



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

FEUP



Nuno Fernando Pereira da Costa

Fundamentos e Aplicações da Mecânica dos Fluídos



Universidade do Porto

FEUP Faculdade de
Engenharia

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**PERDAS DE CARGA EM TÊS DE DERIVAÇÃO DE SISTEMAS
DE TUBAGENS: O CASO DA BIFURCAÇÃO A 60°**

Nuno Fernando Pereira da Costa

Licenciado em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia da Universidade
do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre
em Fundamentos e Aplicações da Mecânica dos Fluidos

Orientação de **Rodrigo Jorge Fonseca de Oliveira Maia**
Professor Associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Janeiro de 2003

Universidade do Porto	
Faculdade de Engenharia	
Biblioteca	
Nº	939324
CDU	
Data	02/04/2008

à árvore genealógica e especialmente ao ramo que
passa por mim pela Ana Maria e pela Maria Eduarda

RESUMO

As perdas de carga locais que surgem nas derivações aparecem dependentes de uma série de parâmetros geométricos (razão de áreas, raio de curvatura na ligação das condutas,...) ou característicos do escoamento estabelecido (divisão de caudais , número de Reynolds, propriedades do fluido, ...).

A definição de um modelo global que permita prever os valores de perda de carga associadas a estes acessórios, largamente utilizados em sistemas de condutas, depende fundamentalmente do desenvolvimento de uma base de dados que considere todos os parâmetros envolvidos, possibilitando desta forma as comparações necessárias à validação de qualquer modelo estabelecido.

Neste sentido, o presente trabalho, pretende fornecer informação detalhada sobre o escoamento que percorre uma derivação a 60° e avaliar a influência da razão entre as áreas da secção das condutas nas características do escoamento.

Assim, considerando duas geometrias distintas com razões de área (ramal de derivação/ramal principal) $A_b/A_s=1$ e $A_b/A_s=0,7$ respectivamente para a primeira e segunda geometria estudadas, foram apurados os valores de perda de carga localizada através da medição do campo de pressões envolvidos para diferentes números de Reynolds e diferentes divisões de caudal (Q_1/Q_3). No entanto, para estas medições, foi apenas considerada uma configuração divergente do escoamento (ramal 3 → ramal 1 + ramal 2).

Apresenta-se, ainda, a caracterização do escoamento turbulento desenvolvido, através da medição dos campos de velocidade e das zonas de separação do escoamento, efectuada com recurso a uma técnica de anemometria Laser-Doppler (LDA) baseada em elementos semi-condutores (díodos-laser e fibras ópticas); para tal as derivações a 60° ensaiadas foram realizadas em material acrílico, transparente, opticamente acessível.

Com base nas medições efectuadas, são apresentadas:

- representações gráficas com a variação dos coeficientes de perda de carga localizada (K_{31} e K_{32}), obtidos, em função da divisão de caudal estabelecida,

bem como, em função do número de Reynolds característico do escoamento à entrada da bifurcação;

- as leis de variação dos coeficientes de perda de potência em função da divisão de caudal considerada;
- a análise do escoamento médio e das zonas de separação detectadas;
- a análise do campo de flutuações de velocidade turbulentas (rms).

Espera-se, desta forma, fornecer esclarecimentos importantes sobre os mecanismos do escoamento turbulento (complexo e fortemente tridimensional) que se desenvolve neste tipo de geometrias e sobre as perdas de carga correspondentes envolvidas.

ABSTRACT

The local energy losses established in pipe junctions, which are common features of the piping networks, are highly dependent of some geometrical features (area ratio, curvature of the junction,...) and of some flow characteristics (flow rate division, Reynolds number,...).

For the development of a generalized predictive model for those energy losses, it is essential to define a database covering wide ranges of the mentioned variables in a way that comparisons and validations can be made.

Working towards that, detailed information of the flow over a 60 degree junction and the influence of the area ratio is investigated in the present experimental study.

For this study two different geometries are considered – one with a branch-to-straight pipe area ratio (A_b/A_s) equal to 1 and the other with that ratio equal to 0,7 – and investigated for a diverging flow configuration.

In this way, considering two distinct geometries with different area ratio (derivation branch/ main branch) $A_b/A_s=1$ and $A_b/A_s=0,7$ respectively for the first and the second studied geometries, values for the energy losses were determined by the measurement of the involved pressure fields for different Reynolds numbers and different flow divisions (Q_1/Q_3). However, in these measurement, only one divergent configuration of the flow was considered (branch 3 $\rightarrow$ branch 1 + branch 2).

The characterisation of the turbulent developed flow is also presented through the measurement of the velocity fields and the separation zones of the flow, made with the application of the Laser-Doppler anemometry system (LDA) based on semi-conductor elements (laser diodes) and optical elements (lenses and optical fibres); for that purpose, the 60 degree junctions tested were made in acrylic material, transparent, and optically accessible.

Considering the effectuated measurement, the following features are presented:

- the graphical representations of the local energy losses variation (K_{31} e K_{32}), obtained as a function of the established flow rate division, as well as a function of the inlet flow characteristic Reynolds number.

- the variation laws for the power loss coefficients as a function of the flow rate partition considered;
- the mean flow and the separation zones analysis;
- the turbulent velocity field analysis (rms);

This way, it is expected to provide important elucidations on turbulent flow mechanisms (complex and highly tridimensional) developed in this type of geometries and on energy losses involved.

RESUME

Les pertes de charge locales qui apparaissent dans les dérivation sont dépendantes d'une série de paramètres géométriques (raison d'aires, rayon de courbure au niveau de la liaison des conduites...) ou caractéristiques de l'écoulement établi (division de débits, nombre de Reynolds, propriétés du fluide,...).

La définition d'un modèle global qui permette prévoir la valeur des pertes de charge associées à ces accessoires, largement utilisés dans les systèmes de conduites, dépend fondamentalement du développement d'une base de données qui prenne en compte tous les paramètres engagés, permettant ainsi les comparaisons nécessaires à la validation d'un quelconque modèle établi.

Dans ce sens, le travail ici présenté prétend fournir une information détaillée sur l'écoulement qui parcourt une dérivation à 60° et évaluer l'influence de la raison entre les aires de la section des conduites au niveau des caractéristiques de l'écoulement.

Ainsi, considérant deux géométries distinctes avec des raisons d'aire (rameau de dérivation/ rameau principal) $A_b/A_s=1$ et $A_b/A_s=0.7$ respectivement pour la première et la seconde géométrie étudiées, les valeurs des pertes de charge locales ont été déterminées à travers le mesurage du champ de pressions engagées pour différents nombres de Reynolds et différentes divisions de débit (Q_1/Q_3). Cependant, pour ces mesures, une seule configuration divergente de l'écoulement a été considérée (rameau 3 → rameau 1 + rameau 2).

Par ailleurs, la caractérisation de l'écoulement turbulent développé, à travers le mesurage des champs de vitesse et des zones de séparation de l'écoulement, est également présentée, effectuée grâce au recours à une technique dénommée anémométrie Laser-Doppler (LDA), basée sur des éléments semi-conducteurs (diodes-laser et fibres optiques); pour cela, les dérivation à 60° ont été réalisées dans un matériel acrylique, transparent et optiquement accessible.

Prenant comme base les mesures effectuées, sont présentées :

- Les représentations graphiques comprenant la variation des coefficients de perte de charge locale (K_{31} et K_{32}), obtenus en fonction de la division du débit établi, ainsi qu'en fonction du nombre de Reynolds caractéristique de l'écoulement à l'entrée de la bifurcation ;
- Les lois de variation des coefficients de perte de puissance en fonction de la division de débit considérée ;
- L'analyse de l'écoulement moyen et des zones de séparation détectées ;
- L'analyse du champ de fluctuations de vitesses turbulentes (rms).

On espère, de cette façon, fournir des éclaircissements importants sur les mécanismes de l'écoulement turbulent (complexe et fortement tridimensionnel) qui se développe dans ce type de géométries et sur les pertes de charges correspondantes engagées.

AGRADECIMENTO

Com a conclusão deste trabalho impõem-se algumas palavras de apreço (insuficientes certamente) para todos os que, de diferentes maneiras, contribuíram para a sua realização.

A toda a minha família por me ter ajudado da melhor forma.

Ao Professor Doutor Rodrigo Jorge Fonseca de Oliveira Maia pelo apoio, pela colaboração e pela confiança manifestada e especialmente por tudo.

À Professora Doutora Maria Fernanda Quintela da Silva Proença pelo apoio, pela colaboração e acima de tudo por ter facilitado em todos os aspectos este trabalho.

Ao Professor Doutor Fernando Manuel Coutinho Tavares de Pinho pelo apoio e disponibilidade revelada.

A todos os Professores que leccionaram a parte curricular do curso de Mestrado pelo profissionalismo e apoio demonstrados.

Aos Professores da Secção de Hidráulica especialmente ao Professor Doutor Ferreira Lemos, Professor Doutor Malafaya Baptista, Professor Doutor Taveira Pinto, Professor Doutor Francisco Piqueiro.

À Esmeralda Miguel pelo apoio, simpatia e disponibilidade revelada.

A todos os funcionários do laboratório de Hidráulica pela simpatia e apoio.

Ao Sr. Jerónimo de Sousa pelo apoio e amizade demonstrada.

Ao Octávio Cardoso pelo apoio e companheirismo.

Ao Alexandre Aibeo pelo apoio e companheirismo.

Ao Adélio Cavadas pelo companheirismo, ajuda e disponibilidade.

Ao João Pedro Pego pelo companheirismo e assessoria técnica de realização.

Ao Sebastian Liebs por ter sido orientador/desorientador nas alturas certas.

À Cristina Silva pela ajuda, simpatia e boa disposição contagiante.

Ao Rui Aleixo pelo companheirismo e apoio técnico com fundo sonoro adequado.

À Ana Lopes pelo apoio e simpatia.

Ao Pedro Costa pelo apoio técnico e disponibilidade.

Ao Paulo Cidade pelo companheirismo.

À Ana Pereira pelo companheirismo.

Ao José Cepeda pelo companheirismo.

Ao Alexandre Freitas pelo companheirismo.

Ao Pedro Sena pelo companheirismo.

Simbologia

Caracteres Latinos

A_b	área da secção da conduta lateral (branch pipe), m^2
A_s	área da secção da conduta principal (straight pipe), m^2
D	diâmetro da conduta, m
d_r	distância entre as franjas, m
d_{vc}	diâmetro do volume de controlo, m
dP/dx	gradiente de pressão, Pa/m
dU/dx	gradiente de velocidade média, s^{-1}
f_D	frequência do raio laser, Hz
f_D	factor de atrito de Darcy, Hz
f_{sh}	deslocamento de frequência, Hz
G	constante gravitacional, m/s^2
H	altura de líquido, m
J_i	perda de carga por unidade de comprimento
K_D	coeficiente de perda de potência
K_{ij}	coeficiente de perda de carga local entre o ramal i e o ramal j
L_s	comprimento de separação, m
L_{vc}	comprimento do volume de controlo, m
N_r	número de franjas
P	pressão
Q_i	caudal escoado na conduta i , m^3/s
R	raio da conduta, m
R	coordenada radial, m
r_c	raio de curvatura na aresta de ligação entre as condutas, m
Re	número de Reynolds do escoamento
U	velocidade média do escoamento na conduta de admissão, m/s
u_x	componente axial da velocidade, m/s
u_y	componente radial da velocidade, m/s
V	diferença de potencial, V

Caracteres Gregos

α	ângulo definido entre a conduta principal e a conduta lateral, °
ε	termo de dissipação de energia.
ϕ	diâmetro interno da conduta, m
ϕ_{furo}	diâmetro das tomadas de pressão, m
λ	comprimento de onda, m
μ	viscosidade dinâmica do fluido, Pa.s
ν	viscosidade cinemática do fluido, m ² /s
θ	ângulo entre os raios laser, °
ρ	massa volumica do fluido, kg/m ³

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Enquadramento e objectivo.....	1
1.2 - Revisão bibliográfica.....	3
2. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	7
2.1-Tomadas de pressão.....	9
2.2- Dimensões das condutas	11
2.3- Nivelamento da instalação.....	13
2.4 - Calibração do transdutor de pressões	13
2.4.1 - Procedimento para a calibração do transdutor de pressões.....	13
2.5 - Calibração dos caudalímetros	16
2.5.1 - Procedimento para a calibração dos caudalímetros.....	18
2.6 - Sistema de Anemometria Laser.....	20
3. MEDIÇÕES DE PERDAS DE CARGA.....	29
3.1 - Determinação dos coeficientes de perda de carga locais, K_{31} e K_{32}	29
3.2 - Configuração analisada	36
3.3 - Ensaios realizados	36
3.4 - Resultados obtidos	38
3.4.1 - Geometria 1 (derivação a 60° ; $A_b/A_s = 1,0$)	38
3.4.1.1 - Coeficientes de perda de potência	42
3.4.1.2 - Lei de variação proposta para o coeficiente de perda de potência.....	43
3.4.2 - Geometria 2 (Derivação a 60° ; $A_b/A_s = 0,7$).....	44
3.4.2.1 - Coeficientes de perda de potência	47
3.4.2.2 - Lei de variação proposta para o coeficiente de perda de potência.....	48

3.4.3 - Comparação de Resultados.....	49
3.4.3.1 - Comparação dos coeficientes de perda de carga local – K_{31}	49
3.4.3.2 - Comparação dos coeficientes de perda de carga local – K_{32}	50
3.4.3.3 - Comparação dos coeficientes de perda de potência - K_D	51
4. MEDIÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES.....	53
4.1 - Caracterização das medições.....	53
4.2 - Representação global da evolução do escoamento	55
4.3 - Campo de velocidades médias – Geometria 1	58
4.3.1 - Conduta principal – zona da bifurcação	58
4.3.2 - Conduta principal – jusante da bifurcação	62
4.3.3 - Conduta lateral	65
4.4 - Campo de velocidades médias – Geometria 2 (Análise comparativa)	72
4.4.1 - Conduta principal – montante da bifurcação	72
4.4.2 - Conduta principal – zona da bifurcação	74
4.4.3 - Conduta principal – jusante da bifurcação	76
4.4.4 - Conduta Lateral	78
5. CARACTERIZAÇÃO DAS ZONAS DE SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO.....	84
5.1- Caracterização das medições efectuadas	84
5.2 - Considerações teóricas	85
5.3- Determinação dos pontos de velocidade (média pontual) nula.....	86
5.4 - Separação do escoamento na conduta principal	87
5.4.1 - Geometria 1	89
5.4.2 - Geometria 2.....	90
5.5 - Separação do escoamento na conduta lateral.....	91
5.5.1 - Geometria 1	91
5.5.2 - Geometria 2.....	93
6. ESCOAMENTOS TURBULENTOS EM CONDUTA	96
6.1 - Considerações teóricas	96
6.2 - Relações de Energia em Escoamentos Turbulentos	101
6.3 - Balanço Produção/Dissipação.....	103

7. ANÁLISE DO CAMPO DE FLUTUAÇÕES DE VELOCIDADE TURBULENTO....	105
7.1-Nota introdutória.....	105
7.2-Campo de velocidades médias – Geometria $A_b/A_s=1,0$	106
7.2.1 - Representação global dos perfis medidos.....	106
7.2.2 - Conduta principal – zona da bifurcação	109
7.2.3 - Conduta principal – jusante da bifurcação.....	111
7.2.4 - Conduta lateral	114
8. ANÁLISE DA INCERTEZA	123
8.1 - Incertezas Associadas às Medições de Velocidade e de Posicionamento do Laser.....	123
8.2 - Incerteza Associada às Medições de Pressão.....	126
9. FECHO DA TESE	132
9.1 – Principais conclusões	132
9.2 - Sugestões para trabalhos futuros	136
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Enquadramento e objectivo

O transporte de fluidos ao longo de redes de distribuição tem sofrido um crescente alargamento das áreas de aplicação, ao longo dos tempos, em todos os ramos da engenharia.

A aplicação destas redes de distribuição remonta ao século XVII, sendo na altura usadas condutas fabricadas a partir de troncos de árvores para a distribuição de água nas grandes cidades. O desenvolvimento de condutas em ferro fundido veio colmatar as limitações de versatilidade na interligação de troços de conduta bem como elevar o nível de pressão admissível no interior destas, permitindo o alargamento das aplicações destas redes ao transporte de outros materiais (líquidos, gasosos ou bifásicos).

Actualmente, estas redes de distribuição comportam condutas fabricadas a partir de uma gama alargada de materiais e estendem-se por milhares de quilómetros, quer seja em intrincadas redes de distribuição nas cidades, nas indústrias ou em edifícios, quer seja no transporte de materiais através de diferentes países ou interligando continentes.

A larga gama de aplicação destes sistemas de tubagens torna necessário o estudo das diversas características dos escoamentos em conduta, de forma a permitir uma correcta definição das redes utilizadas nos diversos ramos da engenharia, onde se incluem a engenharia mecânica, química, aeronáutica e civil. Assim, e como consequência desta procura de informação, foram realizados diversos trabalhos de investigação sobre escoamentos interiores ao longo dos últimos cem anos. No entanto, pese embora o esforço aplicado na definição das perdas de carga ao longo das condutas bem como das perdas associadas aos diversos elementos que compõem estas redes, verifica-se que a informação disponível, continua a ser insuficiente pelo que este assunto continua aberto a reinvestigação. No que respeita às perdas de carga ao longo das condutas, será necessário estender a investigação ao escoamento de fluidos de características não-Newtonianas. Relativamente às perdas de carga em derivações ou outros elementos dos sistemas de tubagens, a informação disponível continua a revelar-se insuficiente, pelo facto da maior parte do trabalho experimental ter sido realizado durante a primeira metade do século passado, com recurso a equipamentos que não permitiam o rigor mais adequado. Para além disso, continua em

falta informação sobre as perdas de carga associadas a derivações de geometria menos comum ou sobre derivações aplicadas em configurações de escoamento específicas. A falta de uniformização de critérios na definição dos coeficientes de perda de carga locais também acarreta alguns entraves ao processo de dimensionamento de redes de escoamentos, pelo que urge ser colmatada.

O trabalho experimental realizado, cujos resultados serviram de base à elaboração desta tese, insere-se num projecto de investigação mais abrangente, denominado “Perdas de carga em sistemas de tubagens” e apoiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia.

Este projecto de investigação, a decorrer no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia (U.P.), tem como objectivo apurar o efeito das características geométricas das derivações, bem como das características do escoamento, no valor de perda de carga localizada que aparece associado a estas derivações.

As características geométricas da derivação a estudar são:

- razão entre as áreas da secção da conduta principal e da conduta lateral (A_b/A_s)
- raio de curvatura na aresta de ligação entre as condutas (r/D)
- ângulo definido entre a conduta lateral e a conduta principal (α)

Quanto às características do escoamento, pretende-se apurar a influência:

- do número de Reynolds do escoamento (Re)
- da divisão de caudal estabelecida (Q_i/Q_j)

Face ao exposto, e tendo-se verificado uma insuficiência de informação disponível na literatura sobre os escoamentos em derivações, foi planeado o presente trabalho experimental, que visa determinar as perdas de carga associadas a uma derivação a 60° , (o ramal principal e o ramal de derivação definem um ângulo de 60°), bem como definir o campo de velocidades e outras características do escoamento turbulento considerado. Procurou-se ainda apurar a influência da razão de áreas A_b/A_s no valor da perda de carga localizada presente neste tipo de geometria.

Assim, foram estudadas duas derivações com razões de áreas distintas. Na primeira, foi considerada uma geometria onde foi mantido o mesmo diâmetro interno ($\varnothing=30\text{mm}$) para a conduta principal e para a conduta de derivação ($A_b/A_s=1$). Na segunda geometria estudada, a conduta principal manteve o mesmo valor para o

diâmetro interno ($\Phi=30\text{mm}$) e a conduta lateral foi definida com um diâmetro interno de 25mm, o que indica uma razão de áreas (A_b/A_s) com um valor aproximado de 0,7.

Para as duas geometrias consideradas neste trabalho, foram realizadas medições de pressão diferencial que permitiram o apuramento da perda de carga localizada para diversos números de Reynolds do escoamento e para diferentes divisões de caudal estabelecidas.

De forma a permitir a caracterização do campo de velocidades e avaliar a dimensão das zonas de separação do escoamento formadas, foi empregue um sistema de anemometria laser-Doppler (LDA) que permitiu a definição dos valores de velocidade média pontual e respectivos desvios quadráticos médios (rms).

1.2– Revisão bibliográfica

Procurar-se-á fazer aqui uma breve revisão dos conhecimentos existentes, relativamente aos fenómenos associados às perdas de carga locais que surgem nas derivações, bem como referir estudos que abordam a caracterização do escoamento, nomeadamente no que respeita ao campo de velocidades e identificação das zonas de separação do escoamento provocadas por este tipo de ligações.

Não tendo sido encontrados trabalhos publicados no que respeita ao apuramento das perdas de carga ou à caracterização do campo de velocidades de escoamentos em derivações a 60° , a revisão bibliográfica apresentada refere quase exclusivamente trabalhos realizados sobre derivações a 90° , com aplicação prática mais corrente.

Sem a intenção de uma descrição pormenorizada dos estudos realizados sobre perdas de carga em derivações a 90° (tês de derivação), remete-se para Crow e Wharton [4] onde é apresentada uma descrição mais completa dos estudos realizados até finais da década de 60, ou para Maia [18] que apresenta uma revisão dos mesmos trabalhos até finais da década de 80.

No entanto, referem-se os trabalhos experimentais ou teóricos de maior vulto sobre perdas de carga em derivações realizados ao longo das últimas décadas. Assim, a partir dos anos 30 fundamentalmente, têm surgido variados trabalhos teóricos e experimentais sobre as perdas de carga em tês de derivação. Os estudos efectuados nessa época, e cujo interesse e importância merecem especial e crescente atenção nas duas últimas décadas, visavam particularmente os escoamentos numa fase, líquida ou

gasosa, que servia de suporte ao estudo da reunião e divisão de caudais de escoamentos em duas ou mais fases.

De referência obrigatória são as “Experiências de Munique” que consistem nos trabalhos de Vogel, Peterman e Kinne. Foram realizadas no Instituto de Hidráulica da Universidade Técnica de Munique entre 1928 e 1931 e são de particular importância, dado tratar-se do primeiro trabalho sistemático no estudo de perdas de carga em tês de derivação.

Entretanto, Peterman prosseguiu com a investigação de derivações nas quais foram considerados ângulos de desvio diferentes de 90° e que foram mais tarde (1931) repetidos e corrigidos por Kinne que utilizou Tês de latão com ligações entre ramais fabricadas com maior rigor geométrico.

Gardel, em 1957, elabora um estudo experimental para tês de derivação executados em fibrocimento e de condutas circulares, estabelece expressões gerais semiempíricas para as configurações de escoamento estudadas e confronta o seu ajuste aos valores obtidos pela “Escola de Munique”.

É ainda de particular importância o estudo de Iwanani, Suu e Kato, apresentado em 1969, e em continuidade a anteriores trabalhos realizados por investigadores Japoneses, que consistiu essencialmente na aplicação da teoria do escoamento potencial plano ao escoamento em tês a 90° (configuração divergente) em condutas circulares. Este estudo permitiu estabelecer, teoricamente, as linhas de corrente do escoamento e a distribuição de pressões ao longo das paredes das condutas na zona de derivação que comparam com resultados obtidos experimentalmente. Com este estudo, estes autores puseram em evidência os fenómenos de separação que ocorrem no escoamento ao longo da conduta de derivação e da conduta principal bem como os escoamentos secundários envolvidos, o que permitiu uma análise física dos mecanismos da perda de carga neste tipo de ligações.

Ainda no ano de 1969, Gardel e Rechsteiner elaboraram um trabalho sistemático, experimental, de todas as configurações de escoamento em derivações integradas em condutas circulares e cujo intento, por se tratar de um estudo mais abrangente, é completar ou corrigir os resultados por ele apresentados anos antes.

Em 1970, a BHRA (British Hydromechanics Research Association) publicou o relatório de Boldy onde são indicados valores aconselháveis para os coeficientes de perda de carga em tês de derivação em condutas circulares ou de secção rectangular.

Em 1973, Ito e Imai apresentaram um estudo experimental para todas as configurações de escoamento (simétricas e não simétricas). Com base neste estudo, indicaram formulas empíricas para os coeficientes de perda de carga em todas as configurações e compararam a sua adequação aos resultados experimentais obtidos por outros investigadores e com as equações propostas por Gardel.

Com as potencialidades de cálculo dos sistemas informáticos em forte crescimento, foram desenvolvidos programas ao longo das duas últimas décadas, que possibilitam a resolução numérica de escoamentos complexos. Assim, mais frequentemente a partir dos anos 90, têm surgido diversos trabalhos de simulação numérica, sobre escoamentos em tês de derivação, com recurso a diversos modelos de turbulência.

Chen et al. (1992) e Neary et al. (1996) desenvolveram trabalhos em simulação numérica, sobre tês de derivação a 90° com ramais de secção rectangular e compararam-nos com trabalhos experimentais equivalentes, verificando uma razoável concordância entre os resultados obtidos pelas diferentes vias.

Quanto a simulações numéricas realizadas com geometrias equivalentes mas de secção circular, não tem sido conseguido o mesmo grau de concordância entre os trabalhos experimentais e as resoluções numéricas do escoamento. Em 1997, Espinosa et al. apresentaram um estudo numérico sobre o tê de derivação a 90°, com um escoamento em regime turbulento, recorrendo a três modelos de turbulência. Da comparação dos resultados obtidos, com trabalhos experimentais, resultaram diferenças significativas no escoamento que percorre a conduta de derivação, na dimensão das zonas de separação do escoamento bem como nos valores das flutuações de velocidade (rms) na zona de bifurcação. Podem ainda ser referidos como trabalhos semelhantes sobre derivações, as resoluções numéricas obtidas por Fu et al. (1991) ; Hager (1984) ; Pop et al. (1983) e Collins (1990).

Em 2000, Ethier et al. publicaram um trabalho com base numa simulação numérica aplicada a uma derivação a 45°. Este estudo teve como objectivo caracterizar o campo de velocidades ao longo da bifurcação e definir as zonas de separação do escoamento para uma gama de números de Reynolds entre 250 e 1650.

Paralelamente a estes estudos, existem trabalhos sobre escoamentos bifásicos onde se pretende avaliar a capacidade das derivações em tê produzirem a separação das fases, bem como estabelecer modelos que permitam o apuramento das perdas de carga envolvidas. Como exemplo dos trabalhos mais significativos realizados dentro

desta área, referem-se os trabalhos apresentados por Reimann et al. (1986) ; Katsaounis et al. (1988) ; Hart et al. (1991); Buell et al. (1994) e Van Gorp et al. (2001).

Existem ainda outros trabalhos de investigação que envolvem este tipo de derivações aplicadas em escoamentos pulsatórios e que têm particular interesse na medicina. Estes estudos fornecem informação relevante sobre a origem de problemas vasculares (por exemplo) e que ocorrem, normalmente, em zonas de bifurcação do sistema circulatório. Como trabalhos de referência dentro desta área, indicam-se os realizados por Siouffi et al. (1984) ; Giddens et al. (1987) ; Pedersen et al. (1992) ; Naiki et al. (1995) ; Schinas et al. (2000) e Nikolaidis et al. (2002)

De referir ainda que a inúmera investigação realizada nos últimos anos sobre derivações nos diversos domínios de aplicação apresentados tem recorrido, de uma forma ou outra, às bases teóricas e aos valores experimentais obtidos para escoamentos a uma fase e de características Newtonianas apresentados.

2 – DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO

O circuito usado nos ensaios foi elaborado de forma a permitir diversas situações de caudal de entrada e diversas partições de caudal bem como de diferentes configurações de escoamento (divergente, convergente). Para este estudo foi apenas considerada a configuração divergente, (ramal 3 → ramal 1 + ramal 2). O propósito desta instalação foi a alimentação de um circuito constituído por uma bifurcação cuja conduta de derivação e a conduta principal definem um ângulo de 60° . O escoamento seria imposto por um sistema de bombagem que por sua vez era alimentado por um reservatório posicionado a uma cota mais elevada.

As divisões de caudal necessárias foram estabelecidas a partir da abertura/fecho de válvulas reguladoras, distribuídas ao longo do circuito.

A Figura 2.1 apresenta uma representação esquemática do circuito usado, que analisado desde a entrada, é constituído por:

- um reservatório de 500 litros de capacidade volumétrica, que foi mantido com um nível constante de água. O nível constante foi estabelecido com o posicionamento de uma tubagem vertical que permite a saída do fluido acima da cota pretendida (trop plein), garantindo-se desta forma um valor constante de pressão hidrostática à entrada do circuito. O caudal perdido no decorrer dos diversos ensaios seria repostado através de uma ligação à rede de distribuição.

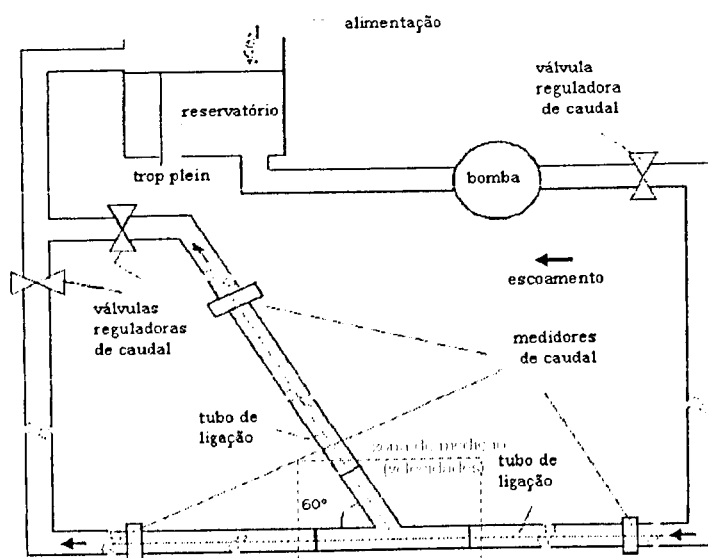


Figura 3.1: Representação esquemática da instalação experimental

- de forma a conseguir-se o calculo adequado da densidade do fluido bem como do valor da viscosidade (White, 1991), foi utilizado, permanentemente, um termómetro no interior do reservatório, permitindo monitorizar a temperatura.
- o escoamento de caudal é controlado por uma bomba volumétrica (Netzsch Mohnopump NM 018/02) com rotação ajustável. Após o sistema de bombagem, foi colocada uma válvula que permitiu regular o caudal para o valor necessário em cada situação de escoamento analisada.
- na entrada (ou a saída, conforme a tubagem analisada) de cada uma das condutas de apoio, foram adaptados medidores de caudal (Danfoss - MAG 1100 ou MAG 2500) que permitem a monitorização e aquisição de dados correspondentes aos caudais escoados em cada conduta da bifurcação.
- foram ainda utilizadas, válvulas nas condutas de saída, posicionadas entre a zona de medição das condutas e a ligação ao reservatório, de forma a permitir o ajuste da partição de caudal adequada a cada medição ou alterar a configuração do escoamento (convergente/divergente).
- as ligações em conduta entre o sistema de bombagem e o circuito que constitui a zona de medição é constituída por tubagem em PVC com duas polegadas de diâmetro, sendo por isso necessário introduzir reduções/alargamentos cónicos para fazer a transição de diâmetro. No interior destas ligações cónicas foram adaptadas estruturas tipo favo de abelha, promovendo assim a tranquilização do escoamento para que não se verifique um acresceto de características turbulentas ao escoamento que se pretendia analisar.
- de forma a permitir a medição do campo de pressões ao longo de cada ramal, foram utilizadas condutas de apoio, em acrílico com diâmetro interior (nominal) de 30 mm, (diâmetro interior de 25 mm na conduta de derivação usada no estudo da segunda geometria considerada : $A_b/A_s=0,7$) e 2000 mm de comprimento que seriam adaptadas com tomadas de pressão distribuídas ao longo da sua extensão (ver Figura 2. 2).

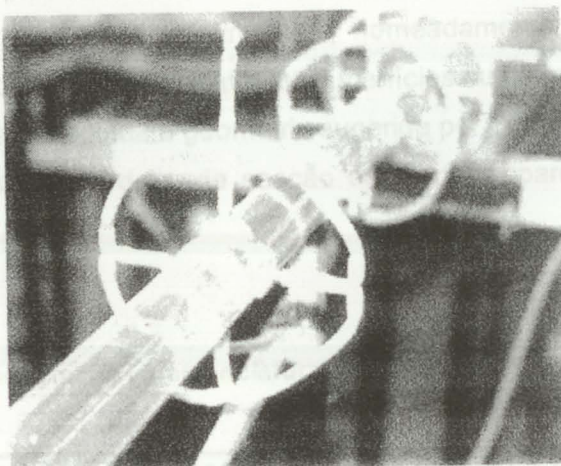


Figura 2.2: Detalhe de uma conduta de apoio com tomadas de pressão distribuídas

- a zona de medição do campo de velocidades turbulento é composta pela ligação aqui em estudo, (derivação a 60°), fabricada em acrílico transparente, (de forma a permitir o acesso dos raios laser), a partir de um bloco de material que seria maquinado internamente de forma a produzir a geometria pretendida, (diâmetros dos furos apropriados), bem como, maquinados externamente de forma a se obter uma secção quadrada de 50x50 mm em cada ramal desta ligação, para que seja facilitado o correcto posicionamento da sonda laser.
- acoplados à derivação foram introduzidos alongamentos constituídos por três blocos em cada ramal da geometria. Estes blocos fabricados em acrílico, de secção quadrada com 50x50 mm, foram interligados com estruturas de apoio, que permitem o correcto (inter)alinhamento ou o nivelamento necessário.

2.1 - Tomadas de pressão

Cada uma das três tubagens de apoio, onde foram realizadas as medições de pressão, foram adaptados 7 planos de medição, onde, em cada plano foram introduzidas 4 tomadas de pressão, em posições diametralmente opostas e ligadas entre si, (ver Figura 2.2) de forma a conseguir-se o valor médio da distribuição de

pressão nessa secção de medida. Para a execução das tomadas de pressão ($\varnothing_{\text{furo}} = 1\text{mm}$) foram seguidos procedimentos adequados (Maia) que aparecem sugeridos em diversa literatura sobre estudos experimentais, nomeadamente, no que respeita à orientação do eixo do orifício, acabamento das superfícies ou da relação de dimensões destes, sendo neste caso seguida a geometria sugerida por Tropea [31].

A localização específica de cada secção de medida aparece discriminada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Localização e nomenclatura das secções de medida (pressão)

Secção	l/mm	Secção	l/mm	Secção	l/mm
1R-2R	156	1L-2L	156	1F-2F	157
2R-3R	306	2L-3L	307	2F-3F	307
3R-4R	457	3L-4L	455	3F-4F	457
4R-5R	457	4L-5L	459	4F-5F	458
5R-6R	305	5L-6L	307	5F-6F	307
6R-7R	153	6L-7L	157	6F-7F	157

As tomadas de pressão de cada ramo, (plano de medição), seriam ligadas por tubos de silicone com 6 mm de diâmetro até um dispositivo que permitiu a ligação sequencial de todas as secções de medida ao transdutor de pressão de forma a apurar-se o valor da variação de pressão entre secções de medida. O dispositivo referido aparece representado na Figura 2.3.

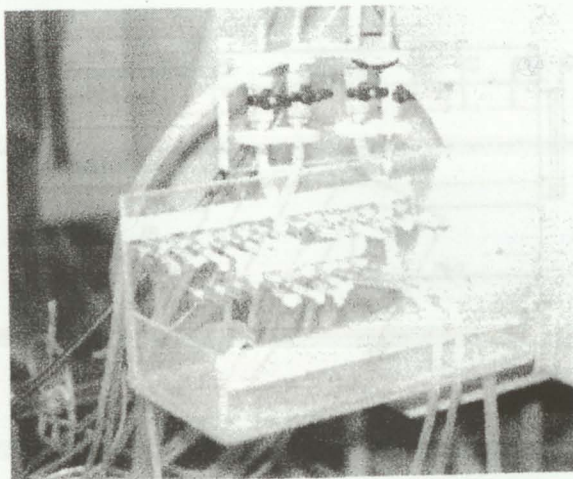


Figura 2.3: Dispositivo para ligação controlada das tomadas de pressão

O transdutor de pressão diferencial (Rosemount ref. 3051C) foi ligado com um computador através de uma placa de interface o que permitiu o tratamento estatístico dos valores de diferença de pressão medidos recorrendo a software adequado (Genie Runtime), nomeadamente o valor médio das diferenças de pressão lidas bem como o valor das flutuações (rms) correspondentes.

2.2 - Dimensões das condutas

O diâmetro das condutas é um dos parâmetros fundamentais tanto na avaliação das perdas de carga aqui em estudo, como no posicionamento do volume de controlo do laser para as medições de velocidade e no correcto alinhamento e nivelamento de todos os elementos que compõe o circuito. Assim, foi dedicado algum trabalho de apuramento das reais dimensões dos diversos componentes envolvidos no circuito, especialmente na zona de medição de pressões e na zona de medição do campo de velocidades. Na Tabela 2.2, apresentam-se, a título de exemplo, os valores do diâmetro medidos nos três ramos da primeira ligação aqui estudada ($A_b/A_s=1$).

As secções de verificação do diâmetro em cada ramo da ligação, designadas com índice "0" (E0 ; S0 e D0) correspondem aos extremos da ligação, a partir dos quais foram marcadas outras secções de verificação com intervalos de 20 mm.

O procedimento seguido na determinação do diâmetro médio em cada ramo da ligação, foi repetido no conjunto de blocos que constituem o prolongamento de cada ramo, assim como nos extremos das condutas de apoio.

2.3 - Nivelamento da instalação

O processo de nivelamento da instalação decorreu em duas fases distintas. Na primeira, foi efectuada uma leitura do nível em cada secção de pressão (tubos) e em todos os troços da ligação, de modo a caracterizar (e determinar) as zonas onde era necessário actuar bem como o valor a ajustar.

Dado que a ligação, (zona de medição de velocidade), apresentava um nivelamento muito homogéneo e preciso o processo de ajuste iniciou-se da ligação para os medidores de caudal em cada ramal.

Todos os valores lidos através do nível (depois de definido o seu plano de referência) foram obtidos de um único ponto, de forma a evitar a determinação de outros planos de referência o que introduziria outros erros ao processo.

Foram aceites diferenças máximas de 1.6 mm em várias secções de medição de pressão, mas inferiores a 0.5 mm na ligação à zona de medição de velocidades (de forma a garantimos a continuidade do escoamento). Não foram conseguidos melhores ajustes, nas condutas de apoio pelo facto de os suportes não estarem igualmente espaçados conforme as secções, serem em número e em forma insuficientes ou por existir algum grau de deformação das condutas.

2.4 - Calibração do transdutor de pressões

A calibração é efectuada através da medição da diferença de pressões entre duas colunas de água e do sinal eléctrico (em tensão) correspondente, indicado pelo aparelho.

A figura seguinte mostra uma representação do dispositivo de calibração, assim como uma breve descrição do mesmo:

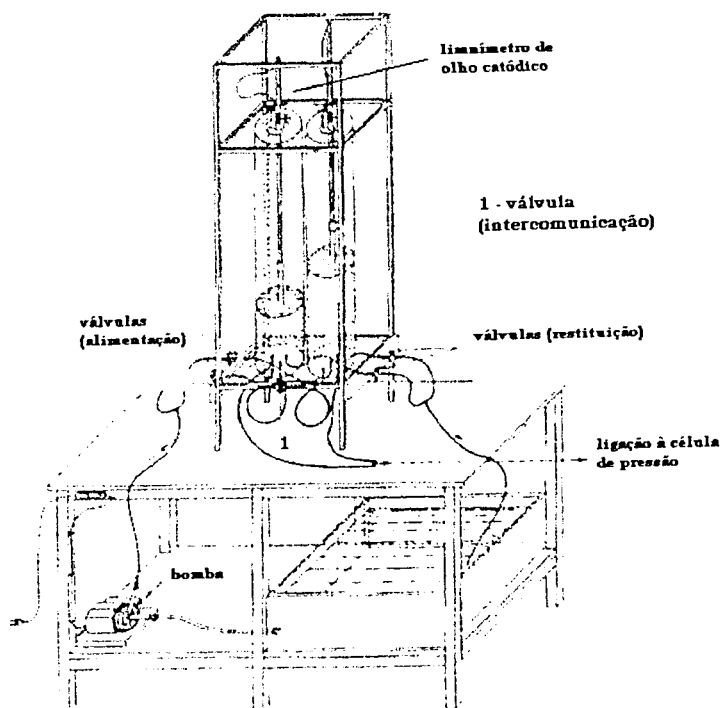


Figura 2.5: Dispositivo de calibração do transdutor de pressões

2.4.1 - Procedimento para a calibração do transdutor de pressões

A primeira operação consiste na ligação dos reservatórios do dispositivo de calibração ao transdutor. O depósito que será usado como referência (nível constante) é ligado a uma entrada de referência do transdutor marcada com a referência L, sendo o segundo depósito, é ligado à outra entrada do transdutor, (referência H). Após verificar o nivelamento dos reservatórios do dispositivo de calibração e a perpendicularidade entre os limnímetros e a água, registam-se os valores da temperatura ambiente e da densidade da água. Após o ajuste dos níveis dos depósitos no dispositivo de calibração perto de zero, abre-se a válvula que une os depósitos. Atingida a estabilização da água, fecha-se novamente a válvula (ver Figura 2.6).

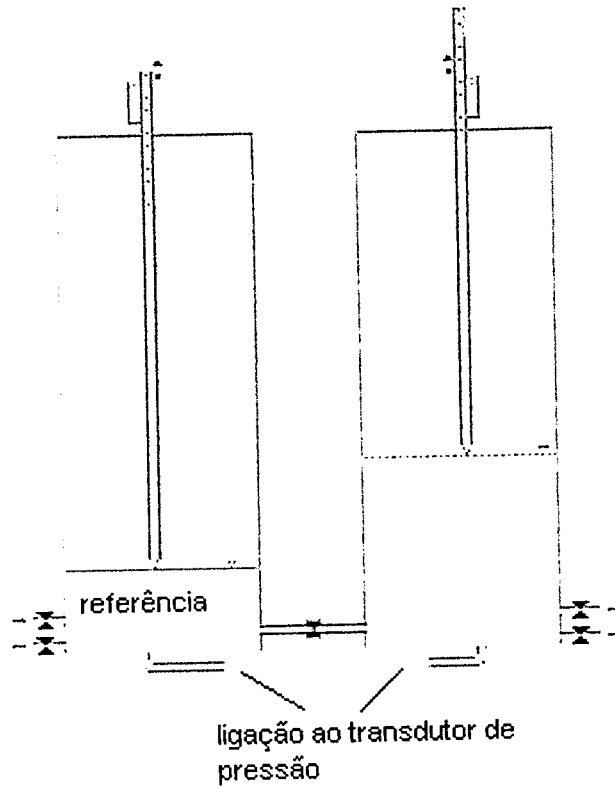


Figure 2.6: Esquema de funcionamento do dispositivo para calibração do medidor de pressão diferencial

Registam-se então os valores dos níveis de água nos depósitos assim obtidos. É necessário fazer variar o nível de água no reservatório ligado à entrada H do transdutor por intervalos previamente fixados.

- No sentido ascendente:

- até cerca de 200mm, intervalos de 0.5cm.
- Dos 200mm até aos 300mm, esses intervalos passarem a cerca de 1cm.
- Dos 300mm aos 400mm (amplitude máxima do dispositivo de calibração), os intervalos admitiu-se uma amplitude de cerca de 2,5cm.

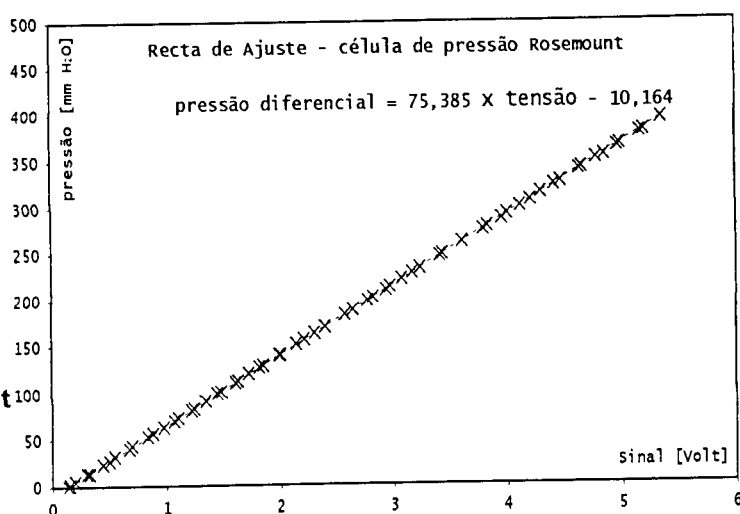
- No sentido descendente, usaram-se intervalos idênticos, considerando amplitudes semelhantes.

Para cada desnível da alínea anterior, é necessário deixar a água atingir o seu ponto quiescente antes de iniciar a aquisição do sinal correspondente à diferença de pressão. De seguida regista-se o valor do desnível e o valor lido pelo computador, o valor da temperatura ambiente e da densidade da água.

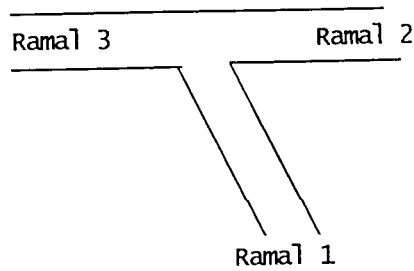
Usando o método dos mínimos quadrados para ajuste dos valores medidos, calculam-se os coeficientes da recta de ajuste que relaciona a diferença de potencial no transdutor com a diferença de pressão entre os depósitos.

A equação da recta é da forma $\Delta H = c1.V + c2$, onde ΔH é o desnível medido e V a diferença de potencial lida no computador. A Figura 2.7 apresenta uma representação gráfica dos valores de uma das calibrações efectuadas, sendo, no entanto, de referir que se procedeu à calibração deste aparelho com alguma regularidade (três calibrações efectuadas) ao longo do decorrer deste trabalho.

Figura 2.7: Recta de calibração obtida para o transdutor de pressão



A instalação em estudo é composta por três ramais, (onde circula o fluido). Dois desses ramais têm o eixo coincidente, enquanto o terceiro apresenta uma inclinação de 60° relativamente aos dois primeiros. A ligação assim formada é apresentada, de seguida, num esquema simplificado para uma melhor descrição da instalação:



No caso desta instalação, somente os ramais 2 e 3 permitem a entrada de escoamento, sendo que o ramal 1 está reservado à sua saída.

Feitas essas considerações, existem duas configurações do escoamento possíveis:

Ramal 2

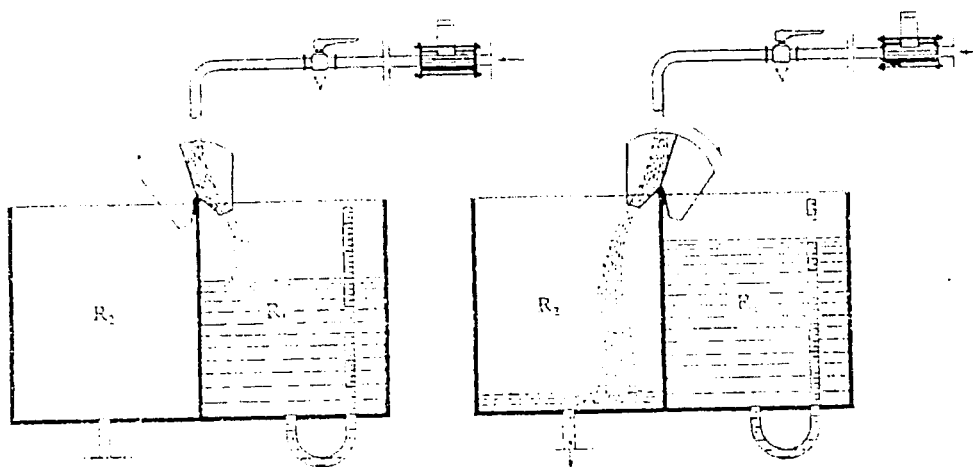
Ramal 1

Ramal 3

Ramal 1

No ramal 1, existe uma válvula permitindo que o escoamento se faça para o tanque de calibração. Neste procedimento, tal válvula designar-se-á por válvula de saída e fica localizada entre o caudalímetro 1 e o reservatório da instalação.

A figura 2.8, seguinte ilustra o funcionamento do reservatório de calibração:



(1) Posição de enchimento

(2) Posição de descarga

Figura 2.8: Esquema de funcionamento do reservatório de calibração para os medidores de caudal

2.5.1 - Procedimento para a calibração dos caudalímetros

Assegurando-se uma alimentação contínua da instalação numa das configurações acima apresentadas, procede-se ao arranque da bomba à velocidade máxima.

Abre-se então a válvula de saída e fecham-se as ligações do ramal 1 à bomba e ao reservatório da instalação. Deste modo, a água escoar para o reservatório de calibração (ver Figura 2.9).

Para velocidades da bomba próximas das usadas nas medições e considerando as duas configurações de calibração, determina-se o caudal escoado.

Foi garantido um nível de água constante no reservatório da instalação durante as medições do caudal correspondente a cada velocidade, para que as condições de calibração sejam o mais próximas possível das condições dos ensaios realizados. Após essa operação, procede-se ao enchimento de vários volumes no reservatório de calibração, registando-se o tempo de enchimento correspondente. Calcula-se a média dos caudais assim medidos e regista-se o valor lido pelo programa de aquisição de dados correspondente ao ramal onde se processa o escoamento.

Para cada caudalímetro, recorrendo ao Método dos Mínimos Quadrados, determina-se a recta de ajuste que relaciona o valor medido e o valor lido pelo programa de aquisição de dados. A equação dessa recta deve ser do tipo $Q = c_{1i} \cdot V + c_{2i}$, onde Q é o caudal medido, V a tensão lida no programa, c_{1i} e c_{2i} constantes relativas ao caudalímetro i .

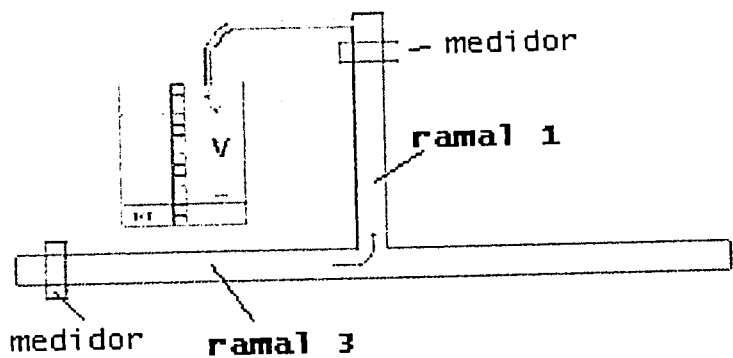
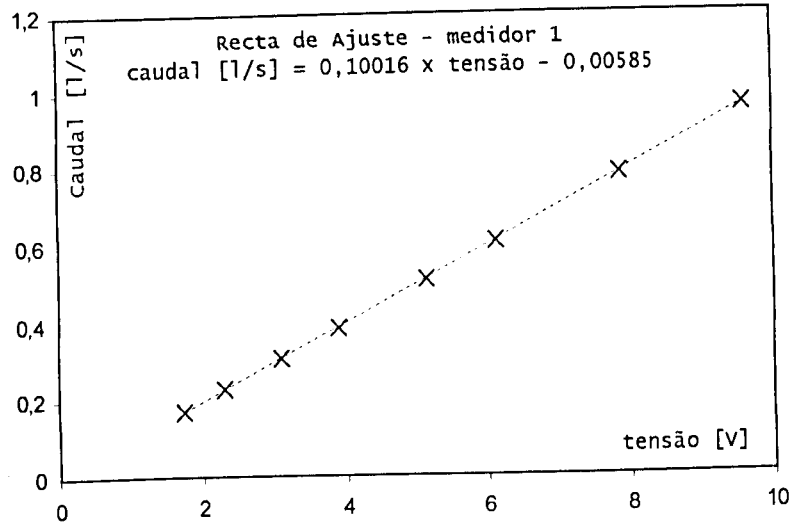


Figura 2.9: Esquema de funcionamento na calibração dos medidores de caudal no ramal de entrada (3) e de derivação (1)

A Figura 2.10 apresenta uma representação gráfica das rectas de ajuste, que serviram de base ao apuramento do valor de caudal que percorre cada um dos ramos do circuito. De referir ainda que a validade desta calibração seria alvo de diversas actualizações tendo sido efectuadas três calibrações distintas, do equipamento, no decorrer deste trabalho.

Figura 2.10a: Recta de calibração obtida para o medidor de caudal (1)



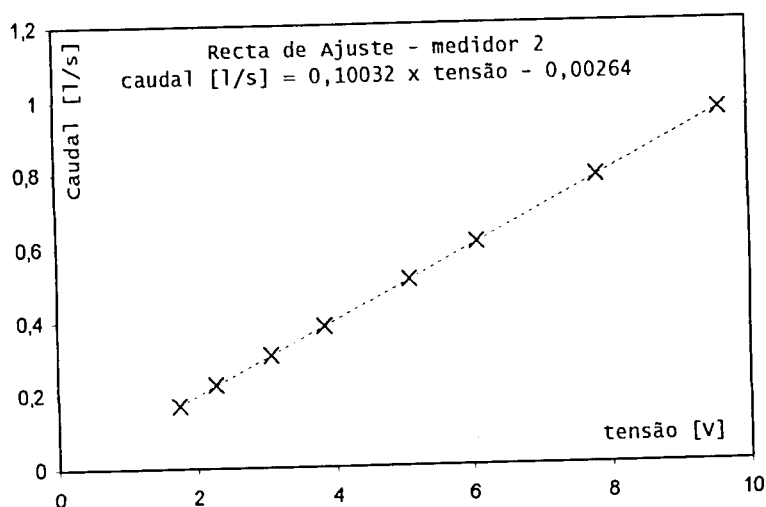
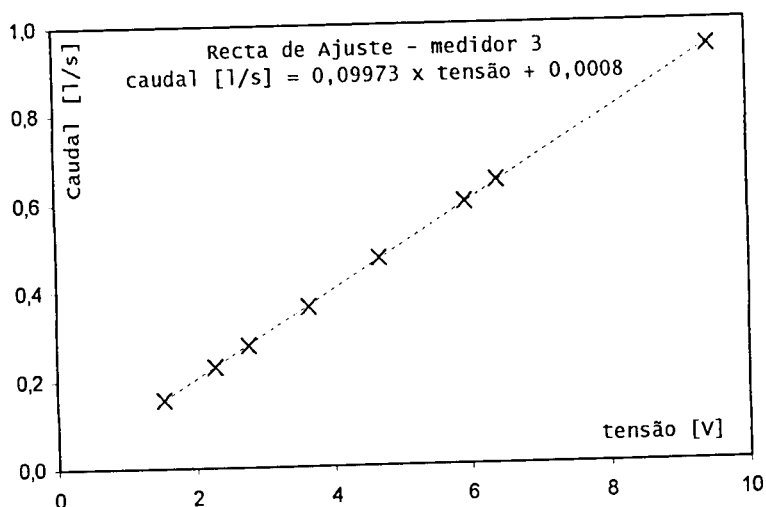


Figura 2.10b: Recta de calibração obtida para o medidor de caudal (2)

Figura 2.10c: Recta de calibração obtida para o medidor de caudal (3)



2.6 - Sistema de Anemometria Laser

Antes de descrever o equipamento de medição de velocidades, e para que este se possa compreender um pouco melhor, é conveniente apresentar primeiro os princípios básicos em que se fundamenta a anemometria laser.

Nas Figuras 2.11a e 2.11b, retiradas de documentação técnica (Dantec Invent), representa-se esquematicamente a região de intersecção de dois feixes de radiação coerente com a mesma intensidade e comprimento de onda. A zona de intersecção designar-se-á por volume de controlo e nela se efectuarão as medições de velocidade.

Segundo o modelo das franjas "fringe model" (Durst et al.) a intersecção de dois feixes coerentes origina franjas de interferência (ver Figura 2.11b). A difracção de luz

proveniente de uma partícula que atravessa o referido volume de controlo e que recebe a luz dos dois feixes luminosos nela incidentes pode ser captada por um detector e a frequência do sinal resultante ser relacionada com a velocidade das partículas do seguinte modo:

$$f = \frac{V_p}{d_f} \quad (2.1)$$

onde f , V_p e d_f são respectivamente a frequência com que a luz é difractada pela partícula, a velocidade da partícula e a distância entre franjas.

A distância entre franjas d_f está relacionada com o comprimento de onda do feixe de radiação, λ , e com o ângulo que os dois raios fazem entre si, φ , através da seguinte equação:

$$d_f = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (2.2)$$

Como se pode ver, só são necessários o comprimento de onda da radiação e o ângulo entre os raios para relacionar a frequência com a velocidade. Esta é uma das vantagens de um sistema de anemometria laser pois prescinde de qualquer calibração. De salientar ainda que a única componente da velocidade medida é a perpendicular à direcção das franjas.

Para permitir avaliar não só o valor como também o sentido da velocidade, usam-se raios laser com frequências diferentes. Com a diferença entre as frequências dos dois raios define-se um deslocamento de frequência, f_{sh} e segundo o modelo das franjas estas passam a ter um movimento de translação com uma velocidade igual a $f_{sh} \cdot d_f$. Assim, e tirando partido do efeito de Doppler, a frequência do sinal criada pelo movimento das partículas no volume de controlo será igual, maior ou menor que f_{sh} consoante a velocidade das partículas seja respectivamente, nula, de sentido oposto à velocidade das franjas ou de sentido idêntico.

A alteração da frequência dos raios pode atingir várias dezenas de MHz, mas quando comparada com a frequência do raio laser esta variação é insignificante, da ordem de 0.07 %, pelo que λ na Equação 2.2 permanece inalterado.

As dimensões do volume de controlo, cuja forma é um elipsoide, estão relacionadas com o valor do diâmetro dos raios, no ponto de intersecção destes, d_i , e com o ângulo entre ambos, θ (ver Figura 2.11a), através das seguintes expressões:

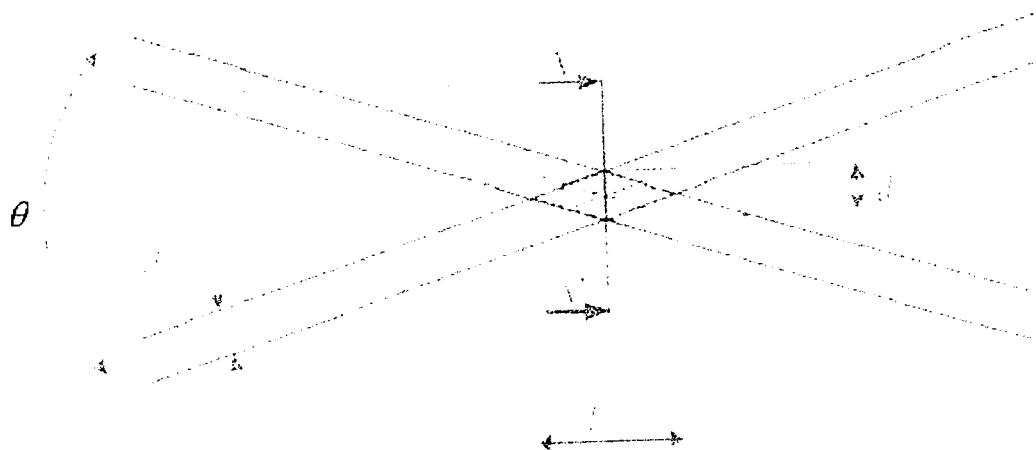


Figura 2.11a: Região onde se interceptam dois raios laser e respectivas grandezas características

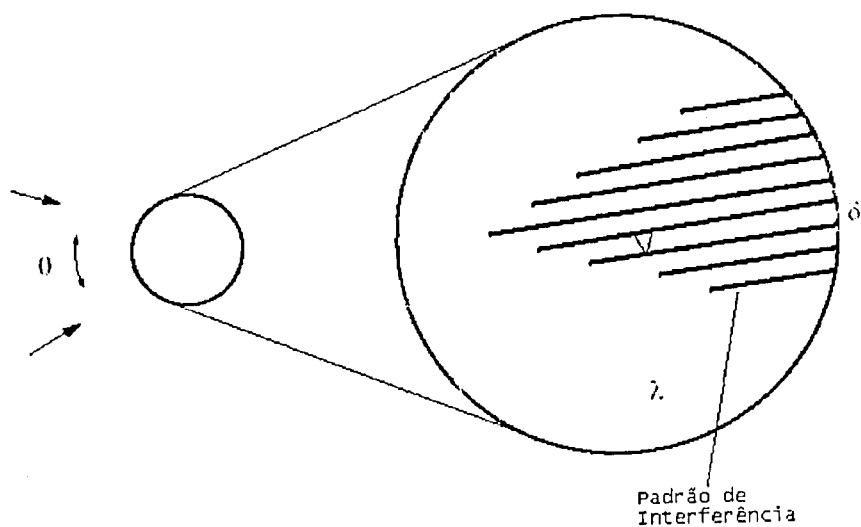


Figura 2.11b : Pormenor da zona de interferência de dois raios laser

$$l_{vc} = \frac{d_1}{\sin \left(\frac{\theta}{2} \right)} \quad (2.3)$$

$$d_{vc} = \frac{d_1}{\cos \left(\frac{\theta}{2} \right)} \quad (2.4)$$

onde l_{vc} e d_{vc} são respectivamente o comprimento e o diâmetro do volume de controlo.

O número de franjas no volume de controlo, N_f , relaciona-se com o diâmetro deste e com a distância entre franjas através da expressão $N_f = d_{vc} / d_f$. Contudo, de acordo com Tropea (1993), a utilização de um deslocamento de frequência produz um efeito equivalente ao aumento do número de franjas. Neste último caso N_f é dado pela seguinte equação:

$$N_f = \frac{f_{sh} \cdot d_{vc}}{V_p} + \frac{d_{vc}}{d_f} \quad (2.5)$$

onde o quociente d_{vc}/V_p representa o tempo de residência da partícula no volume de controlo onde se efectua a medição da velocidade.

Na Tabela 2.3 apresentam-se as principais características do anemómetro laser-Doppler utilizado.

O equipamento utilizado na medição de velocidade por anemometria laser-Doppler (LDA) foi um modelo DFLDA da INVENT. Encontrando-se os seus principais componentes esquematizados na Figura 2.12.

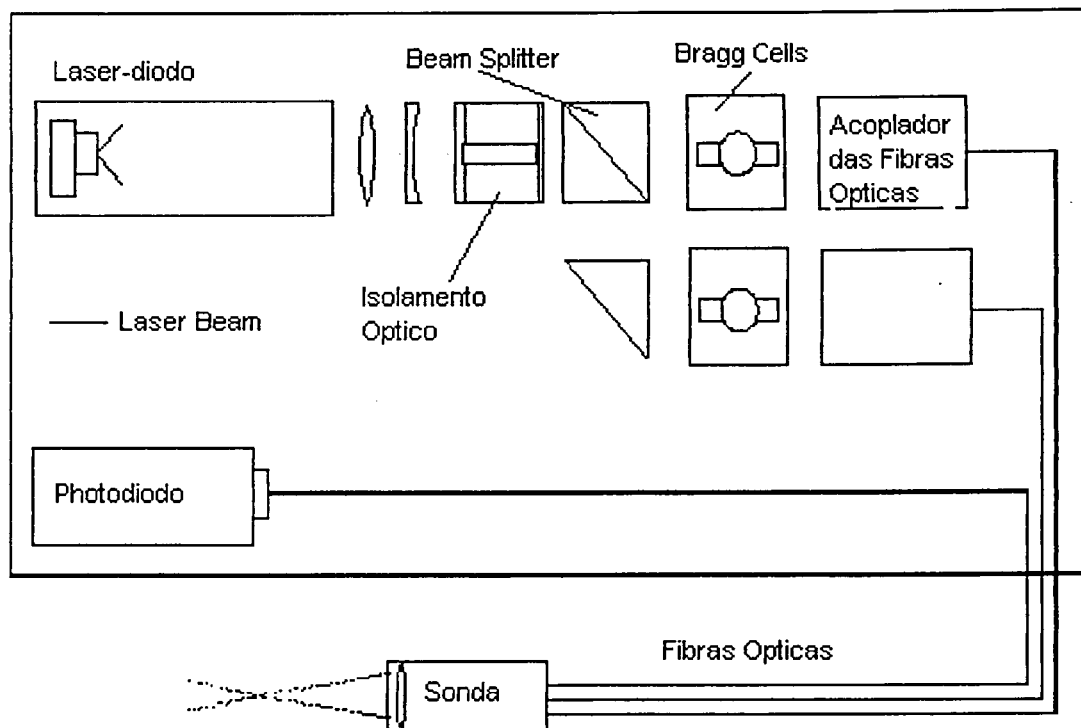


Figura 2.12 : Esquema representativo do equipamentos utilizado na medição de velocidades – sistema laser

O sistema óptico de emissão está inserido, de forma compacta, numa caixa. No seu interior, o laser de 100 mW de potência ($\lambda=827$ nm) emite um feixe de radiação que é posteriormente dividido em dois, por um sistema de prismas ópticos, e após a introdução do deslocamento de frequência em duas células de Bragg estes feixes, são encaminhados para as fibras ópticas por intermédio de acopladores.

As fibras ópticas, conduzem os raios até à sonda óptica que estava equipada com uma lente de 120 mm de distância focal. O fotodetector estava montado no componente e é do tipo fotodiodo de avalanche; a sua função é a de captar a luz difractada pelas partículas em suspensão quando estas atravessam as franjas do volume de controlo, converter este sinal em tensão e enviá-lo para o processador de sinal.

A unidade de potência alimenta o laser, o fotodetector e comanda as células de Bragg, que são os dispositivos responsáveis pela alteração das frequências dos raios. Ao captar a luz difundida pelas partículas no lado oposto à sonda, diz-se que o

fotodetector está montado na direcção directa. Numa montagem na direcção inversa, mais prática de realizar embora o sinal seja mais fraco devido à variação de intensidade dessa luz, em função da direcção relativamente ao raio incidente (ver Figura 2.13), a luz difractada pelas partículas é recolhida pela própria sonda e enviada por fibra óptica para o fotodetector que é, neste caso, colocado no interior da unidade óptica.

Uma descrição pormenorizada deste anemómetro encontra-se em Stieglmeier e Tropea (1992).

Tabela 2.3: Principais características do anemómetro laser-Doppler

Comprimento de onda do laser	827 nm
Potência do laser	100 mW
Meio ângulo entre raios no ar ($\theta/2$)	3.68°
Tamanho do volume de medição em água (intensidade e^{-2})	
Eixo menor (d_{vc})	37 μ m
Eixo maior (l_{vc})	550 μ m
Espaçamento entre franjas (d_f)	6.44 μ m
Deslocamento de frequência (f_{sh})	1.0 MHz

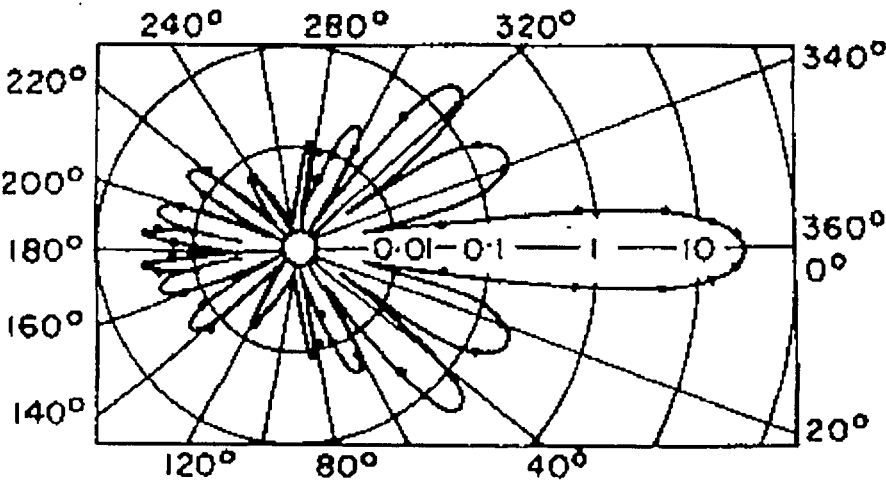


Figure 2.13: Variação da intensidade da luz difundida pelas partículas em função do ângulo relativo ao raio incidente. (Durst et al. (1976))

O processador de sinal utilizado foi um contador digital modelo 1990C da TSI. O contador está equipado com filtros passa baixo e passa alto para eliminar o ruído e o pedestal, este último é um sinal de baixa frequência portador do sinal que contém a informação sobre a velocidade e que surge, em virtude da intensidade de luz do raio laser ser maior no centro deste e diminuir em direcção à sua periferia.

O sinal remanescente, que é do tipo sinusoidal de amplitude modulada, também chamado de "burst", e que está esquematizado na Figura 2.14, irá ser sujeito ainda a uma validação de frequência por intermédio de uma comparação entre ciclos do "burst" por forma a eliminar sinais com origem em ruído ou múltiplas presenças de partículas no volume de controlo.

Esta validação processa-se através da verificação da reprodutibilidade do período de cada ciclo dentro do "burst". O critério de validação adoptado, 1 % de comparação, foi o mais restritivo possível. Antes desta validação em frequência o sinal é ainda submetido a uma validação em amplitude tendo como objectivo assegurar que apenas são admitidos sinais de grande amplitude, pois estes são possuidores de maiores razões sinal/ruído.

Finalmente é determinada a frequência do "burst", que está relacionada com a velocidade da partícula por intermédio da Equação (2.1), mediante a medição do tempo, T , que demora a ser gerado um dado número de ciclos no "burst", N , previamente escolhido.

Durante as medições realizou-se apenas uma medição de velocidade por "burst" e o número de ciclos analisados, N , seria igual a 2^4 . A escolha do número de ciclos a utilizar pelo processador de sinal foi realizada de maneira a que este fosse o máximo possível sem contudo nunca exceder metade do número de franjas no volume de medição, que é dado pela Equação (2.5). Este critério é apresentado como regra no manual do processador de sinal e visa obter medições de velocidade com o menor ruído e incerteza possível e optimizando o tempo de realização da experiência.



Figura 2.14: Representação esquemática de um sinal do foto detector após filtragem, "burst"

A expressão que relaciona a velocidade da partícula, V_p , com o número de ciclos analisados pelo processador de sinal, N , e com o deslocamento de frequência, f_{sh} , é a seguinte:

$$V_p = \frac{\lambda \cdot \left(\frac{N}{T} - f_{sh} \right)}{2 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (2.6)$$

onde T é o tempo correspondente ao somatório dos N períodos dos N ciclos.

Um osciloscópio, estava ligado ao processador de sinal e monitorizava permanentemente a forma dos "bursts" e o nível de ruído. A visualização dos "bursts" permitia também ajustar, não só o alinhamento do fotodíodo, como também o ganho a utilizar, uma vez que estas operações eram efectuadas procurando otimizar a forma e número de "bursts" mantendo um baixo nível de ruído.

As informações digitalizadas sobre as frequências contidas nos "bursts", compiladas pelo processador de sinal, eram permanentemente actualizadas na porta de comunicação deste, podendo ser lidas por intermédio do computador, através de uma placa de interface modelo 1400A da DOSTEK. Neste computador, equipado com um processador Intel 386, um conjunto mínimo de 5000 medições era sujeito a um tratamento estatístico de forma a se obter a velocidade média e o respectivo desvio padrão da amostra. Os dados sobre a frequência contida nos "bursts", e que eram sucessivamente disponibilizados na porta do processador de sinal, foram lidos com uma periodicidade fixa para tomar o valor médio da velocidade independente das

frequências próprias do escoamento, eliminando-se assim uma das fontes de erro sistemático em LDA.

Para se conseguir um bom sinal no osciloscópio, e consequentemente uma elevada frequência de aquisição de dados durante os ensaios, era necessário verificar regularmente o alinhamento do fotodíodo com os raios laser e também a potência destes de forma a mantê-la o mais elevada possível. A sensibilidade do anemómetro laser-Doppler às variações da temperatura ambiente é a principal responsável por estes acertos.

3 – PERDAS DE CARGA

3.1 - Determinação dos coeficientes de perda de carga locais, K_{31} e K_{32}

O apuramento das perdas de carga locais teve como base as medições de gradiente de pressão ao longo das três condutas, que compõem a geometria em estudo. Para a medição da diferença de carga nas diversas secções de medida, foi considerada como referência a tomada de pressão posicionada no início do ramal 3 (conduta de admissão). No entanto, foi necessário em alguns casos considerar como tomada de referência pontos mais a jusante, por se ter atingido o limite de carga da célula de pressão.

Seguidamente, apresenta-se o processo de tratamento dos dados que permitiu obter:

- i) a perda de carga por unidade de comprimento do tubo (J_l);
- ii) o factor de atrito de Darcy (f_D);
- iii) as linhas piezométricas;
- iv) as linhas de energia;
- v) as perdas de carga localizadas (ΔH_{3-i});
- vi) os coeficientes de perda de carga localizada

A partir da diferença dos valores medidos nas linhas de energia da conduta do ramal 3, do ramal 1 e do ramal 2 determinaram-se as perdas de carga localizadas correspondentes aos referidos troços de conduta. Com estes dados determinou-se ainda os coeficientes de perda de carga localizada e de potência.

i) Determinação da perda de carga por unidade de comprimento de tubo (J_l)

Consideremos a seguinte conduta, onde se encontram referenciadas as secções 1 e 2.

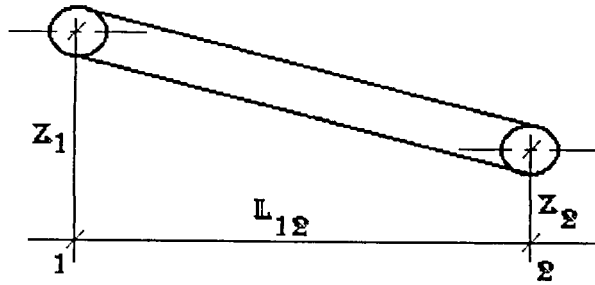


Figura 3.1: Representação esquemática de um trecho de conduta

A aplicação da equação de Bernoulli à conduta limitada pelas secções consideradas origina:

$$\left(\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \right) = J_{12} \cdot L_{12} \quad (3.1)$$

na qual o primeiro membro representa a diferença de energia entre as secções inicial (1) e final (2) e o segundo membro a perda de energia existente entre aquelas duas secções.

No caso aqui em estudo, todas as condutas se encontram no mesmo plano horizontal, o que permite afirmar:

$v_1 \cong v_2$: (velocidades em valores médios)

$z_1 \cong z_2$: (condutas sobre o mesmo plano horizontal)

assim a equação 1 pode tomar a forma:

$$J_{12} = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} \times \frac{1}{L_{12}} = \frac{\Delta p_{12}}{\rho g} \times \frac{1}{L_{12}} \quad (3.2)$$

Onde J_{ij} é determinado pelo quociente entre a diferença de pressões, entre as secções do mesmo ramal, e o comprimento da conduta para essas secções.

Assim, como os valores obtidos correspondem às diferenças de pressão a diferença entre dois desses valores representa o valor do gradiente de pressões entre as duas secções consideradas.

ii) Determinação do factor de atrito (de Darcy, f_D)

Da definição de perda de carga por unidade de comprimento de conduta, resulta que:

$$J = \frac{f}{d} \times \frac{v^2}{2g} \quad (3.3)$$

Como o escoamento é uniforme ($S_1=S_2$; $v_1=v_2$) vem que:

$$Q = v \times A = v \times \frac{\pi \times d^2}{4} \quad (3.4)$$

ou seja, resolvendo em ordem à velocidade e quadrando, resulta:

$$v^2 = \frac{16 \times Q^2}{\pi^2 \times d^4} \quad (3.5)$$

por substituição em (3.3) origina:

$$J = \frac{f}{d} \times \frac{16 \times Q^2}{\pi^2 \times d^4 \times 2g} = \frac{f \times 8 \times Q^2}{\pi^2 \times d^5 \times g} \quad (3.6)$$

ou, explicitando:

$$f_D = \frac{\pi^2 \times d^5 \times J \times g}{8 \times Q^2} \quad (3.7)$$

Tratando-se de um valor experimental podemos recorrer a diversas expressões apresentadas na literatura para verificar a sua validade. Utilizaram-se as expressões de:

Blasius :

$$f_{\text{Blasius}} = 0.3164 \text{Re}_d^{-0.25} \quad (3.8)$$

Filonenko-Al'tsul:

$$f_{\text{Filonenko}} = \frac{1}{(1.8 \log(\text{Re}) - 1.64)^2} \quad (3.9)$$

Colebrook-White:

$$f_{\text{Colebrook}} = \frac{1}{\left(-2 \log \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} + \frac{k/D}{3.7} \right)^2} \quad (3.10)$$

As Equações (3.7) e (3.8) aplicam-se ao caso de escoamentos em condutas hidráulicamente lisas, a expressão (3.9) também se aplica a esta situação se o factor k (rugosidade da conduta) for nulo.

A partir da equação de Colebrook-White determinaram-se valores experimentais para k .

Outra forma, esta mais imediata, de efectuar a verificação entre valores do factor de atrito é utilizando o diagrama de Moody, que indica directamente o coeficiente de resistência ou o valor da rugosidade equivalente consoante os parâmetros conhecidos.

iii) Linhas Piezométricas

A determinação da linha piezométrica foi obtida, somando ao plano de referência (considerado como a origem do referencial) a contribuição de pressão $\left(\frac{p}{\rho \times g} \right)$ em cada secção.

Todavia, como os dados obtidos traduziam um gradiente de pressão foi necessário recorrer a um artifício que traduz, na prática, a inclinação da linha piezométrica. Assim, considerando as diferenças de pressão entre a secção de referência (entrada da conduta de admissão) e as 20 tomadas de pressão restantes, distribuídas pelos três ramos da geometria, construiu-se a linha piezométrica com a subtracção destes valores ao valor obtido na tomada de pressão mais a jusante da conduta 2, (na determinação da perda de carga local entre a conduta de entrada 3 e a conduta de saída 2), ou ao valor obtido na tomada de pressão mais a jusante da conduta 1, (na determinação da perda de carga local entre a conduta de entrada 3 e a conduta de derivação 1).

Desta forma foi possível obter a recta que se aproxima destes pontos, através de regressão linear.

iv) Linhas de Energia

Esta linha é obtida através de união dos pontos determinados pela soma da altura piezométrica $\left(\frac{p}{\rho \times g} \right)$ com a contribuição da energia cinética $\left(\frac{v^2}{2g} \right)$, calculada com base na velocidade média do escoamento em cada ramal.

v) Determinação da perda de carga localizada (ΔH_{3-1})

O valor da perda de carga localizada foi obtido por diferença de cotas, entre as linhas de energia. Assim, subtraiu-se à cota energética do ponto P, que corresponde ao cruzamento dos eixos das duas condutas consideradas, dada pelo ramal 3, as cotas energéticas correspondentes ao ponto P, mas obtidas através das linhas dos ramais 1 e

2. Obtêm-se assim dois valores , para cada número de Reynolds e para cada divisão de caudal Q_1/Q_3 :

$$\Delta H_{3 \rightarrow 1} \; f(Re \; ; \; Q_1/Q_3)$$

$$\Delta H_{3 \rightarrow 2} \; f(Re \; ; \; Q_1/Q_3)$$

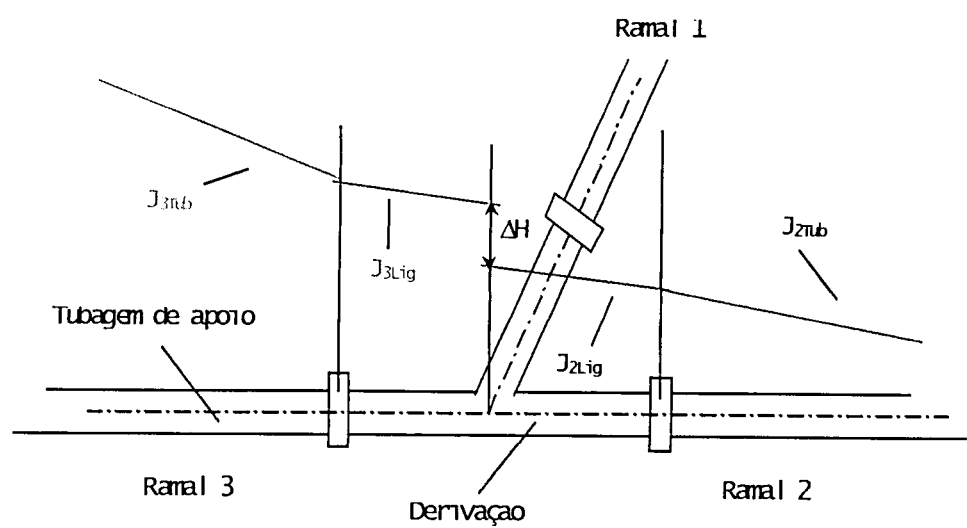


Figura 3.2: Esquema representativo do procedimento para a determinação da perda de carga local

Na Figura 3.2, apresenta-se um esquema mais pormenorizado do processo de determinação do valor da perda de carga local, entre o ramal 3 e o ramal 2, sendo seguido um processo idêntico na determinação de $\Delta H_{3 \rightarrow 1}$.

Tendo como base o processo atrás descrito, foi necessário ainda proceder a uma correcção da linha de energia de cada ramal, agora no interior da ligação. Assim, e tendo-se verificado a existência de diferenças entre os valores de diâmetro interior da ligação e das condutas de apoio, impôs-se a definição de uma equação de energia diferente, com aplicação mais ajustada às condições geométricas da zona de bifurcação.

Considerando que estas duas partes foram fabricadas no mesmo material (acrílico transparente), ou seja apresentam valores de rugosidade semelhantes bem como de coeficiente de resistência e com o valor de energia calculado no ponto de ligação, conduta de apoio/derivação, seria determinada uma nova equação para a linha de energia no interior da derivação, recorrendo à expressão (3.6), para a actualização do valor de perda de carga unitária (J).

vi) Cálculo dos coeficientes de perda de carga localizada

Cálculo destes coeficientes é usual quando se pretende exprimir a perda de carga localizada sob a forma adimensional, em função da velocidade média na conduta de admissão (ramal 3)

$$K_{31} = \frac{\Delta H_{31}}{\frac{8 \times Q_3^2}{\pi^2 \times d^4 \times g}} \quad (3.11)$$

$$K_{32} = \frac{\Delta H_{32}}{\frac{8 \times Q_3^2}{\pi^2 \times d^4 \times g}} \quad (3.12)$$

Também é normal definir, de modo único, a influência localizada do componente no escoamento pela determinação do coeficiente de perda de potência K_D :

$$K_D = \frac{\Delta Pot}{\gamma \times Q_r \times \frac{U_f^3}{2g}} = \frac{Q_1}{Q_3} K_{31} + \frac{Q_2}{Q_3} K_{32} \quad (3.13)$$

3.2 - Configuração analisada

Das diversas configurações de escoamento possíveis com este tipo de geometria, o estudo aqui apresentado baseia-se numa configuração divergente, com aplicação prática mais corrente, e que aparece representada na Figura 3.3.

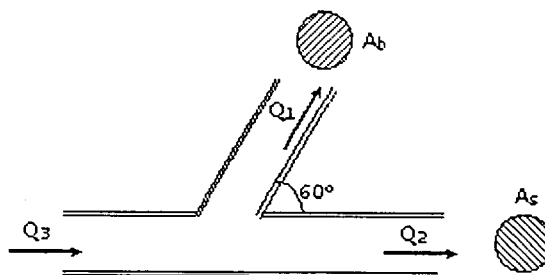


Figura 3.3: Configuração divergente considerada neste estudo

3.3 - Ensaios realizados

No estudo realizado procurou-se apurar a influência, do número de Reynolds do escoamento, calculado na conduta de admissão, bem como da divisão de caudal estabelecida, no valor dos coeficientes de perda de carga locais que ocorrem nestas ligações aqui em análise. Para tal foram realizadas séries de medições, onde para cada partição de caudal estudada se fez variar o valor do caudal de entrada no circuito de forma a investigar-mos uma gama de números de Reynolds. No Quadro 3.1 aparecem representados os pares de valores (Q_1/Q_3 ; Re) escolhidos para a caracterização, em termos de perdas de carga, das duas geometrias estudadas.

Na primeira ligação estudada, com relação de áreas $A_b/A_s=1$, e tendo como base estudos anteriores em que as linhas de energia, obtidas para condições de desvio completo do caudal de entrada para uma das condutas de saída, ($Q_1/Q_3=0$; $Q_1/Q_3=1$), não apareciam definidas com suficiente regularidade conduzindo a alguma indefinição no apuramento das perdas de carga respectivas. Foi assim considerado um valor residual de caudal escoado, (5% do caudal de entrada), na esperança de se

conseguirem linhas de energia construídas a partir de pontos de pressão mais colineares entre si.

Da análise dos resultados obtidos, tornou-se evidente que não se obtêm melhorias significativas, com este procedimento, pelo que se optou por desvios completos de caudal, aquando das medições efectuadas com a segunda geometria estudada, com relação de áreas $A_b/A_s=0,7$ (ver Quadro 3.1). Para os números de Reynolds menores, considerados na primeira geometria estudada, não se obtiveram resultados consistentes e não foram, por isso, abordados no estudo da geometria seguinte.

Quadro 3.1: Condições do escoamento estudadas

$\frac{Q_1/Q_3}{Re}$	0,0	0,05	0,2	0,4	0,6	0,8	0,95	1,0
40000	ii	i	i ; ii	i ; ii	i ; ii	i ; ii	i	ii
30000	ii	i	i ; ii	i ; ii	i ; ii	i ; ii	i	ii
20000	ii	i	i ; ii	i ; ii	i ; ii	i ; ii	i	ii
15000	ii	i	i ; ii	i ; ii	i ; ii	i ; ii	i	ii
10000		i	i	i	i	i	i	
5000		i	i	i	i	i	i	

i - geometria com derivação a 60° e relação de áreas $A_b/A_s=1$

ii - geometria com derivação a 60° e relação de áreas $A_b/A_s=0,7$

A construção das linhas de energia em cada ramo da ligação, para as diversas condições de escoamento estudadas, teve por base a distribuição de pressões ao longo das condutas, nas quais se obtiveram factores de correlação, entre os pontos medidos, com valores superiores a 95%, com excepção dos ramos da geometria percorridos por caudais inferiores a 5% do caudal de admissão.

Apresenta-se no Quadro 3.2 , a título de exemplo, os valores do factor de correlação obtidos nas medições de perda de carga correspondentes à primeira ligação estudada, para três números de Reynolds distintos.

Quadro 3.2: Factores de correlação (em %) obtidos na definição das linhas de energia, geometria com razão de áreas: $A_b/A_s=1$

Re → Q_1/Q_3	40000			30000			20000		
	ramal 1	ramal 2	ramal 3	ramal 1	ramal 2	ramal 3	ramal 1	ramal 2	ramal 3
0.05	58.770	99.991	99.946	38.519	99.993	99.934	4.016	99.981	99.984
0.2	99.463	99.993	99.952	99.683	99.991	99.963	95.436	99.968	99.993
0.4	99.924	99.976	99.963	99.975	99.979	99.951	99.980	99.992	99.925
0.6	99.995	99.896	99.970	99.988	99.957	99.953	99.995	99.909	99.939
0.8	99.995	96.758	99.945	99.978	98.531	99.960	99.983	99.659	99.941
0.95	99.989	31.913	99.927	99.974	9.706	99.959	99.992	5.947	99.985

3.4 - Resultados obtidos

3.4.1 - Geometria 1 (derivação a 60° ; $A_b/A_s = 1,0$)

Os coeficientes de perda de carga local, obtidos entre a conduta de admissão (ramal 3) e a conduta de derivação (ramal 1), apresentam valores irregulares para os números de Reynolds de entrada inferiores a 15000, apresentando uma forma aproximadamente constante para escoamentos com números de Reynolds mais elevados. Os valores máximos medidos para estes coeficientes, rondam o valor 0,9 , medido com um caudal escoado no ramal 1 de 5% do caudal de entrada (ver Figuras 3.4 e 3.5).

Conseguindo-se o melhor desempenho em termos energéticos, (se considerarmos isoladamente o valor de K_{31}), com as partições de caudal: $Q_1/Q_3=0,6$ ou $Q_1/Q_3=0,8$ tendo sido medidos valores na gama 0,5 - 0,55 para os números de Reynolds mais elevados.

A evolução das linhas de tendência para o coeficiente K_{31} , permite apontar como valores extremos, correspondentes ao completo desvio de caudal para a derivação ($Q_1/Q_3=1,0$) e caudal nulo desviado ($Q_1/Q_3=0,0$), 0,6 e próximo da unidade respectivamente.

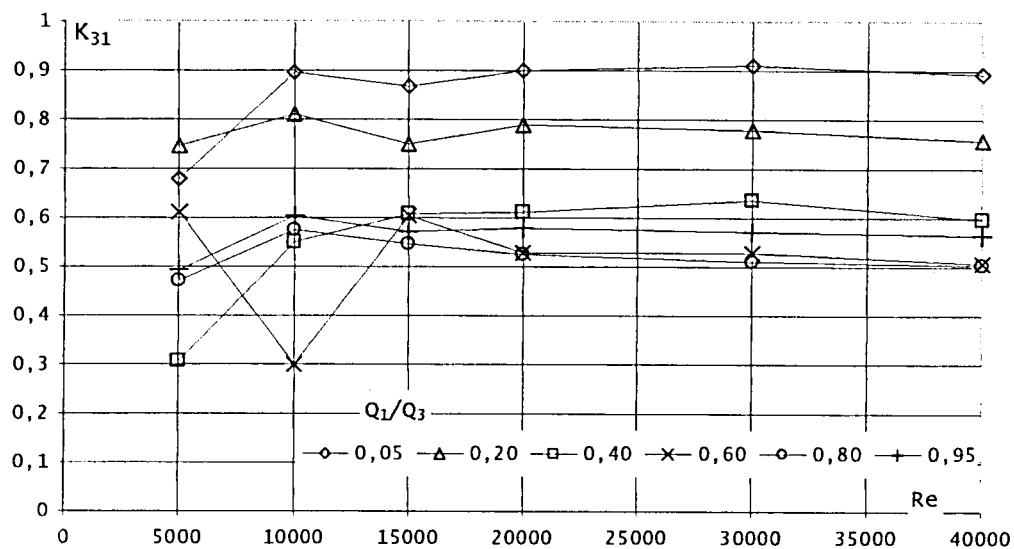


Figura 3.4 :Derivação a 60° com relação de áreas: $A_b/A_s=1,0$. Variação do coeficiente de perda de carga - K_{31} com o número de Reynolds

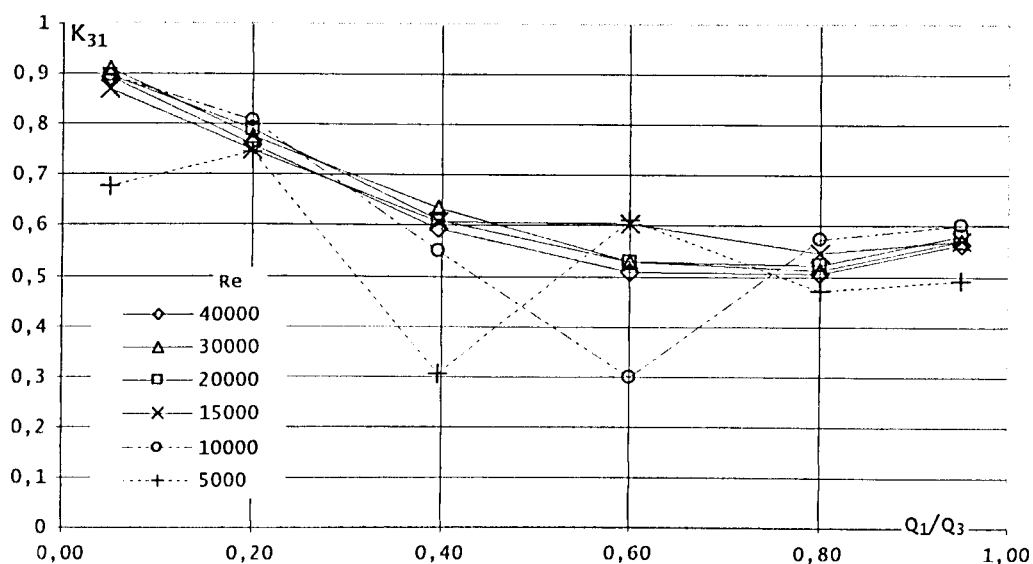


Figura 3.5: Derivação a 60° com relação de áreas: $A_b/A_s=1,0$. Variação do coeficiente de perda de carga - K_{31} com a divisão de caudal - Q_1/Q_3 .

Os valores de coeficiente de perda de carga, entre o ramal de admissão e o ramal de saída (K_{32}), ambos pertencentes à conduta principal desta geometria, aparecem representados nas Figura 3.6 e Figura 3.7, como função do número de Reynolds de entrada e da partição de caudal, respectivamente. Também aqui, não é detectável qualquer dependência clara do coeficiente de perda de carga local (K_{32}) em relação ao número de Reynolds . Aqui, os valores mínimos deste coeficiente são conseguidos com uma partição de caudal: $Q_1/Q_3=0,2$ de sinal negativo, o que traduz um ganho de energia conseguido apenas “localmente” , obtendo-se como valor mínimo: $K_{32}=-0,05$ para um número de Reynolds de entrada correspondente a 40000 .

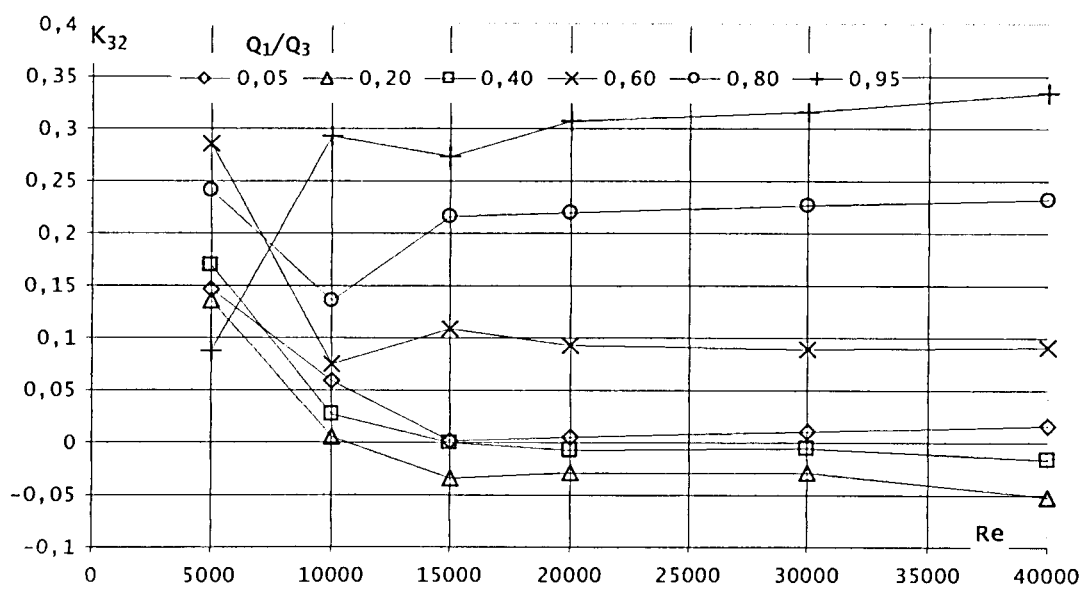


Figura 3.6: Derivação a 60° com relação de áreas: $A_b/A_s=1,0$. Variação do coeficiente de perda de carga – K_{32} com o número de Reynolds.

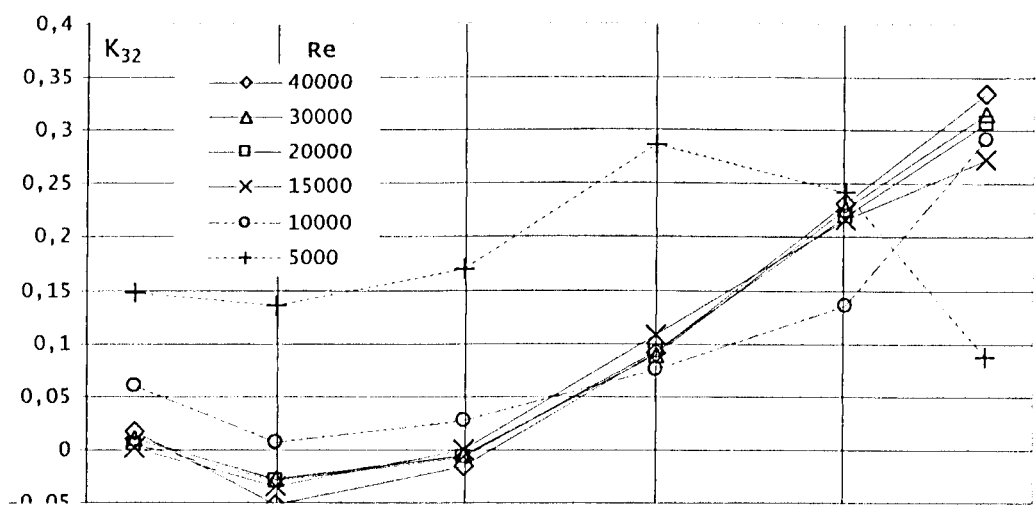


Figura 3.7: Derivação a 60° com relação de áreas: $A_b/A_s=1,0$. Variação do coeficiente de perda de carga - K_{32} com a partição de caudal - Q_1/Q_3

Para números de Reynolds inferiores a 15000, os resultados obtidos apresentam uma distribuição: que se aproxima das linhas obtidas com outros números de Reynolds de valor superior, no caso da medição efectuada para o escoamento caracterizado por um número de Reynolds de entrada de valor 10000.

Para o escoamento com um número de Reynolds de 5000, verifica-se algum paralelismo da linha de tendência para K_{32} até um ponto a que corresponde a divisão de caudal $Q_1/Q_3=0,6$, verificando-se uma quebra contínua dos valores de K_{32} para partições de caudal de maior valor, ao contrário dos restantes números de Reynolds medidos, onde se verifica um contínuo agravamento de K_{32} com o aumento do caudal desviado para a conduta lateral.

A evolução irregular dos coeficientes de perda de carga, medidos em escoamentos com números de Reynolds de menor valor, pode ser justificada com a forma das linhas de energia que serviram de base para a definição destes valores. Nomeadamente, o facto de terem sido obtidas a partir de pontos pouco colineares (baixos factores de correlação) , equivalentes aos resultados obtidos com divisões de caudal, Q_1/Q_3 , reduzidas. Assim, nestas condições do escoamento, será de esperar que o redesenvolvimento do escoamento, nas condutas de saída, aconteça em pontos mais a jusante, implicando maiores flutuações de pressão nas condutas de apoio, que serviram de base a estas medições.

Para as medições efectuadas com partição de caudal de 0,05 será de referir que pequenas variações do valor de caudal implicam flutuações no valor de pressão mais importantes, comparativamente.

3.4.1.1 - Coeficientes de perda de potência

Tendo sido apresentados valores de coeficientes de perda de carga (K_{31}) com irregularidades óbvias, para a determinação dos coeficientes de perda de potência (K_D) considerou-se apenas a contribuição das medições efectuadas com os números de Reynolds: 20000; 30000 e 40000 (ver Figura 3.8).

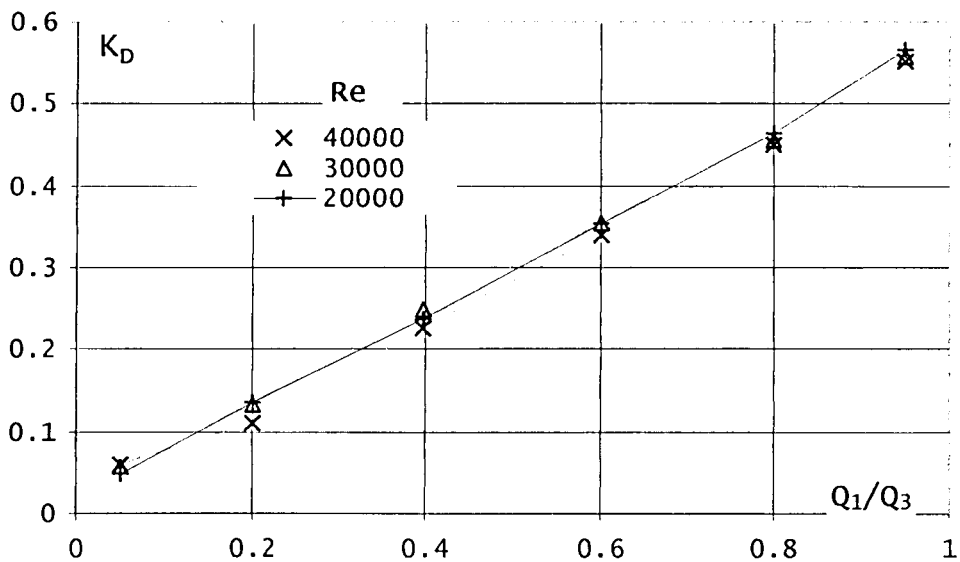


Figura 3.8: Geometria 1 -Coeficiente de perda de potência como função da divisão de caudal

Como seria de esperar, dada a coincidência de valores dos coeficientes de perda de carga para as condições de escoamento com valores de Reynolds mais elevados, as linhas de tendência para o coeficiente de perda de potência, para diferentes números de Reynolds, em função da divisão de caudal Q_1/Q_3 , apresentam uma evolução semelhante, com valores praticamente coincidentes.

Referindo os valores extremos obtidos, verifica-se uma tendência para o valor nulo deste coeficiente quando não existe desvio de caudal no sentido da conduta lateral ($Q_1=0,0$), e um valor máximo de perda de energia do escoamento quando se verifica o completo desvio do caudal de entrada no sentido da derivação ($Q_1=Q_3$) , caracterizado com um coeficiente de perda de potência com valor próximo de 0,6.

3.4.1.2 - Lei de variação proposta para o coeficiente de perda de potência

A determinação dos valores de K_D (Equação 3.13) conduziu a uma distribuição em função da divisão de caudal Q_1/Q_3 com uma forma aproximadamente linear.

Para o apuramento de uma lei de variação, a propor, que melhor se ajustasse aos pontos calculados, foram considerados os valores médios calculados a partir dos coeficientes de perda de potência obtidos para os diferentes números de Reynolds analisados. A expressão proposta aparece indicada na Figura 3.9 tendo sido obtida com um factor de correlação equivalente a 99,8% , embora o seu significado seja pouco relevante, dado o reduzido número de pontos usados na sua definição .

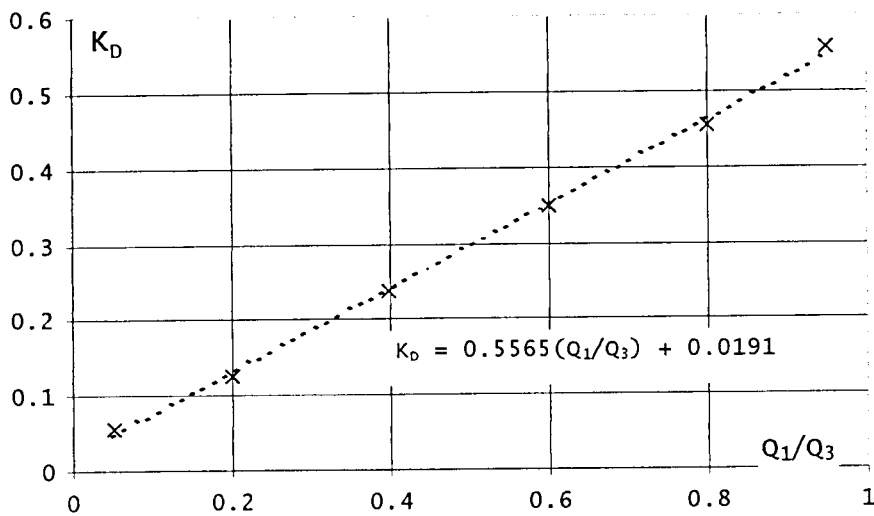


Figura 3.9: Coeficiente de perda de potência. Lei de variação proposta

Esta lei proposta apresenta um valor residual, ($K_D = 0,0191$), quando o escoamento percorre apenas a conduta principal da ligação ($Q_1/Q_3=0,0$), que á partida deverá ser incluído na incerteza associada a estas medições, com esta ressalva podemos considerar o escoamento, nestas condições, equivalente a um escoamento normal em conduta sem desvios de caudal.

Usando de novo a expressão proposta, obtêm-se como valor máximo do coeficiente de perda de potência, o valor 0,5756 , obtido com o desvio completo do caudal de entrada no sentido da conduta de derivação.

3.4.2 - Geometria 2 (Derivação a 60° ; $A_b/A_s = 0,7$)

Os valores de K_{31} , obtidos indicam valores ligeiramente acima de 0,9 para a situação de caudal a percorrer apenas a conduta principal. Fazendo o desvio progressivamente maior no sentido da derivação verifica-se a diminuição de K_{31} , que da análise da linha de tendência deverá apresentar um valor mínimo com a partição $Q_1/Q_3=0,5$.

Após este valor de divisão de caudal verifica-se o agravamento de K_{31} atingindo um máximo, quando todo o caudal de entrada aparece a percorrer a conduta lateral com valor próximo de 1,10. Não é visível qualquer dependência do valor de K_{31} com o número de Reynolds, verificando-se um razoável grau de coincidência entre as linhas de tendência obtidas para diferentes números de Reynolds característicos do escoamento na entrada do circuito. Os valores obtidos para diferentes números de Reynolds apresentam desvios relativos sempre inferiores a 8% no caso K_{31} função de Q_1/Q_3 .

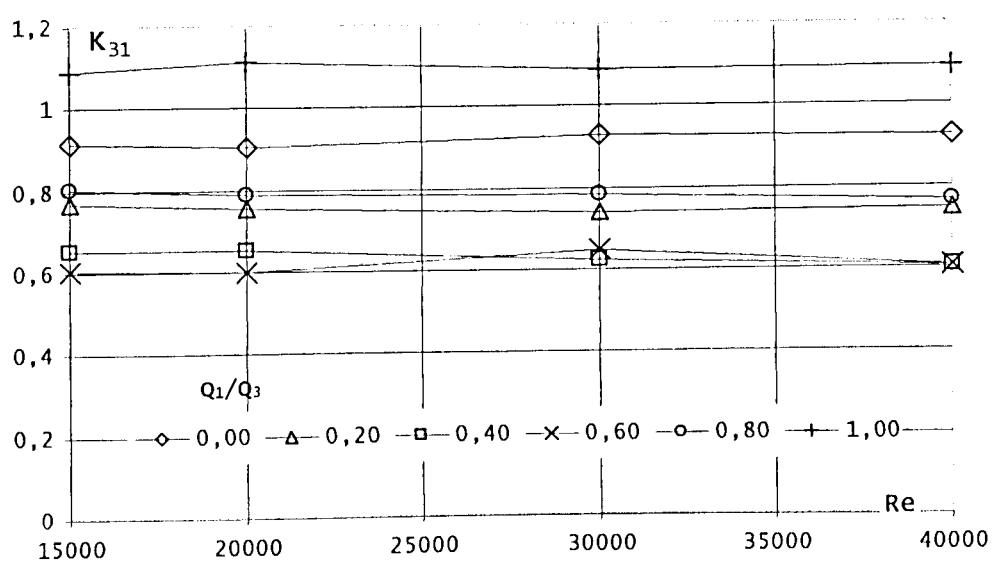


Figura 3.10: Derivação a 60° com relação de áreas: $A_b/A_s=0,7$. Variação do coeficiente de perda de carga – K_{31} com o número de Reynolds

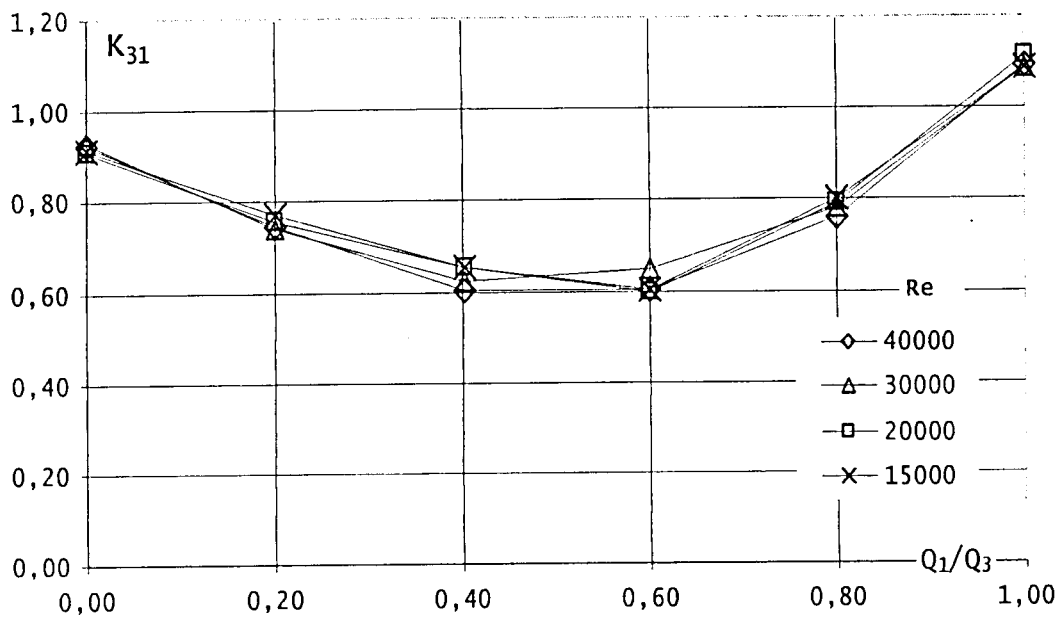


Figura 3.11 – Derivação a 60° com relação de áreas: $A_b/A_s=0,7$. Variação do coeficiente de perda de carga - K_{31} com a partição de caudal - Q_1/Q_3 .

Na Figura 3.12 apresenta-se a distribuição de K_{32} considerando em termos médios os valores obtidos para os diferentes números de Reynolds medidos, não indica a existência de perdas locais na situação de caudal apenas a percorrer a conduta principal, como seria de esperar.

Entre as partições de caudal $Q_1/Q_3=0,0$ e $Q_1/Q_3=0,4$ existe a tendência para os valores de K_{32} serem negativos. Como resultado de um aumento local dos valores de pressão como consequência da desaceleração do fluido. Para partições de $Q_1/Q_3>0,4$ estes coeficientes serão sempre positivos, existe perda de energia efectiva, atingiu do valores máximos, em concordância com o verificado para K_{31} , para a partição $Q_1/Q_3=1,0$, com valores entre 0,28 e 0,34.

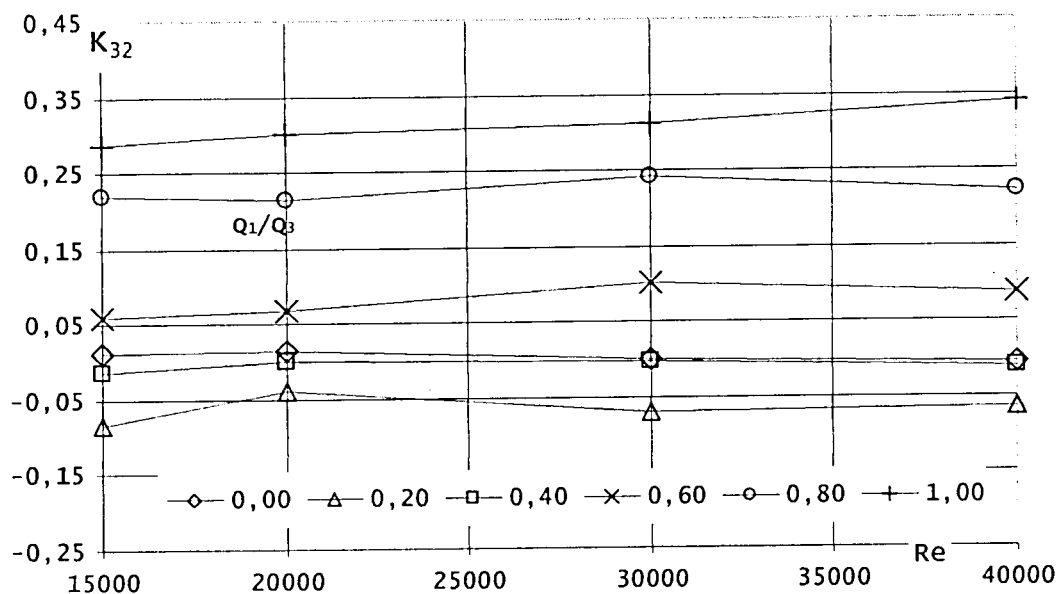


Figura 3.12: Derivação a 60° com relação de áreas: $A_b/A_s=0,7$. Variação do coeficiente de perda de carga - K_{32} com o número de Reynolds.

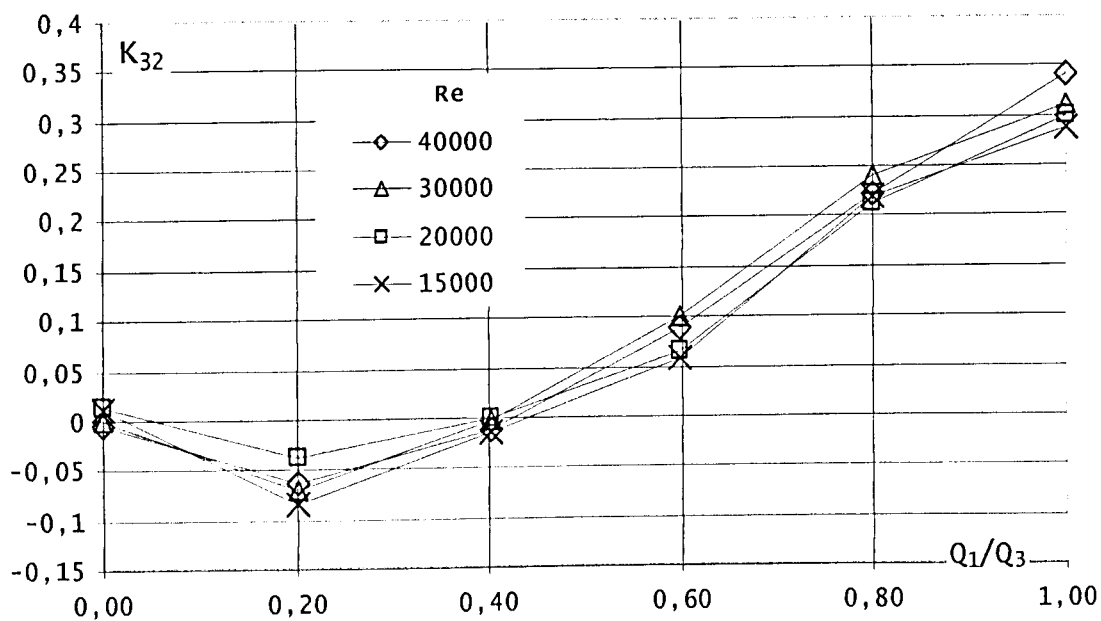


Figura 3.13: Derivação a 60° com relação de áreas: $A_b/A_s=0,7$. Variação do coeficiente de perda de carga - K_{32} com a partição de caudal - Q_1/Q_3

3.4.2.1 - Coeficientes de perda de potência

Da combinação dos coeficientes de perda de carga e com os valores de divisão de caudal que permitiram o apuramento destes, construiu-se uma linha de tendência para o coeficiente de perda de potência. Para as 4 situações analisadas, com números de Reynolds de entrada distintos, é notória a coincidência de valores ao longo da gama de partições de caudal analisadas, ver Figura 3.14, o que traduz uma independência dos coeficientes de perda de potência com o número de Reynolds para a gama avaliada (15000 – 40000).

As linhas de tendência obtidas apresentam um progressivo agravamento dos valores de perda de energia do escoamento, com o aumento de caudal desviado para a conduta lateral, na derivação.

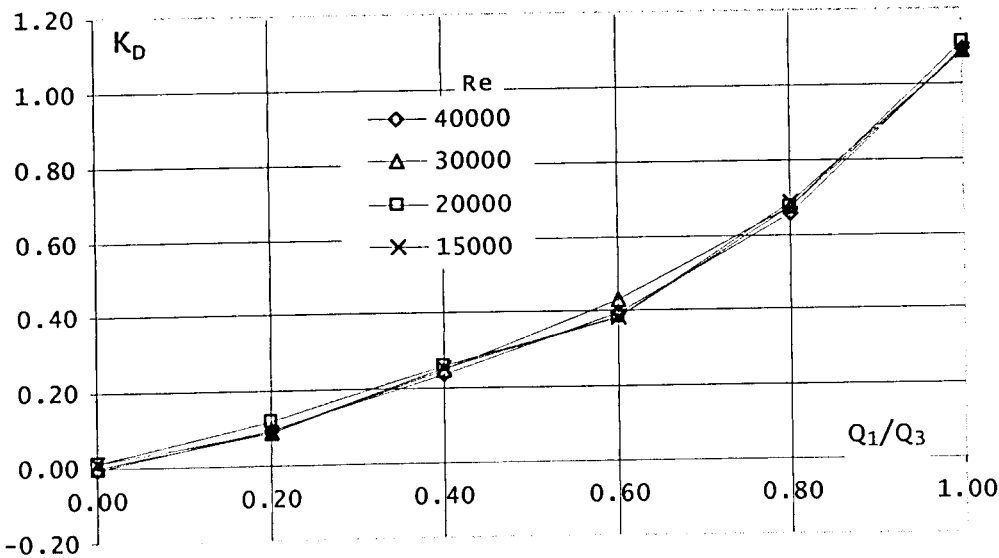


Figura 3.14: Geometria 2 -Coeficiente de perda de potência como função da divisão de caudal

3.4.2.2 - Lei de variação proposta para o coeficiente de perda de potência

Com os valores obtidos, de coeficientes de perda de potência, na gama de números de Reynolds 15000 – 40000 , foi determinada uma lei de ajuste aos valores médios medidos e que aparece representada na Figura 3.15. Foi , aqui, considerado um ajuste por um polinómio de 3º grau, que indica o valor residual 0,0011 para a situação de caudal desviado nulo e o valor máximo 1,09 quando se impõe um desvio completo do caudal de entrada para a conduta de derivação.

A partir da lei de variação definida, podem ser identificadas duas zonas de variação em função da divisão de caudal: i) para divisões de caudal, (Q_1/Q_3) , inferiores a 0,6 verifica-se um agravamento intenso dos valores de perda de potência e que segue uma evolução praticamente linear; ii) para valores de $Q_1/Q_3 > 0,6$ os valores de coeficiente de perda de potência aparecem em agravamento mais acentuado.

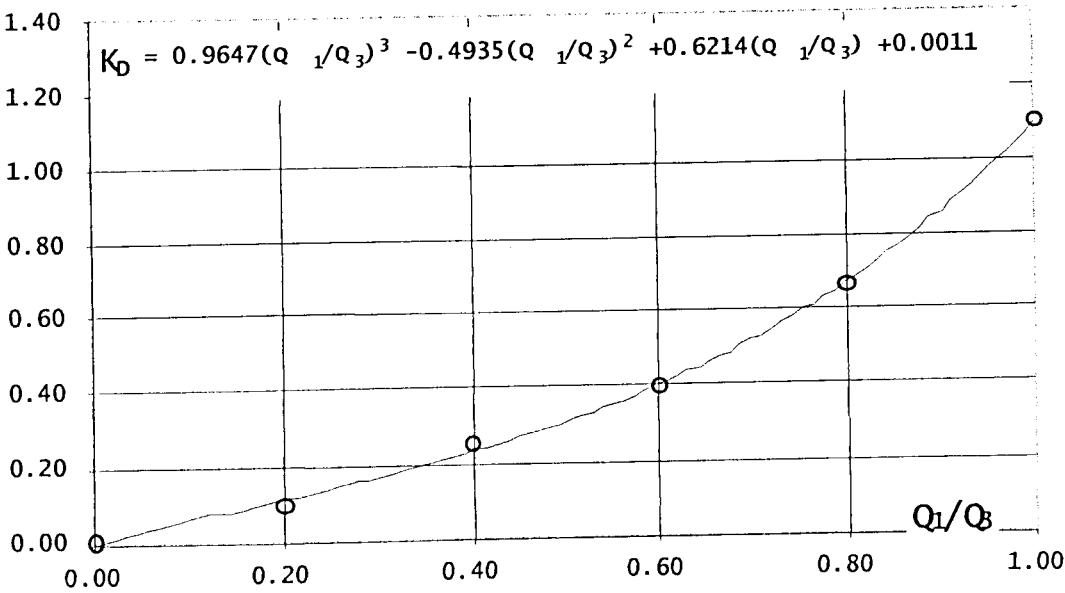


Figura 3.15: Coeficiente de perda de potência. Lei de variação proposta

3.4.3 - Comparação de Resultados

De forma a permitir uma fácil leitura das principais diferenças entre os resultados obtidos nos ensaios que compõem este trabalho e valores propostos por outros autores, em geometrias semelhantes, apresenta-se nas Figuras 3.16 e 3.17 uma representação gráfica dos coeficientes de perda de carga respectivos.

A representação dos valores propostos por Idelcik, baseou-se em expressões indicadas pelo autor, que traduzem a variação dos coeficientes de perda de carga em função das velocidades médias do escoamento em cada ramal da bifurcação bem como do ângulo de inclinação da conduta lateral relativamente à conduta principal. A utilização desta expressão proposta, permitiu obter valores para os coeficientes K_{31} nas duas geometrias aqui em análise. Para os coeficientes K_{32} , este autor não apresenta qualquer distinção de valores para geometrias com relações de área diferente, considerando ainda a aplicação dos mesmos coeficientes a geometrias com o ângulo de derivação compreendido entre os valores 15° e 90° .

Os valores propostos por Gardel, restringem-se à comparação com a primeira geometria estudada $A_b/A_s=1$, não sendo apresentados valores para situações com condutas de diâmetros diferentes dentro da mesma geometria.

4.4.3.1 - Comparação dos coeficientes de perda de carga local – K_{31}

Verifica-se uma razoável concordância de valores, em boa parte das divisões de caudal consideradas, entre os resultados obtidos com a primeira geometria estudada e os valores propostos por Gardel. Excluem-se aqui os valores para $Q_1/Q_3 > 0,8$ onde se verificam, coeficientes de perda de carga com valor 25% superior (valor máximo), indicado por este autor.

Os valores propostos por Idelcik aparecem sempre bastante superiores aos valores medidos. A melhor concordância é conseguida para divisões de caudal Q_1/Q_3 inferiores a 50%. Para a geometria com razão de áreas unitária, os valores propostos por Idelcik assemelham-se mais aos valores medidos na segunda geometria considerada ($A_b/A_s=0,7$). Para a geometria com razão de áreas de valor igual a 0,7, este autor apresenta valores largamente superiores aos valores obtidos nas medições efectuadas com uma geometria equivalente.

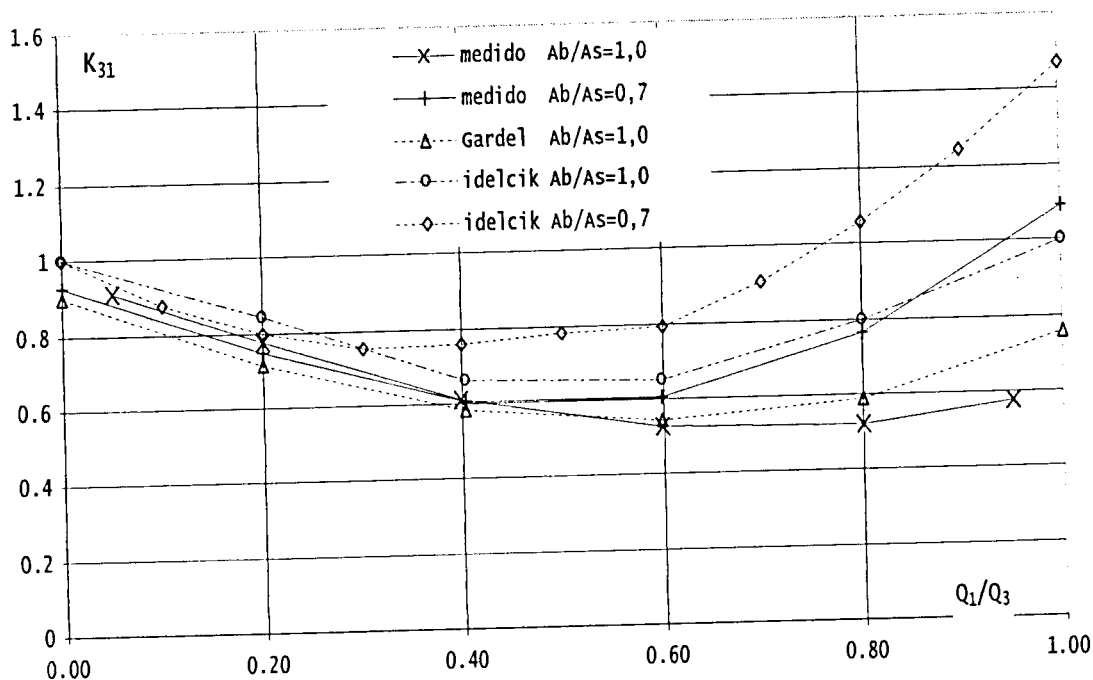


Figura 3.16: Comparação de resultados- coeficientes de perda de carga – K_{31}

Entre as duas geometrias medidas, verifica-se uma diferença máxima nos valores do coeficiente K_{31} com a condição de desvio total, do caudal de entrada, no sentido da derivação. Para esta situação, o valor do coeficiente K_{31} , obtido com a segunda geometria estudada, apresenta um valor 1,83 vezes superior ao valor obtido nas mesmas condições com a primeira geometria medida ($A_b/A_s=1$).

4.4.3.2 - Comparação dos coeficientes de perda de carga local – K_{32}

Os valores obtidos para o coeficiente de perda de carga local - K_{32} , para as duas geometrias consideradas, não apresenta diferenças, de comportamento ou de valor, consideráveis. Acontecendo o mesmo em relação aos valores propostos por Gardel.

Para os valores propostos por Idelcik, verifica-se um afastamento, em relação aos restantes valores propostos. Este afastamento aparece mais evidente entre as divisões de caudal $Q_1/Q_3=0,2$ e $Q_1/Q_3=0,4$, onde não são apresentados valores negativos para o coeficiente K_{32} .

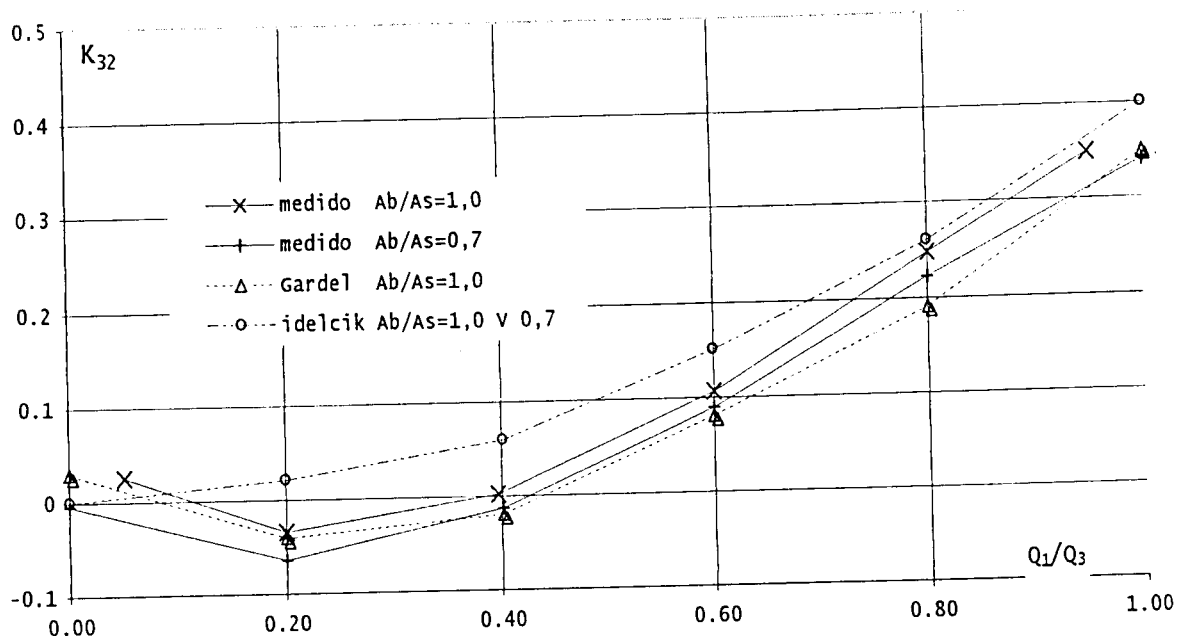


Figura 3.17: Comparação de resultados- coeficientes de perda de carga – K_{32}

3.4.3.3 - Comparação dos coeficientes de perda de potência - K_D

Da análise das linhas de ajuste consideradas nas duas geometrias em estudo, verificam-se perdas de carga locais com valores praticamente coincidentes entre as partições de caudal $Q_1/Q_3=0$ e $Q_1/Q_3=0,5$.

Para a partição Q_1/Q_3 , onde o escoamento se efectua apenas na conduta principal, verificam-se valores residuais de coeficiente de perda de potência de valor distinto, (0,019 e 0,0011 para a 1ª e 2ª geometrias, respectivamente), e que poderão ser justificados por uma eventual melhoria no alinhamento ou interligação dos elementos em acrílico que constituem a zona de bifurcação, no estudo da segunda geometria ($Ab/As=0,7$), não se notando, assim, perturbações no escoamento que façam elevar os valores locais de perda de carga.

Para as divisões de caudal Q_1/Q_3 superiores a 0,5 verifica-se o contínuo afastamento entre os valores obtidos nas duas geometrias analisadas, aparecendo a diferença máxima, (1,0937 e 0,5756 para a 2ª e 1ª geometrias, respectivamente), para

a situação de escoamento com o caudal de entrada totalmente desviado para a conduta lateral. Aqui, a segunda geometria estudada ($A_b/A_s = 0,7$) apresenta um valor máximo de perda de potência de valor duplo relativamente à geometria anterior.

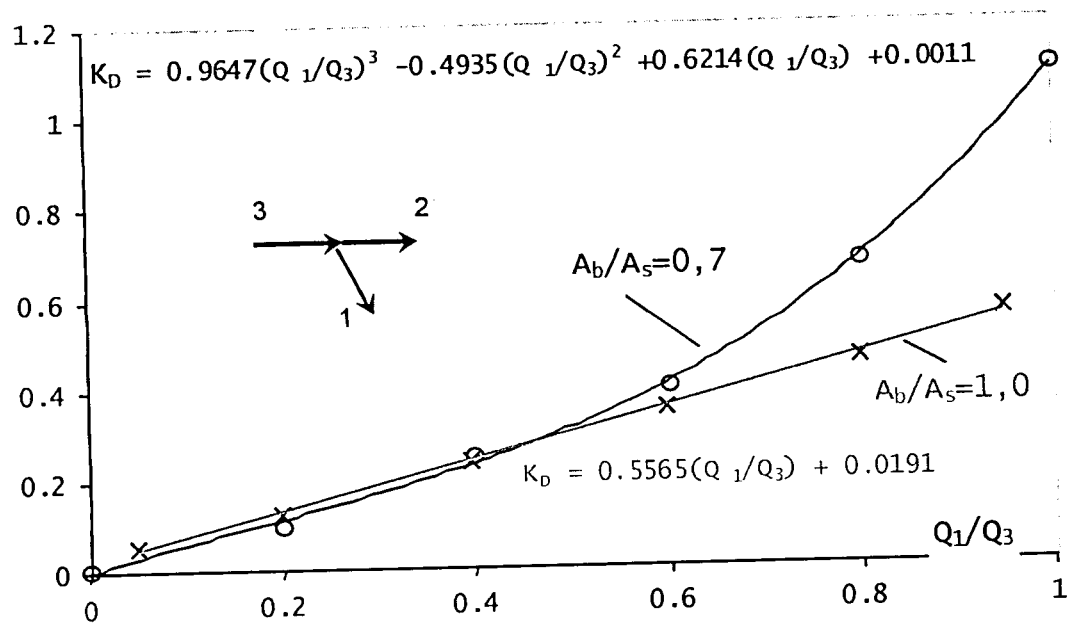


Figura 3.18: Comparação de resultados- coeficientes de perda de potência - K_D

4 – CAMPO DE VELOCIDADES MÉDIA

4.1 - Caracterização das medições

Neste capítulo serão apresentadas as características do escoamento médio, fundamentadas pelas medições de velocidade obtidas nas duas geometrias em estudo. Para a primeira geometria estudada - geometria 1, (derivação com razão de áreas: $A_b/A_s=1,0$), será apresentada uma descrição pormenorizada do escoamento. Na segunda geometria estudada – geometria 2, (derivação com razão de áreas: $A_b/A_s=0,7$), optou-se por fazer uma análise comparativa dos resultados obtidos, (relativamente à primeira geometria), em termos globais, que permite realçar as principais diferenças entre os perfis de velocidade medidos. Para esta geometria, serão referidos em termos de detalhe, apenas, os perfis de velocidade obtidos em secções transversais que não foram consideradas na primeira geometria, nomeadamente, na zona anterior à bifurcação. Esta opção justifica-se pelo facto de estarmos perante escoamentos com características, naturalmente, semelhantes que resultariam em descrições repetitivas das características observadas.

Em ambas as geometrias, pretendendo-se caracterizar o campo de velocidades médias (e os respectivos desvios quadráticos médios), efectuaram-se medições de velocidade, recorrendo à anemometria laser, num escoamento em regime permanente caracterizado por um número de Reynolds na tubagem de alimentação de, aproximadamente, 36000. Para estas medições, foi considerada uma divisão de caudal, Q_1/Q_3 , igual a 0,5.

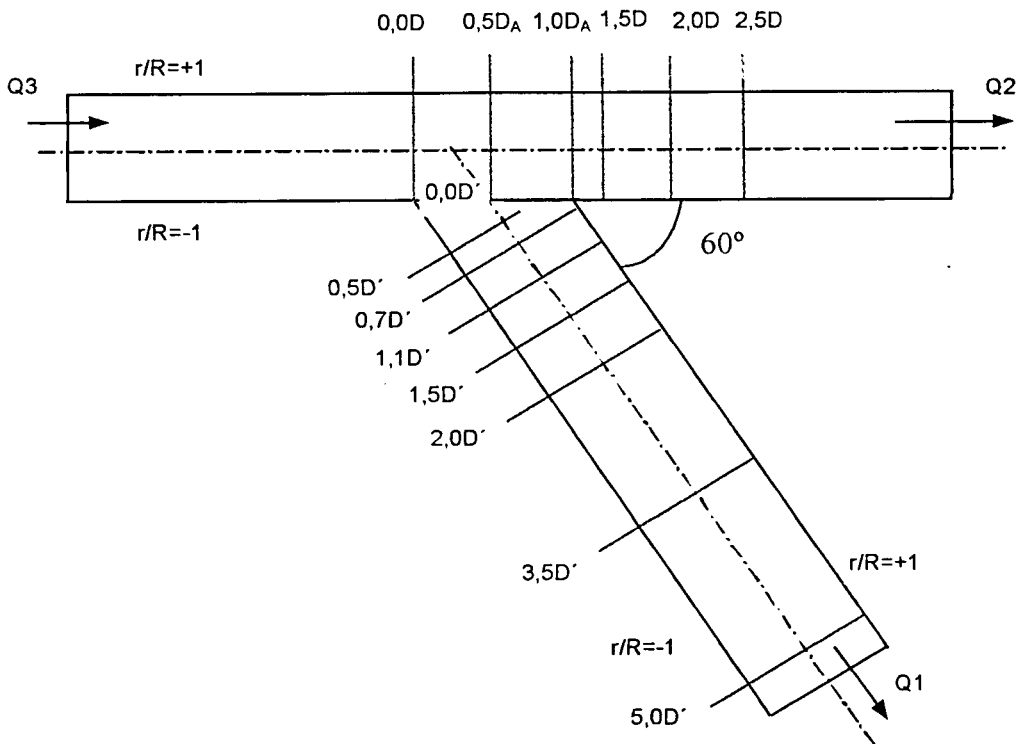


Figura 4.1: Esquema referenciado das secções (transversais) de medição (relativas à geometria 1)

Para as condições de escoamento referidas obtiveram-se medições de velocidade nas secções transversais (expressas em múltiplos do diâmetro interior da conduta principal D , e do diâmetro interior da conduta lateral D' , respectivamente) seguintes adoptando o sistema de referência elucidado na figura 4.1:

- conduta principal : -10D ; -5D ; -0,5D ; -0,1D ; 0,0D ; 0,5D_A ; 1,0D_A ; 1,5D ; 2,0D ; 2,5D ; 6,0D

- conduta lateral : 0,0D' ; 0,28D' ; 0,5D' ; 0,577D' ; 0,7D' ; 1,1D' ; 1,5D' ; 2,0D' ; 3,5D' ; 5,0D' ; 10,0D'

As secções assinaladas em sublinhado foram consideradas apenas na caracterização do escoamento da segunda geometria aqui em análise. As secções

medidas na zona da bifurcação ($0,5D_A$ e $1,0D_A$) foram referenciadas com um diâmetro D_A , (de forma a manter-se a mesma designação para as duas geometrias em estudo), definido pelo diâmetro maior da elipse que compõem a secção de saída para a derivação.

Em qualquer das secções de medida referidas foram considerados dois eixos diametrais, - um eixo horizontal e um vertical, - ao longo dos quais se efectuaram medições da componente axial de velocidade (u_x) bem como da componente “radial” de velocidade (u_y), e das respectivas flutuações, obtendo-se assim os perfis correspondentes.

Uma melhor caracterização do campo de velocidades seria conseguida com a medição da componente “tangencial”, mas por razões de geometria da ligação bem como das dimensões da sonda laser, não foi possível determinar esta componente na conduta lateral na zona mais próxima da bifurcação, local onde esta componente adquire maior importância.

De referir ainda que as medições de velocidade ao longo dos eixos considerados foram obtidas com esquemas de funcionamento do sistema laser distintas, (eixo vertical – forward scatter ; eixo horizontal – back scatter), em que, de uma forma geral, se pode considerar que o sistema em forward scatter apresenta uma relação sinal – ruído mais vantajosa.

4.2 - Representação global da evolução do escoamento

Na figura 4.2 aparecem representados os perfis de velocidade média medidos ao longo da conduta principal e da conduta lateral, para a primeira geometria estudada ($A_b/A_s=1,0$). Pretende-se aqui, apresentar uma perspectiva global da evolução do escoamento, bem como das características mais importantes do escoamento formado. Para este efeito será considerada uma representação das duas componentes de velocidade medidas no plano horizontal da geometria 1.

As medições efectuadas ao longo do eixo vertical, não conduzem a uma perspectiva do escoamento tão óbvia, no que respeita á visualização das principais características deste tipo de escoamento, pelo que não serão apresentadas neste

ponto. Uma análise mais detalhada, onde são focadas as diversas zonas características desta geometria, será apresentada no ponto 3 deste capítulo.

Através da análise da figura 4.2 e da integração dos perfis de velocidade representados, resulta imediatamente, uma desaceleração do escoamento em ambas as condutas de saída. A imposição do desvio de 50% do caudal de entrada para a conduta lateral, (verificando-se igualdade de valor entre os diâmetros das três condutas envolvidas), torna forçosa essa desaceleração. Na entrada da bifurcação o escoamento apresenta-se assimétrico, desviado no sentido da parede interior da conduta, sendo notório, portanto, o efeito de sucção da conduta lateral. Ao longo da conduta principal a desaceleração do escoamento é mais importante numa camada anexa à parede exterior e progressivamente agravada desde a zona de bifurcação até à última secção medida. Ao longo desta conduta não se verifica qualquer separação do escoamento, embora a forma dos perfis, a jusante da bifurcação, indicie este fenómeno para desvios de caudal no sentido da conduta lateral de valor superior a 50% do caudal de entrada.

Na conduta lateral, a formação de uma zona de fluido em recirculação, logo após a aresta de ligação das duas condutas, domina as características do escoamento nesta conduta. O vórtice aqui formado confina o escoamento principal a uma zona anexa à parede oposta e a estabelecer-se com características próximas das de um jacto formado no seio de um escoamento envolvente. Neste tipo de geometria verifica-se o rápido alargamento da zona de influência da recirculação, que chega a ultrapassar o eixo da conduta, acontecendo, para este caso a uma distância $0,7D'$ medida a partir da aresta de ligação das duas condutas. A influência da zona de recirculação, para jusante no escoamento, continua bem visível até à secção $5,0D'$, aqui os perfis de velocidade obtidos apresentam ainda o trabalho de mecanismos de transferencia de quantidade de movimento, necessários ao estabelecimento de um escoamento desenvolvido.

4.3 - Campo de velocidades médias - Geometria 1 ($A_b/A_s=1,0$)

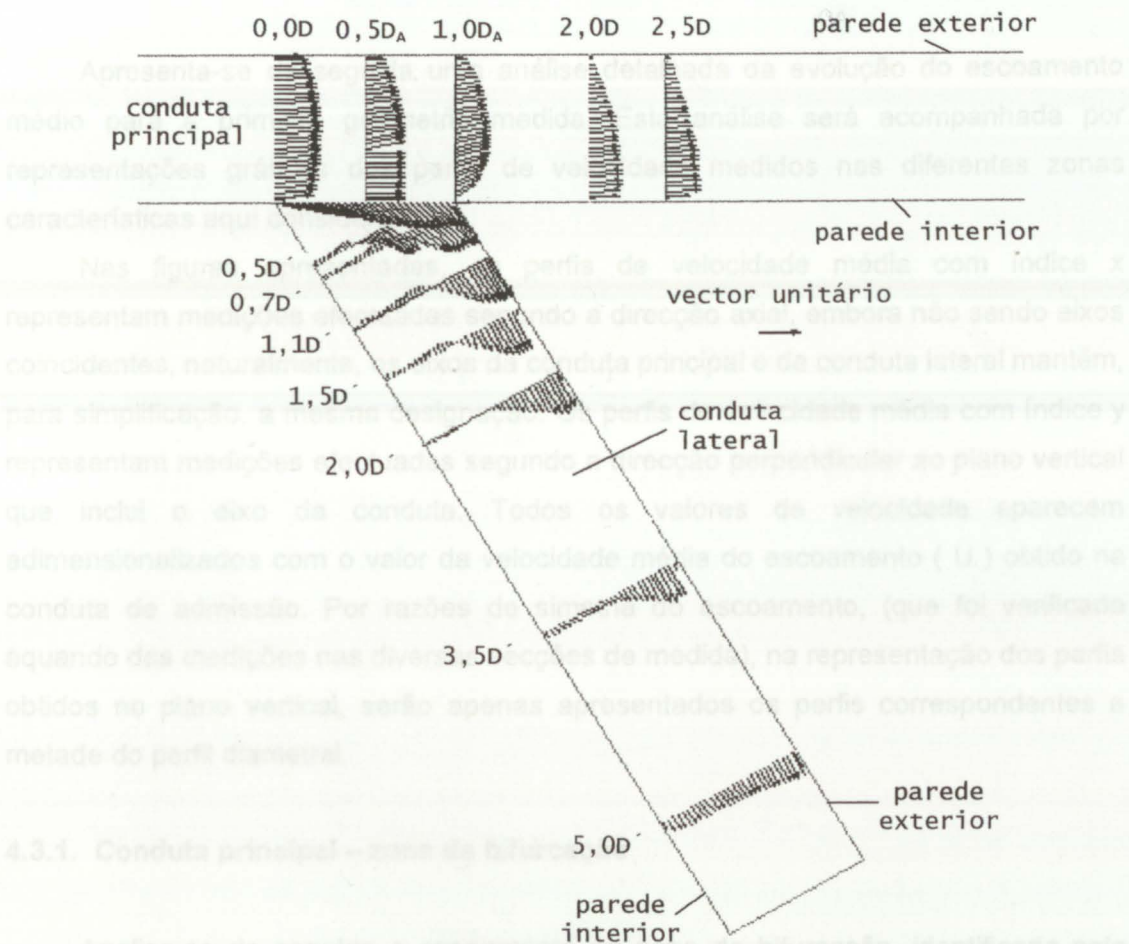


Figura 4.2: Perfis de velocidade, (combinação da componente axial e radial), medidos no plano horizontal – geometria 1. Vector unitário representa o valor da velocidade média (U) do escoamento na conduta de admissão

Importa aqui referir que os escoamentos obtidos nas duas geometrias medidas aparecem muito semelhantes, sendo mesmo praticamente coincidente no que respeita à conduta principal, pelo que as características globais apresentadas também serão válidas para o escoamento que percorre a segunda geometria estudada, ($A_b/A_s = 0,7$).

4.3 - Campo de velocidades médias – Geometria 1 ($A_b/A_s=1,0$)

Apresenta-se de seguida uma análise detalhada da evolução do escoamento médio para a primeira geometria medida. Esta análise será acompanhada por representações gráficas dos perfis de velocidade medidos nas diferentes zonas características aqui consideradas.

Nas figuras apresentadas, os perfis de velocidade média com índice x representam medições efectuadas segundo a direcção axial, embora não sendo eixos coincidentes, naturalmente, os eixos da conduta principal e da conduta lateral mantêm, para simplificação, a mesma designação. Os perfis de velocidade média com índice y representam medições efectuadas segundo a direcção perpendicular ao plano vertical que inclui o eixo da conduta. Todos os valores de velocidade aparecem adimensionalizados com o valor da velocidade média do escoamento (U) obtido na conduta de admissão. Por razões de simetria do escoamento, (que foi verificada aquando das medições nas diversas secções de medida), na representação dos perfis obtidos no plano vertical, serão apenas apresentados os perfis correspondentes a metade do perfil diametral.

4.3.1. Conduta principal – zona da bifurcação

Analisa-se de seguida o escoamento na zona de bifurcação, identificada pela zona de intersecção com a derivação (secções $0,0D$; $0,5D_A$ e $1,0D_A$).

Com o escoamento a atingir a entrada da tubagem de derivação, secção de medida $0,0D$, verifica-se um ligeiro desvio do fluido em direcção à parede da conduta que inclui a saída para a derivação, tornando evidente o efeito de sucção provocado pela conduta lateral.

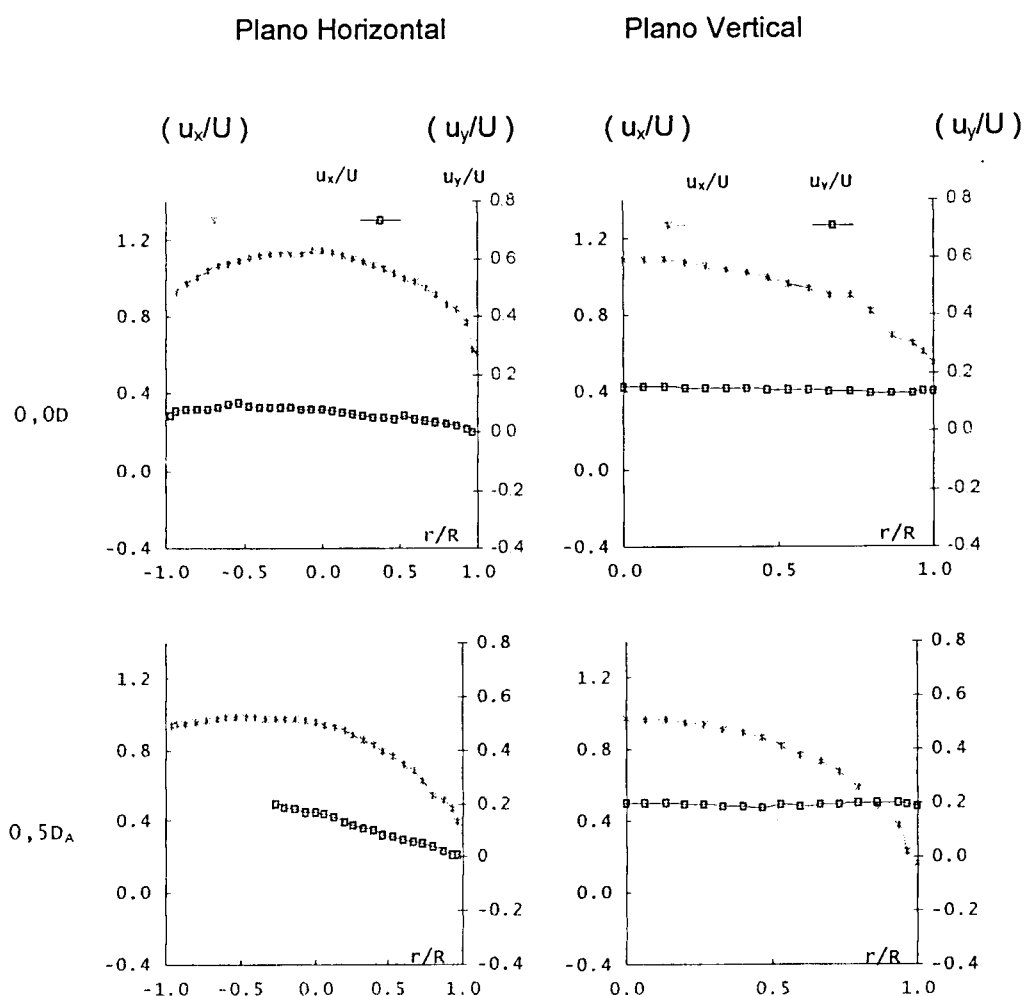


Figura 4.3: Perfis de velocidade axial e transversal medidos no plano horizontal e no plano vertical da zona de bifurcação (secções 0,0D e 0,5D_A)

Nesta secção a componente axial de velocidade, na metade diametral mais próxima da parede do tubo referida, apresenta valores aproximadamente constantes na zona interior da conduta ($\approx 115\%$ da velocidade média de entrada, i.e. , da tubagem de alimentação), diminuindo de intensidade apenas junto da parede. Por outro lado, na outra metade diametral, este decréscimo é contínuo desde o interior até junto da parede, agravando-se aqui por imposições de não deslizamento.

O desvio do escoamento referido para esta secção é confirmado pelas medições da componente radial de velocidade, que como seria de esperar também apresenta um ligeiro acréscimo na metade do tubo do lado da derivação ($\approx 10\%$ da velocidade média de entrada, como valor máximo medido).

Na secção seguinte, medida no alinhamento da intersecção do eixo da conduta principal com o eixo da conduta de derivação, secção $0.5D_A$, a componente axial de velocidade diminui de intensidade que se justifica com o desvio de parte do caudal para a derivação sendo medido um valor máximo de velocidade axial nesta secção de $\approx 97\%$ da velocidade média de entrada. De notar, ainda, que do lado da derivação o perfil de velocidades não decresce até zero porque não existe parede a impor a condição de não deslizamento.

Por outro lado, nesta secção a componente radial de velocidade aumenta notoriamente a partir do eixo da conduta no sentido da derivação, sendo medido um valor máximo próximo dos 20% da velocidade média de entrada. Embora não tenham sido efectuadas medições na zona junto da derivação, por razões de geometria da ligação, a evolução do perfil deixa adivinhar valores de velocidade radial bastante mais elevados.

Na última secção medida nesta zona em análise, secção $1,0D_A$, alinhada com a parede mais a jusante da conduta de derivação, mediram-se valores de velocidade axial ainda menores, que são justificados com o desvio completo de 50% de caudal para a derivação ($\approx 83\%$ da velocidade média de entrada, como valor máximo medido).

O desvio do escoamento no sentido da bifurcação é notório, o que pode ser confirmado pela análise do perfil de velocidades radiais que apresenta de novo valores mais elevados junto da parede da tubagem situada do lado da derivação, aonde atinge um valor máximo de cerca de 34% da velocidade média de entrada.

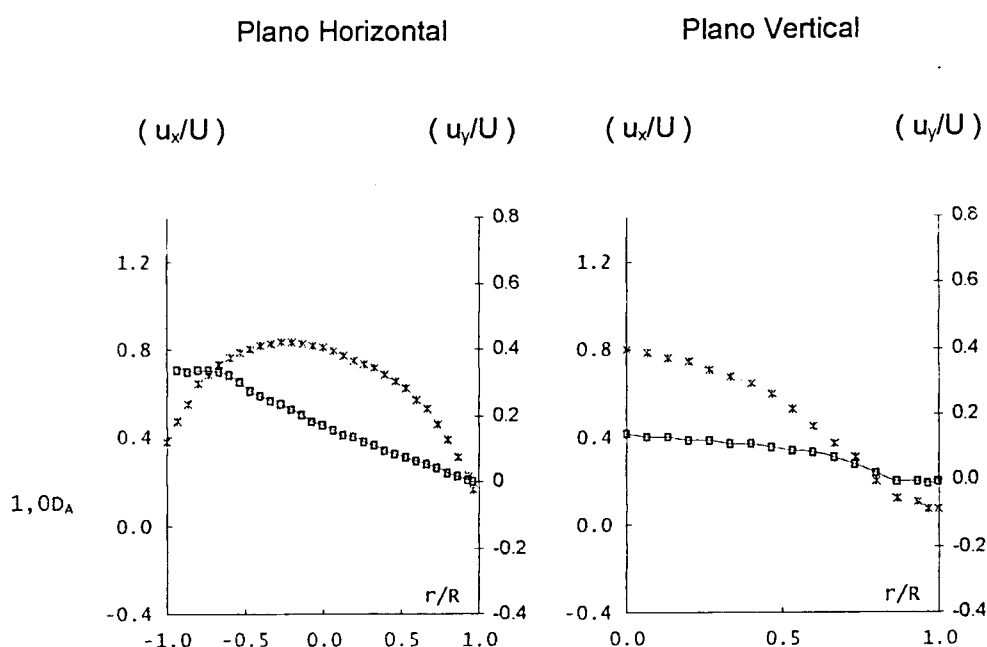


Figura 4.4: Perfis de velocidade axial e transversal medidos no plano horizontal e no plano vertical da zona de bifurcação (secção 1,0D_A)

As características do escoamento referidas anteriormente, reportadas aos perfis de velocidade obtidos no plano diametral horizontal podem ser agora reforçadas pela análise dos perfis medidos ao longo do plano diametral vertical para as mesmas secções, na zona em estudo (à direita nas figuras 4.3 e 4.4).

Para a secção 0.0D, alinhada com a parede interior da conduta de derivação (i.e. , no início da derivação), a componente radial de velocidade tem o sentido da derivação ao longo de todo o perfil, com valores similares em toda a extensão (13-15% da velocidade média de entrada). Na mesma secção, o perfil correspondente à componente axial de velocidades, apresenta um decréscimo aproximadamente linear em 2/3 do raio; decaindo mais acentuadamente junto da parede ($\approx 110\%$ da velocidade

média de entrada, como valor máximo medido no eixo da conduta e $\approx 60\%$ junto da parede superior do tubo).

Na secção seguinte, ($0.5D_A$), constata-se, novamente, que todo o perfil apresenta valores de velocidade axial inferiores aos correspondentes à secção $0.0D$, dada a divisão de caudal se ter iniciado. A evolução do perfil apresenta um maior diferencial entre as velocidades no eixo da conduta ($\approx 95\%$ da velocidade média de entrada), onde se concentra o escoamento “rápido” debitado à entrada da bifurcação, e os valores de velocidade axial junto das paredes, superior e inferior da conduta ($\approx 15\%$ da velocidade média de entrada), onde é retardado o escoamento por imposições de continuidade, o que traduz a “alimentação” do escoamento desviado a partir daquelas zonas. Nesta mesma secção podemos observar um perfil de velocidades radiais, continuando estas, a “apontar” no sentido da bifurcação, com valor aproximadamente constante (20% da velocidade média de entrada), ao longo de todo o perfil.

O perfil mais a jusante de toda a zona em análise (secção $1.0D_A$) traduz por completo a influência do desvio, para a tubagem lateral, de 50% de caudal. Assim registaram-se valores ainda menores para a componente axial de velocidade, que não ultrapassam os 80% da velocidade média de entrada, no eixo da conduta, diminuindo de intensidade de uma forma mais acentuada, por comparação com o perfil $0.5D_A$, na metade do raio próximo da parede, mostrando a tendência para a anulação desta componente na zona mais próxima da parede, i.e. , o escoamento desviado para a conduta lateral é conseguido a partir da transferência de quantidade de movimento do escoamento nesta zona.

A componente radial de velocidade, (secção $1.0D_A$), apresenta valores semelhantes ao perfil $0.0D$, no eixo da conduta, denotando, no entanto, uma inversão de sentido do escoamento junto da parede, promovendo desta forma a estabilização do escoamento que percorre a tubagem de saída.

4.3.2. Conduta principal – jusante da bifurcação

Embora o desvio de caudal para a conduta lateral, tenha sido concluído, os efeitos do escoamento flectido no sentido da conduta lateral continuam a ser visíveis ao longo da conduta de saída. Assim a jusante da bifurcação o escoamento ainda aparece concentrado junto da parede interior da conduta principal, sendo verificado este

comportamento nas três secções medidas nesta zona, secções 1.5D, 2.0D e 2.5D. Todos os perfis, medidos nesta zona, apresentam junto da parede interior valores de velocidade que rondam os 80% da velocidade média de entrada, diminuindo de intensidade gradualmente até valores nulos na parede oposta à derivação. Estas características demonstram que não se verifica uma recuperação significativa do escoamento até à secção 2,5D.

Não foram medidos valores negativos de velocidade axial junto da parede exterior pelo que se conclui que para uma divisão de caudal de 50% em cada conduta não se verifica separação do escoamento na conduta principal. Estes resultados serão confirmados com o estudo mais detalhado sobre zonas de separação apresentado num outro capítulo deste texto.

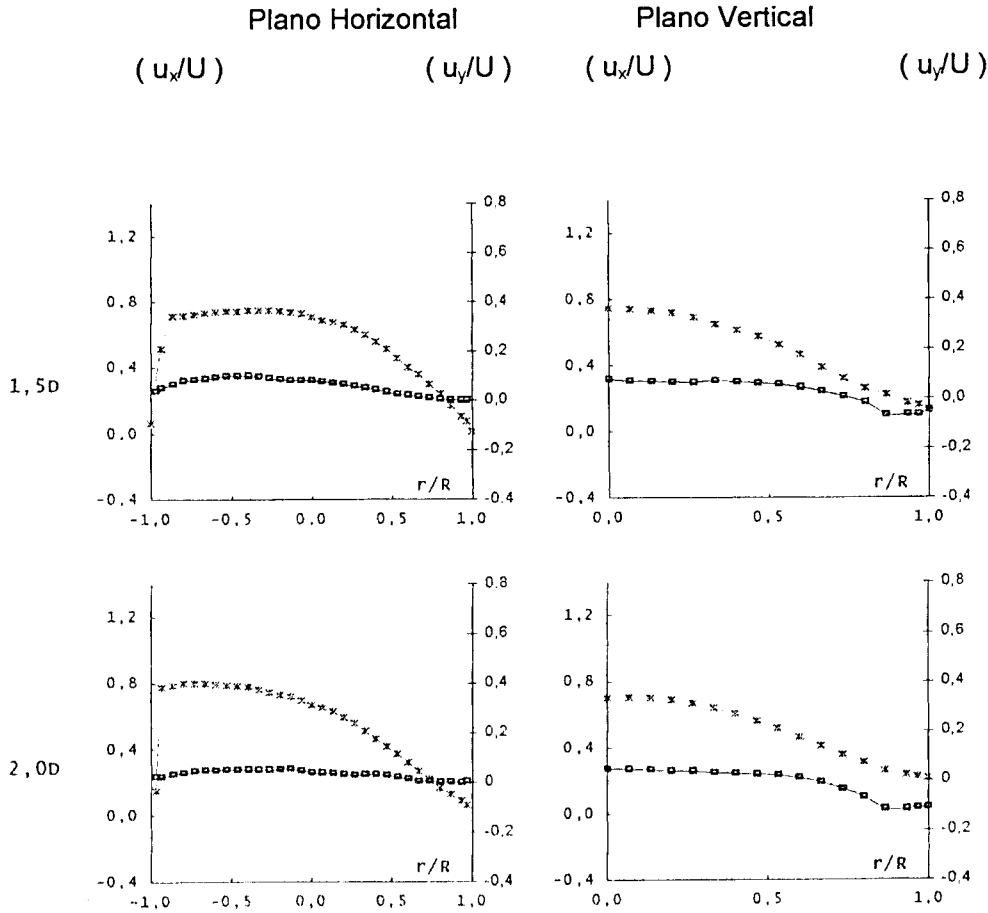


Figura 4.5: Perfis de velocidade axial e radial, medidos no plano horizontal e vertical, a jusante da bifurcação (secções 1,5D e 2,0D)

Para a componente radial de velocidade medida no eixo horizontal da secção 1.5D registaram-se valores máximos próximos de 10% da velocidade média de entrada, a meio do raio interior, que vão decrescendo até valores nulos, (a meio do raio exterior), invertendo-se neste ponto o sentido das velocidades radiais que se mantêm até atingir a parede exterior da conduta.

Nas secções seguintes os valores máximos da componente radial deslocam-se para o eixo da conduta, mantendo-se os valores negativos junto da parede exterior ou seja nesta zona o escoamento aponta no sentido oposto à derivação, verificando-se assim a transferência de quantidade de movimento que permite o redesenvolvimento do escoamento.

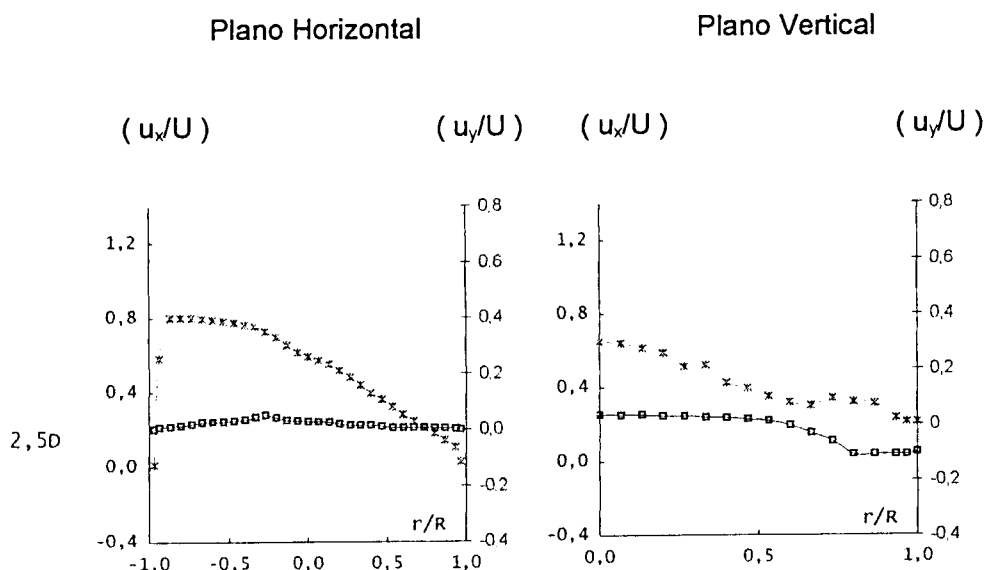


Figura 4.6: Perfis de velocidade axial e radial, medidos no plano horizontal e vertical, a jusante da bifurcação (secção 2,5D)

Após a bifurcação, e reportando-nos agora aos perfis de velocidade medidos ao longo do eixo vertical (à direita nas Figuras 4.5 e 4.6), continua a verificar-se o escoamento concentrado desproporcionalmente ao longo do eixo da conduta embora

seja notória uma transferência gradual de quantidade de movimento no sentido das paredes inferior e superior da conduta a jusante da derivação.

Por comparação de perfis de velocidade, pode referir-se uma recuperação mais “rápida” do escoamento junto das paredes, superior e inferior, relativamente ao escoamento “anexo” à parede exterior desta zona da conduta (referido anteriormente). Uma análise quantitativa, indica, para a secção 1.5D a componente axial de velocidade ronda os 75% da velocidade média de entrada, no eixo da conduta, e com valores próximos dos 10% junto das paredes superior e inferior. Na secção seguinte verifica-se alguma recuperação do perfil ($\approx 70\%$ da velocidade média de entrada, como valor máximo medido no eixo, $\approx 20\%$ da velocidade média de entrada, junto das paredes).

O ressurgimento da componente axial de velocidade junto das paredes da conduta aparece ainda mais marcadamente na secção de medida 2,5D ($\approx 65\%$ da velocidade média de entrada, como valor máximo medido no eixo, $\approx 30\%$ da velocidade média de entrada, junto das paredes). A componente radial de velocidade ao longo do eixo vertical apresenta duas vertentes distintas que se dividem em extensões iguais ao longo do raio. Assim, na metade central (próxima do eixo da conduta) as velocidades apontam para a parede interior (parede que inclui a saída para a conduta lateral), diminuindo de intensidade progressivamente nas secções a jusante, (2,0D e 2,5D).

Para a metade superior do raio o fluido aponta no sentido da parede exterior, aumentando de intensidade nas secções a jusante, de novo, para que se verifique a estabilização do escoamento.

4.3.3. Conduta lateral

A formação de uma zona de recirculação à entrada da conduta de derivação acrescenta características importantes no desenvolvimento do escoamento. Esta zona de recirculação sendo directamente ligada às perdas de carga que surgem nestes tipos de ligação será analisada mais detalhadamente em tempo oportuno.

A partir das medições que permitiram, especificamente, avaliar a extensão do vórtice no plano horizontal, verifica-se que a separação do escoamento ocorre logo após a secção de entrada (0,0D'). De notar que a secção de medida 0,0D' foi definida ao longo da ligação entre a conduta principal e a conduta lateral (sendo o diâmetro horizontal maior que o diâmetro da conduta, 1.0D_A) não sendo por isso considerada

paralelamente às restantes secções de medida da conduta lateral (ver Figura 4.1), no entanto, as componentes de velocidade medidas, mantêm as direcções consideradas nos restantes perfis medidos ao longo desta conduta.

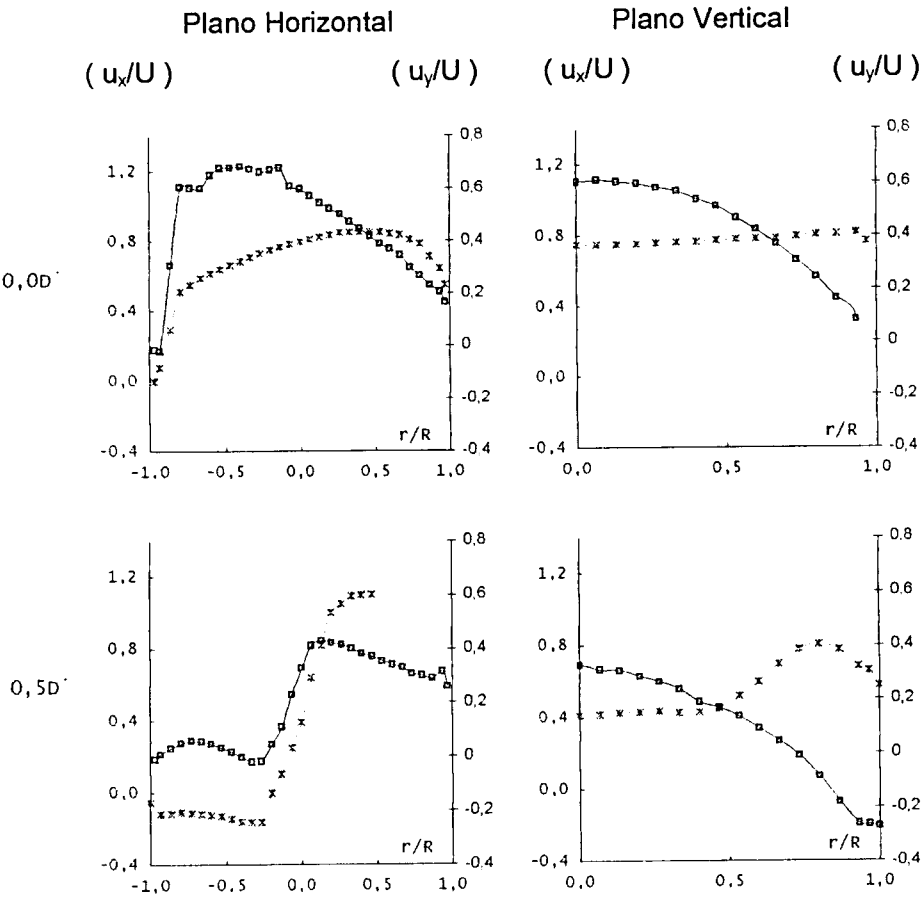


Figura 4.7: Perfis de velocidade axial e radial medidos no plano horizontal da conduta lateral (secções 0,0D' e 0,5D')

À entrada da conduta lateral a componente axial de velocidade apresenta valores máximos a meio do raio exterior (oposto ao vórtice) da conduta, denotando assim a existência de uma zona preferencial de saída do escoamento para a conduta lateral. A montante desta zona verifica-se que o escoamento não consegue seguir a mudança brusca de direcção, apresentando valores semelhantes, (60 a 70% da v.m.e.), para a componente axial e radial, (de notar que a componente radial nesta conduta tem a mesma direcção da componente axial na conduta principal), decaindo abruptamente para valores nulos junto do vértice onde surge a separação do escoamento.

No raio oposto verifica-se uma diminuição continua da velocidade radial, sendo evidente o alinhar do escoamento com a conduta lateral, enquanto a componente axial de velocidade se mantêm com valores máximos (em 80% do raio), seguindo-se uma quebra de intensidade por influência do ponto de estagnação, (coincidente com a aresta de ligação das condutas).

Na secção seguinte (0,5D'), a recirculação estende-se até ocupar 80% do raio interior da conduta, verificando-se neste ponto os valores negativos de velocidade de maior intensidade (próximo dos 20% da v.m.e.). Segue-se uma zona de transição (no eixo da conduta) de gradiente de velocidade elevado, que eleva a velocidade, já dentro do raio exterior, a valores de 110% da velocidade média de entrada. A componente radial apresenta valores máximos no eixo da conduta (40% da v.m.e.) sendo sempre inferior a 5% da v.m.e. dentro da zona de recirculação.

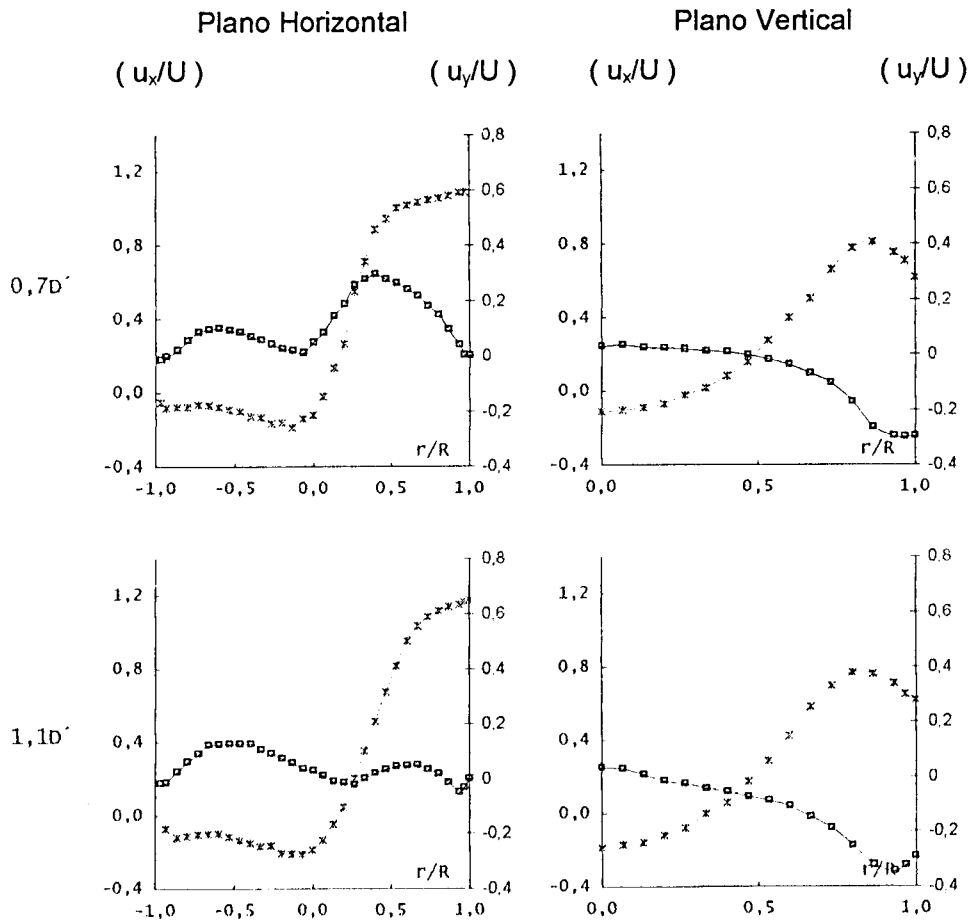


Figura 4.8: Perfis de velocidade axial e radial medidos no plano horizontal da conduta lateral (secções de medida , 0,7D' e 1,1D')

Na secção 0,7D' confirma-se o alargamento da zona de recirculação, que ultrapassa aqui a metade da conduta, e que aumenta até um máximo (medido) de cerca de 60% da secção da conduta na zona diametral (secção 1,1D'). É nessa secção de medida que se verifica a maior extensão do vórtice e simultaneamente valores negativos de velocidade mais significativos ($\approx 22\%$ da v.m.e. no eixo da conduta).

No lado oposto à zona de recirculação temos o escoamento principal que se apresenta, na secção 0,7D', em patamar com valores próximos de 110% da v.m.e. enquanto que na secção 1,1D' este patamar dá lugar a uma zona em que a componente axial de velocidade aumenta de intensidade até junto da parede exterior atingindo aí um máximo de 120% da velocidade média de entrada. Também aqui o gradiente de velocidade da zona de ligação recirculação – escoamento principal aparece menos intenso.

A conservação de quantidade de movimento é garantida ao longo do desenvolvimento do escoamento, já que se verifica o aumento de velocidade na zona de "jacto" quando aumenta a zona de recirculação. De notar ainda que os valores máximos de velocidade no interior da recirculação acontecem sempre, nas imediações da zona de transição, vórtice – escoamento principal (jacto).

Na secção 1,5D' já é notória alguma recuperação do escoamento por se verificar o retrocesso da zona de recirculação, tanto em extensão (equivalente a metade do diâmetro da conduta) como em valor ($\approx 18\%$ da v.m.e.). A componente axial apresenta valores máximos de 105% da v.m.e. e uma zona de transição de gradiente menos elevado em relação à secção 1,1D'.

A componente radial apresenta agora mais intensidade na zona central do vórtice ($\approx 18\%$ da v.m.e.), como consequência da progressiva anulação desta zona de recirculação, sendo inferior a 5% da v.m.e. ao longo do raio exterior.

Na secção medida seguinte (2,0D'), verifica-se a anulação quase completa do vórtice, notando-se ainda pontualmente valores negativos junto do eixo da conduta. Verifica-se a recuperação do escoamento principal, com diminuição de velocidade máxima, na zona de parede, alargamento da mesma e diminuição do gradiente de velocidade ao longo de toda a zona da secção sem recirculação. Aqui, os valores máximos da componente axial igualam a velocidade média de entrada, na zona que comporta o escoamento principal, não se registando evoluções notórias do perfil de velocidades radiais relativamente à secção de medida 1,5D'.

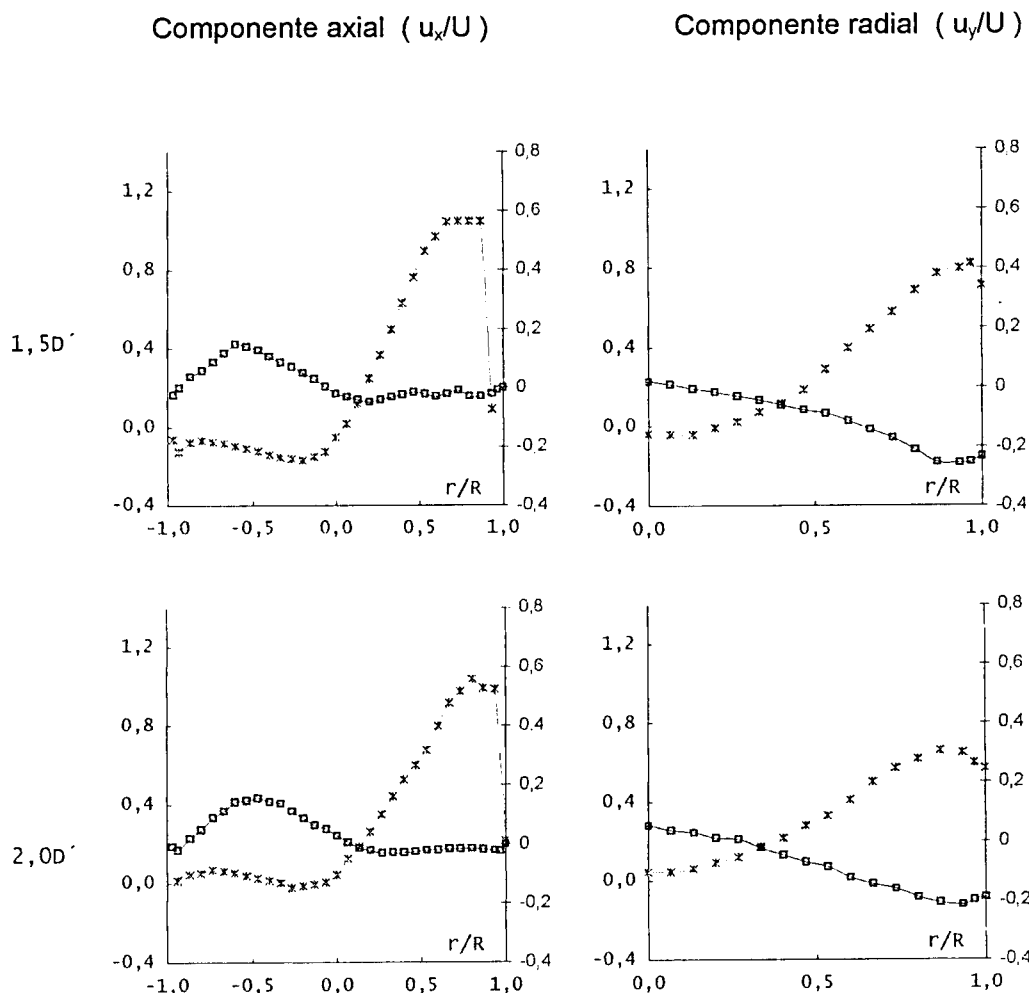


Figura 4.9: Perfis de velocidade axial e radial medidos no plano horizontal da conduta lateral (secções de medida , 1,5 D' e 2,0 D')

Para a secção 3,5D' é evidente a recuperação do perfil de velocidades no sentido da estabilização de um escoamento turbulento desenvolvido, com valores de velocidade axial na ordem dos 20% da v.m.e. na zona onde, anteriormente, se verificava a recirculação, evoluindo, a partir daí, com um gradiente de velocidade ainda algo elevado até atingir valores próximos dos 90% da v.m.e. junto da parede exterior.

A componente radial apresenta valores máximos de 15% da v.m.e. na zona com velocidades axiais menores, sendo sempre inferior a 5% da v.m.e. ao longo do raio exterior. Na secção 5,0D' obtemos naturalmente um perfil de velocidades que se adivinha começar progressivamente a aproximar-se de um perfil correspondente a um

escoamento turbulento desenvolvido, em que a assimetria do escoamento se apresenta bastante esbatida, evoluindo com valores de 40% da v.m.e. junto da parede interior até atingir valores próximos dos 70% da v.m.e. junto da parede oposta. A componente radial apresenta valores inferiores a 5% da v.m.e. ao longo de todo o diâmetro, sendo mais elevados no eixo da conduta.

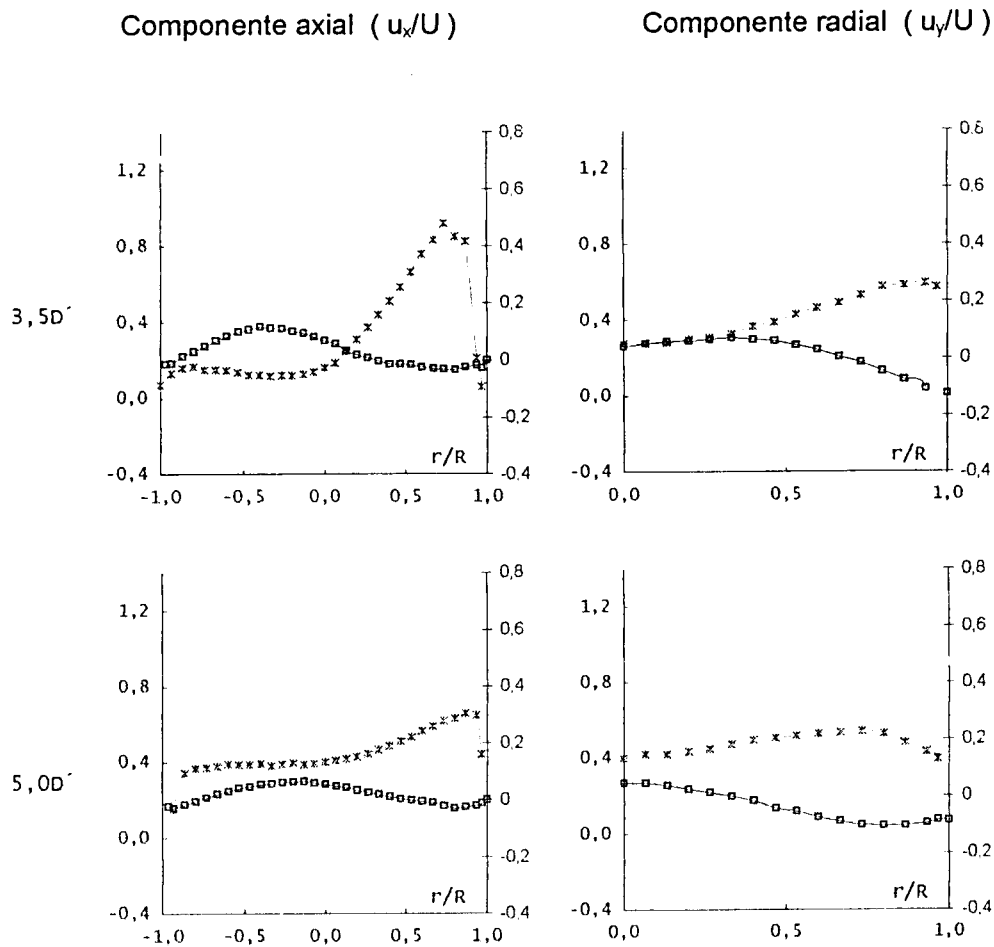


Figura 4.10: Perfis de velocidade axial e radial medidos no plano horizontal da conduta lateral (secções de medida , 3,5D' e 5,0D')

Na entrada da conduta de derivação, (secção 0,0D'), e com referência a medições efectuadas ao longo do eixo vertical da conduta, verificamos que o escoamento apresenta velocidades axiais de valores próximos de 80% da v.m.e. igualmente distribuídos ao longo de todo o diâmetro da conduta.

A componente radial apresenta uma distribuição de velocidade ao longo do eixo vertical com uma forma tipo arco de círculo com velocidade máxima no eixo da conduta próxima de 60% da v.m.e. , com o fluido a deslocar-se, naturalmente, ao encontro da parede exterior da conduta lateral, (sentido negativo de velocidade radial indica movimento do fluido na direcção da parede onde surge o vórtice).

Deslocando-nos 0,5D' a jusante da entrada, verificamos a influência do vórtice ao provocar uma desaceleração do fluido no eixo da conduta, impondo assim uma zona de velocidade axial constante ($\approx 40\%$ da v.m.e.), com uma extensão equivalente a 50% do diâmetro vertical, mantendo-se os valores de 80% da v.m.e. , medidos na secção 0,0D' , junto das paredes inferior e superior da conduta. Aqui a componente radial apresenta uma separação do escoamento, em que a parte central do perfil aponta na direcção da parede exterior com valor máximo no eixo de 30% da v.m.e. movendo-se o fluido na direcção oposta junto das paredes inferior e superior da conduta com valores máximos de 25% da v.m.e.

Este comportamento da componente radial é mantido com o evoluir do escoamento na conduta de derivação, verificando-se apenas variações de intensidade quer na zona central quer junto das paredes.

Para a componente axial verifica-se na zona central do perfil uma crescente desaceleração do fluido até à secção de medida 1,1D' , imposta por uma crescente influência da zona de recirculação que atinge aqui o valor máximo medido. Nas secções seguintes assiste-se à recuperação do fluido nesta zona central, que conduzirá à estabilização do escoamento, surgindo na secção 5,0D' já próximo da forma característica de um perfil desenvolvido.

De notar ainda que as evoluções da zona central do perfil sob influência do vórtice não provoca alterações visíveis nos valores máximos de velocidade axial medidos junto da parede superior (ou inferior) da conduta lateral.

4.4 - Campo de velocidades médias – Geometria 2 (análise comparativa)

Como foi referido anteriormente a análise do escoamento para esta geometria será realizada de forma comparativa em relação aos resultados apresentados para a geometria anterior, sendo referidos com mais detalhe os perfis medidos apenas nesta geometria aqui em análise.

4.4.1 - Conduta principal – montante da bifurcação

Estas medições não foram realizadas para a Geometria 1 ($A_b/A_s=1$), pelo que não é efectuada qualquer comparação. Entretanto, em termos globais o comportamento do escoamento será “extrapolável” para esse caso.

Da análise do escoamento imediatamente a montante da zona de bifurcação e com referência à secção de medida $-0,5D$, (ver Figura 4.11a), verifica-se que neste ponto o escoamento não apresenta perturbações visíveis, que serão impostas mais à frente pela divisão de caudal na bifurcação. Assim, para esta secção obtemos um perfil de velocidades, (componente axial, u_x), que mantém a simetria, relativamente ao eixo da conduta, característica de um escoamento desenvolvido.

Da mesma forma, o perfil obtido para a componente radial de velocidade, não apresenta assimetrias relevantes que indiciem qualquer perturbação do escoamento. Tal já não é o caso da secção de medida seguinte ($-0,1D$), onde já são visíveis, claramente, as alterações no escoamento impostas pela divisão de caudal. Aqui, embora os valores de velocidade (componente axial), se mantenham estáveis junto do eixo da conduta (comparação com o perfil anterior), já tal não acontece junto das paredes (interior e exterior) da conduta, ou seja, junto da parede exterior apresenta valores de 80% da velocidade média enquanto que na parede oposta, (do lado da derivação), os valores de velocidade axial coincidem com o valor da velocidade média de entrada.

A perturbação no escoamento detectada nesta secção é ainda confirmada pela análise do perfil de velocidades radiais, onde se verifica que em 2/3 do perfil apresenta valores positivos para esta componente de velocidade, sendo que o sentido positivo para esta componente de velocidade, indica movimento do fluido de encontro à parede interior da conduta).

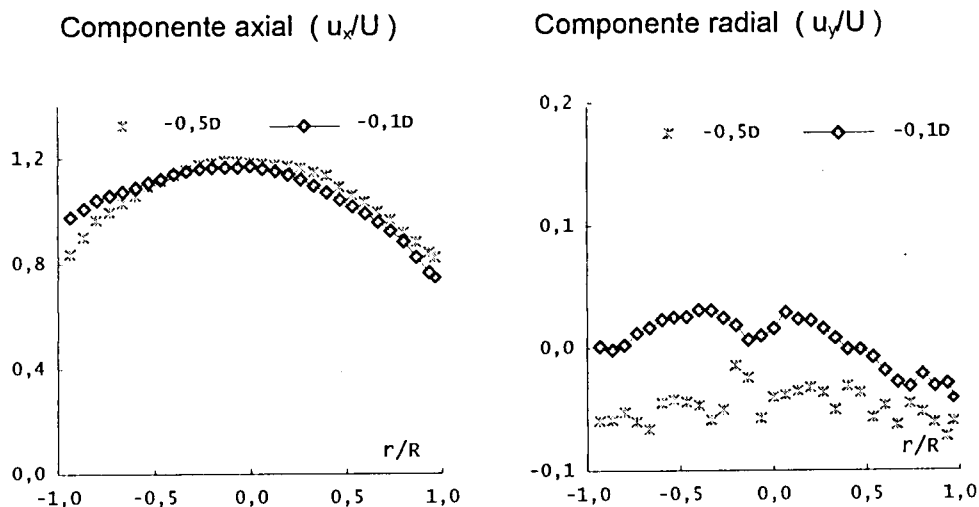


Figura 4.11a: Perfis de velocidade, componente axial e radial medidos no plano horizontal a montante da zona de bifurcação, (secções $-0,5D$ e $-0,1D$)

As características apontadas para o plano horizontal aparecem de novo evidenciadas nas medições obtidas ao longo do plano vertical, verificando-se a desaceleração do escoamento, ao longo do eixo vertical da conduta, quando avançamos da secção $-0,5D$ para a secção $-0,1D$ (ver figura 4.11b).

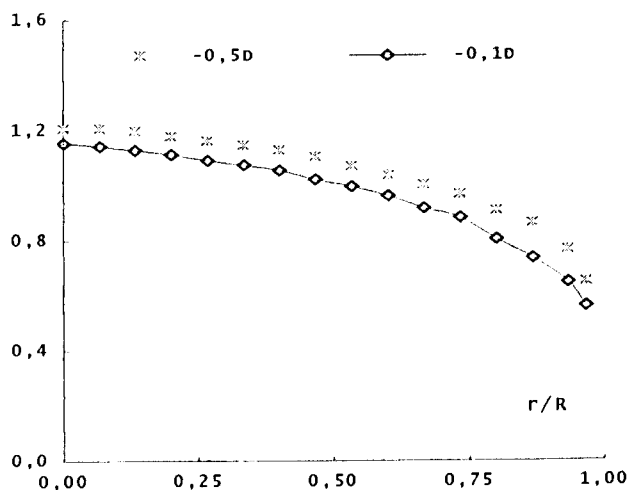


Figura 4.11b: Perfis de velocidade, componente axial, medidos no plano vertical a montante da zona de bifurcação (secções $-0,5D$ e $-0,1D$)

4.4.2 - Conduta principal – zona da bifurcação

Com o escoamento a atingir a entrada da tubagem de derivação, secção de medida 0.0D, e na sequência do que foi referido para a secção de medida anterior, agrava-se o desvio do fluído em direcção á parede da conduta que inclui a saída para a derivação.

De uma forma geral, e a partir da comparação (ver Figura 4.12) dos perfis de velocidade medidos na conduta principal, pode referir-se que os escoamentos aparecem praticamente coincidentes para as duas geometrias estudadas (geometria 1, a vermelho nas figuras). No entanto, e com referência à zona de derivação, pode apontar-se algumas características que aparecem mais marcadas na primeira ou na segunda geometria. Assim, logo à entrada da bifurcação (secção 0,0D), verifica-se uma maior influência do efeito de sucção da conduta lateral no escoamento obtido com a geometria 2.

Esta influência, no escoamento que percorre a conduta principal, traduz-se por um perfil de velocidades axiais mais assimétrico e com valores de velocidade, junto da parede interior, mais elevados, indicando um maior desvio do escoamento (no sentido da parede interior), para a segunda geometria estudada.

Nas secções de medida seguintes, os perfis de velocidade aparecem praticamente coincidentes, com excepção do perfil de velocidades radiais medido no final da bifurcação (1,0D_A). Aqui, particularmente, junto da parede interior, a componente radial de velocidade medida com a geometria 1 apresenta valores mais elevados.

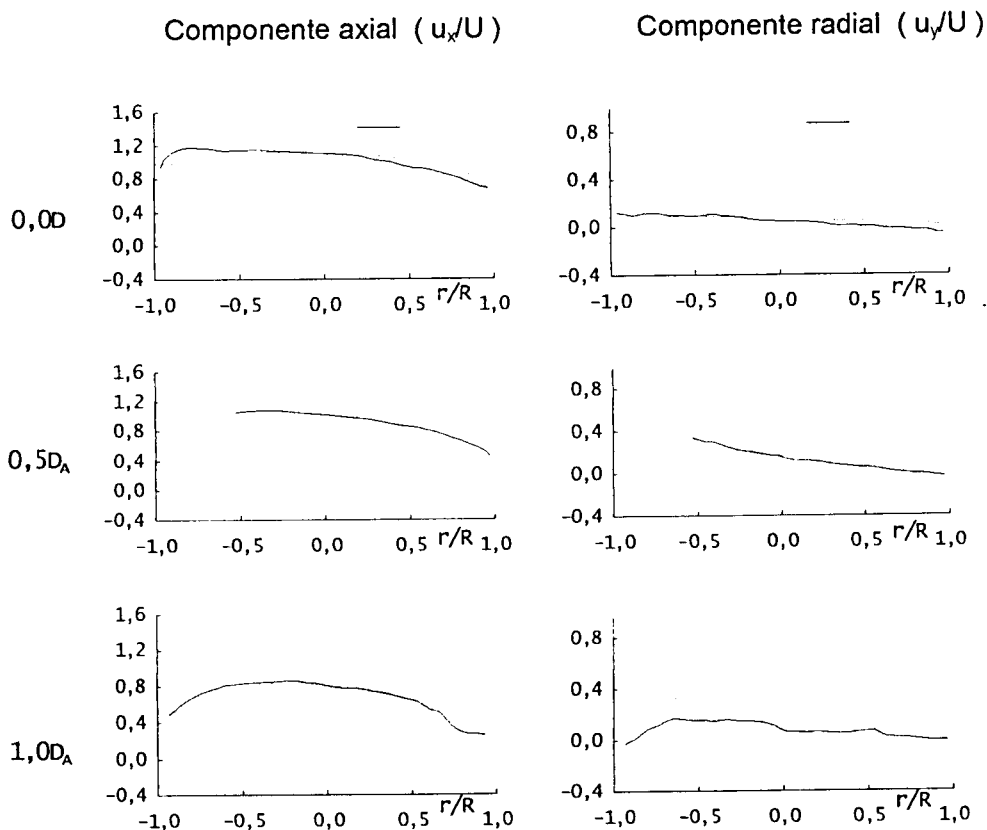


Figura 4.12: Perfis de velocidade, componente axial e radial, medidos no plano horizontal da conduta principal(zona de bifurcação)

Ao longo do eixo vertical, mantém-se a semelhança entre os perfis medidos nas duas geometrias, podendo referir-se no entanto, alguma tendência para uma maior desaceleração do escoamento, na geometria 1, junto das paredes, superior e inferior, da conduta principal.

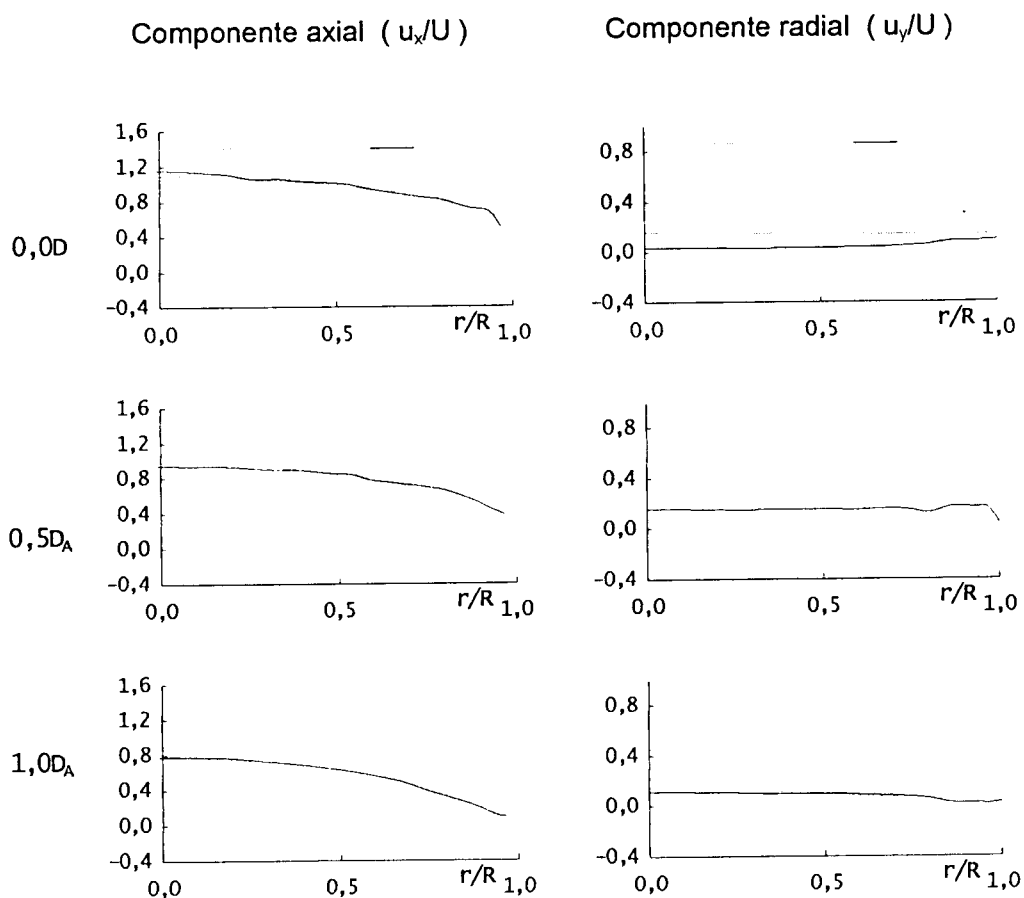


Figura 4.13: Perfis de velocidade, componente axial e radial, medidos no plano vertical da conduta principal (zona de bifurcação)

4.4.3 - Conduta principal – jusante da bifurcação

Após a bifurcação e a partir das Figuras 4.14 e 4.15 (comparação dos perfis de velocidade medidos), pode referir-se como principais diferenças entre os escoamentos em análise:

- um escoamento mais “concentrado” junto da parede interior para a geometria 2, onde se verificam valores de velocidade axial ligeiramente superiores;

- na geometria 1, a transferência de quantidade de movimento, tendo em vista a aceleração do escoamento que ocorre junto da parede exterior dá-se a partir do escoamento anexo à parede superior (e inferior) da conduta (ver componente "radial" de velocidade na Figura 4.15).
- Na geometria 2, esta transferência de quantidade de movimento ocorre a partir das zonas do escoamento anexas às paredes, interior, superior e inferior da conduta (ver componente "radial" nas Figuras 4.14 e 4.15).

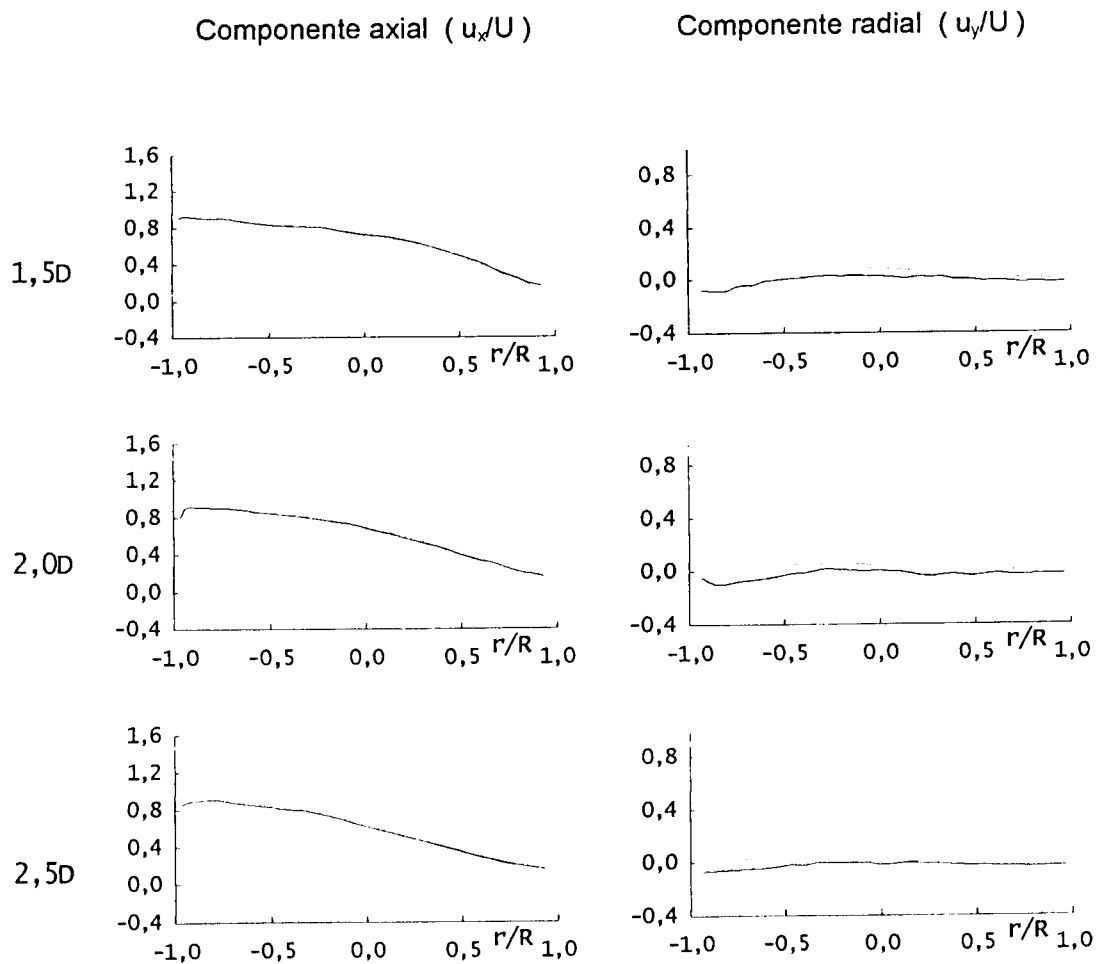


Figura 4.14: Perfis de velocidade, componente axial e radial, medidos no plano horizontal da conduta principal (jusante da bifurcação)

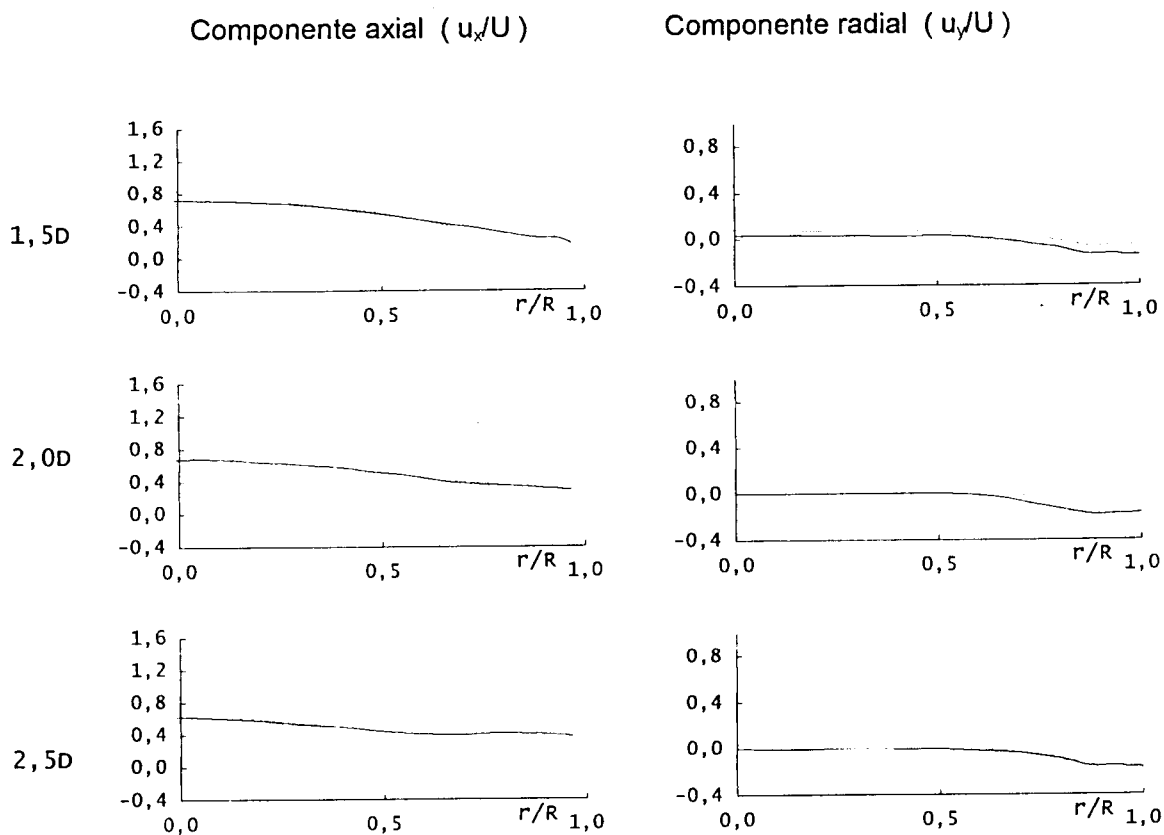


Figura 4.15: Perfis de velocidade, componente axial e radial, medidos no plano vertical da conduta principal (jusante da bifurcação)

4.4.4 - Conduta lateral

De uma forma geral, as diferenças apresentadas entre os perfis medidos ao longo da conduta lateral, deverão ser justificadas pela diferença de dimensão das zonas de recirculação obtidas, bem como, através de uma adimensionalização, dos perfis de velocidade, que leve em conta a velocidade média do escoamento na conduta lateral.

No entanto, importa aqui referir, algumas características dos escoamentos medidos que apresentam alguma relevância através das diferenças detectadas. Assim, e com referência à secção de medida que faz a ligação das duas condutas (secção 0,0D'), verifica-se um melhor alinhamento do escoamento com a conduta lateral junto da parede interior da conduta (ver figura 4.16a, componente axial de velocidade).

Sendo a secção transversal da conduta lateral menor na geometria 2, e uma vez que é imposto o mesmo desvio de caudal, nas duas geometrias em estudo, verifica-se que o escoamento é forçado a um melhor alinhamento com a conduta lateral. Estas características aparecem ainda mais marcadas no perfil de velocidades radiais (à direita na figura 4.16a), onde se verifica que o alinhamento do escoamento aparece mais marcado, na geometria 2, a partir do eixo da conduta, junto da parede exterior os valores desta componente de velocidade decrescem abruptamente não se verificando a mesma situação para a primeira geometria estudada.

As secções de medida $0,5D'$ e $0,577D'$ (medidas na geometria 1 e geometria 2, respectivamente), apresentam diferenças importantes, especialmente para a componente radial de velocidade. Uma vez que não são secções exactamente coincidentes não serão retiradas ilações no que respeita às diferenças apresentadas porque esta zona em análise as características do escoamento são alteradas rapidamente.

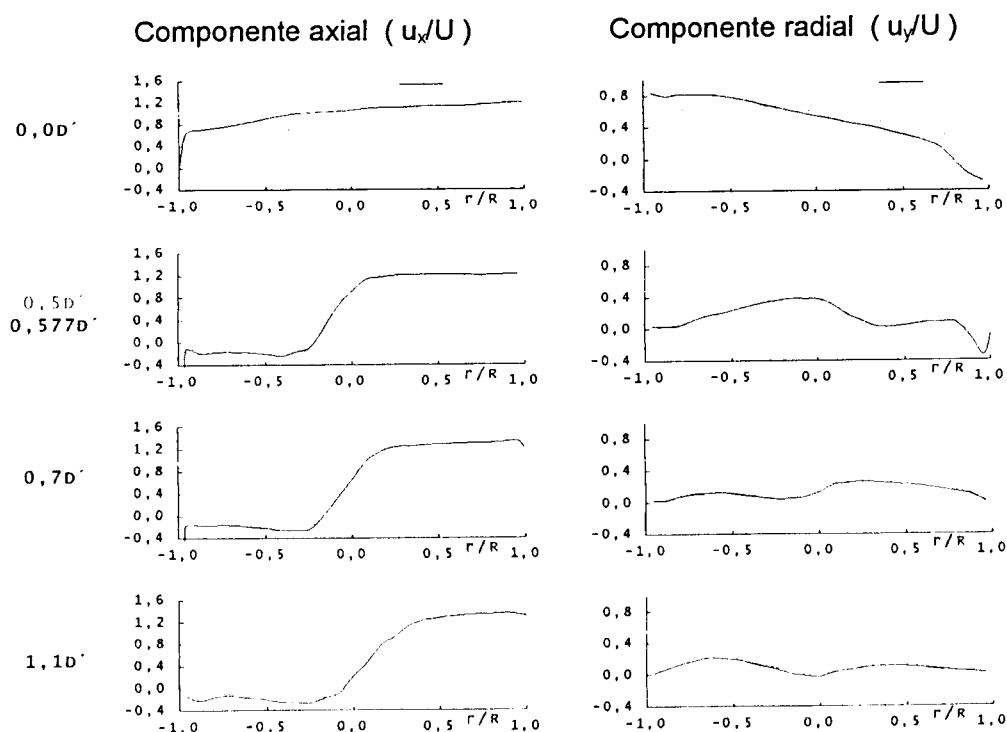


Figura 4.16a: Perfis de velocidade, componente axial e radial, medidos no plano horizontal da conduta lateral (secções $0,0D'$; $0,5D'$; $0,7D'$ e $1,1D'$)

As secções medidas que apresentam a separação do escoamento (figuras 4.16a e 4.16b), indicam como principais diferenças:

- uma extensão do vórtice, para o interior da conduta, maior na geometria 1;
- gradientes de velocidade, na zona de transição escoamento principal/recirculação, mais graves na geometria 2;
- valores negativos de velocidade axial, no interior da recirculação, com maior intensidade na geometria 2.

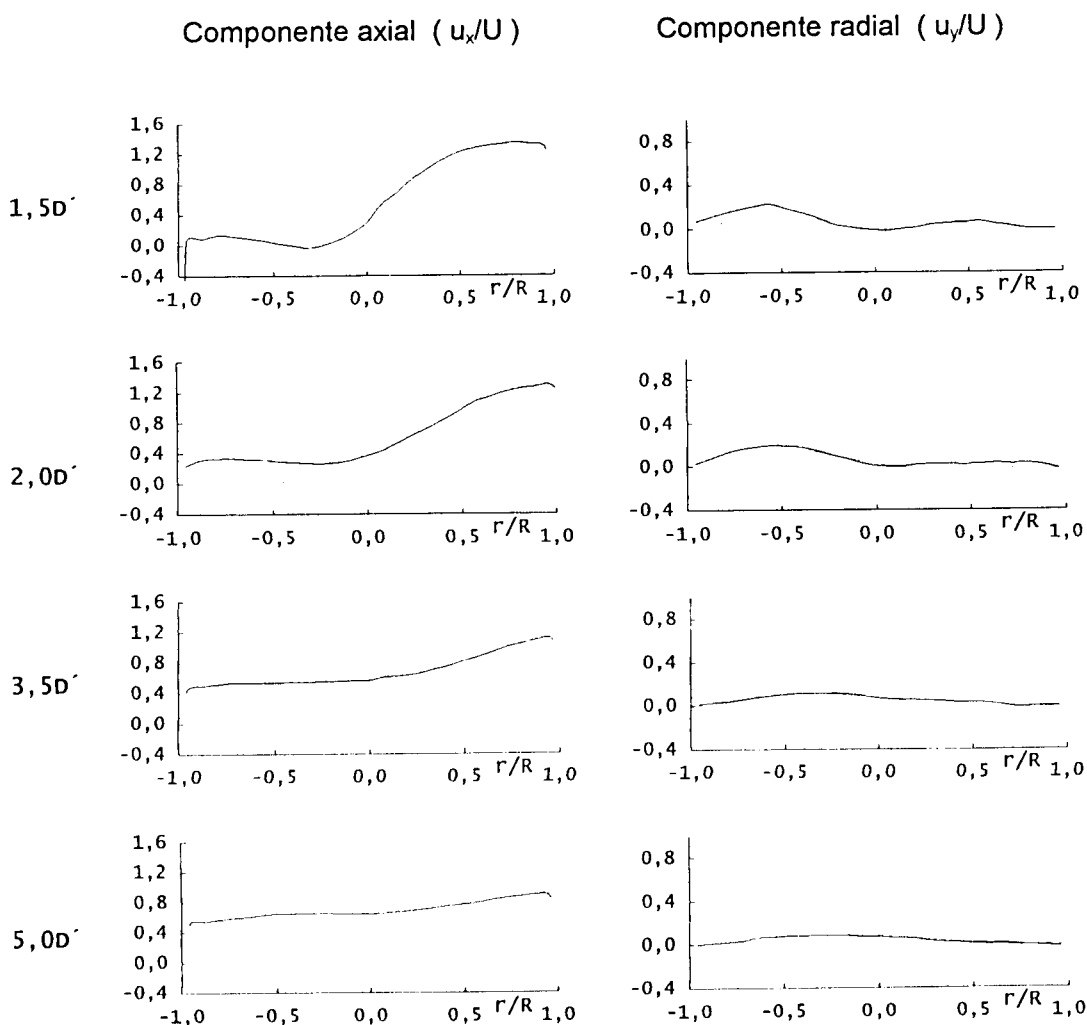


Figura 4.16b: Perfis de velocidade, componente axial e radial, medidos no plano horizontal da conduta lateral (secções 1,5D' ; 2,0D' ; 3,5D' e 5,0D')

As características apontadas indicam que o bloqueio à passagem do escoamento principal, imposto pela zona em recirculação, será maior para a geometria 2, o que implica o estabelecimento de maiores gradientes de velocidade entre a recirculação e a zona de jacto do escoamento bem como entre esta e a parede exterior da conduta. Assim é de esperar uma produção turbulenta mais importante na geometria 2, o que implica uma maior dissipação de energia.

Os perfis de velocidade obtidos para a componente radial, nas duas geometrias, apresentam uma evolução semelhante. No início desta conduta os valores máximos para esta componente de velocidade aparecem junto da parede interior, impostos pelo escoamento na conduta principal.

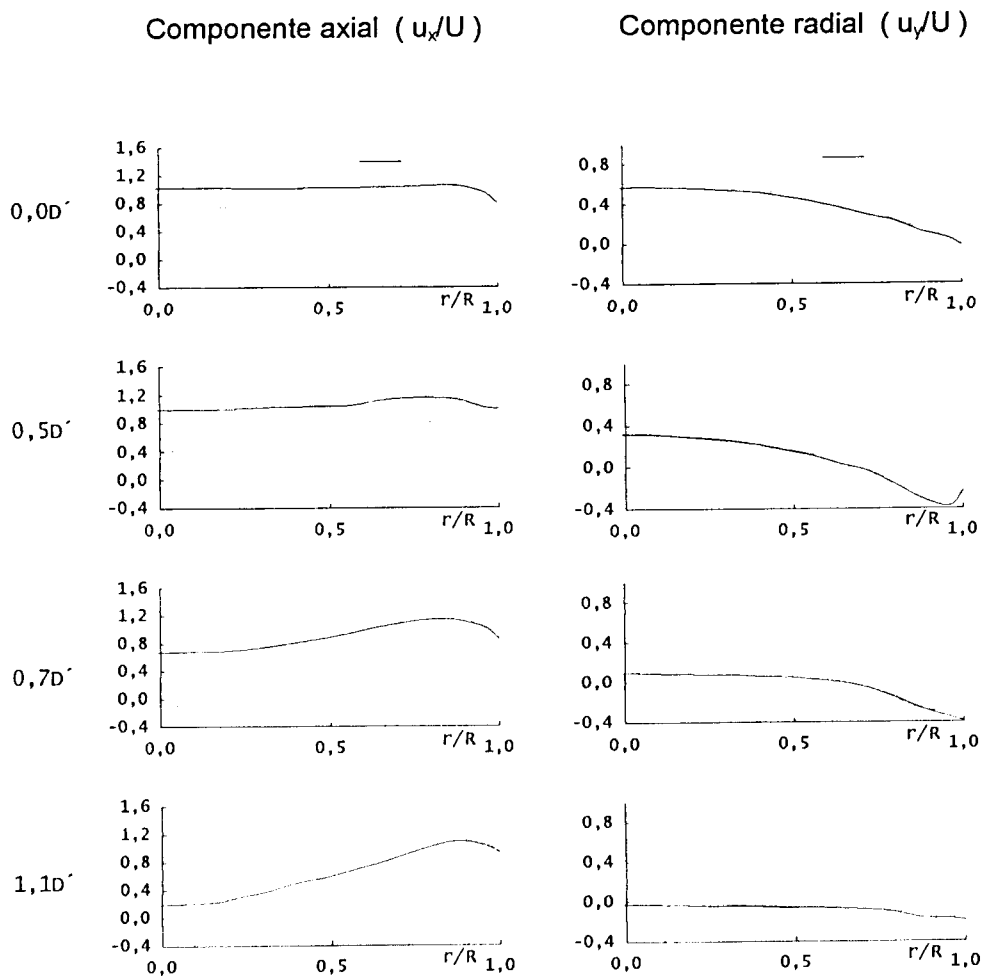


Figura 4.17a: Perfis de velocidade, componente axial e radial, medidos no plano vertical da conduta lateral (secções 0,0D' ; 0,5D' ; 0,7D' e 1,1D')

Até à secção $0,7D'$ esta zona de níveis máximos aparece em deslocamento no sentido da parede exterior da conduta, indicando alguma distorção do escoamento principal (zona de “jacto”) em relação ao eixo da conduta.

Na zona final da recirculação (secções $1,5D'$; $2,0D'$; $3,5D'$ e $5,0D'$) os valores máximos da componente radial aparecem de novo ao longo do raio interior i.e. aparecem no interior da recirculação, o que indica uma transferência de quantidade de movimento do interior da recirculação para o escoamento principal. Analisando os perfis da componente tangencial medidos ao longo do eixo vertical (figuras 4.17a e 4.17b) verifica-se que a transferência de quantidade de movimento referida é compensada pelo fluxo oriundo do escoamento a ocorrer junto das paredes, superior e inferior da conduta.

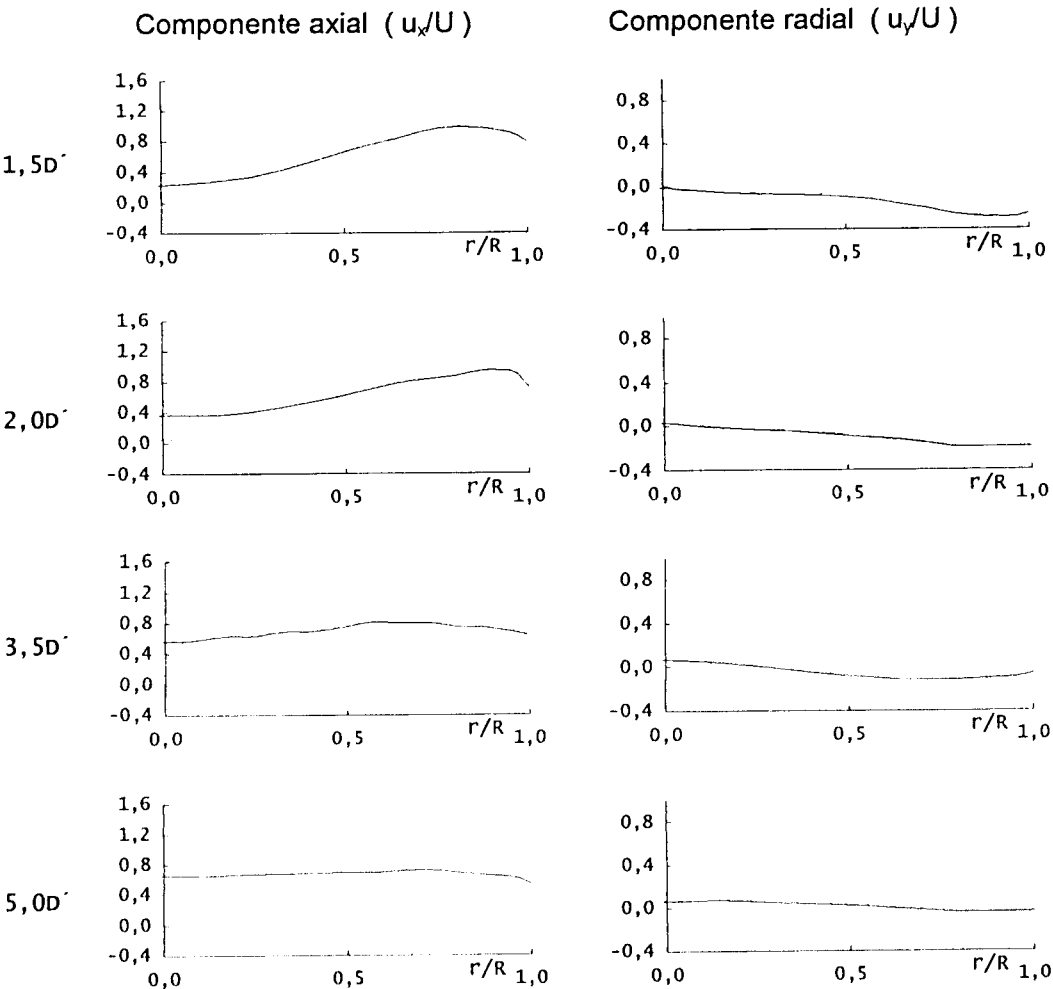


Figura 4.17b: Perfis de velocidade, componente axial e radial, medidos no plano vertical da conduta lateral (secções $1,5D'$; $2,0D'$; $3,5D'$ e $5,0D'$)

Como foi referido anteriormente, as zonas de recirculação obtidas, para a geometria 1 e geometria 2 apresentam dimensões diferentes. Sendo menor na geometria 2, verifica-se para esta geometria uma mais rápida recuperação do escoamento junto da parede interior o que permite a aceleração do redesenvolvimento do escoamento.

5 – CARACTERIZAÇÃO DAS ZONAS DE SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO

5.1 - Caracterização das medições efectuadas

Pretendendo-se caracterizar as zonas de separação do escoamento, nas duas geometrias em estudo, efectuaram-se medições que permitiram determinar, por interpolação, o comprimento de separação junto da parede. Para esse efeito, identifica-se o ponto de separação do escoamento e correspondente ponto de “recolamento” da veia líquida.

Para a geometria 2 ($A_b/A_s=0,7$), estas medições foram complementadas por forma a permitir caracterizar, também, a linha de velocidade (média pontual) nula.

Estas caracterizações foram efectuadas procurando apurar o efeito da:

- i) variação da partição de caudal Q_1/Q_3 ;
- ii) variação do número de Reynolds do escoamento.

Assim, para a geometria 1 estudada ($A_b/A_s=1,0$) e referindo-nos à conduta lateral, foram efectuadas medições para as relações $Q_1/Q_3 = 0,0 ; 0,05 ; 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8 ; 1,0$, mantendo-se o número de Reynolds do escoamento com um valor de, aproximadamente, 36000. O efeito da variação do número de Reynolds foi avaliado apenas para a razão de caudais: $Q_1/Q_3=0,5$, efectuando-se medições para escoamentos com números de Reynolds de entrada de alimentação, na tubagem principal, com os valores, aproximados, seguintes: 5000 ; 10000 ; 15000 ; 20000 ; 30000 ; 40000 .

Nesta mesma geometria, e reportando-nos agora a medições realizadas na conduta principal, para o número de Reynolds de entrada de cerca de 36000, apresentam-se também resultados, mas apenas para as relações $Q_1/Q_3 = 0,9 ; 0,8$ e $0,7$, confirmando-se que não se verifica a separação do escoamento, nesta conduta, para valores de $Q_1/Q_3 < 0,7$.

Para a outra geometria estudada ($A_b/A_s=0,7$), foram avaliados os comprimentos de separação do escoamento em ambas as condutas em função da razão de caudais, Q_1/Q_3 , mas também a evolução da linha de velocidade (média pontual) nula ao longo do

plano diametral horizontal. Essa linha obtida através da identificação dos pontos de velocidade nula em todo o interior do escoamento permite, de forma aproximada, avaliar toda a extensão da zona em recirculação. A análise da influência do número de Reynolds não foi aqui considerada por opção tomada para otimização do tempo disponível para as medições, tendo em atenção que, para a geometria 1, não se constatarem alterações de comportamento significativas para a gama de Re superiores a 10000.

Pode constatar-se que os vórtices detectados na conduta principal localizam-se junto à parede exterior (oposta à conduta de derivação), e em termos genéricos, pode-se considerar o ponto de separação no alinhamento do final da zona de bifurcação. Na conduta lateral os vórtices detectados ocorrem junto à parede interior e o ponto de separação coincidente com a aresta de ligação das condutas.

5.2 - Considerações teóricas

Importará aqui referir algumas características dos escoamentos com separação onde, e de acordo com [Novais, B. [23]], “As partículas de fluido no seu movimento retardado na camada limite nem sempre permanecem na imediata vizinhança da parede. Em certos casos, a espessura da camada limite vai aumentando substancialmente para jusante, passando o escoamento a verificar-se, junto da fronteira, em sentido contrário, ..., destacando-se a camada limite da parede”.

Pode ainda referir-se que, em escoamentos permanentes, (sendo esta a situação em estudo), a separação só se verifica se estes forem retardados, situação em que o gradiente de pressão é positivo e desfavorável à normal evolução do escoamento, aparecendo dentro desta região uma distribuição de pressão que se afasta consideravelmente da que ocorre na zona de escoamento desenvolvido.

Como exemplo da distribuição de pressão ao longo das paredes da conduta, onde surgem zonas de separação do escoamento, podem referir-se as medições efectuadas por Khodadadi et al , obtidas no estudo de um tê de secção rectangular e representadas na Figura 5.1. Nesta distribuição de pressão, e considerando a parede exterior da conduta principal (Figura 5.1a), verifica-se a ocorrência de um gradiente de pressão favorável ($dP/dx < 0$) até junto da entrada da zona de bifurcação do escoamento, invertendo-se então a evolução de pressão para a parede interior da conduta lateral,

justificada com o retardamento do escoamento sujeito a um alargamento súbito de secção. São assim criadas as condições para o aparecimento de uma zona de recirculação, que se estabelece logo após a zona de bifurcação.

Efectivamente, pode verificar-se (Figura 5.1b) que ao longo da conduta lateral e junto da parede onde surge o vórtice, verifica-se uma distribuição de pressão semelhante mas de valores, normalmente, mais elevados, bem como gradientes de pressão ainda mais desfavoráveis ao escoamento, surgindo o ponto de separação do escoamento coincidente com a aresta de ligação das duas condutas envolvidas. Podemos ainda referir uma distribuição de tensão na parede, no interior da zona em recirculação, com valores muito baixos (praticamente nulos) podendo mesmo tomar valores negativos, mais frequentemente no interior do vórtice que surge na conduta lateral.

A jusante da recirculação, (junto da parede exterior da conduta), verifica-se a recuperação do escoamento, de novo com gradiente de pressão favorável.

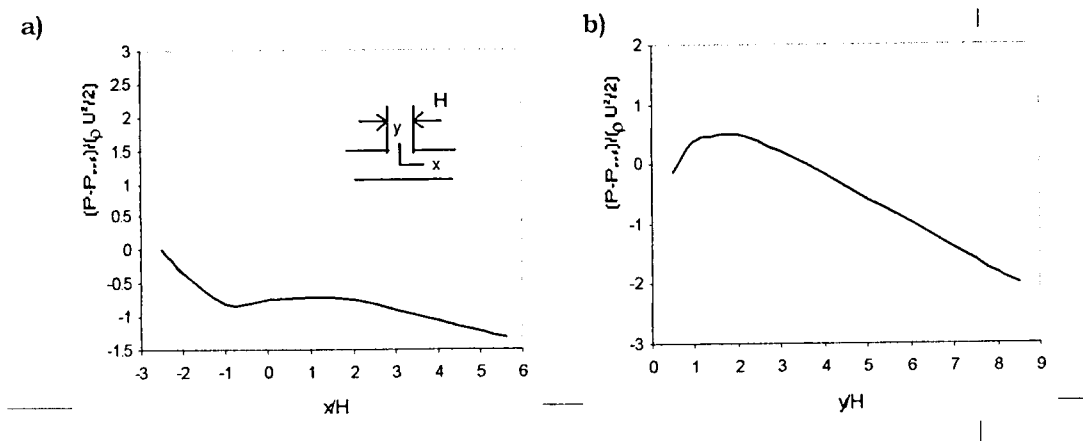


Figura 5.1: Distribuição de pressão apresentada para Re=102 por J.M.Khodadadi: a) junto da parede exterior da conduta principal , b) junto da parede interior da conduta lateral

5.3 - Determinação dos pontos de velocidade (média pontual) nula

A posição desses pontos (na parede) é obtida por extrapolação dos pontos caracterizadores da linha de velocidade (média pontual) nula. Neste caso, como se

pode distinguir na Figura 5.2, foram considerados os valores da velocidade média nos pontos à distância 2,5; 1,5 e 0,5mm da parede para essa caracterização. Esses valores foram obtidos por interpolação de um mínimo de quatro valores da componente axial de velocidade média (2 positivos e 2 negativos), a cada nível, suficientemente próximos entre si.

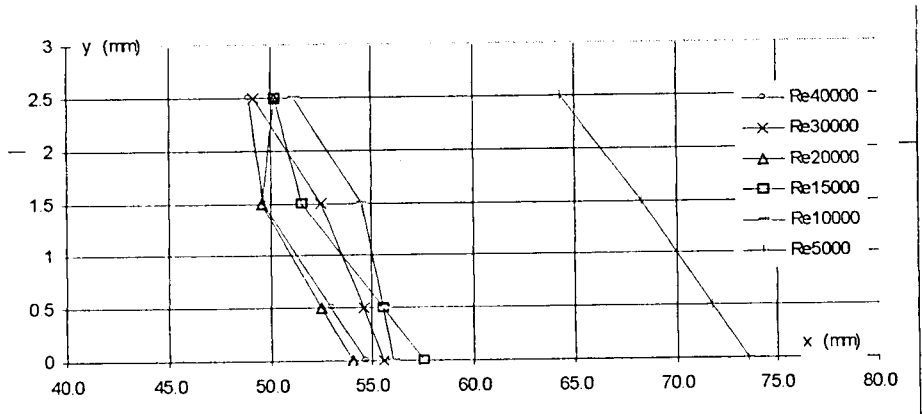


Figura 5.2: Linhas de velocidade nula junto da parede interior da conduta lateral para diferentes números de Reynolds, geometria 1.

5.4 - Separação do escoamento na conduta principal

Dos ensaios realizados, tendo em vista a determinação das linhas de separação do escoamento ao longo da conduta principal, constata-se que esta separação só se verifica a partir da condição do escoamento que estabelece uma razão de caudais, entre a conduta de entrada e a conduta de derivação, superior a 0,5. Sendo que a partição de caudal, mais próxima da condição referida atrás, para a qual foi detectada uma pequena recirculação, corresponde a $Q_1/Q_3=0,6$ (geometria 2). Para a geometria 1 a separação do escoamento só ocorre para uma partição de caudal Q_1/Q_3 igual ou superior a 0,7.

Na literatura consultada, surge como referência a condição de se estabelecer separação do escoamento na conduta principal, (da mesma forma como aparece indicado nos resultados deste trabalho), para caudais a percorrerem a conduta lateral superiores a 50% do caudal de entrada. De referir, no entanto, que esta condição aparece associada a geometrias com as condutas ligadas em ângulo recto.

Apresenta-se, de seguida, uma análise do escoamento medido, junto da parede exterior da conduta principal, para a razão de caudais: $Q_1/Q_3=0,5$ bem como a evolução do perfil de velocidades, medido no alinhamento do final da bifurcação ($1,0D_A$), até à parede da conduta, considerado aqui por apresentar características próximas de um escoamento na zona de separação. Assim, e reportando-nos à Figura 5.3b, verifica-se para o perfil $0,5D_A$ a forma típica de um escoamento acelerado com gradiente de pressões (dP/dx) de valor negativo, sendo ainda negativo, o valor da segunda derivada de velocidade (d^2u/dx^2), junto da fronteira e mantido para o interior da conduta.

Na secção de medida seguinte ($1,0D_A$), surge um perfil, com uma zona na aproximação à parede, com características de escoamento retardado e gradiente de pressão adverso, onde se consegue isolar um ponto de inflexão no perfil de velocidades, (Figura 5.3a). Surge, simultaneamente, a anulação da primeira derivada de velocidade que, a verificar-se na fronteira coincidiria com o ponto de separação do escoamento. Logo após esta zona, verifica-se na camada limite o inverter destas características, onde a segunda derivada de velocidade volta a valores negativos, não se verificando assim condições para a separação do escoamento.

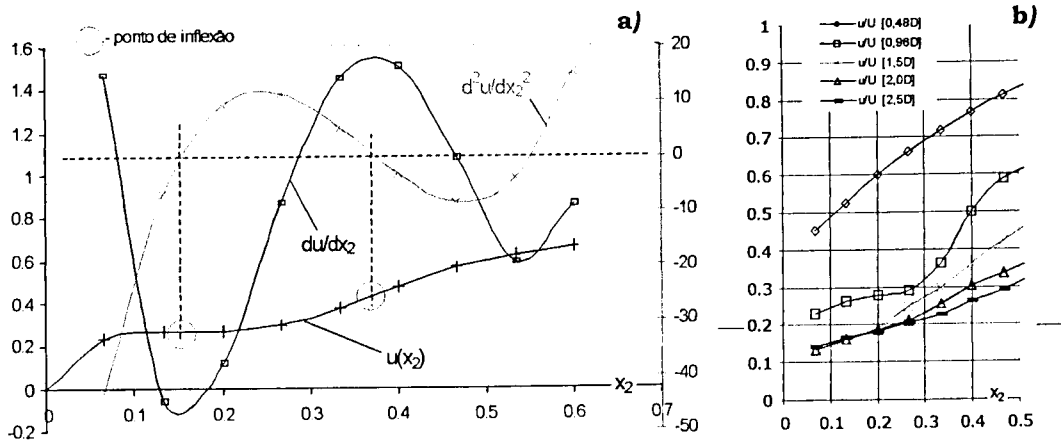


Figura 5.3: Evolução dos perfis de velocidade até junto da parede exterior da conduta principal, ao longo da bifurcação e para jusante desta, (b) , bem como características geométricas específicas do perfil medido no alinhamento do final da bifurcação, (a)

Nas secções de medida seguintes, a jusante da bifurcação, a alteração da curvatura na forma dos perfis de velocidade é sucessivamente atenuada, o que define a recuperação do escoamento numa zona de gradiente de pressão mais favorável, não sendo reunidas, também aqui, condições no escoamento que permitam o germinar de um ponto de separação na fronteira.

5.4.1 - Geometria 1

Analizando agora a evolução do comprimento da zona de separação (geometria 1), medido junto da parede exterior da conduta principal, verifica-se, como referido anteriormente, o surgimento de escoamentos secundários apenas para partições de caudal: Q_1/Q_3 superiores a 0,7 (ver Figura 5.4). Para a razão de caudais: $Q_1/Q_3 = 0,7$ que serve como condição limite para que se verifique uma zona de recirculação, surge um vórtice de dimensões residuais, com extensão de 3mm, detectado apenas muito próximo da parede da conduta, aparecendo localizado num ponto a 80mm da entrada da bifurcação.

Elevando o caudal desviado para a conduta lateral (para 80% do caudal de entrada) verifica-se o alargamento exponencial, relativamente à situação anterior, da zona de separação. Não tendo sido medida a envolvente completa da linha de velocidade nula, particularmente no interior da conduta, não se pode definir a largura máxima ocupada pela recirculação, embora a evolução desta linha junto da parede deixe adivinhar uma largura máxima abaixo dos 5mm. O ponto de separação surge aqui a 50mm da entrada da bifurcação, verificando-se o recolamento a 53mm deste.

Para a razão de caudais $Q_1/Q_3 = 0,9$ agrava-se a dimensão da zona de recirculação, que se pode definir com um comprimento junto da fronteira de 75mm sendo o ponto de separação encontrado a 40mm do início da bifurcação.

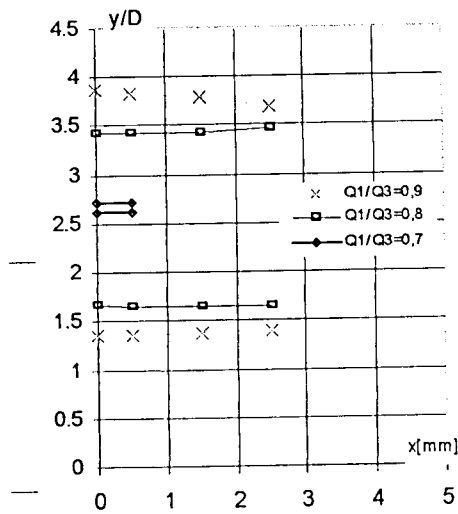


Figura 5.4: Linhas de separação junto da parede exterior da conduta principal, para as partições de caudal indicadas, geometria 1

5.4.2 - Geometria 2

Na figura seguinte, apresentam-se os vórtices identificados, definidos a partir das linhas de velocidade nula que envolvem estes escoamentos secundários. Para uma razão de caudais igual a 0,6 estabelece-se uma zona de recirculação que permanece, ao longo da sua extensão, sempre no interior de uma banda inferior a 2mm. Esta banda está anexa à parede da conduta oposta à derivação, apresentando, no entanto, uma dimensão longitudinal próxima de 23mm, (0,76D), e com ponto de separação situado a jusante da zona de bifurcação.

Impondo um escoamento com razão de caudais igual a 0,7 verifica-se um alargamento substancial da zona em recirculação, com o ponto de separação a deslocar-se para montante do escoamento, aparecendo agora junto do final da bifurcação. Esta linha de velocidade nula, identificada, estende-se para o interior da conduta até ocupar um valor máximo de 55% do raio exterior da conduta, que surge aqui na sua zona frontal para jusante, sendo definido ainda por um comprimento de separação, medido na fronteira, com 47mm, (1,58D).

Para as razões de caudal de valor superior, medidas, verifica-se o alargamento sucessivo do vórtice, traduzindo a menor eficiência das forças de inércia associadas ao fluido em escoamento (ver Figura 5.5). Definindo as suas dimensões máximas, foram medidos comprimentos de separação na fronteira com valores de 55mm e 78mm, bem como alargamentos limite com valores de 14,55mm, (equivalente a metade do diâmetro da conduta), e 18,4mm, (o que inclui 20% do raio interior da conduta), respectivamente para as razões de caudal: $Q_1/Q_3=0,8$ e $0,9$.

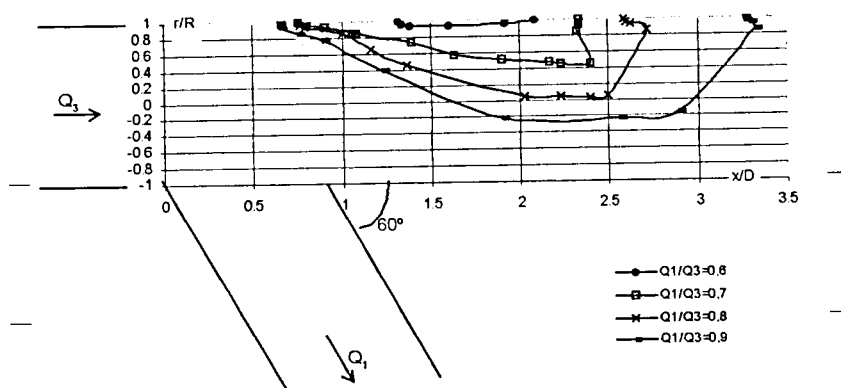


Figura 5.5: Linhas de separação na conduta principal, plano horizontal para as partições de caudal indicadas. Geom. Derv60° $A_b/A_s=0,7$

5.5 - Separação do escoamento na conduta lateral

5.5.1 - Geometria 1

Para a geometria 1 estudada, ($A_b/A_s=1$), apresenta-se, nas figuras seguintes a informação obtida (resumida graficamente), no que concerne a caracterizações do comprimento de separação na conduta lateral em função do número de Reynolds do escoamento de entrada (ver Figura 5.6), bem como função da razão de caudais: Q_1/Q_3 , (ver Figura 5.7), e obtidas ao longo do escoamento na conduta lateral.

Dos resultados obtidos, verifica-se uma evolução aproximadamente constante do comprimento da zona de separação, para a gama de números de Reynolds medida entre os valores apróximados 10000 e 40000, sendo o valor limite inferior para este intervalo equivalente a 1,8 vezes o diâmetro da conduta enquanto o valor máximo atinge 1,92 vezes esse diâmetro. Para o menor número de Reynolds caracterizado,

($Re=5000$), verifica-se um aumento significativo da recirculação junto da fronteira, com valor aproximadamente igual a 2,45 vezes o diâmetro da conduta, deixando adivinhar características de uma zona de transição de regime turbulento/laminar.

Na Figura 5.2, aparece representada a aproximação das linhas de velocidade nula à parede e consequente definição do ponto de “recolamento”, por extrapolação a partir destas. Verifica-se que para todos os números de Reynolds medidos acima de 5000, a extrapolação termina junto da parede da conduta, à volta de um ponto definido a 55mm para jusante da aresta de ligação das condutas.

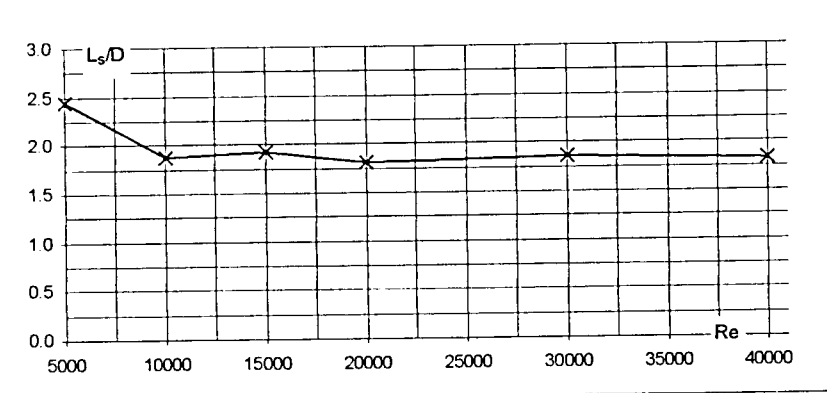


Figura 5.6: Variação do comprimento de separação, (L_s), junto da parede interior da conduta lateral com o número de Reynolds, Geometria 1

Analisando agora a evolução do comprimento da zona de separação como função da razão de caudais estabelecida e registada para um número de Reynolds na entrada da bifurcação de cerca de 36000 (Figura 5.7), verifica-se, junto da parede, a diminuição da zona em escoamento secundário com o aumento de caudal a percorrer a conduta de derivação. De referir que a evolução apontada anteriormente não inclui, o valor medido para o escoamento a verificar-se apenas na conduta principal, pelo que a zona de separação medida nesta situação corresponde a pequenas oscilações do fluido na derivação, (separação incipiente), e que não devem ser consideradas como um escoamento equivalente regular.

O valor máximo registado, acontece para a partição de caudal: $Q_1/Q_3=0,05$ com uma extensão de 140mm, enquanto que, se desviar-mos todo o caudal de entrada para a derivação obtem-se uma zona de separação que ocupa apenas 9,6mm da parede da

conduta e corresponde ao vórtice de menor dimensão definido no estudo da conduta lateral.

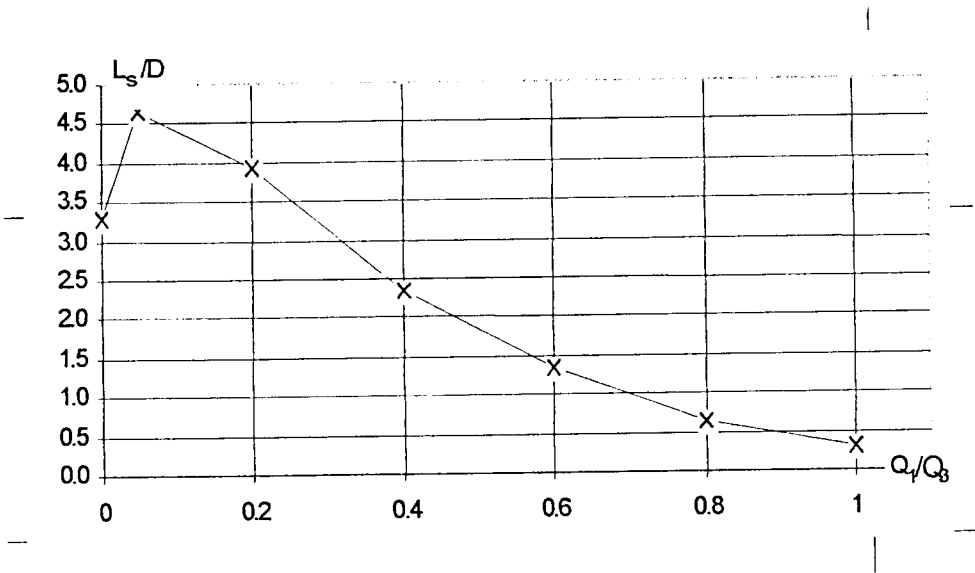


Figura 5.7: Variação do comprimento de separação, (L_s), junto da parede, com a partição de caudal. Geometria 1

5.5.2 - Geometria 2

Para a segunda geometria estudada ($A_b/A_s=0,7$), e impondo um número de Reynolds de entrada de aproximadamente 36000, verifica-se novamente, a separação do escoamento qualquer que seja a partição de caudal estabelecida, (ver Figura 5.8).

A área ocupada pelos vórtices, no plano horizontal, aparece com dimensão inversamente proporcional ao valor do caudal desviado para a conduta lateral, confinando o escoamento principal a uma zona junto da parede oposta à recirculação. Esta zona irá aumentar progressivamente com o incremento de caudal desviado que, por apresentar forças de inércia do fluido sucessivamente mais intensas permite ultrapassar gradientes de pressão desfavoráveis, alargando-se assim a sua zona de influência. No limite, quando todo o caudal de entrada é desviado no sentido da conduta

lateral, ($Q_1/Q_3 = 1,0$), estas forças permitem alargar a secção percorrida pelo escoamento principal à quase totalidade da conduta.

Analisando isoladamente a evolução das linhas de velocidade nula e iniciando pela partição de caudal 0,05 que apresenta, naturalmente, a maior área ocupada pelo vórtice, verifica-se que a maior extensão da recirculação aparece alinhada com a secção de ligação das duas condutas. Esta decresce com uma forma aproximadamente linear para jusante até junto da parede e, de seguida, aproxima-se da fronteira com uma evolução normal a esta.

Estas condições do escoamento impõem um vórtice que ocupa 40% do raio exterior da conduta, na sua largura máxima, assim como um comprimento de separação que atinge um valor próximo dos 159mm, (5,3D). Se se considerar como referência a área, ($A_{0,5}$), ocupada pelo vórtice medido ao longo do plano diametral horizontal da conduta, estabelecendo uma relação de caudais: $Q_1/Q_3 = 0,5$, verifica-se que a esta linha de separação corresponde um vórtice que se estende por uma área 4,7 vezes a área de referência.

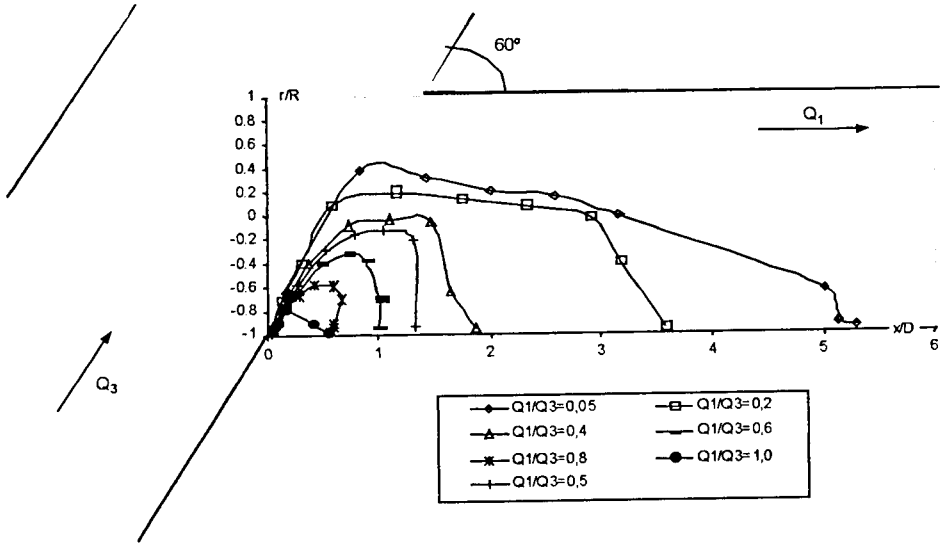


Figura 5.8: Linhas de separação na conduta lateral, plano horizontal para as partições de caudal indicadas, geometria 2

Para a linha de velocidade nula seguinte, ($Q_1/Q_3 = 0,2$), aparece novamente, a largura máxima do vórtice junto da secção de ligação das condutas e ocupando 20% do raio exterior.

Apresenta uma zona central, (aproximadamente $2,5D$ de extensão), onde a largura do vórtice decresce suavemente até atingir o eixo da conduta e de seguida aparece com uma evolução abruptamente decrescente até atingir o ponto de “recolamento” na fronteira, que ocorre aqui a 108 mm da aresta de ligação das condutas, correspondendo a uma área equivalente a 3,8 vezes a área de referência.

Para a razão de caudais, $Q_1/Q_3 = 0,4$, na zona central do vórtice aparece a largura máxima que se estende até junto do eixo da conduta sendo o comprimento de separação junto da parede de 56mm, aqui a área que apresenta escoamento secundário equivale a aproximadamente $3/2$ da área: $A_{0,5}$.

Alterando as condições do escoamento para, $Q_1/Q_3 = 0,5$ aparece novamente, (na zona central do vórtice), a largura máxima que se estende até ocupar 85% do raio interior da conduta sendo o comprimento de separação junto da parede de 40mm.

Ao estabelecermos divisões de caudal que impõem mais de 50% do caudal de entrada a percorrer a conduta lateral, verificam-se comprimentos de separação do escoamento junto da fronteira de valores abaixo de 30mm, (equivalente ao diâmetro da conduta principal), medindo-se valores de 29,8mm; 17,8 mm e 16,4mm, respectivamente, para as partições de caudal: $Q_1/Q_3 = 0,6$; 0,8 e 1,0. Simultaneamente, estas relações de caudal apresentam áreas de ocupação, ao longo do plano diametral, pelos vórtices correspondentes que apresentam valores que diminuem exponencialmente. Concretizando, podemos referir que nas condições $Q_1/Q_3 = 0,6$ o vórtice ocupa, aproximadamente, 55% da área de referência, diminuindo para os 22% da área de referência quando se aumenta o caudal que percorre a conduta lateral para 80% do caudal de entrada.

Quando se desvia todo o caudal de entrada para a conduta de derivação, o vórtice fica confinado a uma área bastante reduzida, ao abrigo da aresta de ligação das condutas, que apenas inclui 3% da área ocupada pelo vórtice detectado na partição de caudal igual a 0,5.

6 – ESCOAMENTOS TURBULENTOS EM CONDUTA

6.1 – Considerações Teóricas

A presença de paredes sólidas a confinarem um escoamento, impõe condições que o tornam mais complicado relativamente a outros escoamentos “livres”, por exemplo: jactos ou esteiras. A restrição mais importante, prende-se com o facto de que a viscosidade do fluido, por mais pequena que seja, impõe uma condição de não deslizamento deste sobre a superfície, o que por si só irá contribuir para o incremento do problema de múltiplas escalas na análise dimensional da turbulência nesta geometria.

Numa breve referência pode referir-se como exemplo a escala de comprimento característica para o domínio de influência da viscosidade como sendo da ordem de ν/w , sendo w o valor característico da flutuação de velocidade, e o comprimento característico da espessura da camada limite δ , que para números de Reynolds elevados será muito maior que ν/w . A presença de escalas características de comprimento de dimensões distintas, como as referidas, implicam uma análise da dinâmica do escoamento, isoladamente, assim a influência da viscosidade, definida com uma pequena escala de comprimento não irá afectar o escoamento na sua totalidade, sendo de esperar que a sua influência se confina a uma pequena camada adjacente á superfície que limita o escoamento.

O comportamento dos escoamentos deste tipo implicam assim uma análise distinta para o interior da conduta e para a camada na superfície, que serão definidas com leis próprias num intervalo de validade específico, resultando ainda a necessidade de incluir métodos assintóticos para conciliar a conjugação e continuidade destas duas zonas do escoamento.

Embora surja a necessidade de tratar estes escoamentos separadamente, no interior e junto da fronteira, a equação de movimento para estes escoamentos aparece com uma forma relativamente simples, uma vez que este tipo de geometria impede o crescimento continuo da espessura da camada limite. Assim numa conduta com comprimento suficiente para o total desenvolvimento do escoamento, os perfis de velocidade acabam por se tornar independentes da posição axial x , para jusante no

escoamento, como resultado, os termos de inércia não lineares, $\left(U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right)$, são suprimidos. O que equivale a dizer que em escoamentos deste tipo, todas as derivadas relativas á coordenada x (axial) serão nulas com exceção do gradiente de pressão $\left(\frac{dP}{dx} \right)$ que aparece como força motriz do escoamento, vencendo a oposição das tensões de corte na parede da conduta.

Considerando uma geometria para a conduta, como indicado na figura seguinte:

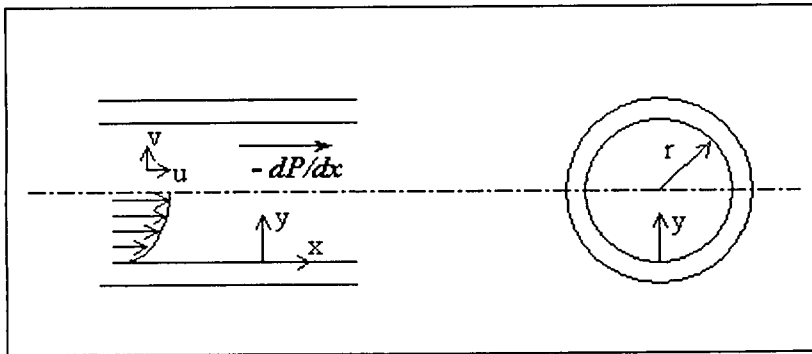


Figura 6.1: Representação esquemática da geometria em estudo

obtêm-se a seguinte equação para o escoamento médio, (sendo consideradas nulas todas as derivadas de quantidades médias normais ao plano xy) :

$$-u \frac{dU}{dy} + v \frac{dU}{dx} = \frac{1}{2} (y - r) \frac{dP}{dx}$$

Definindo a tensão de corte na parede por: ρu_*^2 , sendo u_* a velocidade de fricção, e fazendo um balanço integral de momento para escoamento desenvolvido temos:

$$2\pi r^2 = \pi r^2 \frac{dP}{\rho dx}$$

o que permite obter a equação de quantidade de movimento com a forma:

$$-\overline{uv} + v \frac{dU}{dy} = u_*^2 \left(1 - \frac{y}{r}\right)$$

Uma análise do escoamento permite concluir que as flutuações turbulentas de velocidade têm que satisfazer a condição de não deslizamento, pelo que a tensão de Reynolds, $(-\overline{uv})$, terá que ser nula na parede, resultando uma tensão de parede puramente viscosa. Por outro lado no eixo da conduta o valor de tensão terá que ser nulo, por imposição de simetria do escoamento $(-\overline{\rho uv} + \mu \frac{dU}{dy} = 0)$.

Neste tipo de escoamento a tensão de corte na parede pode ser determinada a partir das dimensões da conduta (diâmetro) e do gradiente de pressão $(\frac{dP}{dx})$.

Considerando aqui um escoamento em conduta lisa, e após adimensionalização com coordenadas de parede, podemos definir uma lei logarítmica para o perfil de velocidades, no interior da conduta, seguinte:

$$u^+ = A \ln y^+ + B ; \quad \text{sendo } u^+ = \frac{U}{u_*} \text{ e } y^+ = \frac{y}{r}$$

Os valores das constantes A e B foram determinadas em diversos estudos experimentais podendo referir-se como valores médios: A=2,5 e B=5. Num outro capítulo deste texto serão apresentados os resultados obtidos neste trabalho, que inclui

uma análise do perfil de velocidades médias turbulento obtido nas medições bem como a sua comparação com perfis obtidos por outros autores.

Analisa-se de seguida a sub-camada viscosa ($y^+ < 5$) de forma a apurar, qual a influência das tensões de Reynolds no balanço total de tensão para pequenos valores de y^+ .

Sendo natural aceitar-se que sobre a superfície todo o balanço de tensão se deve às tensões viscosas, resta identificar os fenómenos presentes na camada definida entre esta superfície e $y^+ = 5$. Alguns trabalhos experimentais indicam que no interior desta camada o valor das tensões de Reynolds permanece como uma pequena fracção do valor da velocidade de fricção, o que permite concluir que o escoamento, aqui, não será exactamente regular, mas as flutuações de velocidade não contribuem muito para a totalidade do campo de tensão uma vez que os efeitos da viscosidade são largamente superiores. Por vezes na literatura esta sub-camada viscosa aparece com a designação de sub-camada laminar, como referência a este anulamento quase completo do efeito das tensões de Reynolds. Pelo que se conclui que no interior desta camada o perfil de velocidades será linear ($u^+ = \frac{U}{u_*} = y^+$), quando se anula a

contribuição da componente $\overline{uv}$ do tensor. Apresenta-se na figura seguinte um esquema com a evolução do perfil de velocidades, genericamente referido como lei de parede, onde aparecem diferenciadas a sub-camada viscosa a zona de transição e a zona interior do perfil, (camada de inércia).

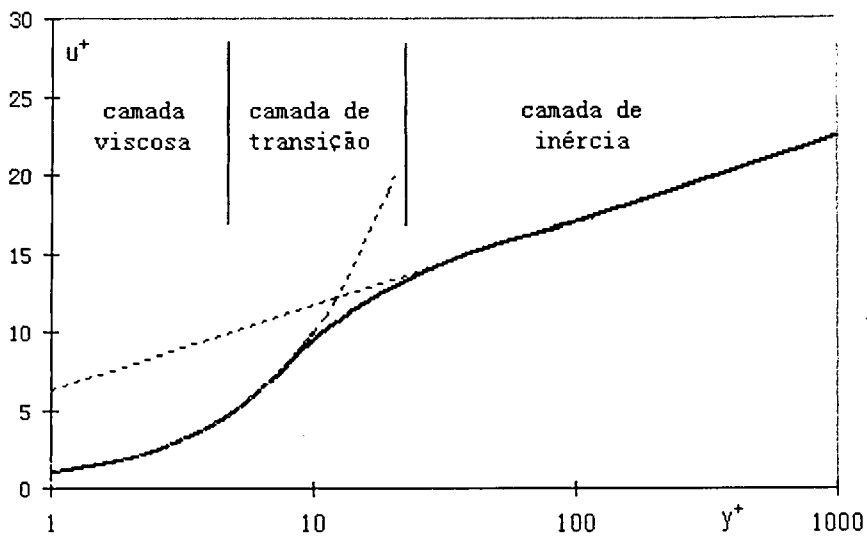


Figura 6.2: Lei de parede

Sendo um dos objectivos deste trabalho identificar características do escoamento medido que justifiquem os valores de perda de carga que se verificam ao longo das condutas bem como localmente na zona de bifurcação, apresentam-se de seguida algumas considerações sobre os mecanismos envolvidos no balanço de energia que ocorrem neste tipo de escoamento.

Genericamente pode referir-se o papel da camada anexa à superfície, como um mecanismo de anulamento da quantidade de movimento bem como da energia cinética associada ao escoamento médio. Esta energia cinética associada às velocidades médias é transferida para a superfície pelas tensões de Reynolds e convertida em energia cinética turbulenta, (equivalente a uma produção de turbulência), bem como em dissipação sob a forma de calor, (dissipação viscosa). Procedendo á integração do termo de transporte $\frac{\partial (\overline{uv} U)}{\partial y}$ entre a superfície e um valor y próximo da zona com

escoamento "interior", verifica-se que a perda de energia nessa região será da ordem de $\rho U_o u_*^2$ por unidade de área e de tempo, uma vez que U será muito próximo do valor da velocidade média do escoamento no limite desta sub-camada. A perda de energia por dissipação viscosa ocorre maioritariamente junto da parede, onde o gradiente de velocidade apresenta o valor máximo, e é da ordem de ρu_*^3 , mas estas perdas ocorrem ao longo de uma camada com espessura reduzida da ordem de ν/u_* , pelo que a maior parte da energia cinética do escoamento médio, transferida para a

superfície da conduta é aplicada na manutenção da energia cinética turbulenta.

Na zona interior do escoamento, as tensões de Reynolds apresentam um valor da ordem de ρu_*^2 e o gradiente de velocidade $\partial U / \partial y$ da ordem de u_* / r , o que integrado ao longo de toda a zona interior do escoamento resulta num valor da ordem de ρu_*^3 para a produção turbulenta por unidade de área e de tempo. Pode assim concluir-se que a maior parte da produção turbulenta ocorre na camada junto das paredes da conduta e simultaneamente esta camada apresenta elevados valores de taxa de dissipação de energia turbulenta e que a principal função da zona interior do escoamento será o transporte da energia cinética do escoamento médio para as superfícies, incluindo-se no transporte referido o incremento de energia resultante do trabalho realizado pelo gradiente de pressão que ocorre a uma taxa de aproximadamente $\rho u_*^2 U_0 / r$ por unidade de volume e de tempo.

6.2 - Relações de Energia em Escoamentos Turbulentos

Escoamentos turbulentos são de natureza dissipativa, onde se verifica uma contínua conversão de energia cinética em calor, o que implica um constante fornecimento de energia para que se mantenham as características turbulentas.

O equilíbrio de um estado estacionário só será mantido se verificar o equilíbrio entre a energia fornecida ao movimento turbulento, o transporte pelo escoamento médio, a dissipação das partículas de fluido que transportam a sua energia cinética e a dissipação viscosa.

Apresenta-se de seguida a equação de balanço da energia cinética, para o **escoamento médio** de um fluido de propriedades constantes e aplicado o procedimento de Reynolds onde todas as quantidades envolvidas foram divididas em duas partes: quantidade média e respectiva flutuação.

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} U_i U_j = - \frac{\partial}{\partial x_i} U_i \left(\frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} U_j U_j \right) - \left(-\overline{u_i u_j} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{u_i u_j} U_i \right) + \nu \frac{\partial}{\partial x_i} U_j \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$

onde o termo $\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} U_j U_j$ indica a variação local de energia cinética por unidade de

massa e de tempo; $- \frac{\partial}{\partial x_i} U_i \left(\frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} U_j U_j \right)$ representa a variação do transporte

convectivo da pressão e da energia cinética por unidade de massa e tempo; $-\left(-\overline{u_i u_j}\right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$ indica o trabalho de deformação realizado pelas tensões turbulentas por unidade de massa e de tempo; $\frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{u_i u_j} U_i\right)$ representa o trabalho das tensões turbulentas por unidade de massa e de tempo; $\nu \frac{\partial}{\partial x_i} U_j \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)$ representa o trabalho realizado pelas tensões viscosas por unidade de massa e tempo; $-\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$ indica a dissipação viscosa por unidade de massa e que será transformado em calor ou seja num movimento caótico das moléculas do fluido.

A equação de energia turbulenta será obtida por manipulação da equação anterior e têm a forma apresentada de seguida:

$$\frac{D}{Dt} \frac{\overline{q^2}}{2} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \overline{u_i \left(\frac{p}{\rho} + \frac{q^2}{2}\right)} - \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_i} \overline{u_j \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)} - \nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

Na qual o primeiro termo $\frac{D}{Dt} \frac{\overline{q^2}}{2}$ representa a variação da energia cinética turbulenta

por unidade de massa e de tempo; o termo $-\frac{\partial}{\partial x_i} \overline{u_i \left(\frac{p}{\rho} + \frac{q^2}{2}\right)}$ indica a difusão da energia

mecânica turbulenta ou o trabalho realizado pela pressão dinâmica turbulenta; $-\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i}$ representa o trabalho de deformação do escoamento médio pelas

tensões turbulentas; $\nu \frac{\partial}{\partial x_i} \overline{u_j \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)}$ representa o trabalho realizado pelas tensões

viscosas de corte do movimento turbulento; $-\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ representa a dissipação

viscosa pelo movimento turbulento.

O termo $-\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i}$ é usualmente designado por produção turbulenta, representando a extracção de energia do escoamento médio e transferindo-a para o movimento turbulento e que pode ser visualizado fisicamente como a transferência de

energia que ocorre no processo de "estiramento" dos vórtices pelo escoamento médio. A definição deste termo como uma produção turbulenta advém do facto das tensões turbulentas, quando $i \neq j$, apresentarem normalmente um valor negativo o que combinado com o sinal deste termo na equação de energia traduz no final uma contribuição favorável para a energia turbulenta. Quando $i = j$ este termo apresenta outras características de interesse para o balanço de turbulência, assim, considerando um escoamento acelerado segundo a direcção x_1 , pelo que $\partial U_1 / \partial x_1 > 0$, o termo aqui em análise será $-\overline{u_1^2} \frac{\partial U_1}{\partial x_1}$ aparecendo com sinal negativo promovendo assim a diminuição da energia turbulenta, acontecendo o inverso se $\partial U_1 / \partial x_1 < 0$. Podemos assim concluir que por norma se verifica a tendência de diminuição da intensidade turbulenta em escoamentos com gradiente de velocidade positivo.

6.3 - Balanço Produção/Dissipação

Começando por referir que em escoamentos de corte, normalmente a taxa de produção de energia turbulenta pelas tensões de Reynolds e a taxa de dissipação viscosa, embora não se equilibrem totalmente aparecem com valores da mesma ordem de grandeza.

Se avançarmos um pouco neste sentido de equilíbrio, e considerarmos que existe igualdade entre a produção ($\wp = -\overline{u_i u_j} S_{ij}$) e a dissipação ($\varepsilon = 2\nu \overline{s_i s_j}$) através da análise dimensional (ver "Dynamics of Turbulence" pp. 64) das diversas grandezas envolvidas, verifica-se que não existe grande interacção entre as taxas de deformação ($\overline{s_i s_j}$) das flutuações de velocidade e as taxas de deformação (S_{ij}) correspondentes ao escoamento médio, o que permite concluir que a estrutura das menores escalas aparece independente da orientação imposta pelo escoamento médio de corte. Assim num escoamento com estas características podemos considerar um bom grau de isotropia ao nível da estrutura das pequenas escalas, (isotropia local). Explorando o termo da dissipação $\varepsilon = \nu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$, e considerando esta ideia de isotropia local, Laufer

assumiu como equivalentes os seguintes termos: $\overline{\left(\frac{\partial u_\phi}{r \partial \phi}\right)^2} = \frac{1}{2} \overline{\left(\frac{\partial u_r}{r \partial \phi}\right)^2} = \frac{1}{2} \overline{\left(\frac{\partial u_x}{r \partial \phi}\right)^2}$ bem como

$\overline{\left(\frac{\partial u_r}{\partial r}\right)^2} = \frac{1}{2} \overline{\left(\frac{\partial u_\phi}{\partial r}\right)^2} = \frac{1}{2} \overline{\left(\frac{\partial u_x}{\partial r}\right)^2}$, o que permite simplificar a expressão da dissipação para a

forma seguinte: $\varepsilon = 15 \nu \overline{\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}\right)^2}$, que aparece avaliada por diversos trabalhos

experimentais, nos quais não são apresentadas diferenças significativas, com excepção de uma zona limite junto da superfície ($x^+ < 100$).

Prosseguindo com esta definição de isotropia local no escoamento em estudo onde se admite $\overline{u_1^2} = \overline{u_2^2} = \overline{u_3^2}$ e definindo uma velocidade representativa (u) destas flutuações por $\frac{1}{3} \overline{u_i u_i}$, o que equivale a definir esta velocidade u como sendo igual a $\overline{u_1^2}$.

Introduzindo de seguida a análise dimensional, com o conceito de microescala de comprimento (λ) usado por Taylor, pode referir-se a igualdade: $\overline{\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1}\right)^2} \equiv \frac{\overline{u_1^2}}{\lambda^2} = \frac{u^2}{\lambda^2}$,

assim a expressão que traduz a dissipação de energia no escoamento poderá tomar a forma de $\varepsilon = 15 \nu \frac{u^2}{\lambda^2}$.

7. ANÁLISE DO CAMPO DE FLUTUAÇÕES DE VELOCIDADE TURBULENTO

7.1 Nota Introdutória

Neste capítulo será analisado o desenvolvimento do campo de flutuações de velocidade turbulento e os efeitos provocados no escoamento médio devido ao tipo de ligação em estudo. Tendo sido analisadas duas geometrias com razões de áreas, entre a secção da conduta de derivação e a conduta principal, distintas e à semelhança do que foi referido para a análise do escoamento médio, (capítulo 4 deste texto), a análise das características turbulentas, medidas com a segunda geometria em estudo, será realizada, de novo, em termos comparativos relativamente aos perfis rms obtidos com a primeira geometria medida.

Como abordagem previa podemos referir que os escoamentos turbulentos em condutas sob pressão são dominados por tensões resistentes que, em geral, se podem caracterizar a partir da análise dos gradientes de velocidade do escoamento, das tensões de Reynolds desenvolvidas e da interacção espacial destas grandezas. De referir ainda que a turbulência extrai energia do escoamento médio nas grandes escalas de vorticidade, sendo este ganho energético equilibrado com a dissipação viscosa verificada nas menores escalas dos vórtices. As tensões de Reynolds serão o mecanismo dinâmico que promove o transporte e estiramento dos vórtices, produzindo assim um espectro desde as grandes escalas até às pequenas escalas.

A análise do campo turbulento será iniciada pela zona da bifurcação dentro da conduta principal, continuada ao longo da conduta de saída e de seguida abordamos os resultados da medição de perfis na conduta lateral. Esta análise será acompanhada com representações gráficas dos perfis de velocidade média e correspondentes valores rms apresentados em escalas distintas por serem muito discrepantes os valores obtidos para estas componentes.

7.2 Campo de flutuações de velocidade (rms) – Geometria 1 ($A_b/A_s=1,0$)

7.2.1 Representação global dos perfis rms medidos

Apresenta-se de início a representação global dos perfis rms medidos que permite acompanhar o desenvolvimento de características do campo turbulento e que serão analisadas em pormenor seguidamente. Na Figura 1.a (conduta principal) estão representados os perfis rms obtidos nas medições efectuadas ao longo do eixo diametral horizontal bem como do eixo diametral vertical, sendo registadas medições da componente axial de velocidade e correspondente valor de flutuação (rms), repetindo-se o procedimento para a componente radial de velocidade. A Figura 1.b representa a mesma série de medições, (referida atrás), mas neste caso efectuada ao longo da conduta lateral.

Plano Horizontal

Plano Vertical

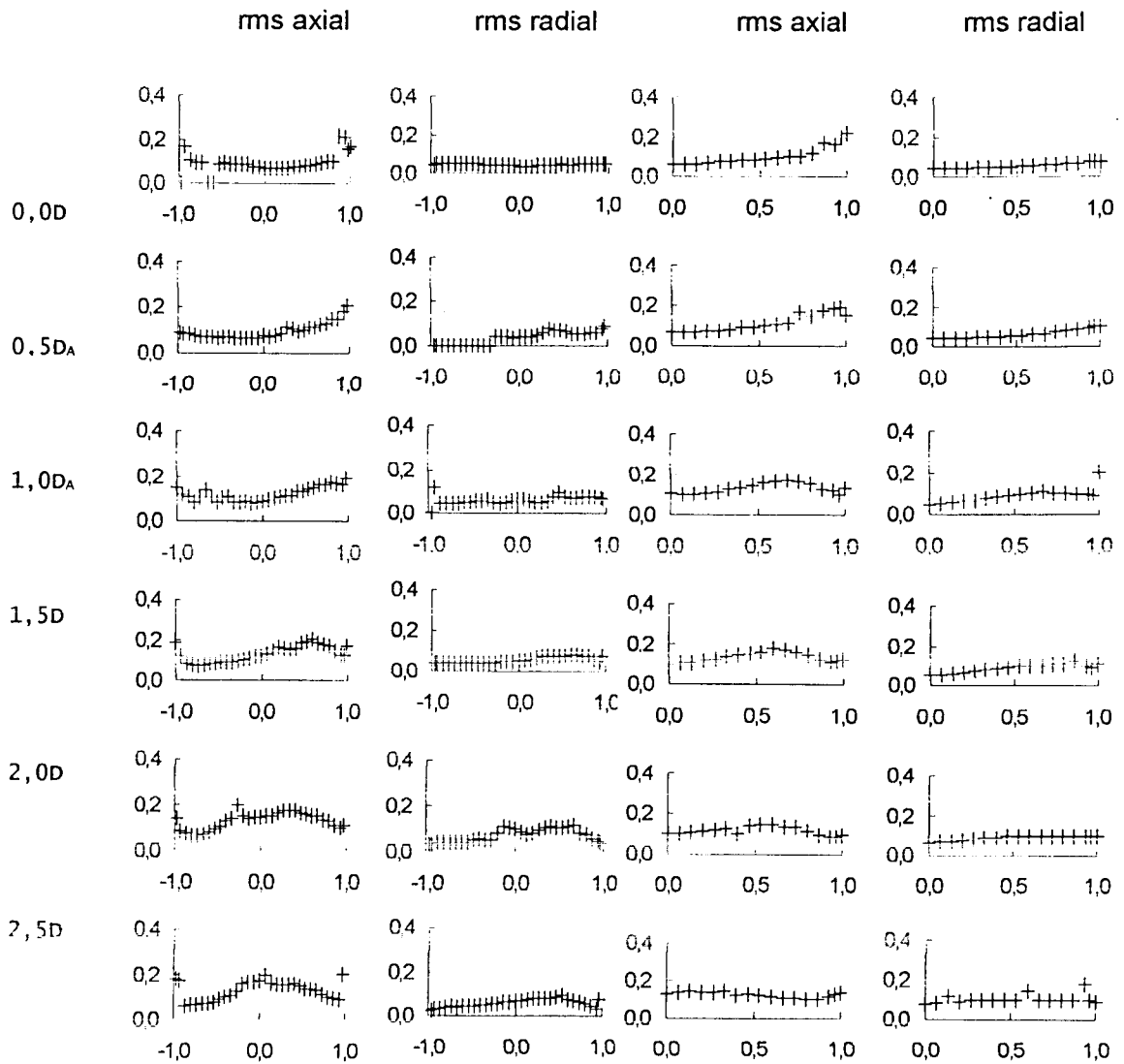


Fig. 7.1a – Representação global da evolução dos perfis rms medidos na conduta principal .

Plano Horizontal

Plano Vertical

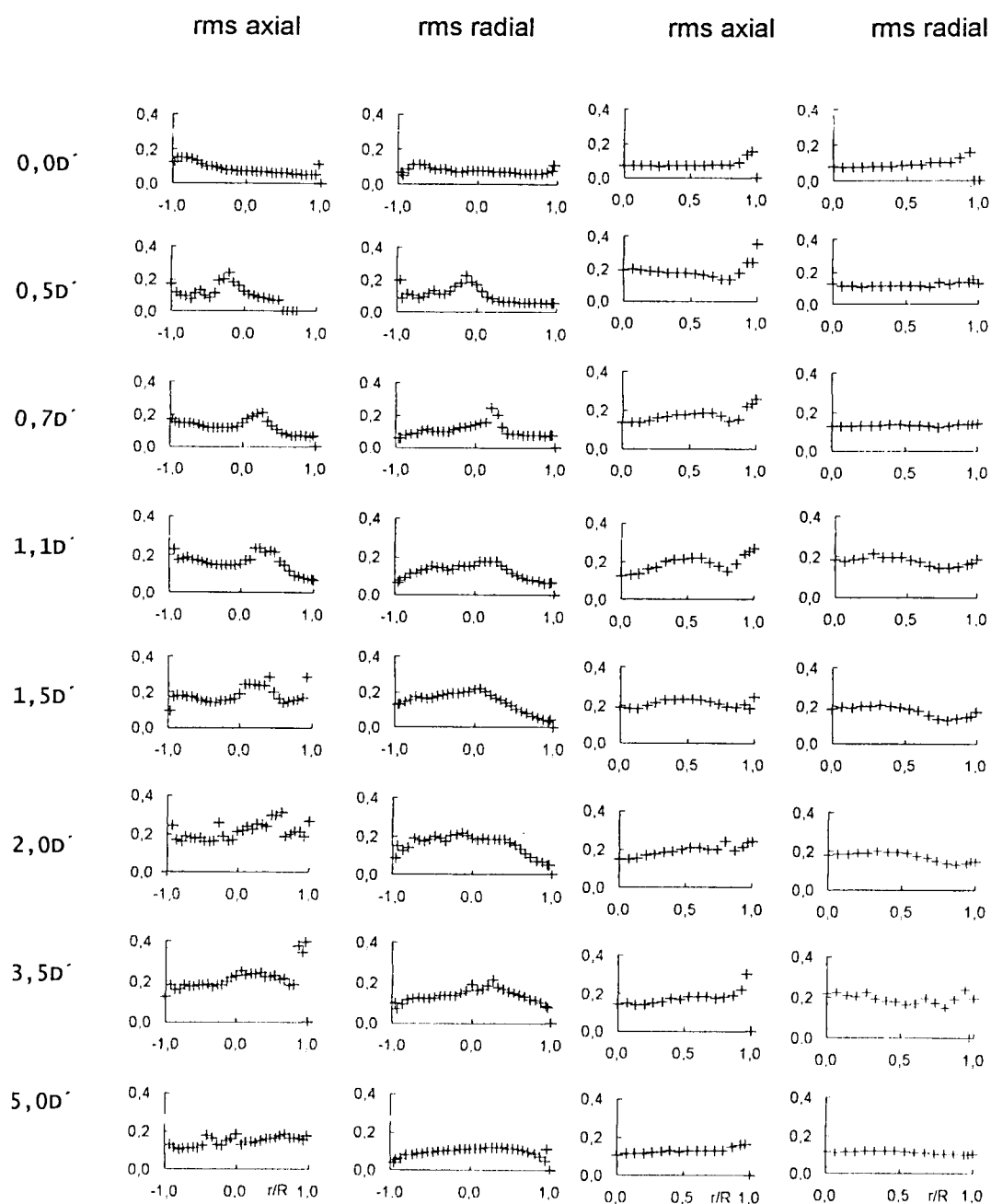


Figura 7.1b – Representação global da evolução dos perfis rms medidos na conduta lateral

7.2.2 Conduta principal

A Figura 7.2a apresenta perfis rms e velocidades médias do escoamento na zona da bifurcação dentro da conduta principal. Esta região é caracterizada por apresentar um escoamento largamente tridimensional com níveis de gradiente de velocidade média em constante agravamento, o que implica um aumento da produção de turbulência em todas as direcções.

No início da bifurcação (secção 0,0D) o fluido apresenta-se já ligeiramente desviado no sentido da conduta lateral, o que dá origem a um ligeiro aumento nos níveis de turbulência junto da saída para a conduta lateral. Na secção seguinte (coincidente com o eixo do ramal de derivação) este desvio de caudal aumenta, agravando desta forma as perturbações no escoamento que produzem assim níveis de turbulência mais importantes. Junto da parede exterior da conduta (oposta á derivação), aparecem os valores mais elevados de rms, definidos pela desaceleração do fluido, que subitamente se expõe a um alargamento da secção. De salientar que o agravamento dos níveis de turbulência com a diminuição do número de Reynolds, (neste caso a diminuição de Re deve-se á divisão igual de caudal por duas condutas que mantêm a secção da conduta de entrada), é uma das características dos escoamentos em conduta.

A interacção “tensão normal – deformação normal” aparece facilitada nesta zona de expansão súbita o que contribui favoravelmente para a produção de turbulência, (primeiro termo da Equação 7.1) .

$$prod. \overline{u_x'^2} = -\overline{u_x'^2} \frac{\partial U_x}{\partial x} - \overline{u_x' u_y'} \frac{\partial U_x}{\partial y} - \overline{u_x' u_z'} \frac{\partial U_x}{\partial z} \quad \text{Equação 7.1}$$

O perfil rms da componente axial na secção 1,155D (final da bifurcação) apresenta alguma dispersão junto do vértice de ligação das duas condutas revelando alguma instabilidade do escoamento neste ponto.

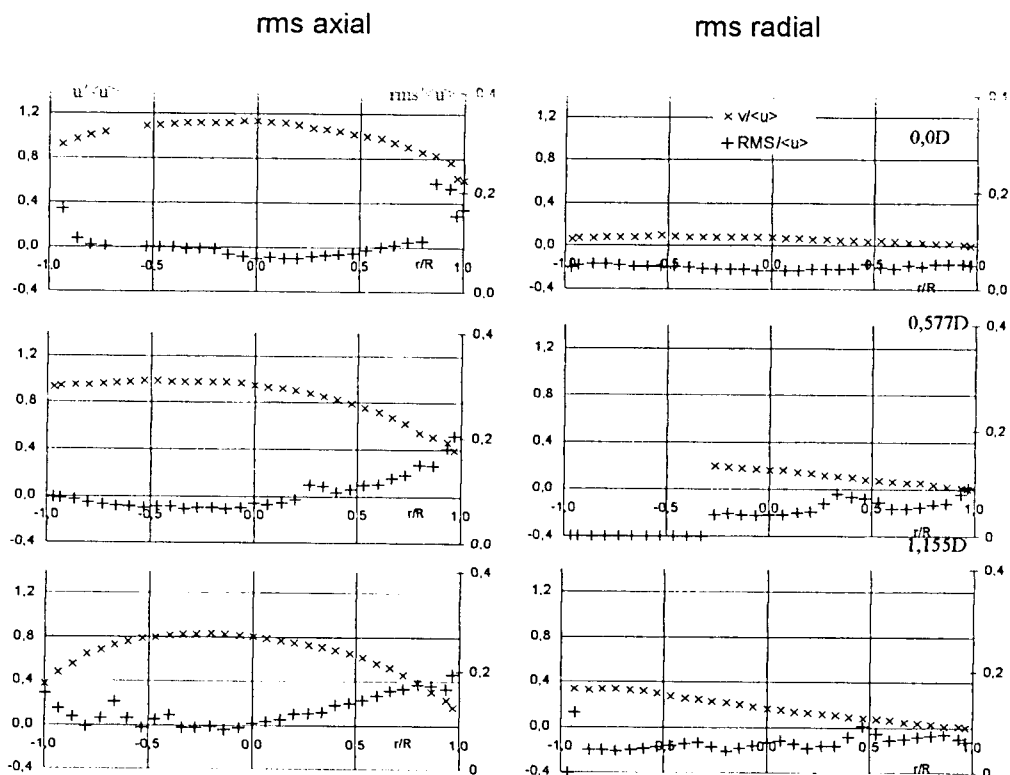


Figura 7.2a - Perfis de rms normalizado (e velocidades), medidos no eixo horizontal da conduta principal.

Junto da parede interior (isto é, no seu alinhamento, dado que não existe parede nesta zona) verificam-se características opostas á produção de turbulência relacionada com a componente axial de velocidade. Por um lado regista-se uma desaceleração do escoamento menos intensa, por se verificar o desvio de caudal na direcção da conduta lateral e simultaneamente, pelo facto de não existir parede nesta zona da conduta, elimina-se assim a contribuição, importante, das tensões de corte associadas aos elevados gradientes de velocidade junto das paredes da conduta. Sendo a contribuição mais importante para a produção de turbulência os gradientes de velocidade e a interacção com as tensões de Reynolds (segundo termo da Equação 7.1), tal resulta assim, numa diminuição na produção turbulenta no escoamento entre a secção 0,0D e a secção 1,155D, junto da parede interior, (que contém a bifurcação), acontecendo o contrário ao longo da parede exterior, dentro desta região.

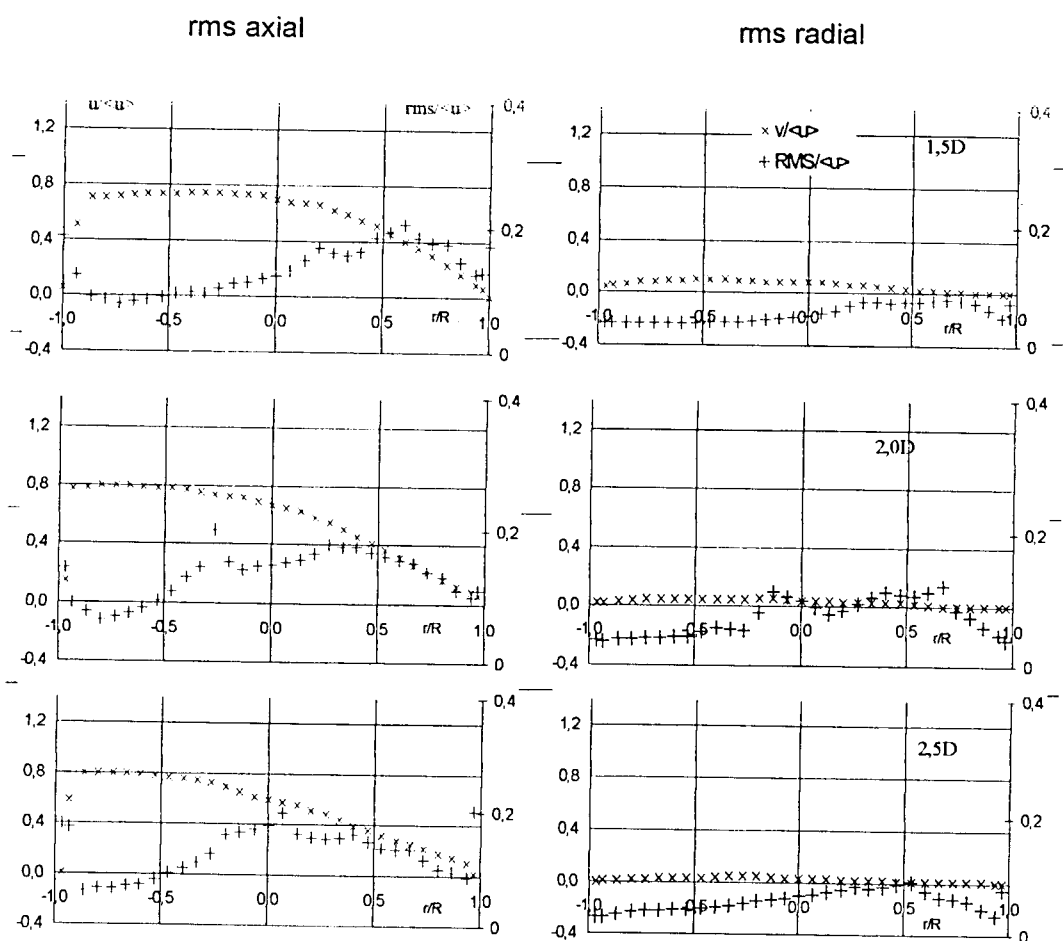


Figura 7.2b - Perfis de rms normalizado (e velocidades), medidos no eixo horizontal da conduta principal .

À entrada da zona de bifurcação, secção 0,0D, e reportando-nos agora a medições efectuadas ao longo do eixo diametral vertical para a componente axial de velocidade, verifica-se aqui o manter de características tipo de um perfil turbulento desenvolvido em conduta circular. Assim, e ao contrário do que se verifica no perfil medido no eixo horizontal, não é notória a influência do desvio de caudal para a conduta lateral (medições efectuadas a uma distância significativa em relação á parede lateral da conduta que inclui a derivação).

O perfil rms apresenta uma evolução regular com valores de 10% da v.m.e. no eixo da conduta aumentando progressivamente na direcção das paredes superior e inferior (de lembrar que as figuras apresentam apenas a metade superior do perfil, por razões de simetria do escoamento), atingindo aqui valores que rondam os 20% da v.m.e. (ver figura 7.3a). A componente radial, nesta mesma secção, apresenta valores entre $\approx 5\%$, junto do eixo da conduta e $\approx 10\%$ próximo das paredes da conduta.

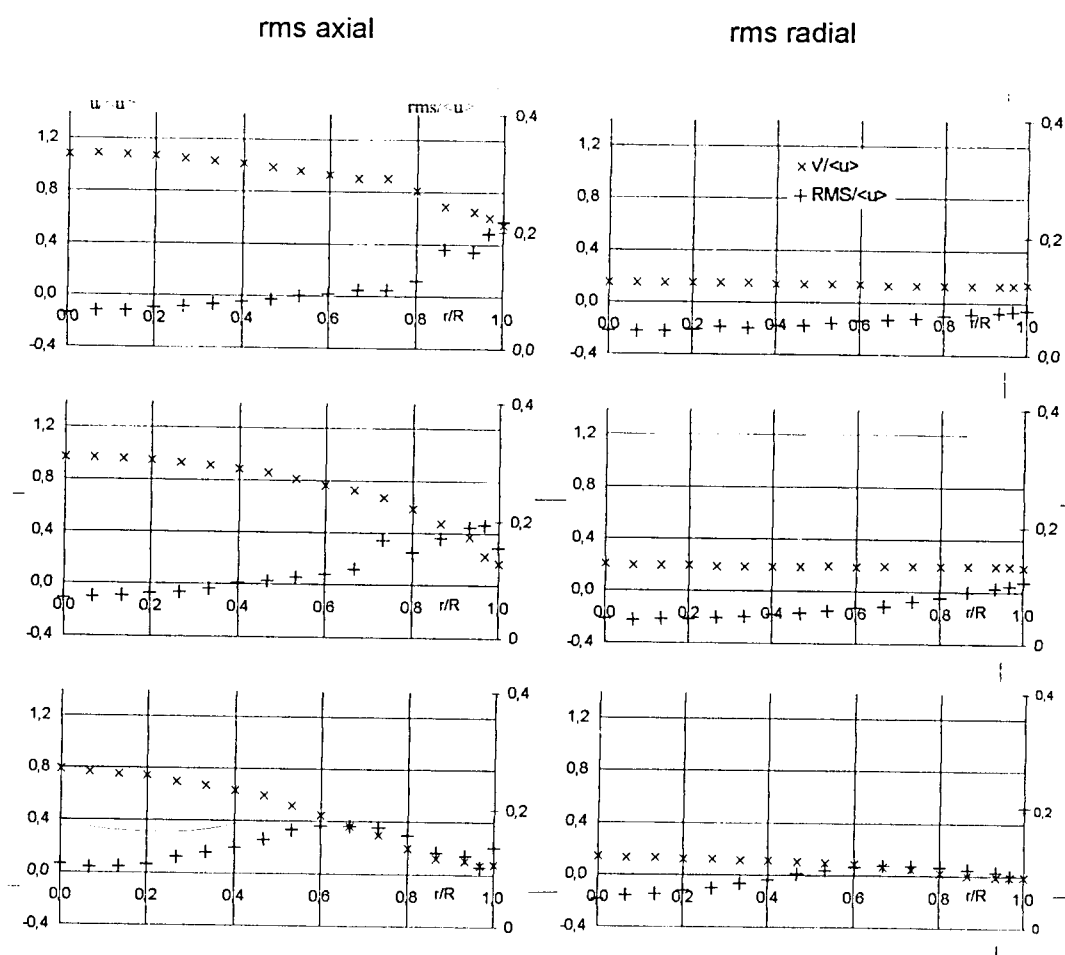
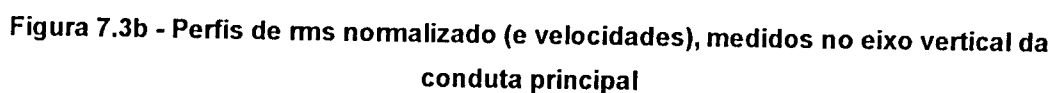


Figura 7.3a - Perfis de rms normalizado (e velocidades), medidos no eixo vertical da conduta principal, (secções 0,0D ; 0,5D_A e 1,0D_A)

Na secção seguinte, a meio da zona de bifurcação, embora o perfil de velocidades médias axiais tenha sido alterado com a desaceleração do fluido imposta pelo desvio parcial de caudal não são notórias alterações de valor nas flutuações de velocidade,

No final da bifurcação (e nas duas secções seguintes a jusante) os níveis máximos de turbulência aparecem situados sensivelmente a 2/3 do raio superior (e inferior) da conduta coincidindo com uma zona de gradiente de velocidade elevado favorecendo assim a produção turbulenta, como foi referido anteriormente.



7.2.3 Conduta Lateral

Na Figura 7.4 apresenta-se a evolução do campo turbulento ao longo do plano horizontal da conduta lateral bem como a posição da linha de velocidade média nula que indica a separação do escoamento, permitindo assim identificar as zonas de maior turbulência bem como esclarecer o seu posicionamento em relação á zona de separação detectada. Uma vez que esta zona de máxima turbulência aparece primeiramente dentro da recirculação, onde os gradientes de velocidade não são consideráveis impõem-se mecanismos de transporte e difusão da turbulência. A jusante desta zona os picos de turbulência aparecem agora no exterior do vórtice, mais alinhados com as zonas de gradiente de velocidade elevado embora se continuem a verificar valores de flutuação de velocidade elevados no interior, pelo que se mantêm aqui os mesmos mecanismos de transporte e difusão detectados.

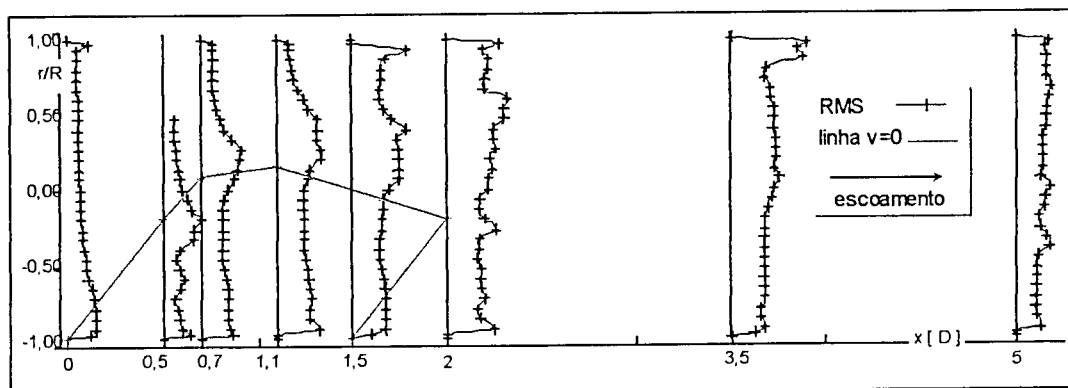


Figura 7.4 – Perfis rms da componente axial de velocidade e posicionamento da linha de separação do escoamento medidos no plano horizontal da conduta lateral

Na entrada da conduta lateral, secção $0,0D'$, a componente axial da velocidade apresenta valores de rms elevados junto da parede interior impostos por uma variação de velocidade acentuada á medida que nos afastamos na direcção da parede oposta onde a mudança de direcção do fluido é facilitada. Os valores máximos atingem neste ponto os 15% da v.m.e., que diminuem linearmente a partir da metade do raio interior,

terminando com valores próximos dos 5% da v.m.e. junto da parede exterior. Aqui a componente radial apresenta uma distribuição mais uniforme ao longo de todo o perfil, embora se consiga isolar uma zona com maiores níveis de turbulência, de novo, junto da parede interior.

Na secção seguinte, $0,5D'$, verifica-se um agravamento das flutuações de velocidade verificando-se que a zona de rms máximo acompanha agora a produção turbulenta a ocorrer junto da camada que faz a separação do escoamento. Aqui a componente axial de velocidade apresenta flutuações que atingem os 25% da v.m.e. . Sendo os valores de rms máximos detectados no limite da recirculação mas ainda no seu interior, e sendo uma zona em que os mecanismos de produção da turbulência não são consideráveis, (gradientes de velocidade pouco significativos), toma-se evidente a existência de transporte da turbulência produzida no interior da conduta pelas tensões de corte entre zonas adjacentes de fluido.

A componente radial apresenta uma evolução semelhante á detectada no perfil rms axial e com valores máximos coincidentes. Verificando-se níveis de turbulência semelhantes nas duas componentes e sendo as suas velocidades médias muito diferentes, (naturalmente menores na componente radial, agravando-se esta diferença á medida que avançamos para jusante no escoamento), assim a turbulência radial detectada será produzida maioritariamente pela componente axial e transformada através de difusão turbulenta bem como da redistribuição dos níveis de pressão.

Na secção $0,7D'$ verifica-se que toda a zona com fluido em recirculação apresenta valores de rms elevados, indicando um transporte de turbulência e redistribuição mais eficiente que se estende agora á totalidade do vórtice. Os valores máximos medidos, ($\approx 20\%$ da v.m.e.), aparecem agora alinhados com a zona de gradiente de velocidade elevado, ou seja, dentro da zona onde ocorre o escoamento principal ("zona de jacto").

A componente radial continua a apresentar níveis de turbulência semelhantes aos detectados na componente axial, com excepção da zona circundante á parede interior, onde se registam valores claramente inferiores. Mantendo-se assim a transformação de rms axial em rms radial, de novo, por mecanismos de redistribuição e difusão turbulenta.

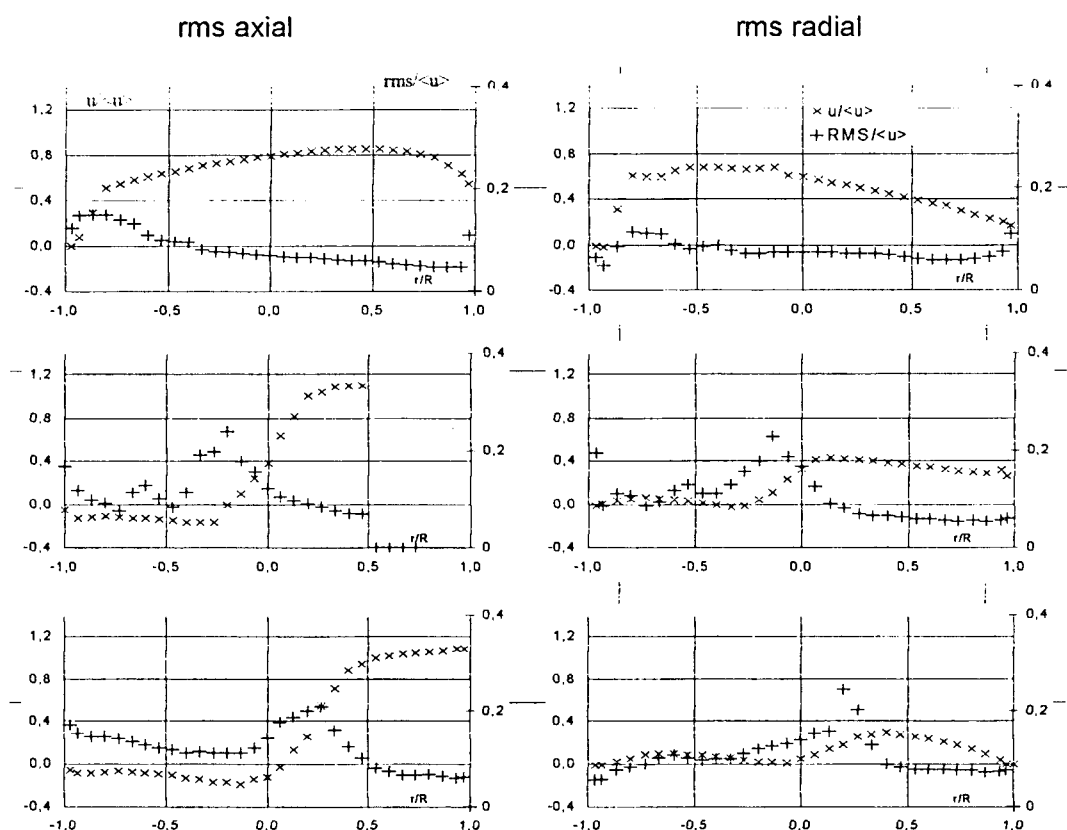


Figura 7.5a - Perfis de rms normalizado (e velocidades), medidos no eixo horizontal da conduta lateral, (secções 0,0D' ; 0,5D' e 0,7D')

Nas secções 1,1D' e 1,5D' assiste-se ao agravamento dos níveis de turbulência , sendo mantida, sensivelmente, a forma dos perfis com relação á secção de medida 0,7D' . Nestas mesmas secções a componente radial mantém a sua dependência relativamente á componente axial, apresentando perfis com dois picos de turbulência que correspondem a duas zonas distintas de produção da turbulência axial , localizada na zona da camada de corte junto da parede da conduta e outra na zona em que o gradiente de velocidade média é mais elevado. Os mecanismos de transmissão da turbulência á componente radial mantém-se, portanto .

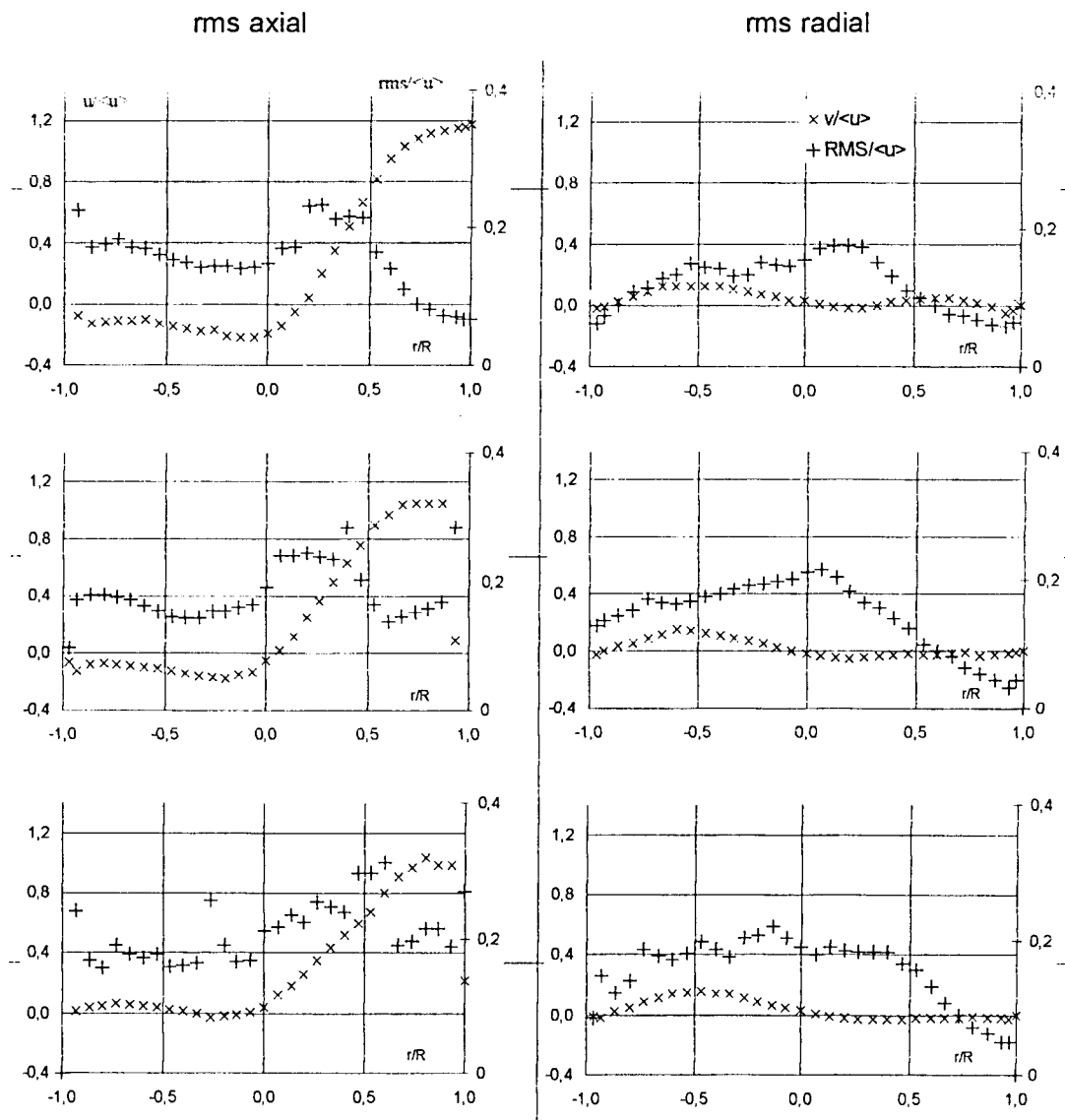


Figura 7.5b - Perfis de rms normalizado (e velocidades), medidos no eixo horizontal da conduta lateral, (secções 1,1D' ; 1,5D' e 2,0D')

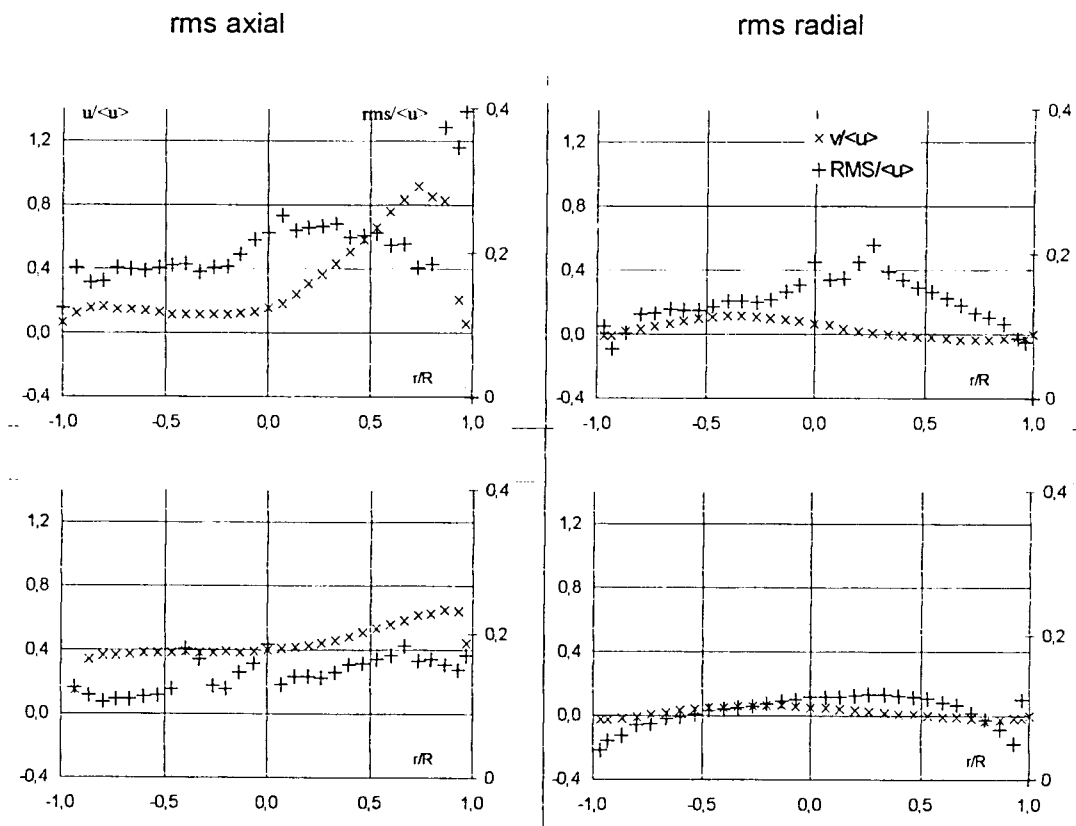


Figura 7.5c - Perfis de rms normalizado (e velocidades), medidos no eixo horizontal da conduta lateral, (secções 3,5D' e 5,0D')

De seguida serão analisados os perfis turbulentos obtidos ao longo do eixo vertical da conduta lateral.

Na secção 0,0D', definida a meio da secção de ligação entre a conduta principal e a conduta lateral, obtém-se um perfil de velocidades axiais de valor constante ao longo do diâmetro vertical da conduta (ver figura 7.6.a) a que correspondem valores de turbulência constantes, próximos dos 8% da v.m.e. atingindo os 16% da v.m.e. apenas junto das paredes da conduta, não sendo assim identificados mecanismos de produção turbulenta importantes. A componente radial de rms tem uma evolução crescente desde o eixo da conduta ($\approx 8\%$ da v.m.e.) até junto das paredes da conduta , agravando-se aqui os níveis de turbulência ($\approx 16\%$ da v.m.e.) . Este comportamento é justificado com um perfil de velocidades médias que apresenta gradientes de velocidade (embora reduzido) em grande parte da sua extensão.

Na secção seguinte ($0,5D'$) assiste-se ao agravamento dos níveis de turbulência tanto na componente axial como na componente radial ,como consequência da desaceleração do fluido junto do eixo da conduta (zona desfavorável , onde é notória a dificuldade do escoamento seguir a alteração de direcção imposta). Junto da parede superior (e inferior) aparecem os níveis mínimos de turbulência já que aqui o escoamento se encontra afastado da influência da recirculação, que inicia aqui a sua expansão.

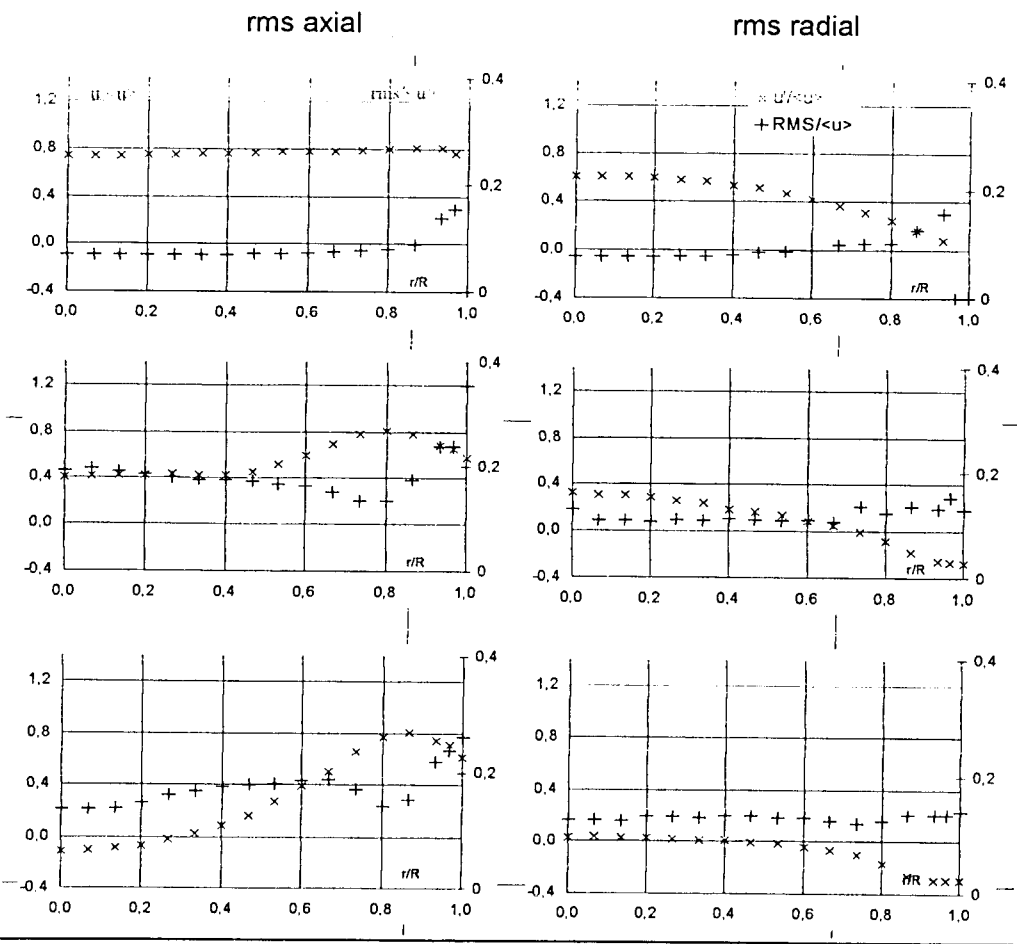


Figura 7.6a - Perfis de rms normalizado (e velocidades), medidos no eixo vertical da conduta lateral , (secções $0,0D'$; $0,5D'$ e $0,7D'$) .

A secção imediatamente a jusante ($0,7D'$) apresenta duas zonas onde a produção turbulenta é menos significativa; na zona central é eliminada a

contribuição dos gradientes de velocidade média por coincidir com o interior da recirculação onde se registaram valores inferiores a 8% da v.m.e., a segunda zona de turbulência "reduzida" detectada mantém-se em concordância com a secção anterior.

Nas secções seguintes verifica-se o agravamento dos valores máximos de turbulência da componente axial na zona adjacente á separação do escoamento onde se encontram gradientes de velocidade média elevados ,registando-se o valor máximo na secção $1,5D'$ ($\approx 25\%$ da v.m.e.), sendo simultaneamente a secção medida mais próxima do final da zona de separação. A componente radial apresenta níveis de turbulência e distribuição semelhantes, ao longo do eixo vertical, nas secções $1,1D'$; $1,5D'$ e $2,0D'$, com valores máximos ($\approx 20\%$ da v.m.e) na zona central do perfil onde não existem gradientes de velocidade média significativos impondo-se assim os mecanismos de transporte e difusão turbulentos nesta zona do escoamento.

A secção medida mais distante da bifurcação ($5,0D'$), apresenta uma distribuição de turbulência regular (ver figura 7.6c) ao longo da zona central do perfil (axial e radial) com valores inferiores a 15% da v.m.e., sendo um sinal da estabilização do escoamento a jusante.

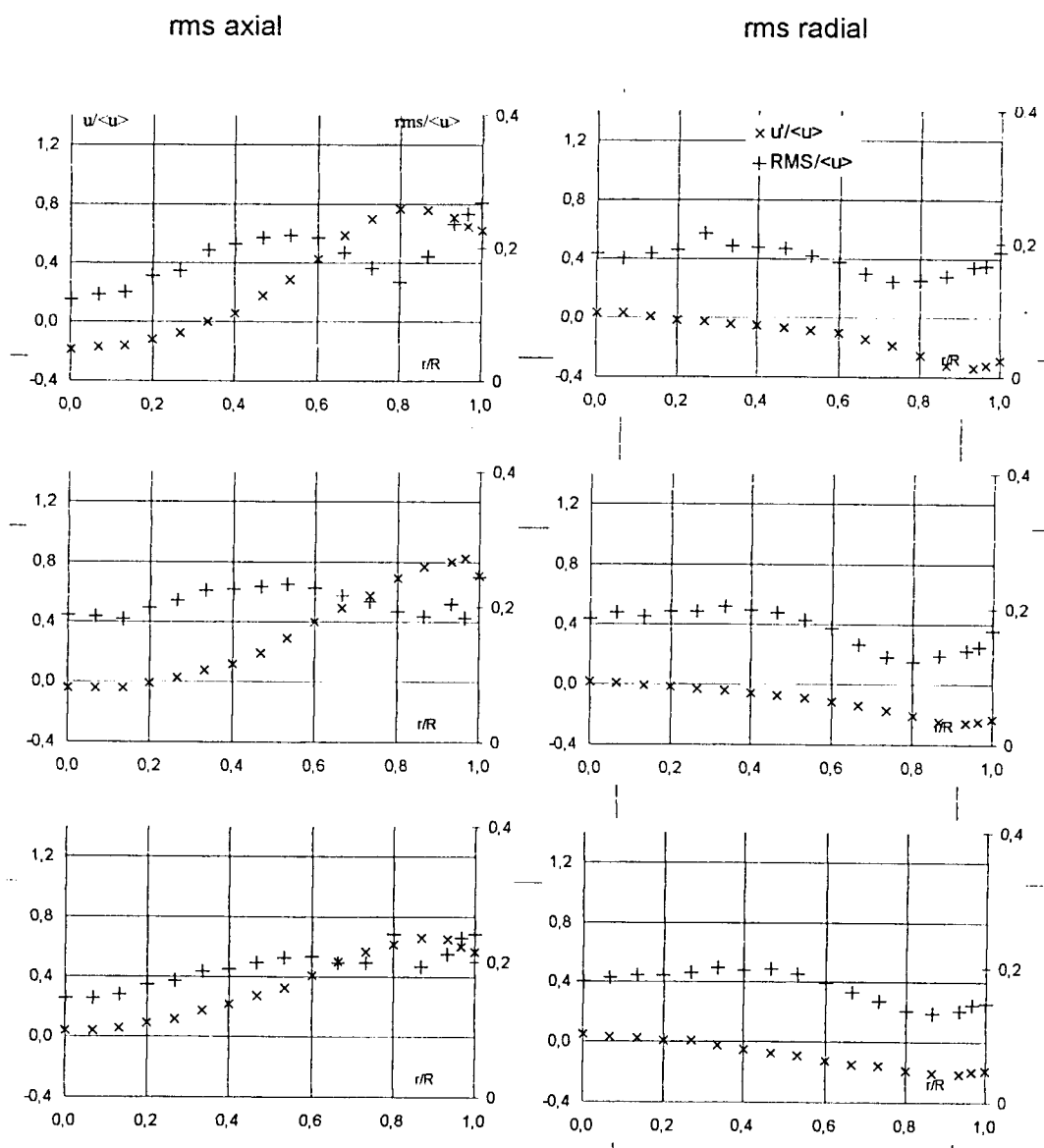


Figura 7.6b - Perfis de rms normalizado (e velocidades), medidos no eixo vertical da conduta lateral, (secções 1,1D' ;1,5D' e 2,0D')

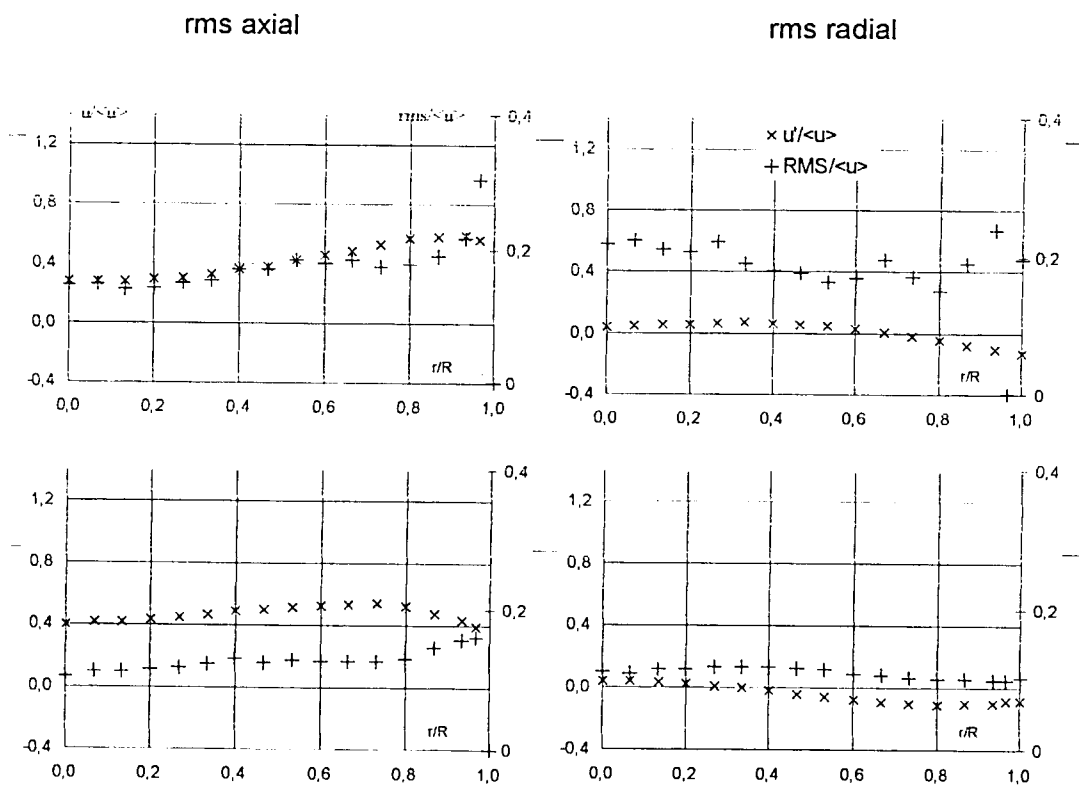


Figura 7.6c - Perfis de rms normalizado (e velocidades), medidos no eixo vertical da conduta lateral , (secções 3,5D' e 5,0D')

8 – ANÁLISE DAS INCERTEZAS

Os ensaios realizados ao longo deste trabalho permitiram a determinação de diversas quantidades, nomeadamente: o número de Reynolds (Re), as divisões de caudal Q_1/Q_3 ; Q_2/Q_3 , o campo de velocidades médias e os coeficientes de perda de carga K_{3i} , sendo necessário o apuramento da incerteza associada a estas quantidades.

Para qualquer das quantidades referidas, a incerteza correspondente será calculada através da equação seguinte:

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial y_i} \Delta y_i\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial x}{\partial y_j} \Delta y_j\right)^2} \quad (8.1)$$

onde Δx representa o valor da incerteza na determinação de uma quantidade x , y_i representa as diversas quantidades independentes que intervêm no cálculo de x para as quais corresponde uma incerteza Δy_i e o gradiente $\partial x / \partial y_i$ representa a sensibilidade associada a cada uma destas quantidades.

8.1 - Incertezas Associadas às Medições de Velocidade e de Posicionamento do Laser

Aplicando à Equação: $U = \frac{\lambda}{2\sin(\theta/2)} f_D$ a expressão de análise geral de incertezas,

Equação (8.1), é possível obter o comportamento da incerteza relativa da velocidade da partícula, $\Delta V_p / V_p$, para uma única leitura, em função do valor da frequência medida e das características do laser (λ - comprimento de onda e $\tilde{\theta}$ - ângulo entre raios laser). As incertezas correspondentes às diversas quantidades intervenientes nesta definição aparecem na Tabela 8.1, correspondendo a valores estimados a partir de verificações em laboratório (ângulo) ou a partir da documentação técnica que acompanha o equipamento. Para esta análise, escolheram-se velocidades representativas da gama dos valores obtidos nas medições efectuadas, considerando-se aqui os valores : 0,01 ; 0,06 ; 0,8 e 1,4 m/s .

Tabela 8.1: Incertezas consideradas no cálculo de $\Delta V_p / V_p$

$\Delta\lambda$	Δf_D	$\Delta\theta$
$\pm 0,5\text{nm}$	$\pm 0,5\text{Hz}$	$\pm 0,005^\circ$

Na Tabela 8.2 apresentam-se as incertezas relativas do valor da velocidade da partícula, para as quatro situações de velocidade consideradas.

Tabela 8.2 – Incerteza relativa - $\Delta V_p / V_p$

f_D [Mhz]	V_p [m/s]	$dV_p/d\lambda$	dV_p/df_D	$dV_p/d\theta$	ΔV_p	$\Delta V_p/V_p$ [%]
0.002	0.01	12039	6.22E-06	0.009957	5.05E-05	0.5075
0.010	0.06	75247	6.22E-06	0.062229	3.13E-04	0.5037
0.130	0.81	978208	6.22E-06	0.808978	4.07E-03	0.5036
0.225	1.40	1693052	6.22E-06	1.400154	7.05E-03	0.5036

No caso de se pretender a incerteza do valor médio da velocidade, ΔV , de uma amostra com n leituras, a expressão a utilizar seria:

$$\Delta V = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta V_{p_i}^2}}{n} \tag{8.2}$$

onde ΔV_{p_i} é a incerteza de cada leitura, sendo calculada de forma análoga ao procedido anteriormente.

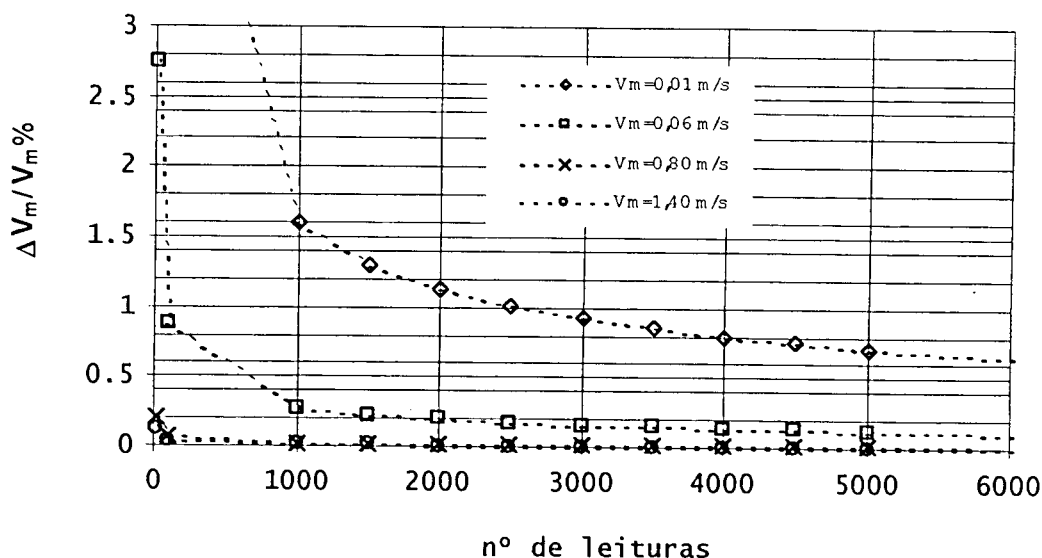


Figura 8.1: Incerteza relativa do valor de velocidade média em função do número de leituras

Como se pode ver através da Figura 8.1 é importante usar o maior número de leituras possível para assim se reduzir a incerteza na medição da velocidade média. Na prática os valores médios de velocidade foram obtidos com amostras contendo 5000 medições pelo que a incerteza do valor médio é substancialmente inferior à de uma única medição. Assim, medindo n vezes a mesma velocidade V_p a incerteza do valor médio das n medições será igual, pela Equação (8.2), a $\Delta V_p / (V_p \sqrt{n})$ o que para $n=5000$ dá origem a uma incerteza relativa máxima inferior a 0,8% quando medimos velocidades de partículas baixas, ($V_p=0.01\text{m/s}$) que é a situação mais desfavorável, em termos de erro, com que se trabalhou.

Através dos resultados aqui exibidos é manifesto que a incerteza de ordem zero (i.e. exclusivamente devidas ao equipamento) de 0.8% inerente ao anemómetro laser é desprezável face às restantes parcelas que contribuem para a incerteza total.

A incerteza global associada ao posicionamento relativo (ao longo dos planos diametrais) do volume de controlo do sistema laser, local onde se realizaram as medições de velocidade, era de $\pm 10\mu\text{m}$ na direcção horizontal ou vertical, e está associado ao limite de precisão da mesa de comando numérico que fazia a movimentação da sonda laser. Por seu lado, a incerteza sistemática inerente ao posicionamento absoluto do volume de controlo do

laser foi estimada em ± 0.5 mm para cada uma das três direcções x, y e z, sendo este valor estimado a partir das dimensões do volume de controlo .

8.2 - Incerteza Associada às Medições de Pressão

Seguindo a Equação (8.1), o valor da incerteza total associada à determinação do número de Reynolds numa conduta de diâmetro d ,

$$Re = \frac{4Q}{\pi d \nu} \quad (8.3)$$

onde Q será o valor do caudal escoado e ν a viscosidade cinemática do fluido, será dada por:

$$\frac{\Delta Re}{Re} = \sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \nu}{\nu}\right)^2} \quad (8.4)$$

As incertezas associadas às divisões de caudal, q_1 e q_2 , calculadas a partir das expressões:

$$q_1 = \frac{Q_1}{Q_3} \quad ; \quad q_2 = \frac{Q_2}{Q_3}$$

estão associadas a um valor de incerteza relativa calculada pelas expressões:

$$\frac{\Delta q_1}{q_1} = \sqrt{\left(\frac{\Delta Q_1}{Q_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Q_3}{Q_3}\right)^2} \quad \frac{\Delta q_2}{q_2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta Q_2}{Q_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Q_3}{Q_3}\right)^2} \quad (8.5a \ ; \ 8.5b)$$

Finalmente, a incerteza na determinação dos coeficientes de perda de carga, K_{3i} será calculada com base no processo de determinação destes coeficientes, como se apresenta, seguidamente:

$$K_{ij} = \frac{\frac{p_i}{\rho g} + \frac{8Q_i^2}{g\pi^2 d_i^4} - \left(\frac{p_j}{\rho g} + \frac{8Q_j^2}{g\pi^2 d_j^4} \right)}{\frac{8Q_i^2}{g\pi^2 d_i^4}} \quad (8.6)$$

sendo:

$$\frac{8Q_i^2}{g\pi^2 d_i^4} = \frac{v_i^2}{2g} \quad ; \quad \frac{8Q_j^2}{g\pi^2 d_j^4} = \frac{v_j^2}{2g} \quad (8.7a; 8.7b)$$

$$\Rightarrow K_{ij} = \frac{\frac{p_i}{\rho g} + \frac{v_i^2}{2g} - \left(\frac{p_j}{\rho g} + \frac{v_j^2}{2g} \right)}{\frac{v_i^2}{2g}} \quad (8.8)$$

com:

$$\frac{p}{\rho g} = P \quad ; \quad P_i + \frac{v_i^2}{2g} - \left(P_j + \frac{v_j^2}{2g} \right) = \Delta h_{ij} \quad (8.9)$$

e definindo uma constante: $C = \frac{8Q_x^2}{g\pi^2 d_x^4} = \frac{v_x^2}{2g}$

à qual se associa uma incerteza relativa, dada pela expressão:

$$\Rightarrow \frac{\Delta C}{C} = \sqrt{\left(2 \cdot \frac{\Delta Q_x}{Q_x}\right)^2 + \left(4 \cdot \frac{\Delta d_x}{d_x}\right)^2} \quad (8.10)$$

$$\Rightarrow K_{ij} = \frac{\Delta h_{ij}}{\frac{v_i^2}{2g}} = \frac{\Delta h_{ij}}{C_i} \quad (8.11)$$

$$\Rightarrow K_{ij} = \frac{P_i + C_i - (P_j + C_j)}{C_i} \quad (8.12)$$

Assim, o valor da incerteza associada ao coeficiente de perda de carga, entre o ramo de entrada (3) e o ramo de saída (2) – K_{32} , poderá ser calculada a partir da expressão seguinte:

$$\Rightarrow w_{K_{32}} = \frac{1}{C_3} \sqrt{w_{P_3}^2 + w_{P_2}^2 + w_{C_2}^2 + \frac{1}{C_3^2} (P_2 - P_3 + C_2)^2 \cdot w_{C_3}^2} \quad (8.13)$$

A incerteza associada ao valor de K_{31} , definido entre a conduta de entrada (3) e a conduta de derivação (1) será determinada por um processo análogo que conduz a uma expressão semelhante à anterior, sendo apenas trocadas as quantidades com índice 2, nos termos respectivos dessa expressão.

Apresenta-se de seguida, a título de exemplo, as diversas quantidades consideradas no apuramento do valor de incerteza, associada aos coeficientes de perda de carga local obtidos com a divisão de caudal : $Q_1/Q_3=0,6$.

Nas Tabelas 8.3 ; 8.4 ; 8.5 ; 8.6 e 8.7 aparecem os valores de incerteza considerados, para as diversas quantidades envolvidas. Os valores da segunda coluna da Tabela 8.3 correspondem aos diâmetros médios, obtidos a partir de diversas leituras efectuadas ao longo dos três ramos da ligação. Estas mesmas leituras permitiriam estimar o valor de incerteza relativa $\Delta d_i / d_i$, a partir dos desvios máximos, (superior a duas vezes o valor do desvio padrão obtido do número de leituras efectuadas), em relação ao valor médio que indicam uma confiança de 95%. Os valores de incerteza correspondentes aos caudais escoados, foram estimados, considerando os desvios máximos (em relação ao valor médio registado) obtidos aquando das medições de diferença de pressão entre pontos. Em alternativa, seria de considerar um valor estimado em função das rectas de calibração correspondentes aos medidores de caudal, que não foram aqui considerados por indicarem valores de incerteza inferiores ao desvio máximo referido.

Para a estimativa da incerteza associada à viscosidade do fluido, necessária na determinação do número de Reynolds, foram considerados os desvios médios correspondentes a uma variação de 0,2 °C de temperatura do fluido, dentro da gama de temperaturas em que foram efectuados os ensaios. As restantes incertezas foram determinadas em função destes valores apresentados, e por aplicação da Equação (8.1).

Tabela 8.3

d_1 [m]	0,0303699	$\Delta d_1/d_1$	0,00032927	ΔQ_1	0,000005
d_2 [m]	0,0307563	$\Delta d_2/d_2$	0,00032514	ΔQ_2	0,000003
d_3 [m]	0,0304093	$\Delta d_3/d_3$	0,00032885	ΔQ_3	0,000005

$\Delta \nu/\nu$

0,0024

Tabela 8.4

Re	Q ₁ [m ³ /s]	Q ₂ [m ³ /s]	Q ₃ [m ³ /s]	ΔQ ₁ /Q ₁	ΔQ ₂ /Q ₂	ΔQ ₃ /Q ₃	ΔRe/Re	em %
40526	0,00055	0,00037	0,00092	0,0091	0,0082	0,0054	0,00596	0,5956
29525	0,00042	0,00028	0,00070	0,0120	0,0107	0,0072	0,00758	0,7581
20309	0,00026	0,00018	0,00044	0,0192	0,0171	0,0115	0,01175	1,1747
15427	0,00019	0,00013	0,00032	0,0259	0,0236	0,0156	0,01581	1,5812
10170	0,00013	0,00008	0,00021	0,0397	0,0366	0,0240	0,02416	2,4160
4883	0,00006	0,00004	0,00010	0,0847	0,0732	0,0500	0,05006	5,0059

Tabela 8.5

Re	K ₃₁	K ₃₂	P ₁ [mH ₂ O]	P ₂ [mH ₂ O]	P ₃ [mH ₂ O]	ΔP ₁	ΔP ₂	ΔP ₃
40526	0,52359	0,10657	0,0433	0,0199	0,0963	0,00223	0,00205	0,00113
29525	0,52891	0,08903	0,0263	0,0129	0,0592	0,00278	0,00231	0,00129
20309	0,52762	0,09277	0,0112	0,0054	0,0258	0,00162	0,00170	0,00105
15427	0,60469	0,10804	0,0065	0,0036	0,0162	0,00108	0,00108	0,00110
10170	0,29841	0,07500	0,0034	0,0012	0,0068	0,00246	0,00268	0,00138
4883	0,61213	0,28618	0,0007	0,0003	0,0018	0,00171	0,00116	0,00159

Tabela 8.6

Re	C ₁ [m]	C ₂ [m]	C ₃ [m]	ΔC ₁	ΔC ₂	ΔC ₃
40526	0,02948	0,01250	0,08159	5,365E-04	2,045E-04	8,944E-04
29525	0,01681	0,00724	0,04681	4,047E-04	1,554E-04	6,753E-04
20309	0,00657	0,00283	0,01828	2,527E-04	9,703E-05	4,210E-04
15427	0,00362	0,00149	0,00989	1,875E-04	7,039E-05	3,095E-04
10170	0,00154	0,00062	0,00418	1,224E-04	4,544E-05	2,011E-04
4883	0,00034	0,00016	0,00097	5,731E-05	2,272E-05	9,663E-05

Tabela 8.7

Re	ΔK_{31}	ΔK_{32}	$\Delta K_{31}/K_{31}$	em %	$\Delta K_{32}/K_{32}$	em %
40526	0,031497	0,030052	0,060157	6	0,2819818	28
29525	0,066212	0,057868	0,125184	13	0,6500084	65
20309	0,106965	0,111626	0,202730	20	1,2032208	120
15427	0,158192	0,159868	0,261606	26	1,4797216	148
10170	0,675696	0,723433	2,264319	226	9,6454620	965
4883	2,418533	2,041775	3,951001	395	7,1345181	713

Na Figura 8.2 aparece uma representação gráfica dos valores de incerteza a considerar na determinação dos coeficientes de perda de carga local, onde é notória a imprecisão dos resultados para números de Reynolds inferiores a 20000, e que pode ser justificada com a menor correlação entre os valores de pressão medidos ao longo das condutas de saída. A incerteza associada ao valor de K_{32} aparece sempre com valores elevados, mesmo para o número de Reynolds igual a 30000, e que se justifica com o facto dos valores obtidos aparecerem próximos de zero, potencializando assim os valores de incerteza relativa.

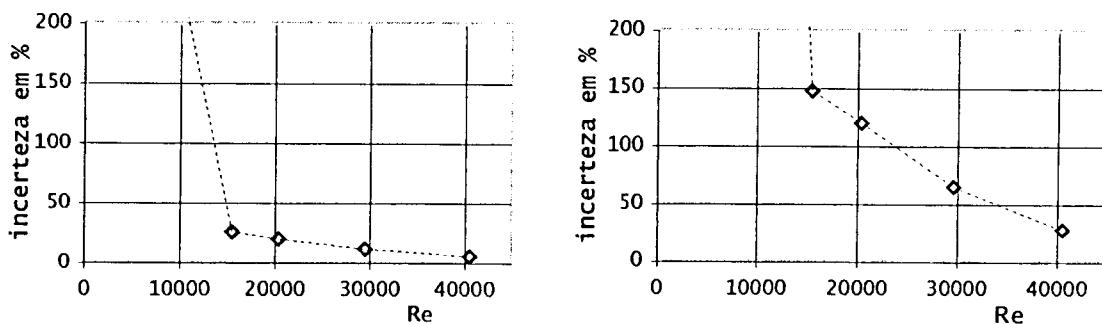


Figura 8.2 – Incerteza relativa associada aos coeficientes de perda de carga: K_{31} (à esquerda na figura) e K_{32} (à direita na figura)

9. FECHO DA TESE

Este capítulo final apresenta um resumo das principais conclusões relacionadas com os estudos realizados. Serão ainda, apresentadas algumas sugestões para estudos, julgados importantes, a realizar no seguimento desta matéria.

9.1 – Principais conclusões

A falta de modelos teóricos capazes de traduzir a evolução do escoamento complexo e largamente tridimensional que percorre uma derivação ou que sejam capazes de definir o valor de perda de carga associado, levaram a um estudo experimental detalhado de forma a possibilitar a definição das características pretendidas.

No desenvolvimento deste trabalho foram realizadas medições do campo de pressões que permitiram determinar a variação dos coeficientes de perda de carga localizada em função da divisão de caudal e do número de Reynolds do escoamento.

Através de uma técnica de anemometria Laser-Doppler (LDA) foi medido o campo de velocidades médias e respectivas flutuações de velocidade (rms) de forma a possibilitar a caracterização de um escoamento turbulento ao percorrer esta geometria. Especificamente, foram medidos perfis de velocidade em diferentes zonas características desta geometria, nomeadamente na conduta principal, a uma distância de $10D$ para montante da bifurcação, numa zona imediatamente a montante da bifurcação, na zona de bifurcação e para jusante desta. Na conduta de derivação foram medidos perfis de velocidade desde o início da bifurcação até uma distância de $5D$ para jusante desta. A caracterização do escoamento foi realizada, definindo um número de Reynolds na conduta de admissão de 36000 e impondo uma divisão de caudal Q_1/Q_3 igual a 0,5.

- Recorrendo ao sistema laser referido, foram ainda determinadas as zonas de separação do escoamento (na conduta principal e na conduta de derivação). Para a primeira geometria analisada as zonas de separação foram avaliadas a partir do comprimento destas, junto da parede da

conduta, e medidas para a gama de divisões de caudal seguinte: $0 < Q_1/Q_3 < 1$. Para a segunda geometria foram determinadas as linhas de separação do escoamento que surgem no plano diametral horizontal das condutas, de novo, para a gama de divisões de caudal: $0 < Q_1/Q_3 < 1$.

- Para ambas as geometrias e para uma gama de números de Reynolds entre 15000 e 40000 não se detectaram variações claras dos coeficientes de perda de carga localizada. Os valores destes coeficientes obtidos com escoamentos em que o número de Reynolds era inferior a 15000 os resultados apresentaram alguma indefinição e não serão considerados como alterações ao comportamento apontado.
- Os valores do coeficiente de perda de carga definido na conduta principal (K_{32}) são muito semelhantes nas duas geometrias embora surjam sempre com valor ligeiramente superior para a geometria 1 ($A_b/A_s=1$).
- Os valores do coeficiente de perda de carga entre a conduta principal e a conduta de derivação (K_{31}), aparecem praticamente coincidentes, nas duas geometrias ensaiadas, para divisões de caudal (Q_1/Q_3) inferiores a 0,4. Para as divisões de caudal de valor superior a 0,4 as diferenças entre as duas geometrias aumentam progressivamente.
- A maior diferença entre os valores de K_{31} obtidos para as duas geometrias medidas acontece para a situação de desvio completo do caudal de entrada para a conduta de derivação. Para esta condição do escoamento obtém-se um valor de K_{31} maior na geometria 2, sendo a diferença entre valores medidos superior a 70% relativamente à 1ª geometria analisada.
- A partir dos valores de K_{31} e K_{32} obtidos, determinaram-se os coeficientes de perda de potência e propõem-se leis de variação deste coeficiente com a divisão de caudal, obtidas a partir do ajuste aos valores calculados.
- Para a primeira geometria estudada sugere-se uma lei de variação linear, na segunda geometria o melhor ajuste foi conseguido com um polinómio de 3º grau. De referir, no entanto, que as duas leis propostas apresentam

uma evolução praticamente coincidente para divisões de caudal Q_1/Q_3 inferiores a 0,5.

- Sendo os valores de K_D , praticamente coincidentes para as divisões de caudal entre 0 e 0,5 também os escoamentos deverão ser muito semelhantes. A partir da divisão de caudal $Q_1/Q_3=0,5$ as diferenças, entre os coeficientes obtidos, são progressivamente mais marcadas pelo que deverão ser mais importantes as diferenças entre os escoamentos correspondentes.
- Da comparação dos resultados obtidos, para os coeficientes de perda de carga, com outros autores, verifica-se uma razoável concordância com os valores propostos por Gardel. Relativamente aos valores propostos por Idelcik, verificam-se afastamentos significativos. Para os valores de K_{32} o afastamento é mais notório na gama de divisões de caudal Q_1/Q_3 de 0,4 a 0,6. Para os valores de K_{31} o afastamento é progressivamente mais evidente para os valores de $Q_1/Q_3 > 0,4$.
- Qualquer que tenha sido a divisão de caudal estabelecida verificou-se a separação do escoamento, (junto da parede interior), na conduta de derivação, em ambas as geometrias analisadas.
- Para a geometria 1 ($Ab/As=1$) foi avaliada a dependência do comprimento de separação do escoamento (apenas para $Q_1/Q_3=0,5$), junto da parede da conduta, com o número de Reynolds. Verificou-se que este se mantém praticamente constante para a gama de números de Reynolds entre 10000 e 40000. (Esta análise não foi repetida para a 2ª geometria estudada).
- Na conduta principal, e para a geometria 1, verifica-se a separação do escoamento para divisões de caudal $Q_1/Q_3 \geq 0,7$ (no caso de $Q_1/Q_3=0,7$ a recirculação apresenta um valor residual de $\approx 3\text{mm}$ de comprimento, para $Q_1/Q_3=0,8$ e $Q_1/Q_3=0,9$ os comprimentos de separação atingem os 53mm e 75mm, respectivamente).
- Na 2ª geometria analisada, foram determinadas as linhas envolventes das zonas de separação do escoamento que surgem, tanto na conduta

principal como na conduta de derivação. Na conduta principal verifica-se a separação a partir da condição de escoamento $Q_1/Q_3 \geq 0,6$.

- Os pontos de separação do escoamento, detectados na conduta principal, ocorrem numa zona próxima do final da bifurcação. Com o aumento do caudal desviado para a conduta de derivação, estes pontos de separação deslocam-se gradualmente para montante acontecendo o inverso com os pontos de "recolamento", i. e. deslocam-se sucessivamente para jusante.
- As zonas de separação do escoamento, que ocorrem junto da parede interior da conduta de derivação, têm ponto de separação coincidente com a aresta de ligação das condutas.
- O comprimento máximo das zonas de separação detectadas verifica-se para a partição de caudal $Q_1/Q_3=0,05$, e é de cerca de 140 mm e 160mm respectivamente para a geometria 1 e geometria 2.
- A evolução dos comprimentos de separação, com a divisão de caudal Q_1/Q_3 , é semelhante nas duas geometrias estudadas, mas com valores ligeiramente inferiores na geometria 2 (excepto para $Q_1/Q_3=0,05$ onde se verifica o contrário).
- Ao longo da conduta principal os escoamentos obtidos, para as duas geometrias, são praticamente coincidentes.
- A evolução, do escoamento que percorre a conduta de derivação, é semelhante nas duas geometrias. As principais diferenças podem ser justificadas com a presença de vórtices de dimensões diferentes.
- Após a bifurcação, a uma distância de 5D, as perturbações introduzidas nos escoamentos, de ambas as geometrias, ainda são notadas, pelo que, o completo desenvolvimento do escoamento ainda não aparece estabelecido.
- O efeito de sucção, da conduta de derivação sobre o escoamento a montante da zona de bifurcação, faz-se notar claramente a uma distância

de $-0,1D$, onde se verifica alguma assimetria no perfil de velocidades medido. O perfil medido à distância de $-0,5D$ apresenta desvios pouco significativos em relação a um perfil turbulento desenvolvido, pelo que, esta distância, pode ser considerada indicativa para o limite de influência do efeito de sucção referido.

- Para uma melhor caracterização do escoamento e dos fenómenos físicos envolvidos, nas perdas de carga localizadas, seria necessária informação sobre a distribuição das tensões turbulentas.

9.2 - Sugestões para trabalhos futuros

- Em trabalhos semelhantes a realizar deverão ser contempladas medições que permitam o apuramento de outras quantidades turbulentas, nomeadamente as tensões turbulentas (Reynolds), seria ainda importante efectuar medições de pressão ao longo da zona de bifurcação.
- A análise do escoamento deste tipo de bifurcações deverá ser estendida ao estudo de outros fluidos, de características não Newtonianas.
- Existe muito pouca informação sobre a interacção de derivações sucessivas, em especial, a influência de uma derivação sobre as derivações que surgem para jusante desta.
- A caracterização do campo de velocidades, neste tipo de geometria, deverá ser estendido a escoamentos com divisões de caudal diferentes de 0,5, uma vez que prevêem alterações significativas.

- Determinar a envolvente completa das zonas de recirculação na sua forma tridimensional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Boldy, A. P.

Performance of dividing and combining tees. BHRA Technical report 1061, 1970.

[2] Buell, J. ; Soliman, H. ; Sims, G.

Two-phase pressure drop and phase distribution at a horizontal tee junction, Int. Journal Multiphase Flow - vol.20 pp. 819-836, 1994.

[3] Coleman, H.W. and Steele, W.G., Jr.

Experimentation and uncertainty analysis for engineers. Mississippi State University, 1978.

[4] Crow, D.A. ; Wharton, R.

A review of literature on the division and combination of flow in closed circuits. The British Hydrodynamics Research Association (BHRA), Technical note 937, 1968.

[5] Durst, F. ; Kikura H. ; Lekakis, I. ; Jovanovic J. ; Ye, Q.

Wall shear stress determination from near-wall mean velocity data in turbulent pipe and channel flows. Experiments in fluids, 20, 417-428, 1996.

[6] Durst, F. ; Martinuzzi R. ; Sender, J. ; Thevenin D.

LDA - Measurements of mean velocity, RMS - values and higher order moments of turbulence intensity fluctuations in flow fields with strong velocity gradients.

[7] Eriksson, J.G. ; Karlsson, R.I.

Near wall turbulence structure in the plane turbulent wall jet in still surroundings. Royal Institute of Technology, 2000.

[8] Escudier, M. P. ; Smith, S.

Fully developed turbulent flow of non-Newtonian liquids through a square duct, 2000.

[9] Espinosa, F.S. ; Bates, C.J.

Prediction and measurement of a turbulent flow in a 90° pipe junction. V encontro nacional de mecânica computacional, Univ. do Minho, 1997.

[10] Fu, H. ; Watkins, A.P.; Tindal, M.J. ; Yianneskis, M.

Turbulent dividing flow in a branched duct. Laser Anemometry - vol. 1 ASME, 1991.

[11] Gardel, A

Les pertes de charge dans les branchements en Té des conduites de section circulaire.
Bulletin technique de la Suisse Romande, n°25, 1970.

[12] Hayes, R.E.; Nandkumar, K. ; Nasr-El-Din, H.

Steady laminar flow in a 90° planar branch. Computers and fluids, 17, 537-553, 1989.

[13] Hinze, J.

Turbulence, 2nd edition, MacGraw-Hill, 1975.

[14] Hunt, C.R. ; Morrison, J.F.

Eddy structure in turbulent boundary layers. Eur.J.Mech.B-Fluids, vol. 19 pp.673-694, 2000.

[15] Khodadadi J. M.

Wall pressure and shear stress variations in a 90° bifurcation during pulsatile laminar flow.
Journal of Fluids Engineering, vol. 113 , 1991.

[16] Kiya, M. ; Mochizuki, O. ; Ishikawa, H.

Challenging issues in separated and complex turbulent flows. Division of mechanical science,
Hokkaido University, 2000.

[17] Liepsch, D. and Moravec, S.

Pulsatile flow of non-Newtonian fluid in distensible models of human arteries. Biorheology, 21,
pp. 571-586, 1984.

[18] Maia, R.

Investigações numéricas e experimentais do efeito das perdas de carga localizadas em sistemas de tubagens. Métodos e técnicas para o seu estudo sistemático. O caso particular do Tê a 90°. Tese de doutoramento, Universidade do Porto, 1992.

[19] Maia R. ; Pinho, F.T. ; Proença, M.F. ; Schulte, A.

Energy Losses on a 90° Tee Junction. Ninth International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 1998.

[20] Moravec, S. ; Liepsch, D.

Flow investigations in a model of a three-dimensional human artery with Newtonian and non-Newtonian fluids. Part I. Biorheology, 20, pp. 745-759, 1983.

[21] Muller, W. ; Stratmann, H.

Pressure losses in branch pipes and distributors. Sulzer Technical Review, 1971.

[22] Nikolaidis, N.M. ; Mathioulakis, D.S.

Axial and secondary flow study in a 90° bifurcation under pulsating conditions using PIV. Journal of fluids engineering, vol.124 pp.505-511, 2002.

[23] Novais Barbosa, J.

Mecanica dos fluidos e hidraulica geral. Porto editora, 1986.

[24] Ohba, K. ; Sato, M. ; Sakaguchi, S. ; Sakurai, A.

Visualization and measurement of detailed velocity field in U-bend and branched tube using laser-induced fluorescence method.

[25] Oliveira, P.J. ; Pinho, F.T.

Pressure drop coefficient of laminar Newtonian flow in axisymmetric sudden expansions. Int. J. Heat and fluid flow, vol.18, No. 5, 1997.

[26] Ross Ethier , Sujata Prakash ; David A. Steinman ; Richard L. Leask ; Gregory G. Couch ; M. Ojha

Steady flow separation patterns in a 45 degree junction, Journal of Fluid Mechanics, 2000.

[27] Schinas, D. ; Mathioulakis, D.S.

Pulsating flow in a 90° bifurcation. J. Of Fluids Engineering, vol.122, pp.569-575, 2000.

[28] Simpson, R.L. ; Strickland, J.H. , Barr, P.W.

Features of a separating turbulent boundary layer in the vicinity of separation.J. Fluid Mech. Vol. 79, pp. 553-594, 1977.

[29] Takeshi, K. ;Herman, H.M. ; Goldsmith, L.

Particle flow behaviour in models of branching vessels: Vortices in 90° T-junctions. Biorheology, 16, pp. 231-248, 1979.

[30] Townes, H.W. ; Gow, J.L. ; Powe, R.E. ; Weber, N.

Turbulent flow in smooth and rough pipes. Journal of Basic Engineering, pp.353-362, 1972

[31] Tropea, C.

Measuring technics in experimental fluid mechanics, 1985.

[32] White, F. M.

Viscous Fluid Flow. Mc Graw-Hill, Inc, 1991.



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000093938