento (Lencastre, 1996).....	27
Figura 2.20: Perfil de velocidades num tubo para o regime laminar em completo desenvolvimento (adaptado de Cimbalá, J. M. et al., 2006).....	29
Figura 2.21: Flutuações da velocidade num escoamento turbulento permanente (adaptado de Quintela, 2009).....	30
Figura 2.22: Distribuição de velocidades, $\bar{u}$ , num tubo para o regime turbulento em função da distância ao eixo, $r$ (adaptado de Cimbalá, J. M. et al., 2006).....	30
Figura 2.23: Representação da variação de velocidade em contacto com superfícies sólidas (Massey, 2002).....	31
Figura 2.24: Estabelecimento do escoamento na entrada de um tubo em regime laminar (adaptado de Cimbalá, J. M. et al, 2006). ....	32
Figura 2.25: Estabelecimento do escoamento na entrada de um tubo em regime turbulento (adaptado de Lencastre, 1996). ....	33
Figura 2.26: Fluido escoado sobre uma superfície curva (adaptado de Massey, 2002). ....	34
Figura 2.27: Trecho curvo de uma tubagem (adaptado de Lencastre, 1996). ....	35
Figura 2.28: Distribuição vetorial da velocidade (m/s) e distribuição da pressão estática (Pa): (a) num plano longitudinal ao cotovelo a 45°, (b) Trajetórias do escoamento (m/s) ao longo do cotovelo a 90°, e (c) num plano transversal à curva a 90° (Pereira, 2010).....	36
Figura 2.29: Dispositivo fixo com pás encurvadas colocado imediatamente a montante de um elemento curvo (Clauss, 2009).....	36
Figura 2.30: Estabelecimento do escoamento perante um cotovelo com 90°: à esquerda com o dispositivo e à direita sem a colocação do mesmo (adaptado de Clauss, 2009).....	37
Figura 2.31: Fluido circulante num cotovelo com 90°: à esquerda sem aplicação das pás encurvadas e à direita com a aplicação das mesmas (adaptado de Clauss, 2009).....	37
Figura 2.32: Escoamento no cotovelo com 90°: sem e com colocação de dispositivo com pás encurvadas (adaptado de Clauss, 2009). ....	38
Figura 2.33: Dispositivo fixo com pás encurvadas colocado a uma distância 4D a jusante da segunda curva (adaptado de Hall, 2009). ....	38
Figura 2.34: Magnitude das velocidades (ft/s) distanciada de 2 a 10D a jusante do dispositivo: a) sem a colocação do dispositivo e b) com o dispositivo (adaptado de Hall, 2009). ....	39
Figura 2.35: Campo de velocidades antes e depois da zona em curva com o dispositivo (Hall, 2009). ....	39
Figura 3.1: (a) Vista de montante da barragem e tomada de água, (b) vista frontal da tomada de água, (c) restituição a jusante da barragem e (d) bacia de dissipação de energia (imagens cedidas pelo LNEC). ....	41

Figura 3.2: Circuito hidráulico: (a) aspeto, (b) e (c) troço curvilíneo a jusante da tomada de água, vistas em planta e na lateral respetivamente.....	41
Figura 3.3: Confluência dos rios Tua e Douro. ....	42
Figura 3.4: (a) Bombas do sistema geral de abastecimento do NRE e (b) válvula de cunha a montante do modelo físico do Foz Tua. ....	43
Figura 3.5: Conjunto de caudalímetros associados a cada conduta e variadores de velocidades.....	43
Figura 3.6: Esquema de funcionamento do Doppler. ....	44
Figura 3.7: Princípio da técnica de emissão pulsada dos ultrassons para medição da velocidade. ....	45
Figura 3.8: (a) Peça para posicionamento do transdutor Doppler, (b) equipamento de processamento e (c) posicionamento do transdutor. ....	47
Figura 3.9: Vista em planta dos circuitos hidráulicos: (a) no modelo físico e (b) posições das secções de medição.....	47
Figura 3.10: Posições do transdutor na medição de cada secção na conduta. ....	48
Figura 4.1: Registos dos perfis diametrais de velocidade (mm/s) com espaçamento angular de 45°: funcionamento do circuito hidráulico em bombagem.....	52
Figura 4.2: Registos dos perfis diametrais de velocidade (mm/s) com espaçamento angular de 45°: funcionamento do circuito hidráulico em turbinagem.....	53
Figura 4.3: Efeito transmissor da parede oposta à do encosto do transdutor Doppler (adaptado de Signal Processing (DOP3000)). ....	54
Figura 4.4: Perfis diametrais das velocidades registadas nas diferentes secções para igual posicionamento do transdutor, no modo de funcionamento do circuito hidráulico em bombagem. ....	57
Figura 4.5: Perfis diametrais das velocidades registadas nas diferentes secções para igual posicionamento do transdutor, no modo de funcionamento do circuito hidráulico em turbinagem ....	58
Figura 4.6: Esquema de discretização utilizado no código MatLab.....	59
Figura 4.7: Caracterização 2D do campo de velocidades (mm/s) nas diferentes secções de medição para o funcionamento do circuito hidráulico em bombagem. ....	61
Figura 4.8: Caracterização 2D do campo de velocidades (mm/s) nas diferentes secções de medição para o funcionamento do circuito hidráulico em turbinagem.....	62
Figura 4.9: Reprodução da camada limite na caracterização 2D do campo de velocidades (mm/s) no funcionamento em bombagem. ....	63
Figura 4.10: Reprodução da camada limite na caracterização 2D do campo de velocidades (mm/s) no funcionamento em turbinagem. ....	64



## INDICE DE QUADROS

Quadro 2.1: Coeficiente de colmatção $Kd$ em função do tipo de limpeza (Lencastre, 1996).....	14
Quadro 2.2: Coeficiente de forma $Kf$ em função do tipo de secção transversal (Lencastre, 1996). ....	14
Quadro 2.3: Valores para $K1$ representando $\theta$ o ângulo de ataque do escoamento na grelha (Lencastre, 1996).....	15
Quadro 2.4: Valores para $K2$ sendo $a$ o espaçamento livre entre barras, $a0$ o espaçamento entre eixos e $\theta$ o ângulo de ataque do escoamento na grelha (Lencastre, 1996). ....	15
Quadro 2.5: Espaçamento entre barras de acordo com o tipo de turbina (adaptado de Lencastre, 1996, in Ramos et al., 2000).....	17
Quadro 2.6: Coeficiente de majoração, $F$ , para o número de Strouhal (Ramos et al., 2000).....	18
Quadro 2.7: Relações empíricas da altura de submersão mínima, $h_{\min}$ , expressa em relação à geratriz superior da conduta ou galeria (ESHA,2004).....	26
Quadro 3.1: Plano de medição: em turbinagem e em bombagem. ....	48
Quadro 3.2: Caudais nos ensaios.....	48
Quadro 3.3: Submergências de ensaio.....	49
Quadro 4.1: Desvios máximos relativos das medições no centro do tubo, em torno do valor médio para o funcionamento em bombagem. ....	55
Quadro 4.2: Desvios máximos relativos das medições no centro do tubo, em torno do valor médio para o funcionamento em turbinagem. ....	55
Quadro 4.3: Erros relativos dos caudais numéricos, calculados com base nas velocidades medidas com o sistema Doppler, no funcionamento em bombagem .....	63
Quadro 4.4: Erros relativos dos caudais numéricos, calculados com base nas velocidades medidas com o sistema Doppler, no funcionamento em turbinagem. ....	65



## SIMBOLOGIA

$a$ : espaçamento livre entre barras

$a_b$ : área bruta das grades

$a_l$ : área líquida através das grades

$a_0$ : espaçamento entre os eixos das barras

$b$ : dimensão da secção transversal das barras no sentido do escoamento

$c$ : constante de circulação na região do vórtice livre; velocidade de propagação do som na água

$D$ : diâmetro hidráulico

$dA_i$ : área da coroa circular elementar

$dr$ : espessura da coroa circular elementar

$E_b$ : módulo de elasticidade do material das barras

$e$ : espessura da barra

$F$ : coeficiente de majoração do número de Strouhal

$f_e$ : frequência de emissão

$f_r$ : frequência de receção

$g$ : aceleração da gravidade

$h_{0min}$ : altura de submersão entre a superfície livre e o eixo central da tomada de água

$J$ : perda de carga unitária

$K$ : raio de giração da secção transversal da barra em relação a um eixo paralelo à velocidade corrente

$K_d$ : coeficiente de depósitos sobre a grelha de proteção

$K_e$ : coeficiente de perda de carga na entrada da tomada de água (entre o plano de entrada e a secção das comportas)

$K_f$ : coeficiente de forma da secção transversal da grelha de protecção

$K_g$ : coeficiente de perda de carga na grelha

$K_r$ : coeficiente de perda de carga nas ranhuras da comporta na tomada de água

$K_1$ : coeficiente de perda de carga em função da forma das barras

$K_2$ : coeficiente de perda de carga em função da relação  $a/a_0$

$L$ : distancia entre os apoios das barras

$l_1$ : comprimento de entrada em regime laminar

$l_2$ : componente de entrada em regime turbulento

$M$ : fator de fixação das barras

$p$ : relação entre a área obstruída pela grelha e a área total

$Q$ : caudal derivado

$q_i$ : caudal derivado da coroa circular elementar

$R$ : raio do tubo

$r$ : distância radial ao centro do tubo

$r_0$ : fração do raio da superfície de entrada

$S$ : secção transversal total do painel da grelha de protecção

$S_t$ : número de Strouhal

$T_{rp}$ : período de tempo entre duas emissões de ultra-sons consecutivas

$U$ : velocidade média numa secção

$u_{max}$ : velocidade no eixo do tubo

$\bar{u}$ : valor médio da velocidade pontual

$u'$ : componente da flutuação da velocidade

$V$ : velocidade máxima de aproximação às grelhas de proteção

$\nu$ : viscosidade cinemática; velocidade de uma partícula em movimento

$v_i$ : velocidade da coroa circular elementar

$\mu$ : viscosidade dinâmica

$\gamma$ : peso específico da água

$\gamma_b$ : peso específico do material das barras

$\Gamma$ : valor representativo da circulação

$\delta$ : espessura da camada limite na entrada de um tubo em regime laminar; mudança de fase do eco recebido

$\Delta d$ : variação na distância de uma partícula ao ponto de emissão/recepção

$\Delta H_g$ : perda de carga na grelha

$\Delta H_t$ : perda de carga na tomada de água

$\Delta s$ : distância de deslocamento de uma partícula

$\theta$ : ângulo de ataque do escoamento na grelha de proteção; ângulo do transdutor com a direção do escoamento

$\rho$ : massa específica do líquido

$\varphi$ : ângulo da grelha de proteção com a horizontal; ângulo da boca de entrada da tomada de água com a vertical



## **ACRÓNIMOS**

BUREC: Bureau of Reclamation

EDP: Energias de Portugal

ESHA: European Small Hydropower Association

ICOLD: Comissão Internacional das Grandes Barragens

LNEC: Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NRE: Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas

UDV: Velocímetro Doppler Ultrassónico



# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento geral do aproveitamento de Foz Tua

O aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua, de um só escalão e com a barragem em fase de construção prevendo-se estar concluída em 2016, situa-se no rio Tua, um afluente do rio Douro (Figura 1.1). As principais estruturas deste aproveitamento, nomeadamente a central, a subestação e o circuito hidráulico desenvolvem-se na margem direita do Rio Tua, no município de Alijó (distrito de Vila Real).



**Figura 1.1: Confluência entre o rio Tua e o rio Douro. Local de construção do aproveitamento de Foz Tua (fonte: <http://portugalfotografiaaerea.blogspot.pt>).**

A barragem de abóbada de dupla curvatura (em betão), com 107 m de altura é dotada de um descarregador de cheias em lâmina livre, através de quatro vãos equipados com comportas, na zona central do coroamento da barragem, sendo a capacidade máxima de vazão de 5500 m<sup>3</sup>/s. A estrutura de dissipação de energia é uma bacia de impacto em betão, protegendo a fundação da barragem das ações dinâmicas da descarga livre no leito, a jusante da barragem. A descarga de fundo, inserida no corpo da barragem, tem secção corrente de 2,1x3,1 m<sup>2</sup> e está equipada com uma comporta de segmento a jusante e uma comporta de guarda a montante.

A estação subterrânea de produção hidroelétrica, localizada 400 m a jusante da barragem, será equipada com dois grupos reversíveis turbina/bomba do tipo Francis (potência total de 259 MW) para turbinagem a partir da albufeira do Foz Tua e para bombagem a partir da albufeira da Régua, a jusante, para a albufeira de Foz Tua. Este modo de funcionamento das máquinas hidráulicas (bombagem) que ocorrerá em horas mortas do consumo de energia elétrica, nomeadamente no período noturno, visa

recolocar na albufeira do Tua, os volumes de água para reutilização em turbinagem (ou seja, para produção de energia) nos períodos de ponta do consumo elétrico.

Na Figura 1.2 esquematizam-se os principais aspetos da exploração deste aproveitamento.



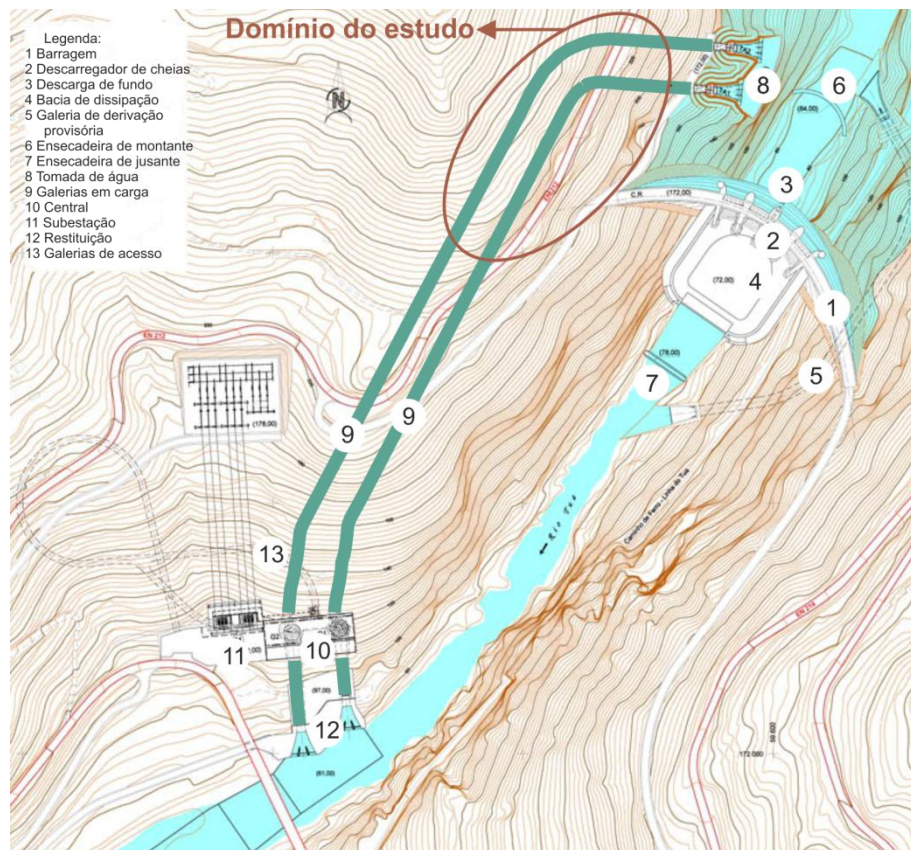
**Figura 1.2: Esquema da exploração do aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua (adaptado de EDP, 2008).**

A subestação associada à central hidroelétrica localiza-se à superfície (Figura 1.3).



**Figura 1.3: Antevsão da implantação da barragem e da sub-estação do aproveitamento hidroelétrico do Foz Tua (fonte: <http://www.a-nossa-energia.edp.pt>).**

O circuito hidráulico, subterrâneo, tem um desenvolvimento total da ordem dos 700 m (Figura 1.4). A tomada de água, com torre para manobra das comportas, localiza-se a montante da barragem, a uma distância da ordem dos 80 m. Os 2 túneis, revestidos a betão e com 7,5 m de diâmetro interior, assumem traçados sensivelmente paralelos, com os respetivos eixos distanciados cerca de 30 m, contornando o encontro direito da barragem. A estrutura de restituição, localizada na albufeira da Régua cerca de 500 m a jusante da barragem do Foz Tua, é constituída por túneis ascendentes, com 63 m e 46 m de comprimento total que funcionam como poços de captação na exploração do circuito em bombagem.



**Figura 1.4: Esquema planimétrico das principais estruturas do aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua (adaptado de <http://www.engenheiromaestri.com>).**

## 1.2 Objetivos do trabalho

O presente estudo visa analisar, no modelo físico existente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, o campo de velocidades do escoamento nos troços de carácter curvilíneo, integrantes do circuito hidráulico, imediatamente a jusante da estrutura da tomada de água, construída a montante da barragem (Figura 1.4). Estudos anteriores verificaram que, no modo de funcionamento em bombagem, o escoamento é restituído à albufeira do Tua fundamentalmente pelos vãos centrais e direitos da tomada de água, pretendendo-se concluir as causas da observada assimetria do campo de velocidades. Para a sua caracterização/medição em modelo físico (objetivo principal da investigação) foi utilizado o sistema eletrónico UDV (Velocímetro Doppler Ultrassónico).

Pretende-se ainda, através de um trabalho de pesquisa bibliográfica, aprofundar o conhecimento nos domínios das tomadas de água e do impacto das singularidades do traçado dos circuitos hidráulicos nas respetivas condições de escoamento dos circuitos hidráulicos.

### 1.3 Estrutura da tese

O presente documento foi organizado em 5 capítulos cujos conteúdos são seguidamente descritos:

**Capítulo 1:** introdução, incluindo o enquadramento e o objetivo do estudo;

**Capítulo 2:** síntese de conhecimentos sobre as tomadas de água (enquadrada por uma breve sistematização das diferentes estruturas integrantes de um aproveitamento hidráulico fluvial) e sobre os efeitos de singularidades no campo de velocidades dos escoamentos pressurizados;

**Capítulo 3:** descrição do modelo físico, apresentação dos princípios da medição Doppler e apresentação da metodologia e do plano de medições;

**Capítulo 4:** análise e discussão dos registos obtidos;

**Capítulo 5:** conclusões do estudo e propostas para desenvolvimentos complementares.

## 2 Síntese de conhecimentos

### 2.1 Aproveitamentos hidráulicos fluviais - enquadramento geral

Sendo a água um elemento natural imprescindível à vida do ser humano, já em tempos remotos (há 5000 anos) os povos se aglomeravam junto de linhas de água (onde as terras eram igualmente mais férteis) e construía barragens para armazenamento de água, criando albufeiras que permitiam satisfazer as suas necessidades básicas. Aproveitamentos fluviais têm vindo a ser desenvolvidos pelo Homem desde as civilizações mais antigas, com o objetivo de armazenar a água para utilização nos períodos de maior escassez, nomeadamente para abastecimento às populações, na rega, na pecuária e na produção de força motriz. A pequena barragem de Jawa, situada na Jordânia, construída no fim do quarto milénio A.C. para abastecimento populacional (Quintela, 2009) é disso um exemplo.

Os princípios de planeamento e gestão integrada dos recursos hídricos evoluíram e, hoje em dia, a generalidade dos aproveitamentos hidráulicos fluviais são de fins múltiplos, podendo associar duas ou mais finalidades, nomeadamente: a produção de energia, a rega, o abastecimento público, a regularização dos caudais no rio, o controlo de cheias, o controlo de poluição, o controlo da propagação de marés, a recarga de aquíferos e ainda outras como a navegação, a aquacultura e a utilização recreativa.

As tomadas de água são estruturas integrantes dos aproveitamentos, destinadas a desviar as águas armazenadas nas albufeiras para os circuitos hidráulicos do aproveitamento, que servem os sistemas de abastecimento público e de rega ou de produção de energia hidroelétrica, podendo ainda integrar outros órgãos de segurança e exploração de barragens e açudes, nomeadamente os descarregadores de cheia por orifícios e as descargas de fundo (Pinheiro, 2006).

Num aproveitamento hidráulico fluvial, as barragens são as estruturas cuja finalidade é retenção da água, elevando o seu nível a montante e criando, com as águas retidas, uma albufeira de armazenamento. Uma gestão do aproveitamento requer também o controlo do nível da água a jusante.

A construção de grandes barragens obriga a estudos hidráulicos em modelo reduzido. A Comissão Internacional das Grandes Barragens (ICOLD), classifica como grandes barragens, todas as que tenham altura superior a 15 m ou alturas entre os 10 m e os 15 m se verificadas uma das seguintes condições:

- desenvolvimento do coroamento superior a 150 m,
- capacidade total de armazenamento na albufeira igual ou superior a  $10^6$  m<sup>3</sup>;
- caudal de ponta de cheia superior a 2000 m<sup>3</sup>/s;

Também as barragens construídas em locais com problemas específicos na fundação ou com projeto não convencional, são classificadas de grandes barragens.

O projeto e a construção de uma barragem orientam-se segundo dois objetivos essenciais: a resistência ao impulso da água a montante e a garantia da estanquidade da obra e da fundação. Estes dois objetivos podem ser assegurados, em simultâneo, pela mesma estrutura ou por estruturas distintas, necessariamente conjugadas no seu conjunto.

No que se refere à classificação das barragens, a mais comum assenta nos materiais utilizados para a construção da sua estrutura, pois condicionam substancialmente todos os aspetos da sua conceção. Não obstante as soluções construtivas mistas, as barragens são classificadas segundo dois grandes grupos: as barragens de aterro e as barragens de betão. Os materiais incorporados no corpo da barragem definem, no primeiro grupo, as barragens de terra e as de enrocamento. As barragens construídas em betão poderão ser de gravidade (estabilidade é assegurada pelo seu peso próprio), de abóbada (transmitindo o impulso da água fundamentalmente para os encontros) e de contrafortes.

As exigências de controlo da percolação através da fundação podem implicar disposições especiais na construção das barragens, nomeadamente valas e cortinas corta-águas, tapete impermeável a montante, tapete drenante invertido a jusante, drenos verticais, poços de alívio ou galerias de drenagem.

Órgãos especiais asseguram a exploração e a segurança do aproveitamento hidráulico, nomeadamente descarregadores de cheia; descargas de fundo; dissipadores de energia e ainda as tomadas de água - estruturas de entrada nos circuitos hidráulicos do aproveitamento, nos descarregadores de cheia por orifícios ou nas descargas de fundo.

## 2.2 Tomadas de água

### 2.2.1 Aspetos gerais

As tomadas de água, órgãos fundamentais para derivação de caudal de uma corrente natural para um canal com escoamento em superfície livre ou para uma conduta ou galeria forçada, compreendem, em geral, a estrutura de entrada, a grelha, uma câmara de sedimentação e um descarregador. As exigências hidráulicas de submersão e as preocupações com o arrastamento de sedimentos são determinantes da localização das tomadas de água, em albufeiras ou a montante de aproveitamentos hidráulicos a fio-de-água, que depende também de fatores geotécnicos e ambientais, nomeadamente relacionados com a vida aquática, com a formação de gelo e com a direção dos ventos que influenciam a acumulação localizada de folhas e detritos arrastados das margens.

É recomendável que a tomada de água não se localize numa zona de águas paradas ou muito afastadas do descarregador de cheias, pois são propícias à deposição de sedimentos (ESHA, 2004). A existência de câmaras de sedimentação a jusante da tomada de água, promovendo, por redução da velocidade do escoamento, a decantação de matéria em suspensão (e.g. silte, areia, cascalho e seixos) constitui uma solução preventiva ao arrastamento de sedimentos através da tomada de água. Os sedimentos acumulados nas câmaras de sedimentação são periodicamente descarregados através de correntes de varrer (manutenção operacional da tomada de água). Também a orientação da superfície de entrada é um fator crucial na minimização do impacto do material sólido arrastado e acumulado nas grelhas de proteção da tomada de água, constituintes fundamentais na detenção de detritos e sedimentos transportados pelo escoamento, recomendando-se, em albufeiras, uma orientação daquela superfície normal ao alinhamento do descarregador de cheias.

O desempenho deste órgão hidráulico é fortemente influenciado pelas condições geológicas, geotécnicas, estruturais e ambientais, recomendando ESHA (2004) que devem ser minimizadas as perturbações do escoamento nas tomadas de água, de modo a que as perdas de carga sejam pouco significativas. Também fenómenos como a separação do escoamento em relação às paredes da tomada, a formação de vórtices, o arrastamento de sedimentos e a entrada de ar na estrutura são de evitar de forma a não causarem complicações a nível do bom funcionamento do circuito hidráulico e do rendimento das turbomáquinas.

A altura mínima de submersão é um parâmetro hidráulico fundamental para o bom desempenho da tomada de água, pelo que o estudo das variações do nível de água a montante é essencial para auxiliar o estudo da respetiva localização. Também a velocidade de escoamento através da tomada de água constitui um fator hidráulico determinante do seu funcionamento. A ocorrência de velocidades elevadas impõe formas da estrutura que assegurem variações locais de pressão limitadas, por forma que as pressões mínimas resultem suficientemente afastadas da tensão de vapor, evitando o fenómeno de cavitação que, geralmente, origina as seguintes condições indesejáveis: ruído, vibração, erosão, alteração de características de funcionamento das turbomáquinas e diminuição dos caudais escoados (Pinheiro, 2006; Quintela, 2007).

### 2.2.2 Classificações

A European Small Hydropower Association (ESHA, 2004) classifica as tomadas de água segundo dois grandes grupos:

- *Tomada de água de energia*: deriva a água diretamente para a turbina através de uma conduta forçada. Estas estruturas podem ser encontradas em aproveitamentos a fio-de-água ou em albufeiras e estão associadas a escoamentos sob pressão.
- *Tomada de água de transporte*: deriva a água (geralmente em superfície livre) para outros circuitos hidráulicos e geralmente terminam em *tomadas de água de energia*.

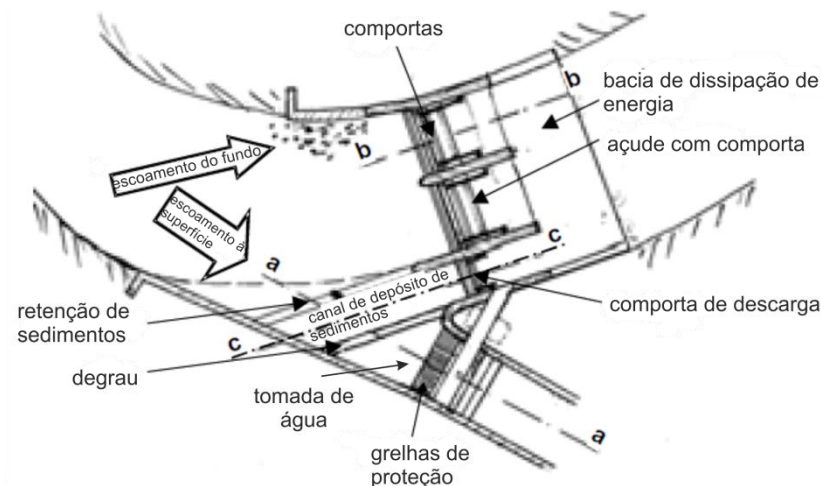
Estruturalmente, as tomadas de água podem ser de diferentes tipos, sendo a respetiva localização determinante dessa diferenciação. Em albufeira a água não contém, em geral, quantidades significativas de material sólido em suspensão, contrariamente ao que acontece na maioria dos aproveitamentos a fio-de-água ou em cursos de água, onde quantidades significativas de material arrastado podem atingir a tomada de água.

Em albufeiras as tomadas de água são em geral de um dos seguintes tipos (Quintela et al., 2001):

- Através da barragem (se esta for em betão);
- Em torre de tomada de água separada do corpo da barragem, caso esta seja de aterro;
- Em torre de tomada de água adjacente à barragem, sendo esta em betão;
- Em estrutura construída numa das vertentes, geralmente seguida por um túnel;
- Em estrutura flutuante, sendo estas tomadas de água de carácter temporário.

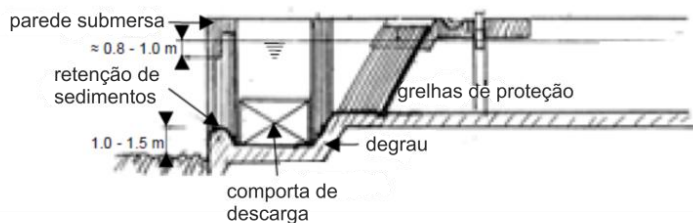
Em rios ou em aproveitamentos hidráulicos a-fio-de-água, as tomadas de água são tomadas de transporte, em geral de uma das seguintes tipologias:

- A tomada de água do tipo lateral, a mais frequente, deve ser localizada no lado externo do trecho curvo da linha de água (Figura 2.1), para evitar assim a entrada de detritos e de sedimentos do fundo do leito, beneficiando das fortes correntes ali sentidas. No entanto, caso não seja possível a localização antes referida, deve ser construído um canal de sedimentação com um metro de profundidade, situado a montante da tomada e perpendicular à mesma. O canal de sedimentação deve ter uma inclinação mínima de 2%, se possível de 5% e o fundo deve ser bem revestido (e.g. betão de alta qualidade, enrocamento, etc.) para evitar a sua erosão (ESHA, 2006). Geralmente é instalada uma parede submersa (Figura 2.2) a fim de evitar a entrada de detritos na tomada de água (ESHA, 2004).

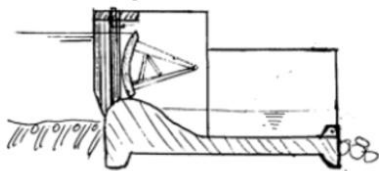


**Figura 2.1: Esquema, em planta, de uma tomada de água do tipo lateral (adaptado de ESHA, 2004).**

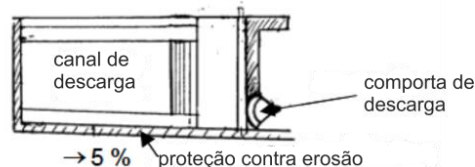
**Corte a-a: tomada de água**



**Corte b-b: açude**



**Corte c-c: retenção de sedimentos**



**Figura 2.2: Esquema dos cortes a-a, b-b e c-c de uma tomada de água do tipo lateral (adaptado de ESHA, 2004).**

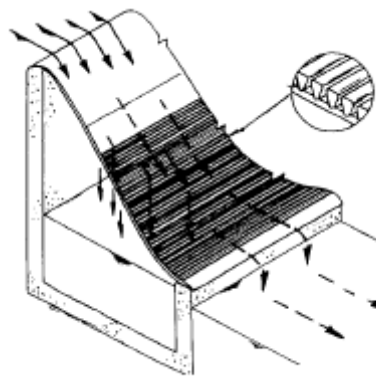
- As tomadas de água do tipo frontal, particularmente indicadas para as situações em que as quantidades de material sólido do fundo do leito e de matéria suspensa são elevadas (ESHA, 2004), devem ser construídas em troços retilíneos de rios cuja largura não ultrapasse os 50 m. São sempre equipadas com túnel de deposição de areias, exigindo descargas frequentes de limpeza e acarretando, pelo facto, frequentes perdas de água.
- As tomadas de água do tipo inferior (ou Tirolês), geralmente associadas a aproveitamentos em regiões com declives acentuados (e.g. regiões montanhosas), lidam com elevadas quantidades material sólido transportado, requerendo-se também uma adequada integração na paisagem. São, em geral, soluções estruturais económicas, por não exigirem elevada

manutenção, e por garantirem uma limpeza contínua devido ao excesso de caudal que não é derivado. As grelhas de proteção deste tipo de tomada de água são colocadas transversalmente à direção do escoamento com uma inclinação superior à do leito do rio (Figura 2.3). As barras da grelha estão orientadas segundo a direção do escoamento a fim de ajudarem na sua auto-limpeza (Ramos et al., 2000).



**Figura 2.3: Tomada de água do tipo Tirolois (ESHA, 2006).**

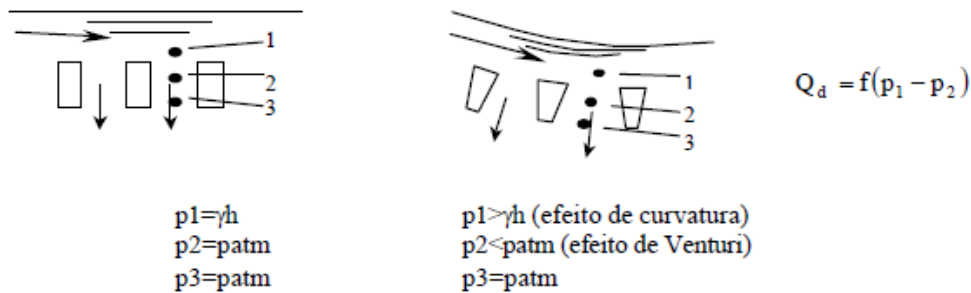
Porém, para este tipo de tomada de água inferior (Tirolois) caso as grelhas de proteção sejam inseridas no paramento de jusante de um açude, as barras são, em geral, colocadas transversalmente à direção do escoamento, com a secção transversal da barra em V (Figura 2.4). Esta forma das barras, dificultando a entrada de detritos com dimensões superiores à do espaçamento entre barras na face exterior da grelha, limita a dimensão máxima dos detritos arrastados na tomada de água.



**Figura 2.4: Tomada de água do tipo Tirolois (Ramos et al., 2000).**

O efeito de Venturi estabelecido com esta forma da barra, traduzido num espaçamento mais reduzido na face superior da grelha, induz a aspiração do escoamento (Figura 2.5), a qual é

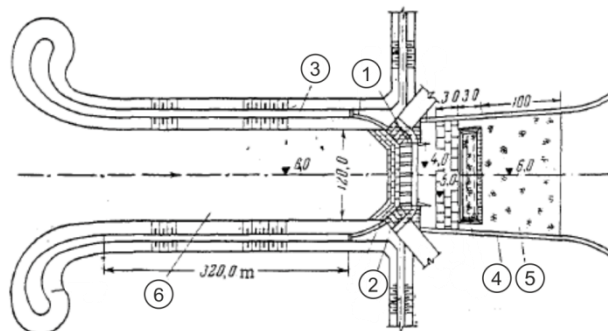
também favorecida pelo efeito da curvatura côncava da soleira de saída do descarregador (Ramos et al., 2000).



**Figura 2.5: Efeito de Venturi e da curvatura na vazão através da grelha (Ramos et al., 2000).**

As condições de aproximação são também cruciais para o bom funcionamento da tomada de água. No estudo de Kukhianidze e Ezernitskaya (1970), conduzido num modelo reduzido à escala 1:60 de uma tomada de água (Figura 2.6) localizada no rio Araks (rio considerado instável com inclinação do leito  $\sim 0,002$  e com elevada carga de sedimentos sólidos e suspensos - uma média anual de sedimentos da ordem dos 2g/l), verificaram que a uniformidade do escoamento é significativamente melhorada, com a construção de um canal de aproximação a montante (Figura 2.6). Propõem um canal de largura constante, definido pelo desenvolvimento da frente descarregadora e das duas tomadas de água, e com um comprimento entre 2,5 a 3 vezes a sua largura. Para minimizar a entrada de sedimentos, os autores propõem que as tomadas de água sejam orientadas obliquamente em relação à direção do escoamento, tendo obtido com esta solução uma redução assinalável na concentração de sedimentos, nomeadamente de 0,003 g/l com a orientação da tomada de água normal à direção do escoamento, e de 0,0008 g/l com uma orientação oblíqua.

- Legenda:
- 1- Barragem
  - 2- Tomadas de água
  - 3- Muros-guia do dique do canal de aproximação
  - 4- Muros-guia do dique do canal de saída
  - 5- Canal de saída
  - 6- Canal de aproximação



**Figura 2.6: Esquema em planta do canal (adaptado de I.I. Kukhianidze e F.I. Ezernitskaya, 1970).**

### 2.2.3 Grelhas de proteção

As grelhas de proteção são elementos de elevada relevância no controlo da entrada de detritos, muito prejudiciais no funcionamento do circuito hidráulico, podendo mesmo danificar os respetivos componentes (e.g. válvulas, turbinas, bombas, filtros). As grelhas são, em geral, colocadas à entrada da tomada de água, podendo ser fixas ou móveis. Em aço inoxidável ou em material plástico, a estrutura das grelhas é definida por travessas e longarinas (Figura 2.7) possuindo um ou mais painéis retangulares dotados de travessas transversais afastadas entre si para apoio das barras. O afastamento entre estas barras, a relação entre a área total e a área útil de escoamento e a secção transversal das barras são os parâmetros fundamentais caracterizadores das grelhas. O espaçamento mínimo entre as barras deve atender às dimensões máximas de detritos admitidos pela turbomáquina sem afetar o seu rendimento útil, devendo a secção transversal das barras assegurar a resistência aos esforços normais no plano da grelha.

As grelhas devem ser dimensionadas para resistirem à pressão exercida pela água na estrutura em situações de colmatção, sem sofrerem excessivas deformações (ESHA, 2004). Pese embora o benefício de resistência das barras associado a secções transversais trapezoidais, com a base maior virada para montante, são geralmente mais utilizadas as barras de secção retangular (ESHA, 2004; Pinheiro, 2006).

#### 2.2.3.1 Velocidade de aproximação à grelha

Numa tomada de água a área total da secção a obturar pela grelha deve ser definida por forma a assegurar uma velocidade máxima de aproximação,  $V$ , compatível com as condições locais (Lencastre, 1996).

- Em locais muito profundos (profundidade de 50 a 100 m):  $0.4 < V < 0.6$  m/s;
- Em locais de razoável profundidade, com limpeza mecânica da grelha:  $0.6 < V < 0.8$  m/s;
- Em locais de meio fundo (a uma profundidade 2 a 3 vezes a altura da grelha) quando existem dispositivos de limpeza automática essa velocidade pode atingir cerca de 1 m/s.

ESHA (2004) recomenda que a velocidade de aproximação,  $V$ , se mantenha entre 0.6 m/s e 1.5 m/s de modo a que os detritos suspensos não sejam atraídos para o sistema das grelhas. Já Eletrobrás (2003) considera velocidades de 1 a 1,5 m/s para tomadas de água com carga menor a 30 m.c.a. e velocidades no intervalo entre 1,5 e 2,5 m/s para tomadas de água com cargas maiores a 30 m.c.a.

### 2.2.3.2 Perdas de carga através das grelhas

Em pequenos aproveitamentos hidráulicos as perdas de carga na grelha podem assumir grande importância relativa.

As perdas de carga nas grelhas de proteção são função da espessura e do espaçamento das barras constituintes (Roberson et al., 1998). Detritos como folhas ou plásticos retidos nas grelhas, são elementos de obstrução de elevada relevância pois provocam perdas de carga significativas à entrada. O grau de colmatação da grelha influencia decisivamente a resistência hidráulica localizada e previsivelmente esta cria diferenças de pressão a montante e a jusante da grelha o que implica uma solicitação estática das mesmas (Pinheiro, 2006). A vibração nas grelhas de proteção leva a uma certa preocupação em projetos de escoamento reversível de tomadas de água quando estas estão a funcionar em bombagem, podendo causar a separação do escoamento nas paredes e produzir velocidades entre as grades que excedem as velocidades que ocorrem em funcionamento normal (Roberson et al., 1998). As barras devem ser dimensionadas para que o espaçamento entre elas não seja demasiado pequeno de modo a evitar grandes perdas de carga, e que também não seja demasiado grande de maneira a evitar a entrada de material sólido no circuito hidráulico (Ramos et al., 2000).

A perda de carga,  $\Delta H_g$ , nas grelhas é avaliada pela seguinte relação (Lencastre, 1996):

$$\Delta H_g = K_g \frac{U^2}{2g} \quad (2.1)$$

representando  $U$  (m/s) a velocidade na seção onde está instalada a grelha (sem a mesma estar montada) e  $K_g$  o coeficiente de perda de carga singular (-).

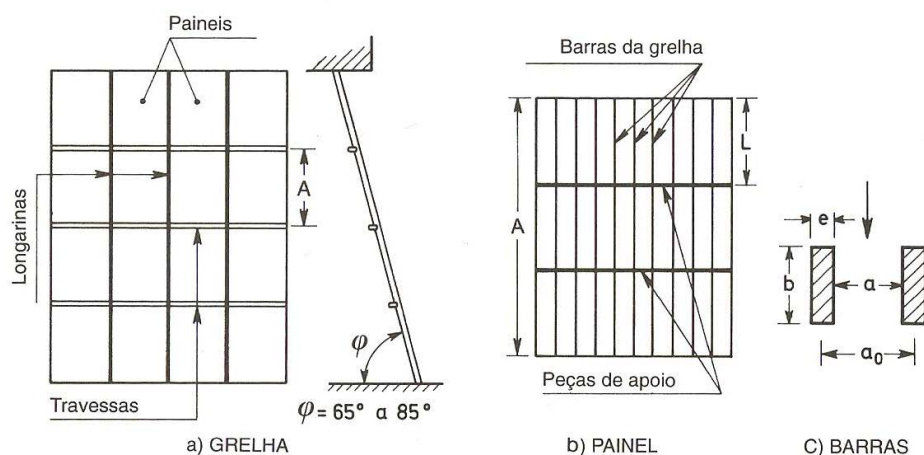


Figura 2.7: Grelha de proteção (Lencastre, 1996).

Em grelhas normais à corrente o valor de  $K_g$  é dado pela seguinte expressão:

$$K_g = K_d \cdot K_f \cdot p^{1,6} \cdot f(b/a) \cdot \text{sen}\varphi \quad (2.2)$$

onde  $K_d$  representa o coeficiente de depósitos sobre a grelha (-),  $K_f$  o coeficiente de forma da secção transversal da grelha (-),  $p$  a relação entre a área obstruída pela grelha e a área total da mesma (-),  $b$  a dimensão da secção transversal das barras no sentido do escoamento (m),  $a$  o espaçamento livre entre as barras (m) e  $\varphi$  o ângulo do plano da grelha com a horizontal. O fator  $f(b/a)$  é calculado segundo a seguinte expressão:

$$f(b/a) = 8 + 2,3(b/a) + 2,4(a/b) \quad (2.3)$$

A aproximação ao valor do coeficiente de colmatação da grelha,  $K_d$ , é efetuada em função do tipo de limpeza (Quadro 2.1), sendo o coeficiente de forma da secção,  $K_f$ , aproximado em função da secção transversal das barras (Quadro 2.2).

**Quadro 2.1: Coeficiente de colmatação  $K_d$  em função do tipo de limpeza (Lencastre, 1996).**

<b>Coeficiente <math>K_d</math></b>	<b>Tipo de limpeza</b>
1,1 a 1,2	Grelha com limpeza automática moderna
1,5	Grelha com limpeza automática antiga
2 a 4	Grelha com limpeza manual

**Quadro 2.2: Coeficiente de forma  $K_f$  em função do tipo de secção transversal (Lencastre, 1996).**

<b>Coeficiente <math>K_f</math></b>	<b>Tipo de secção transversal</b>
0,51	Secção retangular alongada
0,35	Secção circular
0,32	Secção alongada com semicírculos nas extremidades

Para o caso das grelhas apresentarem, em planta, uma disposição oblíqua relativamente à direção do escoamento (Figura 2.8) o coeficiente de perda de carga na grelha  $K_g$  é variável com ângulo  $\theta$ , sendo o seu valor determinado pela expressão:

$$K_g = K_1 \cdot K_2 \quad (2.4)$$

em que  $K_1$  (-) é função da forma das barras (Quadro 2.3) e  $K_2$  (-) da relação  $a/a_0$  (Quadro 2.4).

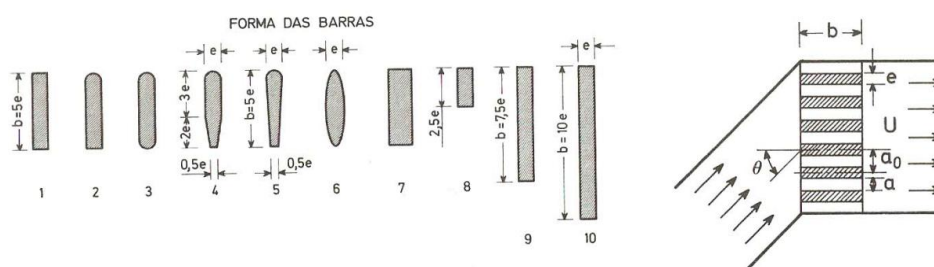


Figura 2.8: Secções transversais das barras e orientação do escoamento em relação à grelha (Lencastre, 1996).

Quadro 2.3: Valores para  $K_1$  representando  $\theta$  o ângulo de ataque do escoamento na grelha (Lencastre, 1996).

Nº da Barra	$\theta$									
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	40°	50°	60°
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,76	0,65	0,58	0,54	0,52	0,51	0,52	0,58	0,63	0,62
3	0,76	0,60	0,55	0,51	0,49	0,48	0,49	0,57	0,64	0,66
4	0,43	0,37	0,34	0,32	0,30	0,29	0,30	0,36	0,47	0,52
5	0,37	0,37	0,38	0,40	0,42	0,44	0,47	0,56	0,67	0,72
6	0,30	0,24	0,20	0,17	0,16	0,15	0,16	0,25	0,37	0,43
7	1,00	1,08	1,13	1,18	1,22	1,25	1,28	1,33	1,31	1,20
8	1,00	1,06	1,10	1,15	1,18	1,22	1,25	1,30	1,22	1,00
9	1,00	1,00	1,00	1,01	1,02	1,03	1,05	1,10	1,04	0,82
10	1,00	1,04	1,07	1,09	1,10	1,11	1,10	1,07	1,00	0,92

Quadro 2.4: Valores para  $K_2$  sendo  $a$  o espaçamento livre entre barras,  $a_0$  o espaçamento entre eixos e  $\theta$  o ângulo de ataque do escoamento na grelha (Lencastre, 1996).

$a/a_0$	$\theta$									
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	40°	50°	60°
0,50	2,34	2,40	2,48	2,57	2,68	2,80	2,95	3,65	4,00	4,70
0,55	1,75	1,80	1,85	1,90	2,00	2,10	2,25	2,68	3,55	4,50
0,60	1,35	1,38	1,42	1,48	1,55	1,65	1,79	2,19	3,00	4,35
0,65	1,00	1,05	1,08	1,12	1,20	1,30	1,40	1,77	2,56	4,25
0,70	0,78	0,80	0,85	0,89	0,95	1,05	1,17	1,52	2,30	4,10
0,75	0,60	0,62	0,65	0,70	0,75	0,85	0,95	1,30	2,05	3,90
0,80	0,37	0,40	0,45	0,50	0,55	0,64	0,75	1,06	1,75	3,70
0,85	0,24	0,25	0,30	0,36	0,42	0,50	0,60	0,88	1,40	3,50

BUREC (1973) considera, na definição do coeficiente de perda de carga nas grades ( $K_g$ ), a área real obstruída pela grade, pelos perfis estruturais e de contraventamento, propondo a seguinte expressão:

$$K_g = 1.45 - 0.45 \frac{a_l}{a_b} - \left( \frac{a_l}{a_b} \right)^2 \quad (2.5)$$

onde  $a_l$  representa a área líquida através das grades e  $a_b$  a área bruta das grades e guias.

Eletrobrás (2003) quantifica a perda de carga na tomada de água ( $\Delta H_t$ ) como o resultado da perda de carga nas grades, na perda de carga ocorrida continuamente ao longo da estrutura de entrada até a secção da comporta e a perda de carga provocada pelas ranhuras da comporta, considerando nomeadamente:

$$\Delta H_t = (K_e + K_g + K_r) \frac{U^2}{2g} \quad (2.6)$$

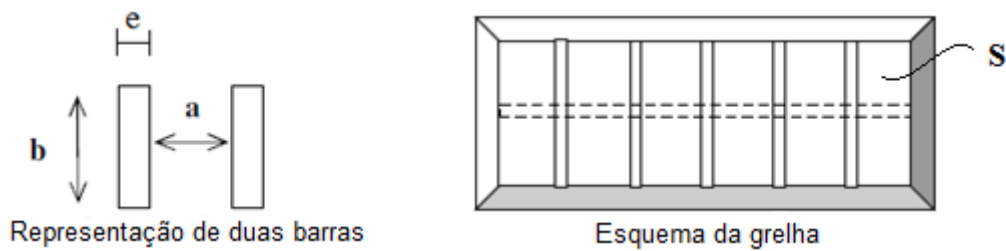
em que  $K_e$  é o coeficiente de perda de carga na entrada (entre o plano de entrada e a secção das comportas),  $K_g$  o coeficiente de perda de carga na grade e  $K_r$  o coeficiente da perda de carga nas ranhuras da comporta. Tabelas e ábacos com dados experimentais são apresentados em Hydraulic Design Criteria (1988) para definição do valor de  $K_e$  (Anexo A).

### 2.2.3.3 Estabilidade das barras

Nas tomadas de água, as grelhas estão submetidas a solicitações estáticas e dinâmicas. As primeiras relacionadas com o diferencial de pressões a montante e a jusante da grelha (tanto mais elevado quanto maior for o grau de colmatação) e as segundas com o efeito da passagem do escoamento, traduzida na vibração da estrutura. Grelhas sujeitas a campos de velocidade não uniformes no seu plano são suscetíveis de serem solicitadas dinamicamente.

A vibração pode também estar associada à formação de vórtices com uma frequência  $f_s$ . O que se pretende com o cálculo da estabilidade das barras é fazer com que a sua frequência de vibração,  $f_b$ , seja diferente da frequência de vibração dos vórtices gerados,  $f_s$ , por forma a evitar o fenómeno de ressonância que possa conduzir ao colapso do sistema das grades.

Segundo Ramos et al. (2000), as grelhas podem ser definidas pelo espaçamento entre as barras ( $a$ ), a dimensão da secção transversal das barras no sentido do escoamento ( $b$ ), a espessura ( $e$ ) e a secção transversal total do painel da grelha ( $S$ ), como na Figura 2.9.



**Figura 2.9: Características da grelha de proteção (adaptado de Ramos et al., 2000).**

De acordo com Ramos et al. (2000), o espaçamento entre barras deve atender à dimensão máxima de material sólido que as máquinas hidráulicas podem suportar, valor este que é fornecido pelo fabricante (Ramos et al., 2000; Pinheiro, 2006).

**Quadro 2.5: Espaçamento entre barras de acordo com o tipo de turbina (adaptado de Lencastre, 1996, in Ramos et al., 2000).**

<b>TIPO DE TURBINA</b>	<b>a (m)</b>
<b>Kaplan</b>	0.10 – 0.15
<b>Francis muito rápida</b>	0.08 – 0.10
<b>Francis lenta</b>	0.06 – 0.09
<b>Pelton</b>	0.03 – 0.05
<b>Pequenas instalações de bombagem</b>	0.02

De acordo com o critério de estabilidade,  $f_b$  deve ser superior a  $f_s$  respeitando no mínimo a seguinte condição:

$$f_b \geq 1.5 f_s \quad (2.7)$$

Na prática verifica-se que para frequências de vibração das barras cerca de 1,5 vezes a frequência de vibração dos vórtices não são notórias as ressonâncias perigosas (Lencastre, 1996).

A frequência de vibração  $f_s$  (Hz) é dada por:

$$f_s = \frac{S_t V}{e} \quad (2.8)$$

em que  $S_t$  (-) é o número de Strouhal (Figura 2.10) que depende da secção transversal da barra,  $V$  (m/s) é a velocidade máxima de aproximação e  $e$  é a espessura das barras (m). Ramos et al. (2000) consideram a necessidade de majoração deste parâmetro pelo fator de segurança  $F$ , a definir em função das relações dimensionais das barras de acordo com o Quadro 2.6. Visher e Hager, (1998) indicam que para barras com 100 mm de diâmetro e uma velocidade de aproximação do escoamento da ordem de 1 m/s, a frequência de vibração ( $f_s$ ) varia tipicamente entre 0.3 e 1 Hz.

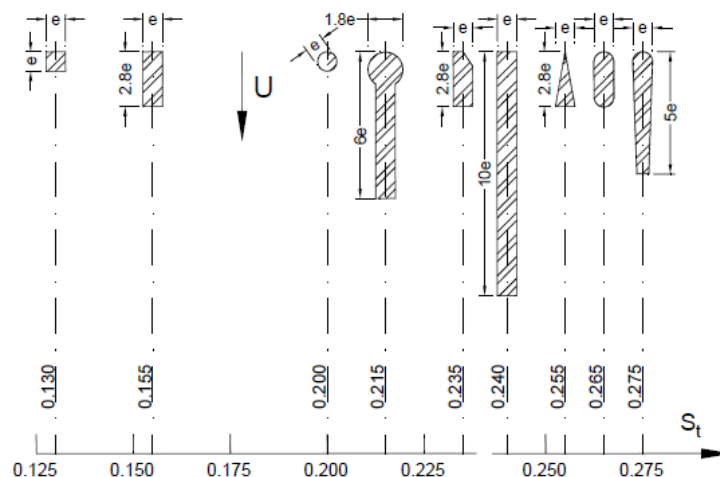


Figura 2.10: Número de Strouhal  $S_t$  para diferentes tipos de seção transversal das barras (Pinheiro, 2006).

Quadro 2.6: Coeficiente de majoração,  $F$ , para o número de Strouhal (Ramos et al., 2000).

$(a+e)/e$	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00
$F$	2.15	1.70	1.40	1.20	1.05	1.01

Relativamente à frequência estrutural das barras mergulhantes em água, para  $a \leq 0,7b$  Lencastre (1996) refere como válida a seguinte expressão:

$$f_b = M \frac{K}{L^2} \sqrt{\frac{gE_b}{\gamma_b + \frac{a}{e}\gamma}} \quad (2.9)$$

em que:

$M$  – fator de fixação das barras ( $M=3.565$ , para as extremidades encastradas;  $M=0.169$ , para as extremidades articuladas);

$K$  – raio de giração da seção transversal da barra em relação a um eixo paralelo à velocidade corrente (m);

$L$  – distância entre os apoios das barras (m);

$g$  – aceleração da gravidade ( $9.8 \text{ m/s}^2$ );

$E_b$  – módulo de elasticidade do material das barras ( $\text{N/m}^2$ );

$\gamma_b$  – peso específico ( $\text{N/m}^3$ ) do material das barras;

$\gamma$  – peso específico da água ( $9800 \text{ N/m}^3$ ).

Para  $a > 0,7b$  o autor recomenda, na estimativa da frequência estrutural das barras mergulhadas em água através da relação anterior, que se considere  $a = 0,7b$ .

#### 2.2.3.4 Limpeza das grelhas

A limpeza das grelhas é um dos aspetos mais relevantes em termos da manutenção operacional das tomadas de água, uma vez que a sua colmatação é um fenómeno que assume um crescimento exponencial. Com a obstrução da grelha por detritos retidos, a velocidade do escoamento na zona que não está obstruída é superior, favorecendo o arrastamento de maior quantidade de detritos. Para combater este fenómeno, as grelhas de proteção devem ser equipadas de limpa-grelhas. A limpeza das grelhas pode ser feita de forma automática ou manual. A limpeza manual só deve ser equacionada quando o comprimento das barras não ultrapassa os 3 m, não devendo ser considerada, nas tomadas de água do tipo lateral, com fortes correntes.

A inclinação das grelhas frontais ou laterais facilita, relativamente à instalação de grelhas verticais, as operações de limpeza, uma vez que permite tirar partido da tendência natural do equipamento de limpeza manter-se junto das barras. Pinheiro (2006) refere a inclinação de 20° como suficiente para assegurar essa vantagem.

ESHA (2004) recomenda, em linhas de água com arrastamento com quantidades significativas de detritos de grande dimensão (galhos, troncos de árvores, etc.) a colocação temporária, na época de cheias, de uma segunda grelha amovível a montante da grelha permanente (ordinária), com grandes espaçamentos entre barras (de 100 mm a 300 mm) com a função de reter todos os detritos de maior dimensão e assim otimizar o funcionamento do limpa-grelhas automático.

#### 2.2.4 Formação de vórtices

Os vórtices (padrão de escoamento turbulento caracterizado pelo movimento de rotação do fluido em torno de um eixo) são causados por uma aceleração não uniforme do escoamento, em geral, resultante de submersões deficientes e de orientações desfavoráveis da tomada de água. Nos *vórtices* as trajetórias das partículas são circulares concêntricas num eixo em que a velocidade é teoricamente infinita (Quintela, 2007; Lencastre, 1996).

Ramos et al. (2000) afirmam que a formação dos vórtices depende da geometria da tomada de água, da submersão e da velocidade de aproximação do escoamento.

Um adequado dimensionamento da tomada de água assegura a minimização das perdas de carga e da formação de vórtices. Este fenómeno é muito prejudicial em termos do funcionamento global do circuito hidráulico (ESHA, 2004), uma vez que:

- resultam em condições não uniformes do escoamento na tomada de água;

- introduzem ar no circuito hidráulico com efeitos nefastos para as turbomáquinas: vibração, cavitação, etc.;
- aumentam as perdas de carga e diminuem a eficiência hidráulica dos sistemas ou circuitos;
- arrastam material sólido para o interior da conduta.

No caso do ar arrastado para o circuito hidráulico, este pode concentrar-se em bolsas, reduzindo progressivamente a capacidade de transporte do circuito. Quando a força de flutuação da bolsa de ar atinge um valor suficientemente elevado pode ocorrer o retorno violento à tomada de água, podendo causar extravasamentos e danos estruturais significativos (caso de estudo de Pozos et al., 2010).

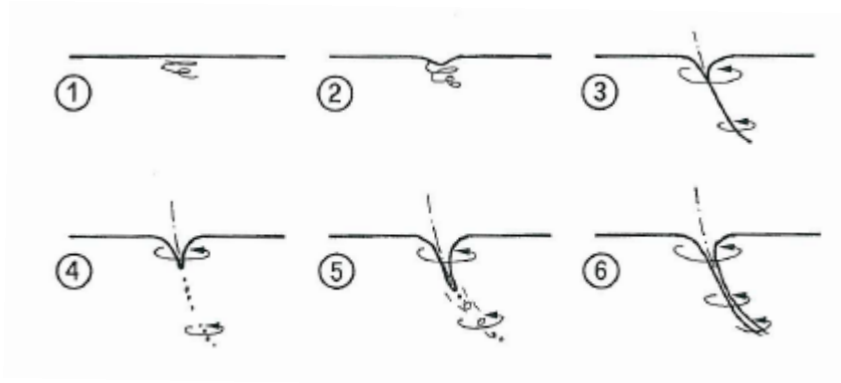
A solução para evitar a formação de vórtices ainda não se encontra bem definida e não existe uma única fórmula adequada que envolva os possíveis fatores que afetam este fenómeno, no entanto, perturbações no escoamento que provocam velocidades não uniformes podem dar início à formação de vórtices. Todas as ações que contribuam para a melhoria das condições de aproximação à tomada de água (velocidades de aproximação reduzidas) e eliminação das zonas de separação do escoamento (aumento da área da abertura da entrada e construção de canais de aproximação) evitam a formação de vórtices.

Apesar de não cabalmente definida a solução que elimine a formação de vórtices, ESHA (2004) enumera algumas das perturbações que induzem velocidades não uniformes do escoamento, de acordo com ASCE, referindo:

- condições de aproximação assimétricas;
- submersão inadequada;
- separação do escoamento e formação de pequenos remoinhos;
- velocidade de aproximação superior a 0.65 m/s;
- mudanças bruscas de direção do escoamento.

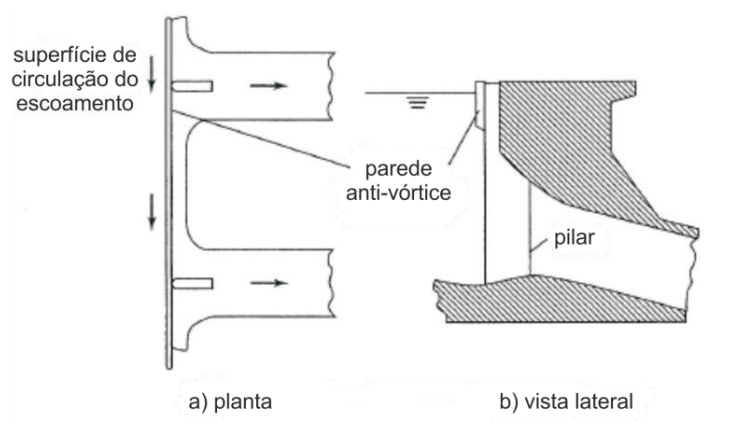
Os vórtices são, em geral, classificados de acordo com o nível de desenvolvimento ou intensidade, traduzido pelo aspeto visual da perturbação criada no local em que o mesmo é gerado. Knauss (1987) classifica os vórtices segundo 6 níveis de desenvolvimento (Figura 2.11):

1. Remoinho na superfície;
2. Depressão superficial, com remoinho definido;
3. Remoinho definido ao longo de uma coluna;
4. Vórtice com arrastamento de sedimentos, sem arrastamento de ar;
5. Vórtice com arrastamento de bolhas de ar;
6. Vórtice com núcleo de ar.



**Figura 2.11: Evolução do fenômeno da vorticidade (Visher e Hager, 1998).**

Embora a altura de submersão seja importante para determinar a magnitude dos vórtices, a geometria da tomada de água também tem influência nas características do escoamento. A maior parte das estruturas de entrada das tomadas de água estão submersas (abaixo da superfície livre da água) tendendo a formar-se zonas mortas e zonas giratórias acima dessas estruturas, favorecendo assim o desenvolvimento de vórtices. Esta condição pode ser superada se o topo da galeria da tomada de água se prolongar até à superfície livre da água, evitando assim a formação de vórtices e favorecendo o escoamento da superfície livre. Também a construção de uma parede anti-vórtice, paralela à face da tomada de água (Figura 2.12), apoiada em pilares prolongada acima da superfície livre defende a tomada de água da formação de vórtices (Roberson et al., 1998). Se o topo da galeria não tiver o prolongamento até à superfície livre a inclinação da face da tomada de água torna-se uma condição relevante para evitar a formação de vórtices. Saliências como os pilares projetados para fora do plano da superfície de entrada na tomada de água, devem ser evitados de maneira a que o escoamento circulante não origine a formação de vórtices.



**Figura 2.12: Solução construtiva de parede anti-vórtice em tomada de água de energia (adaptado de Roberson et al., 1998).**

De uma forma geral pode dizer-se que há três métodos para eliminar vórtices:

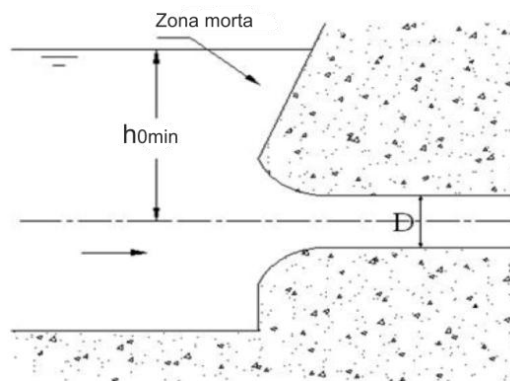
- melhorar o “lay-out” da tomada de água;
- aumentar a submergência;
- usar dispositivos anti-vórtices.

O primeiro método implica modificações significativas do projeto. Os dispositivos anti-vórtices podem considerar-se divididos em dois tipos (Viseu et al., 2007):

- dispositivos que contribuem para a eliminação de zonas mortas no escoamento;
- dispositivos de intersecção dos escoamentos de circulação.

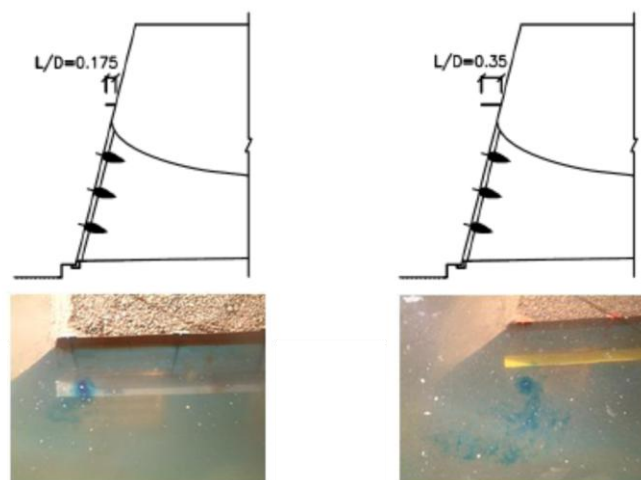
Os segundos podem classificar-se quanto ao seu aspeto geral: horizontais ou verticais, ou quanto à localização: superficiais ou profundos. A escolha é determinada pelo tipo de vorticidade a eliminar (superficial ou com chaminé desenvolvida) e pela variação dos níveis de água na albufeira. Entre estes dispositivos figuram, por exemplo, as grades verticais e horizontais (superficiais ou profundas) e os septos.

Taghvaei et al. (2012) realizaram um estudo sobre estruturas anti-vórtice em modelo físico reduzido (à escala de 1:20) da tomada de água da barragem de Siahbisheh, no Irão. Os estudos foram ensaiados para quatro condições dimensionais da estrutura anti-vórtice para 6 alturas de submergência diferentes, variando o valor de  $h_{0min}/D$  entre 2 e 4 (Figura 2.13).



**Figura 2.13: Altura de submergência  $h_{0min}$  e diâmetro do túnel  $D$  (adaptado de S.M. Taghvaei et al., 2012).**

Os autores investigaram os vários dispositivos anti-vórtice, concluindo que a aplicação de régua horizontais por cima da tomada de água (Figura 2.14) diminuem notavelmente a força dos vórtices formados.



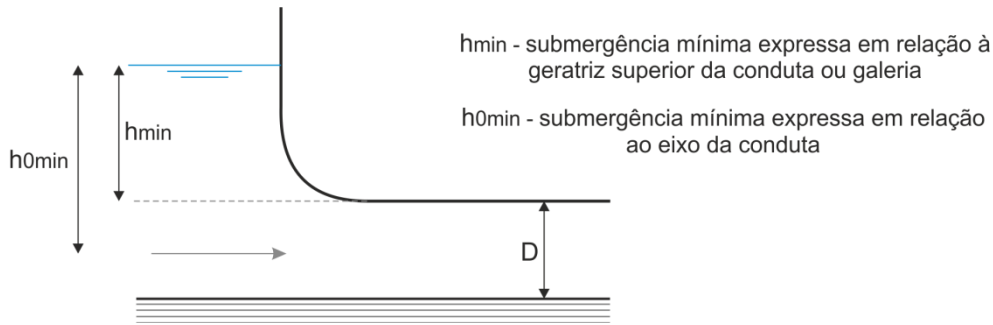
**Figura 2.14: Dispositivos anti-vórtice com melhor performance, sendo L o comprimento do dispositivo (S.M. Taghvaei et al., 2012).**

Os dispositivos anti-vórtice colocados por cima da tomada de água provocam, segundo os autores (Taghvaei et al., 2012), maior atrito e cortam as linhas de passagem de fluxo, reduzindo ou eliminando a força do vórtice.

Carriveau et al. (2012) estudaram a formação de vórtices nas tomadas de água submersas em regiões com temperaturas baixas, tendo concluindo que os vórtices do tipo dye-core (classificação de Knauss, 1987) ou vórtices do tipo 3, cuja formação antecede os vórtices com coluna de ar (Figura 2.11), podem causar sérios danos, nestas regiões climáticas (caracterizadas pelas baixas temperaturas) pois apesar de não haver ameaça de arrastamento de ar, arrastam partículas de gelo com dimensões reduzidas (frazil ice).

### 2.2.5 Submersão

A altura mínima de submersão (Figura 2.15) visa evitar a formação de vórtices e o arrastamento de ar no interior da galeria. Uma vez que o problema é de complexa formulação o cálculo teórico preciso da altura de submersão mínima na tomada de água não é ainda possível, existem fórmulas empíricas que permitem o seu cálculo. De acordo com Knauss (1987) e ESHA (2004), a altura mínima de submersão não é condição única para o adequado funcionamento da tomada de água, podendo para o efeito ser muito mais eficiente o melhoramento das condições de aproximação.



**Figura 2.15: Esquema de definição das alturas de submersão mínima.**

Visher e Hager (1998), indicam que a formação dos vórtices é função de parâmetros adimensionais, tais como:

- Número de Froude de submersão:  $F = \frac{Q}{\left(\frac{\pi}{4}\right)D^2\sqrt{gh_{0min}}}$
- Número de circulação:  $N_{\Gamma} = \frac{\Gamma D}{Q}$
- Número de Reynolds:  $R = \frac{Q}{vh_{0min}}$
- Número de Weber:  $W = \frac{Q}{\left(\frac{\pi}{4}\right)D^2\sqrt{\frac{\rho D}{\sigma}}}$

sendo  $Q$  o caudal desviado pela tomada de água,  $D$  o diâmetro da conduita,  $h_{0min}$  a altura de submersão entre a superfície livre e o eixo da tomada de água,  $\nu$  a viscosidade cinemática,  $\rho$  a massa volúmica,  $\sigma$  a tensão de superfície e  $\Gamma$  o valor representativo da circulação, determinado por:

$$\Gamma = 2\pi c \quad (2.10)$$

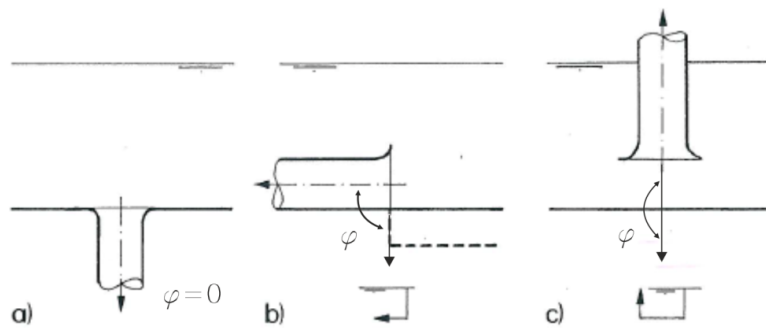
onde  $c$  é uma constante de circulação na região do vórtice livre. De acordo com os autores, o parâmetro representativo da circulação,  $\Gamma$ , torna-se difícil de calcular porque apenas pode ser estimado através de ensaios em modelos reduzidos, em estruturas protótipo se estas existirem ou através de simulações por números complexos (Knauss, 1987; Visher e Hager, 1998).

A Figura 2.16 apresenta as três configurações típicas da entrada da tomada de água diferenciadas pela direção e sentido do escoamento na conduita, traduzida no valor do ângulo  $\varphi$  com a vertical, nomeadamente  $\varphi = 0$ ,  $\varphi = \pi/2$  e  $\varphi = \pi$ . Visher e Hager consideram a altura limite de submersão  $h_{0min}$ , a altura abaixo da qual o vórtice do tipo 5 é formado (ocorre a entrada de bolhas de ar na estrutura, contudo sem a formação de um núcleo de ar). Os autores combinaram o efeito da circulação com o número de Froude definindo o número de remoinho  $C = \Gamma/\sqrt{(gD^3)}$ , concluindo que o limite de submersão relativo é função da inclinação da entrada da tomada de água com a vertical,  $\varphi$ , e do número de remoinho,  $C$ :

$$\frac{h_{0min}}{D} = f(\varphi, C) \quad (2.11)$$

O limite de submersão foi avaliado para diferentes orientações de estruturas como ilustra a Figura 2.16, verificando os autores que a relação entre o limite de submersão relativo e o número de remoinho,  $C$ , é aproximadamente linear, podendo escrever-se  $C$  como uma constante de proporcionalidade:

$$\frac{h_{0min}}{D} = C \frac{\Gamma}{\sqrt{gD^3}} \quad (2.12)$$



**Figura 2.16: Configurações típicas da entrada da tomada de água: a)  $\varphi = 0$ ; b)  $\varphi = \pi/2$ ; c)  $\varphi = \pi$  (adaptado de Visher e Hager, 1998).**

Os autores ainda referem que para o mesmo número de remoinho, o efeito da orientação geométrica da estrutura pode ser descrito pela constante  $C$ , o que é demonstrado pela existência de uma relação entre a velocidade tangencial máxima e  $r_0$ , o qual é uma fração do raio do orifício de entrada (Figura 2.17). Com  $C = C(\varphi)$ , por outras palavras como função da orientação da estrutura apenas, a altura de submersão limite relativa é, de acordo com estes autores, definida por:

$$\frac{h_{0min}}{D} = [C \left(\frac{r_0}{D}\right)]^2 \quad (2.13)$$

tomando  $C$ , os seguintes valores:

- Captação inferior na vertical  $C = 110$ ;
- Captação na horizontal  $C = 90$ ;
- Captação superior na vertical  $C = 75$ .

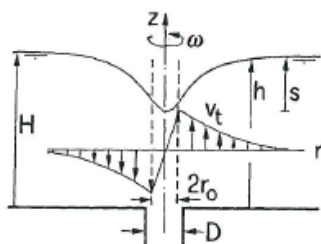


Figura 2.17: Vórtice livre e distribuição de velocidades (Visher e Hager, 1998).

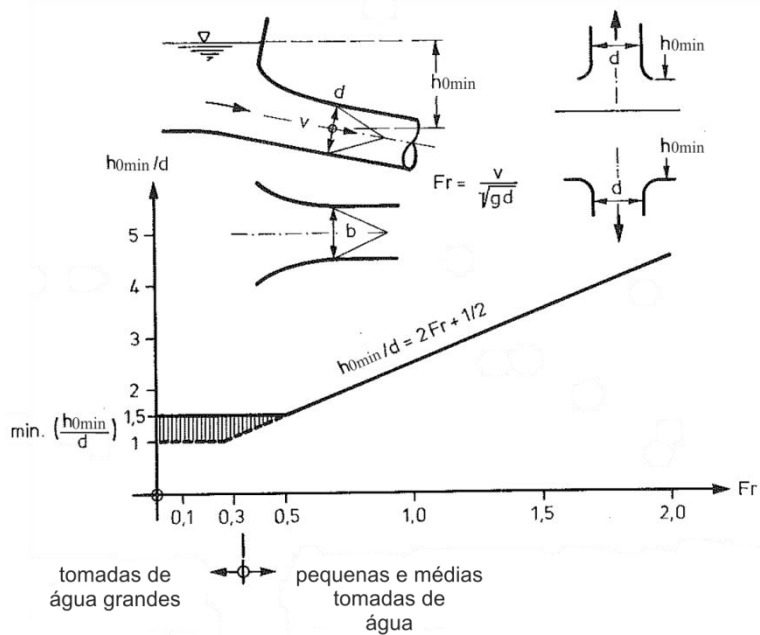
A European Small Hydropower Association (2004) indica as formulações incluídas no Quadro 2.7 para aproximação à altura mínima de submersão.

Quadro 2.7: Relações empíricas da altura de submersão mínima,  $h_{min}$ , expressa em relação à geratriz superior da conduta ou galeria (ESHA, 2004).

Autor	Expressão
Knauss	$h_{min} \geq D \left( 1 + 2.3 \frac{U}{\sqrt{g \cdot D}} \right)$
Nagarkar	$h_{min} \geq 4.4 (UD^{0.50})^{0.54}$
Rohan	$h_{min} \geq 1.474 UD^{0.76}$
Gordon	$h_{min} \geq cU\sqrt{D}$

A relação de Gordon utiliza um coeficiente  $c$  variável em função das condições de aproximação:  $c = 0,7245$  para condições de aproximação assimétricas e  $c = 0,5434$  no caso das condições de aproximação serem simétricas. Eletrobás (2003) recomenda esta formulação para definição da submersão da tomada de água referindo além desta condição a necessidade de situar a aresta superior do portal da tomada de água pelo menos 2 m abaixo do nível de água mínimo na albufeira.

Segundo Knauss (1987), para tomadas de água de grandes dimensões ( $Fr \leq 1/3$ ) é recomendada uma altura de submersão de 1 a 1,5 vezes o diâmetro da galeria da tomada de água. Para pequenas e medias estruturas ( $Fr \geq 1/3$ ), a altura de submersão deve ser calculada de acordo com a expressão indicada na Figura 2.18. O autor indica que estas recomendações são válidas perante condições de aproximação adequadas e servem como um objetivo final no melhoramento na fase de construção.

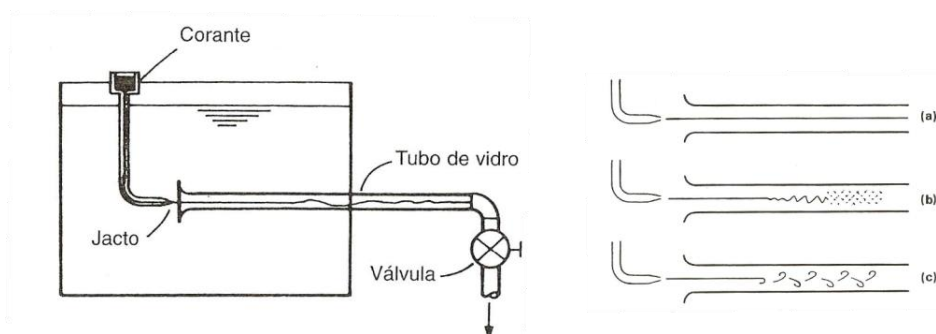


**Figura 2.18: Submersão mínima para tomadas de água com condições de aproximação de escoamento apropriadas e sem dispositivos especiais para a supressão de vórtices (adaptado de Kauss, 1987).**

### 2.3 Impacto das singularidades dos circuitos hidráulicos no campo de velocidades do escoamento

#### 2.3.1 Campo de velocidades dos escoamentos uniformes: laminar e turbulento (caracterização geral)

Foi no início da década de 1880 que a diferenciação entre escoamentos laminares e turbulentos foi experimentalmente observada por Osborne Reynolds (1842-1912) – Professor de Engenharia da Universidade de Manchester. A clássica experiência de Reynolds consiste na injeção de um filamento de tinta no seio de um escoamento em tubo transparente, controlado por uma válvula a jusante (Figura 2.19).



**Figura 2.19: Esquema do tubo de vidro no tanque (Massey, 2002): (a) regime laminar, (b) transição e (c) regime turbulento (Lencastre, 1996).**

Reynolds observou que, sob reduzidas velocidades do escoamento no interior do tubo (válvula com reduzida abertura), o filamento de tinta introduzido no seu seio não era perturbado, mantendo um alinhamento retilíneo em todo o período da observação [Figura 2.19 (a)]. À medida a que a abertura da válvula aumentava, e portanto a velocidade do escoamento era incrementada, este investigador observou perturbações crescentes no filamento de tinta introduzido [Figura 2.19 (b) e (c)]. Massey (2002) refere que, nas experiências de Reynolds, o início da perturbação do filamento ocorre sempre a uma distância da boca de entrada do tubo,  $L \approx 30D$ , representando  $D$  o diâmetro do tubo.

A não perturbação do filamento de tinta no escoamento com reduzido caudal (ou baixa velocidade) decorre do facto dos elementos do fluido escoarem ordenadamente, num regime designado de laminar. A turbulência gerada com o aumento da velocidade é responsável pela perturbação observada no filamento de tinta e nessas condições (velocidades mais elevadas) o escoamento torna-se turbulento. A turbulência caracteriza-se pela presença de vórtices em movimento, com dimensões variáveis, traduzindo-se em movimentos secundários ou de agitação, de carácter aleatório. Apesar do movimento médio no tempo ser unidirecional, a flutuação turbulenta ocorre nas 3 dimensões (x, y, z) e, por esse facto, o escoamento turbulento assume, em rigor, um carácter igualmente tridimensional. Em regime permanente, a turbulência constitui um processo *aleatório estacionário* ou *quase estacionário* (Lencastre, 1996), com as velocidades pontuais em constante flutuação, contudo, num intervalo de tempo suficientemente longo, os valores médios são constantes em grandeza e direção, (Massey, 2002).

O valor do número de Reynolds,  $Re$ , do escoamento, é utilizado como critério de separação entre os escoamentos laminar e turbulento. Este parâmetro adimensional é definido pela relação:

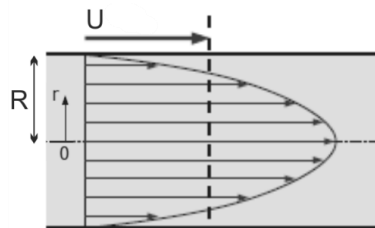
$$Re = \frac{\rho UD}{\mu} = \frac{UD}{\nu} \quad (2.14)$$

em que  $\rho$  representa a massa volúmica do líquido ( $\text{kg/m}^3$ ),  $U$  é a velocidade média (m/s),  $D$  é o diâmetro hidráulico do tubo (m),  $\mu$  é a viscosidade dinâmica ( $\text{Nsm}^{-2}$ ) e  $\nu = \mu/\rho$  é a viscosidade cinemática.

Valores reduzidos de  $Re$  traduzem a presença de forças de inércia relativamente reduzidas face às forças resistentes decorrentes da viscosidade, tendo estas um efeito preponderante na estabilidade do escoamento. A ocorrência de elevados valores de  $Re$  significa que a contribuição relativa das forças viscosas na estabilização do escoamento é reduzida, tendendo este a apresentar-se instável e com formação de vórtices.

As experiências de Reynolds permitem observar que a transição de escoamento laminar a turbulento ocorre para números de Reynolds críticos,  $Re_{cr}$ , variáveis com a geometria do tubo, no intervalo entre 2000 e 4000. Em tubos com secção circular, é geralmente, aceite o valor de  $Re_{cr} = 2300$ .

Num escoamento laminar uniforme, numa conduta de secção circular, cada partícula do fluido é animada apenas por uma velocidade axial, sendo nulas as componentes radiais das velocidades pontuais para qualquer valor da distância ao eixo do tubo. O respetivo perfil de velocidades assume uma forma parabólica com o valor máximo no eixo e o valor mínimo junto às paredes da conduta (Figura 2.20).



**Figura 2.20: Perfil de velocidades num tubo para o regime laminar em completo desenvolvimento (adaptado de Cimbala, J. M. et al., 2006).**

As velocidades pontuais são positivas (direção e sentido do escoamento), sendo negativo o gradiente de pressão  $\partial p/\partial x$  por efeito da viscosidade do fluido. Num tubo horizontal a perda de carga unitária,  $J$ , relaciona-se com aquele gradiente na forma:

$$J = \frac{1}{\rho g} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (2.15)$$

A velocidade média é determinada através da seguinte expressão (Cimbala et al., 2006):

$$U = \frac{R^2}{8\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (2.16)$$

sendo,  $R$  o raio da conduta (m) e  $\mu$  a viscosidade dinâmica ( $\text{Nsm}^{-2}$ ). Esta equação expressa em termos de  $J$  corresponde à fórmula de Hagen-Poiseuille ( $J = 32 (\mu/\rho g)(U/D^2)$ ).

O diagrama das velocidades na secção reta da conduta define-se pela relação:

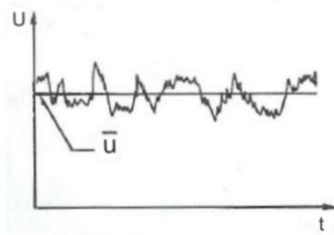
$$u(r) = 2U \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (2.17)$$

correspondendo um valor máximo das velocidades pontuais no eixo da conduta,  $r = 0$ :

$$u_{max} = 2U \quad (2.18)$$

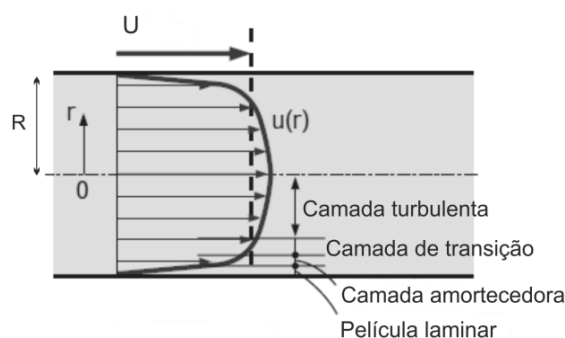
No caso dos escoamentos turbulentos permanentes e num intervalo de tempo suficientemente longo, os valores médios das velocidades pontuais,  $\bar{u}$ , mantêm-se constantes em grandeza e direção (Figura 2.21). Em qualquer instante desse escoamento, a velocidade pode ser considerada como um resultado da soma da velocidade pontual média,  $\bar{u}$ , com a flutuação turbulenta,  $u'$ , cujo valor médio tende para zero num intervalo de tempo suficientemente longo:

$$U = \bar{u} + u' \quad (2.19)$$



**Figura 2.21: Flutuações da velocidade num escoamento turbulento permanente (adaptado de Quintela, 2009).**

O diagrama de velocidades do escoamento turbulento distancia-se do parabólico (típico do escoamento laminar) aproximando-se notavelmente de um diagrama uniforme (Figura 2.22). O gradiente das velocidades é acentuado junto das paredes do tubo, anulando-se nesta fronteira (condição de não deslizamento).



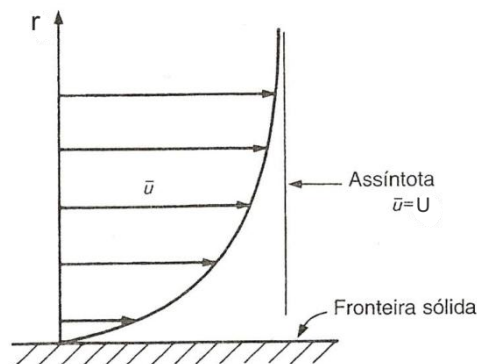
**Figura 2.22: Distribuição de velocidades,  $\bar{u}$ , num tubo para o regime turbulento em função da distância ao eixo,  $r$  (adaptado de Cimbalá, J. M. et al., 2006).**

Cimbalá et al. (2006) identifica 4 regiões distintas do escoamento turbulento esquematizadas na Figura 2.22: uma película laminar muito fina adjacente à parede do tubo (espessura inferior a 1% do diâmetro da conduta) caracterizada por uma variação linear das velocidades; a camada amortecedora, onde os

efeitos da turbulência começam a ser relevantes (contudo os efeitos da viscosidade são ainda dominantes); a camada de transição onde os efeitos da turbulência são mais acentuados; a camada turbulenta dominada pelos efeitos de turbulência.

Lencastre (1996) define zona de transição a zona de separação entre as camadas laminar e a camada limite turbulenta.

Tanto em presença do escoamento laminar como do turbulento, todos os fluidos reais satisfazem a condição de não deslizamento em contacto com superfícies sólidas, ou seja, os efeitos da viscosidade de um líquido são mais acentuados junto da fronteira sólida do escoamento. Por mais lisa que seja a superfície de contacto e por mais baixa que seja a viscosidade do líquido, a velocidade relativa entre a superfície de fronteira (parede do tubo) e o fluido é sempre nula. O diagrama de velocidades (Figura 2.23) apresenta uma zona de escoamento contígua à parede do tubo com aumento contínuo das velocidades pontuais, de  $\bar{u} = 0$  até  $\bar{u} = U$ , atingindo assintoticamente o domínio do escoamento irrotacional (Barbosa, 1968; Massey 2002) atingindo o seu valor máximo no eixo do tubo.



**Figura 2.23: Representação da variação de velocidade em contacto com superfícies sólidas (Massey, 2002).**

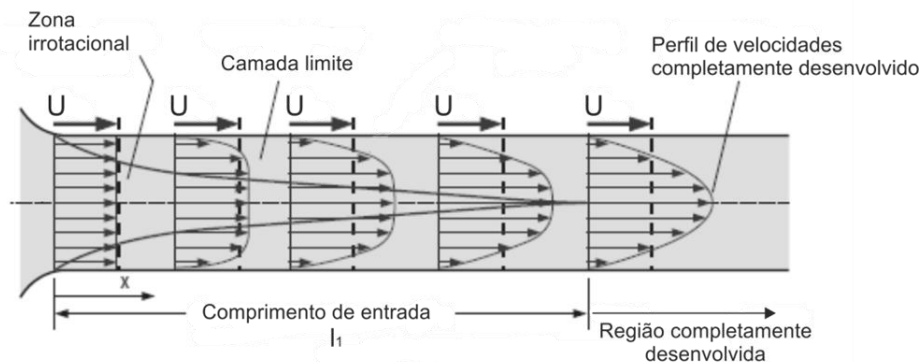
### 2.3.2 Entrada do escoamento num tubo

O movimento do fluido junto das paredes do tubo é tipicamente rotacional por efeito da deformação angular gerada em resultado da viscosidade. Num escoamento rectilíneo com distribuição uniforme de velocidades, por exemplo no início do escoamento em que o efeito de parede ainda não se faz sentir é tipicamente irrotacional.

Na secção de entrada do tubo, o fluido começa por convergir para o interior da conduta, tendendo a apresentar nas secções iniciais um núcleo de velocidades sensivelmente uniformes, sem efeito relevante da viscosidade (Figura 2.24). À medida que o escoamento progride para jusante, o efeito da viscosidade introduzido pelo efeito de parede, vai-se fazendo sentir para valores sucessivamente

menores da distância radial: o domínio do escoamento no qual a viscosidade não se faz sentir vai-se reduzindo progressivamente para jusante, ou seja a camada limite vai aumentando até atingir o eixo do tubo, condição a partir da qual o perfil das velocidades se encontra completamente desenvolvido.

As partículas de fluido em contacto com a parede do tubo respeitam a condição de não deslizamento, pelo que, para o mesmo valor de caudal, para compensar, nas sucessivas secções de escoamento, o atraso que se faz sentir na vizinhança da parede do tubo a velocidade do fluido na sua zona central aumenta (Cimbala. et al., 2006; Massey, 2002).



**Figura 2.24: Estabelecimento do escoamento na entrada de um tubo em regime laminar (adaptado de Cimbala, J. M. et al, 2006).**

O domínio ocupado pelo fluido pode ser subdividido em duas regiões: a) a região da camada limite laminar, de pequena espessura na vizinhança da parede e onde o gradiente de velocidades,  $\partial u/\partial r$ , na direção perpendicular à parede é muito grande (pelo que as tensões de corte atingem valores elevados mesmo que a viscosidade do fluido seja pequena); b) a região restante ocupada pelo fluido: a zona irrotacional (identificada na Figura 2.24), onde a velocidade permanece essencialmente constante na direção radial e, por isso, os efeitos da viscosidade são desprezáveis (Barbosa, 1968; Cimbala, J. M. et al, 2006).

A espessura da camada limite aumenta ao longo do tubo, até que atinge o eixo e preenche a conduta na sua totalidade como mostra a Figura 2.24. A região que se encontra entre a entrada do tubo e o ponto para onde a camada limite converge no eixo, é chamado de *comprimento de entrada*. H. L. Langhaar (citado em Massey, 2002) deduziu uma expressão simples para o cálculo do comprimento de entrada em regime laminar, expressa em seguida:

$$l_1 = 0,057(Re)D \quad (2.20)$$

em que  $Re$  é o numero de Reynolds e  $D$  o diâmetro do tubo.

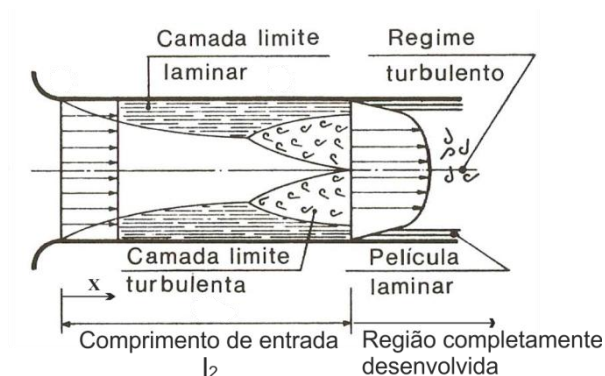
Para  $Re < 2000$ , a camada limite continua laminar até que ocupe toda a secção do tubo. A espessura da camada limite desenvolve-se segundo a expressão:

$$\delta = \frac{Kx}{Re} \quad (2.21)$$

sendo  $K \sim 5$  e  $Re$  o número de Reynolds que caracteriza o escoamento médio na conduta (Lencastre, 1996).

No entanto, para  $Re = 2000$ , condição limite que garante a estabilidade em regime laminar, o comprimento de entrada é cerca de 114 vezes o valor do diâmetro do tubo (Massey, 2002).

As perturbações da camada limite laminar iniciam-se para  $Re > 2000$ , sofrendo amplificação para jusante (Figura 2.25). Subsiste, porém ao longo da parede, uma subcamada laminar ou película laminar, em resultado do efeito de parede que contraria os movimentos transversais, limitando a componente,  $u'$  de flutuação transversal (Barbosa, 1968; Lencastre, 1996).



**Figura 2.25: Estabelecimento do escoamento na entrada de um tubo em regime turbulento (adaptado de Lencastre, 1996).**

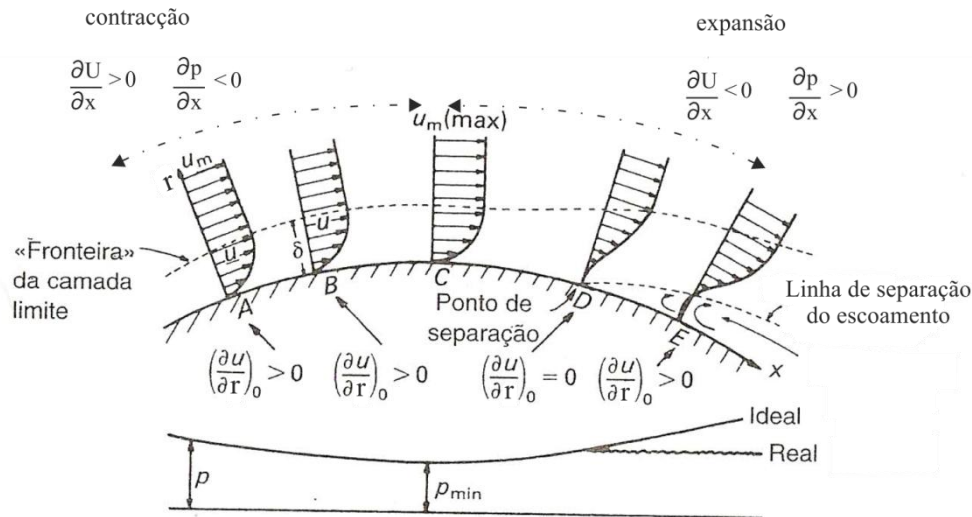
O comprimento de entrada,  $l_2$ , é dado pela expressão:

$$l_2 = 1,5D\sqrt[4]{Re} \quad (2.22)$$

Em regime turbulento, o comprimento de entrada é menor, e habitualmente é considerado o valor de 50 vezes o valor do diâmetro para tubos lisos. No entanto, caso a entrada do tubo seja em aresta viva ou existam fatores cujo os quais induzam turbulência, o comprimento de entrada é ainda menor (Massey, 2002).

### 2.3.3 Escoamento em curvas

Quando há variação da pressão no sentido do escoamento, o comportamento do líquido pode ser fortemente alterado. Considere-se a superfície curva exposta a uma corrente uniforme representada na Figura 2.26.



**Figura 2.26: Fluido escoado sobre uma superfície curva (adaptado de Massey, 2002).**

A existência de uma superfície curva obriga a desvios das linhas de corrente do escoamento e consequentemente à variação das suas velocidades. A contração do escoamento é acompanhada de um aumento da velocidade ( $\partial U/\partial x > 0$ ) e de uma redução de pressão ( $\partial p/\partial x < 0$ ). Por seu turno numa expansão do escoamento a velocidade reduz-se ( $\partial U/\partial x < 0$ ) e a pressão aumenta ( $\partial p/\partial x > 0$ ). Neste processo de redução de  $U$  por efeito da expansão do escoamento, o fluido junto da fronteira é levado ao repouso (ponto de separação) e, para jusante desta condição, geram-se correntes secundárias de sinal contrário ao escoamento principal definindo uma região de escoamento separado. A este fenómeno dá-se o nome de *separação do escoamento*. Devido à inversão do escoamento são formados turbilhões grandes e irregulares junto da superfície sólida, cuja energia mecânica é dissipada sob a forma de calor, especialmente se esta não apresentar uma forma hidrodinâmica (Barbosa, 1968; Lencastre, 1996; Massey, 2002).

Nos escoamentos em pressão (no interior de tubagens) qualquer modificação ou alteração nos tubos de fluxo dão lugar a alterações localizadas de velocidade e de pressão (Manzanares A. A., 1980).

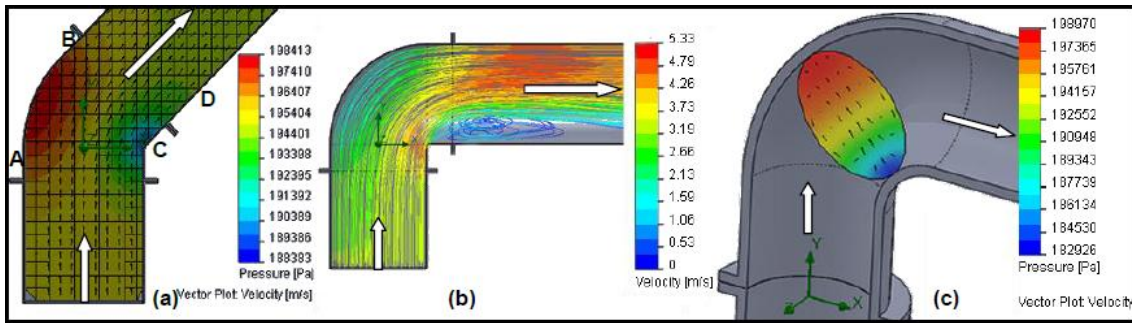
Quando o fluido em escoamento no interior de uma tubagem é obrigado a mudar de direção, sofre uma perturbação onde há dissipação de energia mecânica em turbulência (Figura 2.27).



**Figura 2.27: Trecho curvo de uma tubagem (adaptado de Lencastre, 1996).**

A circulação do líquido deve-se a uma força que é dirigida para o interior da curva, que origina a aceleração centrípeta necessária. Para que isso aconteça, há um aumento de pressão na zona exterior da curva, do ponto 1 para o 2 (sendo máxima em 2) o que corresponde a uma diminuição de velocidade, assim como a diminuição de pressão na zona interior da curva (sendo mínima no ponto 3, sofrendo um aumento gradual até 4), no que se verifica um aumento de velocidade. O líquido sofre um aumento de pressão no sentido do escoamento, tal como acontece na situação de separação do escoamento, e portanto este fenómeno é visível a menos que o raio de curvatura seja muito elevado. Na Figura 2.27, está representada a secção transversal da conduta, pelo corte A-A. Sabe-se que junto à parede sólida a velocidade é reduzida devido à camada limite, e ocorre um aumento de pressão da zona interior da curva para a exterior (com efeito reduzido nas extremidades inferior e superior da conduta, devido à ação da viscosidade). Uma vez que a pressão sofre um aumento da zona interior da curva para a exterior, há um aumento da velocidade no sentido contrário, e assim surge a formação de dois redemoinhos gémeos. Segundo Massey (2002) esta alteração na forma do escoamento origina um movimento helicoidal duplo, que pode permanecer na conduta, até uma distância de 50 a 75 vezes o valor do diâmetro do tubo. Os fenómenos de separação do escoamento e formação do escoamento secundário podem ser evitados com a colocação de anteparos no interior da conduta, as chamadas palhetas.

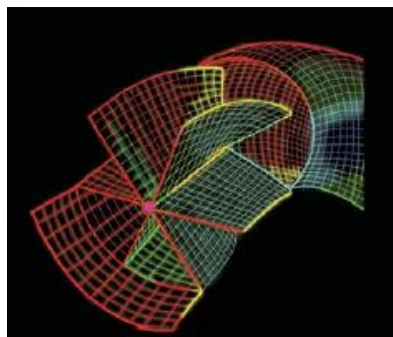
Pereira (2010) realizou uma investigação teórica através de análises numéricas CFD (Computational Fluid Dynamics) e também investigação experimental no contexto dos circuitos de aproveitamentos hidroelétricos, onde incluiu o estudo do comportamento hidráulico do escoamento em curvas e cotovelos. Analisou as variações da pressão e da velocidade, assim como das trajetórias do escoamento no interior das singularidades (Figura 2.28).



**Figura 2.28: Distribuição vetorial da velocidade (m/s) e distribuição da pressão estática (Pa): (a) num plano longitudinal ao cotovelo a 45°, (b) Trajetórias do escoamento (m/s) ao longo do cotovelo a 90°, e (c) num plano transversal à curva a 90° (Pereira, 2010).**

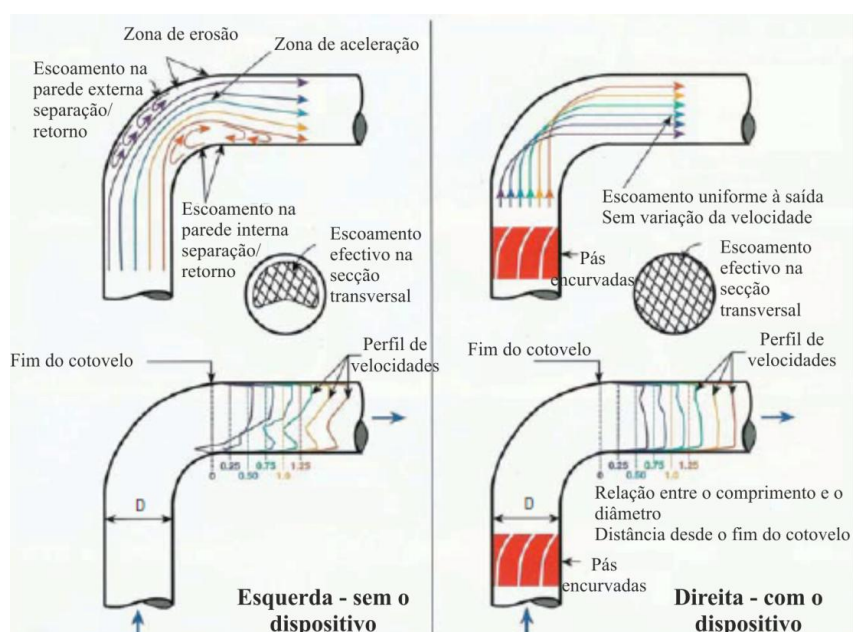
Pereira (2010) mostrou que há um aumento da pressão no extradorso do cotovelo, entre A e B, e uma redução no intradorso do mesmo, atingindo um mínimo em C e aumentando até D [Figura 2.28 (a)]. Assim, entre A e B e entre C e D o gradiente de pressões é positivo criando-se as condições para que ocorra o fenómeno de separação do escoamento, visível na Figura 2.28 (b). Na região de separação ocorre dissipação de energia por turbulência uma vez que na mesma se verifica rotacionalidade do escoamento [Figura 2.28 (b)]. A distribuição vetorial de velocidade no plano transversal à curva a 90°, representada na Figura 2.28 (c), mostra a formação de um duplo vórtice que resulta do aumento de pressão e correspondente diminuição da velocidade, no extradorso da curva, e da diminuição de pressão e correspondente aumento da velocidade, no intradorso da mesma (Pereira, 2010).

Em determinados casos, é necessário que o escoamento estabilize imediatamente após à mudança de direção, devido ao curto espaço disponível necessário para o restabelecimento do campo de velocidades. Clauss (2009) aponta como solução a instalação de um dispositivo fixo com pás curvadas em forma de hélice (Figura 2.29), imediatamente a montante do cotovelo ou curva, que vai obrigar o fluido a “torcer” na entrada do elemento curvo.



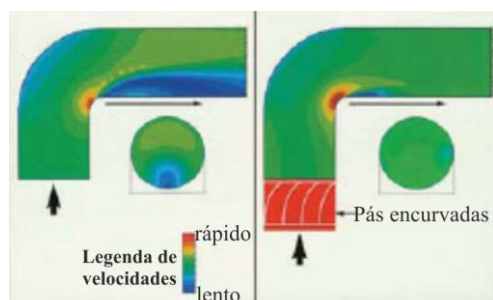
**Figura 2.29: Dispositivo fixo com pás encurvadas colocado imediatamente a montante de um elemento curvo (Clauss, 2009).**

A Figura 2.30 ilustra a melhoria do campo de velocidades, resultado da colocação das pás encurvadas, num cotovelo com 90°.



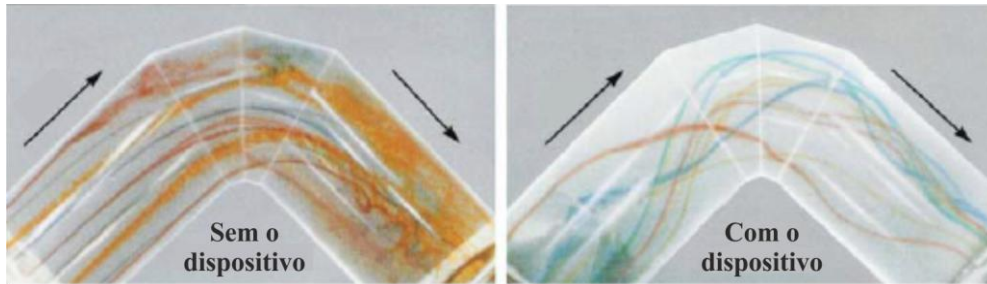
**Figura 2.30: Estabelecimento do escoamento perante um cotovelo com 90°: à esquerda com o dispositivo e à direita sem a colocação do mesmo (adaptado de Clauss, 2009).**

Os resultados apresentados no canto superior esquerdo, da Figura 2.30 (simulação CFD) mostram a perturbação característica do escoamento introduzida pela mudança de direção. No canto inferior esquerdo, representando-se os perfis de velocidades é visível a assimetria do campo à saída do cotovelo. Os resultados apresentados nos cantos superior e inferior direitos da Figura 2.30, traduzem o comportamento das linhas de corrente e o campo de velocidades no cotovelo respetivamente, após a colocação do dispositivo, onde se verifica uma saída da curva estabilizada, sem assimetria do campo de velocidades. Também na Figura 2.31 se comparam os resultados de simulação CFD das velocidades do escoamento, sem e com dispositivo de pás encurvadas instalado a montante da curva.



**Figura 2.31: Fluido circulante num cotovelo com 90°: à esquerda sem aplicação das pás encurvadas e à direita com a aplicação das mesmas (adaptado de Clauss, 2009).**

Clauss (2009) recorreu à injeção de filamentos de tinta no cotovelo com  $90^\circ$ , com e sem a aplicação do dispositivo de pás curvas, para confirmação dos resultados teóricos de simulação CFD. A Figura 2.32 mostra que, no caso da curva sem o dispositivo, os filamentos de tinta misturam-se por efeito da perturbação gerada no escoamento pela curva. No entanto, com a colocação da peça de pás curvas os filamentos de tinta mantêm-se individualizados, mostrando assim como o escoamento permanece inalterado à saída do cotovelo sem turbulência.



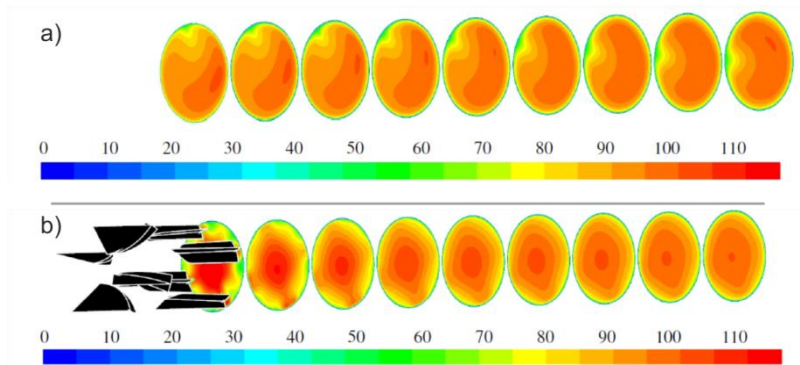
**Figura 2.32: Escoamento no cotovelo com  $90^\circ$ : sem e com colocação de dispositivo com pás encurvadas (adaptado de Clauss, 2009).**

Também Hall (2009) sugere uma solução idêntica para eliminar a perturbação do escoamento induzido por duas curvas (com  $90^\circ$ ) em planos perpendiculares no sistema hidráulico, representado na Figura 2.33. Hall (2009) desenvolveu um modelo geométrico computacional, onde os ensaios foram conduzidos para um tubo de aço com cerca de 15 cm de diâmetro.

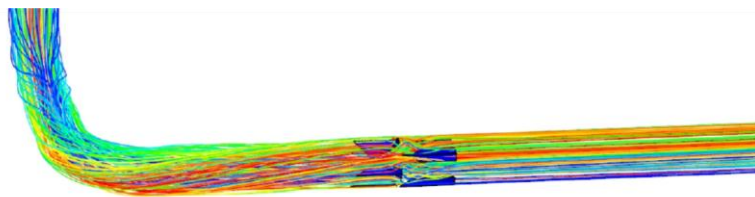


**Figura 2.33: Dispositivo fixo com pás encurvadas colocado a uma distância  $4D$  a jusante da segunda curva (adaptado de Hall, 2009).**

As Figura 2.34 e Figura 2.35 ilustram a melhoria do campo de velocidades, resultante da colocação deste dispositivo a jusante das singularidades.



**Figura 2.34: Magnitude das velocidades (ft/s) distanciada de 2 a 10D a jusante do dispositivo: a) sem a colocação do dispositivo e b) com o dispositivo (adaptado de Hall, 2009).**



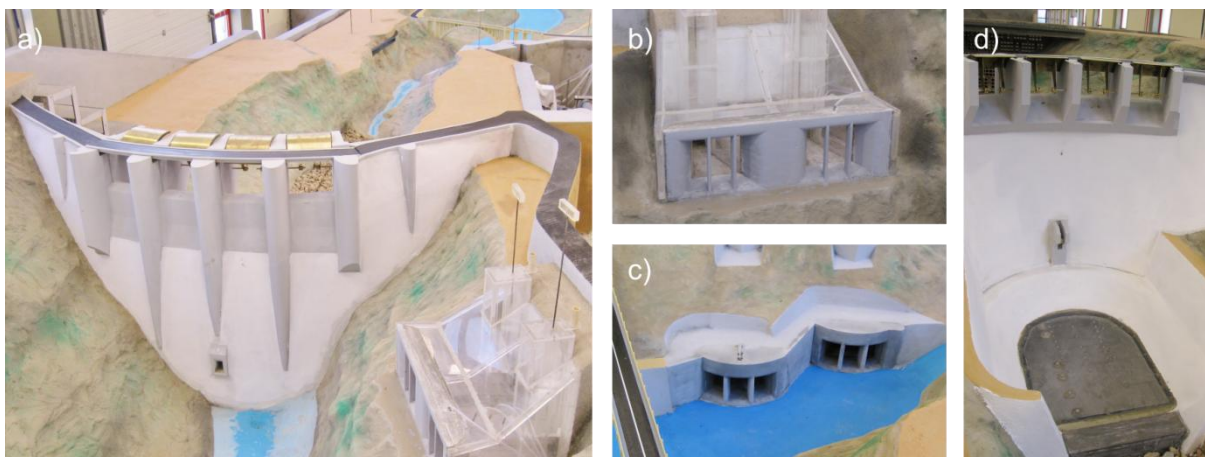
**Figura 2.35: Campo de velocidades antes e depois da zona em curva com o dispositivo (Hall, 2009).**



### 3 Trabalho experimental

#### 3.1 Descrição do modelo reduzido

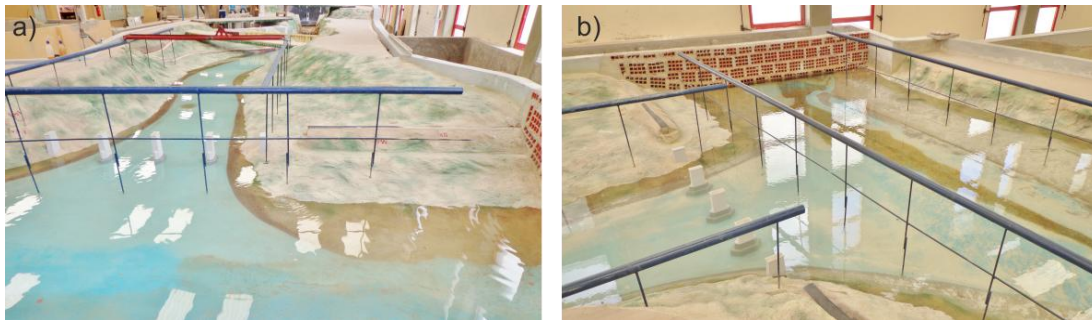
Os ensaios experimentais foram realizados no pavilhão do Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas (NRE) no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), onde foi construído o modelo reduzido do aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua no âmbito de um estudo solicitado pelas Energias de Portugal (EDP). O modelo reduzido inclui a barragem [Figura 3.1 (a)], a tomada de água [Figura 3.1 (b)], a restituição [Figura 3.1 (c)], a bacia de dissipação de energia [Figura 3.1 (d)], o circuito hidráulico com os respetivos grupos reversíveis (Figura 3.2) e um troço de rio a jusante da barragem, o qual engloba a confluência com o rio Douro (Figura 3.3).



**Figura 3.1:** (a) Vista de montante da barragem e tomada de água, (b) vista frontal da tomada de água, (c) restituição a jusante da barragem e (d) bacia de dissipação de energia (imagens cedidas pelo LNEC).



**Figura 3.2:** Circuito hidráulico: (a) aspeto, (b) e (c) troço curvilíneo a jusante da tomada de água, vistas em planta e na lateral respetivamente.



**Figura 3.3: Confluência dos rios Tua e Douro.**

O modelo físico da barragem e os seus órgãos hidráulicos foram construídos à escala de 1/65,79. Esta escala foi definida pela necessidade de reproduzir as galerias, com 7,5 m de diâmetro, em tubagem acrílica (com diâmetro externo igual a 120 mm ao qual corresponde um diâmetro interno de 114 mm).

As estruturas hidráulicas do modelo físico foram, na generalidade, moldadas com argamassa de cimento e areia, tendo sido revestidas por pasta de cimento nas fronteiras com o escoamento, simulando assim a rugosidade das superfícies do protótipo.

Na construção do circuito hidráulico do modelo físico, foram utilizados os seguintes materiais:

- perspex transparente na tomada de água da albufeira de Foz Tua [Figura 3.1 (b)];
- argamassa de cimento e areia na restituição do circuito hidráulico dos grupos geradores [Figura 3.1 (c)];
- tubos de perspex transparente no trecho curvilíneo das galerias e tubos de polietileno na restante galeria [Figura 3.2 (b) e (c)].

O modelo físico do aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua é alimentado pela rede de abastecimento do pavilhão do NRE, que dispõe de um reservatório de armazenamento geral a partir do qual é alimentada uma conduta de fibrocimento com 350 mm que abastece os diversos modelos físicos. A água utilizada em cada modelo é conduzida através de canais de recirculação até ao reservatório de aspiração das bombas [Figura 3.4 (a)]. O controlo do caudal no modelo físico de Foz Tua é feito através de uma válvula de cunha inserida imediatamente a montante do reservatório do modelo, como ilustra a Figura 3.4 (b). Outra válvula, regula, neste modelo físico, o caudal no rio Douro (a jusante da barragem).



**Figura 3.4: (a) Bombas do sistema geral de abastecimento do NRE e (b) válvula de cunha a montante do modelo físico do Foz Tua.**

O modelo físico dispõem de instrumentação para a medição de níveis na albufeira e na restituição, nomeadamente um hidrómetro a montante e outro a jusante da barragem. Para controlo e medição dos caudais no circuito hidráulico, o modelo físico dispõe de um caudalímetro (ALTO METER, modelo SC 100 AS). Existem ainda caudalímetros nos dois circuitos hidráulicos dos grupos geradores (Figura 3.5).



**Figura 3.5: Conjunto de caudalímetros associados a cada conduta e variadores de velocidades.**

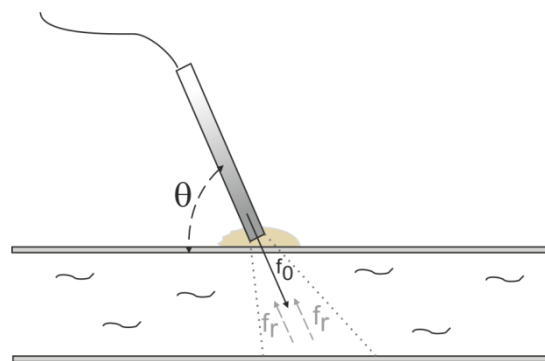
### 3.2 Princípios de medição Doppler

O campo de velocidades do escoamento líquido no circuito hidráulico associado à tomada de água foi medido através de um velocímetro Doppler ultrassónico (DOP3000 - Signal Processing, Switzerland).

O respetivo transdutor aplica a técnica de emissão pulsada de ultrassons, na qual o efeito Doppler<sup>1</sup> tem um efeito reduzido e as velocidades são determinadas através da mudança da posição entre pulsos das partículas em movimento no seio do fluido que, possuindo uma impedância acústica diferente do meio envolvente, atuam como fonte de sinais ultrassónicos (ecos).

Esta técnica de velocimetria Doppler ultrassónica requer uma dimensão de partículas inferior ao comprimento de onda do campo ultrassónico, as quais refletem uma pequena quantidade da energia em todas as direções, mantendo, nesta dispersão, a intensidade e a direção do feixe de ondas emitidas praticamente imperturbável. Para partículas de dimensão superior, a onda incidente é refletida ou refratada e, neste caso, a sua intensidade e direção de propagação são modificadas.

Na medição Doppler, uma sequência de ondas sinusoidais são emitidas pelo transdutor, com uma frequência de emissão  $f_e$ , que se propaga num cone estreito do meio líquido (volume da amostra). As ondas emitidas são intercetadas por partículas em suspensão no trajeto, que dão origem a ecos, por sua vez rececionados continuamente pelo mesmo transdutor a uma frequência  $f_r$  (Figura 3.6). O intervalo de tempo entre a emissão das ondas e a receção dos ecos é tomado como o sinal de referência, correspondendo diferentes atrasos a distintas posições da partícula que intersectou a onda.



**Figura 3.6: Esquema de funcionamento do Doppler.**

Entre 2 emissões ou 2 pulsos consecutivos, uma partícula em movimento com a velocidade  $v$ , desloca-se de acordo com a expressão seguinte:

$$\Delta s = vT_{rp} \quad (3.1)$$

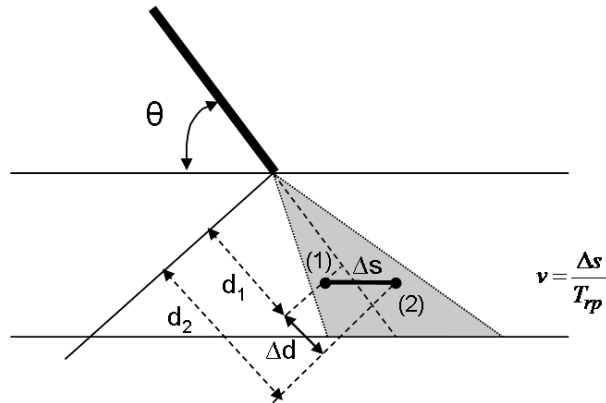
---

<sup>1</sup> Efeito Doppler é a variação na frequência de uma onda acústica ou eletromagnética por efeito do movimento ou do emissor ou do recetor.

representando  $T_{rp}$  o período de tempo entre 2 emissões. Essa variação de posição da partícula, entre (1) e (2) (Figura 3.7), é acompanhada da variação na distância  $d$  da partícula ao ponto de emissão/recepção (transdutor Doppler), segundo a direção do feixe ultrassônico, sendo:

$$\Delta d = d_2 - d_1 = \Delta s \cos \theta \quad (3.2)$$

representando  $\theta$  o ângulo do feixe ultrassônico com a direção do escoamento.



**Figura 3.7: Princípio da técnica de emissão pulsada dos ultrassons para medição da velocidade.**

Esta diferença na distância da partícula ao transdutor ( $d_1$  e  $d_2$ ) associa-se, para a posição 1 e 2 da partícula, a diferentes valores dos respectivos intervalos de tempo  $T$  decorridos entre a emissão do pulso ultrassônico e a recepção da onda refletida, nomeadamente:

$$T_1 = \frac{2d_1}{c} \quad (3.3)$$

$$T_2 = \frac{2d_2}{c} \quad (3.4)$$

representando  $c$  a velocidade de propagação do som na água ( $c = 1480$  m/s para a temperatura de  $20^\circ\text{C}$ ).

É esta informação, recolhida pelo transdutor, que permite determinar a posição da partícula e também a variação ocorrida entre 2 pulsos consecutivos, sendo:

$$d_2 - d_1 = \frac{c}{2}(T_2 - T_1) \quad (3.5)$$

Tendo em conta as relações (3.1), (3.2) e (3.5):

$$vT_{rp} \cos \theta = \frac{c}{2}(T_2 - T_1) \quad (3.6)$$

ou seja,

$$v = \frac{c(T_2 - T_1)}{2T_{rp} \cos \theta} \quad (3.7)$$

Uma vez que são muito reduzidas as diferenças de tempos ( $T_2 - T_1$ ), esta medição é substituída pela medição da mudança de fase  $\delta$  do eco recebido,

$$\delta = 2\pi f_e(T_2 - T_1) \quad (3.8)$$

em que  $f_e$  representa a frequência de emissão. Com essa informação a velocidade das partículas é determinada por:

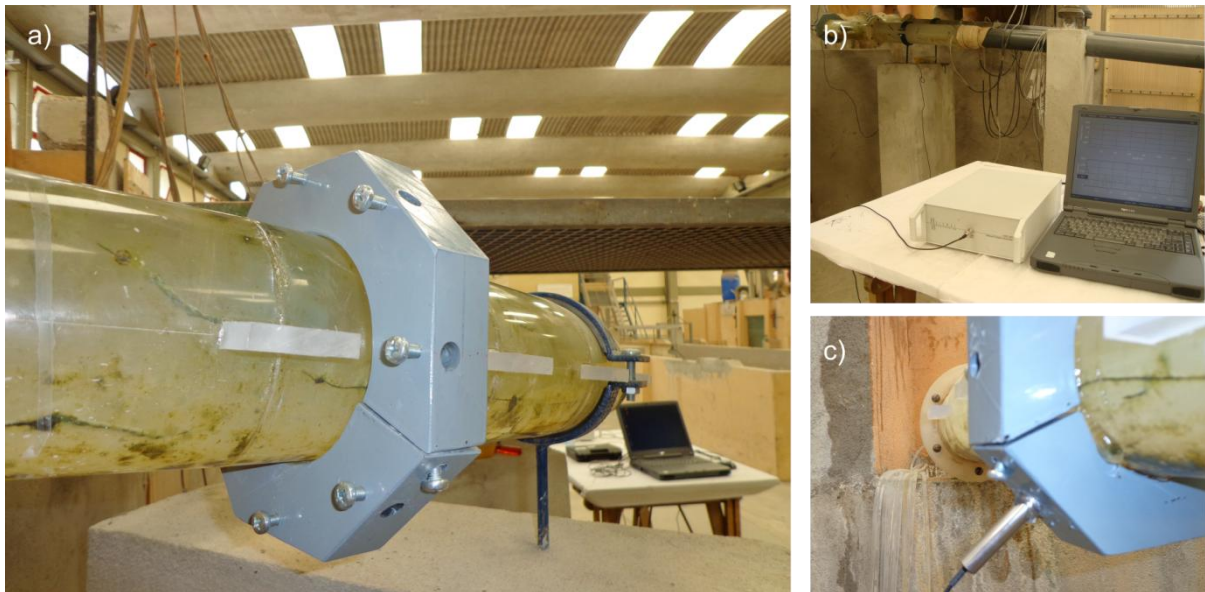
$$v = \frac{c\delta}{4\pi f_e T_{rp} \cos \theta} \quad (3.9)$$

### 3.3 Metodologia e plano de medições

Os ensaios experimentais visaram a caracterização 2D do campo de velocidades do escoamento no interior das galerias do circuito hidráulico, em regime permanente, para dois modos distintos de exploração do circuito hidráulico - turbinagem e bombagem.

No presente estudo, o transdutor, com 10 mm de diâmetro e frequência de emissão de 4 MHz, foi posicionado com um ângulo de  $\theta = 75^\circ$ , encostado à superfície exterior da parede da tubagem, assegurando-se a continuidade acústica através de uma fina camada de gel intercalada entre o transdutor e a superfície de contacto. Para o posicionamento e fixação do sensor foi construída uma peça abraçadeira com furações cilíndricas, com ângulo de interceção dos respetivos eixos com o eixo do tubo de  $75^\circ$  (Figura 3.8).

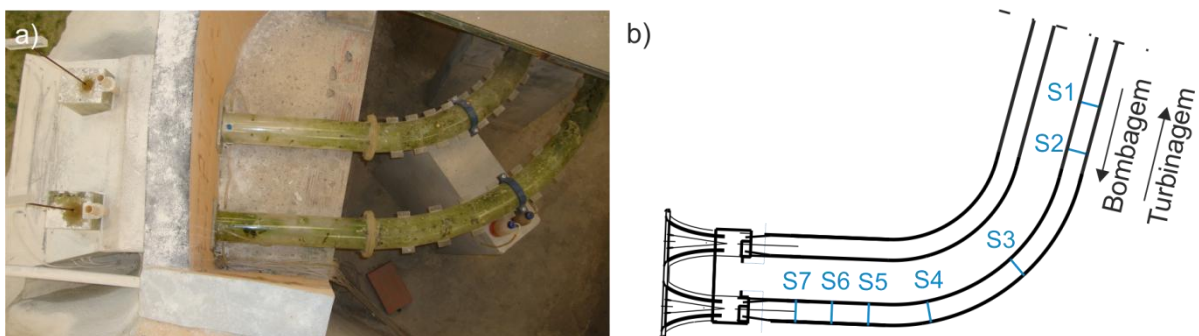
Tratando-se da caracterização do campo de velocidades em regime permanente, prolongou-se cada medição por um período de cerca de 1 minuto, recolhendo 1600 perfis instantâneos das velocidades diametrais, com espaçamento temporal de 49,7 ms, tendo-se considerado como resultado da medição o perfil médio nesse intervalo. A resolução obtida em cada perfil é traduzida por um total de 64 “gates” de medição, distanciadas entre si de 2,25 mm.



**Figura 3.8:** (a) Peça para posicionamento do transdutor Doppler, (b) equipamento de processamento e (c) posicionamento do transdutor.

Foram realizadas medições em sete secções distintas do circuito (S1 a S7) assinaladas na Figura 3.9. Fornecendo, cada medição Doppler, um perfil diametral de velocidades, a resolução espacial 2D do campo de velocidades nas referidas secções de medição, foi conseguida através de medições com o sensor posicionado nas 8 posições com intervalos angulares de  $45^\circ$  (Figura 3.10).

Nas secções 1 a 5 realizaram-se medições nas oito posições distintas do transdutor P1 a P8 (Figura 3.10). Devido a dificuldades na colocação do sensor, nas secções 6 e 7, só foi possível efetuar medições com o transdutor colocado nas posições P2 a P5. No total foram adquiridos 96 perfis diametraes de velocidade do escoamento (Quadro 3.1), 48 em turbinagem e 48 em bombagem.



**Figura 3.9:** Vista em planta dos circuitos hidráulicos: (a) no modelo físico e (b) posições das secções de medição.

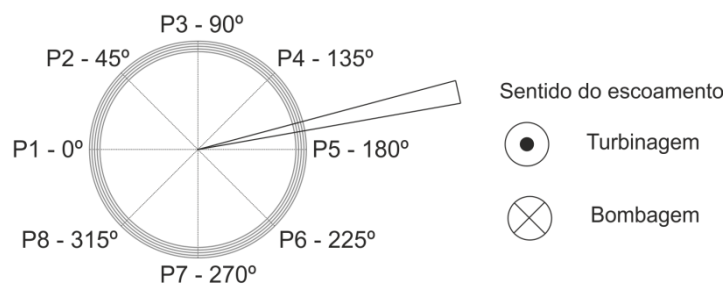


Figura 3.10: Posições do transdutor na medição de cada secção na conduta.

Quadro 3.1: Plano de medição: em turbinagem e em bombagem.

Perfis diametrais de velocidade	Secção de medição						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
P1	●	●	●	●	●		
P2	●	●	●	●	●	●	●
P3	●	●	●	●	●	●	●
P4	●	●	●	●	●	●	●
P5	●	●	●	●	●	●	●
P6	●	●	●	●	●		
P7	●	●	●	●	●		
P8	●	●	●	●	●		

Apresenta-se no Quadro 3.2 os caudais estabelecidos no modelo físico, controlados através dos caudalímetros associados à instalação. Para o modo de funcionamento do circuito hidráulico em bombagem, a alimentação, proveniente de jusante (alimentado pelo rio Douro), foi controlada pelo caudalímetro para o valor de 18 l/s. Os variadores de velocidade de rotação associados ao equipamento de bombagem asseguram a regulação do caudal bombado para 2 x 4,0 l/s.

Quadro 3.2: Caudais nos ensaios.

Modo de funcionamento	Caudal no modelo	Caudal no protótipo
<b>Bombagem</b>	2 x 4,0 l/s	2 x 139 m <sup>3</sup> /s
<b>Turbinagem</b>	2 x 4,47 l/s	2 x 155 m <sup>3</sup> /s
<b>No rio Douro (ensaios em bombagem)</b>	18 l/s	1068 m <sup>3</sup> /s

Para assegurar a presença de quantidade suficiente de partículas em suspensão no seio do escoamento (requisito da técnica de medição Doppler), procedeu-se ao lançamento, na zona da tomada de água ou da restituição (nos ensaios em turbinagem e em bombagem, respetivamente) de farinha de sílica previamente dissolvida (seeding). Este procedimento foi aplicado e mantido ao longo de cada ensaio.

No Quadro 3.3 são apresentados os valores de submergência nas albufeiras do Tua e da Régua, tendo em conta que os ensaios foram efetuados para os respetivos níveis de pleno armazenamento (NPA).

**Quadro 3.3: Submergências de ensaio.**

<b>Submergências</b>	<b>Modelo físico</b>	<b>Protótipo</b>
<b>Turbinagem (albufeira do Tua)</b>	0,37 m	24,25 m
<b>Bombagem (albufeira da Régua)</b>	0,11 m	6,9 m



## 4 Análise e discussão de resultados

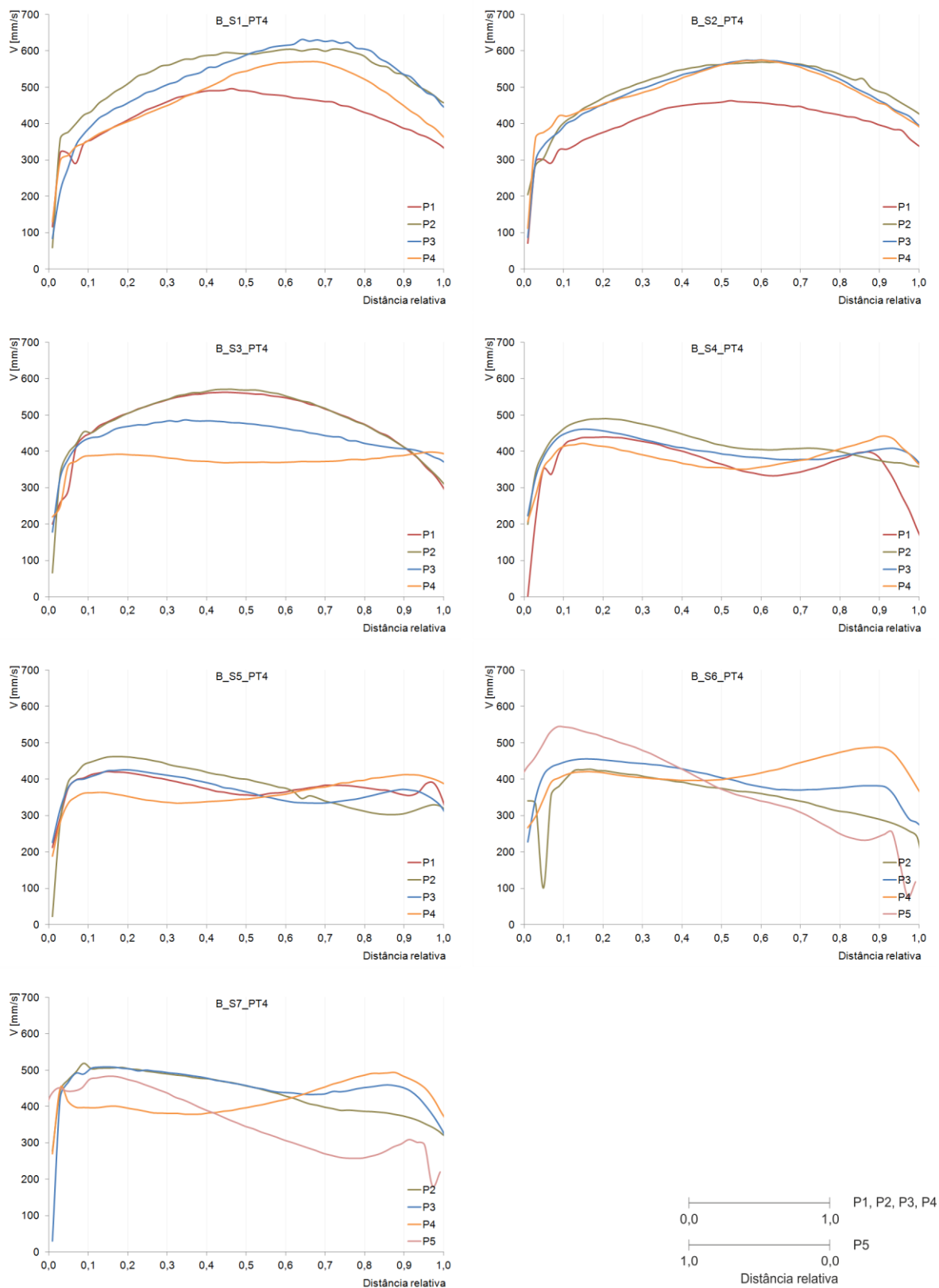
### 4.1 Perfis médios das velocidades registadas com o sistema Doppler

As Figura 4.1 e Figura 4.2 traduzem os perfis médios das velocidades registadas através do sistema de medição Doppler, com o sensor nas posições P1 a P4 e para o funcionamento do circuito hidráulico em bombagem e turbinagem respetivamente. Os perfis de velocidades obtidos com o transdutor nas posições P5 a P8 (Anexo B), cujas direções diametrais de medição são coincidentes com as direções da medição nas posições P1 a P4, apenas são utilizados na reprodução da camada limite, na vizinhança do sensor. A informação contida nos Quadro 4.1 e Quadro 4.2 caracteriza as variações máximas registadas nas medições sob funcionamento em bombagem e turbinagem respetivamente.

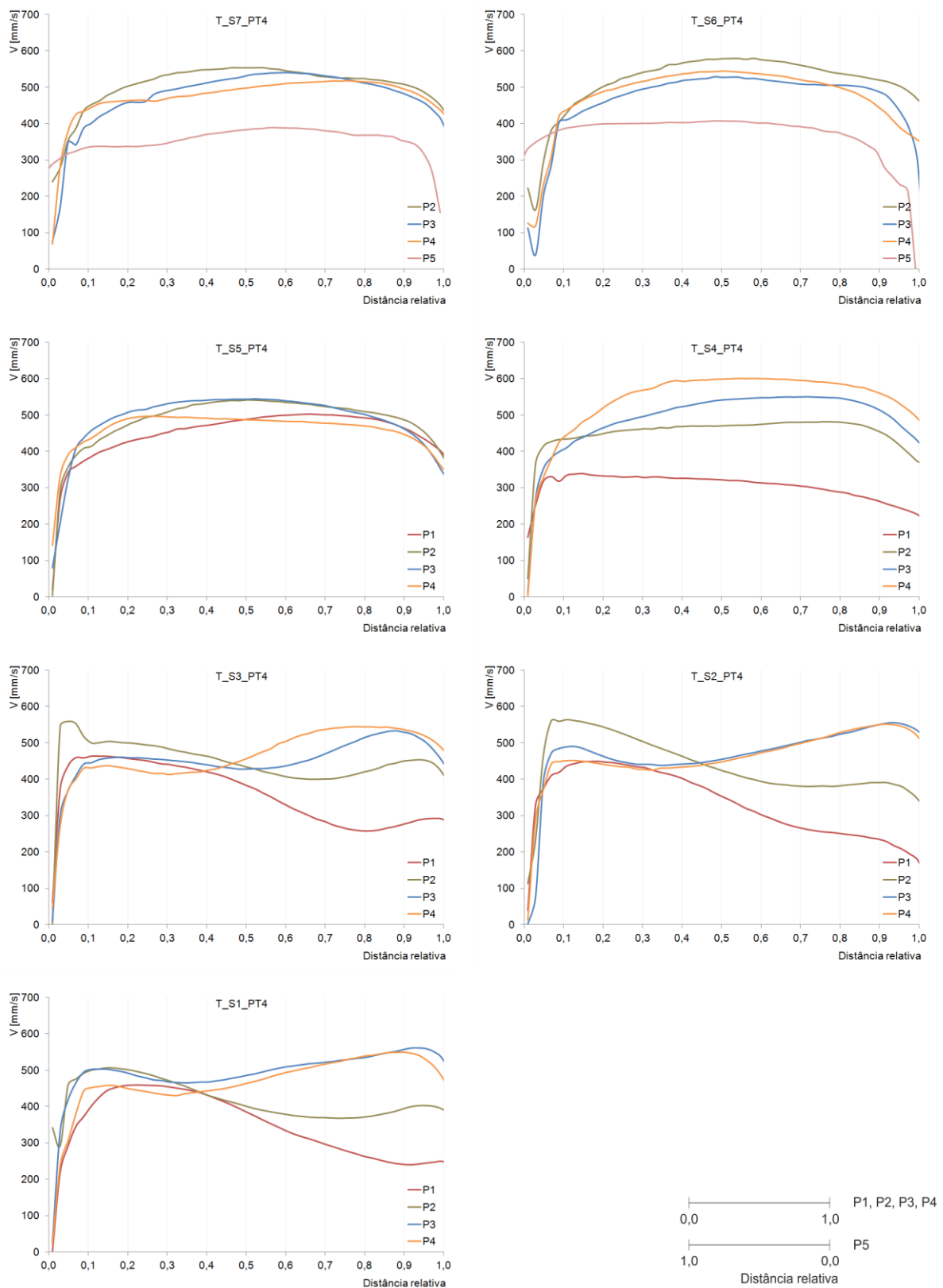
Numa análise crítica aos resultados de medição observam-se que:

- existem diferenças relevantes, nas diferentes secções de medição, entre os valores de velocidade registada no centro da tubagem, único ponto comum dos vários perfis (P1 a P8);
- não se obtém uma reprodução adequada da camada limite na vizinhança da parede diametralmente oposta à do encosto do transdutor.

No que diz respeito ao primeiro aspeto, concluiu-se que as diferenças registadas são um resultado dos desvios de orientação dos eixos das 8 furações executadas na peça abraçadeira para posicionamento do transdutor, os quais deveriam assegurar uma interseção única com o eixo do tubo. Para garantir este desejável rigor de medição é necessário que a peça de posicionamento do sensor seja executada com técnicas de elevada precisão. Assim, de acordo com o manual - Signal Processing (DOP3000) – são indicados erros de 9%, 18% e 30% na avaliação do caudal através dos resultados de medição Doppler para desvios de 1°, 2° e 3°, respetivamente, em relação aos 75° da inclinação teórica do sensor com o eixo do tubo. Esta inclinação é um dos parâmetros do velocímetro Doppler ultrassónico a seleccionar pelo utilizador e cuja precisão de valor é de primordial importância.

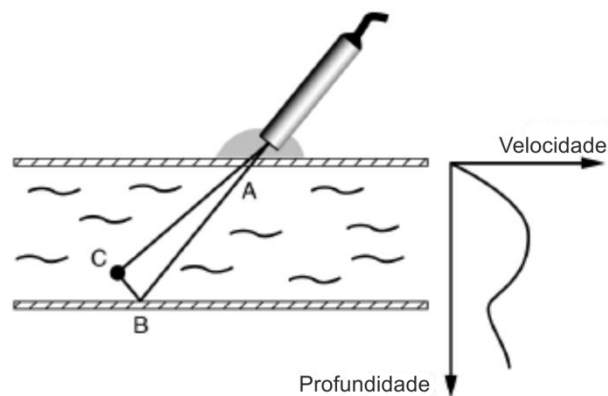


**Figura 4.1: Registos dos perfis diametrais de velocidade (mm/s) com espaçamento angular de 45°: funcionamento do circuito hidráulico em bombagem**



**Figura 4.2: Registos dos perfis diametrais de velocidade (mm/s) com espaçamento angular de 45°: funcionamento do circuito hidráulico em turbinagem.**

No que diz respeito ao segundo aspeto, verifica-se que o efeito da parede (não deslizamento), traduzido por um acentuado gradiente das velocidades do escoamento na sua vizinhança apenas é reproduzido junto da parede adjacente ao transdutor. A superfície de fronteira oposta, refletindo o feixe ultrassónico emitido pelo transdutor, funciona também como transmissor (Figura 4.3). As partículas atingidas refletem sinais, que são também rececionados pelo transdutor. Estes ruídos de medição, causados por estas reflexões acústicas (componentes de velocidades não reais), são adicionados aos perfis de velocidade reais, afetando de forma relevante a medição na vizinhança da parede oposta à do sensor. Por este facto, não é possível reproduzir, nesta região e através da técnica de medição Doppler, o campo de velocidades reais. No sentido de ultrapassar esta limitação procedeu-se à aquisição dos perfis de velocidades com o transdutor nas posições P5, P6, P7 e P8 (direções diametrais de medição coincidentes com as direções da medição nas posições P1, P2, P3 e P4, respetivamente), por forma a obter a caracterização da camada limite naquela região.



**Figura 4.3: Efeito transmissor da parede oposta à do encosto do transdutor Doppler (adaptado de Signal Processing (DOP3000)).**

Nos Quadro 4.1 e Quadro 4.2 apresentam-se os valores médios das velocidades medidas no centro do tubo (em bombagem e turbinagem, respetivamente) e os desvios máximos relativos dos valores medidos em torno do valor médio. Para o funcionamento em bombagem registou-se um desvio máximo de 21,18% na secção S3, traduzindo-se esse desvio em turbinagem, em 30,10% na secção S4.

**Quadro 4.1: Desvios máximos relativos das medições no centro do tubo, em torno do valor médio para o funcionamento em bombagem.**

<b>Bombagem</b>				
<b>Secção de medição</b>	<b>Velocidade no eixo (mm/s)</b>		<b>Valor médio (mm/s)</b>	<b>Desvio máximo relativo em torno do valor médio (%)</b>
	<b>máx</b>	<b>min</b>		
<b>S1</b>	591,55	490,01	540,78	9,39
<b>S2</b>	562,51	458,69	510,60	10,17
<b>S3</b>	568,16	369,58	468,87	21,18
<b>S4</b>	417,37	355,40	386,38	8,02
<b>S5</b>	400,33	345,07	372,70	7,41
<b>S6</b>	404,43	372,90	388,67	4,06
<b>S7</b>	457,79	344,01	400,90	14,19

**Quadro 4.2: Desvios máximos relativos das medições no centro do tubo, em torno do valor médio para o funcionamento em turbinagem.**

<b>Turbinagem</b>				
<b>Secção de medição</b>	<b>Velocidade no eixo (mm/s)</b>		<b>Valor médio (mm/s)</b>	<b>Desvio máximo relativo em torno do valor médio (%)</b>
	<b>máx</b>	<b>min</b>		
<b>S1</b>	485,09	385,27	435,18	11,47
<b>S2</b>	455,07	353,05	404,06	12,62
<b>S3</b>	456,45	382,81	419,63	8,77
<b>S4</b>	598,76	321,69	460,22	30,10
<b>S5</b>	542,84	486,51	514,67	5,47
<b>S6</b>	578,77	406,70	492,74	17,46
<b>S7</b>	554,32	383,22	468,77	18,25

Os registos obtidos no modo de funcionamento em bombagem (Figura 4.1) traduzem um escoamento pouco perturbado entre as secções S1 e S3. Os perfis de velocidades apresentam algum nível de simetria em relação ao eixo do tubo (exclui-se, pelas razões apontadas, as regiões de escoamento na vizinhança das paredes). A partir da secção S4 os perfis registados tendem a apresentar-se assimétricos em relação ao eixo do tubo, com velocidades superiores na região exterior da curva.

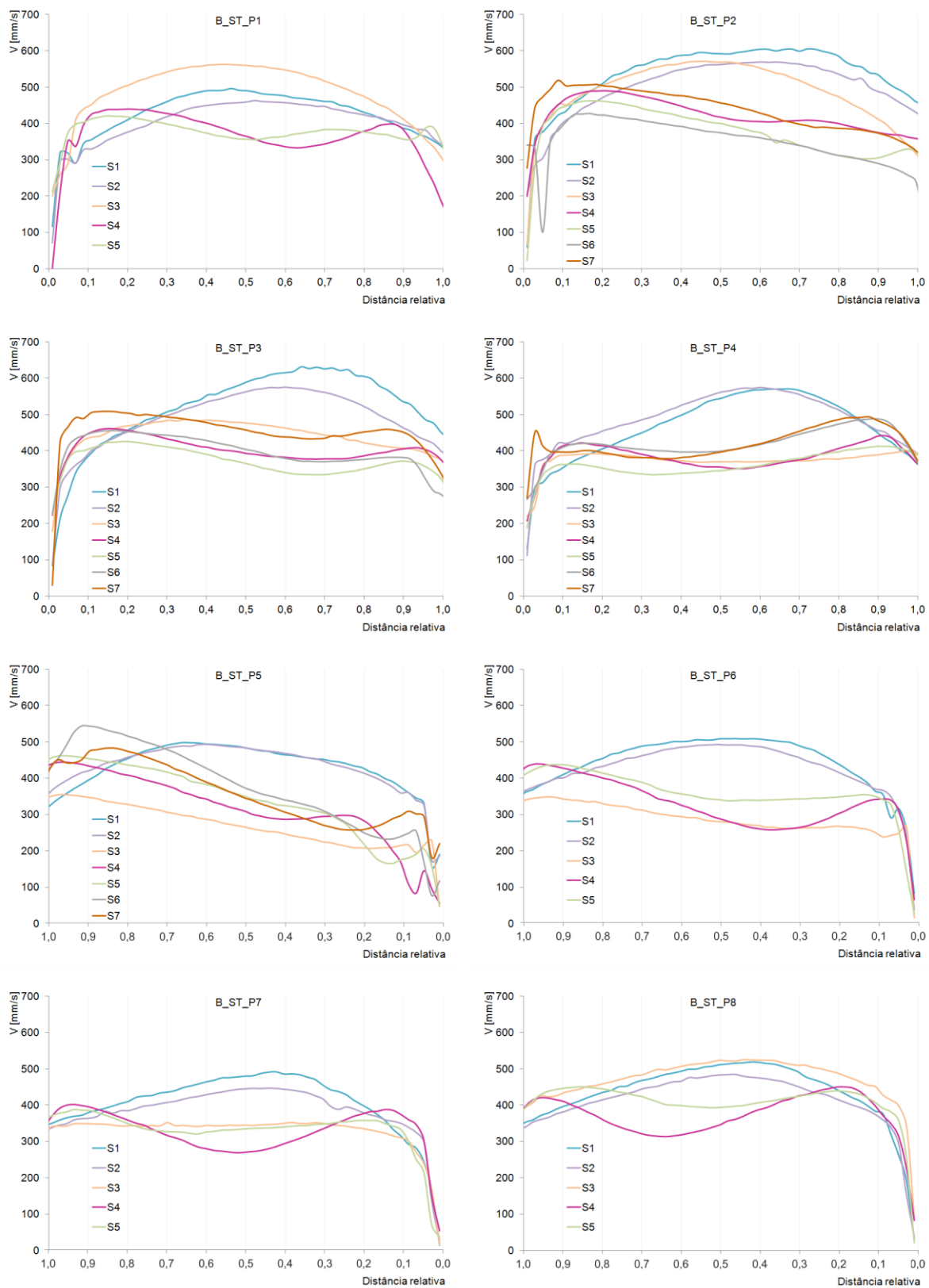
No modo de funcionamento em turbinagem (Figura 4.2) os perfis de velocidade nas secções a montante da curva (S7, S6 e S5) apresentam também algum nível de simetria em relação ao eixo do tubo com tendência de alteração a partir da secção S4. Nas secções S3 e S2 (secção intermédia e secção de saída da curva), os perfis de velocidade registados são marcadamente assimétricos em relação ao eixo do tubo também com velocidades superiores na região exterior da curva. Na secção S1

o escoamento ainda não recuperou do efeito causado pela presença da curva no seu campo de velocidades.

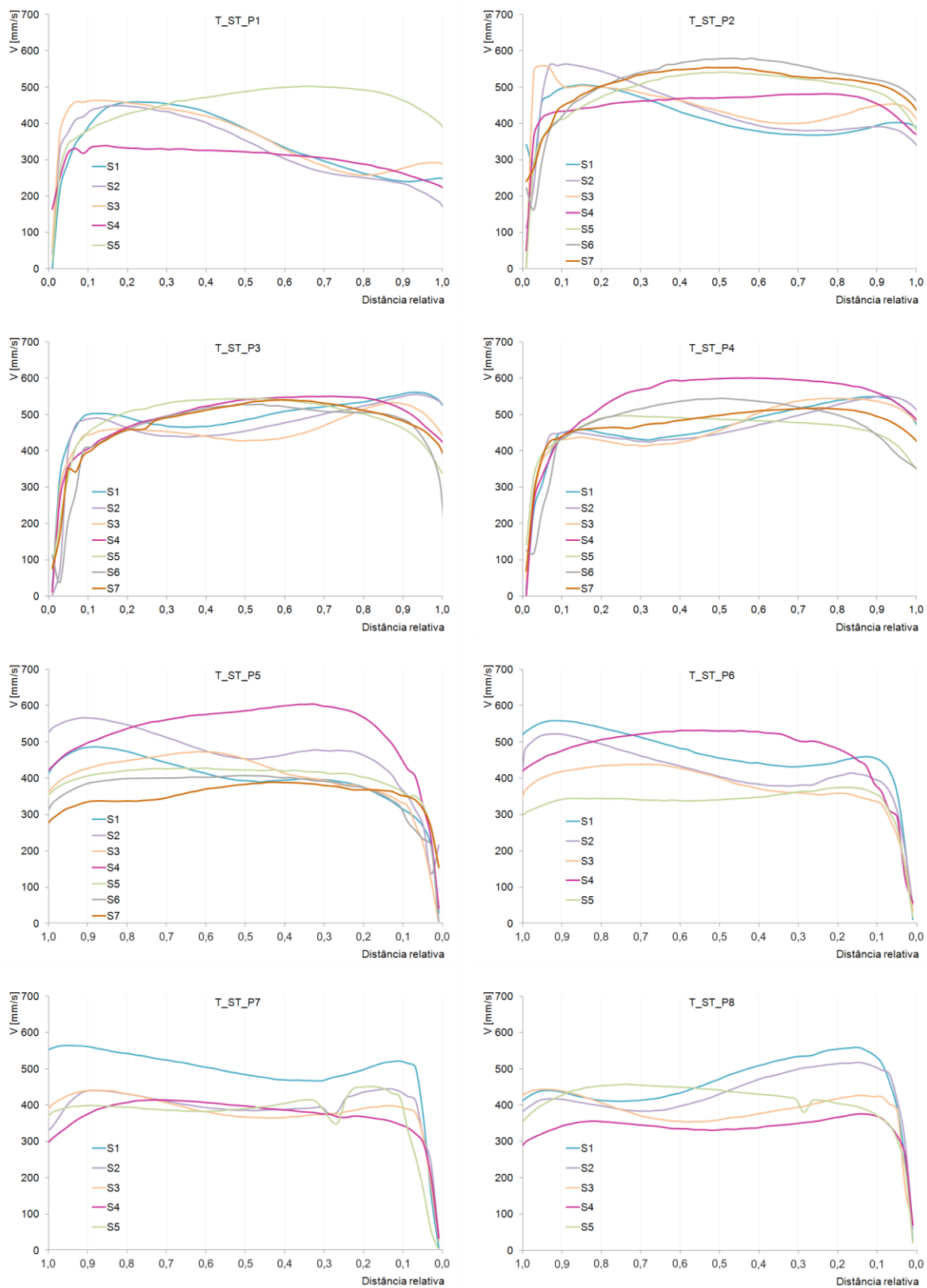
Nas Figura 4.4 e Figura 4.5 comparam-se os perfis de velocidades medidos com cada uma das posições do transdutor, nas diferentes secções no funcionamento em bombagem e turbinagem respetivamente.

Em bombagem (Figura 4.4), observa-se que os perfis de velocidades P1 e P2 revelam uma alteração relevante a partir da secção S4 (saída da curva), começando esse efeito a fazer-se sentir mais cedo nos restantes perfis de velocidades, nomeadamente a partir da secção S3 (a meio da curva). O perfil de velocidades na secção S6 (a jusante da curva) registado com o transdutor na posição P2 poderá indicar a presença de uma separação de escoamento na vizinhança da parede do tubo. Também o perfil de velocidades registado na secção S4 (saída da curva) com o transdutor na posição P5 traduz, na região interior da curva, um perfil irregular igualmente indiciador da separação local do escoamento.

Em turbinagem (Figura 4.5), o escoamento dá-se da secção S7 para a secção S1 (a sequência das secções de montante para jusante é inversa). Os perfis de velocidade são, na abordagem à curva, aproximadamente uniformes (S7 a S4). O efeito da presença da curva no campo das velocidades do escoamento é refletido em todos os perfis de medição a partir da secção S3 (meio da curva). Os perfis P1 a P8 na secção S1 (já fora da curva) ainda mostram a influência da curva no respetivo campo de velocidades.



**Figura 4.4: Perfis diametrais das velocidades registadas nas diferentes secções para igual posicionamento do transdutor, no modo de funcionamento do circuito hidráulico em bombagem.**

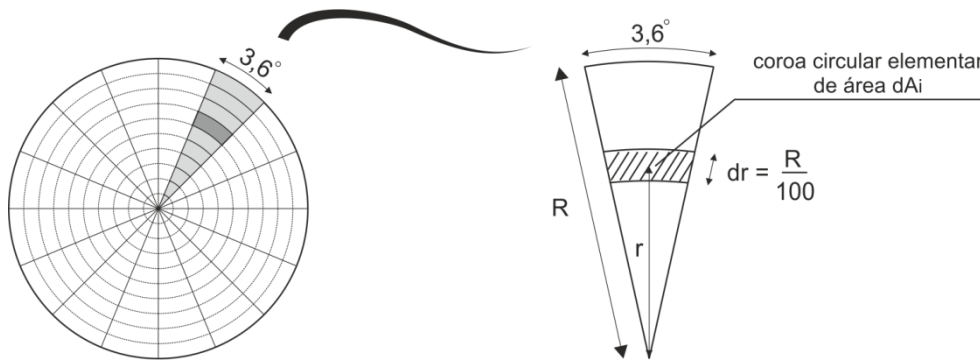


**Figura 4.5: Perfis diametrais das velocidades registadas nas diferentes secções para igual posicionamento do transdutor, no modo de funcionamento do circuito hidráulico em turbinagem**

## 4.2 Tratamento numérico, apresentação e discussão de resultados

### 4.2.1 Tratamento numérico

Tendo por base a informação pontual das velocidades registadas, em cada secção, com o transdutor nas posições P1, P2, P3 e P4 (intervalo angular de  $45^\circ$ ), foi aplicada uma técnica numérica de interpolação linear-polar para a caracterização 2D do campo de velocidades. Esta é a técnica integrante de um código MatLab (Mendes, 2012) utilizado neste trabalho. Em linhas gerais a técnica numérica aplicada considerou uma discretização da secção em 10.000 coroas circulares elementares, definidas por uma amplitude angular de  $3,6^\circ$  e uma espessura  $dr = R/100$  (Figura 4.6).



**Figura 4.6: Esquema de discretização utilizado no código MatLab.**

As velocidades,  $v_i$ , no centro das coroas circulares elementares foram então definidas a partir das velocidades pontuais registadas pelo Doppler, recorrendo à referida interpolação linear-polar. O código desenvolveu ainda a determinação numérica do caudal na secção,  $Q$ , através da relação:

$$Q = \sum q_i = \sum (v_i \cdot dA_i) \quad (4.1)$$

representando  $q_i$  o caudal escoado através do elemento de discretização  $i$  de área  $dA_i$ .

### 4.2.2 Apresentação e discussão dos resultados numéricos

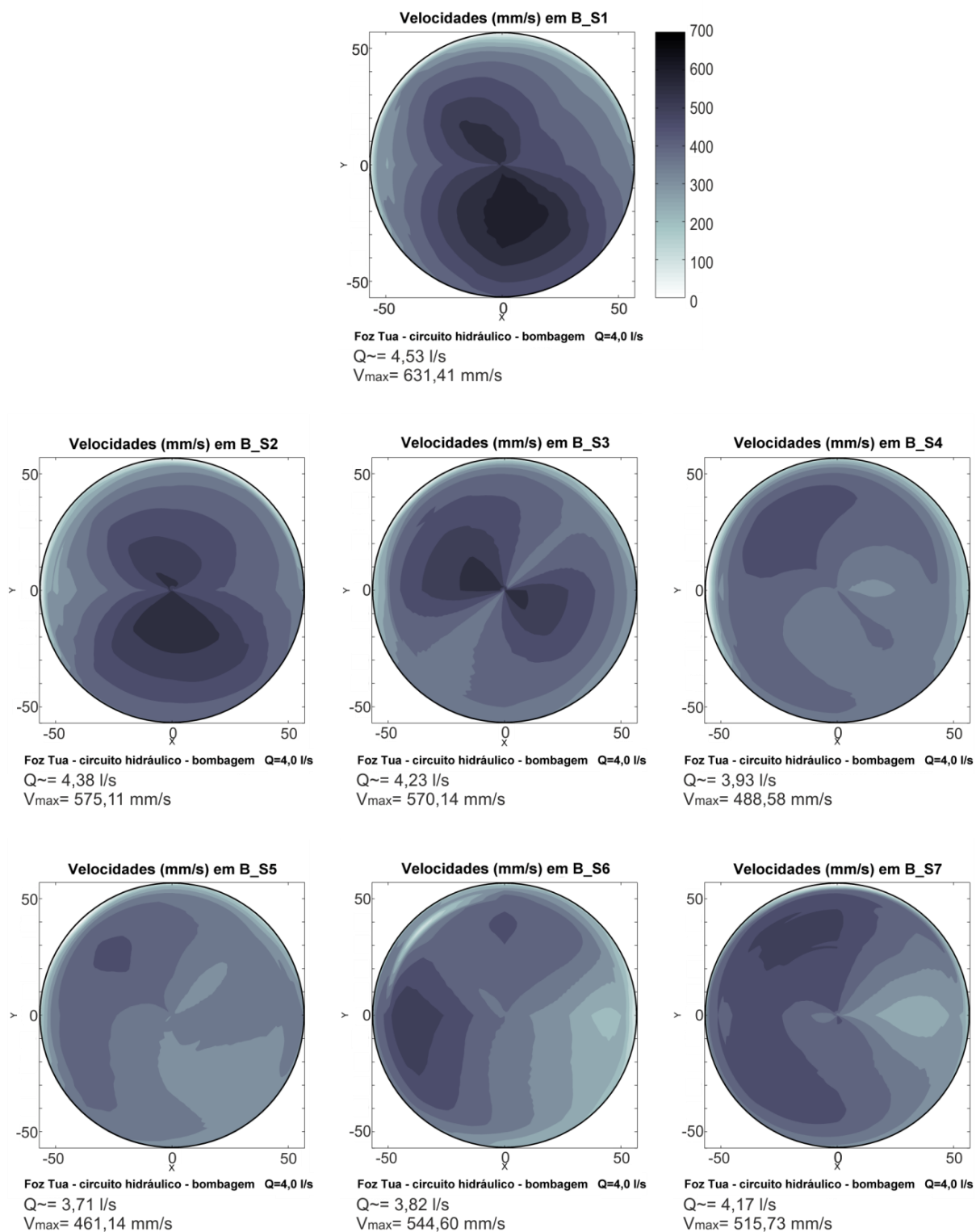
As Figura 4.7 e Figura 4.8 fornecem uma caracterização 2D do campo de velocidades nas diferentes secções para o modo de funcionamento hidráulico em bombagem e turbinagem respetivamente.

Em bombagem (Figura 4.7), observa-se que o escoamento aborda a curva sem perturbações (S1 a S3), evidenciando a partir da secção S4 (fim da curva), um escoamento que flui preferencialmente pela

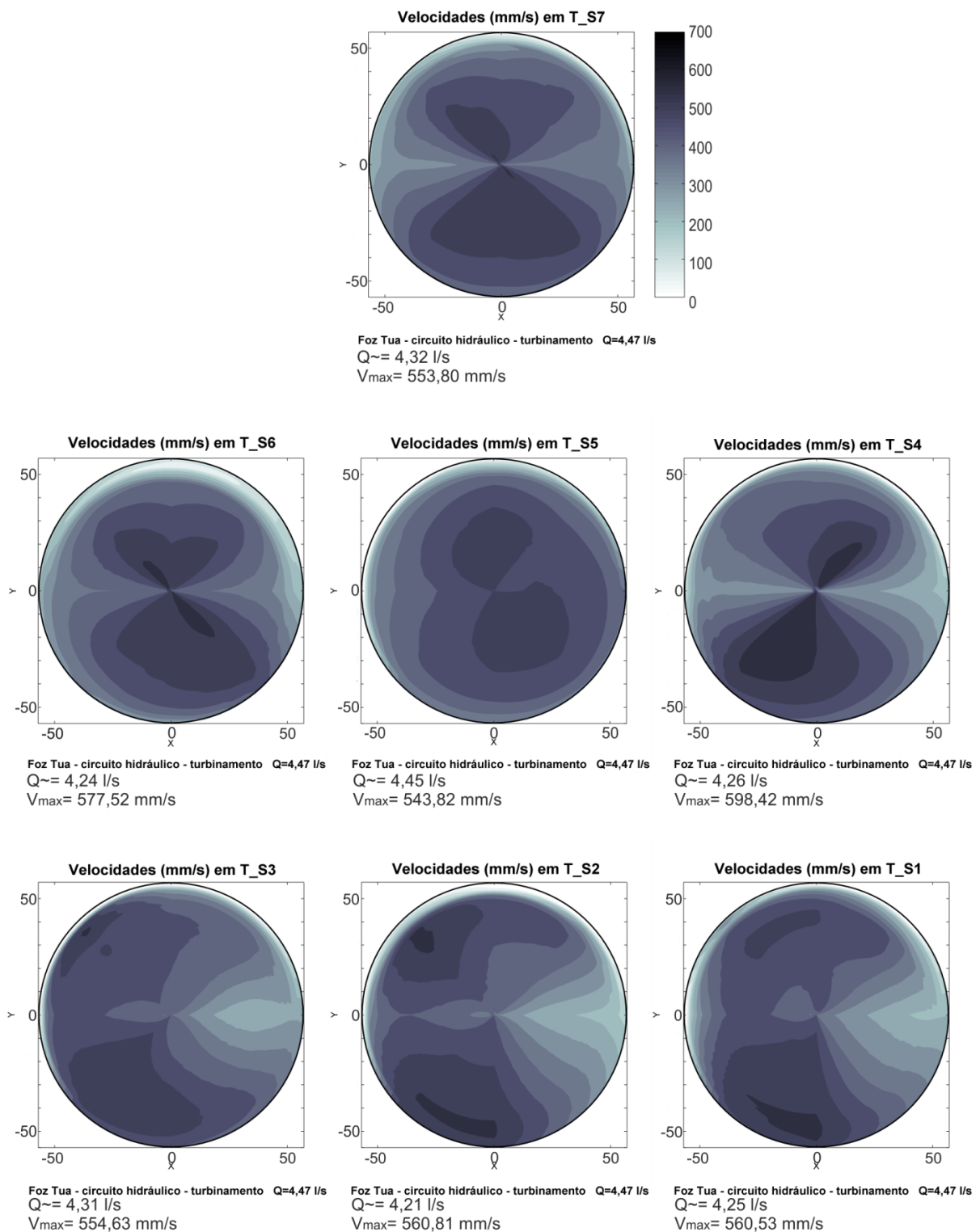
região externa da curva. Verifica-se ainda que na secção S7 (última secção de medição antes da entrada na estrutura da tomada de água) o escoamento ainda não restabeleceu o estado de completo desenvolvimento (efeito causado pela singularidade da curva), observando-se uma acentuada assimetria no campo de velocidades.

Em turbinagem (Figura 4.8), o escoamento processa-se da secção S7 para S1, abordando a curva na secção S4 sem se registarem perturbações do campo de velocidades. A partir da secção S3 o campo de velocidades revela o desenvolvimento de assimetria também com valores superiores na região externa da curva, atingindo a secção S1 sem que tenha restabelecido o seu equilíbrio. A caracterização 2D traduzida nas Figuras 4.7 e 4.8 espelha uma fraca reprodução da camada limite na vizinhança da parede diametralmente oposta à da instalação do transdutor. Pese embora essa frágil reprodução a informação contida nos registos Doppler para as posições P5, P6, P7 e P8, permitiu reproduzir a camada limite na mesma região, para ambos os modos de funcionamento hidráulico (bombagem e turbinagem) (Figura 4.9 e Figura 4.10 respetivamente).

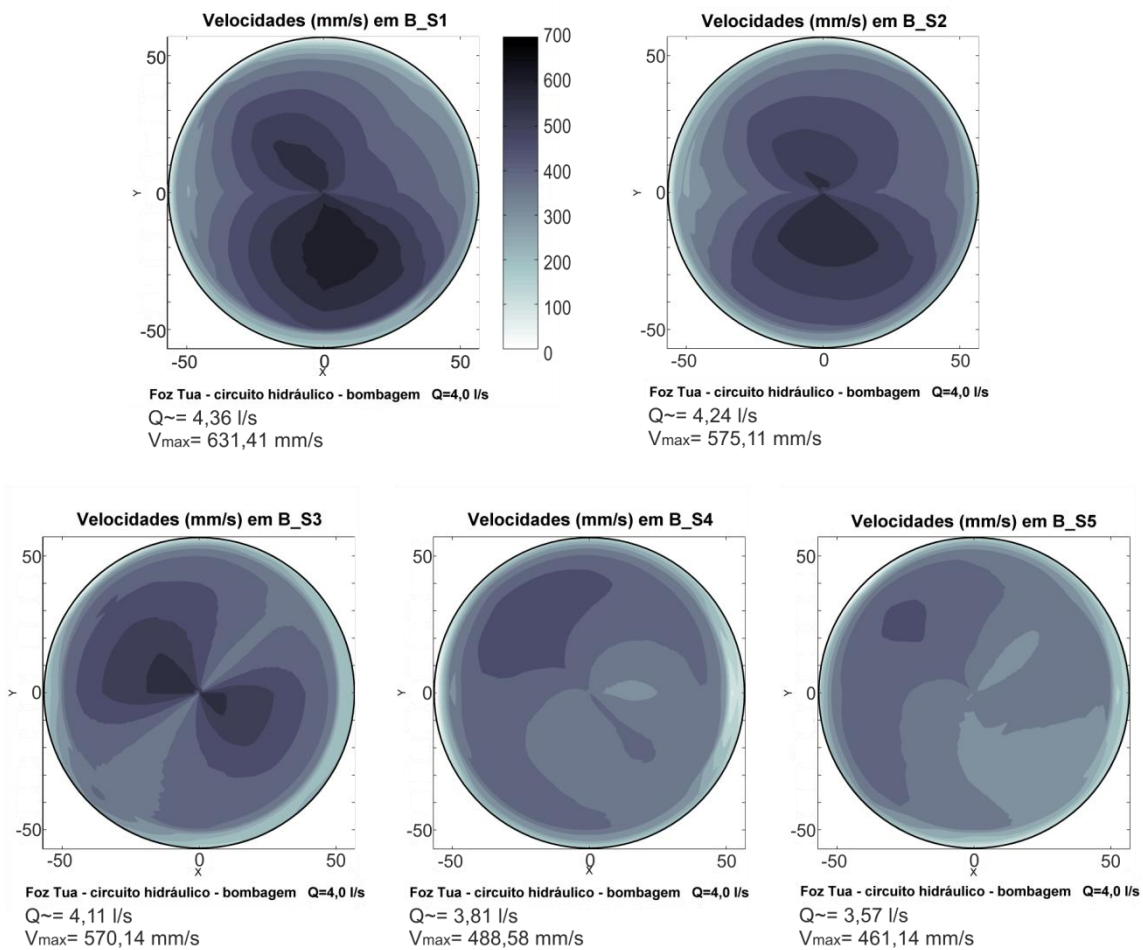
Para esse efeito, foram substituídos os valores das 4 últimas “gates” de medição dos perfis de velocidades P1, P2, P3 e P4 pelos valores das 4 primeiras “gates” dos perfis opostos (P5, P6, P7 e P8) reproduzindo-se através dessa metodologia a camada limite na vizinhança oposta à posição do transdutor no modo de bombagem, apresentada na Figura 4.9. A reprodução da camada limite traduz alterações nos valores dos caudais numéricos, verificando-se, no Quadro 4.3, a diminuição do erro relativo ao caudal de ensaio, nas 3 primeiras secções (S1, S2 e S3) e um aumento nas secções S4 e S5. Registaram-se erros máximos nas secções S1 e S5 de 9,00% e 10,75% respetivamente.



**Figura 4.7: Caracterização 2D do campo de velocidades (mm/s) nas diferentes secções de medição para o funcionamento do circuito hidráulico em bombagem.**



**Figura 4.8: Caracterização 2D do campo de velocidades (mm/s) nas diferentes secções de medição para o funcionamento do circuito hidráulico em turbinagem.**



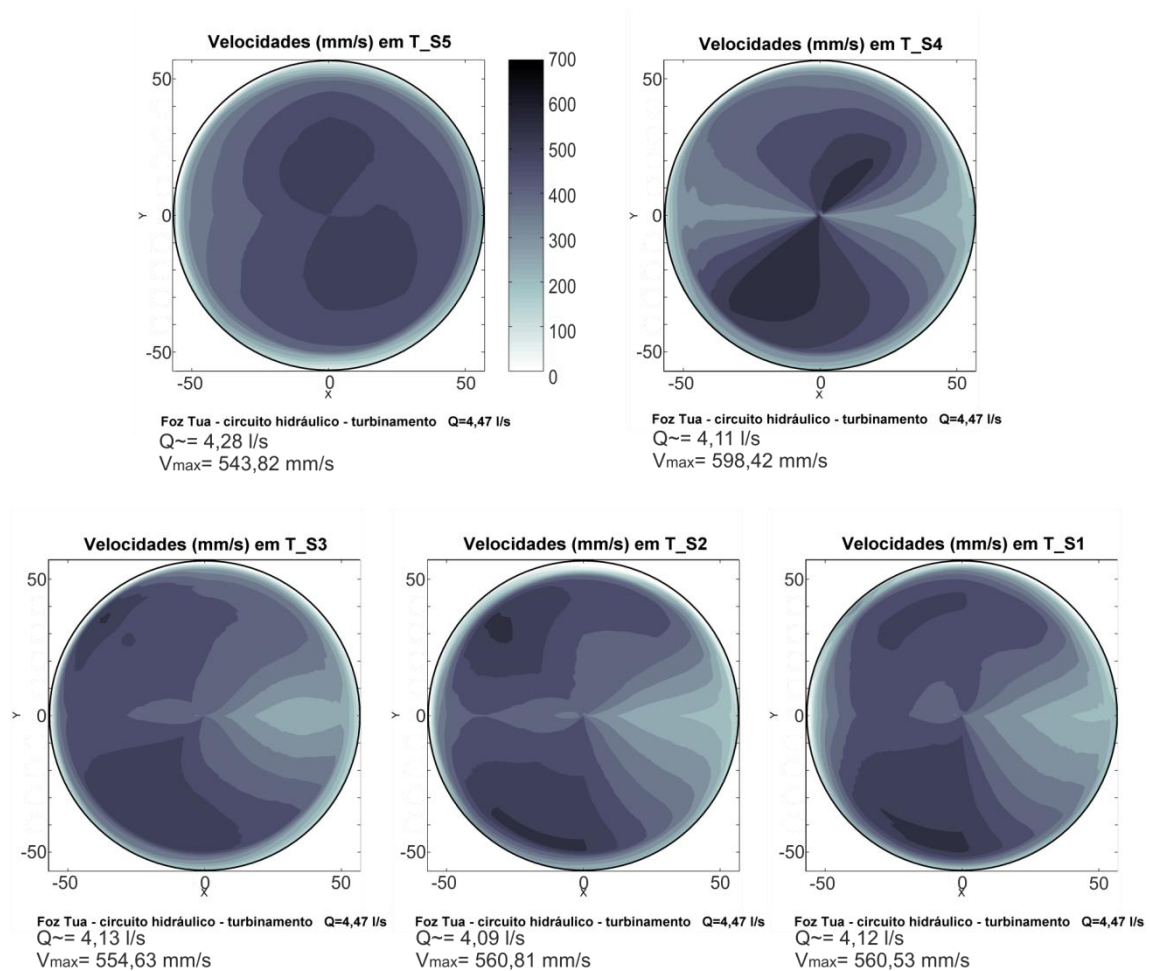
**Figura 4.9: Reprodução da camada limite na caracterização 2D do campo de velocidades (mm/s) no funcionamento em bombagem.**

**Quadro 4.3: Erros relativos dos caudais numéricos, calculados com base nas velocidades medidas com o sistema Doppler, no funcionamento em bombagem**

Bombagem					
Secção de medição	Qensaio (l/s)	Sem reprodução da camada limite		Com reprodução da camada limite na vizinhança oposta	
		Qnumérico (l/s)	Erro relativo (%)	Qnumérico (l/s)	Erro relativo (%)
S1	4,00	4,53	13,25	4,36	9,00
S2		4,38	9,50	4,24	6,00
S3		4,23	5,75	4,11	2,75
S4		3,93	1,75	3,81	-4,75
S5		3,71	7,25	3,57	-10,75
S6		3,82	4,50	-	-
S7		4,17	4,25	-	-

A Figura 4.10 fornece a caracterização 2D do campo de velocidades nas diferentes secções para o modo de funcionamento hidráulico em turbinagem, com reprodução da camada limite de acordo com

o procedimento indicado. Observa-se, no Quadro 4.4, que o erro do caudal numérico obtido quando é efetuada a reprodução da camada limite aumentou em todas as secções, registando-se o máximo de 8,50% na secção S2, uma vez que a caudal numérico da medição em turbinagem apresentava já de origem um erro por diferença.



**Figura 4.10: Reprodução da camada limite na caracterização 2D do campo de velocidades (mm/s) no funcionamento em turbinagem.**

**Quadro 4.4: Erros relativos dos caudais numéricos, calculados com base nas velocidades medidas com o sistema Doppler, no funcionamento em turbinagem.**

<b>Turbinagem</b>					
<b>Secção de medição</b>	Qensaio (l/s)	Sem reprodução da camada limite		Com reprodução da camada limite na vizinhança oposta	
		Qnumérico (l/s)	Erro relativo (%)	Qnumérico (l/s)	Erro relativo (%)
<b>S1</b>	4,47	4,25	4,92	4,12	-7,83
<b>S2</b>		4,21	5,82	4,09	-8,50
<b>S3</b>		4,31	3,58	4,13	-7,61
<b>S4</b>		4,26	4,70	4,11	-8,05
<b>S5</b>		4,45	0,45	4,28	-4,25
<b>S6</b>		4,24	5,15	-	-
<b>S7</b>		4,32	3,36	-	-



## 5 Síntese e conclusões do estudo e propostas para desenvolvimentos complementares

### 5.1 Síntese do estudo e principais conclusões

O objetivo específico do presente trabalho consistiu na avaliação das condições do escoamento nos troços de carácter curvilíneo das tubagens que modelam o circuito hidráulico dos grupos geradores reversíveis do aproveitamento de Foz Tua. Pretendeu-se interpretar as razões de uma constatada distribuição não uniforme do escoamento na restituição dos caudais à albufeira, processada preferencialmente pelos vãos centrais e direitos do plano de grades da tomada de água. Esta condição reflete-se no rendimento das turbomáquinas associadas, comprometendo, por isso a eficiência energética do aproveitamento.

Para a persecução deste objetivo realizou-se:

- uma análise bibliográfica sobre tomadas de água e sobre o impacto das singularidades dos circuitos hidráulicos no campo de velocidades do escoamento;
- o estudo da técnica de velocimetria Doppler ultrassónica;
- a definição do programa de medições experimentais para uma caracterização 2D do campo de velocidades e a definição do dispositivo para posicionamento do sensor Doppler;
- ensaios experimentais, em bombagem e em turbinagem, com aquisição dos registos da medição Doppler;
- o tratamento e a análise dos registos obtidos.

O trabalho desenvolvido permitiu retirar as seguintes conclusões:

1. A técnica de velocimetria Doppler ultrassónica apresenta uma elevada sensibilidade aos desvios de orientação do respetivo transdutor. Por esse facto, a aplicação desta tecnologia para caracterização 2D do campo de velocidades - com um desejado nível de rigor - requer um equipamento/dispositivo de posicionamento do sensor de elevada precisão, por forma a garantir, para os seus diferentes posicionamentos, a convergência dos feixes ultrassónicos no centro do tubo;
2. A técnica de medição Doppler encerra uma limitação na medição de velocidades na vizinhança da parede oposta à de posicionamento do transdutor, em resultado do ruído causado pelas reflexões acústicas das partículas atingidas pelo feixe ultrassónico que inicialmente é emitido pelo transdutor e posteriormente refletido pela parede oposta;

3. Relativamente às condições do escoamento nos troços de carácter curvilíneo das tubagens que modelam o circuito hidráulico dos grupos geradores reversíveis do aproveitamento de Foz Tua, concluiu-se que, a constatada distribuição não uniforme do escoamento na restituição à albufeira (processada preferencialmente pelos vãos centrais e direitos) se deve ao efeito da curva. Este efeito, traduzido por uma concentração do escoamento com velocidades superiores na zona exterior da curva, atinge a estrutura de entrada da tomada de água, razão pela qual a restituição dos caudais através da tomada de água não é uniforme.

## 5.2 Proposta para desenvolvimentos complementares

No domínio do modelo físico do aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua, propõem-se os seguintes desenvolvimentos complementares:

- Estudo experimental no modelo físico, da aplicação de um dispositivo com pás encurvadas para estabilização do escoamento a jusante e avaliação do impacto desta solução na dissipação da energia e na eficiência energética do aproveitamento (em bombagem e turbinagem);
- Estudo experimental de configurações geométricas alternativas da estrutura da tomada de água dos circuitos dos grupos reversíveis, no sentido de uma possível correção/uniformização da distribuição de caudal pelos seus diversos vãos. Refere-se, nomeadamente, soluções com divisórias interiores devidamente orientadas, capazes de corrigir a tendência do escoamento se processar preferencialmente pelos vãos da direita.

## Referências bibliográficas

**Barbosa, José Novais. 1968.** A camada limite: distribuição de velocidades em escoamentos interiores. Porto : FEUP, 1968.

**BUREAU OF RECLAMATION. 1973.** *Design of small dams.* Washington : U.S. Department of the interior.

**Carriveau, E. C., Baddour, R. E. e Kopp, G. A. 2002.** Properties of swirling and non-swirling flows at submerged water intakes. *Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering.* 5-8 de June de 2002.

**Cimbala, John M. e Çengel, Yunus A. 2006.** *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications.* 1. New York : McGraw-Hill, 2006.

**Clauss, Jim. 2009.** Taming Turbulent Piping-System Flow - Utilizing vane technologies to condition flow, protect piping systems. *HPAC Engineering.* December de 2009, pp. 36-43.

**Criteria, Hydraulic Design. 1988.** Vicksburg, Mississippi : Waterways Experiment Station - Corps of Engineers, 1988.

**EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A. 2008.** Estudo de Impacte Ambiental. [Online] Novembro de 2008. [http://www.edp.pt/pt/sustentabilidade/EDPDocuments/AHFT\\_EIA\\_RNT.pdf](http://www.edp.pt/pt/sustentabilidade/EDPDocuments/AHFT_EIA_RNT.pdf).

**Eletrobrás. 2003.** *Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas.* Brasil : Eletrobrás, 2003.

**ESHA. 2004.** Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant. s.l. : ESHA, 2004.

**ESHA. 2006.** Guía para el Desarrollo de Una Pequeña Central Hidroeléctrica. s.l. : ESHA, 2006.

**Hall, Kimbal. 2009.** *Computational flow model of westfall's leading tab flow conditioner.* s.l. : Westfall Manufacturing Company Report, 2009.

**Knauss, Jost. 1987.** *Swirling flow problems at intakes.* Rotterdam : A.A. Balkema, 1987.

**Kukhiandize, I. I. e Ezernitskaya, F. I. 1970.** Results od hydraulic investigation of structures of the Mil'sk-Mugan water intake complex on the Araks river. N.º 8. August de 1970, pp. 25-26.

**Lencastre, Armando. 1996.** *Hidráulica Geral.* Lisboa : Edição do Autor, 1996.

- Manzanares, Alberto A. 1980.** Hidráulica geral. Lisboa : Tecnica - AEIST, 1980.
- Massey, B. S. 2002.** *Mecânica dos fluidos*. 6. Lisboa : Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
- Mendes, L. 2012.** Código MatLab. *Superpolar*. Lisboa : s.n., 2012.
- Pereira, Ana. 2010.** *Eficiência hidrodinâmica e optimização no projecto de aproveitamentos hidroeléctricos*. Tese de mestrado. Lisboa : IST, 2010.
- Pinheiro, António N. 2006.** Folhas de apoio à disciplina de Estruturas e Aproveitamentos Hidráulicos. Tomadas de Água em Albufeiras. Lisboa : Instituto Superior Técnico, 2006.
- Pozos, O., et al. 2010 (Noviembre).** *Problemática del aire atrapado en la caja rompedora de pression valle de paz, macrocircuito: Caso de estudio*. In XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta Del Este, Uruguay : IARH, 2010 (Noviembre).
- Quintela, António C. 2007.** *Hidráulica*. 9. Lisboa : Fundação Calouste Gulbenkian, 2007.
- Quintela, António C., Cardoso, João L. e Mascarenhas, José M. 2009.** *Aproveitamentos Hidráulicos Romanos a sul do Tejo*. Lisboa : EPAL, 2009.
- Quintela, António C., et al. 2001.** *Curso de exploração e segurança de barragens* . Lisboa : Instituto da Água, 2001.
- Ramos, Helena e Almeida, António Betâmio. 2000.** Modelação computacional de tomadas de água do tipo Tirolês e estruturas de controlo de caudal. Vol. 21, n.º 2. *APRH*. Maio de 2000, pp. 53-62.
- Ramos, Helena, et al. 2000.** *Guidelines for Design of small hydropower plants*. Belfast, North Ireland : WREAN and DED, 2000.
- Roberson, John A., Cassidy, John J. e Chaudhry, M. Hanif. 1998.** *Hydraulic Engineering*. New York : John Wiley & Sons, 1998.
- Signal Processing S.A.** DOP3000 series - user's manual. Switzerland : s.n.
- Taghvaei, S. M., et al. 2012.** Anti-vortex structures at hydropower dams. *International Journal of the Physical Sciences* Vol. 7(28). 19 de July de 2012, pp. 5069-5077.
- Vischer, D.L e Hager, W.H. 1998.** *Dam hydraulics*. New York : John Wiley & Sons, 1998.

**Viseu, T., Amaral, S. e Magalhães, A.P. 2007.** *Barragem de Undúrraga. Estudo hidráulico em modelo reduzido dos descarregadores de cheias.* Lisboa : Relatório do LNEC, Dezembro, 2007.

**Sites consultados:**

<http://cnpgb.inag.pt/>

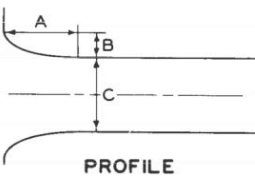
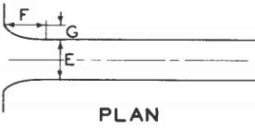
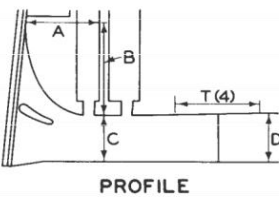
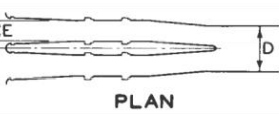

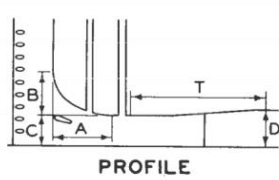
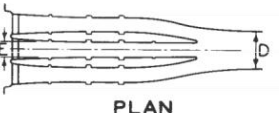
<http://www.a-nossa-energia.edp.pt>



# ANEXOS

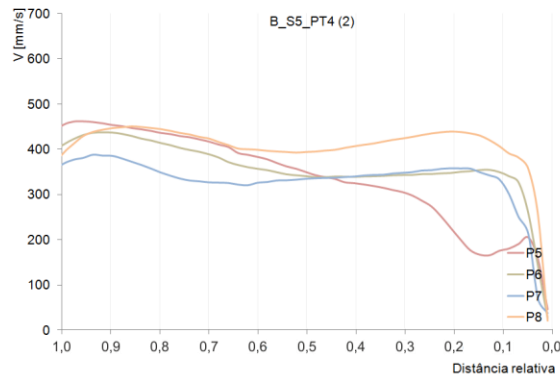
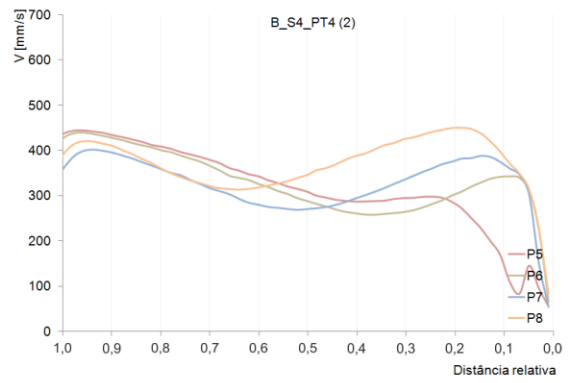
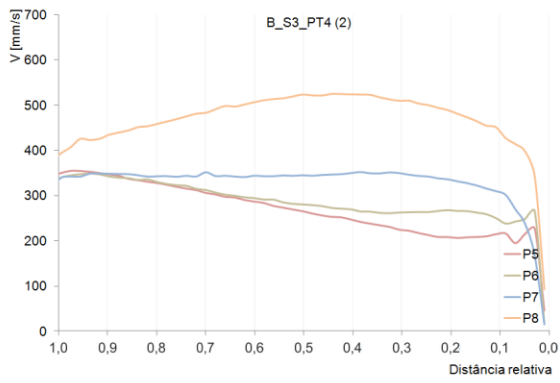
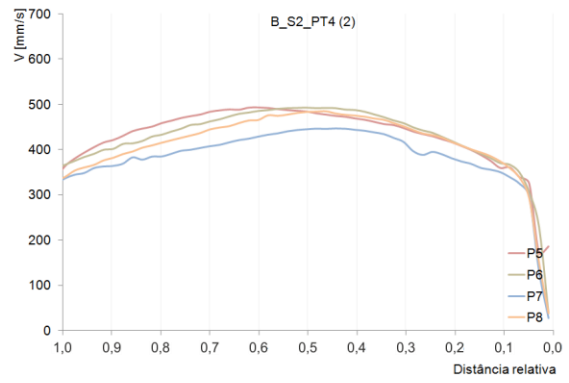
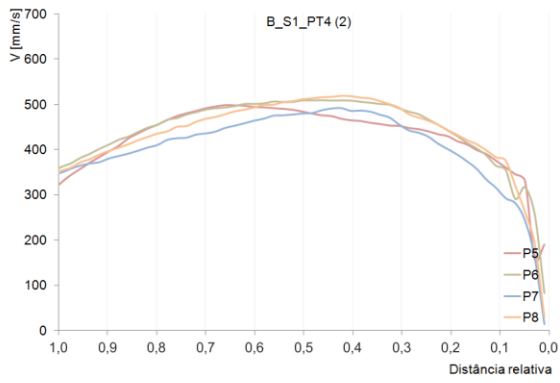


Anexo A – Coeficiente,  $K_e$ , de perda de carga na entrada da tomada de água (Hydraulic Design Criteria, 1988)

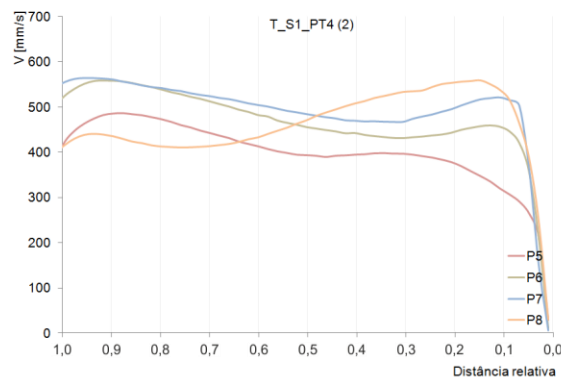
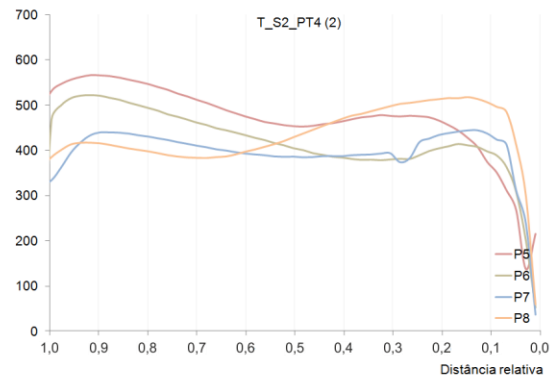
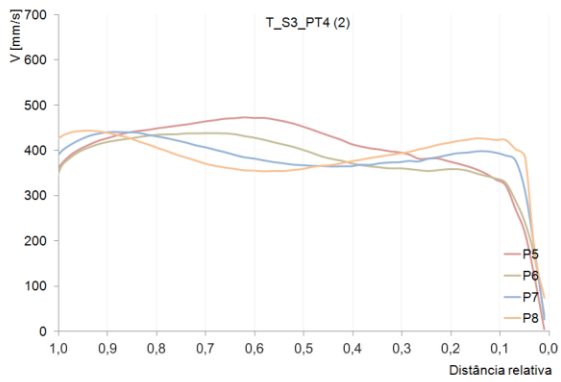
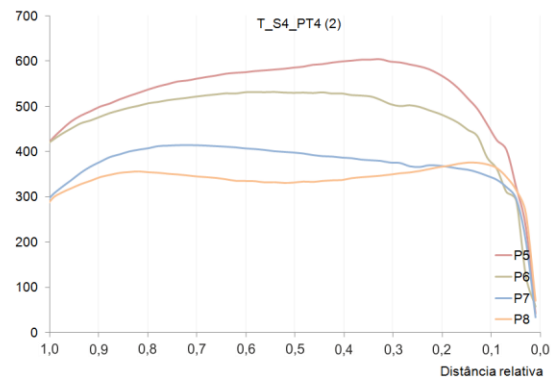
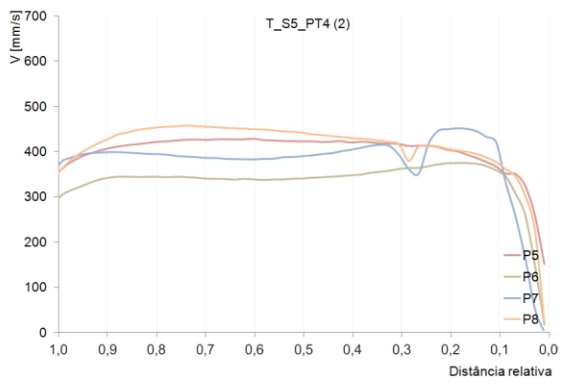
SHAPE	PROJECT (1)	CONDUIT PROPER			AVERAGE INTAKE COEFFICIENT $K_e$
		LENGTH DIAM (2)	REYNOLDS NUMBER (2)	VELOCITY HEAD (1)	
<b>SINGLE INTAKE (CONCRETE DAM CONDUITS)</b>					
 <p>PROFILE</p>	<p><b>PINE FLAT</b> (PROTOTYPE) A=9.0, B=3.0 C=9.0, E=5.0 F=5.0, G=1.7</p>	54	2.9-3.6 x 10 <sup>7</sup> (PROTOTYPE)	65-81	0.16
	 <p>PLAN</p>	<p><b>ES 802</b> (1:20 MODEL) A=7.5, B=2.5 C=10.0, E=5.7 F=4.3, G=1.4</p>	83	6.7 x 10 <sup>5</sup> (MODEL)	97
<b>DOUBLE INTAKE (EARTH DAM TUNNEL)</b>					
 <p>PROFILE</p>	<p><b>DENISON</b> (PROTOTYPE) A=25.0, B=39.0 C=19.0, D=20.0 E=9.0, T=53.0</p>	40	1.2 x 10 <sup>8</sup> (PROTOTYPE)	66	0.19
	 <p>PLAN</p>	<p><b>DENISON</b> (1:25 MODEL) (SEE ABOVE)</p>	47	8.2-9.6 x 10 <sup>5</sup> (MODEL)	61-82
 <p>PLAN</p>	<p><b>FT RANDALL (5)</b> (PROTOTYPE) A=24.0, B=16.0 C=23.0, D=22.0 E=11.0, T=49.0</p>	39	0.7-1.5 x 10 <sup>8</sup> (PROTOTYPE)	16-72	0.25
	<p><b>FT RANDALL</b> (1:25 MODEL) (SEE ABOVE)</p>	39	0.9-1.0 x 10 <sup>6</sup> (MODEL)	46-86	0.16
<b>TRIPLE INTAKE (EARTH DAM TUNNEL)</b>					
 <p>PROFILE</p>	<p><b>TIONESTA</b> (1:36 MODEL) A=30.0, B=22.0 C=16.0, D=19.0 E=7.5, T=66.0</p>	98	1.5-4.1 x 10 <sup>5</sup> (MODEL)	7-50	0.33
 <p>PLAN</p>					
<p><b>INTAKE HEAD LOSS</b>  <math display="block">h_e = K_e \frac{v^2}{2g}</math>                     V = VELOCITY IN CONDUIT PROPER</p>					
<p>(1) DIMENSIONS IN PROTOTYPE FEET.                      (2) EQUIVALENT DIAMETER FOR NONCIRCULAR SECTIONS BASED ON HYDRAULIC RADIUS.                      (3) DOES NOT INCLUDE GATE-SLOT LOSSES.                      (4) LENGTH OF TRANSITION                      (5) ROOF CURVE MAJOR AXIS HORIZONTAL</p>					
<p><b>CONCRETE CONDUITS</b>  <b>INTAKE LOSSES</b>                      HYDRAULIC DESIGN CHART 221-I</p>					
<p>PREPARED BY U. S. ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION, VICKSBURG, MISSISSIPPI                      REV 1-64                      WES 6-57</p>					



## Anexo B



**Registos dos perfis diametrais de velocidade (mm/s) com espaçamento angular de 45°: funcionamento do circuito hidráulico em bombagem**



**Registos dos perfis diametrais de velocidade (mm/s) com espaçamento angular de 45°: funcionamento do circuito hidráulico em turbinagem.**