

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Química

Efeitos Tridimensionais no Escoamento em Torno de Cilindros Confinados

Vera Maria Machado Ribeiro

Dissertação apresentada com vista à obtenção do grau de mestre em Engenharia
Química pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto

Dissertação realizada sob a supervisão de:

- Professor Doutor Fernando Manuel Tavares de Pinho do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Professora Doutora Maria Teresa Sena Esteves do Departamento de Engenharia Química do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Dezembro 2008

Agradecimentos

Todos os dias e em todas as etapas da minha vida há algo que aprendo. Pode ser um conhecimento científico, uma forma de pensar, uma forma de estar, uma atitude...verdadeiras lições de vida.

Chegada ao fim mais uma etapa da minha vida, posso ainda enaltecer que para além de tudo o que aprendi, sinto ainda o privilégio de ter aprendido, e com a certeza de que continuarei a aprender, com determinadas pessoas a quem aqui deixo o meu reconhecimento e agradecimento.

Ao orientador Professor Fernando Pinho pelo acompanhamento e pela partilha dos seus sábios conhecimentos.

À co-orientadora Professora Maria Teresa Sena Esteves por todo acompanhamento, conhecimentos partilhados e pela confiança em mim.

Ao Professor Manuel Alves pelas oportunidades, pelos conhecimentos transmitidos, pelas críticas e por toda a ajuda indispensável.

Ao Professor Paulo Coelho pela ajuda reconhecidamente indispensável na construção da instalação e por todos os saberes partilhados.

À Patrícia Sousa, pela companhia no laboratório, por toda a ajuda e por todos os pormenores e sábios “truquezinhos” que comigo partilhou.

Ao CEFT – Centro de Estudos e Fenómenos de Transporte pela cedência do espaço, equipamento e todo o material.

À Fundação para a Ciência e a Tecnologia e FEDER, no âmbito do programa POCI2010, via projectos POCI/EQU/59256/2004 e POCI/EQU/56342/2004 e no âmbito do Programa Nacional de Re-equipamento Científico (Projectos REEQ/262/EME/2005 e REEQ/928/EME/2005), que permitiu a compra de parte do equipamento utilizado no âmbito desta tese.

E sem referir nomes, porque eles sabem quem são, a todos os meus amigos que de uma forma ou outra me ajudaram.

Por fim, não pelos conhecimentos científicos mas apenas por existirem na minha vida, aos meus Pais, às minhas Irmãs, aos meus Sobrinhos e à Dra. Luísa Gomes.

Resumo

Tendo em consideração a elevada relevância do estudo do escoamento de fluidos newtonianos e não-newtonianos no desenvolvimento e melhoramento de muitos processos industriais, onde estes escoamentos apresentam na sua maioria carácter tridimensional, a realização deste trabalho tem como principal objectivo o estudo dos efeitos tridimensionais do escoamento laminar de fluidos newtonianos em torno de um cilindro confinado.

Com o objectivo de estudar e quantificar os efeitos tridimensionais no escoamento laminar em torno de um cilindro confinado, pretende-se neste trabalho estudar experimentalmente o efeito da razão de forma $AR = 8$ (razão entre a largura da secção rectangular e a sua profundidade - AR) e razão de bloqueio $BR=50\%$ (razão entre o diâmetro do cilindro e a profundidade da secção rectangular - BR), através da caracterização do escoamento em diferentes condições. Utilizaram-se para o efeito dois fluidos newtonianos, a água e uma solução aquosa de glicerina a 46,3 %.

Para se efectuar a caracterização do escoamento utilizam-se duas técnicas. A visualização de escoamentos, através de uma técnica fotográfica de elevado tempo de exposição, e a medição detalhada do campo de velocidade, utilizando a técnica denominada por velocimetria por imagem de partículas (PIV). Os resultados obtidos experimentalmente são posteriormente comparados com previsões numéricas efectuadas.

O estudo do efeito da variação da razão de forma é efectuado apenas numericamente para $AR = 1$ e $AR = 8$ para diferentes números de Reynolds.

Através da caracterização do fluido (visualização de escoamentos e PIV), pode-se concluir que existem quatro picos de velocidade no escoamento em torno do cilindro nas condições estudadas experimentalmente ($AR = 8$ e $BR = 50\%$). Estes picos de velocidade correspondem ao local onde o comprimento da recirculação é mínimo.

Comparando o escoamento para $AR = 8$ e $AR = 1$ conclui-se que para $AR = 8$ o efeito do cilindro é dominante enquanto que para $AR = 1$ o escoamento é dominado pelo efeito do cilindro e pelo efeito das paredes laterais.

Abstract

The study of Newtonian and non-Newtonian fluids around a confined cylinder reveals a great importance in the development and improvement of some real flow phenomena that happens in industrial processes such as polymer extrusion and injection molding, where the Reynolds numbers are quite low due to the high fluid viscosity.

The main goal of this work is to investigate experimental and numerically the three-dimensional effects on the laminar flow of Newtonian fluids around a confined cylinder. The effect of the aspect ratio, AR (ratio between the width of the rectangular section and its depth) was studied experimentally for $AR = 8$ and for blockage ratio $BR = 50\%$ (ratio between the cylinder diameter and the depth of rectangular section), through the characterisation of different flow conditions. The fluids used were water and an aqueous solution of glycerine 46,3 wt%.

Flow visualisations were carried out using streak line photography and the velocity field of the flow was measured in detail using Particle Image Velocimetry (PIV). The experimental results obtained were also compared with numerical predictions.

Moreover, the effect of the variation of the aspect ratio was studied numerically for $AR = 1$ and $AR = 8$.

Through the characterization of the fluid (flow visualizations and PIV measurements), one can conclude that there are four velocity peaks around the cylinder under the conditions studied experimentally ($AR = 8$ and $BR = 50\%$). These velocity peaks correspond where the length of the recirculation is minimal.

Comparing the flow for $AR = 8$ and $AR = 1$, one can conclude that for $AR = 8$ the effect of cylinder is dominant, while for $AR = 1$ the flow is dominated by the effect of cylinder and the effect of the side walls.

Índice

1. Introdução	1
1.1 Fluidos newtonianos e não-newtonianos	1
1.2 Motivação e Contribuição	2
1.3 Objectivos	4
1.4 Organização da Tese	5
2. Revisão Bibliográfica	7
2.1 Fluidos newtonianos e não-newtonianos	7
2.2 Escoamento em Torno de um Cilindro Confinado	8
2.3 Escoamento em Torno de um Cilindro Confinado – Efeitos Tridimensionais	9
2.4 Conclusão	10
3. Descrição Experimental	11
3.1 Construção da Instalação	11
3.2 Descrição da Instalação	14
3.3 Técnicas Utilizadas	16
3.3.1 Visualização de Escoamentos	16
3.3.2 Medição do Campo de Velocidades – PIV	18
3.4 Caracterização dos Fluidos	20
3.5 Procedimento Experimental	21
3.6 Método Numérico	23
4. Resultados e Discussão	25
4.1 Caracterização Reológica do Fluido N46,3	25
4.2 Análise de Incertezas	27
4.3 Caracterização do Escoamento	29
4.3.1 Comprimento da Recirculação – L_V	29
4.3.2 Medição do Campo de Velocidades – PIV	33
4.4 Variação da Razão de Forma – Estudo Numérico	41
5. Conclusões e Recomendação para Trabalho Futuro	47
5.1 Conclusões	47
5.2 Recomendações para Trabalho Futuro	49

Referências Bibliográficas	51
Anexos	1
Anexo A	1
Anexo B	17
Anexo C	19
Anexo D	20
Anexo E	23

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Domínio de escoamento tridimensional: conduta de secção $L \times H$.	4
Figura 3.1 – Representação esquemática da instalação experimental.	12
Figura 3.2 – Instalação experimental construída.	13
Figura 3.3 – Representação esquemática da coluna (a) e do cilindro (b).	14
Figura 3.4 – Posição 1 da coluna em que foram realizados os ensaios – estudo do plano xz .	15
Figura 3.5 – Posição 2 da coluna em que foram realizados os ensaios – estudo do plano xy .	15
Figura 3.6 – Esquema pormenorizado do cilindro na coluna e dos lasers.	17
Figura 3.7 – Esquema pormenorizado do cilindro na coluna e do laser do PIV.	19
Figura 3.8 – Posição 1 da coluna em que foram realizados os ensaios – estudo do plano xz .	22
Figura 3.9 – Posição 2 da coluna em que foram realizados os ensaios – estudo do plano xy .	22
Figura 4.1 – Variação da viscosidade do fluido em função da temperatura.	26
Figura 4.2 – Fotografia obtida no ensaio realizado com o fluido N46,3 com número de Reynolds de 23,0 no plano $z/R=0$.	30
Figura 4.3 – Variação do comprimento da recirculação em função do número de Reynolds para cada plano em estudo.	31
Figura 4.4 – Variação do comprimento da recirculação em função do número de Reynolds nos planos $z/R=0$ e $z/R=15$.	32
Figura 4.5 – Perfis de velocidade ao longo da linha central ($y/R=0$ e $z/R=0$) para $Re=15,2$ e $Re=27,5$.	34
Figura 4.6 – Perfis de velocidade ao longo de z/R ($y/R=0$) para $Re=15,2$ e $Re=27,5$.	35
Figura 4.7 – Figura 4.7 – Comparação dos perfis transversais da velocidade axial em $z/R=0$ e $z/R=15$ para $Re = 11,2$: a) $s/R=-4$; b) $s/R=-2$; c) $s/R=1$; d) $s/R=2$; e) $s/R=4$; f) $s/R=10$;	38
Figura 4.8 – Comparação dos perfis transversais da velocidade axial e m $z/R=0$ e $z/R=15$ para $Re = 19,9$: a) $s/R=-4$; b) $s/R=-2$; c) $s/R=1$; d) $s/R=2$; e) $s/R=4$; f) $s/R=10$;	39

Figura 4.9 – Comparação dos perfis transversais da velocidade axial em $z/R=0$ e $z/R=15$ para $Re = 35,7$: a) $s/R=-4$; b) $s/R=-2$; c) $s/R=1$; d) $s/R=2$; e) $s/R=4$; f) $s/R=10$;	40
Figura 4.10 – Perfis de velocidade ($y/R=0$ e $s/R=4$) em função da direcção z/R para os números de Reynolds de 10, 20 e 40: a) $AR = 8$; b) $AR = 1$;	42
Figura 4.11 – Variação do comprimento da recirculação em função da direcção z/R para os números de Reynolds de 10, 20 e 40: a) $AR = 8$; b) $AR = 1$;	44
Figura A.1 – Acessório de entrada e saída da coluna com seis injectores.	3
Figura A.2 – Distribuidor.	4
Figura A.3 – Secção de trabalho.	5
Figura A.4 – Pormenor do sistema de fixação das placas para a contracção bidimensional.	6
Figura A.5 – Suporte para as secções de 160 e 40 mm.	7
Figura A.6 – Suporte para as secções de 80 e 20 mm.	8
Figura A.7 – Espaçador para secção 80 mm.	9
Figura A.8 – Espaçador para secção 40 mm.	10
Figura A.9 – Espaçador para secção 20 mm.	11
Figura A.10 – Cilindro com 10 mm de diâmetro.	12
Figura A.11 – Suporte para cilindro de 10 mm de diâmetro.	13
Figura A.12 – Cilindro com 5 mm de diâmetro.	14
Figura A.13 – Suporte para cilindro de 5 mm de diâmetro.	15
Figura A.14 – Cilindro com 16 mm de diâmetro.	16
Figura B.1 – Esquema inicial da instalação experimental.	17
Figura E.1 – <i>Frame 1</i> de um par de imagens.	23
Figura E.2 – <i>Pixel Mean</i> obtida.	24
Figura E.3 – Imagem obtida após a subtracção da imagem <i>Pixel Mean</i> .	24
Figura E.4 – Imagem obtida após a aplicação da <i>mask</i> .	25
Figura E.5 – Imagem obtida após a aplicação da correlação.	25
Figura E.6 – Imagem obtida após a aplicação da <i>Moving Average</i> .	26
Figura E.7 – Imagem do mapa de vectores.	26
Figura E.8 – Perfil de velocidade retirado do mapa de vectores a dois raios a jusante do cilindro.	27

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 – Valor dos caudais e respectivos números Reynolds estudados na visualização de escoamentos.	30
Tabela 4.2 – Valor dos caudais e respectivos Reynolds estudados na medição do campo de velocidades com a coluna na posição 1.	33
Tabela 4.3 – Valor dos caudais e respectivos números de Reynolds estudados na medição do campo de velocidades com a coluna na posição 2.	36
Tabela C.1 – Valores obtidos do ensaio reológico do fluido N46,3.	19
Tabela D.1 – Valor do comprimento da recirculação para cada número de Reynolds e respectivo plano para os ensaios realizados com água.	20
Tabela D.2 – Valor do comprimento da recirculação para cada número de Reynolds e respectivo plano para os ensaios realizados com N46,3.	21
Tabela D.3 – Valor do comprimento da recirculação para cada número de Reynolds dos resultados experimentais e dos resultados numéricos nos planos $z/R=0$ e $z/R=15$.	22

Nomenclatura

τ - Tensão de Cisalhamento

$\frac{\partial v}{\partial y}$ - Gradiente de Velocidade

η – Viscosidade (Pa.s)

(x,y,z) – Coordenadas cartesianas

L – Largura da secção rectangular (mm)

H – Profundidade da secção rectangular (mm)

D_{Cilindro} – Diâmetro do cilindro (m)

R_{Cilindro} – Raio do cilindro (mm)

Re – Número de Reynolds

u – Velocidade Axial (m/s)

U – Velocidade média (m/s)

ρ – Massa Volúmica (Kg/m³)

AR – Razão de Forma

BR – Razão de Bloqueio

O – Ordem de Grandeza

T – Temperatura (°C ou K)

T_0 – Temperatura de referência (°C ou K)

η_0 – Viscosidade de Referência (Pa.s)

1. Introdução

Neste capítulo introdutório, apresenta-se inicialmente a definição de fluido e a distinção entre fluido newtoniano e não-newtoniano. Posteriormente, indicam-se as motivações para a realização desta tese bem como a sua contribuição, justificando assim a relevância deste trabalho. Por fim, indicam-se os objectivos associados à realização desta tese e descreve-se de forma sucinta a sua estrutura.

1.1 Fluidos newtonianos e não-newtonianos

Denomina-se de fluido toda a matéria, no estado líquido ou gasoso, que se deforma indefinidamente quando sujeita à acção de uma força de cisalhamento (ou corte ou tangencial). Os fluidos compartilham a propriedade de não resistir à deformação e por isso não têm forma própria, tomando a forma do recipiente que ocupam.

As propriedades dos fluidos relevantes para o estudo da dinâmica dos fluidos de escoamentos isotérmicos são a massa volúmica, a tensão superficial, a viscosidade e restantes propriedades reológicas.

De acordo com as suas propriedades reológicas, os fluidos podem ser classificados como newtonianos ou não-newtonianos. Assim, se um fluido obedece à lei

de Newton da viscosidade, descrita na equação (1), diz-se que este fluido é newtoniano, como por exemplo a água ou o ar.

$$\tau = \eta \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \quad (1)$$

Sendo τ a tensão de cisalhamento (Pa), η a viscosidade (Pa.s) e $\frac{\partial v}{\partial y}$ o gradiente de velocidade (s^{-1}).

Se um fluido não obedece à lei de Newton da viscosidade, diz-se que este fluido é não-newtoniano, como por exemplo, o sangue, tintas, etc.

Embora o conceito de viscosidade seja utilizado para classificar os fluidos, o estudo das características dos fluidos não-newtonianos poderá ser feito através de outras propriedades reológicas que mostram as relações entre os tensores de tensão e de deformação sob diferentes condições, como a deformação oscilatória ou o fluxo extensional, que são medidas através de reómetros de corte e de reómetros extensionais.

1.2 Motivação e Contribuição

O escoamento e a deformação de qualquer fluido durante o seu processamento tem um papel muito importante nas propriedades finais de produtos como os polímeros, metais, cerâmicos, etc. Assim, o conhecimento do comportamento dos materiais é essencial para obter produtos com as propriedades desejadas e auxilia no projecto dos equipamentos utilizados no processamento desses materiais.

A generalidade dos materiais poliméricos apresenta características reológicas de fluidos não-newtonianos, podendo-se encontrar este tipo de fluidos em diversos processos das indústrias petroquímica, alimentar, farmacêutica, dos plásticos, das tintas e dos detergentes, entre outras.

A produção anual de produtos plásticos continua a aumentar a um ritmo acentuado, tendo-se registado uma produção mundial de 80 milhões de toneladas em 2004. Comparando este valor com a produção anual observada em 1950, de apenas 5 milhões de toneladas, compreende-se facilmente o acréscimo da importância dos materiais poliméricos no nosso dia a dia.

Os materiais poliméricos possuem frequentemente comportamento viscoelástico, o qual se caracteriza pela manifestação simultânea de comportamento viscoso e elástico quando sujeitos a uma deformação. Desta combinação resultam frequentemente escoamentos com comportamentos algo inesperados, como se pode observar no interessante álbum de fotografias coligidas por Boger e Walters (1993).

A generalidade dos estudos experimentais com fluidos newtonianos e não-newtonianos refere-se a condições em que o escoamento pode ser considerado bidimensional. Contudo, em situações práticas é habitual os escoamentos processarem-se em geometrias complexas, nas quais o padrão de escoamento apresenta um forte carácter tridimensional, como é o caso do escoamento em torno de um cilindro, colocado perpendicularmente ao escoamento no centro de uma conduta de secção quadrada. Esta geometria apresenta uma elevada simplicidade geométrica, no entanto conduz a padrões de escoamento complexos, que importa perceber. Neste contexto, Ferreira (2007) desenvolveu o estudo numérico de efeitos tridimensionais no escoamento de fluidos newtonianos e viscoelásticos em torno de um cilindro.

Tendo em consideração que a experimentação permite a validação dos modelos matemáticos usados nos cálculos numéricos, pretende-se com o trabalho desenvolvido nesta tese dar continuidade e validar o trabalho desenvolvido por Ferreira (2007). Desta forma será possível contribuir para a compreensão do comportamento dos fluidos em geometrias ainda pouco estudadas, como é o caso do escoamento em torno de um cilindro confinado.

Embora o objectivo principal do trabalho em curso seja o estudo do comportamento dos fluidos não-newtonianos em geometrias complexas tridimensionais, torna-se imperativo iniciar o estudo de determinadas condições de escoamento (neste caso o escoamento em torno de um cilindro confinado) pelos fluidos newtonianos, para o qual o estudo numérico tem uma elevada precisão, e só depois proceder ao estudo do comportamento dos fluidos não-newtonianos em geometrias mais complexas, de relevância industrial. Isto porque a problemática dos escoamentos de fluidos não-newtonianos passa também pela escolha do modelo reológico adequado que represente a reologia de fluidos usados nas experiências, o que nem sempre é evidente, sobretudo quando nos escoamentos existem zonas de características muito diversas e também com regiões dominadas por efeitos de corte e zonas predominantemente extensionais. Esta multiplicidade de características nos escoamentos aumenta o grau de incertezas das comparações numérico-experimental.

1.3 Objectivos

Este trabalho tem como principal objectivo o estudo experimental do escoamento laminar em torno de um cilindro de envergadura finita inserido numa conduta rectangular, com vista à quantificação dos efeitos tridimensionais, utilizando fluidos newtonianos.

Com o objectivo de quantificar os efeitos tridimensionais, pretende-se estudar o efeito da variação da razão de forma, AR (do inglês *aspect ratio*), que é a razão entre a largura da secção rectangular e a sua profundidade (L / H), conforme se pode verificar na figura 1.1, uma vez que estes efeitos são acentuados com a diminuição da razão de forma.

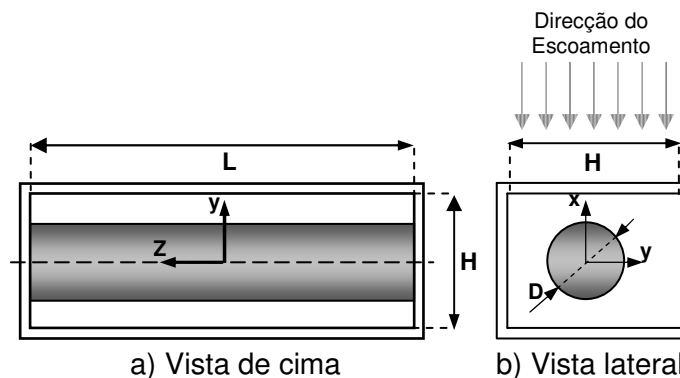


Figura 1.1 – Domínio de escoamento tridimensional: conduta de secção $L \times H$. Vista de cima do cilindro (a) e vista lateral correspondente (b)).

A influência da razão de forma surge combinada com os parâmetros adimensionais que caracterizam dinamicamente o escoamento. Como o estudo desenvolvido neste trabalho refere-se a fluidos newtonianos, o parâmetro adimensional que caracteriza o regime de escoamento é o número de Reynolds. Assim, os parâmetros adimensionais relevantes nesta tese são os seguintes:

- Razão de Forma, $AR = \frac{L}{H}$
- Número de Reynolds, $Re = \frac{\rho U R_{Cilindro}}{\eta}$
- Razão de Bloqueio, $BR = \frac{D_{Cilindro}}{H} = 0,5$

Para efectuar o estudo e a quantificação do efeito da razão de forma no escoamento em torno do cilindro, faz-se a caracterização do escoamento em diferentes condições.

Neste trabalho, a caracterização do escoamento faz-se com duas técnicas. A primeira é a visualização de escoamentos através da utilização de uma técnica fotográfica de elevado tempo de exposição e a segunda técnica, denominada velocimetria por imagem de partículas, doravante designada por PIV (do inglês *Particle Image Velocimetry*), a qual permite efectuar a medição detalhada do campo de velocidades do escoamento.

É ainda objectivo deste trabalho complementar as medições experimentais e efectuar comparações com um estudo numérico usando um programa de simulação já existente (Oliveira et al 1998 e Alves et al 2001). Nesta tese, não foram desenvolvidos novos métodos numéricos, mas apenas utilizados os métodos e códigos já existentes, como ferramenta de simulação numérica para previsão dos escoamentos em estudo por via experimental.

1.4 Organização da Tese

Esta tese encontra-se dividida em cinco capítulos. No capítulo 2 desta tese apresenta-se um resumo da bibliografia relevante para este estudo.

No capítulo 3 encontra-se a descrição da instalação e das técnicas utilizadas com vista à obtenção de resultados e por fim referem-se os procedimentos seguidos no trabalho experimental.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados experimentais obtidos em cada uma das técnicas utilizadas (técnica fotográfica e PIV), bem como a discussão relativa aos resultados obtidos. Neste capítulo efectua-se ainda as respectivas comparações com as previsões numéricas.

Para finalizar, no capítulo 5, e tendo em consideração todo o trabalho experimental e os resultados obtidos, apresentam-se as conclusões do trabalho bem como algumas sugestões de trabalho futuro.

2. Revisão Bibliográfica

Introdução

Neste capítulo apresentam-se as referências bibliográficas de maior relevância associadas ao estudo de escoamento de fluidos newtonianos e não-newtonianos, em torno de um cilindro confinado, para que se possa enquadrar o estudo desenvolvido nesta tese na literatura já existente.

2.1 Fluidos newtonianos e não-newtonianos

Sendo o objectivo deste trabalho o estudo dos efeitos tridimensionais do escoamento laminar de fluidos em torno de um cilindro confinado, importa desde já salientar que este é um tema pouco estudado, embora de óbvio interesse dado o carácter tridimensional dos escoamentos reais. Apesar de tudo, há alguns trabalhos relacionados com o tema, que de seguida serão descritos sucintamente. No entanto, antes de abordar especificamente este escoamento, salientam-se dois marcos da maior relevância no estudo de fluidos newtonianos e não-newtonianos.

O primeiro, relacionado com o estudo do comportamento de fluidos não-newtonianos, é a incontornável obra de Bird et al (1987) “Dynamics of Polymeric Liquids”, onde se faz uma abordagem teórica da dinâmica de fluidos de materiais poliméricos. O segundo, está relacionado com uma abordagem experimental, e é o livro “Rheological Phenomena in Focus” de Boger e Walters (1993), onde se ilustra uma parte significativa dos trabalhos experimentais de visualização efectuados.

As visualizações de Boger e Walters com fluidos newtonianos são no fundo motivadas pelo trabalho com fluidos não-newtonianos. Neste contexto, os trabalhos realizados numérica e experimentalmente com fluidos newtonianos surgem como necessidade de estabelecer aproximações dos fluidos não-newtonianos aos fluidos newtonianos, com vista à obtenção de uma solução numérica exacta para o escoamento dos fluidos não-newtonianos.

2.2 Escoamento em Torno de um Cilindro Confinado

No trabalho de Boger and Walters (1993), destaca-se a complexidade do escoamento de fluidos viscoelásticos em torno de um cilindro e salienta-se que a sua análise é particularmente indicada para análise numérica. Neste sentido, e dado que ainda não se obteve a solução exacta para o escoamento de fluidos viscoelásticos em torno de um cilindro, este escoamento foi seleccionado para problema de referência em Reologia Computacional por Brown e McKinley (1994).

Após a selecção como problema de referência em reologia computacional, observa-se um elevado interesse no estudo deste escoamento e por isso iniciaram-se vários estudos experimentais e numéricos de escoamento de fluidos viscoelásticos em torno de um cilindro, como refere a obra de Owens (2002), que apresenta uma extensa revisão bibliográfica do tema.

Neste contexto, desde a sua selecção como problema de referência, iniciaram-se vários trabalhos experimentais acerca do escoamento de fluidos viscoelásticos em torno de um cilindro (McKinley et al. (1993); Baaijens (1995); Vershelst and Nieuwstadt (2004)). No entanto, a maior parte dos trabalhos que surgiram desde então, foram desenvolvidos numericamente (Fan et al. (1999); Alves e tal. (2001); Caola et al (2001); Sahin and Owens (2004); Ferreira (2007)). A maioria destes trabalhos considera o escoamento em torno de cilindros de elevado comprimento, sendo por isso o escoamento bidimensional. Assim, verifica-se uma lacuna no estudo dos efeitos tridimensionais do escoamento em questão, e por isso o interesse no estudo desenvolvido neste trabalho.

2.3 Escoamento em Torno de um Cilindro Confinado – Efeitos Tridimensionais

O estudo efectuado por Verhelst (2004) é o trabalho mais próximo do objecto de estudo desta tese. Neste trabalho, analisa-se experimentalmente o escoamento de fluidos viscoelásticos em torno de um cilindro disposto simetricamente no interior de uma conduta rectangular com razão de forma de 8:1 e razão de bloqueio cilindro/coluna de 1:2. Uma das principais conclusões deste trabalho é a de que o escoamento nestas condições não pode ser considerado bidimensional mas sim tridimensional.

Neste contexto, verifica-se que o estudo dos efeitos tridimensionais do escoamento laminar em torno de um cilindro confinado é relativamente recente e a maior parte dos estudos realizados são maioritariamente numéricos.

Ainda que neste trabalho se dê relevância ao estudo do escoamento laminar em torno de um cilindro, salientam-se os trabalhos de Gerich e Eckelman (1982) e Norberg (1994), que efectuaram o estudo dos efeitos tridimensionais de fluidos Newtonianos em torno de um cilindro mas em regime turbulento.

No estudo realizado por Poole et al (2007), em que algumas das características do escoamento em estudo são comuns à do escoamento em torno de um cilindro confinado numa conduta rectangular, observa-se a existência de picos de velocidade junto das paredes laterais.

Desta breve revisão ressalta que o que ainda não está claramente estabelecido é qual deverá ser a razão de forma a partir da qual o escoamento possa ser considerado bidimensional, e no caso em que ele é tridimensional, quais são as respectivas características do escoamento.

Recentemente, Ferreira (2007), desenvolveu o estudo numérico dos efeitos tridimensionais do escoamento em torno de cilindro confinado com o objectivo de dar respostas a estas questões, e posteriormente alargar o âmbito do estudo a fluidos de características não newtonianas. Neste trabalho, também se verificou a existência de picos de velocidade junto das paredes laterais.

Assim, este trabalho dá continuidade aos estudos de Ferreira (2007) e tem como objectivo demonstrar experimentalmente algumas das suas descobertas (como a existência de picos de velocidades junta das paredes laterais) validando os seus cálculos, para permitir a continuação desta investigação a novos efeitos da tridimensionalidade dos escoamentos.

2.4 Conclusão

Sendo o escoamento laminar de fluidos newtonianos e não-newtonianos em torno de um cilindro de elevada relevância em vários processos industriais (como por exemplo nos processos com permutadores de calor), onde os escoamentos apresentam características de tridimensionalidade, considera-se este trabalho de elevada relevância científica e industrial.

Por outro lado, considera-se também importante o facto de este trabalho ter como objectivo complementar e validar o trabalho numérico desenvolvido por Ferreira (2007).

3. Descrição Experimental

Neste capítulo apresenta-se inicialmente uma breve descrição da instalação experimental e posteriormente, faz-se a descrição da secção de teste, bem como de todos os equipamentos usados na execução deste trabalho. De seguida descrevem-se as técnicas de visualização de escoamentos e de medição detalhada do campo de velocidades (PIV), as condições de operação e referem-se os procedimentos seguidos em cada uma destas técnicas. Por fim, faz-se uma breve referência ao método numérico utilizado no estudo numérico que complementa os resultados experimentais.

3.1 Construção da Instalação

Depois de projectada e construída a coluna de secção rectangular, onde se encontra inserido o cilindro, elaborou-se o esquema da instalação experimental, que se encontra representado na figura 3.1.

Para completar este trabalho, os desenhos a partir dos quais se construiu a coluna, são apresentados no anexo A. Estes desenhos são da autoria do Professor Paulo José da Silva Martins Coelho que conjuntamente com o Professor Manuel António Moreira Alves conceberam a instalação.

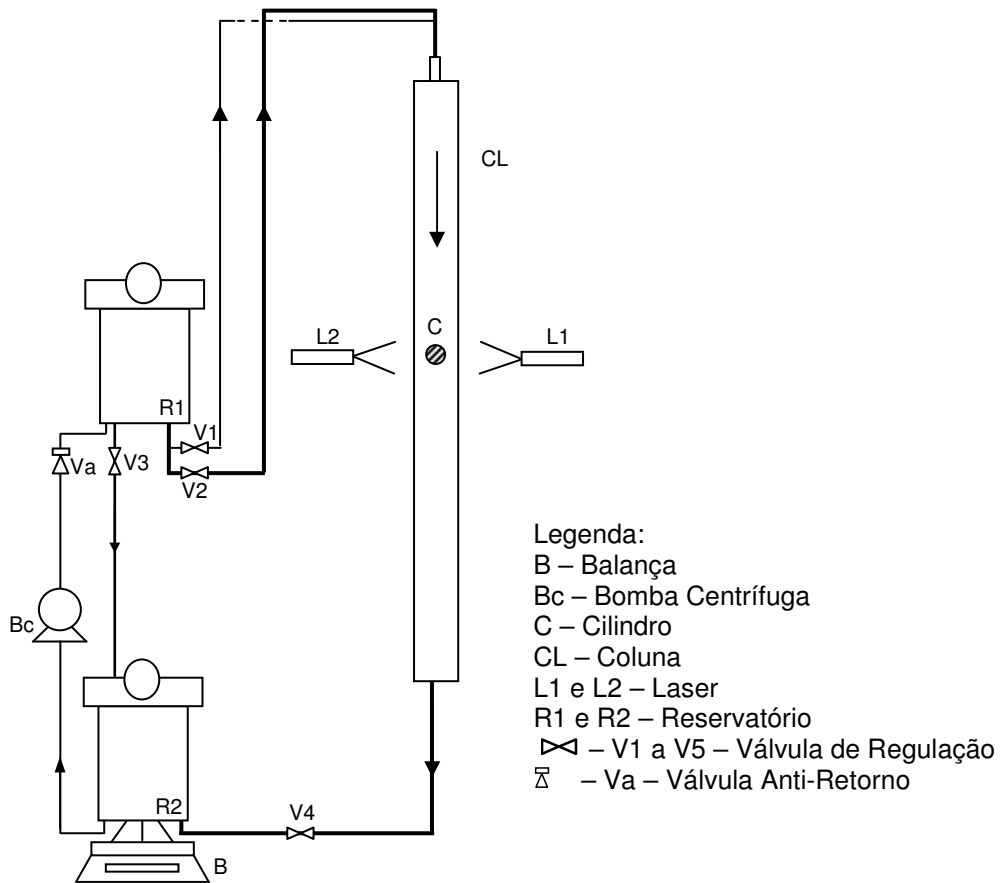


Figura 3.1 – Representação esquemática da instalação experimental.

Posteriormente, procedeu-se à montagem da instalação, que está suportada numa estrutura em *Dexion*, que tem como finalidade suportar todos os equipamentos necessários para a actividade experimental (coluna, balança, reservatórios, etc). Na figura 3.2 apresenta-se uma vista geral da instalação experimental.

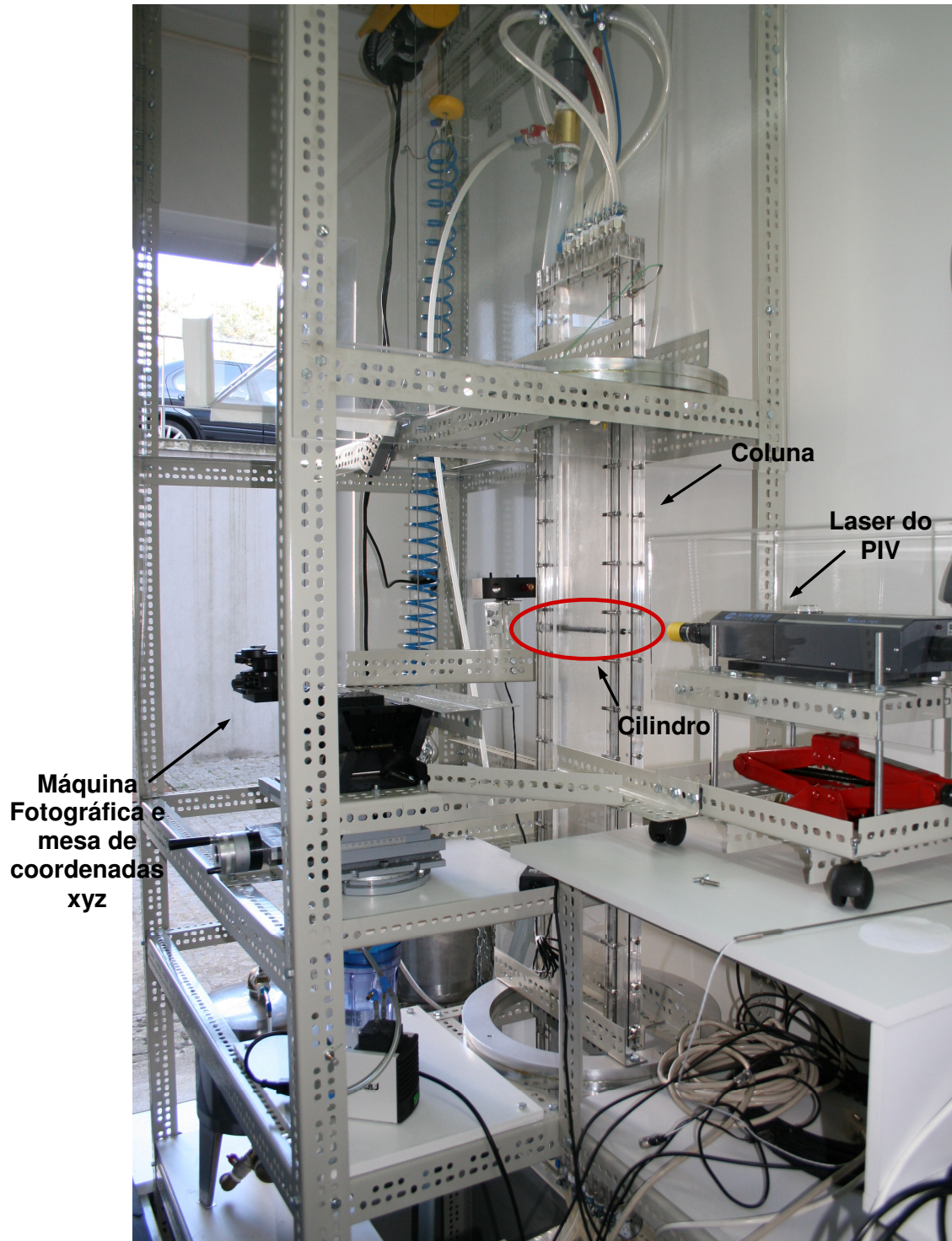


Figura 3.2 – Instalação experimental construída.

No decorrer da montagem e utilização da instalação, esta foi sendo sucessivamente sujeita a algumas alterações de forma a otimizar os resultados. Nas figuras 3.1 e 3.2 está representada a versão final da instalação experimental, ou seja, a instalação otimizada. Toda a descrição experimental, resultados e discussões

apresentadas nesta tese referem-se aos resultados obtidos na instalação experimental representada nas figuras 3.1 e 3.2.

As alterações efectuadas bem como os motivos da necessidade de efectuar estas alterações na instalação experimental, encontram-se descritos no anexo B desta tese.

3.2 Descrição da Instalação

O elemento principal da instalação experimental é a coluna de secção rectangular onde está inserido o cilindro, perpendicularmente à direcção do escoamento. Tendo em consideração o modo como foi construída a instalação, o fluido circula por gravidade e por isso circula no sentido descendente.

A coluna, construída em acrílico, tem 1,7 m de altura e o cilindro encontra-se a uma distância de 0,63 m a partir do topo da coluna. A secção rectangular da coluna tem uma largura (L) de 160 mm e uma profundidade (H) de 20 mm, conforme se mostra na representação esquemática na figura 3.3.

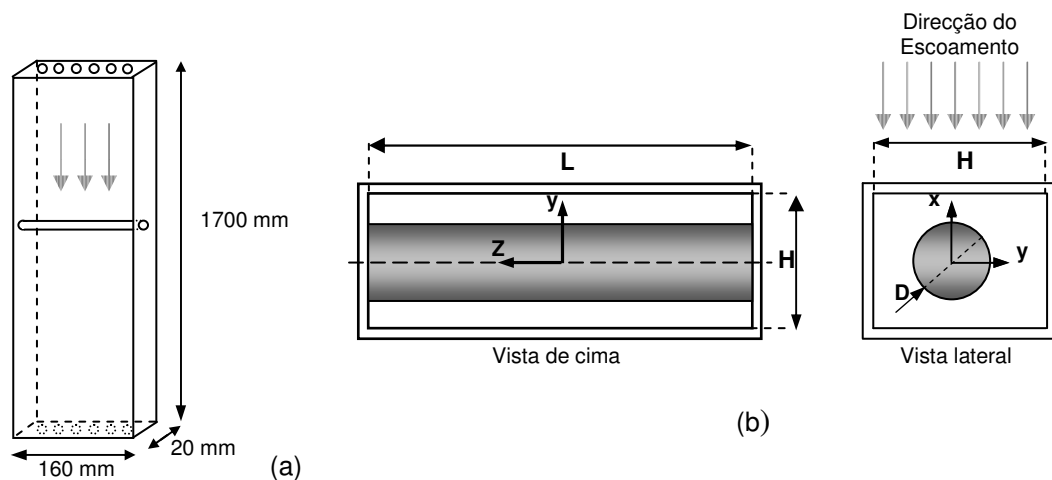


Figura 3.3 – Representação esquemática da coluna (a) e do cilindro (b).

Pode-se ainda verificar na representação da figura 3.3 (a), que o fluido entra na coluna através de seis injectores, uniformemente distribuídos em toda a largura da coluna, de forma a garantir que a velocidade do fluido seja o mais uniforme possível na entrada da coluna.

A coluna está acoplada a um suporte giratório que possibilita a sua rotação, tornando-se assim possível a realização do estudo do escoamento do fluido nos planos xz e xy . Assim, é possível realizar ensaios com a coluna em duas posições distintas, definidas como a posição 1 (estudo do plano xz) e a posição 2 (estudo do plano xy), tal como se pode verificar nas figuras 3.4 e 3.5, respectivamente.

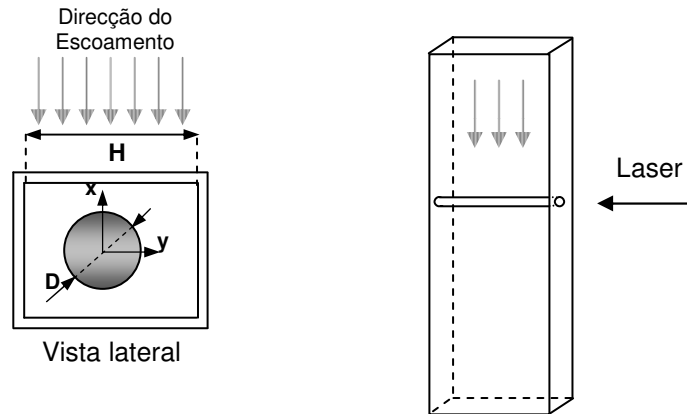


Figura 3.4 – Posição 1 da coluna em que foram realizados os ensaios – estudo do plano xz .

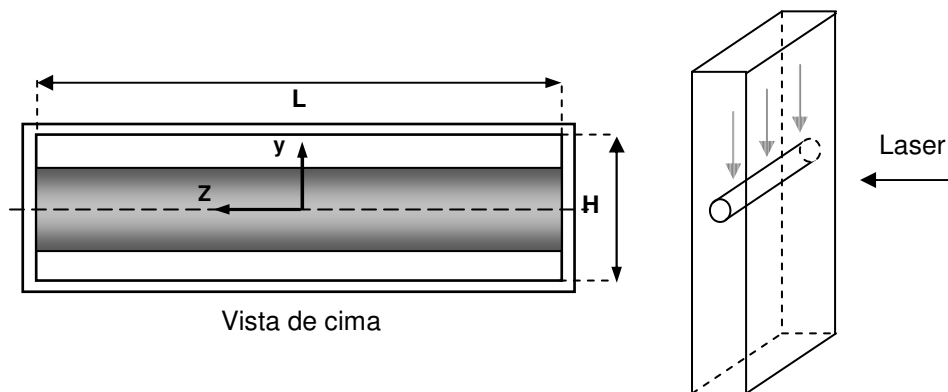


Figura 3.5 – Posição 2 da coluna em que foram realizados os ensaios – estudo do plano xy .

Para além da coluna, e conforme se pode verificar na figura 3.1, a instalação possui ainda dois reservatórios (R1 e R2), um dos quais armazena o fluido que é fornecido à coluna (R1) e o outro recebe o fluido proveniente da coluna (R2).

Depois de percorrer a coluna e entrar no reservatório R2, o fluido é transportado do reservatório R2 para o reservatório R1 por meio de uma tubagem e com o auxílio de

bomba centrífuga (Bc). Nesta tubagem existe uma válvula anti-retorno Va, localizada a jusante da referida bomba, para impedir que o fluido circule no sentido inverso.

Para garantir que o caudal de fluido fornecido à coluna seja constante em todo o ensaio, criou-se uma segunda ligação entre o reservatório R1 e o reservatório R2, para que o nível no reservatório R1 e R2 seja sempre constante e conseqüentemente o caudal seja constante. Assim, através desta ligação, o excesso de fluido retorna para o reservatório R2, de forma a garantir que a altura no reservatório R1 é constante.

Medição do Caudal

O caudal fornecido à coluna é determinado a partir da medição da massa de fluido que passa da coluna para o reservatório R2, recorrendo ao uso de uma balança (B) (KERN DS 36kg) com uma precisão de 0,5 g. A variação de peso ao longo do tempo é medido pela balança e registado num programa de aquisição de dados em *Labview*, que contabiliza o tempo em que se realiza a medição de forma a ser possível determinar o caudal mássico. Durante esta medição, a bomba centrífuga é desligada, e o fluido deixa de passar do reservatório R2 para o reservatório R1, de forma a poder-se determinar a massa de fluido que sai do reservatório R1, atravessa a coluna e acumula-se posteriormente no reservatório R2. Esta medição do caudal de fluido é efectuada no final de cada ensaio.

3.3 Técnicas Utilizadas

3.3.1 Visualização de Escoamentos

A técnica experimental de visualização do escoamento consiste na iluminação do cilindro, usando um díodo laser com uma potência de 5 mW e um comprimento de onda de 635 nm, que emite uma “folha” de luz vermelha. Esta “folha” de luz, perpendicular ao eixo do cilindro, que ilumina a geometria torna visíveis as partículas traçadoras que se encontram suspensas no fluido. São estas partículas que, por reflectirem a luz do díodo laser e por se deslocarem com o fluido, marcam a trajectória deste, que é depois captada por uma máquina fotográfica, usando tempos de exposição elevados. Para este fim, utilizou-se uma câmara fotográfica *CANON EOS 30D* com uma lente macro EF100mm.

Com o fluido a percorrer a coluna e o díodo laser a iluminar a fluido, procede-se à captação das fotografias. Como forma de se conseguir obter as trajectórias das partículas

traçadoras, é necessário ajustar o tempo de exposição da fotografia a cada caudal de fluido. Neste contexto, quanto menor o caudal do fluido, menor a velocidade do fluido e das partículas e por isso é necessário um maior tempo de exposição da fotografia, para se obter um rasto significativo.

Para que se pudessem estudar diferentes planos do cilindro e para garantir que a iluminação do cilindro seja uniforme em todo o seu comprimento e perímetro, utilizaram-se dois díodos laser iguais (laser 1 e laser 2), um de cada lado do cilindro colocados paralelamente, conforme se pode observar na figura 3.6.

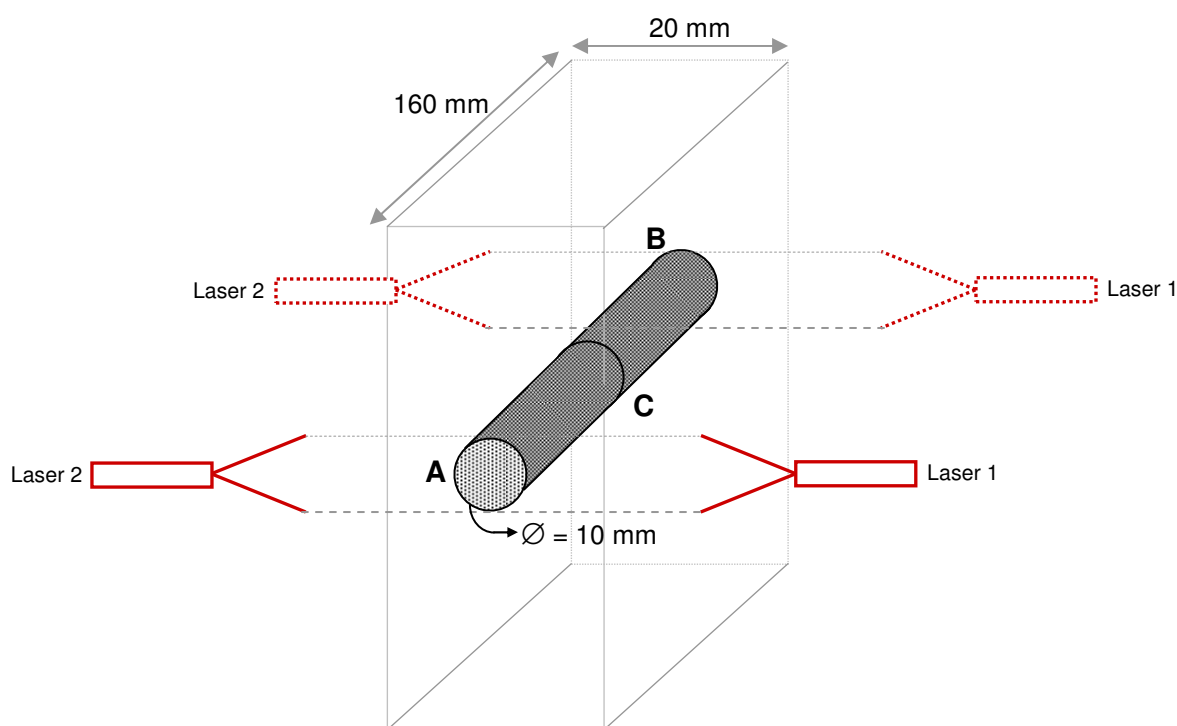


Figura 3.6 – Esquema pormenorizado do cilindro na coluna e dos lasers.

De acordo com a figura 3.6, verifica-se que ambos os díodos laser podem percorrer todo o cilindro, desde a posição A, definida como o início do cilindro até à posição B, definida como o final do cilindro. A posição C representa o plano central do cilindro.

O deslocamento ao longo do cilindro é efectuado recorrendo a uma mesa de coordenadas XYZ, à qual os lasers se encontram acoplados. Para que a distância entre a câmara fotográfica e o plano iluminado seja sempre a mesma, a câmara também se

encontra acoplada à mesa de coordenadas XYZ. Assim, o deslocamento dos díodos laser e da câmara fotográfica é sempre o mesmo.

De salientar que para cada ensaio (cada Re e cada plano em estudo) foi necessário ajustar o tempo de exposição de cada fotografia, de modo a se conseguir visualizar claramente a recirculação. Para isso, foi necessária uma fase inicial de experiência e de prática da técnica fotográfica com elevado tempo de exposição.

Nos ensaios realizados, tendo em consideração o caudal do escoamento em cada ensaio, o tempo de exposição para cada fotografia variou entre ($0 (0,1 \text{ s}) \leq \Delta t \leq 0 (10 \text{ s})$).

Na visualização do escoamento, para cada fotografia, ou seja, para cada número de Reynolds e respectivo plano em estudo, pretende-se medir o comprimento da recirculação (L_v), para assim se poder analisar a variação do comprimento da recirculação em função do número de Reynolds e da coordenada neutra do cilindro (z).

3.3.2 Medição do Campo de Velocidades – PIV

A medição detalhada do campo de velocidades é realizada, recorrendo ao sistema de Velocimetria por Imagem de Partículas – PIV. O sistema de PIV permite caracterizar com rigor e de uma forma quantitativa os campos de velocidade do escoamento de fluidos.

O sistema de PIV é constituído por um laser (*Solo PIV III* da New Wave Research), que emite uma “folha” de luz verde com um comprimento de onda de 532 nm, com uma energia máxima de 50 mJ, por pulso de luz.

No sistema de PIV, o fluido é iluminado por dois pulsos de luz, de forma a captar o trajecto de cada partícula existente no fluido entre esses dois pulsos de luz, resultando duas imagens separadas por um tempo pré-definido, que permitem a criação do mapa de vectores. Estas imagens são adquiridas através de uma câmara digital de CCD (*Flow Sense 2M*, Dantec Dynamics), à qual se encontra acoplada uma lente Nikon – AF Micro de 60 mm.

Para a aquisição e tratamento das imagens adquiridas é utilizado o software *FlowManager v4.60* (Dantec Dynamics). Uma breve explicação acerca do tratamento das imagens obtidas por PIV até à criação do mapa de vectores, encontra-se no anexo E desta tese.

De salientar que para cada ensaio foi necessário definir o tempo entre cada pulso de luz, para que cada partícula se deslocasse cerca de 25% da área de interrogação (valor recomendado no manual). Para isso, foi necessária uma fase inicial de experiência e de prática da utilização do PIV.

Nos ensaios realizados, tendo em consideração o caudal do escoamento em cada ensaio, o tempo entre cada pulso de luz variou entre $(0 (1 \times 10^3 \mu\text{s}) \leq \Delta t \leq 0 (1 \times 10^5 \mu\text{s}))$ e para cada ensaio foram obtidos 60 pares de imagens.

Tal como na visualização de escoamentos o laser do sistema PIV pode também percorrer todo o cilindro, desde a posição A, definida como o início do cilindro até à posição B, definida como o final do cilindro. A posição C representa o plano central do cilindro, conforme se pode verificar na figura 3.7.

O deslocamento ao longo do cilindro é efectuado recorrendo também a uma mesa de coordenadas XYZ, à qual o laser do PIV se encontra acoplado. Para que a distância entre a câmara fotográfica e o plano iluminado seja sempre a mesma, a câmara também se encontra acoplada a uma mesa de coordenadas XYZ. Assim, o deslocamento provocado no laser do PIV e na câmara fotográfica é sempre o mesmo.

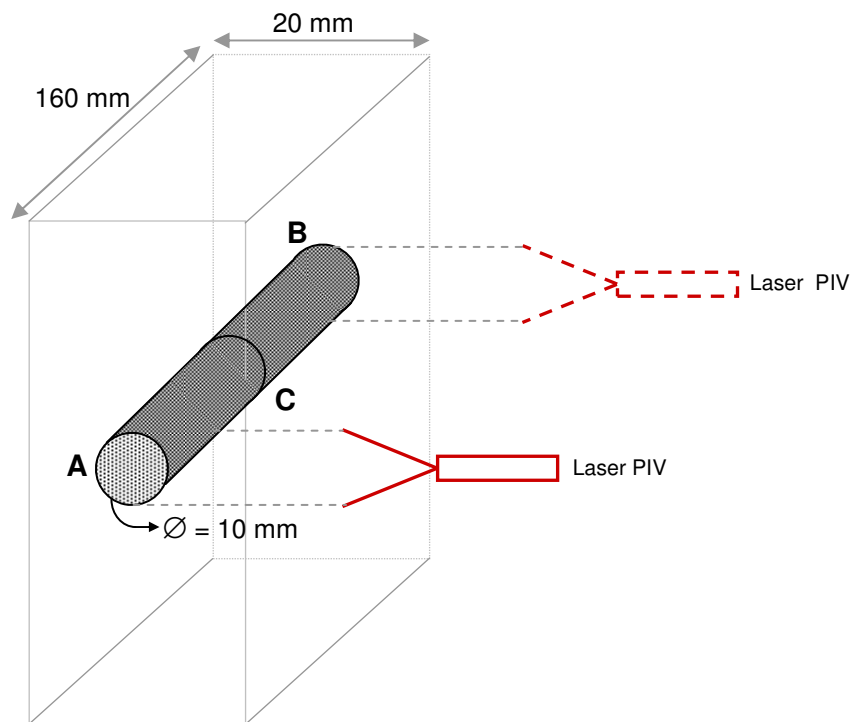


Figura 3.7 – Esquema pormenorizado do cilindro na coluna e do laser do PIV.

3.4 Caracterização dos Fluidos

No estudo efectuado nesta tese utilizaram-se dois fluidos newtonianos, água e uma solução aquosa de glicerina a 46,3%, doravante designada por fluido N46,3.

Numa fase inicial e de teste da instalação, realizaram-se ensaios com o fluido água. Posteriormente, utilizou-se o fluido N46,3.

Ainda que se espere que os resultados obtidos com água e com o fluido N46,3 sejam iguais em escoamentos a idêntico número de Reynolds, dado que ambos os fluidos são newtonianos, a realização de ensaios com o fluido N46,3 permite obter imagens com melhor qualidade na visualização de escoamentos. Isto porque este fluido apresenta uma maior viscosidade, o que permite trabalhar com velocidades de escoamento maiores e por isso a quantidade de partículas que passa através da coluna em cada ensaio é maior, o que possibilita que o trajecto das partículas obtido nas fotografias seja melhor definido.

Por outro lado, a utilização de um fluido com maior viscosidade, o que permite trabalhar com velocidades de escoamento maiores, possibilita também a obtenção de melhores resultados na medição detalhada do campo de velocidades, uma vez que a quantidade de partículas que atravessa a coluna vai ser maior e por isso os erros associados ao tratamento das imagens obtidas no PIV vão também ser menores.

Para a realização dos ensaios com qualquer um dos fluidos, é necessário cerca de 20L de fluido na instalação.

A ambos os fluidos (água e N46,3) adicionou-se 25 ppm de biocida (Kathon) com o objectivo de evitar e minimizar o desenvolvimento de bactérias nos fluidos e adicionou-se 20 ppm de partículas traçadoras de poliamida com diâmetro igual a 50 μm .

Assim, os fluidos utilizados neste trabalho continham:

Água:

- 100% de água
- 25 ppm de biocida
- 20 ppm de partículas

N46,3:

- 46,3% de glicerina
- 53,7% de água
- 25 ppm de biocida
- 20 ppm de partículas

Sendo a água um fluido com características reológicas (densidade, viscosidade) já estudadas, conhecidas e publicadas, não foi necessário efectuar a sua caracterização reológica. As características reológicas da água utilizadas neste trabalho foram retiradas do trabalho de Streeter e Wylie (1982).

Por outro lado, para o fluido N46,3 foi necessário medir a sua densidade (com um densímetro) e fazer a sua caracterização reológica, com o objectivo de determinar a viscosidade deste fluido.

Neste contexto, uma vez que o fluido é newtoniano, a sua análise reológica consiste em analisar a variação da viscosidade em função da temperatura, mantendo a taxa de deformação constante. Para tal, utilizou-se um reómetro de corte da marca Anton Paar e modelo Physica MCR301 e fez-se um ensaio em que se variou a temperatura do fluido entre 10°C e 22°C.

Sendo que a variação da viscosidade em função da temperatura pode ser descrita pela Equação de Arrhenius [$\ln(\eta/\eta_0) = (\Delta H/R) / (1/T - 1/T_0)$], a partir dos resultados obtidos no ensaio realizado no reómetro pode-se determinar o valor da viscosidade em função da temperatura.

Os resultados obtidos na caracterização reológica do fluido N46,3 encontram-se no capítulo 4 desta tese, onde se encontram todos os resultados obtidos neste trabalho.

3.5 Procedimento Experimental

Ainda que a coluna esteja preparada para trabalhar com várias razões de forma e com cilindros de vários diâmetros, no âmbito deste trabalho, e tendo em consideração o plano de trabalhos proposto, experimentalmente utilizou-se o cilindro com um diâmetro de 10 mm e estudou-se a geometria com razão de forma igual a 8 ($AR = 8$).

Temperatura

Como não existe na instalação forma de manter a temperatura do fluido constante ao longo dos ensaios, esta varia em função das alterações da temperatura ambiente a que o laboratório onde decorre o trabalho experimental está sujeito. Contudo, através de um sensor de temperatura colocado no interior na coluna, a temperatura do fluido em cada ensaio foi registada, de forma a ser possível determinar a viscosidade para a temperatura a que decorreu cada ensaio.

Pressão

Durante a realização dos ensaios a pressão relativa no interior da coluna é de cerca de +0,25 bar para garantir que não existem entradas de ar para o interior da coluna e desta forma evitar eventuais alterações no escoamento. O controlo da pressão no interior da coluna é efectuado através de um manómetro de pressão que se encontra acoplado à instalação.

No trabalho experimental realizado no âmbito desta tese, realizaram-se ensaios com a coluna em duas posições distintas, definidas como a posição a 1 e posição 2, tal como se pode verificar nas figuras 3.8 e 3.9. Nestas figuras encontram-se representados com cor vermelha os planos em que se efectuou o estudo do escoamento do fluido.

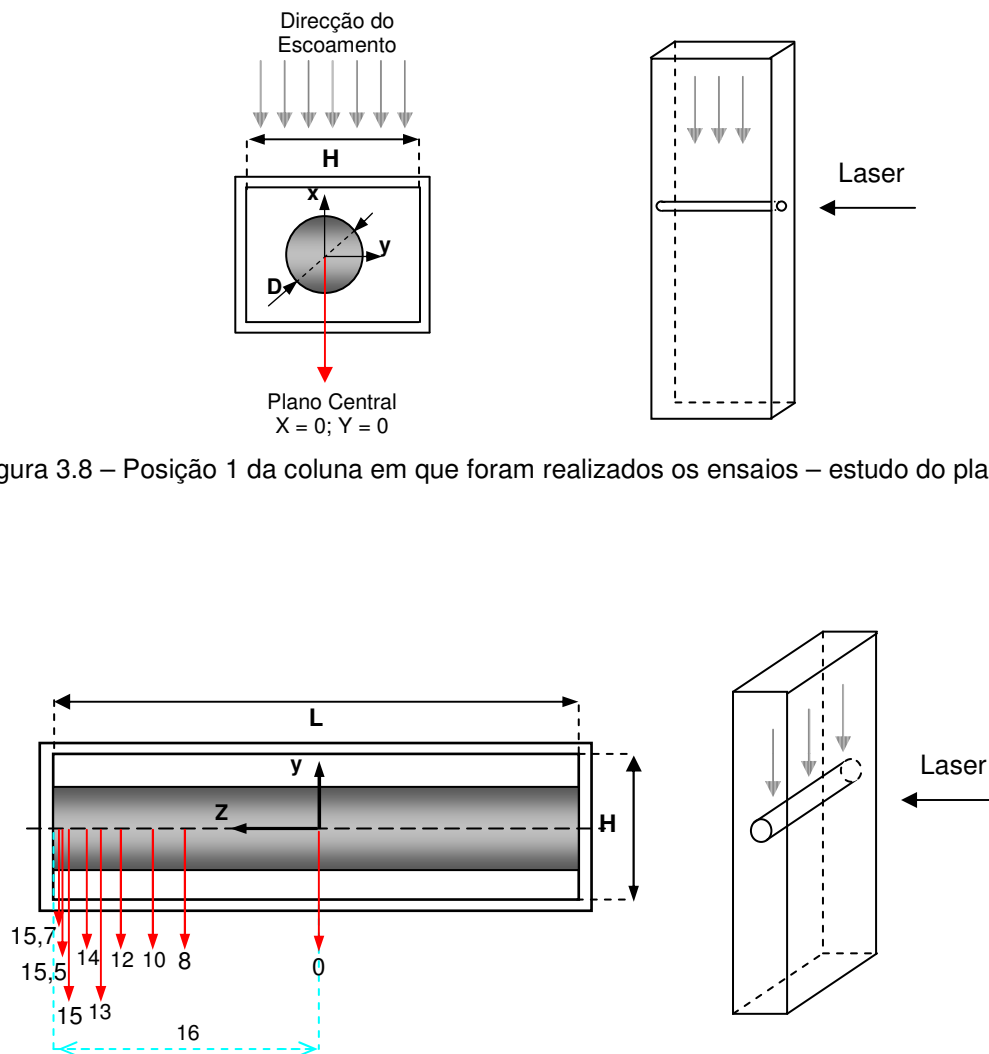


Figura 3.8 – Posição 1 da coluna em que foram realizados os ensaios – estudo do plano xz.

Figura 3.9 – Posição 2 da coluna em que foram realizados os ensaios – estudo do plano xy.

Com a coluna na posição 1, e para vários caudais de fluido (vários Re), realizaram-se ensaios com:

- Sistema PIV no plano central do cilindro ($x = 0$ e $y = 0$) – plano coincidente com a “folha” de luz do laser.

Com a coluna na posição 2, e para vários caudais de fluido (vários Re) realizaram-se ensaios com:

- Sistema PIV nos planos $z/R = 0; 8; 10; 12; 13; 14; 15; 15,5; 15,7$; - Planos perpendiculares à “folha” de luz do laser.
- Visualização de escoamentos nos planos $z/R = 0; 8; 10; 12; 13; 14; 15; 15,5; 15,7$; - Planos perpendiculares às “folhas” de luz dos díodos laser.

Nos ensaios realizados com a coluna na posição 2, considera-se que o escoamento é simétrico na direcção de z e por isso efectuasse o estudo experimental apenas num dos lados do cilindro, tal como se pode verificar na figura 3.9.

3.6 Método Numérico

O método numérico a partir do qual se pretende prever os escoamentos e desta forma complementar o estudo experimental, é o método dos Volumes Finitos que tem sido amplamente utilizado e encontra-se actualmente validado (Oliveira et al 1998 e Alves et al 2001).

Tendo em consideração que não é objectivo deste trabalho a aprendizagem do método numérico utilizado, sugere-se a consulta de Ferreira (2007), onde se encontra uma descrição detalhada do método numérico.

Neste trabalho, a utilização da simulação numérica, visa complementar e comparar os resultados experimentais com o estudo numérico efectuado. No entanto, a análise da variação da razão da forma efectuada neste trabalho é apenas numérica.

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos experimental e numericamente neste trabalho. Inicialmente mostram-se os resultados obtidos na caracterização reológica do fluido N46,3. Posteriormente faz-se uma breve análise das incertezas associadas a este trabalho. De seguida apresentam-se os resultados obtidos na visualização de escoamentos e na medição detalhada do campo de velocidades. Os resultados obtidos numericamente vão sendo apresentados em simultâneo com os resultados experimentais, de modo a facilitar a sua comparação. Por fim, apresentam-se os resultados que permitem estudar o efeito da razão de forma, que são exclusivamente numéricos.

4.1 Caracterização Reológica do Fluido N46,3

Como já referido, e sendo o fluido N46,3 um fluido newtoniano, para se fazer a sua caracterização reológica, determinou-se a influência da temperatura na sua viscosidade, realizando para esse efeito um ensaio em que se fez variar a temperatura numa gama de valores pré-definidos (10°C a 22°C), mantendo constante uma dada taxa

de deformação ($\gamma = 0,01 \text{ s}^{-1}$). Considera-se que a temperatura de referência T_0 é igual a 20°C ($293,15 \text{ K}$).

Sendo que a variação da viscosidade em função da temperatura de um fluido newtoniano pode ser descrita pela equação de Arrhenius, a partir dos resultados obtidos no ensaio realizado no reómetro pode-se construir a *figura 4.1*. Sabendo que a viscosidade à temperatura de referência ($T_0=293,15 \text{ K}$) é $\eta_0= 0,0041 \text{ Pa.s}$, a partir do ajuste obtido determina-se o valor da viscosidade para qualquer temperatura. A partir do valor da viscosidade correspondente à temperatura de cada ensaio, determina-se o respectivo valor do número de Reynolds.

Os resultados obtidos através dos ensaios reológicos encontram-se tabelados no anexo C desta tese.

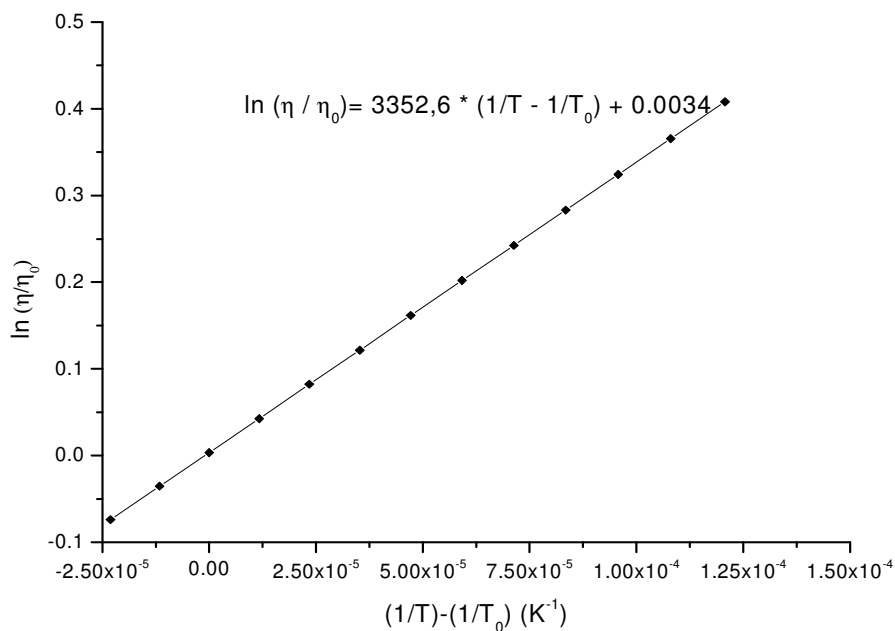


Figura 4.1 – Variação da viscosidade do fluido em função da temperatura.

Assumiu-se que na gama de temperaturas a que foram efectuados os ensaios a massa volúmica da solução é aproximadamente constante, $\rho = 1130 \text{ kg/m}^3$.

4.2 Análise de Incertezas

Dado que qualquer trabalho experimental e mesmo até qualquer método numérico está associado a um determinado grau de incerteza, a sua quantificação torna-se necessária para análise e comparação de resultados.

Ainda que neste trabalho não se faça uma quantificação específica de todos os erros associados a este trabalho, dadas as limitações temporais existentes, faz-se aqui uma breve análise quantitativa das incertezas associadas ao trabalho experimental. Os valores de incertezas apresentados de seguida apresentam um nível de confiança de 95%.

Embora a análise de incertezas do método numérico seja também importante, neste trabalho esta não vai ser realizada, dado que não houve qualquer desenvolvimento de métodos numéricos, mas apenas a utilização de um método.

Visualização de Escoamentos – Técnica Fotográfica

A incerteza associada à técnica fotográfica de elevado tempo de exposição utilizada na visualização dos escoamentos é a incerteza existente na medição do comprimento da recirculação, dado que esta medição é efectuada visualmente a partir das fotografias.

Assim, e de acordo com as inúmeras medições efectuadas e as respectivas repetições, verificou-se que a incerteza relativa na medição do comprimento da recirculação para baixos números de Reynolds é maior do que a incerteza na medição dos comprimentos para maiores números de Reynolds, dado que para menores números de Reynolds o comprimento da recirculação é menor do que para maiores números de Reynolds.

Quantitativamente, a incerteza na medição do comprimento da recirculação para menores números de Reynolds ($Re \approx 7$) é de cerca de 8% e a incerteza na medição do comprimento da recirculação para maiores números de Reynolds ($Re \approx 40$) é de cerca de 1,2%.

Medição detalhada do campo de velocidades – PIV

A incerteza associada à medição detalhada do campo de velocidades com PIV está relacionado com o tratamento das imagens com o software FlowManager v4.60 e apresenta um valor de cerca de 5%. Para a existência desta incerteza contribuem dois factores. A primeira contribuição deve-se ao facto do software não detectar o deslocamento das partículas entre cada par de imagem, caso a velocidade seja muito baixa. A segunda contribuição refere-se a um erro sistemático (referenciado no manual do PIV) e deve-se ao facto do software eliminar os pontos cujas velocidades das partículas sejam muito elevadas. Ao eliminar valores de velocidades mais elevadas, os resultados finais obtidos tendem para um valor de velocidade média mais baixa do que é na realidade.

Mudança de plano na direcção de z – Estudo do plano xy

As diversas repetições da mudança do plano na direcção de z , efectuada nos ensaios realizados na posição 2 da coluna (estudo do plano xy), bem como o tratamento e análise dos resultados, permitem concluir que existe uma incerteza associada a esta mudança de plano.

Assim, junto do plano $z/R=0$, a incerteza da mudança de plano é inferior à incerteza na mudança do plano junto das paredes laterais da coluna. Isto é, à medida que se altera o plano de $z/R=0$ em direcção à parede lateral da coluna ($z/R \rightarrow 16$), a incerteza, isto é, o desvio entre os valores experimentais e os dados numéricos, é progressivamente maior. Quantitativamente, a incerteza nas medições realizadas no plano $z/R=0$ é desprezável, aumentando progressivamente até aos 10%.

A existência desta incerteza deve-se a uma limitação da instalação. Isto é, a ligação efectuada entre a mesa de coordenadas e o laser (utilizado na visualização de escoamentos e no PIV) têm maior estabilidade no plano $z/R=0$ do que no plano junto das paredes laterais da coluna. De salientar que durante os ensaios observou-se esta limitação da instalação, no entanto a confirmação desta limitação verificou-se após a análise dos resultados. Este defeito introduz uma rotação da folha de laser em torno do eixo do yy , cujas consequências nefastas são ampliadas em regiões de elevados gradientes de velocidade, como acontece para valores de z mais elevados.

4.3 Caracterização do Escoamento

Na caracterização do escoamento laminar em torno de um cilindro confinado efectuada neste trabalho, todos os ensaios realizados referem-se ao intervalo de números de Reynolds entre 7 e 40, dado que Ferreira (2007) conclui no seu trabalho que a recirculação surge para números de Reynolds superiores a 7 e torna-se instável para números de Reynolds superiores a 40.

Tendo em consideração o número de ensaios realizados no presente trabalho, por motivos de clarificação e simplificação na interpretação de todas as figuras apresentadas na caracterização do escoamento, não se representam resultados para todos os números de Reynolds obtidos experimentalmente.

Em todas as figuras apresentadas na caracterização do escoamento, os resultados experimentais encontram-se representados por símbolos e os resultados numéricos por linhas. Note-se ainda que nestas figuras podem-se encontrar resultados de ensaios realizados com água e com o fluido N46,3.

Na caracterização do escoamento laminar em torno de um cilindro efectuada neste trabalho, apresentam-se primeiro os resultados referentes ao comprimento da recirculação (L_V) e posteriormente os resultados resultantes da medição do campo de velocidades com PIV.

4.3.1 Comprimento da Recirculação – L_V

O estudo do comprimento da recirculação foi efectuado através da visualização de escoamentos. Assim, e como já referido no capítulo 3 desta tese, a visualização de escoamentos foi efectuada com a coluna na posição 2 (estudo do plano xy). Neste contexto, para vários caudais de fluido (vários números de Reynolds), foram tiradas fotografias das linhas de rasto nos planos $z/R = 0; 8; 10; 12; 13; 14; 15; 15,5; 15,7$ (previamente definidos).

Os caudais para os quais se obtiveram as fotografias e respectivos números de Reynolds (Re) para cada fluido utilizado encontram-se resumidos na tabela 4.1.

Os valores de cada comprimento da recirculação medidos encontram-se no anexo D desta tese.

Tabela 4.1 – Valor dos caudais e respectivos números Reynolds estudados na visualização de escoamentos.

		Caudal (g/s)	Re
Experimentais	Água	11,104	19,4
		17,923	31,9
		21,935	39,2
	N46,3	18,894	7,2
		28,321	10,4
		35,343	13,9
		54,177	20,3
		68,881	27,3
		86,400	33,9

Como se obtiveram dezenas de fotografias na visualização do escoamento, apresenta-se apenas uma fotografia como exemplar de todas as que foram obtidas, a partir da qual se pode verificar a qualidade dos resultados obtidos. Assim, na figura 4.2 pode-se observar uma fotografia obtida no ensaio realizado com o fluido N46,3, com $Re=20,3$ e no plano $z/R=0$.

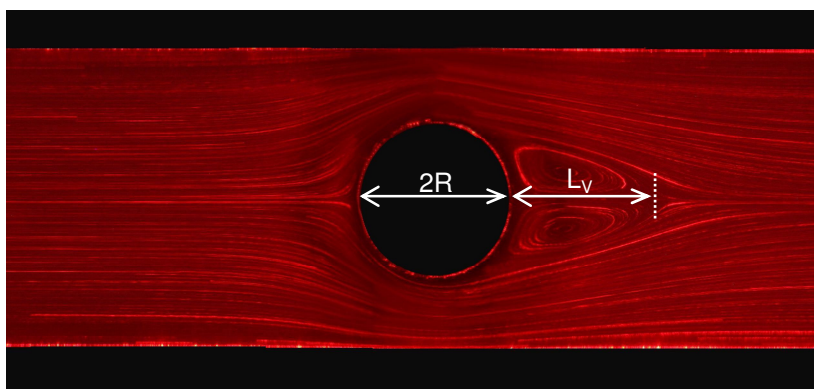


Figura 4.2 – Fotografia obtida no ensaio realizado com o fluido N46,3 com número de Reynolds de 20,3 no plano $z/R=0$.

Após a determinação do comprimento da recirculação (L_v) de cada ensaio, procede-se à representação gráfica do L_v/R em função da coordenada neutra do cilindro (z), para diferentes número de Reynolds. Assim, na figura 4.3, pode-se observar a variação do comprimento da recirculação (L_v) em função do plano em estudo (z), para diferentes números de Reynolds.

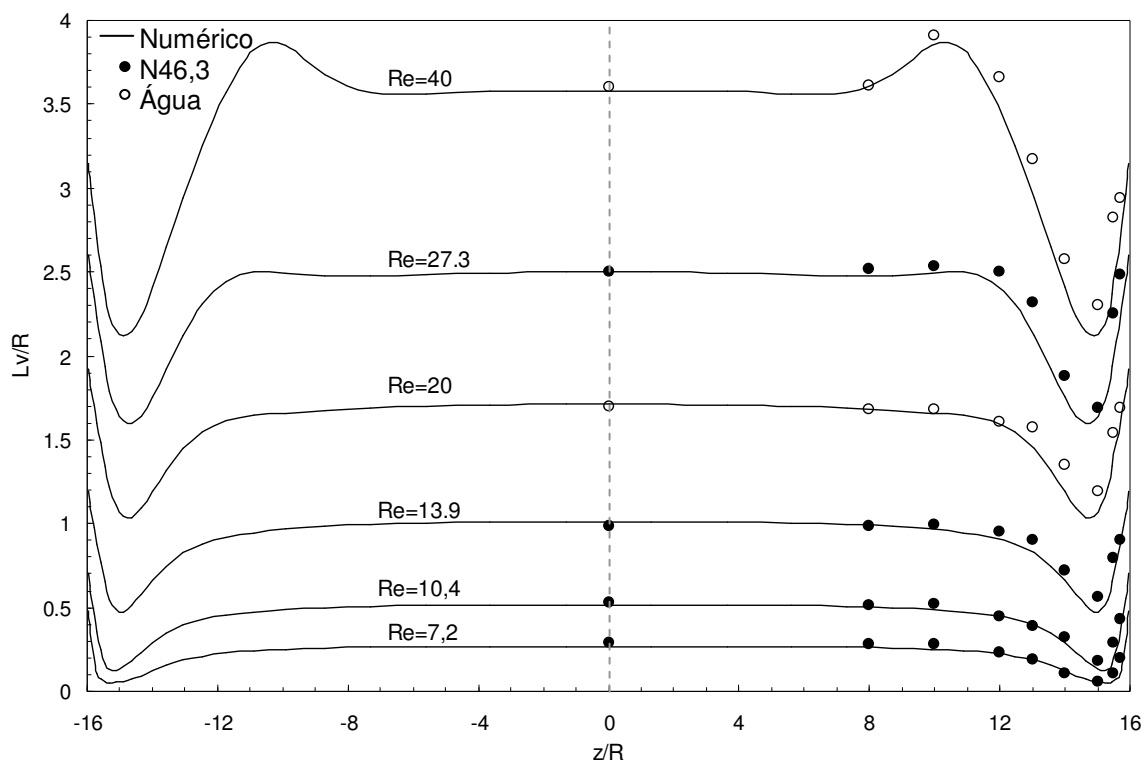


Figura 4.3 – Variação do comprimento da recirculação em função do número de Reynolds para cada plano em estudo.

Assim, a partir da observação da figura 4.3 verifica-se que $z/R=15$ é o plano de medição mais próximo do local onde o comprimento da recirculação é mínimo e por isso a velocidade do fluido é máxima, o que possibilita verificar a existência de picos de velocidade junto das paredes laterais da coluna, tal como era esperado de acordo com o trabalho numérico de Ferreira (2007).

Numericamente, pode-se ainda observar que existe simetria do comprimento recirculação em relação ao plano central do cilindro ($z/R=0$) e por isso o estudo experimental de diferentes planos de z/R pode ser realizado apenas em metade do cilindro, tal como foi efectuado neste trabalho.

Com os resultados obtidos referentes ao estudo do comprimento da recirculação, pode-se ainda analisar graficamente a variação do comprimento da recirculação em função do número de Reynolds e para os diferentes planos, tal como se pode observar na figura 4.4, $z/R=0$ (plano central) e $z/R=15$. Este último plano está próximo do local onde existe um pico de velocidade.

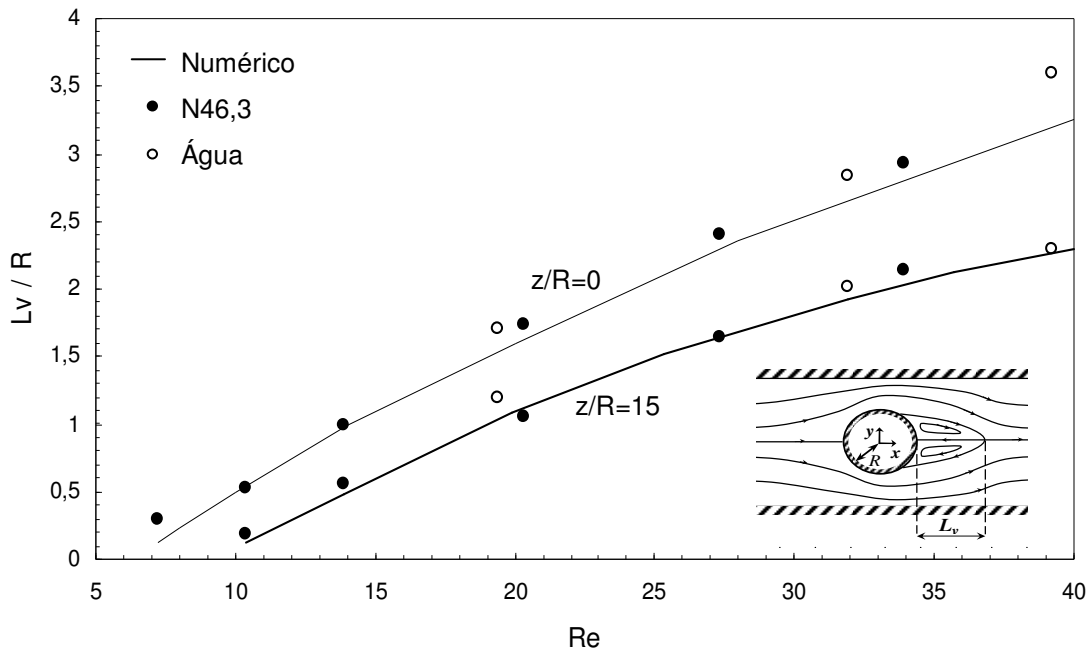


Figura 4.4 – Variação do comprimento da recirculação em função do número de Reynolds nos planos $z/R=0$ e $z/R=15$.

Conforme esperado, de acordo com Ferreira (2007), observa-se que o comprimento da recirculação aumenta com o aumento do número de Reynolds para ambos os planos representados ($z/R=0$ e $z/R=15$). No entanto, verifica-se que o aumento do comprimento da recirculação em função do aumento do número de Reynolds não é proporcional nos diferentes planos em estudo.

De referir ainda que para o número de Reynolds mais baixo representado na figura 4.4 ($Re=7,2$, $z/R=0$, N46,3), já existe recirculação, o que de acordo com Ferreira (2007) é esperado. Este concluiu no seu trabalho que para as condições de escoamento em que foram realizados estes ensaios a recirculação surge para números de Reynolds superiores a 7.

Através da análise dos resultados da figura 4.3 e da figura 4.4, verifica-se que a diferença máxima existente entre os resultados experimentais e numéricos é de cerca de 10%. Esta diferença é essencialmente devido à incerteza experimental da medição do comprimento da recirculação que se estima na ordem de 8%. Esta diferença inclui ainda uma contribuição de 3,5%, relativa ao efeito da incerteza da mudança de plano. Esta última contribuição é desprezável no plano central, mas importante junto das paredes laterais, onde ocorrem grandes gradientes de velocidades.

Assim, verifica-se que os resultados experimentais e numéricos são bastante concordantes, o que possibilita que estes resultados complementem e validem o estudo numérico desenvolvido por Ferreira (2007).

4.2.3 Medição do Campo de Velocidades – PIV

A medição detalhada do campo de velocidades utilizando o PIV foi efectuada com a coluna na posição 1 (estudo do escoamento no plano xz) e na posição 2 (estudo do escoamento no plano xy). Em ambas as posições em estudo, foram realizados ensaios para vários números de Reynolds.

Assim, com a coluna na posição 1, e para vários caudais (vários números de Reynolds), realizaram-se ensaios no plano central do cilindro ($x = 0$ e $y = 0$). Com a coluna na posição 2, e também para vários caudais, realizaram-se ensaios nos planos $z/R = 0; 8; 10; 12; 13; 14; 15; 15,5; 15,7$.

Na tabela 4.2 encontram-se representados os caudais e respectivos números de Reynolds dos ensaios realizados com a coluna na posição 1.

Tabela 4.2 – Valor dos caudais e respectivos Reynolds estudados na medição do campo de velocidades com a coluna na posição 1.

Fluido	Caudal (g/s)	Re
Água	6,868	11,4
	7,354	12,1
	9,300	15,2
	12,945	21,6
	14,087	22,9
	15,951	26,0
	17,385	27,5

Na figura 4.5 pode-se observar os perfis de velocidade ao longo da linha central da secção de teste ($y/R=0$ e $z/R=0$) para os números de Reynolds de 15,2 e 27,5.

A partir da análise da figura 4.5, verifica-se que a montante do cilindro, os dois perfis de velocidade são coincidentes e que o escoamento é afectado pela presença do cilindro a uma distância de cerca de quatro raios do cilindro ($s/R = (x/R - 1) = -4$), uma vez que é a partir desta distância que há alteração nos perfis de velocidade.

Pode-se observar que o intervalo $-1 > x/R < 1$, corresponde ao cilindro e por isso perfil de velocidades toma o valor de zero.

A jusante do cilindro, pode-se observar claramente a existência da recirculação bem como o aumento do seu comprimento com o aumento do número de Reynolds, tal como seria de esperar de acordo com o trabalho de Ferreira (2007) e também de acordo com os resultados obtidos no estudo do comprimento da recirculação já efectuada neste trabalho e já evidenciada anteriormente.

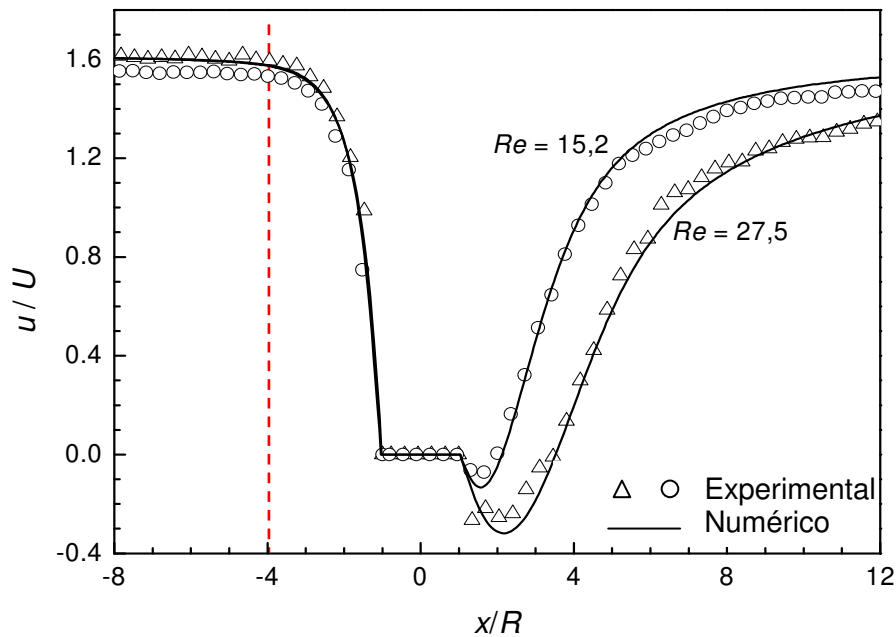


Figura 4.5 – Perfis de velocidade ao longo da linha central ($y/R=0$ e $z/R=0$) para $Re=15,2$ e $Re=27,5$.

Com os ensaios realizados na posição 1 da coluna, pode-se ainda representar os perfis de velocidade em função do plano $(x, 0, z)$ para vários valores de x , tal como se pode observar na figura 4.6.

Assim, na figura 4.6, evidenciam-se os perfis de velocidade a jusante do cilindro para as distâncias de $s/R = 2, 4, 6$ e 12 do cilindro ($s/R = x/R - 1$). No lado esquerdo da figura podem-se observar os resultados obtidos para $Re = 15,2$ e do lado direito da figura para $Re = 27,5$.

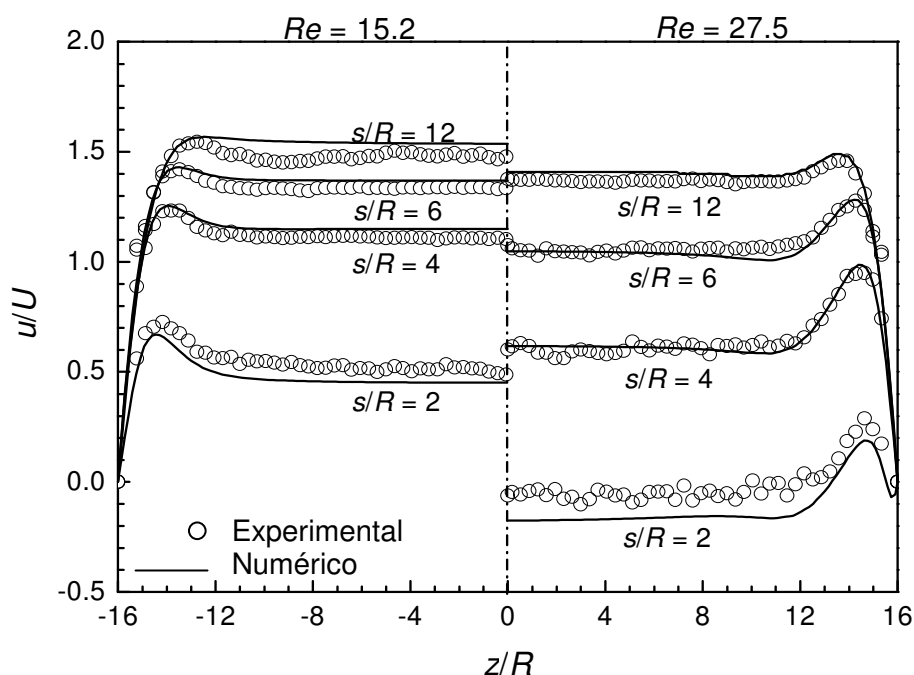


Figura 4.6 – Perfis de velocidade ao longo de z/R ($y/R=0$) para $Re=15,2$ e $Re=27,5$.

Para ambos os números de Reynolds verifica-se a existência de picos de velocidade próximos das paredes laterais da coluna e verifica-se ainda que a intensidade dos picos de velocidade aumenta com a diminuição da distância em relação ao cilindro (os picos de velocidade são mais intensos em $s/R=4$ do que em $s/R=6$). Pode-se ainda observar que a intensidade dos picos de velocidade aumenta com o aumento do número de Reynolds ($s/R = 4$ é mais intenso para $Re = 27,5$ do que para $Re = 15,2$).

Verifica-se ainda que a variação do comprimento da recirculação com o número de Reynolds é aparente, quando se compara o perfil $s/R=2$, dado que para $Re=27,5$, a velocidade é negativa para $Re=15,2$ a velocidade é positiva.

Todas as conclusões obtidas a partir da análise da figura 4.6 já referidas eram esperadas, de acordo com os resultados já obtidos e discutidos anteriormente neste trabalho e de acordo com o trabalho de Ferreira (2007).

Através da análise dos resultados das figuras 4.5 e 4.6, verifica-se que a diferença máxima existente entre os resultados experimentais e numéricos é de cerca de 8%. O valor deste erro não tem em consideração os resultados da figura 4.6 para $Re=27,5$ à distância de $s/R=2$, dado que as diferenças entre os resultados numéricos e

experimentais são significativas em relação aos restantes resultados apresentados na mesma figura.

Assim, tendo em consideração que a incerteza da medição detalhada do campo de velocidades estimada é de cerca de 5%, verifica-se que a diferença existente entre os resultados experimentais e numéricos é essencialmente devida à incerteza da medição do campo de velocidades. Esta diferença inclui ainda uma contribuição de 3%, relativa ao efeito da incerteza da mudança de plano que, como já referido, é desprezável no plano $z/R=0$ e significativa no plano próximo das paredes laterais.

Pode-se então concluir que existe uma elevada concordância entre os resultados experimentais e numéricos, o que permite complementar e validar o estudo numérico de Ferreira (2007).

Na tabela 4.3 encontram-se representados os caudais e respectivos números de Reynolds dos ensaios realizados na medição detalhada do campo de velocidades com a coluna na posição 2 (estudo do plano xy).

Tabela 4.3 – Valor dos caudais e respectivos números de Reynolds estudados na medição do campo de velocidades com a coluna na posição 2.

Fluido	Caudal (g/s)	Re
Água	9,606	15,9
	11,478	19,2
	25,416	42,8
N46,3	12,379	4,8
	17,551	6,6
	30,441	11,2
	36,507	14,2
	52,040	19,9
	70,820	28,2
	89,062	35,7

As figuras 4.7 a 4.9 representam os perfis transversais da velocidade axial, dos ensaios realizados com o fluido N46,3 e com $Re=11,2$, $Re=19,9$ e $Re=35,7$, respectivamente. Nestas figuras apresentam-se os resultados obtidos no plano $z/R = 0$ (plano central) e no plano $z/R = 15$ (plano próximo da zona onde existe um pico de velocidade).

Em ambas as figuras (4.7 a 4.9), as representações gráficas a) e b) mostram os perfis de velocidade a montante do cilindro com uma distância do cilindro de $s/R=-4$ e $s/R=-2$, respectivamente. As representações gráficas c), d), e) e f) exibem os perfis de velocidade a jusante do cilindro com uma distância do cilindro de $s/R=1$, $s/R=2$, $s/R=4$ e $s/R=10$, respectivamente.

Nas figuras 4.7 a 4.9 encontram-se representados apenas metade dos perfis de velocidade, uma vez que existe simetria do perfil de velocidades na direcção de z/R , em relação ao plano central do cilindro ($z/R=0$). A existência desta simetria foi já evidenciada nos resultados experimentais da visualização dos escoamentos e nas respectivas comparações numéricas efectuadas.

Para qualquer número de Reynolds estudado, o perfil de velocidade representado a montante do cilindro ($s/R=-4$ - (a)) não é afectado pela presença do cilindro, uma vez que no estudo do plano xy (posição 1) verificou-se que só a partir da distância de $s/R=-4$ é que o escoamento é influenciado pela presença do cilindro (figura 4.5).

No perfil de velocidades a montante mais próximo do cilindro ($s/R=-2$ - (b)), pode-se observar a influência da presença do cilindro, tendo em consideração a diminuição da velocidade do escoamento, para qualquer número de Reynolds representado.

A montante do cilindro ($s/R=-4$ e $s/R=-2$ - a) e b)), qualquer que seja o número de Reynolds, a velocidade de escoamento é sempre maior no plano central ($z/R=0$) do que próximo das paredes laterais do cilindro ($z/R=15$).

A jusante do cilindro (c), d), e) e f)), os perfis de velocidade nos dois planos em estudo apresentam diferentes comportamentos em relação ao número de Reynolds.

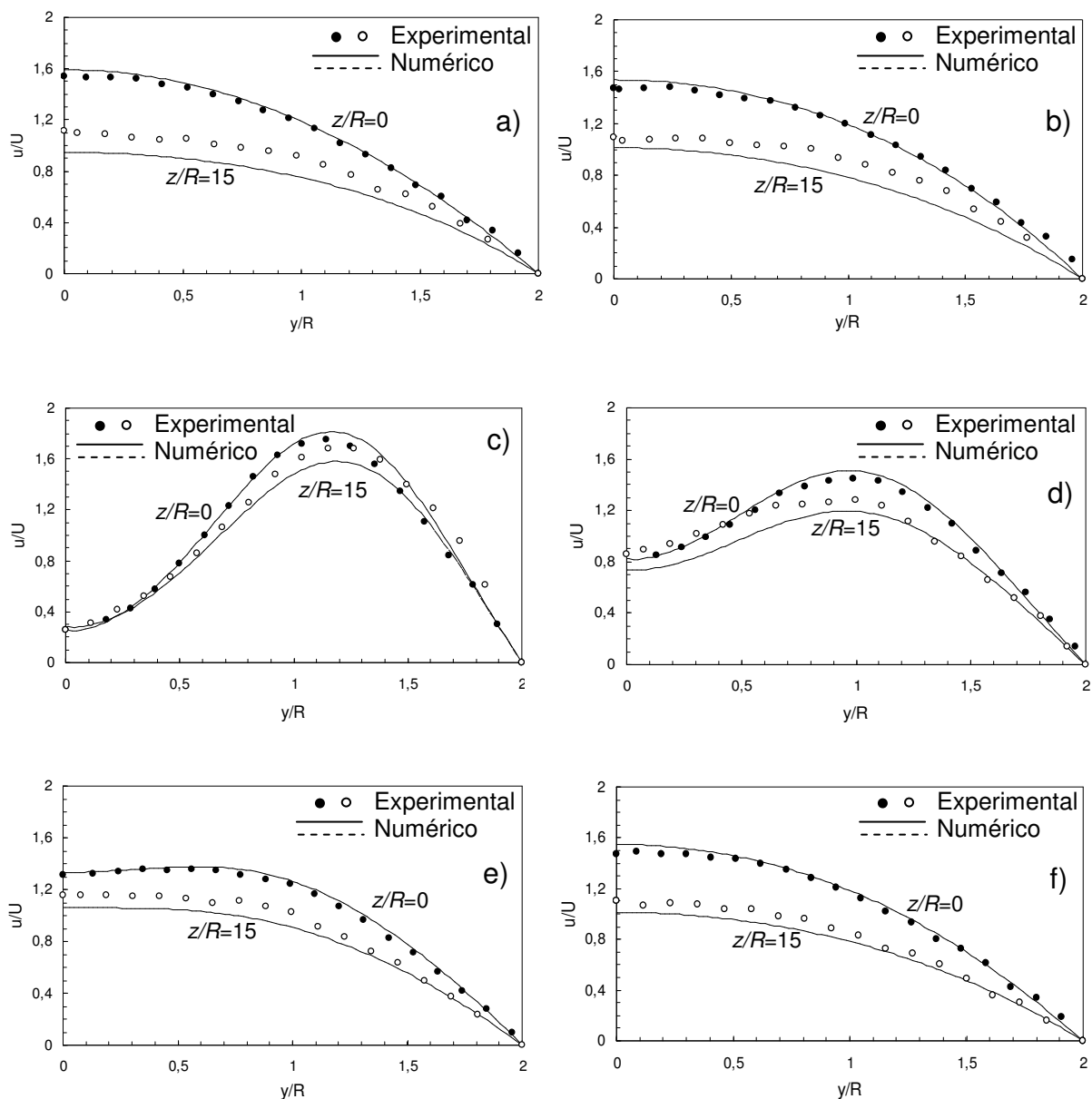


Figura 4.7 – Comparação dos perfis transversais da velocidade axial em $z/R=0$ e $z/R=15$ para $Re = 11,2$: a) $s/R=-4$; b) $s/R=-2$; c) $s/R=1$; d) $s/R=2$; e) $s/R=4$; f) $s/R=10$;

Para o número de Reynolds igual a 11,2 (figura 4.7), que é o menor número de Reynolds representado graficamente, verifica-se que a jusante do cilindro a velocidade no plano $z/R=0$ é maior do que no plano $z/R=15$ para qualquer valor de y/R . No entanto, é de salientar que no perfil $s/R=1$ – c), perfil mais próximo de cilindro, a velocidade do escoamento é idêntica em ambos os planos em estudo.

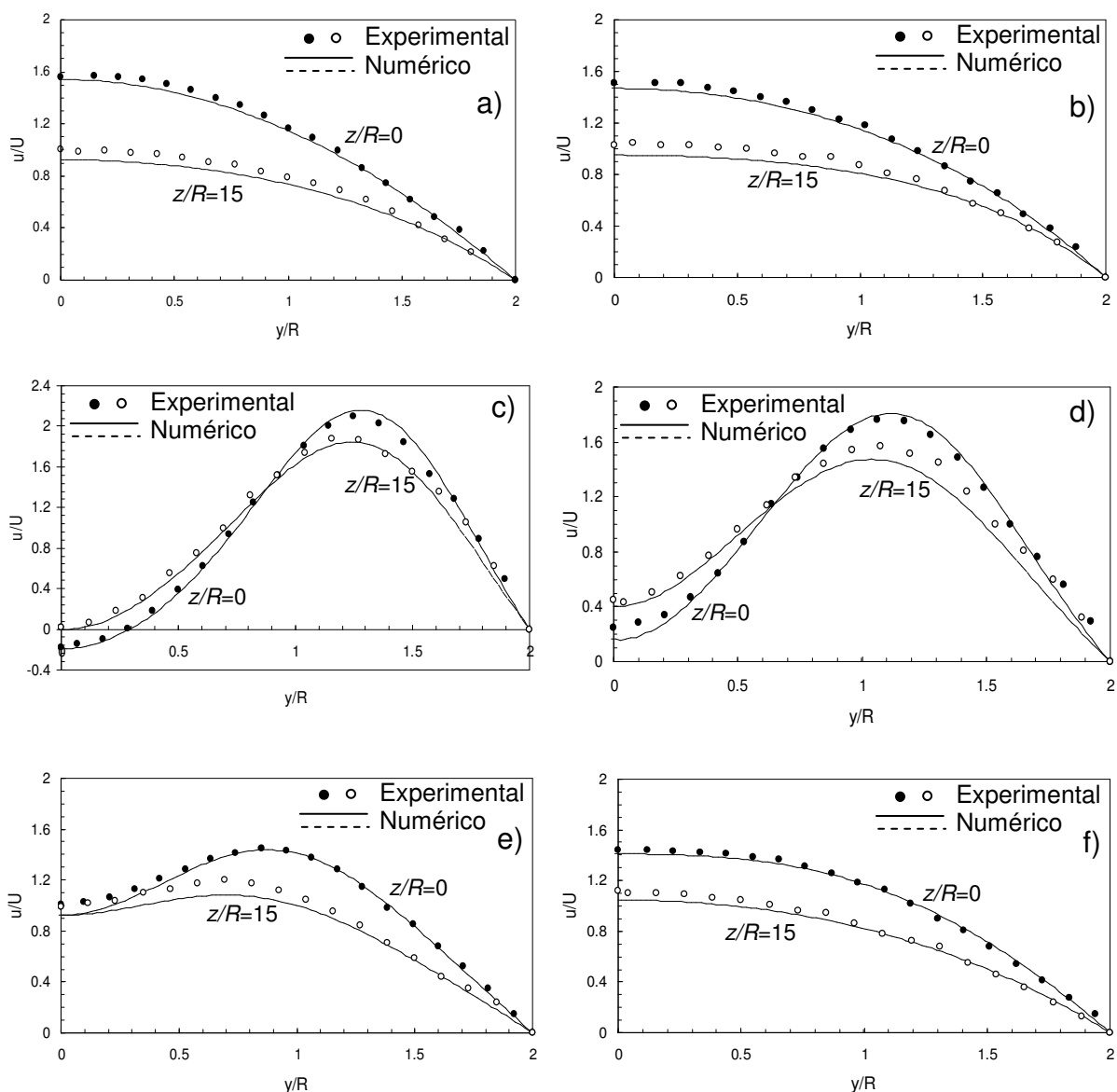


Figura 4.8 – Comparação dos perfis transversais da velocidade axial em $z/R=0$ e $z/R=15$ para $Re = 19,9$: a) $s/R=-4$; b) $s/R=-2$; c) $s/R=1$; d) $s/R=2$; e) $s/R=4$; f) $s/R=10$;

Para o número de Reynolds igual a 19,9 (figura 4.8), verifica-se que nos perfis a jusante mais próximos do cilindro ($s/R=1$ e $s/R=2$ - c) e d)) a velocidade do escoamento no plano $z/R=15$ é maior do que no plano $z/R=0$ até $y/R \approx 0,7-0,9$.

Nos perfis mais afastados do cilindro ($s/R=4$ e $s/R=10$ - e) e f)), verifica-se que a velocidade no plano $z/R=15$ é menor do que no plano $z/R=0$, qualquer que seja y/R .

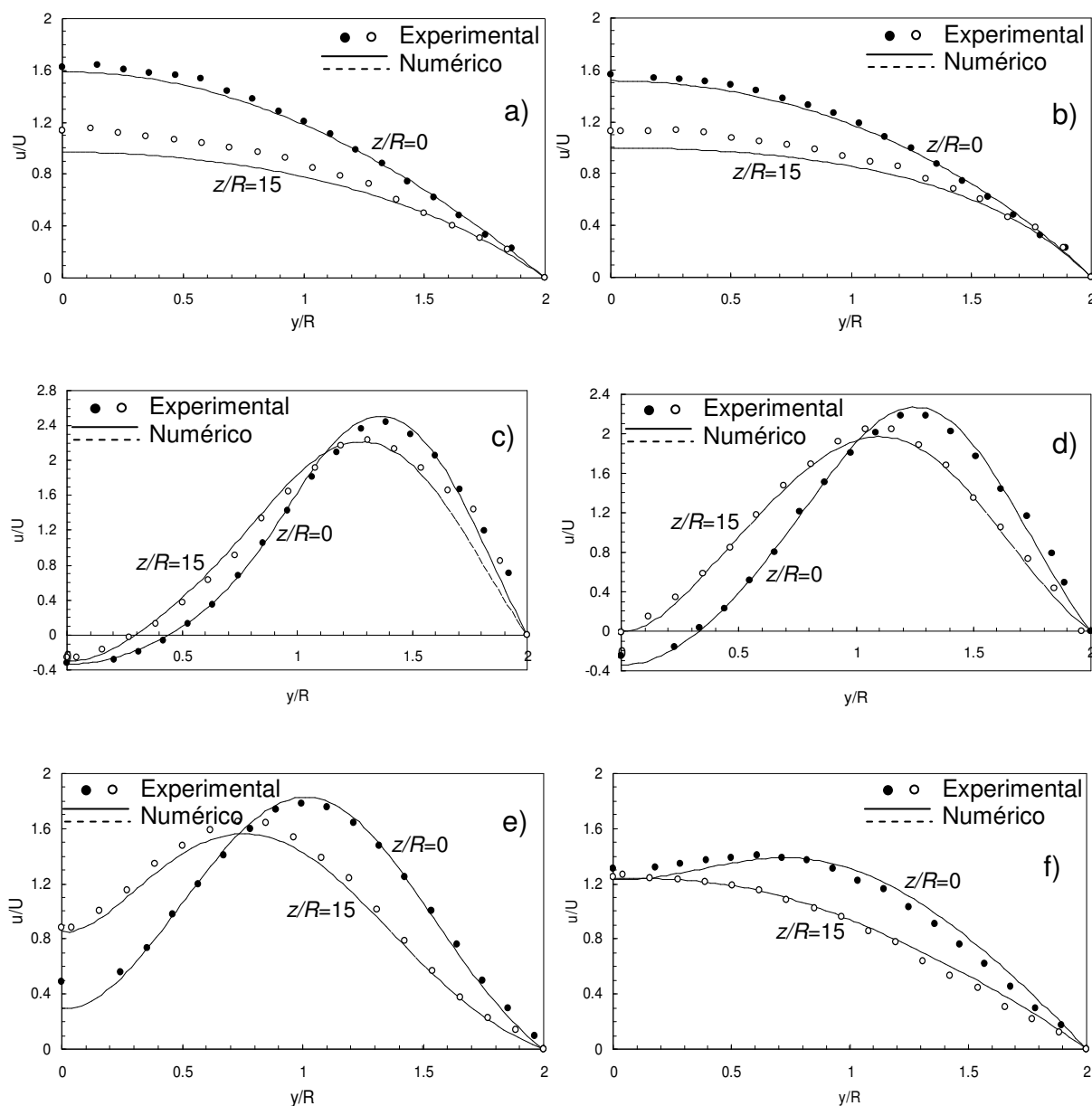


Figura 4.9 – Comparação dos perfis transversais da velocidade axial em $z/R=0$ e $z/R=15$ para $Re = 35,7$: a) $s/R=-4$; b) $s/R=-2$; c) $s/R=1$; d) $s/R=2$; e) $s/R=4$; f) $s/R=10$;

Para o número de Reynolds igual a 35,7 (figura 4.9), verifica-se que nos perfis a jusante mais próximos do cilindro ($s/R=1$ e $s/R=2$ - c) e d)) a velocidade do escoamento no plano $z/R=15$ é maior do que no plano $z/R=0$ até $y/R \approx 1-1,1$. No perfil representado em e) ($s/R=4$), verifica-se que a velocidade no plano $z/R=0$ é maior do que no plano $z/R=15$ até aproximadamente $y/R=0,7$. No perfil mais afastado do cilindro ($s/R=10$ - f)), verifica-se que a velocidade no plano $z/R=0$ é maior do que no plano $z/R=15$, $y/R > 0,2$.

Relativamente às figuras 4.7 a 4.9, em $y/R=0$ as velocidades elevadas no plano $z/R=15$, correspondem aos picos de velocidade observados na figura 4.6. Os picos observados na direcção de y/R , correspondem a picos de velocidade que ocorrem até cerca de metade da profundidade da secção, para o número de Reynolds mais elevado.

De salientar que como apenas se encontra representada nas figuras 4.7 a 4.9 apenas metade da profundidade da coluna, na realidade, existem dois picos de velocidade na direcção de y , um pico de cada lado do cilindro.

Através da análise dos resultados apresentados nas figuras 4.7 a 4.9, verifica-se que a diferença máxima existente entre os resultados experimentais e numéricos varia entre 2% e 10% nos planos $z/R=0$ e $z/R=15$, respectivamente. Embora a diferença encontrada para $z/R=0$ esteja dentro da incerteza experimental, já no caso de $z/R=15$, o erro introduzido pela mudança de plano é o responsável pelo maior desvio verificado.

4.4 Variação da Razão de Forma – Estudo Numérico

No âmbito deste trabalho estudaram-se numericamente as razões de forma $AR = 8$ e $AR = 1$, para os números de Reynolds de 10, 20 e 40.

A figura 4.10 mostra os perfis de velocidade a jusante do cilindro ($y/R=0$ e $s/R=4$) em função da direcção z/R para os números de Reynolds de 10, 20 e 40 e para $AR = 8$ (a) e $AR = 1$ (b)).

Conforme era já esperado, na figura 4.10 a) ($AR=8$) observa-se a existência de picos de velocidade junto das paredes laterais da coluna, que são maiores quanto maior for o número de Reynolds. A existência destes picos de velocidade localizados próximos das paredes laterais do cilindro deve à compensação de velocidade que tem de ocorrer no escoamento, devido à desaceleração na parede.

Na figura 4.10 b) ($AR=1$), verifica-se que o perfil de velocidades deixou de ser dominado pela influência da presença do cilindro no escoamento, sendo que agora é dominado pelo efeito das paredes laterais da coluna. Na realidade, o aumento da velocidade no plano central deve-se à necessária compensação da velocidade do escoamento que tem de ocorrer devido à desaceleração do escoamento na parede. Como neste caso o plano central encontra-se muito próximo da parede lateral, é nesta zona que vai ocorrer a compensação da velocidade do escoamento.

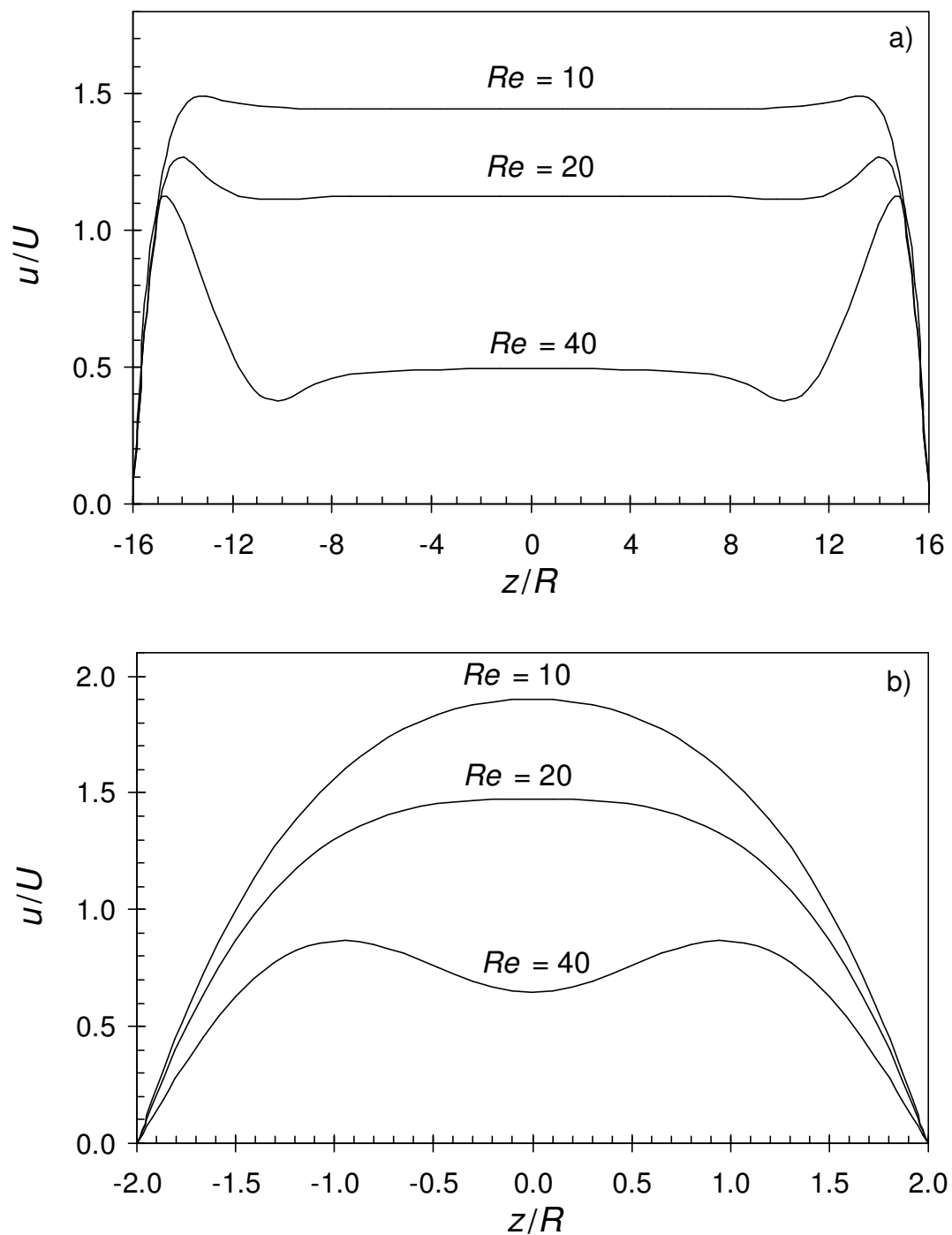


Figura 4.10 – Perfis de velocidade ($y/R=0$ e $s/R=4$) em função da direcção z/R para os números de Reynolds de 10, 20 e 40 e para $AR = 8$ (a)) e $AR = 1$ (b)).

A figura 4.11 evidencia a variação do comprimento da recirculação em função da direcção z/R para os números de Reynolds de 10, 20 e 40 e para $AR = 8$ (a) e $AR = 1$ (b)).

Através de análise da figura 4.11, verifica-se que qualquer que seja a razão de forma, o comprimento da recirculação aumenta com o aumento do número de Reynolds tal como era de esperar e também de acordo com a figura 4.3.

Relativamente à variação do comprimento da recirculação em relação à direcção z/R em a), verifica-se que o comprimento da recirculação é menor junto das paredes laterais da coluna, tal como era esperado, tendo em consideração os resultados já obtidos neste trabalho.

Por outro lado, em b) verifica-se que o comprimento da recirculação é maior junto das paredes laterais e menor no plano central. O facto do comprimento da recirculação ser menor no plano central, deve-se ao aumento da velocidade neste plano. Como já referido o aumento da velocidade do fluido neste plano deve-se à compensação da velocidade que ocorre junto das paredes laterais, para compensar a desaceleração do escoamento na parede da coluna.

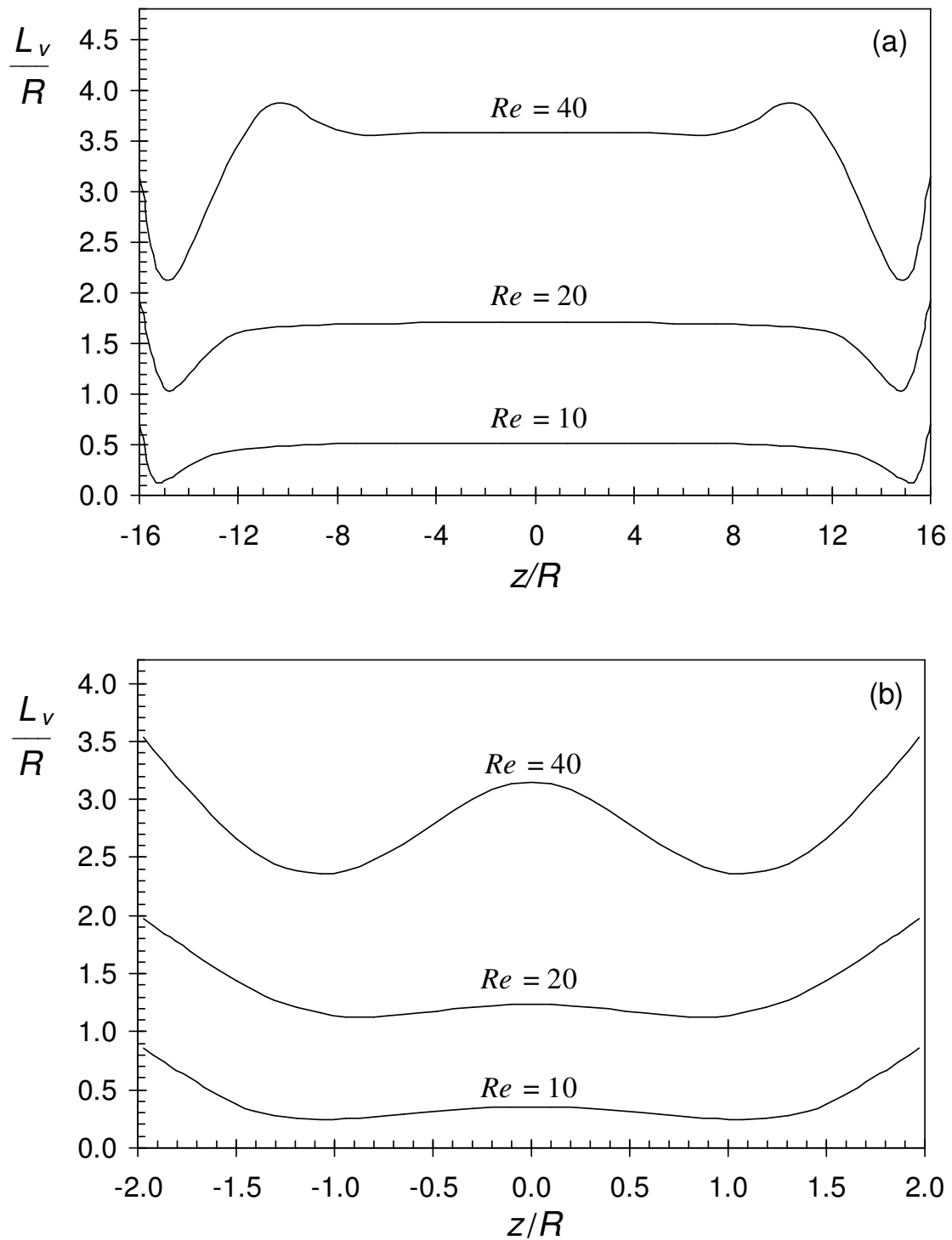


Figura 4.11 Variação do comprimento da recirculação em função do plano em estudo para vários números de Reynolds ($y/R=0$): a) $AR=8$; b) $AR=1$;

Para $AR=8$, o efeito do cilindro é dominante, e por isso os picos de velocidade surgem apenas junto das paredes laterais da coluna (figura 4.10 a)) e o comprimento da recirculação é mínimo junto das paredes laterais da coluna (figura 4.11 a)).

No entanto, para $AR=1$, e tal como se pode ver na figura 4.10 b), o efeito do cilindro deixa de ser dominante, passando a ser dominado pelo efeito do cilindro e da parede, dado que a velocidade é maior no plano central. Por este motivo, o comprimento da recirculação é mínimo na plano central, tal como se pode ver na figura 4.11.

5. Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro

Neste capítulo apresentam-se as conclusões que se podem obter tendo em consideração o estudo desenvolvido neste trabalho e as recomendações de trabalho futuro relacionadas com este trabalho,

5.1 Conclusões

Tendo em consideração que o objectivo deste trabalho consiste em estudar e quantificar os efeitos tridimensionais no escoamento laminar em torno de um cilindro confinado com uma razão de bloqueio de 50%, pretende-se para isso estudar experimentalmente o efeito da razão de forma $AR = 8$, através da caracterização do escoamento em diferentes condições e estudar o efeito da variação da razão forma. Para isso pretende-se efectuar o estudo numérico do escoamento com $AR=8$ e $AR=1$ e estabelecer as respectivas comparações.

Para se efectuar a caracterização do escoamento utilizam-se duas técnicas. A visualização de escoamentos, através de uma técnica fotográfica de elevado tempo de

exposição e a medição detalhada do campo de velocidade, utilizando a técnica denominada por velocimetria por imagem de partículas (PIV).

A visualização de escoamentos permite estudar o comprimento da recirculação L_v para diferentes números de Reynolds e com PIV pode-se estudar e quantificar detalhadamente o campo de velocidades do escoamento para diferentes números de Reynolds.

Através do estudo do comprimento da recirculação, pode-se concluir que quanto maior o número de Reynolds, maior é o comprimento da recirculação, qualquer que seja o plano em estudo na direcção de z . No entanto, verifica-se que o aumento do comprimento da recirculação com o aumento do número de Reynolds, não é proporcional nos diferentes planos na direcção de z em estudo neste trabalho.

Tal como Ferreira (2007) concluiu no seu estudo numérico, verifica-se a existência de picos de velocidade próximos do plano $z/R=15$. Estes picos de velocidade correspondem ao local onde o comprimento da recirculação é mínimo.

Através da medição detalhada do campo de velocidades com PIV, pode-se concluir que a montante do cilindro, o escoamento é afectado pela presença deste a uma distância de cerca de quatro raios ($s/R=-4$) do cilindro, qualquer que seja o número de Reynolds.

A jusante do cilindro, verifica-se que ocorrem picos de velocidade do escoamento próximos do plano $z/R=15$. A intensidade destes picos de velocidade diminui à medida que a distância do cilindro na direcção de x aumenta. Por outro lado, a intensidade destes picos aumentam com o aumento do número de Reynolds.

Na análise do escoamento na direcção de y , verifica-se que a existência de picos de velocidade entre o cilindro e a parede da coluna (um pico em cada lado do cilindro). A distância destes picos em relação ao cilindro depende do número de Reynolds. Assim, quanto maior o número de Reynolds, maior a distância destes picos de velocidade em relação ao cilindro.

Assim, com o estudo detalhado do campo de velocidades efectuado nas diferentes direcções, pode-se concluir que na realidade existem quatro picos de velocidade no escoamento em torno do cilindro nas condições estudadas experimentalmente ($AR=8$ e $BR=50\%$). Na direcção de z existem dois picos de velocidade junto das paredes laterais da coluna e na direcção de y existem dois picos de velocidade, um de cada lado do cilindro.

Tendo em consideração a análise de incertezas efectuada, pode-se ainda concluir que os resultados experimentais obtidos na visualização dos escoamentos e na medição detalhada do campo de velocidades apresentam uma elevada concordância com as comparações numéricas efectuadas, o que permite concluir que este trabalho complementa e valida o trabalho numérico de Ferreira (2007).

Relativamente à influência da variação da razão de forma conclui-se que, qualquer que seja a razão de forma (AR), a montante do cilindro, as partículas contidas no fluido, ao aproximarem-se do cilindro, aumentam a sua velocidade para contornarem o obstáculo (neste caso o cilindro). As partículas que se encontram junto das paredes têm menor velocidade, devido ao efeito das paredes laterais.

A jusante do cilindro, a uma determinada distância das paredes (dependente do número de Reynolds), ocorre uma aceleração do fluido, para compensar a diminuição da velocidade junto das paredes. Este aumento de velocidade é responsável pela presença de picos de velocidade a jusante do cilindro.

Para $AR=8$, o efeito do cilindro é dominante, e por isso os picos de velocidade surgem apenas junto das paredes laterais da coluna e o comprimento da recirculação é mínimo junto das paredes laterais da coluna, onde a velocidade é máxima.

No entanto, para $AR=1$, o escoamento é dominado pelo efeito do cilindro e pelo efeito das paredes laterais e por isso observa-se que a velocidade é maior no plano central. Na realidade, dado que o plano central encontra-se próximo das paredes laterais, é no plano central que ocorre o pico de velocidade, que surge com forma de compensar a desaceleração do fluido nas paredes. Por este motivo, o comprimento da recirculação é mínimo no plano central.

5.2 Recomendações para Trabalho Futuro

Após a realização deste trabalho e tendo em consideração os resultados obtidos bem como os vários aspectos relacionados com o trabalho desenvolvido ou o trabalho que poderia ter sido desenvolvido mas que por limitações de tempo não foi possível, considera-se que diversos estudos podem ainda ser realizados neste âmbito. Assim, recomenda-se o estudo dos seguintes aspectos:

- Tendo em consideração que a instalação está preparada para o estudo experimental de diferentes razões de forma ($AR = 8, 4, 2$ e 1), recomenda-

se o estudo experimental das razões de forma $AR = 4, 2$ e 1 , uma vez que neste trabalho efectuou-se apenas o estudo experimental da razão de forma $AR = 8$.

- Tendo em consideração que a instalação está preparada para o estudo experimental de diferentes razões de bloqueio, através da utilização de cilindros com diferentes diâmetros (5mm, 10 mm e 16 mm), recomenda-se o estudo experimental das diferentes razões de bloqueio para as quais a coluna está preparada.

Salienta-se que cada razão de forma pode ser estudada com as três diferentes razões de bloqueio.

- Tendo em consideração a importância do estudo dos fluidos não-newtonianos e uma vez que neste trabalho utilizaram-se apenas fluidos newtonianos, recomenda-se o estudo experimental do escoamento com fluidos não-newtonianos com as diferentes razões de forma e razões de bloqueio para as quais a instalação está preparada.

Referências Bibliográficas

Alves M.A., Pinho F.T. e Oliveira P.J. (2001). The flow of viscoelastic fluids past a cylinder: finite-volume high-resolution methods. *J. Non-Newt. Fluid Mech.* 97: 207-232.

Baaijens H.P.W., Peters G.W.M., Baaijens F.P.T. e Meijer M.E.H. (1995). Viscoelastic Flow past a confined cylinder of a polyisobutylene solution. *J. Rheol.* 39: 1243-1277.

Bird R.B., Armstrong R.C. e Hassager O. (1987a). *Dynamics of polymeric Liquids. Vol. 1 – Fluid Mechanics.* 2nd Ed. John Wiley & Sons. New York.

Boger D.V. e Walters K. (1993). *Rheological phenomena in focus.* Elsevier. Amsterdam.

Brown R.A. e McKinley G.H. (1994). Report on the VIIIth International workshop on Numerical Methods in Viscoelastic Flows. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 52: 407-413.

Caola A.E., Joo Y.L., Armstrong R.C. e Brown R.A. (2001). Highly parallel time integration of viscoelastic flows. *J. Non-Newt. Fluid Mech.* 100: 191-216.

Fan Y., Tanner R.I. e Phan-Thien N. (1999). Galerkin/least-square finite-element methods for steady viscoelastic flows. *J. Non-Newt. Fluid Mech.* 84: 233-256.

Ferreira H.H. (2007). *Escoamento de fluidos newtonianos e viscoelásticos em torno de um cilindro: Estudo numérico de efeitos tridimensionais.* Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Gerich D. e Eckelman H. (1982). Influence of end plates and free ends on the shedding frequency of circular cylinder. *J. Fluid Mech.* 122: 109-121.

McKinley G.H., Armstrong R.C. e Brown R.A. (1993). The wake instability in viscoelastic flow past confined circular cylinders. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 344: 265-304.

Norberg C. (1994). An experimental investigation of the flow around a confined cylinder. *J. Fluid Mech.* 258: 287-316.

Oliveira P.J., Pinho F.T. e Pinto G.A. (1998) Numerical simulation of non-linear elastic flows with a general collocated finite-volume method. *J. Non-Newt Fluid Mech.* 79: 1-43.

Owens R.G. e Phillips T.N. (2002). *Computational Rheology*. Imperial College Press. London.

Poole R.J., Escudier M.P., Afonso A. e Pinho F.T. (2007) Laminar flow of a viscoelastic shear-thinning liquid over a backward-facing step preceded by gradual contraction. *Phys. Fluids* 19:93-101.

Sahin M. e Owens R.G. (2004). On the effects of viscoelasticity on two-dimensional vortex dynamics in the cylinder wake. *J. Non-Newton. Fluid Mech.* 123:121-139.

Streeter V.L. e Wylie E.B. (1982). *Mecânica dos fluidos*. McGraw-Hill. São Paulo.

Verhelst J.M. and Nieuwstadt F.T.M. (2004) Visco-elastic flow past circular cylinders mounted in a channel: experimental measurements of velocity and drag. *J. Non-Newton. Fluid Mech.* 116: 301-328.

Anexos

Anexo A

Neste anexo apresentam-se os desenhos a partir dos quais se construiu a coluna e os respectivos acessórios (cilindros, espaçadores e distribuidor). Os referidos desenhos podem-se visualizar desde a figura A.1 até à figura A.14.

De modo a simplificar a análise das figuras, de seguida indica-se o que cada uma das figuras representa, tal como nas legendas das figuras:

- Figura A.1 – Acessório de entrada e saída da coluna com seis injectores.
- Figura A.2 – Distribuidor.
- Figura A. 3 – Secção de trabalho.
- Figura A.4 – Pormenor do sistema de fixação das placas para a contracção bidimensional.
- Figura A.5 – Suporte para as secções de 160 e 40 mm.
- Figura A.6 – Suporte para as secções de 80 e 20 mm.
- Figura A.7 – Espaçador para secção 80 mm.
- Figura A.8 – Espaçador para secção 40 mm.
- Figura A.9 – Espaçador para secção 20 mm.
- Figura A.10 – Cilindro com 10 mm de diâmetro.
- Figura A.11 – Suporte para cilindro de 10 mm de diâmetro.
- Figura A.12 – Cilindro com 5 mm de diâmetro.
- Figura A.13 – Suporte para cilindro de 5 mm de diâmetro.
- Figura A.14 – Cilindro com 16 mm de diâmetro.

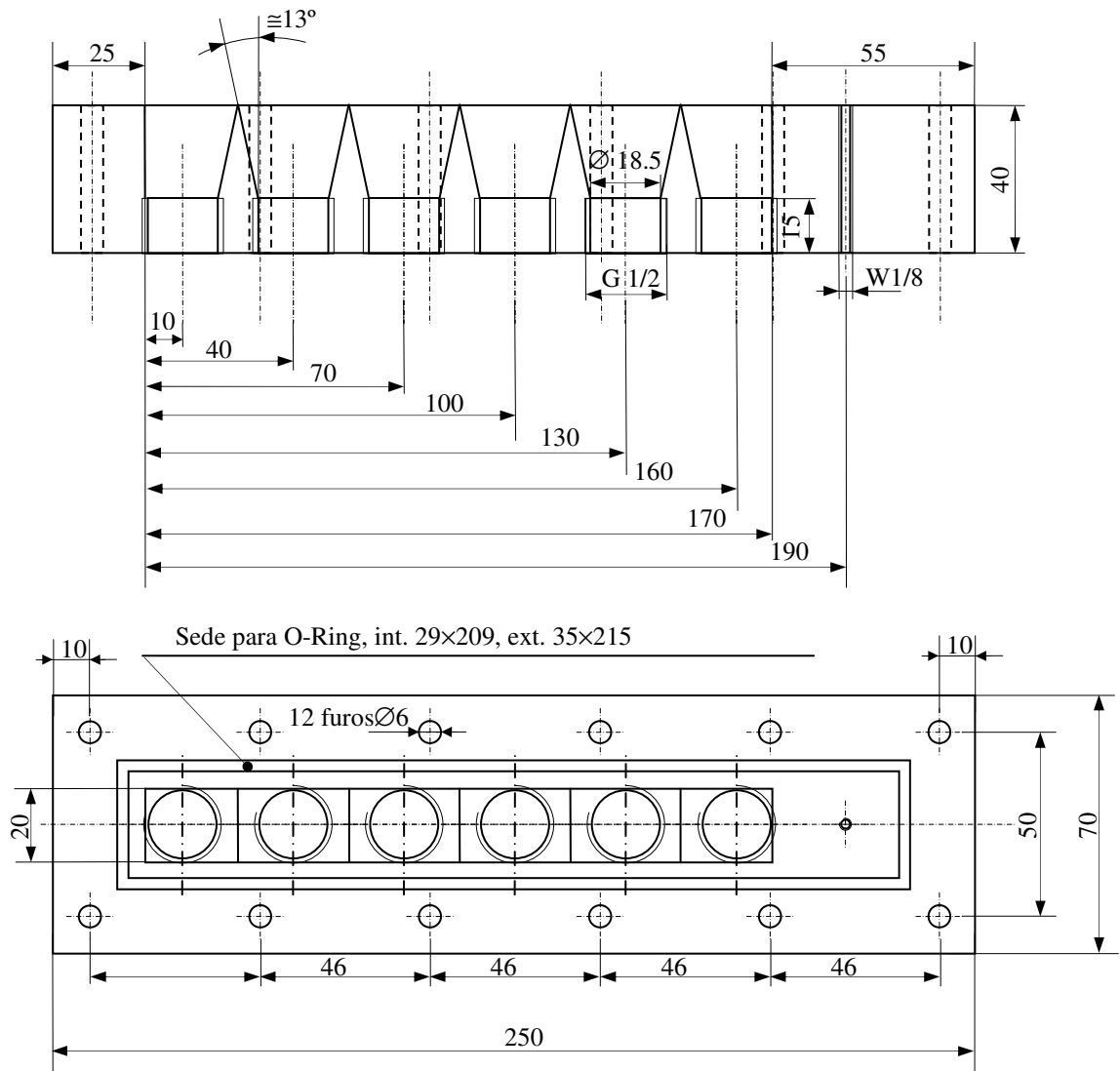


Figura A.1 – Acessório de entrada e saída da coluna com seis injectores.

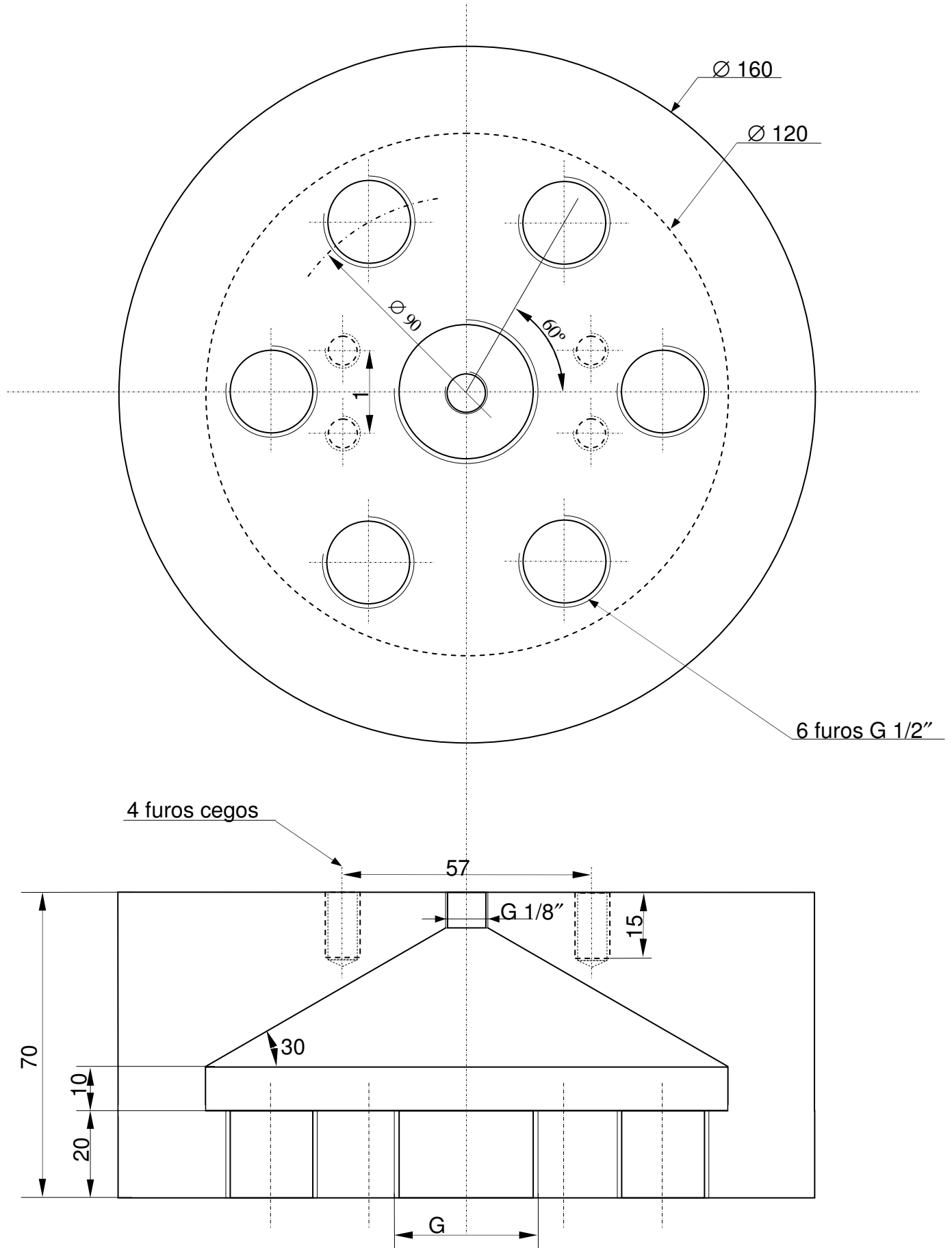


Figura A.2 - Distribuidor

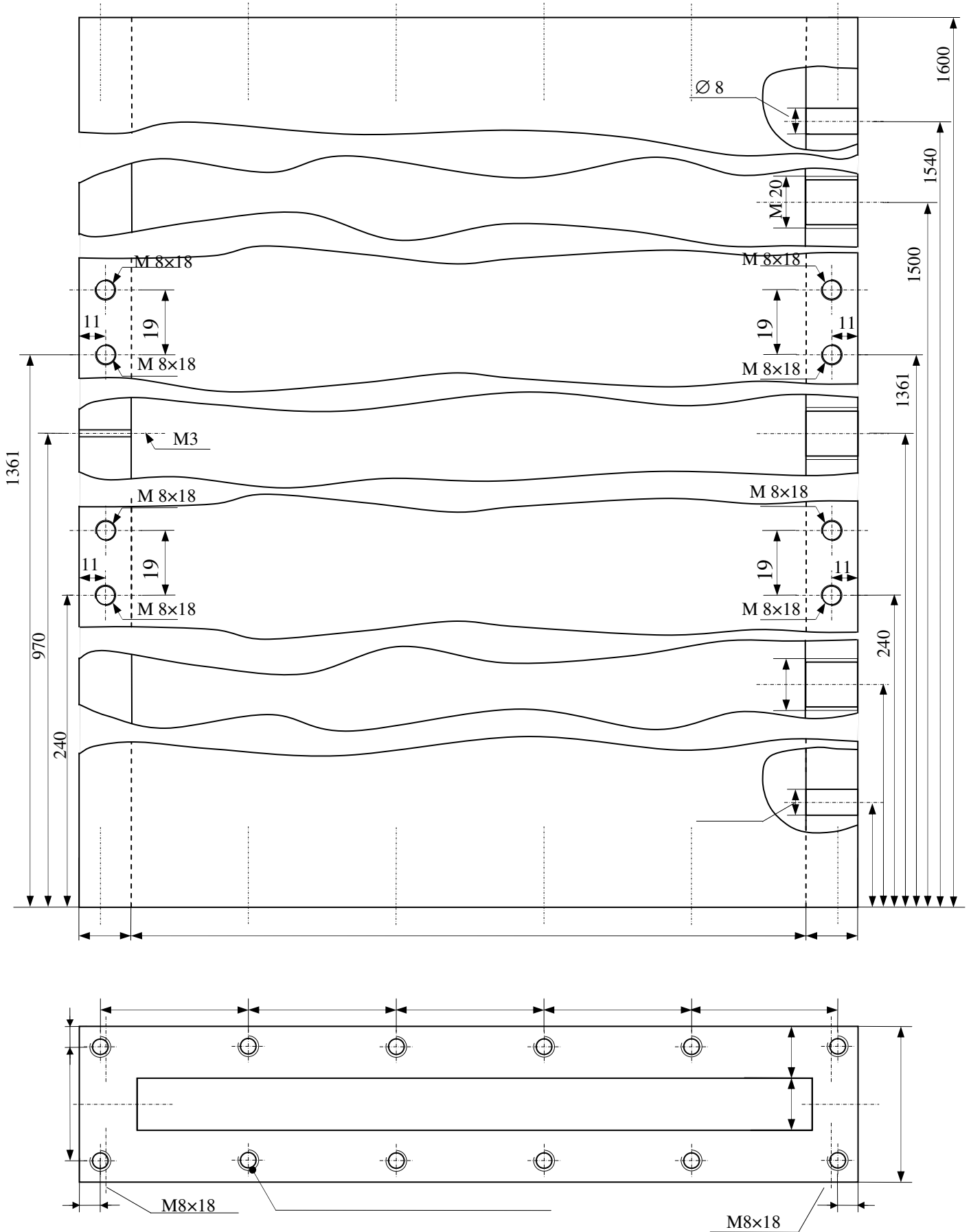


Figura A.3 – Secção de trabalho.

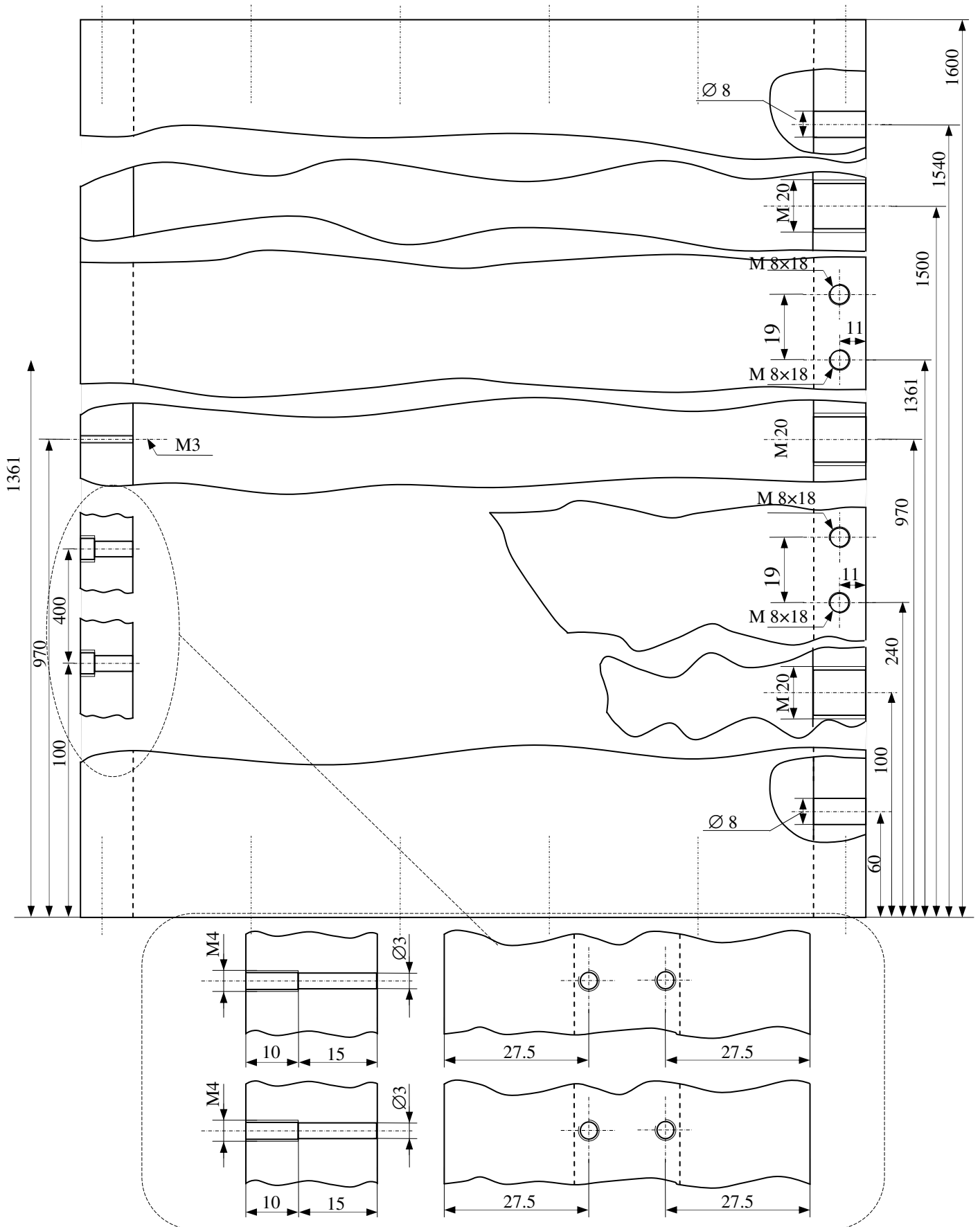


Figura A.4 – Pormenor do sistema de fixação das placas para a contracção bidimensional.

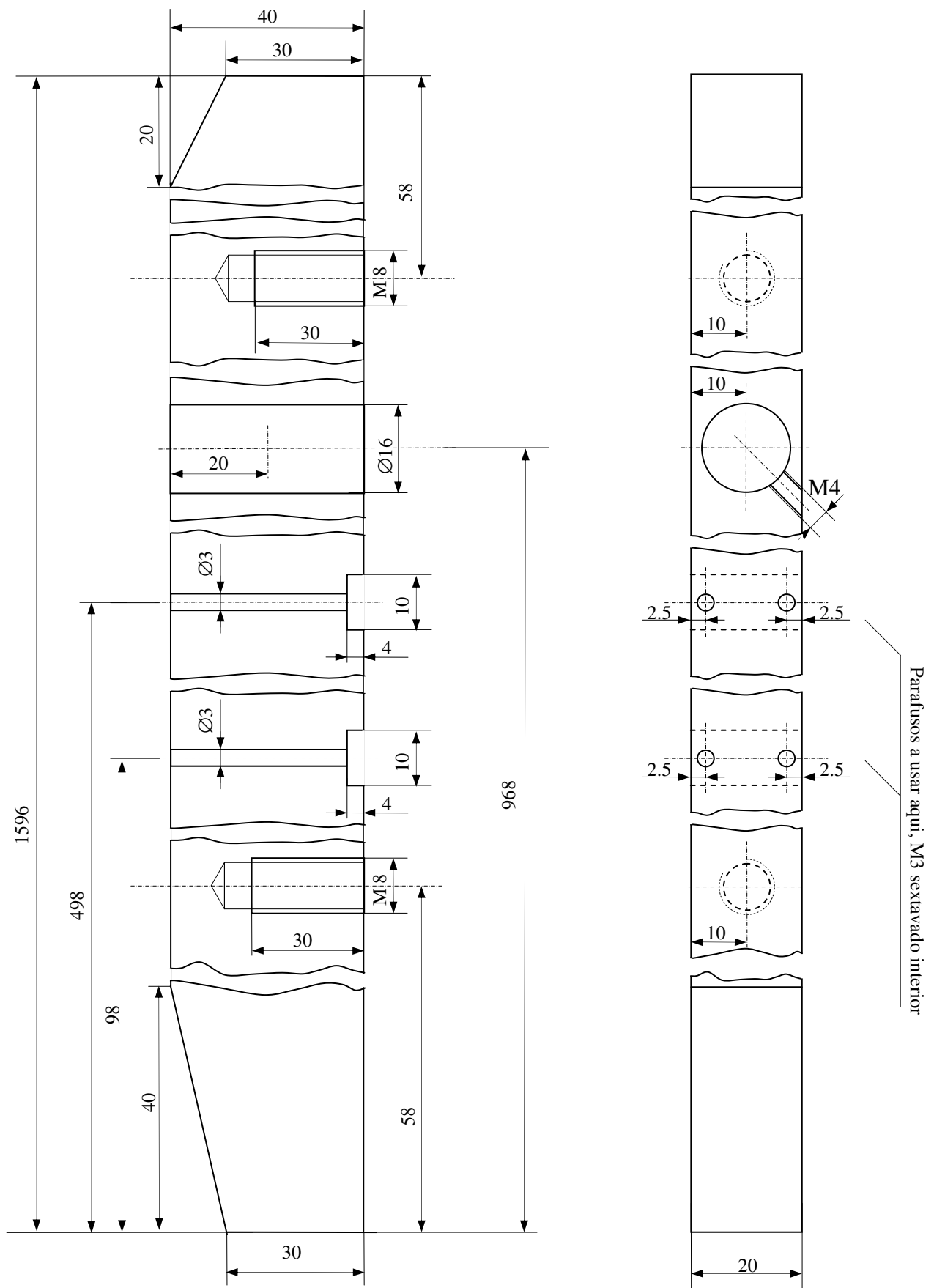


Figura A.5 – Suporte para as secções de 160 e 40 mm.

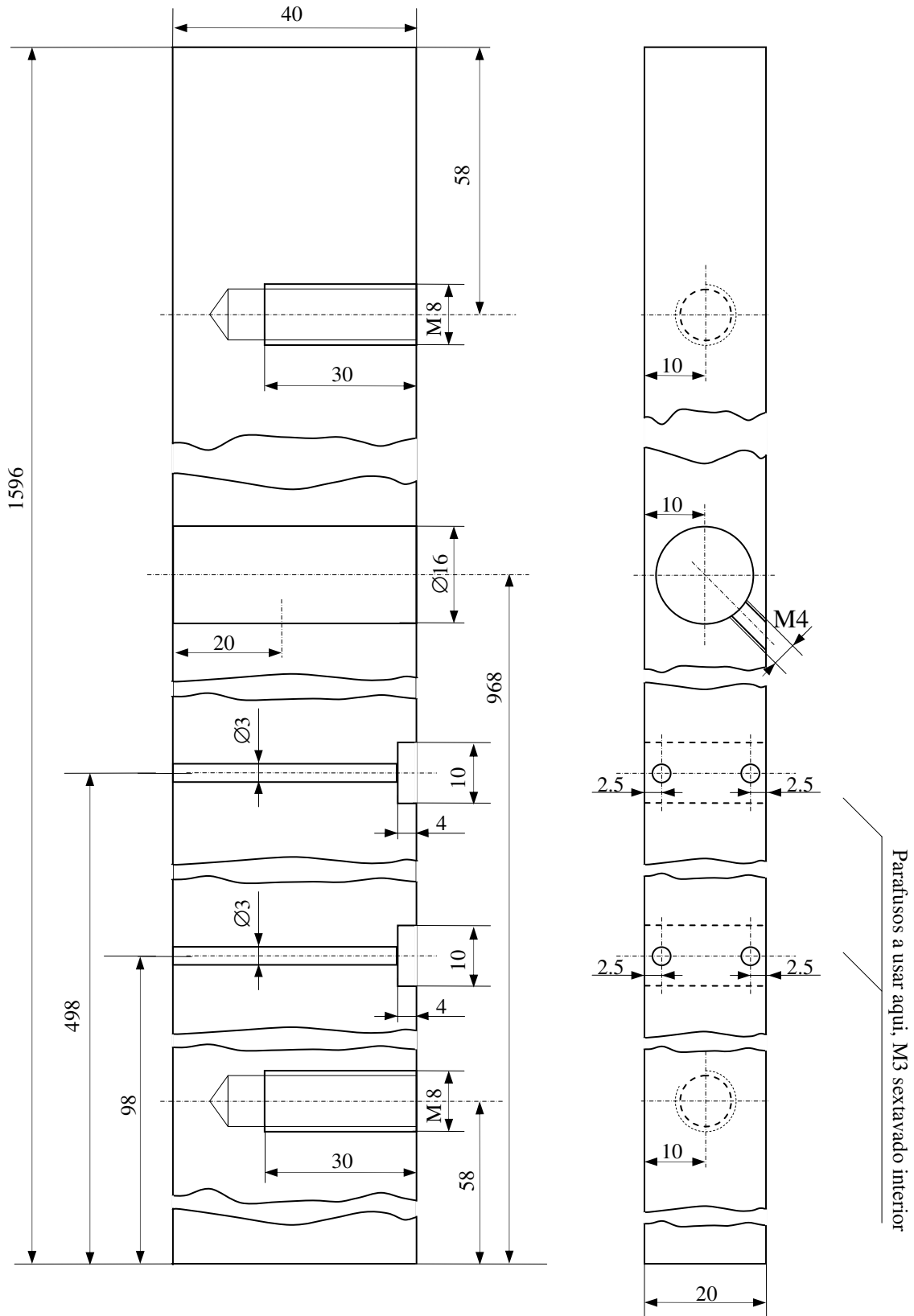


Figura A.6 – Suporte para as secções de 80 e 20 mm.

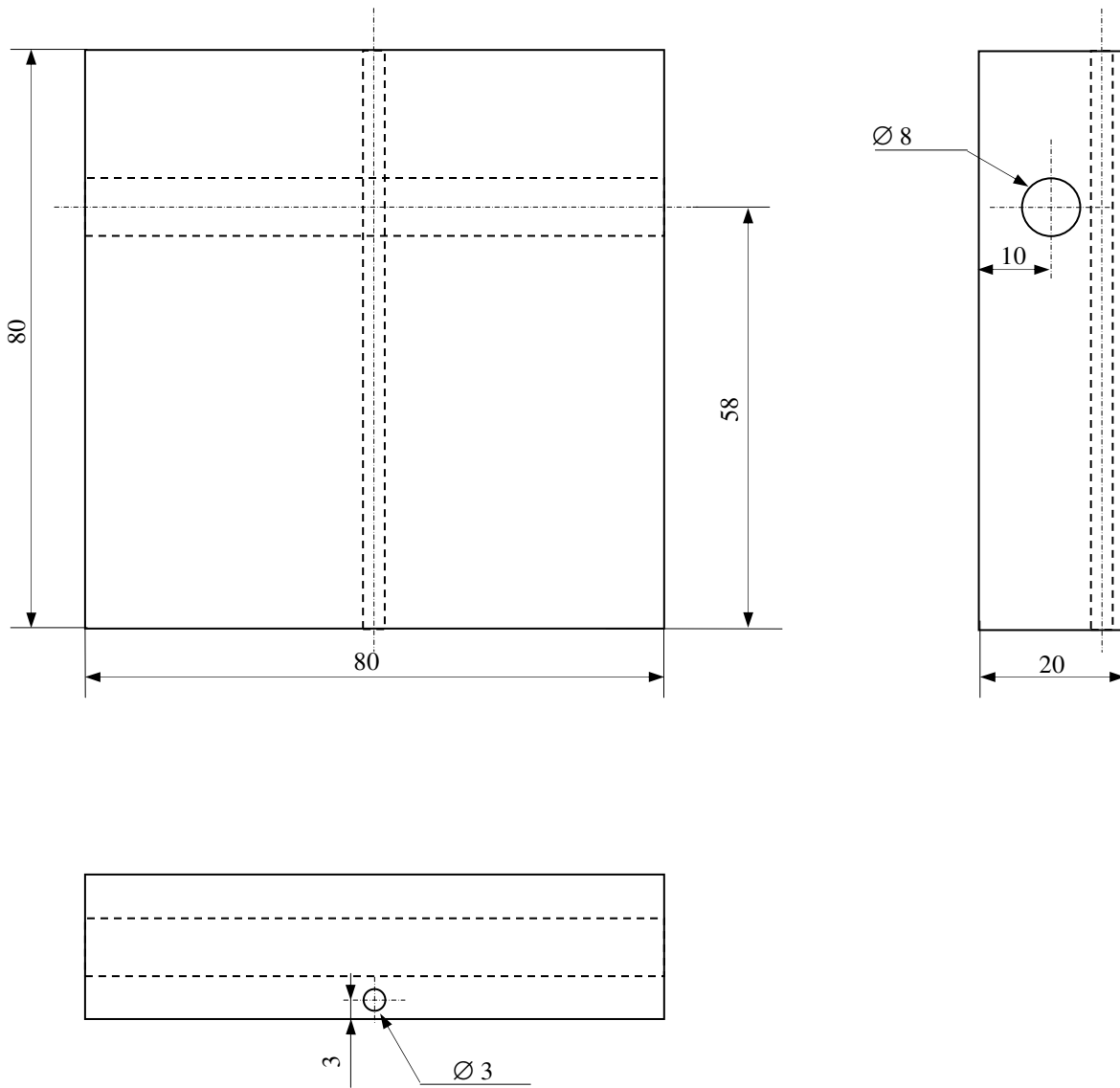


Figura A.7 – Espaçador para secção 80 mm.

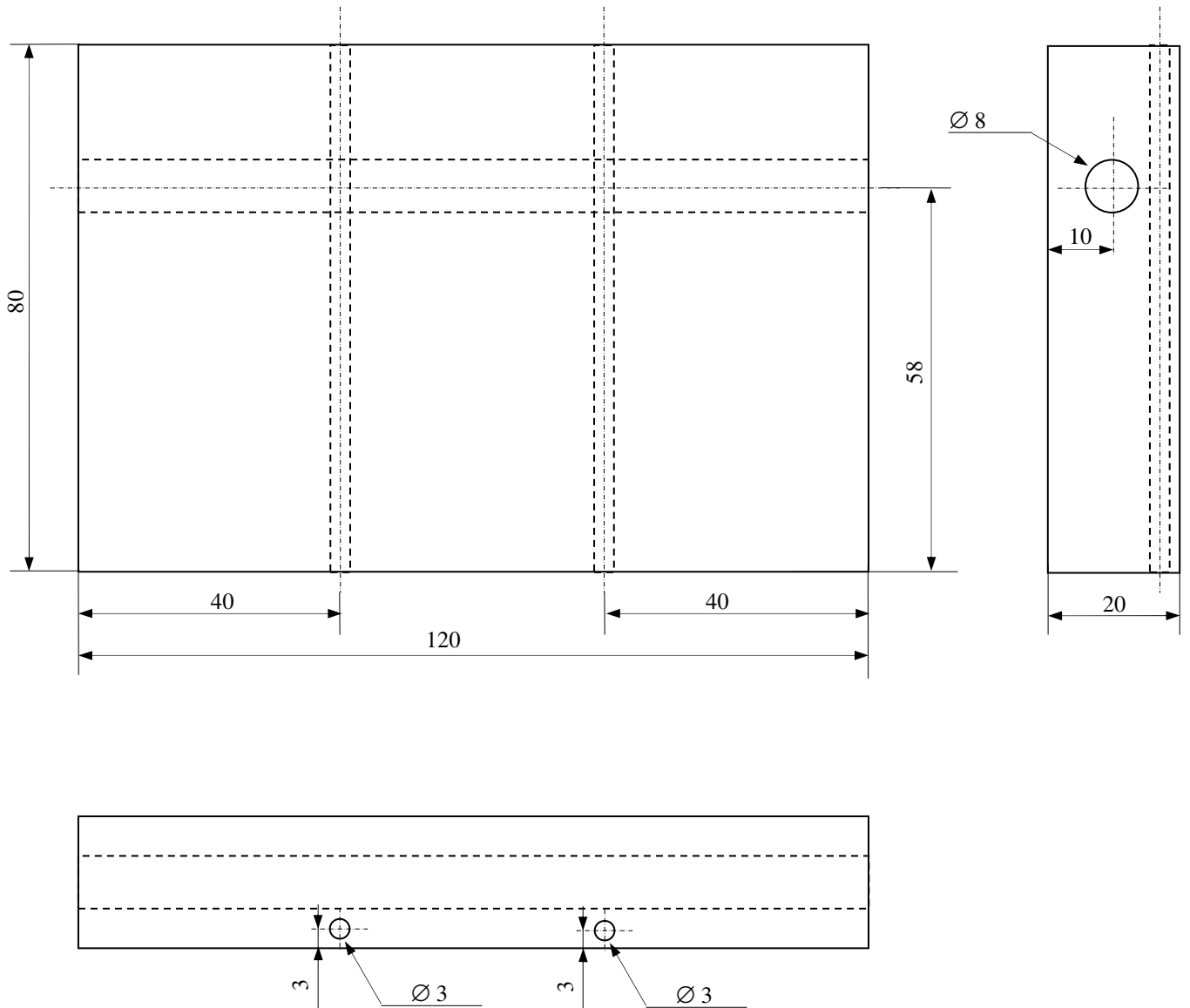


Figura A.8 – Espaçador para secção 40 mm.

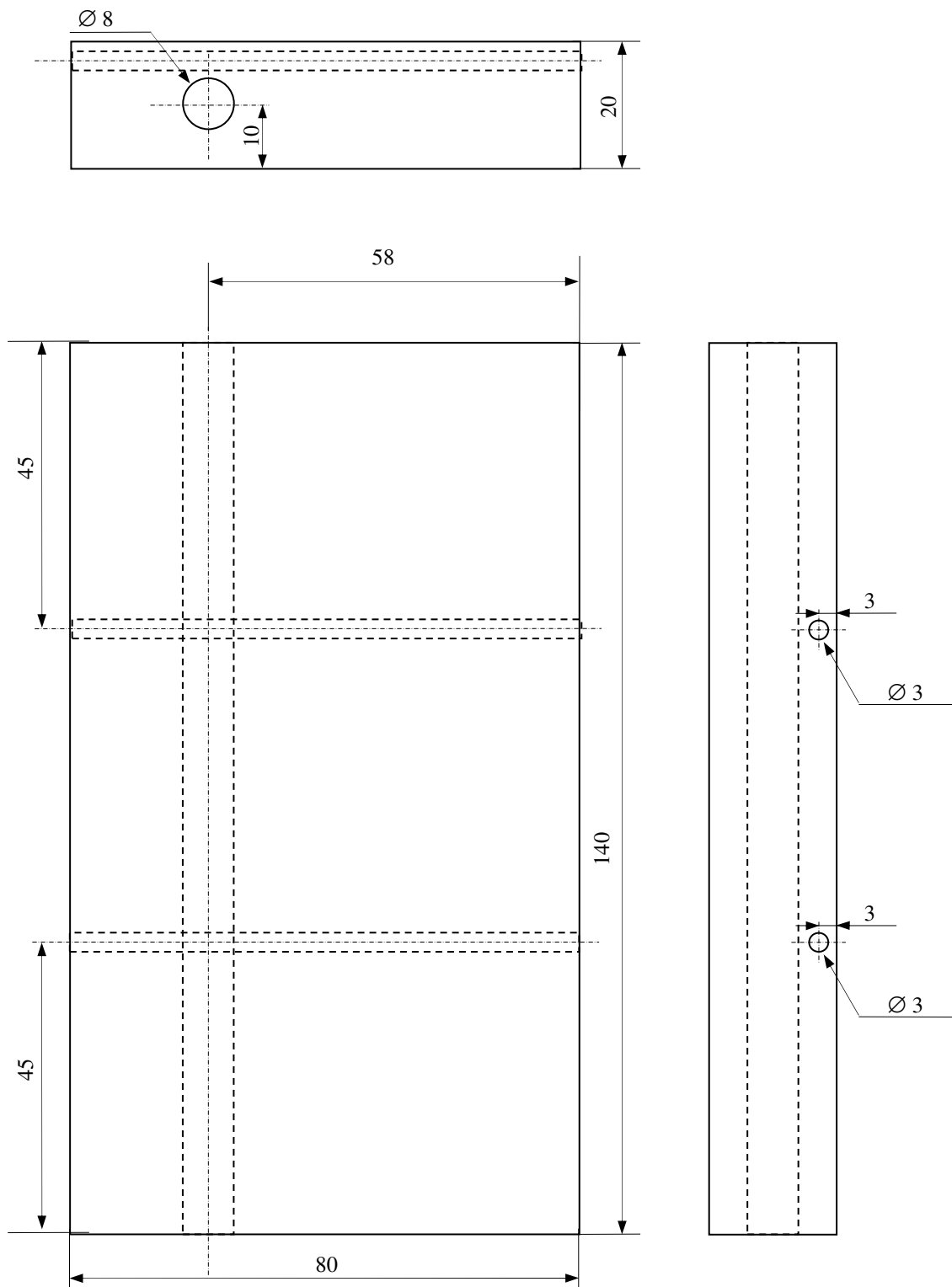


Figura A.9 – Espaçador para secção 20 mm.

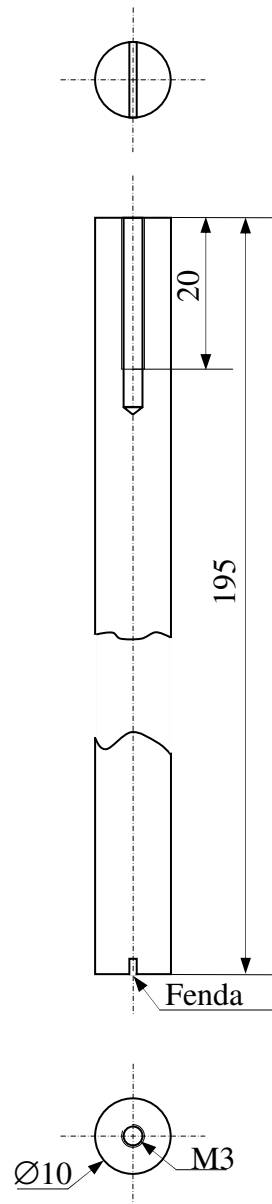


Figura A.10 – Cilindro com 10 mm de diâmetro.

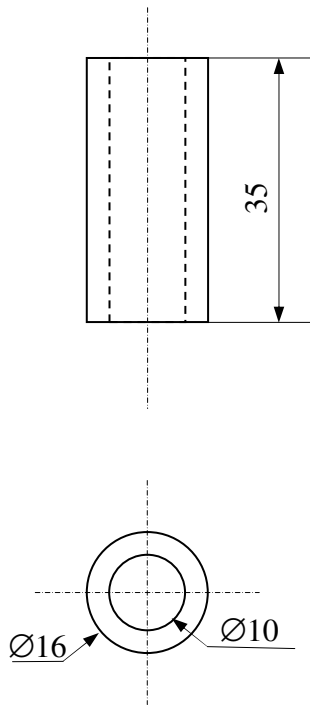


Figura A.11 – Suporte para cilindro de 10 mm de diâmetro.

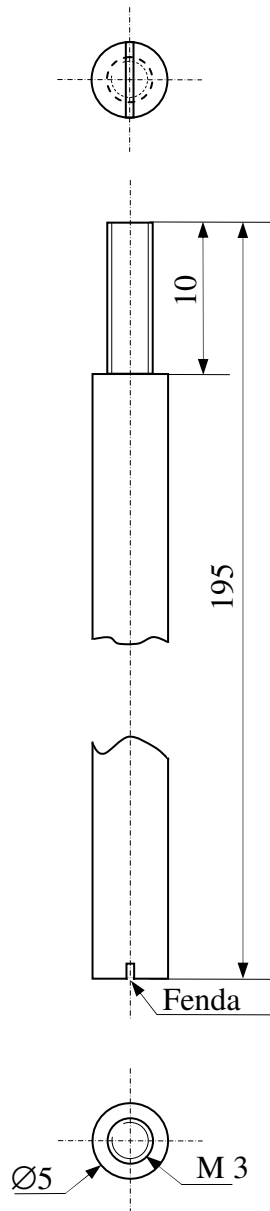


Figura A.12 – Cilindro com 5 mm de diâmetro.

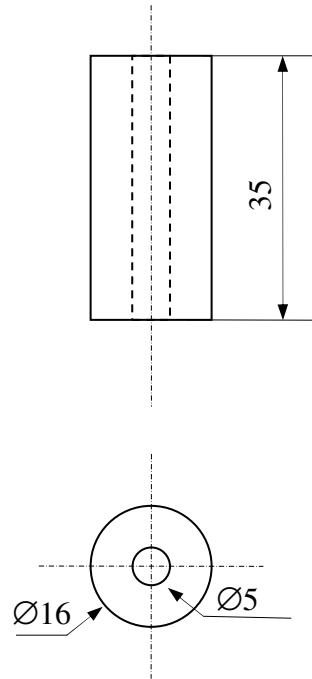


Figura A.13 – Suporte para cilindro de 5 mm de diâmetro.

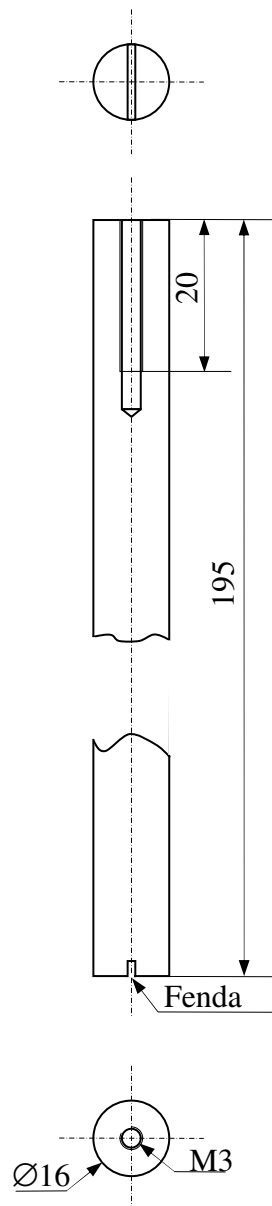


Figura A.14 – Cilindro com 16 mm de diâmetro.

Anexo B

Neste anexo encontra-se a representação do esquema da instalação experimental inicial (figura B.1), que foi posteriormente alterada com o objectivo de otimizar os resultados experimentais, como já referido no capítulo 3 (descrição experimental) desta tese.

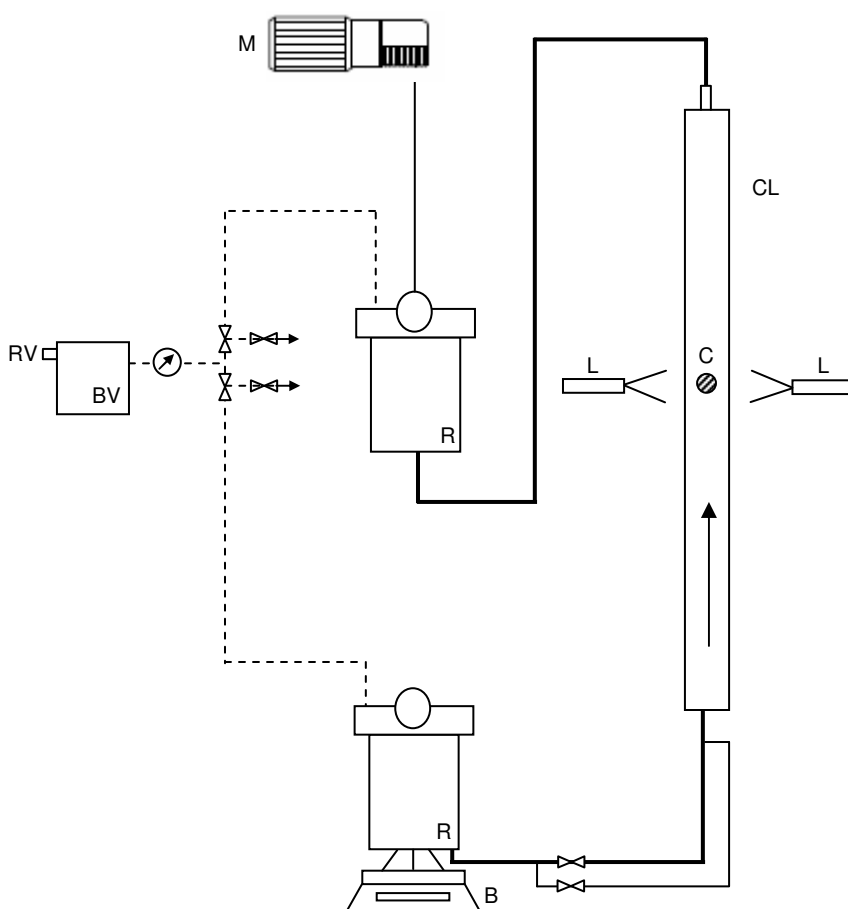


Figura B.1 – Esquema inicial da instalação experimental.

Em termos experimentais, a instalação representada na figura B.1 apresenta as seguintes limitações:

- Como o fluido circula através da coluna por gravidade, a pressão de operação é igual à pressão atmosférica, o que pode provocar a entrada de ar para dentro da coluna. A entrada de ar na coluna pode provocar

alterações dos padrões de escoamento do fluido e, no caso do fluido ser uma solução aquosa de glicerina, acresce ainda o facto desta solução ser higroscópica quando em contacto com o ar, alterando a sua composição.

- Como o nível de água do tanque superior vai diminuindo com decorrer do ensaio (o fluido vai passando do tanque superior para a coluna e da coluna para o tanque inferior), o caudal de fluido que passa através da coluna por gravidade vai diminuindo ao longo do ensaio, uma vez que a diferença de cotas entre os níveis de líquido nos dois tanques vai também diminuindo.

Com vista à optimização dos resultados obtidos e tendo em consideração as limitações referidas, efectuaram-se as seguintes alterações na instalação:

- Criou-se um circuito fechado em toda a instalação, com o objectivo de pressurizar toda a instalação, de modo a que a pressão no interior da coluna seja sempre superior à pressão no exterior. Assim, garante-se que não existe qualquer entrada de ar na coluna.
- Com o objectivo de manter o caudal de água que atravessa a coluna constante durante os ensaios, fez-se uma ligação entre os dois reservatórios. A partir desta ligação, e com o auxílio de uma bomba centrífuga, o fluido é transportado desde o reservatório inferior até ao reservatório superior, de forma a que os níveis de líquido nos dois tanques seja sempre constante e consequentemente o caudal de fluido que passa através da coluna é também sempre constante.

Anexo C

Neste anexo, encontram-se na tabela C.1 os valores obtidos no ensaio reológico realizado para o fluido N46,3. Este ensaio foi efectuado com o objectivo de determinar a viscosidade do fluido em cada ensaio. A temperatura de referência T_0 é igual a 20°C (293,15 K).

Tabela C.1 – Valores obtidos do ensaio reológico do fluido N46,3.

Temperatura (°C)	Temperatura (K)	Viscosity (Pa.s)	$\ln(\eta/\eta_0)$	$1/T-1/T_0$ (K ⁻¹)
10	283,15	0,00623	4,18E-01	1,21E-04
11	284,15	0,00590	3,64E-01	1,08E-04
12	285,15	0,00564	3,19E-01	9,57E-05
13	286,15	0,00542	2,79E-01	8,34E-05
14	287,15	0,00522	2,42E-01	7,13E-05
15	288,15	0,00502	2,02E-01	5,92E-05
16	289,15	0,00482	1,62E-01	4,72E-05
17	290,15	0,00463	1,22E-01	3,53E-05
18	291,15	0,00445	8,19E-02	2,34E-05
19	292,15	0,00427	4,06E-02	1,17E-05
20	293,15	0,00410	0,00E+00	0,00E+00
21	294,15	0,00396	-3,47E-02	-1,16E-05
22	295,15	0,00383	-6,81E-02	-2,31E-05

Anexo D

Neste anexo, encontram-se os resultados obtidos a partir dos resultados da visualização de escoamentos.

Na tabela D.1, encontram-se os resultados do comprimento da recirculação para cada número de Reynolds e respectivo plano em estudo, para os ensaios realizados com água. Na tabela D.2 encontram-se os mesmos resultados, mas para os ensaios realizados com o fluido N46,3.

Tabela D.1 – Valor do comprimento da recirculação para cada número de Reynolds e respectivo plano para os ensaios realizados com água.

Re	Plano z/R	L_v / R
19,4	0	1,700
	8	1,680
	10	1,680
	12	1,607
	13	1,577
	14	1,351
	15	1,195
	15,5	1,537
	15,7	1,693
31,9	0	2,844
	8	2,843
	10	2,820
	12	2,877
	13	2,746
	14	2,344
	15	2,020
	15,5	2,487
	15,7	2,596
39,2	0	3,600
	8	3,613
	10	3,912
	12	3,657
	13	3,172
	14	2,574
	15	2,300
	15,5	2,820
	15,7	2,944

Tabela D.2 – Valor do comprimento da recirculação para cada número de Reynolds e respectivo plano para os ensaios realizados com N46,3.

Re	Plano z/R	L_v / R	Re	Plano z/R	L_v / R
7,2	0	0,291	20,3	0	1,732
	8	0,282		8	1,658
	10	0,285		10	1,621
	12	0,234		12	1,468
	13	0,187		13	1,385
	14	0,109		14	1,129
	15	0,058		15	1,050
	15,5	0,112		15,5	1,362
	15,7	0,203		15,7	1,668
10,4	0	0,534	27,3	0	2,404
	8	0,513		8	2,516
	10	0,518		10	2,534
	12	0,451		12	2,505
	13	0,393		13	2,322
	14	0,326		14	1,880
	15	0,185		15	1,650
	15,5	0,289		15,5	2,187
	15,7	0,429		15,7	2,481
13,9	0	0,988	33,9	0	2,925
	8	0,988		8	3,333
	10	0,995		10	3,340
	12	0,948		12	3,400
	13	0,903		13	3,101
	14	0,724		14	2,455
	15	0,562		15	2,134
	15,5	0,796		15,5	2,511
	15,7	0,903		15,7	2,679

Na tabela D.3, encontram-se os resultados experimentais obtidos na visualização de escoamentos, para os ensaios realizados com a água e com o fluido N46,3, nos planos $z/R=0$ e $z/R=15$, bem como os respectivos resultados numéricos.

Tabela D.3 – Valor do comprimento da recirculação para cada número de Reynolds dos resultados experimentais e dos resultados numéricos nos planos $z/R=0$ e $z/R=15$.

		Re	L_v/R $z/R=0$	L_v/R $z/R=15$
Experimentais	Água	7,9	0,384	
		19,4	1,620	
		31,9	2,764	
		39,2	3,600	
	N46,3	7,2	0,357	
		10,4	0,561	0,185
		13,9	0,988	0,562
		20,3	1,732	1,050
		27,3	2,401	1,650
		33,9	3,460	2,134

Anexo E

Neste anexo, pode-se visualizar uma sequência de imagens obtidas no tratamento dos resultados da medição detalhada do campo de velocidades com PIV, bem como uma breve explicação do que é feito em cada imagem.

As imagens que de seguida se podem observar, foram obtidas no ensaio realizado na posição 2 da coluna para um número de Reynolds igual a 20,3 e no plano $z/R=0$.

Na figura E.1 pode-se observar a imagem “bruta” obtida nos ensaios. Esta é uma das imagens obtidas em cada par de imagens e é designada por *frame 1*. A outra imagem do mesmo par é designada por *frame 2*.

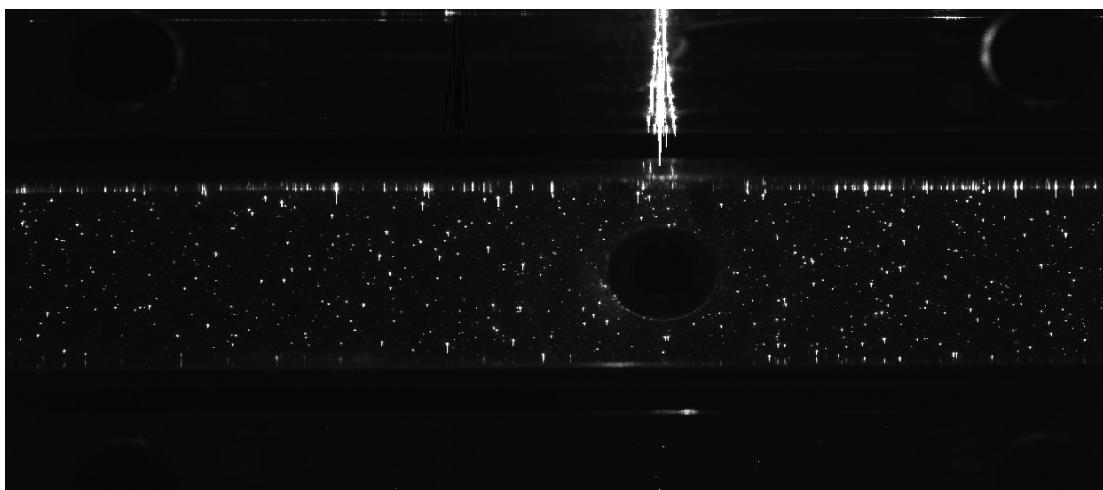


Figura E.1 – *Frame 1* de um par de imagens.

Após a obtenção das imagens, inicia-se o tratamento das mesmas. Assim, a partir da imagem “bruta” ou imagem inicial, cria-se a denominada *Pixel Mean* (média de píxeis), que se pode ver na figura E.2. Nesta imagem pode-se observar o “ruído” existente na imagem inicial. Ou seja, tudo o que não são partículas traçadoras e em nada ajudam na criação do mapa de vectores. Esta imagem é obtida através de uma média dos 60 pares de imagens adquiridas em cada ensaio.

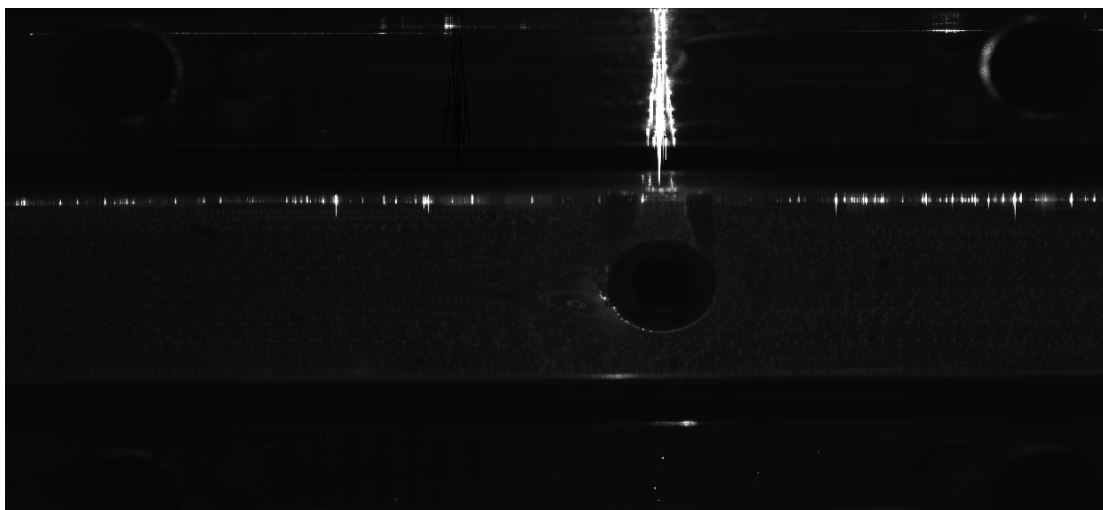


Figura E.2 – *Pixel Mean* obtida.

De seguida, procede-se à subtracção da imagem *Pixel Mean* a cada uma das imagens obtidas, para que todas as imagens resultantes da subtracção contenham apenas os elementos necessários à criação do mapa de vectores. Na figura E.3 pode-se observar uma imagem obtida após a subtracção da imagem *Pixel Mean*.

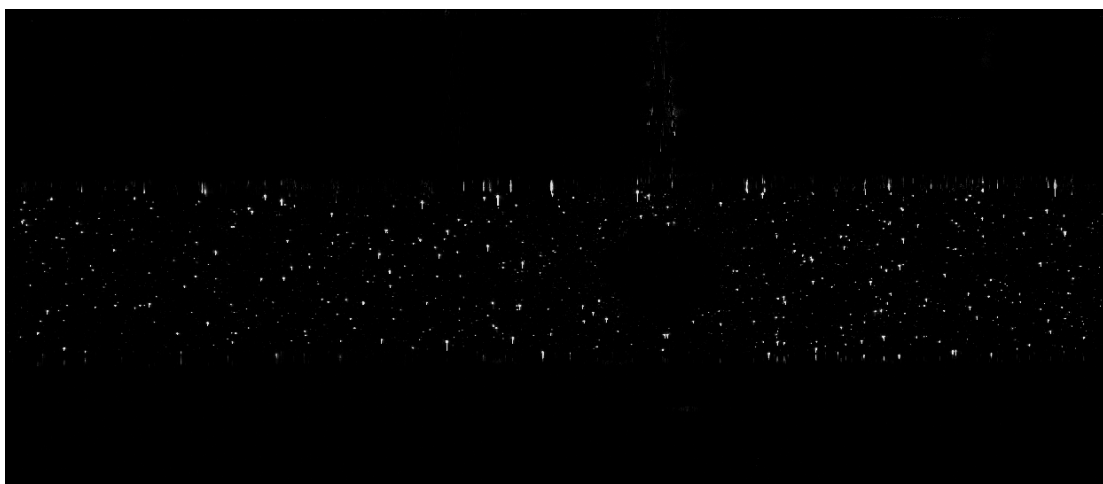


Figura E.3 – Imagem obtida após a subtracção da imagem *Pixel Mean*.

Posteriormente, para remover da imagem a zona do cilindro bem como das paredes da coluna, que podem influenciar o mapa de vectores na zona de estudo do escoamento, cria-se a denominada *Mask* (máscara), que é aplicada a todas as imagens do ensaio, conforme se pode observar na figura E.4.



Figura E.4 – Imagem obtida após a aplicação da *mask*.

Depois de removido das imagens tudo o que não é necessário, aplica-se uma correlação já existente no programa *FlowManager v4.60*. A correlação utilizada, denominada de *Adaptive Correlation*, faz sucessivas iterações em pequenas áreas de interrogação em que é dividida a imagem. Na figura E.5 pode-se observar a imagem obtida após a aplicação da correlação.

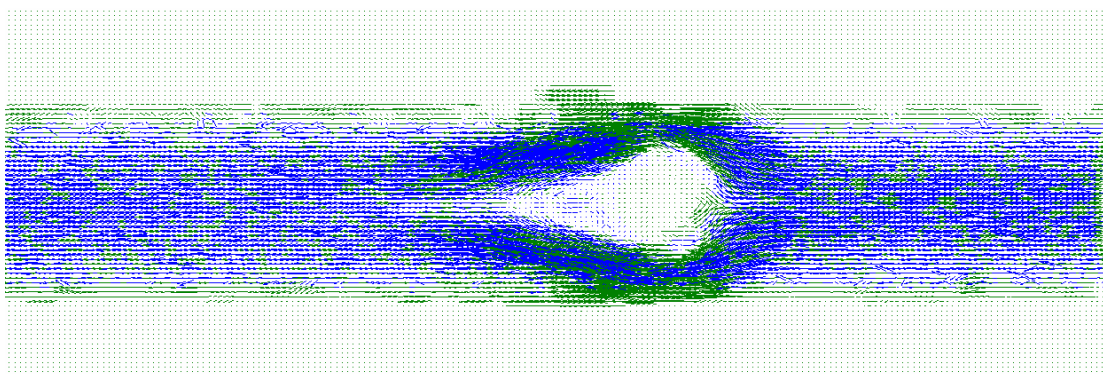


Figura E.5 – Imagem obtida após a aplicação da correlação.

Na imagem, os vectores representados a azul correspondem aos vectores resultantes do escoamento após a aplicação da correlação e os vectores representados a verde correspondem aos vectores que são substituídos, após a aplicação da correlação. Estes vectores são substituídos por apresentarem uma velocidade com diferenças superiores a 10% (valor do erro recomendado no manual) em relação à velocidade média em cada área de interrogação.

Posteriormente, faz-se uma média em cada imagem (*Moving Average*) dos vectores representados a azul e a verde, também em cada área de interrogação, de forma a retirar os vectores que se encontrem fora da média obtida. Os vectores retirados encontram-se representados a vermelho na figura E.6.

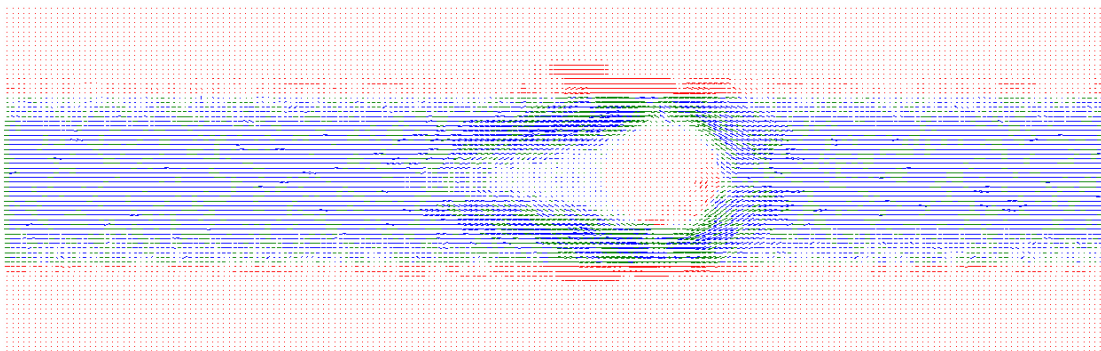


Figura E.6 – Imagem obtida após a aplicação da *Moving Average*.

A partir das imagens obtidas após aplicação da *Moving Average*, faz-se uma média de todas as imagens do ensaio para obter o mapa de vectores correspondente. O mapa de vectores obtido nesta sequência de imagens encontra-se representado na figura E.7.

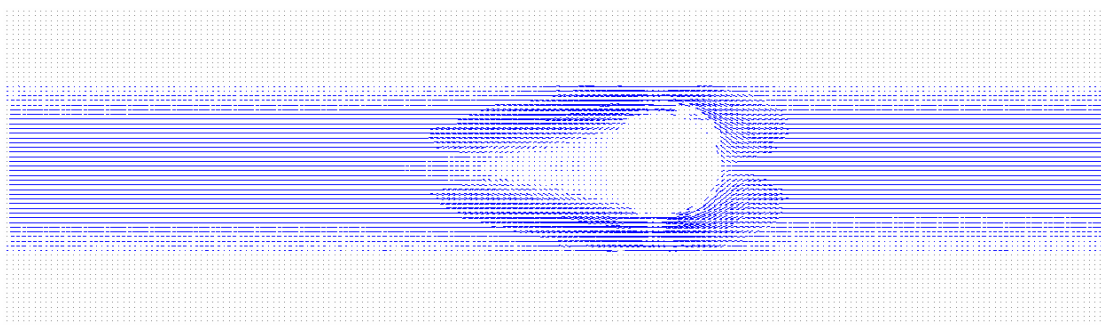


Figura E.7 – Imagem do mapa de vectores.

Depois de criado o mapa de vectores correspondente a cada ensaio, retiram-se os perfis de velocidade com a localização e direcção que se pretender. Na figura E.8 pode-se visualizar um perfil de velocidade retirado a uma distância de dois raios a jusante do cilindro.

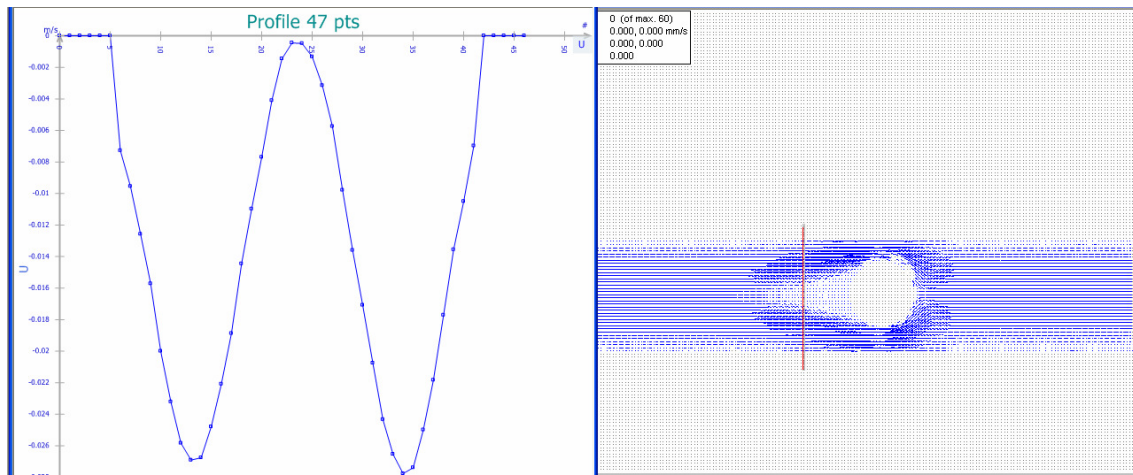


Figura E.8 – Perfil de velocidade retirado do mapa de vectores a dois raios a jusante do cilindro.