

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS
E SANEAMENTO AMBIENTAL

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO SISTEMA “VÓRTICE FERRADURA”
NO ESCOAMENTO AO REDOR DE UM CILINDRO CIRCULAR



por

Paulo Henrique Fernandes Ferreira

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental como requisito parcial para a obtenção do
Título de Mestre em Engenharia.

Porto Alegre, outubro de 2003.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS
E SANEAMENTO AMBIENTAL

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO SISTEMA “VÓRTICE FERRADURA”
NO ESCOAMENTO AO REDOR DE UM CILINDRO CIRCULAR**

Paulo Henrique Fernandes Ferreira

Tese submetida ao programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Edith Beatriz Camaño Schettini

Co-orientador: Luiz Emílio Sá Brito de Almeida

Banca Examinadora

Prof. Ph.D Acir Mércio Loredó Souza,
Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques
Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres

Dept. Eng. Civil/UFRGS
IPH/UFRGS
IPH/UFRGS

Porto Alegre, outubro de 2003.

À minha mãe, meu pai e meu irmão,

E a todos aqueles que me deram apoio!

"A coisa mais bela que o homem pode experimentar é o mistério. É esta a emoção que está na raiz de toda ciência e toda a arte. O homem que desconhece este encanto, incapaz de sentir admiração e estupefação, já está, por assim dizer, morto."

Albert Einstein

"Sondei a noite erma e tranqüila, olhei-a fundo, a perquiri-la, sonhando sonhos que ninguém, ninguém ousou sonhar jamais..."

Edgar Allan Poe

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisa Hidráulicas da Universidade do Rio Grande do Sul, sob a orientação da Prof. Edith Beatriz Camaño Schettini, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e co-orientado pelo Prof. Luiz Emílio Sá de Almeida, também da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O trabalho consistiu no emprego de métodos de visualização e medições de pressão, procurando caracterizar o campo de escoamento ao redor de um cilindro circular, modificado pela presença do Vórtice Ferradura.

AGRADECIMENTOS

É do meu desejo agradecer a todos que, como professores, colegas, familiares e amigos, tenham porventura colaborado de alguma forma, direta ou indiretamente na realização deste trabalho. Em especial, gostaria de agradecer aos colegas de trabalho: Jaime F. Gomes, Juliano R. Gimenez e Sandro C. Nassr, cujo convívio diário acabou por proporcionar grande crescimento, tanto profissional, como pessoal.

Gostaria de expressar agradecimento à minha orientadora, Edith Beatriz Camaño Schettini, pelas discussões enriquecedoras, pelo exemplo de ser humano e competência profissional. Também, gostaria de agradecer ao Professor Rogério Dornelles Maestri pela contribuição espontânea e inquietude intelectual, não permitindo o direito a descanso, muito contribuindo para meu amadurecimento profissional. Aos professores Marcelo Giulian Marques, Paulo Kroeff de Souza, Ana Luiza Borges, Luiz Magalhães Endres, Alexandre Beluco, por seu indispensável auxílio, muito obrigado. Também, muito obrigado ao funcionário Paulo Dolejal pela inestimável ajuda.

Agradeço à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), e a PPG-IPH, a oportunidade de desenvolver este trabalho.

A Bianca de Moraes Branco, obrigado por seu amor, apoio e paciência. Dedico este trabalho a meus pais, por ser fruto de seu empenho e fé.

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo de um sistema hidrodinâmico encontrada em muitas situações dentro da mecânica dos fluidos: o Vórtice Ferradura. Esta estrutura possui características bastante complexas e seu comportamento ainda é pouco compreendido e explicado.

Assim, o escoamento ao redor do cilindro circular, em leito fixo, foi investigado experimentalmente, com o propósito de tentar caracterizar o comportamento hidrodinâmico do Vórtice Ferradura através da visualização de escoamento e medições de pressão. Para o trabalho, um cilindro foi montado.

As visualizações do Vórtice foram feitas através de uma janela de visualização na seção de testes do canal. A filmagem foi feita através de uma câmera de vídeo VHS, de uso doméstico, e injeção de corante. As medições de pressão foram feitas através do emprego de transdutores de pressão, e divididas em dois grupos: (i) medições de pressão feitas no leito do canal, na linha de simetria, na região de escoamento próxima ao Vórtice; (ii) medições de pressão do escoamento na superfície do cilindro.

As imagens, assim como os dados de transdutor, foram transportados para o meio digital para posterior manipulação e análise. Os resultados confirmam algumas descrições fornecidas pela literatura, bem como, também levantam algumas considerações sobre o assunto: as imagens permitiram a visualização das etapas de formação do Vórtice, descrever modificações em seu diâmetro ao longo dos ensaios, reconhecer a variabilidade espacial de sua posição e detectar a presença de um vórtice secundário. Os dados de transdutor descreveram o campo de pressões no leito do canal, modificado pela presença do cilindro e, ao redor da superfície do mesmo, bem como, o comportamento das flutuações de pressão, correlações, autocorrelações e espectros das flutuações de pressão dos transdutores, para estas situações.

Palavras-Chave: Vórtice Ferradura, visualização de escoamento, transdutor de pressão.

ABSTRACT

This work presents the study of a hydrodynamic structure found in many situations in the mechanics of the fluids: the Horseshoe Vortex. This structure has complex characteristics and its behavior is not yet entirely understood and explained.

Then, the flow around a circular cylinder in fixed bed was investigated, trying to characterize the hydrodynamic behavior of Horseshoe Vortex through the flow visualization and pressure measurements. For this study, a cylinder was set up.

The visualizations of the Vortex were made through a window, in a test section in the channel. The filming was made through a VHS domestic video camera and dye injection. The pressure measurements were made by pressure transducers and divided into two groups: on the bed of the channel, on the symmetry line, close to the Vortex; and measurements on the surface of the cylinder.

The images and the transducer's data were transported to digital media for manipulation and analysis. The results confirm some descriptions supplied by literature, besides that, showing some points about this subject: the images allowed the visualization of the formation stages of the Vortex, to describe modifications in its diameter along the rehearsals, to recognize the space variability of its position and to detect the presence of a secondary vortex. The transducer data described the pressure field on the bed of the channel, modified by the presence of the cylinder, and on the surface of the cylinder, as well as, the behavior of the pressure fluctuations, correlations, auto-correlations and spectra of the pressure fluctuations from transducers, for these situations.

Word keys: Vortex Horseshoe, flow visualization, pressure transducer.

ÍNDICE	Página
Capa	I
Folha de Rosto	II
Apresentação	V
Agradecimentos	V
Resumo	VI
Abstract	VII
Índice	VIII
Lista de Símbolos	X
Índice de Figuras	XII
Índice de Tabelas	XIV
Índice de Equações	XIV
1. Introdução	1
Relevância e Motivação	1
Objetivos	2
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1 Aspectos Teóricos	4
2.1.1 Estruturas Coerentes e Vórtices	4
2.1.2 O escoamento ao Redor do Cilindro	7
2.1.3 O Vórtice Ferradura	14
2.2 Formulação Matemática	21
2.2.1 Função Amostral ou Registro Amostral	21
2.2.2 Equações Determinísticas	21
2.2.2 Análise Dimensional do Escoamento ao Redor do Cilindro	26
2.2.3 Funções Estocásticas	30
3. A Instalação e o Trabalho Experimental	34
3.1 O Canal	34
3.2 A Seção de Testes	34
3.3 O Cilindro	37
3.4 Sistema de Aquisição de Imagens	40
3.5 Sistema de Aquisição de Pressão	41
3.6 Considerações Gerais sobre o trabalho experimental	45
3.7 O Método de Visualização	45
3.8 O Método de Medição de Pressão	49

4. Resultados	53
4.1 Visualizações	53
4.2 Medições de Pressão	58
4.2.1 As Pressões no Leito ao Longo da Linha de Simetria	59
4.2.1.1 Análise Estatística	59
4.2.1.2 Análise de Correlações e Análise Espectral	63
4.2.2 As Pressões ao Redor do Cilindro	71
4.2.2.1 Análise Estatística	71
4.2.2.2 Análise de Correlações e Análise Espectral	74
4.2.3 Número de Strouhal para os Resultados	80
5. Conclusões e Recomendações	81
5.1 Conclusões	81
5.1.1 Visualizações	81
5.1.2 Medições de Pressão	82
5.2 Recomendações	87
6. Referências Bibliográficas	89
Anexos	91
Anexo A – Métodos de Aferição e Calibração	92
A.1 Aferição da Vazão	92
A.2 Aferição dos Transdutores	93
Anexo B – Diagramas dos Circuitos Eletrônicos	100
Anexo C – Estacionariedade: Verificação das Séries de Dados	101
Anexo D – Estatística das Medições de Pressão	103
D.1 Medições no leito	103
D.2 Medições laterais	107

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Grandeza	Unidade(S.I.)
a	Ângulo da Comporta com a vertical	°
b	Largura do Escoamento	m
C	Coefficiente de correlação	-
C_p	Coefficiente de Pressão	-
C_v	Coefficiente de Resistência	-
D	Diâmetro do cilindro	m
D_v	Diâmetro do Vórtice	m
DN	Diâmetro Nominal	m
d	Operador Diferencial Parcial	-
δ	Espessura da Camada Limite	m
e	Número de Euler	-
f	Frequência	Hz
Φ_{xx}	Função de Densidade Autoespectral	-
g	Aceleração da Gravidade	m/s ²
H	Lâmina d'água (Profundidade)	cm
H_v	Lâmina d'água no Vertedor	cm
k	Coefficiente de Rugosidade	m/m
L	Comprimento	m
m	Massa	kg
μ	Viscosidade Dinâmica	Kg.m ² /s
N	Número de Valores	-
η	Distância Adimensional à Parede	m/m
P	Pressão Média	Pa
p	Pressão	Pa
ρ	Massa específica	kg.m ⁻³
Q	Vazão	l/s
R	Raio do Cilindro	m
R²	Coefficiente de Correlação	-
Re	Número de Reynolds do escoamento	-
Re_D	Reynolds do cilindro	-
R_{xx}	Função de Autocorrelação de X	-

R_{XY}	Função de Correlação entre X e Y	-
rms	Média quadrática	Pa
St	Número de Strouhal	-
$u_{i,j,k}$	Velocidades ortogonais	m/s
U_{∞}	Veloc. do escoamento de aproximação	m/s
V	Velocidade Média do Escoamento	m/s
S	Localização do Ponto de Estagnação	-
T	Transdutor	-
t	Tempo	s
$\tau_{i,j}$	Tensão	Pa
θ	Ângulo ao Redor do Cilindro	°
V	Veloc. Média do escoamento	m/s
v	Diferença de Potencial Elétrico (Tensão)	volts
$x_{i,j,k}$	Direções ortogonais	m
$x(t),y(t),z(t)$	séries temporais	Pa
X,Y,Z	Coordenadas cartesianas	m
Y_m	Profundidade média do escoamento	m
ν	Viscosidade cinemática	m ² /s
ψ	Função de Corrente	-
Ψ	Função Densidade de Probabilidade	-
∇	Operador Nabla	-

LISTA DE FIGURAS

Figura	Legenda	Página
Fig. 2.1	– O Vórtice Ferradura.	6
Fig. 2.2	– As regiões de escoamento próximas ao cilindro (Fonte: Dargahi, 1987, p. 03).	8
Fig. 2.3	– Esteira do cilindro.	8
Fig. 2.4	– As linhas de corrente para baixos e altos valores de Reynolds, respectivamente. (Fonte: Triton, 1988, ps. 23 e 24).	10
Fig. 2.5	– Distribuição de Pressão ao redor do cilindro (Fonte: Triton, 1988, p. 149).	11
Fig. 2.6	– Valores do Coeficiente de Arraste para diversos Reynolds (Fonte: Triton, 1988, p. 33).	12
Fig. 2.7	– Separação do Escoamento (Fonte: Schlichting, 1979, p. 258).	13
Fig. 2.8	– Rotação do escoamento no plano de simetria.	14
Fig. 2.9	– O Formato tridimensional do Vórtice (Fonte: Okamoto e Sunabashiri, 1992, p. 514).	15
Fig. 2.10	– O vórtice secundário (sem referência).	16
Fig. 2.11	– O Sistema de Vórtice Ferradura (Fonte: Schlichting, 1979, p. 259).	16
Fig. 2.12	– Movimentos Transversais.	18
Fig. 2.13	– Erupções de Fluido (Fonte: Doligalski, 1994, p. 602).	18
Fig. 2.14	– Distribuição de velocidades, dentro da camada limite, ao redor do cilindro (Fonte: Schlichting, 1979, p. 171).	25
Fig. 2.15	– Número de Strouhal para o desprendimento de vórtices do cilindro (Fonte: White, 1991, p. 11).	29
Fig. 3.1	– Representação genérica do canal e da seção de testes	35
Fig. 3.2	– Válvula Gaveta e Vertedor.	36
Fig. 3.3	– Detalhamento da seção de testes.	36
Fig. 3.4	– Seção de testes.	37
Fig. 3.5	– Diagrama do arranjo dos orifícios, no leito e na superfície do cilindro.	38
Fig. 3.6	– Posição dos orifícios feitos na superfície do cilindro.	38
Fig. 3.7	– Disposição dos orifícios, na superfície do cilindro.	39
Fig. 3.8	– Vista geral do arranjo do cilindro, mangueiras e transdutores.	40
Fig. 3.9	– Vista do transdutor Druck de pressão, modelo PTX620, e alguns acessórios.	42
Fig. 3.10	– Posicionamento: da (a) filmadora (em planta) e da (b) (Iluminação (em vista).	46
Fig. 4.1	– Formação do Vórtice.	54
Fig. 4.2	– A Variabilidade Espacial.	55
Fig. 4.3	– O Vórtice Primário e o Secundário.	56
Fig. 4.4	– Variação do diâmetro do Vórtice com o número de Reynolds.	57
Fig. 4.5	– Pressão Dinâmica Média: (a) sem cilindro e (b) com cilindro, nos ensaio no leito.	60
Fig. 4.6	– Pressão Dinâmica Final, adimensionalizada com o cilindro.	61
Fig. 4.7	– O RMS, (a) sem e (b) com cilindro, nos ensaio no leito.	62
Fig. 4.8	– A Correlação Espacial dos dados, nos ensaio no leito.	64
Fig. 4.9	– A Autocorrelação dos dados, nos ensaio no leito.	67

Fig. 4.10 – Os Espectros de Potência dos dados, nos ensaio no leito.	69 e 70
Fig. 4.11.a – Pressão Dinâmica Média, nos ensaios de superfície.	71
Fig. 4.11.b – Pressão Dinâmica Média adimensionalizada, nos ensaios de superfície.	72
Fig. 4.12 – O RMS dos dados, nos ensaios de superfície.	73
Fig. 4.13 – A Correlação Espacial dos dados, nos ensaios de superfície.	75
Fig. 4.14 – A Autocorrelação dos dados, nos ensaio de superfície.	77
Fig. 4.15 – Os Espectros de Potência dos dados, nos ensaio no leito.	79
Fig. 4.16 – O Número de Strouhal para frequências obtidas dos Espectros de Energia.	80

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Legenda	Página
Tabela 3.1	– Resumo dos Ensaios de Visualização.	46
Tabela 3.2	– Resumo dos Ensaios (leito do canal).	52
Tabela 3.3	– Resumo dos Ensaios (superfície do cilindro).	52

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação	Descrição	Página
Equação 1	– Equação de Navier-Stokes para Fluidos Newtonianos Viscosos	22
Equação 2	– Distribuição de Velocidades para o Cilindro Circular (Escoamento irrotacional, não-viscoso)	23
Equação 3	– Distância à parede (Adimensional)	24
Equação 4	– Função de Corrente para o Cilindro Circular (Escoamento irrotacional, não-viscoso)	24
Equação 5	– Equação dos Parâmetros obtidos pela Análise Dimensional	27
Equação 6	– Equação dos Números Adimensionais obtidos pela Análise Dimensional	27
Equação 7	– Número de Reynolds	28
Equação 8	– Número de Strouhal	29
Equação 9	– Coeficiente de Pressão	29
Equação 10	– Coeficiente de Resistência	30
Equação 11	– Valor Médio	30
Equação 12	– Função Densidade de Probabilidade	31
Equação 13	– Função de Correlação.	31
Equação 14	– Transformada da Função de Correlação ou Função de Densidade Autoespectral	31
Equação 15	– Decomposição de Reynolds	32
Equação 16	– Função Densidade de Probabilidade modificada pela Decomposição de Reynolds	32
Equação 17	– R.M.S. (Root Mean Square)	32

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho sintetiza os resultados provenientes de uma série de estudos experimentais desenvolvidos em laboratório, com o objetivo principal de caracterizar o comportamento hidrodinâmico de uma estrutura vorticial em particular: o *Vórtice Ferradura*.

Este vórtice é uma estrutura bastante comum em muitas situações do campo da mecânica dos fluidos, estando associado freqüentemente, a escoamentos que perpassam obstáculos.

A análise experimental foi concebida em duas grandes abordagens experimentais ao tema. A primeira abordagem trata-se de uma bateria de *Ensaio de Visualização*, onde se procedeu a filmagem do Vórtice; e a segunda abordagem, composta de *Ensaio de Medição de Pressão*, onde foram estudados os efeitos de sua presença no campo de pressões próximo.

Inicialmente, o trabalho apresenta o assunto, contextualizando-o de acordo com a literatura sobre o tema, abordando aspectos que julgados relevantes pela pesquisa científica acadêmica e as dificuldades inerentes ao estudo, assim como, apresentando aspectos até o presente momento, desconhecidos sobre o assunto.

Em momento posterior, tem lugar, então, a descrição das metodologias empregadas, a descrição do aparato experimental, a análise dos resultados e as conclusões obtidas. Por fim, encerrando o trabalho, é apresentada a bibliografia consultada empregada no estudo.

Relevância e Motivação

O *Vórtice Ferradura* é uma estrutura presente, entre outros, no escoamento que ultrapassa um obstáculo, que pode ser, por exemplo, um cilindro circular. Este tipo de estrutura hidrodinâmica está presente em muitas situações do cotidiano da engenharia, como por exemplo, no escoamento em torno de pilar.

A este Vórtice estão associados fenômenos de erosão localizada, sendo o mesmo considerado pela literatura específica do assunto, como sua principal causa (Dargahi, 1987). O efeito provocado pelo Vórtice em estruturas inseridas em escoamentos, de modo semelhante, constitui um problema importante na prática de engenharia.

Apesar do Vórtice estar associado, por exemplo, às condições que provocaram a ruína e colapso de estruturas de pontes, o mesmo permanece sem uma compreensão e um equacionamento ditos satisfatórios, e que possam ser aceitos como definitivos. O fenômeno apresenta as mesmas dificuldades inerentes ao processo erosivo, sendo também, um fenômeno tridimensional, variável, e extremamente complexo, cujo estudo envolve a análise de características hidrodinâmicas do escoamento, interrelacionadas entre si.

Assim, o Vórtice possui características hidrodinâmicas ainda pouco reconhecidas. Conhecer estas características é essencial para o processo de compreensão do fenômeno em si. Existe uma grande quantidade de dados experimentais sobre o assunto, porém, tendo em sua maioria, formulação com ênfase em erosão localizada, e estando estruturada de forma a associá-lo ao mecanismo da erosão e com a determinação da profundidade de erosão.

Em sua maior parte, os resultados obtidos são de natureza empírica visando uma aplicabilidade prática que, apesar de grande utilidade é reducionista, pois não explica o fenômeno em sua natureza íntima, nem estabelece um conjunto de princípios teóricos capaz de descrever o fenômeno.

Em termos gerais, esta pesquisa propôs-se a estudar qualitativa e quantitativamente como o escoamento foi alterado com a presença de um cilindro, buscando dessa forma, fornecer mais uma contribuição para o assunto.

Objetivos

O trabalho propõe, como objetivo geral, a caracterização do comportamento hidrodinâmico do sistema Vórtice Ferradura, a médios valores de Reynolds. Porém, o emprego de duas abordagens distintas a um objeto único de estudo, conduziu a objetivos específicos a cada caso. Assim, foram perseguidos os seguintes objetivos particulares:

1. Investigar, o quanto possível, qualitativa e quantitativamente, empregando imagens geradas através de uma metodologia de visualização, a dinâmica do (sistema) Vórtice Ferradura, ao redor do cilindro, identificando características predominantes e aspectos, que porventura seriam de utilidade para seu entendimento.

2. Investigar, neste momento, em termos de quantidades mensuráveis, empregando dados provenientes de medições de pressão no leito e na superfície do cilindro, a dinâmica do (sistema) Vórtice Ferradura, na região próxima ao vórtice, ao redor do cilindro e no leito do canal, identificando características predominantes e aspectos que porventura seriam de utilidade para seu entendimento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS TEÓRICOS

2.1.1 Estruturas coerentes e vórtices

Estruturas Coerentes têm sido a designação atribuída, nos últimos anos, à evidência da presença de alto grau de organização, dentro de escoamentos turbulentos. Este termo descreve estruturas hidrodinâmicas que apresentam, simultaneamente, duas propriedades básicas: preservação de forma e imprevisibilidade (Lesieur, 1997). Os vórtices estão entre as estruturas de grande escala que apresentam maior coerência dentro de escoamentos turbulentos e, tanto os vórtices da esteira como o próprio Vórtice Ferradura, têm sido tratados, em recentes trabalhos (Krajnović, S., Davidson, L., 2000), como estruturas coerentes. Porém, ainda é tema de controvérsia se o emprego deste termo envolve um novo ponto de vista sobre o assunto ou apenas atribui um novo nome a um velho conceito.

De qualquer modo, segundo Triton (1988), o nome salienta que nunca é apropriado descrever um escoamento turbulento como completamente aleatório, pois existe muita evidência de que as flutuações de velocidade envolvem modelos de movimento e evidências obtidas pela medição de quantidades estatísticas, visualização de escoamento e simulação numérica, têm demonstrado a presença de alto grau de organização, no movimento de grandes turbilhões.

Neste contexto, modelos conceituais são descrições idealizadas de processos físicos apenas englobando as idéias fenomenológicas centrais. Assim, em alguns escoamentos, tais modelos ocorrem repetitivamente, com estruturas identificáveis por certos períodos e algumas vezes, apresentando indícios de periodicidade. Segundo Robinson (1991), são comuns modelos para vórtices “Hairpins” (ou “Grampo de Cabelo”), dentro da camada limite de placas planas, podendo, porém, haver variações de aplicabilidade.

Nesta linha de pesquisa, diversas técnicas de investigação têm sido empregadas: análise estatística, simulações numéricas, etc. Entre elas, a visualização de escoamento tem desempenhado papel significativo (Robinson, 1991), fornecendo grandes quantidades de novas informações.

Do mesmo modo, uma rica variedade de ferramentas de análise estatística tem sido desenvolvida para o reconhecimento de estruturas coerentes e, entre elas, salienta-se a *Amostragem Condicional*. Esta técnica tem sido empregada extensivamente e sua aplicação varia desde a identificação de grandes estruturas organizadas, quase determinísticas, até erupções em pequena escala, em regiões próximas a paredes.

Há várias décadas, o estudo acadêmico tem provido grande quantidade de informação e, um dos questionamentos mais imediatos está em responder como utilizar toda a informação já estocada, neste novo contexto. Basicamente, os trabalhos têm se desenvolvido através de medições de propriedades médias (temporais) do escoamento, feitas em pontos singulares. Um aperfeiçoamento das técnicas experimentais e numéricas de detecção é requerido, já que é grande o número de dificuldades a serem superadas. Portanto, está claro que muito trabalho experimental ainda será despendido e, apesar do conceito de estruturas coerentes estar bem estabelecido, existe ainda muita controvérsia sobre os resultados obtidos e os modelos mais apropriados a serem adotados, o que, freqüentemente, conduz a novas revisões sobre o assunto.

Locais que concentram vorticidade, no interior de um escoamento, são ocorrência bastante comum dentro da mecânica dos fluidos. Nestes locais, é freqüente o aparecimento de uma estrutura hidrodinâmica peculiar, concentradora de grande quantidade de vorticidade em uma pequena região: *o vórtice*. O vórtice é, também, presença comum em um sem número de situações, no campo da mecânica dos fluidos (White, 1991).

Os vórtices estão presentes em toda a natureza, e diversas vezes são encontrados em nossa vida diária: na turbulência provocada pela passagem de automóveis ou aviões, no escoamento de um rio, ao passar pelo pilar de uma ponte, etc (Hughes e Brighton, 1979). Portanto, é natural que, há décadas, exista um grande interesse em compreender o mecanismo básico de seu funcionamento, bem como, o de alguns fenômenos associados a eles.

Existe uma grande variedade de fenômenos relacionados aos vórtices, associados tanto com movimentos de grande escala como, também, com movimentos de pequena escala. A turbulência causada pelo vento ao passar entre os edifícios de uma metrópole é um exemplo de escoamentos de grande escala. Como fenômenos associados a movimentos de pequena

escala, pode-se citar o ruído gerado, no interior de veículos, influenciado diretamente pelas características aerodinâmicas do mesmo.

Alguns vórtices têm o mecanismo de seu comportamento bastante conhecido, não obstante outros, como o caso do *Vórtice Ferradura* (fig. 2.1), carecem ainda de muita pesquisa. Neste vórtice, um complexo campo de escoamento de características tridimensionais desenvolve-se quando, o escoamento de aproximação, de natureza bidimensional, encontra a presença do cilindro (Dargahi, 1987). Ahmed e Rajaratnam (1997), afirmam que este tipo de escoamento é muito complexo para ser completamente entendido pela análise teórica, e muito variado para ser estudado através de poucos experimentos. A complexidade do campo de escoamento associado a este vórtice, em particular, faz com que os métodos teóricos e experimentais sejam de difícil aplicação (Dargahi, 1989).

As equações para o caso tridimensional não podem, ainda, ser resolvidas de forma analítica e as simulações numéricas apresentam resultados limitados, devido ao número excessivo de simplificações necessárias e o fato das simplificações assumidas não corresponderem a características reais de escoamento. Não obstante este fato, a utilização de métodos numéricos, o aumento da potência computacional, estão, hoje em dia, conduzindo a soluções cada vez mais, próximas da realidade.

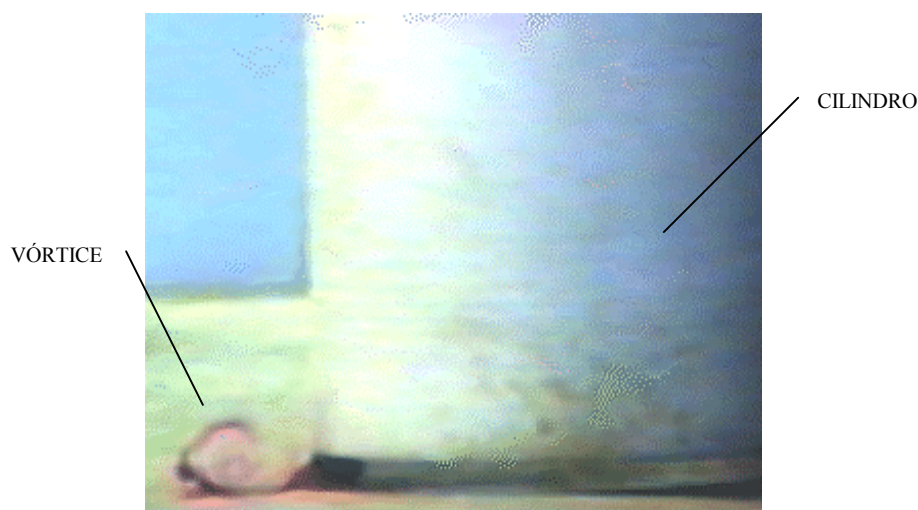


Fig. 2.1 – Visualização do Vórtice Ferradura ($Re = 5000$).

A grande maioria das técnicas experimentais existentes é mais adequada a escoamentos bidimensionais. Apesar disso, as técnicas de visualização de escoamento têm proporcionado uma promissora forma de analisar, qualitativamente, o escoamento (Dargahi,

1989). Também, a Anemometria Laser Doppler (LDA) tem permitido medições tridimensionais, sem interferência no escoamento (não-intrusivo).

A maioria dos trabalhos desenvolvidos em camadas limites tridimensionais têm se restringido à obtenção de médias temporais de pressão ou velocidade dentro do campo de escoamento, e os resultados observados têm sido contraditórios (Angui e Andropoulos, 1992). Os autores afirmam que este campo é muito complexo, e que possui algumas características de rápida evolução temporal, não sendo possível sua caracterização apenas em termos de propriedades médias temporais.

2.1.2 O Escoamento ao redor do cilindro

As características fundamentais do escoamento ao redor do cilindro podem ser deduzidas das distribuições de velocidade, pressão, tensões de cisalhamento no leito, e alguns parâmetros descritores de turbulência. Para o caso do cilindro preso a um fundo plano, Dargahi (1987) afirma que a complexa natureza tridimensional do escoamento que se forma causa sérias dificuldades na medição destas quantidades. Porém, desde então, muito já se evoluiu em relação a novos sistemas de medição, podendo citar-se, entre outros, o LDA (Laser Doppler Anemometry) e o PIV (Particle Image Velocimetry).

Segundo o autor, o escoamento ao redor do cilindro, preso a um fundo plano, individualiza duas regiões distintas:

- ♦ uma *principal*, externa, tratando-se do escoamento de aproximação;
- ♦ uma região de escoamento *secundária*, interna, de características viscosas.

Na região principal, o escoamento de aproximação percorre a direção axial do canal, formando um ângulo de 90° com a geratriz do cilindro.

Na região de escoamento secundário, ao redor do cilindro, basicamente, apresentam-se duas estruturas hidrodinâmicas (fig. 2.2): o (sistema) *Vórtice Ferradura*, o qual se forma a montante do cilindro, junto à base; e a *Esteira de Vórtices*, que se forma a jusante do mesmo.

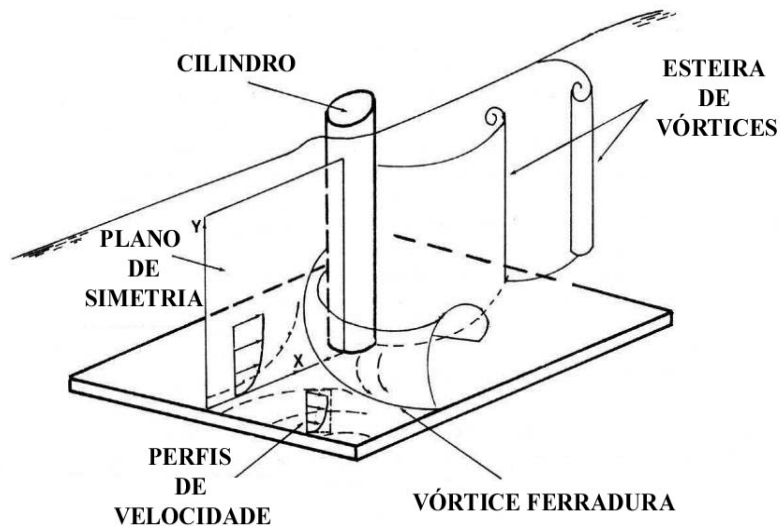


Fig. 2.2 – As regiões de escoamento próximas ao cilindro (Fonte: Dargahi, 1987).

Os vórtices da esteira (fig. 2.3) são gerados pela separação da camada limite do cilindro, contornam a superfície do cilindro e são desprendidos (“vortex shedding”) dos contornos do cilindro. Durante a formação da esteira, o escoamento que passa pelo cilindro é inicialmente acelerado e a camada limite, em um certo momento, descola-se da superfície do cilindro, como resultado da dissipação e perda de energia cinética das partículas que se movem ao longo da superfície, causado pelo gradiente adverso (Triton, 1988). Tais partículas não possuem a energia cinética necessária para mover-se dentro da região de aumento da pressão e o escoamento descola da superfície do cilindro.

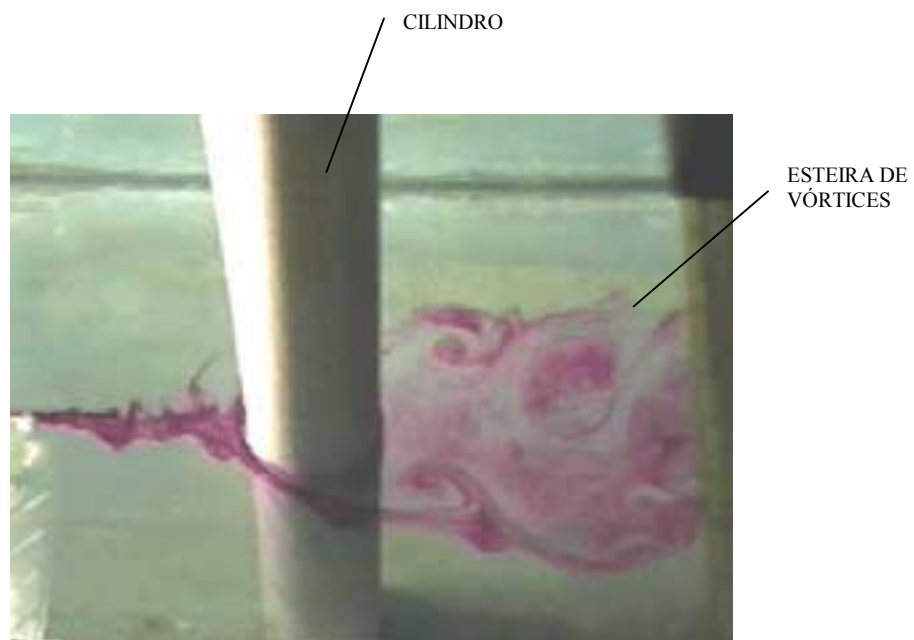


Fig. 2.3 – Visualização da Esteira do cilindro ($Re \approx 1000$).

O autor também afirma que as características da esteira variam com o número de Reynolds. Esta descrição assume a condição de escoamento bidimensional. A presença de uma placa plana em uma das extremidades do cilindro, neste caso, tem pouca influência, e acredita-se que as características do desprendimento dos vórtices e outros parâmetros do escoamento no caso bidimensional são modestamente distintos do caso tridimensional (Dargahi, 1987). Com respeito à esteira, uma grande quantidade de material tem sido gerado nas últimas décadas, e o seu comportamento complexo, em vários regimes de escoamento, tem sido, em grande parte, conhecido.

O Vórtice Ferradura, depois de estabelecido, é deformado (deflexionado) lateralmente, juntamente com o escoamento de aproximação, como um resultado da oposição do cilindro, movendo-se, então, para jusante, com seu eixo girando e assumindo a direção longitudinal. Os detalhes da formação deste vórtice serão vistos mais adiante.

O surgimento de um escoamento descendente na face de montante do cilindro acentua a formação do vórtice, aumentando sua vorticidade. Muitas vezes, o que pode ser encontrado é não um, mas um sistema de Vórtices Ferradura, compostos de várias pares de vórtices. Dentro deste sistema, a energia cinética é alta, sendo seu máximo localizado próximo ao núcleo do vórtice.

A deformação e localização do sistema, segundo Graf e Yulistiyanto (1998), podem ser dadas em função da velocidade de aproximação, podendo ser relacionada ao número de Reynolds do escoamento. O sistema parece ser mais intenso e mais próximo à base do cilindro, quanto maior esta velocidade. Segundo o autor, pode-se imaginar que, no processo erosivo, a circulação promove a erosão, enquanto o vórtice transporta os sedimentos.

Os campos de velocidade e pressão ao redor do cilindro

O escoamento ao redor do cilindro apresenta comportamentos distintos a baixos e a altos números de Reynolds. A baixíssimos valores de Reynolds ($Re \ll 1$), as forças viscosas são predominantes sobre as de inércia, o escoamento é permanente, apresentando características simétricas entre os campos de escoamento de montante e jusante. Portanto, as linhas de corrente e os campos de velocidade e pressão de jusante, são uma imagem dos de montante. Porém, assim que o número de Reynolds aumenta ($Re \approx 4$), o escoamento se

modifica e esta simetria desaparece. Como resultado desta assimetria, surge uma região de recirculação e, em seu interior, vórtices unidos ao cilindro. As linhas de corrente para ambas situações podem ser vistas na figura 2.4. Então, para valores de $Re > 40$, o escoamento torna-se não-permanente e para valores de $Re > 100$, passa a haver desprendimento periódico de vórtices da superfície do cilindro, gerando a Esteira.

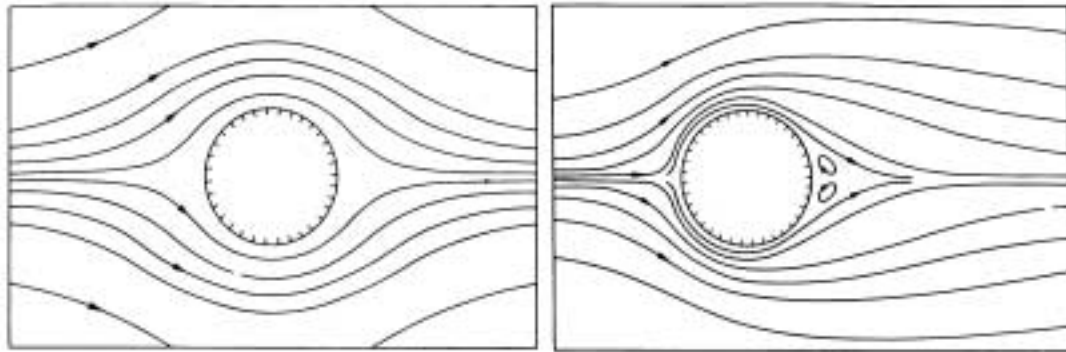


Fig. 2.4 – As linhas de corrente para $Re > 40$ e $Re > 100$, respectivamente.

(Fonte: Triton, 1988).

Porém, em $Re \cong 3 \times 10^5$, uma importante mudança ocorre (Triton, 1988): a camada limite do escoamento ao redor do cilindro que, até então era laminar, passa a sofrer transição para turbulento e, em $Re \cong 3 \times 10^6$, a própria esteira torna-se turbulenta.

Os experimentos conduzidos por Graf e Yulistiyanto (1998) *et. al* demonstram, ao redor do cilindro, a existência de distribuições de velocidade, altamente tridimensionais, mais organizadas a montante e menos a jusante do cilindro, onde ocorre o desprendimento dos vórtices da esteira. Segundo o autor, a tridimensionalidade também está presente nas intensidades da turbulência, que tornam-se mais significativas na zona da esteira, atrás do cilindro.

Para Graf (1998), a energia cinética turbulenta é menor a montante do que a jusante do cilindro. Dargahi (1989) encontrou que, na região de montante, a intensidade de turbulência aumenta consideravelmente na região próxima à separação do escoamento, a montante do cilindro. Para este autor, a autocorrelação e os espectros de velocidade revelam uma natureza periódica do escoamento dentro desta região.

Um exemplo de distribuições de pressão, teóricas (solução para escoamento não-viscoso) e experimentais (medidas para números de Reynolds $\approx 1,9 \times 10^5$) - linhas tracejada e

contínua, respectivamente - ao redor da superfície de um cilindro, pode ser visualizado na figura 2.5. Pode-se notar que a região a jusante do cilindro (neste exemplo, $\theta > 130^\circ$) apresenta pressões muito inferiores às indicadas pela teoria do escoamento potencial, isto devido à separação da camada limite, cujas causas serão discutidas mais tarde.

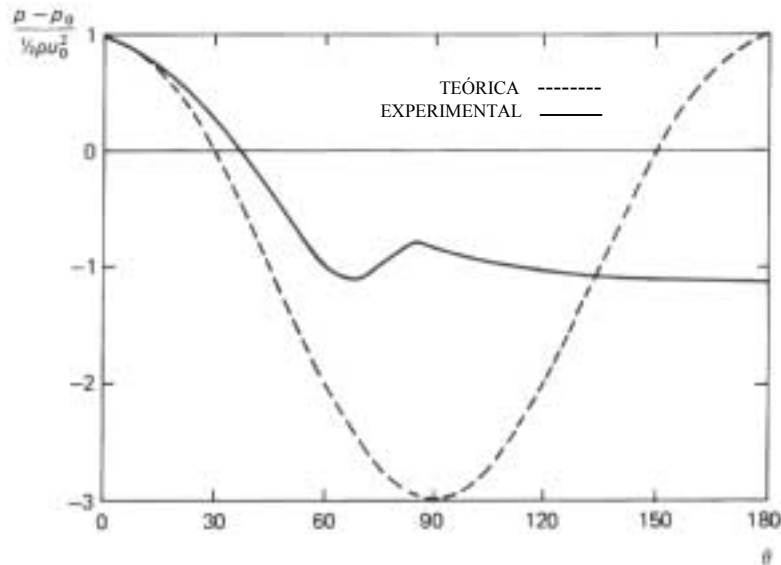


Fig. 2.5 — Distribuição de Pressão ao redor do cilindro (Fonte: Triton, 1988, p. 149).

Resultados obtidos por Dargahi (1987) também apresentam, para a região de separação, a montante do cilindro, valores de pressão que se desviam consideravelmente daqueles previstos pela teoria do escoamento potencial. No trabalho, o autor afirma que a distribuição de pressões, próxima à superfície do mesmo, concorda com a Teoria Potencial, havendo divergência, porém, quando nos afastamos da mesma.

A diferença entre as pressões na face de jusante e aquelas existentes na face de montante produz uma força sobre o cilindro, exercida pelo fluido em movimento sobre o mesmo, chamada de *Força de Arrasto*. Esta força é resultado direto da diminuição da quantidade de movimento transportado pelo escoamento, devido à presença do obstáculo, o que depende da pressão e do cisalhamento na parede do cilindro. O arrasto é mais comumente apresentado como uma quantidade adimensional, o *Coefficiente de Resistência* C_D .

A figura 2.6 apresenta valores de C_D em função do número de Reynolds. Nela, podemos notar que para uma ampla faixa de valores de Reynolds, o coeficiente de resistência varia pouco. Contudo, ao valor do número de Reynolds aproximar-se de $3,0 \times 10^5$, uma mudança radical acontece, com o coeficiente de resistência diminuindo abruptamente (aproximadamente num fator 3). Este número de Reynolds corresponde à transição do

escoamento da camada limite de laminar para turbulento, sendo afetado pela rugosidade da superfície e pela turbulência do escoamento.

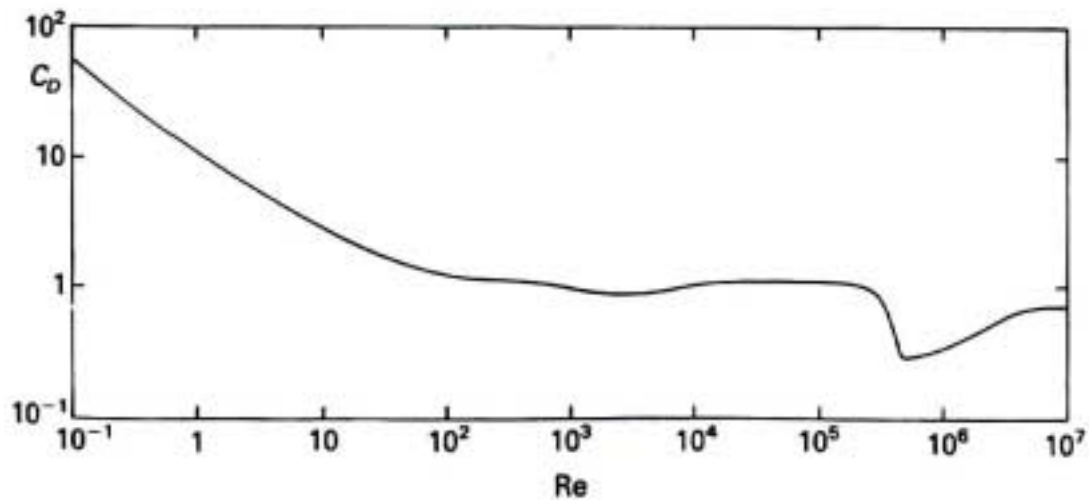


Fig. 2.6 – Valores do Coeficiente de Resistência para o cilindro, em função do número de Reynolds (Fonte: Triton, 1988).

A Camada Limite Tridimensional

O caso tridimensional apresenta características significativamente mais complexas que o caso bidimensional. Segundo White (1991), o avanço técnico sobre o estudo de camadas limites tridimensionais e turbulentas têm sido menor, nesta área, devido à ausência de dados detalhados sobre o assunto.

O escoamento ao redor de um cilindro, preso a um fundo plano está relacionado a fenômenos de *separação* e *descolamento*. Apesar da terminologia clássica utilizar, indistintamente, ambos os termos para o mesmo fenômeno, neste estudo eles correspondem, respectivamente, à separação do escoamento da camada limite do leito do canal, quando ao aproximar-se do cilindro; e da camada limite do cilindro propriamente dito, a jusante do mesmo, durante o processo de desprendimento de vórtices.

A separação tridimensional do escoamento, quando ocorre, é um complexo problema topológico (Dargahi, 1987) e existe, atualmente, pesquisa ativa na área de topologia matemática onde a mesma ocorre.

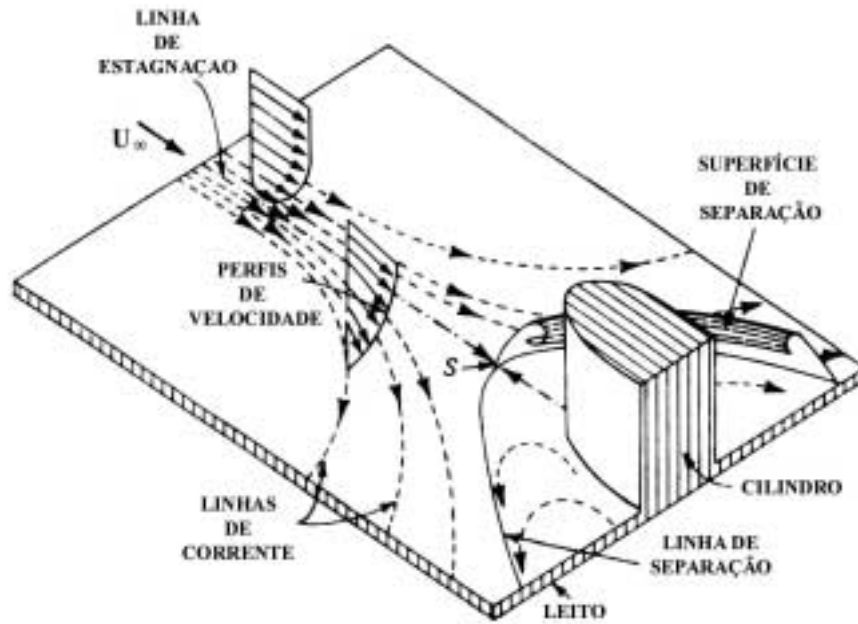


Fig. 2.7 – Separação tridimensional do escoamento (Fonte: Schlichting, 1979).

White (1991) também descreve a representação clássica na qual, o gradiente de pressão adverso provocado pelo obstáculo, em associação com os gradientes de pressão transversais, gerados pela curvatura do perfil deficitário de velocidades do escoamento externo ao redor do cilindro, impõem uma separação tridimensional do escoamento que, no plano, acontece ao longo de uma *linha de separação* (fig. 2.7). A distância entre cada ponto da linha de separação e a parede do cilindro torna-se maior a medida que o escoamento passa pelo cilindro, formando uma curva parabólica ao redor do cilindro.

As linhas de separação acabam por formar, em três dimensões, uma *superfície de separação*. No plano vertical, uma parcela do escoamento, ao longo da linha de estagnação, é forçada a descer pela face frontal do cilindro, dentro da região delimitada pela superfície de separação.

Como afirmado anteriormente, o fenômeno de descolamento está relacionado com a presença da esteira. A localização do ponto onde ocorre este descolamento depende: do número de Reynolds, da rugosidade da superfície do cilindro e da intensidade de turbulência a montante do cilindro.

Tanto camadas limites laminares como turbulentas podem sofrer descolamento da superfície do cilindro. Segundo Tritton (1988), é necessária uma região relativamente pequena

de gradiente adverso para produzir o descolamento de camadas laminares, enquanto que, em camadas limites turbulentas, são necessárias regiões ainda menores. O escoamento a jusante do descolamento normalmente sofre recirculação e, novamente segundo Tritton (1988), alterações importantes no escoamento começam e são notáveis a partir de, aproximadamente, número de Reynolds do cilindro igual a 4, com o surgimento de dois vórtices unidos ao cilindro.

A ocorrência de recirculação, dentro da região de separação, acaba por tornar as medições de velocidade difíceis de serem efetuadas, e tem dificultado a aplicação de métodos teóricos, experimentais ou numéricos. Neste contexto, a técnica de visualização tem proporcionado uma forma alternativa de investigar o problema qualitativamente.

2.1.3 O Vórtice Ferradura

Formação

O (Sistema) Vórtice Ferradura forma-se na linha de estagnação do cilindro, no plano de simetria, devido à rotação horizontal do escoamento de aproximação (fig. 2.8).

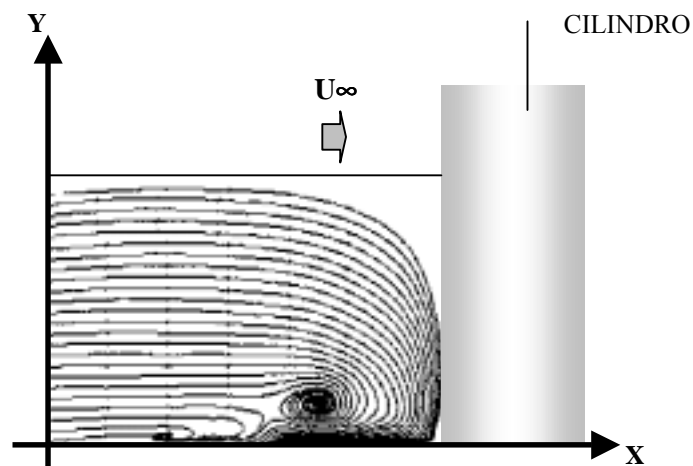


Fig. 2.8 – Rotação do escoamento no plano de simetria.

Após a separação do escoamento, parte do escoamento de aproximação, começa a galgar esta região de separação. Produz-se, também, uma concentração de vorticidade dentro da camada limite, que, por sua vez começa a girar. Então, dentro desta camada de separação, na face frontal do cilindro, o vórtice formado, desenvolve-se lateralmente sofrendo deformação (deflexionamento) e estiramento ao redor do cilindro, adquirindo o formato

tridimensional de uma ferradura (fig. 2.9). Ainda, existe grande dificuldade em compreender a interação entre inércia, pressão e as forças viscosas que atuam neste contexto.

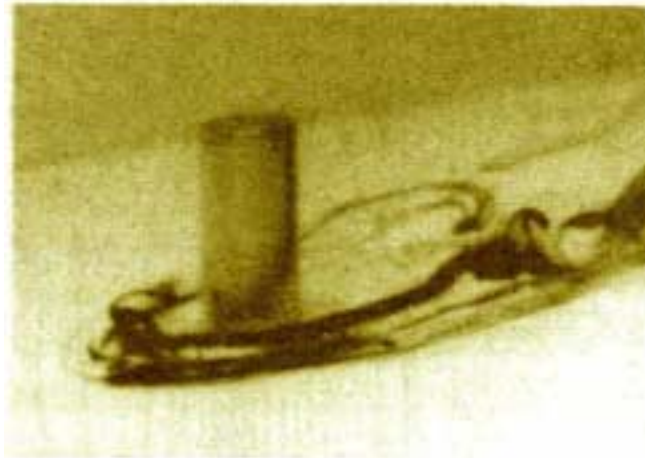


Fig. 2.9 – O Formato tridimensional do Vórtice (Fonte: Okamoto e Sunabashiri, 1992).

Comportamento Hidrodinâmico

Segundo Doligalski (1994), o comportamento do Vórtice pode ser descrito em muitos regimes de escoamento e, muito freqüentemente, em termos do número de Reynolds associado a um comprimento característico do obstáculo ou da camada limite de aproximação.

No passado, o Vórtice foi bastante pesquisado (Baker 1991, Dargahi, 1987 e 1989, Sumer 1997), e várias técnicas de visualização, tais como injeção de fumaça em túnel de vento e geração de bolhas de hidrogênio em água, foram utilizadas no estudo do Vórtice Ferradura. Além disso, muitas medições de pressão e velocidade, sob o Vórtice, também foram realizadas.

No estudo realizado por Baker (1991), a distribuição do esforço de cisalhamento, na região abaixo ao Vórtice, foi calculada a partir dos perfis de velocidade medidos. Este estudo mostrou que, naquela região, o esforço de cisalhamento pode ser aumentado por um fator de 7 a 11 vezes com relação ao valor do esforço, sem a presença do cilindro, salientando a sua importância no processo erosivo em torno de pilares, por exemplo.

Dargahi (1987) sugere que o diâmetro do vórtice é independente do número de Reynolds, estando relacionado apenas ao diâmetro do cilindro. Okamoto e Sunabashiri (1992)

afirmam que o tamanho relativo do Vórtice Ferradura diminui como o aumento do comprimento do cilindro.

As pesquisas computacionais e experimentais (Dargahi 1987), algumas descrevendo interações de vórtices com superfícies têm mostrado que, na região do leito do canal localizada próxima do Vórtice Ferradura, origina-se uma zona de concentração de vorticidade de sinal oposto ao Vórtice, na forma de um vórtice secundário (fig. 2.10). Também, em certos casos acontece de, após a formação do vórtice secundário, formar-se um terceiro vórtice, de mesmo sinal de vorticidade do primeiro.

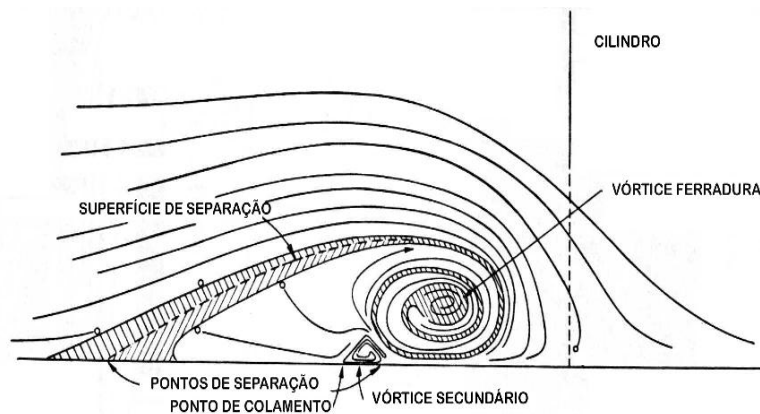


Fig. 2.10 – O vórtice secundário.

O autor confirma a existência, para alguns o número de Reynolds, de não um, mas vários vórtices adjacentes. Assim, em muitos casos, desenvolvem-se sistemas com vários vórtices, algumas vezes, mas não necessariamente aos pares, com sinais de vorticidade alternados. Segundo o autor, o seu número cresce com o aumento do número de Reynolds da Placa. Este padrão foi encontrado, também, em simulações numéricas (apud Visbal, 1991). Dargahi (1987) constatou, experimentalmente, a presença de até 9 vórtices e, segundo o autor, estes vórtices podem coexistir (fig. 2.11).

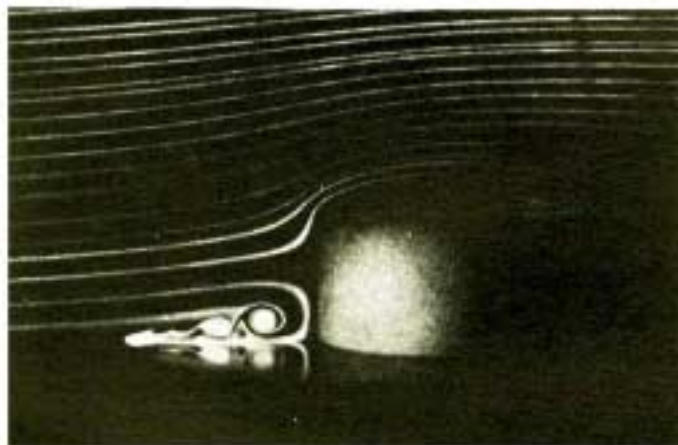


Fig. 2.11 – O Sistema de Vórtice Ferradura (Fonte: Schlichting, 1979, p. 259).

Também, segundo Dargahi (1989), em experimentos com escoamento laminar, o número de vórtices aumenta com o número de Reynolds. Segundo o autor, para baixos valores do número de Reynolds, os vórtices secundários são laminares e geralmente estáveis. Porém, assim que o número de Reynolds da Placa ultrapassa um valor crítico, este modelo torna-se não-permanente.

Agui e Andreopoulos (1992), encontraram em seus experimentos a presença constante do vórtice primário, o qual, segundo os autores, induz erupções de fluido do leito que, freqüentemente, resultam na formação de um vórtice secundário. Os experimentos também indicaram variação espacial da posição do vórtice, da ordem da espessura da camada limite, estando tais movimentos associados à chegada de grandes estruturas provenientes da camada limite do escoamento de aproximação. Também, os autores afirmam que, a baixos números de Reynolds, o vórtice encontra-se relativamente mais próximo do cilindro do que em altos Reynolds.

Dargahi (1987), em experimentos em ar, afirma que seus resultados não indicam a existência de uma frequência dominante de desprendimento do Vórtice, com o sistema apresentando um comportamento aproximadamente periódico. O autor sugere, ainda, que o desprendimento do Vórtice Ferradura tem fraca influência no desprendimento de vórtices da esteira. Doligalski (1994), além de concordar com a quase periodicidade do vórtice descreve indicações de que o Vórtice Ferradura, acima de um certo valor crítico de Reynolds, comporta-se de forma não-permanente.

Um aspecto interessante de seu comportamento é o fato do vórtice, ao redor do cilindro, oscilar periódica e transversalmente ao plano de simetria (fig. 2.12). Isto acontece quando as partículas de fluido, ao deslocarem-se para jusante, experimentam um gradiente transversal de pressão adversa.

Doligalski (1994), descreve interações entre o vórtice primário e o secundário, no qual este último é comprimido e posteriormente ejetado por aquele, causando uma subsequente interação do vórtice ejetado com o vórtice primário e o escoamento desenvolvido, gerando um comportamento tridimensional complexo, que é especulado como sendo responsável, em parte, pelo movimento quase periódico do vórtice.

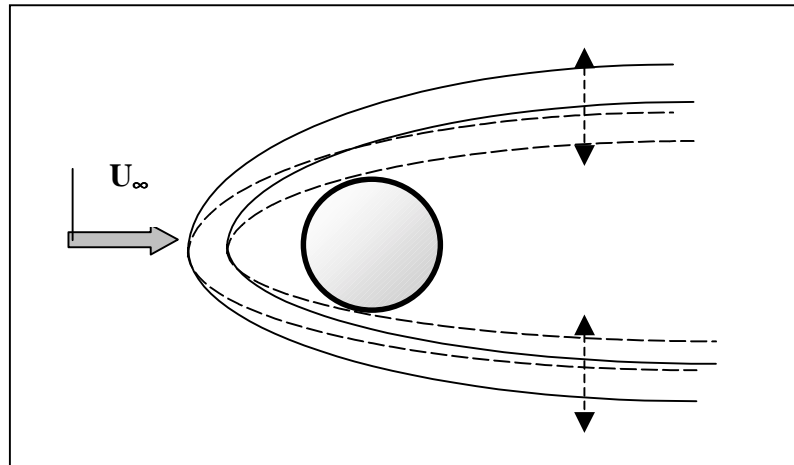


Fig. 2.12 – Movimentos Transversais.

Interações do Vórtice com superfícies

Doligalski (1994) afirma que resultados de ensaios de visualização têm sugerido que muito da física do comportamento do Vórtice Ferradura está relacionada, intimamente, a fenômenos de forte interação superficial. Os detalhes sobre estas interações, induzidas pelo vórtice, somente na última década foram examinados.



Fig. 2.13 – Erupções de Fluido (Fonte: Doligalski, 1994).

Interações superficiais entre o Vórtice e o leito do canal ocorrem quando o Vórtice, logo após formar-se a montante do cilindro é, então, transportado para jusante. Neste momento, suas “pernas” (extensões longitudinais) produzem perturbações do escoamento

próximo ao leito. O aparecimento de tais perturbações está restrito a pequenas regiões na vizinhança do vórtice e acabam por provocar focos (“spots”) de erupção de fluido (fig. 2.13), as quais ejetam-se do leito para dentro do escoamento de aproximação.

Assim que estes “spots” penetram no escoamento externo de alta velocidade, começam a girar, interagindo com as pernas do vórtice e sofrendo espalhamento e dispersão. As perturbações adquirem vorticidade oposta ao vórtice, e acabam cancelando-se com o vórtice, reduzindo, constantemente, o vigor do mesmo.

Este tipo de fenômeno é regenerativo no sentido que, com certa periodicidade, as espirais são ejetadas das superfícies para a formação de novos vórtices. A natureza dessas interações Vórtice / superfície é pouco conhecida, devido ao fato de, assim como o próprio vórtice, envolve complexas topologias de escoamento tridimensional.

Além disso, com as ejeções acontecendo dentro de sistemas de referência móveis e instantâneos, a pesquisa experimental e computacional em relação a estes fenômenos é extremamente desafiadora. As técnicas experimentais convencionais, as quais são conduzidas em pontos fixos no espaço, são efetivamente pouco eficazes no sentido de detectar tais fenômenos. Progresso pode ser encontrado utilizando-se técnicas de visualização e PIV (Particle Image Velocimetry).

A partir de relativamente altos números de Reynolds acontecem, então, instabilidades que ocasionam o surgimento de “ondulações” ou “enrolamentos” nas plumas de fluido. Estes “enrolamentos”, movem-se dentro de um mesmo sistema de referência e acompanham movimentos secundários do Vórtice, como deslocamentos transversais. Devido ao cisalhamento superficial, as ondulações são acentuadas, causando distorção em algumas regiões do laço e gerando pontos de contato do mesmo com a superfície do leito, acentuando ainda mais a interação superficial.

Em números de Reynolds ainda mais elevados, a camada limite do escoamento de aproximação torna-se completamente turbulenta, o que modifica o processo de formação do vórtice significativamente, resultando no desenvolvimento do sistema em um vórtice único, o qual é maior e de comportamento mais caótico que os seus correspondentes laminares.

Modernos estudos teóricos têm identificado as causas geradoras destes eventos e seu mecanismo de formação. Porém, devido a desenvolverem-se abruptamente e em escalas espaciais muito pequenas, é muito difícil descrever experimentalmente com precisão, o surgimento do processo (Doligalski, 1994).

2.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

2.2.1 Função Amostral ou Registro Amostral

Denomina-se *Função ou Registro Amostral*, ao registro histórico de um evento ou fenômeno, feito durante um intervalo finito de tempo. O conjunto de todos os registros possíveis constitui um *Processo*. Aqueles fenômenos físicos que já são capazes de ser representados através de uma relação matemática explícita, com relativa precisão, atribuímos a categoria de *Determinísticos*.

Contudo, existem muitos outros fenômenos físicos cujo comportamento, ainda não foi possível descrever através de leis matemáticas explícitas e, portanto, ainda não existe forma de prever valores exatos, em um determinado instante de tempo. Estes fenômenos, ditos *Estocásticos*, por sua natureza aleatória, devem ser descritos através da Análise Estatística.

Neste contexto, Lesieur (1997) afirma que o estudo matemático de escoamentos de fluido parte de teorias analíticas ou de modelos estocásticos. As teorias analíticas referem-se ao equacionamento de propriedades que, são médias espaciais de volumes de controle. Contudo, a altos números de Reynolds, devido a termos não-lineares, as equações passam a apresentar erros de previsão e aleatoriedade, apontando para o emprego de modelos estocásticos. Assim, quando estamos analisando o escoamento externo ou o comportamento assumido pela camada limite, em muitas situações podemos, via de regra, fazer emprego de equações determinísticas. Porém, quando tratamos de escoamento no caso de camadas limites tridimensionais, ou escoamentos turbulentos que, ainda, não possuem solução analítica, empregam-se cálculos estatísticos. Este trabalho, em seus diversos aspectos, apresenta ambas categorias de fenômenos. A seguir, portanto, apresentamos ambas abordagens.

2.2.2 Equações Determinísticas

Os modelos matemáticos determinísticos de dinâmica dos fluidos, em geral, partem do desdobramento de equações básicas de movimento, mas, também podem ser provenientes da Análise Dimensional. No entanto, muitas vezes, sua determinação é feita em caráter empírico, para situações bem particulares.

As equações básicas provêm de propriedades do fluido, de leis físicas de conservação (massa, quantidade de movimento e energia), ou de equações de estado: a Equação da Continuidade, da Conservação da Quantidade de Movimento (linear e angular) e de Conservação de Energia. Estas equações podem apresentar-se na forma integral ou diferencial e, em geral, seu sistema de referência está em repouso e é centrado sobre o eixo do cilindro (descrição Euleriana).

Da conservação de quantidade de movimento, surgem as equações de Navier-Stokes, que descrevem o movimento de fluidos newtonianos viscosos:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla \vec{P} + \nabla \tau_{ij} \quad (1)$$

O lado esquerdo da equação representa a variação da quantidade de movimento do fluido no tempo, enquanto o lado direito, representa a soma de esforços por unidade de volume agindo nas partículas de fluido, referindo-se os termos, respectivamente, ao campo gravitacional, às forças de pressão e às tensões viscosas. Os dois últimos termos estão relacionados ao campo de velocidades, sendo o último, o Tensor das Tensões, o termo não-linear. Este termo é de grande importância, pela dificuldade matemática de resolução desta equação justamente pelo fato de tratar-se de uma equação diferencial não-linear.

É importante salientar que o gradiente de pressão na face de estagnação, a montante do cilindro, depende principalmente dos termos convectivos e difusivos na equação do movimento, sendo preponderante o termo convectivo. Assim, a distribuição de velocidades de montante é o principal fator afetando o gradiente de pressão na face de montante do cilindro. Espera-se que este gradiente seja independente do diâmetro do cilindro.

Os problemas referentes a escoamentos bidimensionais são, frequentemente, descritos através do escoamento potencial, com somente uma coordenada espacial, cada uma das duas componentes de velocidade dependendo de duas coordenadas espaciais que, por sua vez, são relacionadas. Já no caso da camada limite tridimensional, o escoamento potencial externo depende de duas coordenadas espaciais, ambas em superfícies de paredes, enquanto que o escoamento dentro da camada limite, possui as três componentes de velocidade, as quais

dependem das três coordenadas de espaço. Muitas das camadas limites tridimensionais são tão complexas que permanecerão, durante muito tempo, inacessíveis ao tratamento matemático.

Nenhum método analítico permite solução geral para problemas arbitrários de escoamento (White, 1991). Até agora, não foi encontrada nenhuma solução analítica para o tipo mais simples de escoamento tridimensional. A maior parte dos métodos disponíveis são baseados em hipóteses simplificativas que não refletem as características físicas reais do escoamento (Dargahi, 1987). Contudo, os resultados obtidos podem ser utilizados para delinear, em linhas gerais, alguns aspectos físicos.

Schlichting (1979), apresenta uma descrição de solução exata para as equações de movimento da camada limite bidimensional, encontrada por Hiemenz e, posteriormente desenvolvida por outros autores. Na resolução, a velocidade do escoamento potencial é assumida como tendo a forma de séries de potência (Séries de Blasius) em x , onde x é a distância do ponto de estagnação, na face de montante do cilindro, ao longo do contorno do mesmo (vide figura 2.14).

O perfil de velocidades, dentro da camada limite também é representado por uma série semelhante de potências de x , onde os coeficientes desta série de potências de x são funções da coordenada y . Assim, para uma dada geometria, os coeficientes são representados na forma de tabelas, para um grande número de termos das séries.

Para o caso específico do cilindro circular, onde a distribuição de velocidades para o escoamento irrotacional, não-viscoso, é dada por:

$$U(x) = 2U_{\infty} \operatorname{sen}\left(\frac{x}{R}\right) \quad (2)$$

onde:

$U(x)$ = campo de velocidades
 U_{∞} = velocidade de aproximação
 R = raio do cilindro

Encontramos, após a expansão em séries:

$$U(x) = U_1x + U_3x^3 + U_5x^5 + \dots = 2\frac{U_{\infty}}{R}x - \frac{2}{3!}\frac{U_{\infty}}{R^3}x^3 + \frac{2}{5!}\frac{U_{\infty}}{R^5}x^5 + \dots$$

onde:

U_1, U_2 e U_3 , são coeficientes dependentes do formato do corpo.

A equação da continuidade é satisfeita com a introdução da função corrente $\psi(x,y)$, também assumida como uma série de potências de x , com coeficientes sendo funções de y , tornando independentes os coeficientes U_1, U_3, U_5 , etc. Introduzindo a distância à parede, na forma adimensional η , dada pela expressão:

$$\eta = y \sqrt{\frac{U}{\nu}} = \frac{y}{R} \sqrt{\frac{2U_{\infty}R}{\nu}} \quad (3)$$

onde ν é a viscosidade cinemática e U , novamente o campo de velocidades.

Então, encontramos:

$$\psi = \sqrt{\frac{\nu}{U_1}} [U_1 x f_1(\eta) + 4U_3 x^3 f_3(\eta) + 6U_5 x^5 f_5(\eta)] \quad (4)$$

A equação resultante é a função corrente empregada na determinação das componentes de velocidade $u = \partial\psi/\partial y$ e $v = -\partial\psi/\partial x$. Substituindo estas expressões nas equações de movimento, obtém-se um sistema de equações diferenciais ordinárias para f_1, f_3, f_5 , etc, de 3ª ordem.

Estas equações, juntamente com as condições limites associadas, permitem a obtenção da distribuição de velocidades na camada limite, para diversos valores de x/R , que são graficados na figura 2.14, tendo sido obtidas através de séries até a 11ª potência. Desta solução também é obtida a distribuição do esforço de cisalhamento $\tau = \mu (\partial u / \partial y)$, a qual para a condição de tensão de cisalhamento superficial ($\tau_0 = 0$). Corresponde ao ponto de descolamento da camada limite da superfície do cilindro a posição:

$$\frac{x}{R} = 108,8^\circ$$

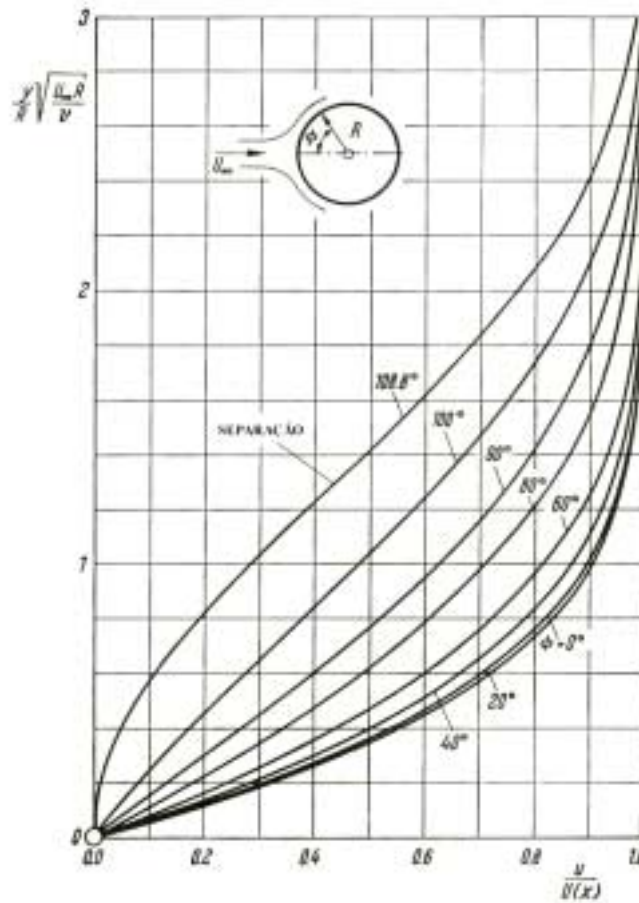


Fig. 2.14 – Distribuição de velocidades, dentro da camada limite, ao redor do cilindro (Schlichting, 1979).

Apesar da importância destes resultados, a utilidade da solução de Hiemenz era limitada devido a que cilindros esbeltos requerem grande número de termos, para a expansão em série. Porém, atualmente, com a potência dos atuais computadores, isto já foi superado.

Os métodos numéricos nos permitem resolver muitos problemas sem solução analítica formal, tendo adquirido importância depois do enorme desenvolvimento que tiveram os computadores pessoais nas últimas décadas. Em geral, os cálculos feitos para escoamentos laminares obtêm bons resultados.

Robinson (1991) e Lesieur (1997), apresentam dois tipos de abordagens que têm sido empregadas na investigação de estruturas turbulentas: a *Simulação de Grandes Escalas* e a *Simulação Numérica Direta*. Na *Simulação de Grande Turbilhões* (LES – Large-Eddy Simulation), as menores escalas do escoamento são modeladas, enquanto que os turbilhões maiores são calculados diretamente das equações tridimensionais de Navier-Stokes. Esta técnica parte do pressuposto de que as pequenas escalas são aproximadamente “universais” enquanto que as escalas maiores são fortemente dependentes de geometrias e parâmetros do

escoamento. Já em relação à Simulação Direta (DNS - Direct Numeric Simulation), todas as escalas são calculadas das equações de escoamento, no sentido de aprimorar a simulação, tendo como consequência o aumento da exigência computacional. O autor relata que, na investigação quantitativa, a técnica DNS tem mostrado melhores resultados.

Simulações para escoamento ao redor de cilindros são realizadas, geralmente, para altos números de Reynolds. Atualmente, as simulações numéricas chegam até nos números de Reynolds 800, com DNS (Lesieur, 1997). Contudo, algumas simulações detêm-se em Reynolds próximos a 40 (Tritton, 1988), procurando estudar a transição para regime não-permanente.

Em relação à pesquisa teórica, específica sobre o Vórtice Ferradura, muitas simulações numéricas têm sido realizadas nos últimos anos, e alguns autores (Doligalski, 1994) têm apontado a necessidade de mudanças na abordagem do problema e a adoção de inovações nos procedimentos numéricos (em alguns casos, adotando formulação Lagrangiana), de forma a explicar efetivamente alguns aspectos do fenômeno.

Também, nos últimos anos tem havido tentativas de calcular as interações superficiais induzidas por vórtices, através de soluções numéricas, com a solução completa das equações de Navier-Stokes. Estas simulações têm sido realizadas à faixas moderadas de números de Reynolds, tornando-se progressivamente mais difícil e caro de trabalhá-las, à medida que o número de Reynolds aumenta.

2.2.3 Análise Dimensional do Escoamento ao Redor do Cilindro Circular

No processo de *Análise Dimensional*, após a etapa de identificação do problema e reconhecimento das variáveis físicas descritas pela literatura como relevantes ao estudo do Vórtice, o passo seguinte é o cálculo dos grupos adimensionais através do Teorema dos π .

Os grupos adimensionais encontrados são úteis na definição da sistemática experimental. Para tal, algumas das relações encontradas são tornadas fixas, enquanto outras são assumidas como variáveis. A modelagem física pode sofrer um erro contido nas previsões do modelo, por não ser possível semelhança simultânea para todos os tipos de força. Para o estudo, a relação resultante da análise dimensional é:

$$f(X/D, \rho U D / \mu, P / \rho U^2, H/D, D/tU, \delta/D, \tau / \rho U^2, U / (Dg)^{1/2}, b/D, k/D, X/Y, Y/D, Y/b, \delta/Y) = 0 \quad (5)$$

onde suas variáveis e dimensões são:

<i>Posição longitudinal</i>	$X : [L]$	<i>Profundidade</i>	$H : [L]$
<i>Posição transversal</i>	$Y : [L]$	<i>Tempo</i>	$t : [T]$
<i>Velocidade externa</i>	$U : [L / T]$	<i>Espessura da Camada Limite</i>	$\delta : [L]$
<i>Massa Específica</i>	$\rho : [M / L^3]$	<i>Tensão de Cisalhamento</i>	$\tau : [M / LT]$
<i>Viscosidade dinâmica</i>	$\mu : [M / LT]$	<i>Aceleração da gravidade</i>	$g : [L / T^2]$
<i>Diâmetro</i>	$D : [L]$	<i>Largura do escoamento</i>	$b : [L]$
<i>Pressão</i>	$P : [M / LT^2]$	<i>Rugosidade superficial</i>	$k : [L]$

A equação 2.1, após a identificação dos números adimensionais clássicos da literatura fica:

$$f(X/D, Re, Eu, H/D, St, \delta/D, C_D, Fr, b/D, k/D, X/Y, Y/D, Y/b, \delta/Y) = 0 \quad (6)$$

onde, por exemplo:

Re – número de Reynolds,

Eu - número de Euler,

St - número de Strouhal,

Fr - número de Froude

onde surgem parâmetros que podem ser relacionados à geometria do escoamento, ao comportamento do escoamento externo e ao comportamento referente aos vórtices despreendidos do cilindro.

Os parâmetros ditos geométricos (X/D , Y/D , δ/D , b/D , H/D , X/Y , etc), em geral, surgem através de adimensionalização empregando como comprimento característico o diâmetro do pilar. Como exemplos de sua influência temos que, segundo Okamoto e Sunabashiri (1992), o tamanho relativo do vórtice se modifica com o aumento da altura do

cilindro. Segundo os autores, também, o valor do coeficiente de arraste e a região de recirculação atrás do cilindro, aumentam com o aumento da relação H/D . Os vórtices da esteira são desprendidos simetricamente para $H/D = 1$ e 2 , e tornam-se assimétricos para $H/D \approx 4$ a 7 . O parâmetro δ/H define a condição de velocidade desenvolvida ($\delta/H = 1$). Os parâmetros geométricos b/D , H/b , são influentes ao referirem-se respectivamente à efeitos de obstrução ocasionados pelo pilar e bidimensionalidade do escoamento. As dimensões transversais e longitudinais dos vórtices, não são afetadas significativamente pelos parâmetros do escoamento.

No caso dos parâmetros que descrevem as condições do escoamento externo, estes são referentes às forças intervenientes no fenômeno: o número de Froude e o número de Reynolds. Como não faz parte dos objetivos do estudo do Vórtice o estudo de fenômenos gravitacionais, em geral, a abordagem utiliza a semelhança de Reynolds, apenas garantindo semelhança de regime para o número de Froude.

Quanto aos parâmetros que descrevem o comportamento do Vórtice Ferradura, o parâmetro de maior emprego é o número de Reynolds:

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (7)$$

Diversos autores (Dargahi, 1987) afirmam que, dependendo de seu valor, o Vórtice pode assumir um comportamento permanente ou não. Apesar de o número Reynolds baseado no diâmetro do cilindro ser o mais amplamente empregado, segundo Ballio et al. o valor de Re_{δ^*} (δ^* : espessura de deslocamento da camada limite), tem-se mostrado como uma escolha mais adequada para estudos do Vórtice Ferradura, do que o número de Reynolds do cilindro. O autor afirma que, também neste caso, o número de vórtices no plano de simetria aumenta com este número de Reynolds, e diminui com o gradual aumento de Re_{δ^*} , o sistema torna-se não permanente (eventualmente oscilatório) e finalmente turbulento. A transição de sistema laminar para turbulento ocorre para $400 < Re_{\delta^*} < 1000$, e para ambos, o principal parâmetro de escala é a largura do obstáculo, exceto para a posição vertical do vórtice que se relaciona melhor com δ^* .

Porém, apesar de sua evidente importância, o número de Reynolds não é o único parâmetro relacionado com o Vórtice. Quanto às características de oscilação e frequências de

desprendimento, os vórtices costumam estar relacionados com a seguinte relação funcional adimensional:

$$St = \frac{nD}{U} \quad (8)$$

a qual é denominada *número de Strouhal*. O número de Strouhal pode variar com o número de Reynolds, como por exemplo, no caso do desprendimento da esteira (fig. 2.15).

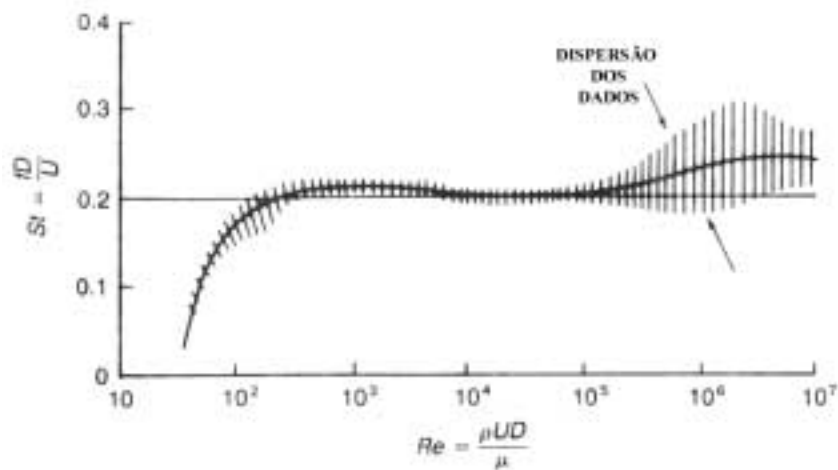


Fig. 2.15 – Número de Strouhal para o desprendimento de vórtices do cilindro, em função do número de Reynolds (Fonte: White, 1991).

Além dos parâmetros já citados, as referências de utilização na literatura apresentam: δ/D , b/D e H/b . Baker (1991) afirma que para valores moderados e altos de D/δ^* , assim que o número de Reynolds do cilindro aumenta, oscilações e instabilidades podem ser notadas no núcleo do vórtice. Em certo momento, estas oscilações tornam-se mais intensas e para valores a partir de determinado valor crítico, os vórtices tornam-se completamente turbulentos (com uma frequência adimensional de oscilação de aproximadamente 0,08). O autor afirma que, para Vórtices Ferradura laminares, o número de vórtices aumenta com o número de Reynolds e o sistema laminar é mais suscetível à influência da modificação dos parâmetros. Acredita-se que altos valores para os parâmetros geométricos possam modificar o sistema.

O parâmetro adimensional *Coefficiente de Pressão* é definido como (White 1986):

$$C_p = \frac{p_1 - p_0}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (9)$$

onde p_0 é uma pressão de referência e p_1 , uma pressão medida em um ponto qualquer, escolhido. Esta é uma importante quantidade empregada na adimensionalização de resultados de medições de pressão. Também, não menos importante é o já mencionado *Coefficiente de Resistência*, definido como (White 1986):

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 DL} \quad (10)$$

onde F_D é a Força de Arrasto sobre a superfície do cilindro. Este parâmetro está associado ao movimento relativo entre o cilindro e o fluido e, a altos números de Reynolds, ao mecanismo de formação da esteira.

2.2.4 Funções Estocásticas

Da Estatística Descritiva, conhecemos uma série de instrumentos para o tratamento de variáveis aleatórias. Desse modo, as propriedades de um conjunto de valores de um processo podem, hipoteticamente, ser descritos, através de um infinito número de momentos estatísticos de diversas ordens.

Segundo descrição de Bendat e Piersol (1986), definimos o seguinte momento estatístico:

$$\text{Valor Médio:} \quad \bar{X} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^N X_i \quad (11)$$

onde X_i representa valores da grandeza medida, N o número de valores e \bar{X} o valor médio.

É importante considerarmos que, somente valores médios não são informações suficientes para a descrição de um conjunto de dados. Por exemplo, podemos ter duas massas de dados com comportamentos bem distintos, apresentando o mesmo valor médio. Desse modo, faz-se necessário entendermos, como estes dados, por exemplo, flutuações de pressão, distribuem-se em torno da média e de que forma relacionam-se no tempo e posição.

Segundo descrição de Endres (1997), a Função Densidade de Probabilidade (f.d.p.) para a variável X , em um intervalo de tempo T , é definida como:

Função de Densidade de Probabilidade:
$$P(X) = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\Delta X} \right) \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\Delta t_{X, X+\Delta X}}{T} \right] \quad (12)$$

onde ΔX um intervalo de variação da grandeza, $\Delta t_{t, t+\tau}$ o intervalo de tempo no qual a grandeza assumiu esta variação, e τ a defasagem de tempo.

Segundo descrição de Endres (1997), as relações entre tempo e posição são dadas pela Função de Correlação e sua Transformada de Fourier, entre as variáveis X e Y:

Função de Correlação:
$$R_{XY}(\tau) = \lim_{T \rightarrow 0} \left(\frac{1}{T} \right) \sum_{i=1}^N X(t)Y(t+\tau)\Delta t \quad (13)$$

onde R_{XY} representará a correlação entre os instantes t e $t + \tau$, das grandezas X e Y. A transformada da função de autocorrelação R_{XX} , é definida como:

Transformada da Função de Autocorrelação ou
Função de Densidade Autoespectral:
$$\Phi_{XX}(f) = \int_0^T R_{XX}(\tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad (14)$$

equivalente à função de autocorrelação, porém tendo, desta vez, como domínio a frequência em vez do tempo. A função de autocorrelação é usualmente apresentada através do Coeficiente de Correlação $C_{XY}(\tau)$, obtido através da adimensionalização que utiliza o produto dos valores de RMS das duas séries.

Bendat e Piersol (1986), definem que um processo estocástico pode ser classificado como sendo *Estacionário* ou *Não-Estacionário*. Para o caso geral, onde a média e função de autocorrelação variam com o tempo, o processo é dito não-estacionário. Para a situação onde estes parâmetros não variam com o tempo, o processo é dito *Fracamente Estacionário* ou *Estacionário em Amplo Senso*. Finalmente, para a situação especial onde todos os momentos possíveis são invariantes no tempo, diz-se que o processo é *Fortemente Estacionário*, ou *Estacionário no Estrito Senso*. Em muitas aplicações práticas, a verificação de fraca estacionariedade justificará a adoção de forte estacionariedade.

Uma classe de processos estocásticos estacionários muito importante, são os processos ditos *Ergódicos*. Um processo é dito ergódico, quando a média temporal de seus valores e da função de autocorrelação não diferem quando calculados sobre diferentes amostras. Portanto, todas as propriedades podem ser determinadas através de médias temporais, a partir de uma amostra simples. Felizmente, em geral, fenômenos físicos estacionários são ergódicos, podendo, então, ser conhecidas suas características através de um simples registro amostral.

Na prática, muitos dados sofrem tratamento após subtração da média, o que equivale, em mecânica dos fluidos, a assumir a *Decomposição de Reynolds*, tratando os dados como uma combinação de uma componente estática, o valor médio, e uma componente flutuante. Assim, por exemplo, no caso da pressão:

$$p(t) = \bar{p} + p'(t) \quad (15)$$

onde $p(t)$ é o valor final da grandeza pressão no tempo t , \bar{p} a componente estática e $p'(t)$ a componente flutuante. A equação pode ser posta na seguinte forma:

$$p'(t) = p(t) - \bar{p}$$

Assim, ainda segundo Endres (1997), empregando-se a Função Densidade de Probabilidade (f.d.p.) sobre $p'(t)$ e calculando suas potências, ponderadas pela f.d.p, na forma:

$$\Psi = \int_{-\infty}^{\infty} (X')^n p(X') dX' \quad (16)$$

onde Ψ é a f.d.p modificada e n é o valor da potência.

Assim, determinam-se, através das potências, para esta função, os momentos utilizados para caracterizar a distribuição dos dados em torno da média. Para a potência dois ($n=2$) podemos determinar o segundo momento, o *Valor Quadrado Médio* de $X'(t)$. Calculando a raiz quadrada deste momento, obtemos a *Média Quadrática* ou, no caso em específico, retirada a média, o *R.M.S* (Root Mean Square):

$$R.M.S. = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i'^2 \right)^{1/2} \quad (17)$$

Com as terceira e quarta potências (terceiro e quarto momentos), adimensionalizadas pelos RMS, respectivamente, obtemos o Coeficiente de *Assimetria* e *Curtose*. O coeficiente de Assimetria permite uma avaliação da assimetria dos dados, em torno da origem e a Curtose, sua planicidade.

Por fim, seguindo a indicação dada por Endres (1997), trazemos a conhecimento a recomendação de que as relações matemáticas descritas anteriormente, não são suficientes para o fornecimento de um conjunto completo de fundamentos necessários para a promoção de investigações deste assunto, fazendo-se necessário a análise de tópicos adicionais sobre o levantamento de campos de flutuação de pressões em superfícies.

3. A INSTALAÇÃO E O TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1 O CANAL

Os experimentos foram desenvolvidos em um canal de alvenaria (fig. 3.1), existente no Laboratório de Ensino do Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS. Suas características geométricas são: comprimento 35 m, largura 0,40 m, 0,50 m de altura e declividade de 0,2 %. O limite de vazão escoada pelo canal é de, aproximadamente, 70 l/s, limite este, imposto pelas condições hidráulicas do canal. A instalação se completa com um reservatório inferior, um sistema de bombas e reservatório de nível constante, um sistema de medição de níveis, composto de pontas linimétricas, e um retorno.

A água é bombeada do reservatório para um vertedor que, por sua vez, deságua em uma câmara de tranquilização, composta de um difusor e duas colméias separadas por um envelope de brita. A vazão de entrada é controlada por uma válvula de gaveta (fig. 3.2). A partir da câmara, a água percorre longitudinalmente o canal, atravessando, em dado momento, a seção de testes localizada aproximadamente na metade de sua extensão. Após isso, a água é novamente reconduzida ao reservatório inferior, por gravidade, através do retorno. O nível do escoamento dentro do canal pode ser controlado através de uma comporta manual, instalada no final do canal.

O canal permite um escoamento com velocidades médias de até aproximadamente 2 m/s, sendo suficientes às necessidades do experimento. No estabelecimento das vazões de ensaio, empregou-se a curva-chave do vertedor do canal. A equação da curva-chave pode ser consultada no anexo A.

3.2 A SEÇÃO DE TESTES

A seção de teste (figs. 3.3 e 3.4) é composta de uma armação metálica, dimensões de 2,10 m de comprimento e 0,5 m de largura, com janelas de vidro; e um leito perfurado, onde se encontram as tomadas de pressão para os transdutores (fig. 3.5). O leito foi construído através do assentamento de argamassa de cimento sobre uma base de baquelite. A colocação da argamassa procurou respeitar as características de regularidade e rugosidade do restante do canal.

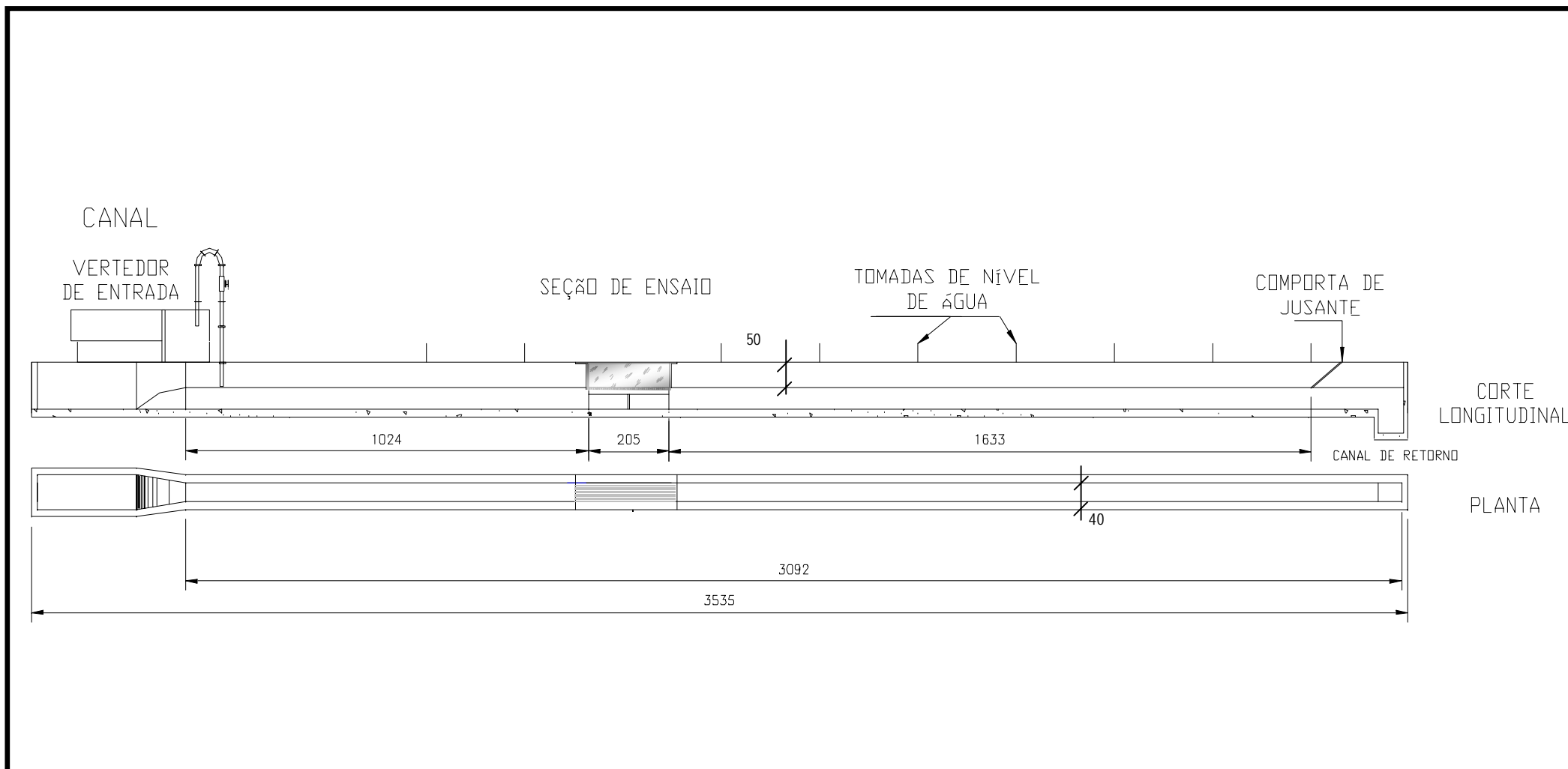


Fig. 3.1 – Representação esquemática do canal e da seção de testes (valores em cm).



Fig. 3.2 – Válvula Gaveta e Vertedor.

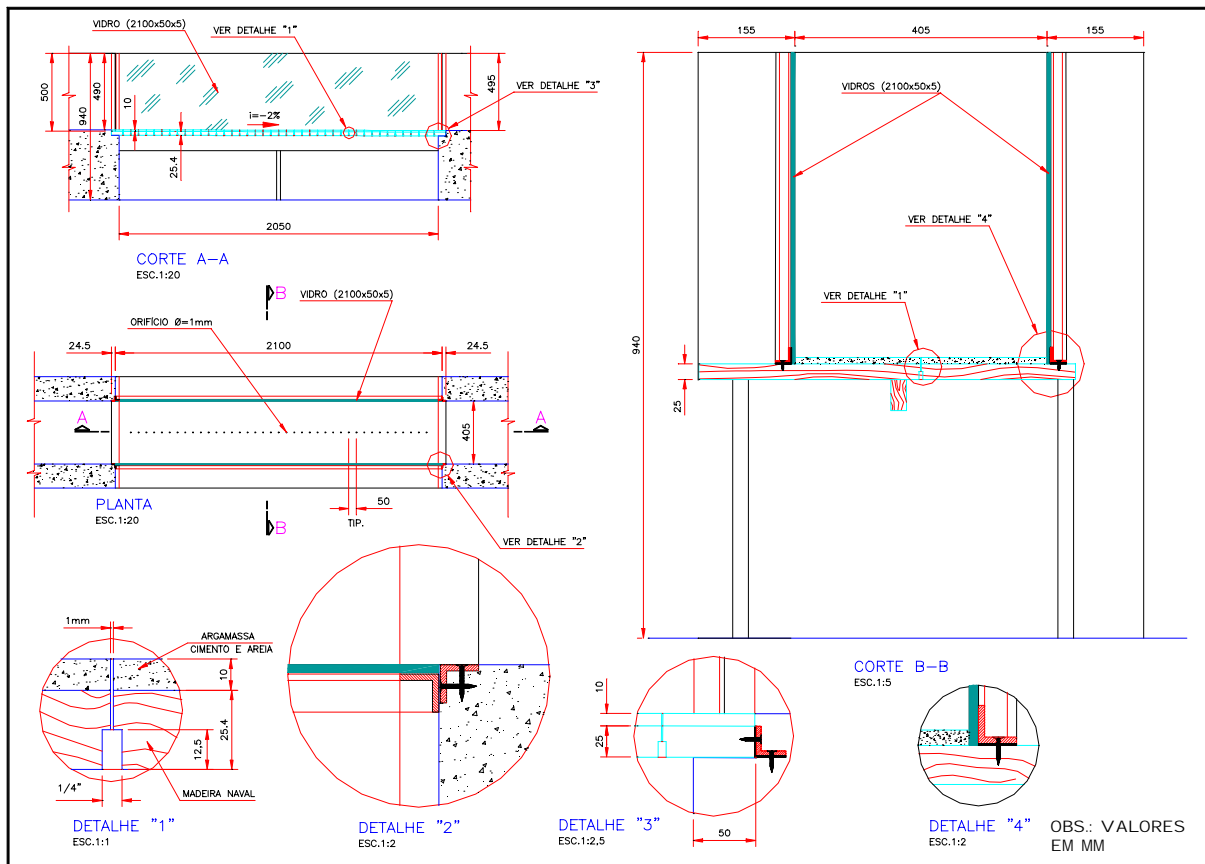


Fig. 3.3 – Detalhamento da seção de testes (sem escala).

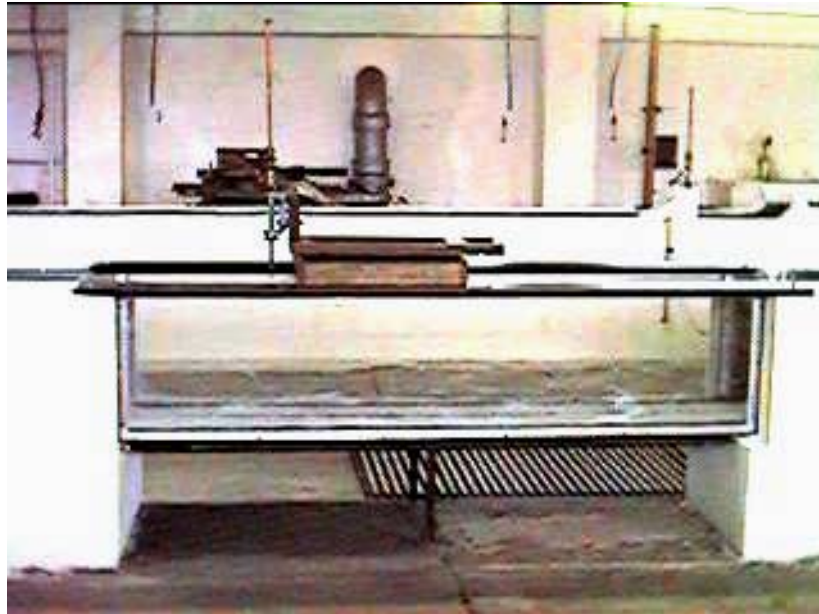


Fig. 3.4 – Seção de testes.

3.3 O CILINDRO

Desempenhando papel essencial durante todo o experimento, um cilindro circular foi montado de forma que, durante os ensaios, permitisse a injeção do corante necessário aos experimentos de visualização do escoamento. O mesmo cilindro foi empregado, também, em experimentos de medição de pressão com transdutores, que visavam proceder medições no escoamento, tanto na região próxima ao leito do canal, como na região próxima à superfície do cilindro.

Este cilindro foi adaptado a partir de um tubo de PVC DN 40 (40 mm, externo), 0,5m de altura e superfície lisa. Uma de suas extremidades foi selada com um disco de acrílico, o que impediu a entrada de água em seu interior durante os ensaios. Para as medições de pressão na superfície do cilindro, na superfície foram perfurados cinco orifícios de diâmetro nominal 1mm (figs. 3.5 e 3.6). O orifício de número 2, por sua vez, também foi empregado para injeção de corante durante os experimentos de filmagem.

O corante escolhido foi permanganato de potássio (KMnO_4) diluído em água, o qual tem largo emprego em visualizações feitas em água. A diluição de corante não foi feita a concentração constante, tendo sido aumentada gradativamente à medida que o número de Reynolds dos ensaios aumentava, o que proporcionava maior transporte, do mesmo, pelo escoamento.

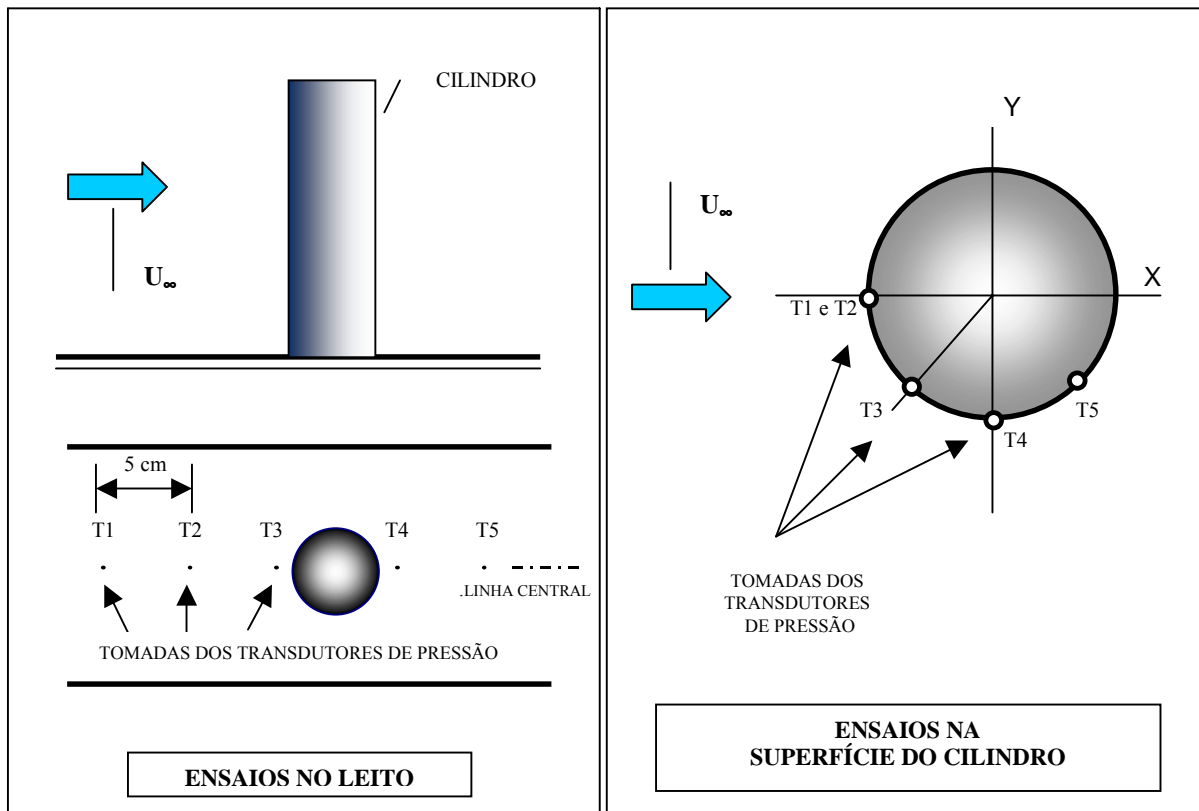


Fig. 3.5 – Diagrama do arranjo dos orifícios, no leito do canal e na superfície do cilindro.



Fig. 3.6 – Posição dos orifícios feitos na superfície do cilindro.

Nos experimentos de medição de pressão na superfície do cilindro, aos orifícios, um a um, foram fixadas mangueiras plásticas de diâmetro interno 2 mm e diâmetro externo 5 mm, totalizando cinco mangueiras. A fixação na superfície interna do cilindro foi feita através da colagem de ventosas de borracha. A função das mangueiras, nas medições de pressão sobre a superfície, era de conduzir as ondas de pressão de cada ponto da superfície do cilindro até o transdutor. Para os ensaios de medição de pressão no leito, os orifícios foram selados. Endres (1997) mostra em seu trabalho, um efeito amplificador sobre as curvas dos espectros de flutuação de pressão, tornando-as mais agudas sem contudo, alterar sua forma. Este fato restringe os resultados a análises predominantemente qualitativas.

Os orifícios foram dispostos na seguinte condição: dois orifícios alinhados verticalmente, na linha do plano de estagnação do cilindro, a 0° com a direção principal do escoamento; três orifícios alinhados horizontalmente, em planta, no sentido anti-horário, cada um, respectivamente, disposto nos ângulos de 45° , 90° e 135° , em relação à face de estagnação do cilindro. Um diagrama explicativo deste arranjo é descrito nas figuras 3.6 e 3.7.

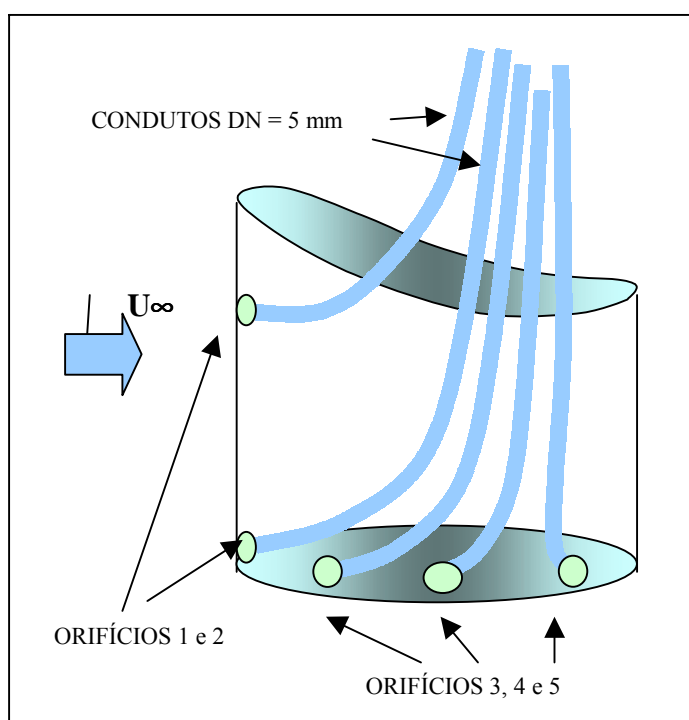


Fig. 3.7 – Disposição dos orifícios, na superfície do cilindro.

Para as medições de pressão na superfície do cilindro, os transdutores foram montados em um suporte em baquelite nivelado com nível de bolha, e posteriormente calibrados.

Também, para este tipo de ensaio, foi necessário criar uma união entre as mangueiras que partiam da superfície, e as mangueiras que eram conectadas ao transdutor, estas de diâmetro maior (DN = 1 cm). Esta união consistiu de um disco de acrílico. Uma vista geral do arranjo do cilindro, com as mangueiras conectadas aos transdutores pode ser vista na fotografia da figura 3.8.

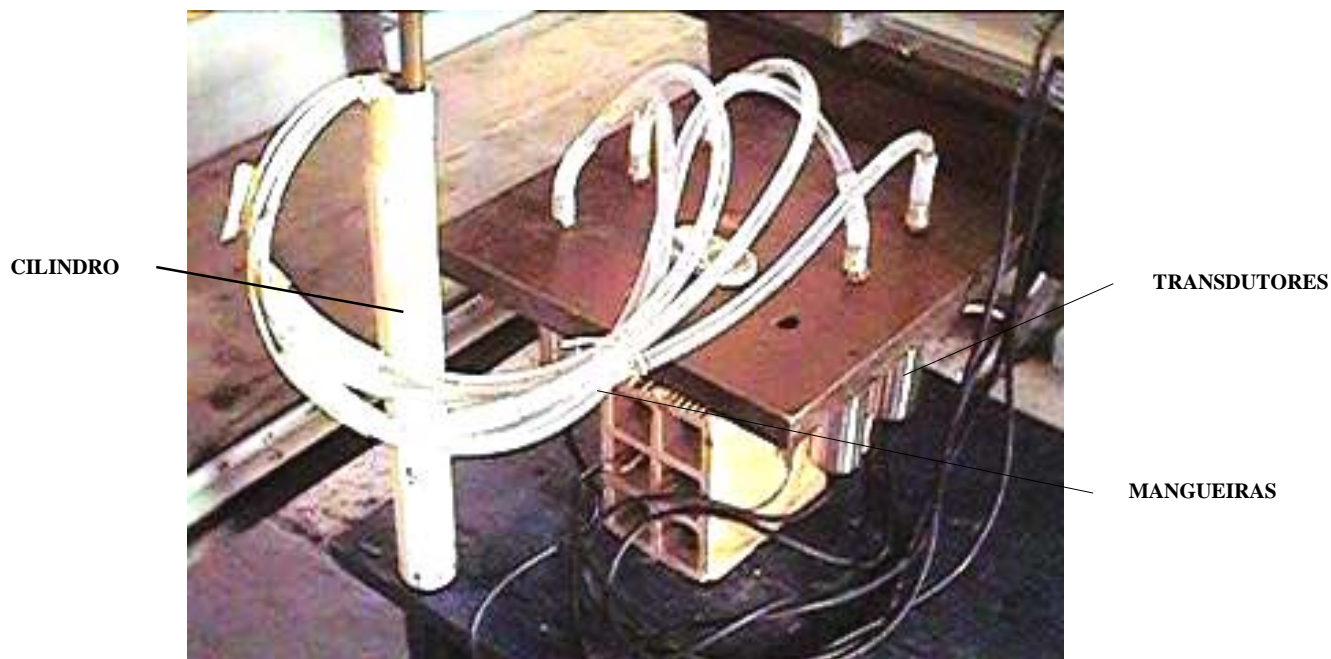


Fig. 3.8 – Vista geral do arranjo do cilindro, mangueiras e transdutores.

3.4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS

Aquisição Digital das Imagens

As aquisições de dados, no caso das filmagens, foram realizadas através da conversão analógico-digital de amostras consideradas representativas das gravações de cada ensaio, em fita VHS. Para a conversão, processamento e registro dos sinais digitais, foi empregada uma placa de vídeo, instalada em um micro-computador.

O computador empregado consistia de um AMD-K6 II – 350 MHz, com 128 Mb de RAM, HD (disco rígido) de 6 Gb e placa de vídeo AGP de 8 Mb. A placa de captura de vídeo empregada foi a WaveWatcher TV-PCI, com resolução de 320 x 240 pixels, em 24 bits “true color”, possuindo controle de tempo associado à frequência do processador do micro. Foram empregados os softwares de aquisição da placa para gerenciar as condições de aquisição.

O Equipamento de Filmagem

O processo de filmagem constou da utilização de uma câmera filmadora analógica, comum, marca Panasonic, modelo PV-610D/PV-A23 (Panasonic, 1987), de foco manual e play-back de vídeo, disposta ortogonalmente às janelas de vidro da seção de testes. A mesma foi instalada em um suporte que permitia o ajuste angular vertical e horizontal de filmagem e utilizava, para o processo de gravação, uma fita VHS, comum. A câmera grava as imagens com uma velocidade de aquisição de 30 quadros por segundo, em fita magnética (VHS), padrão NTSC (*National Television Standarts Commission*). Não foram empregados filtros óticos durante a aquisição.

Suas especificações técnicas são:

Sinal de Vídeo: padrão EIA (525 linhas, 61 campos) – sinal colorido NTSC

Sistema de gravação de vídeo: 4 cabeças

Comprimento focal: 8,5 mm - 68 mm

Diâmetro do filtro das lentes: 49 mm

Iluminação mínima: 2 lux

Umidade operacional: 10 % a 75 %.

3.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE PRESSÃO

Transdutores e Tomadas de Pressão

Todas as medições de pressão foram efetuadas através de um transdutor Druck de pressão, tipo *piezo-resistivo*, de precisão, série PTX600 e modelo PTX620 (fig. 3.9), com as seguintes especificações técnicas:

- ◆ Faixa: 1,5 psig (aproximadamente 1,05 m.c.a)
- ◆ Alimentação: 9 a 30 V d.c.
- ◆ Saída: 4 a 20 mA d.c.
- ◆ Estabilidade: 0,1 % F. S.(Full Scale) /ano
- ◆ Linearidade e histerese: $\pm 0,08$ % F.S.
- ◆ Performance térmica: 1 %, para temperatura de -20 a 80° C.

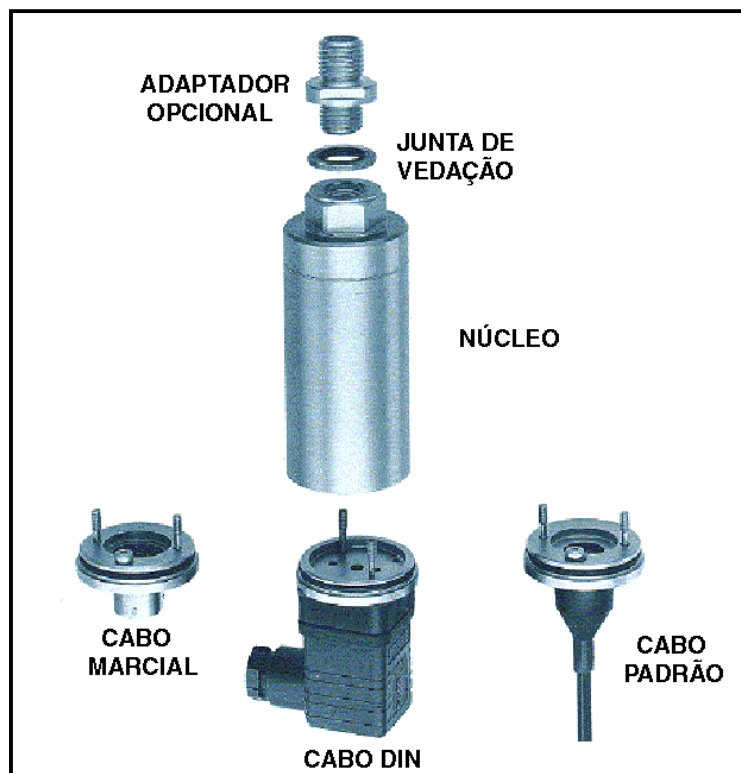


Fig. 3.9 – Vista do transdutor Druck de pressão, modelo PTX620, e alguns acessórios.

O transdutor empregado pode registrar flutuações de pressão com confiabilidade. Para a obtenção de informações adicionais, recomendam-se entrar em contato com:

Druck Brasil Ltda
Rua 9 de Julho, 25 Térreo
Vila Tereza - Rudge Ramos
São Bernardo do Campo/SP
CEP 09606-010 - Brasil
Tel: +55 (0)11 4367-3477
Fax: +55 (0)11 4368-9686
email: druck.brasil@druck.com

ou os seguintes endereços eletrônicos da Web:

www.davidson.com.au/press/druck/ptx600.htm e www.druck.com.

Antes do experimento, foi escolhida uma faixa de trabalho para os transdutores de 0 a 2,5 V, definindo assim a sua “sensibilidade” ao fenômeno. A escolha da faixa de trabalho procurou encontrar a melhor definição da onda de pressão, com o menor erro de conversão digital, tendo sido feita através do software da placa de aquisição. Após esta escolha, o procedimento seguinte foi a aferição dos transdutores. A aferição foi feita no próprio canal de ensaio, objetivando minimizar erros decorrentes da transposição da aferição de outro local para o canal. Estes erros estariam relacionados às seguintes variáveis:

- ◆ Diferença de cota entre o local de aferição e do canal. Apesar do canal ter seu valor conhecido, qualquer tentativa de compensação poderia gerar erro de estimativa;
- ◆ Mesmo com a compensação julgada satisfatória, também seria necessário compensar a espessura do leito do canal, que era variável;
- ◆ Variação de posicionamento dos adaptadores (nipples), para os transdutores.

Para tanto, o que foi proposto como calibração, foi a utilização do canal como reservatório, o qual, tendo sido imposto diversos valores de profundidade de água, conhecidos, determinando, assim, as voltagens associadas a cada transdutor, para cada profundidade.

Circuito dos Transdutores

Na confecção de um sistema básico de aquisição de dados é necessário, além dos sensores propriamente ditos, um circuito Amplificador/Condicionador, uma placa de conversão analógica–digital e um computador, provido dos respectivos softwares de gerenciamento da aquisição. Opcionalmente, pode-se fazer uso de filtros, caso exista o interesse de modificar o sinal que parte do amplificador.

O circuito amplificador empregado nos experimentos assumia as seguintes etapas: os sinais de pressão deixavam os transdutores como sinais analógicos de corrente que, a partir de certo ponto, transformavam-se em sinais analógicos de tensão. Estes, por sua vez, eram amplificados durante sua passagem pelo circuito. Ao chegarem à placa de aquisição os sinais eram, então, convertidos de sinal analógico (elétrico) em sinal digital. A utilização de sinais de corrente como saída do transdutor é justificada pela menor quantidade de ruído que este tipo de arranjo gera. O amplificador empregado tratou-se de um circuito amplificador simples e foi montado e testado no próprio Instituto, pelo Setor de Instrumentação.

As investigações preliminares utilizando transdutores, tendo detectado uma série de frequências aparentemente externas ao fenômeno, conduziram ao emprego de filtros. A julgar que estas frequências também estiveram presentes em aquisições feitas com canal vazio, pôde-se supor que estas não estavam relacionados a fenômenos físicos, e sim a “ruídos”, provavelmente, de origem elétrica. Entre eles, alguns correspondiam à frequência da rede de fornecimento de energia elétrica (~60Hz), bem como, suas respectivas harmônicas. Ainda

outras frequências estavam relacionadas a um vasto número de sinais provenientes de fontes não-identificadas, mas também de natureza não-hidráulica.

Os circuitos de filtros, por concepção, permitem a definição de um intervalo para passagem de frequências, as quais são as de interesse à aquisição. Desse modo, visando a eliminação de sinais externos aos objetivos do experimento e com o intuito de tratamento dos sinais elétricos enviados pelos sensores, também, um conjunto de filtros analógicos foi montado. Portanto, com este arranjo, após saírem do amplificador, os sinais passam pelos filtros e depois são conduzidos à placa de aquisição. O diagrama de representação dos circuitos dos amplificadores e dos filtros pode ser consultado no anexo B.

No experimento, o filtro empregado era o Butterworth, do tipo passa-baixa, tendo sido utilizado na eliminação de sinais acima de 20 Hz (Frequência de Corte). As estimativas e os trabalhos na área mostraram que todas as características predominantes do Vórtice estão associadas à frequências bem abaixo deste valor, tendo sido de grande interesse eliminar as frequências indesejadas, capazes de confundir a análise.

Por não apresentarem um comportamento ideal, os filtros atenuavam, dentro de certa faixa, o sinal da aquisição. Esta influência se deu até aproximadamente uma década (múltiplo de dez), anterior à frequência de corte. A atenuação é de aproximadamente 2 %, ângulo de fase -8° , para a frequência de 0,2 Hz e de 30 %, ângulo de fase -90° , para a frequência de 20 Hz.

A atenuação do sinal acabou por impor uma limitação quanto à natureza da análise dos dados, sujeitando-a à identificação de frequências importantes, e atribuindo certo comprometimento a análises de determinação de valores de intensidade ou quantidade de energia, associadas ou entregues a cada frequência. Uma forma de resolver esta limitação é compensar o valor do sinal adquirido, com uma equação linear de ajuste para a atenuação entre os valores citados. Isto não foi tentado, sendo deixado como sugestão para trabalho posterior.

A placa de aquisição/conversão empregada era da marca Linx, modelo CAD 12/36 A/D, ou seja, de interface Analógico-Digital, com 32 canais e aquisição direta em disco. A máxima taxa de aquisição, a partir dos circuitos do transdutor é em torno de 20 kHz, para um computador XT. Com micros mais velozes, pode-se obter taxas mais altas. O

armazenamento em disco se pode dar em taxas de até 100.000 amostras/seg. A placa foi instalada em um micro-computador PC 80486 – 66 MHz, com 8 Mb de RAM e HD (disco rígido) de 100 Mb, e gerenciada pelo software de aquisição, que acompanha a placa: o Aqdados. A placa possui controle de tempo associado à frequência do processador (clock) do micro.

3.6 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O TRABALHO EXPERIMENTAL

No sentido de atender o objetivo central de promover um estudo experimental sobre o Vórtice Ferradura, o trabalho desenvolvido pode ser dividido em dois momentos principais: os experimentos de filmagem e os experimentos de medição de pressão.

O emprego de duas metodologias busca a complementaridade de resultados. Em ambos os casos, o emprego de ensaios preliminares permitiu verificar a aplicabilidade dos métodos propostos, bem como o desempenho dos equipamentos. Estes pré-ensaios, também, mostraram-se importantes ao permitir a otimização de um grande número de questões de ordem prática, particulares a cada tipo de experimento, assim como, permitir o reconhecimento de condições ótimas de ensaio.

As velocidades do escoamento medidas em cada ensaio, foram determinadas através do emprego da equação da continuidade, a partir do valor da vazão obtido da equação de curva-chave do vertedor (Anexo A1). As velocidades obtidas foram conferidas através de medições expeditas feitas com um tubo de *Pitot-Prandtl*.

O cilindro de PVC, após convenientemente preparado, foi instalado na seção de testes. Disposto perpendicularmente ao leito do canal, o cilindro foi fixado a um carrinho de madeira, o qual permitia seu deslocamento, ao longo da seção de testes. Sua posição de ensaio distava aproximadamente 12 m da câmara de tranquilização (fig. 3.1).

3.7 O MÉTODO DE VISUALIZAÇÃO

Instalada defronte à seção de testes do canal, a câmera foi posicionada de forma que o centro da imagem coincidisse com o centro do vórtice, a 90° com as janelas da seção de testes, procurando minimizar as distorções causadas pela refração entre os meios

ar / vidro / água (fig. 3.10-a). No intuito de obter uma imagem plana, referenciada, os resultados serão comparados ao diâmetro do cilindro.

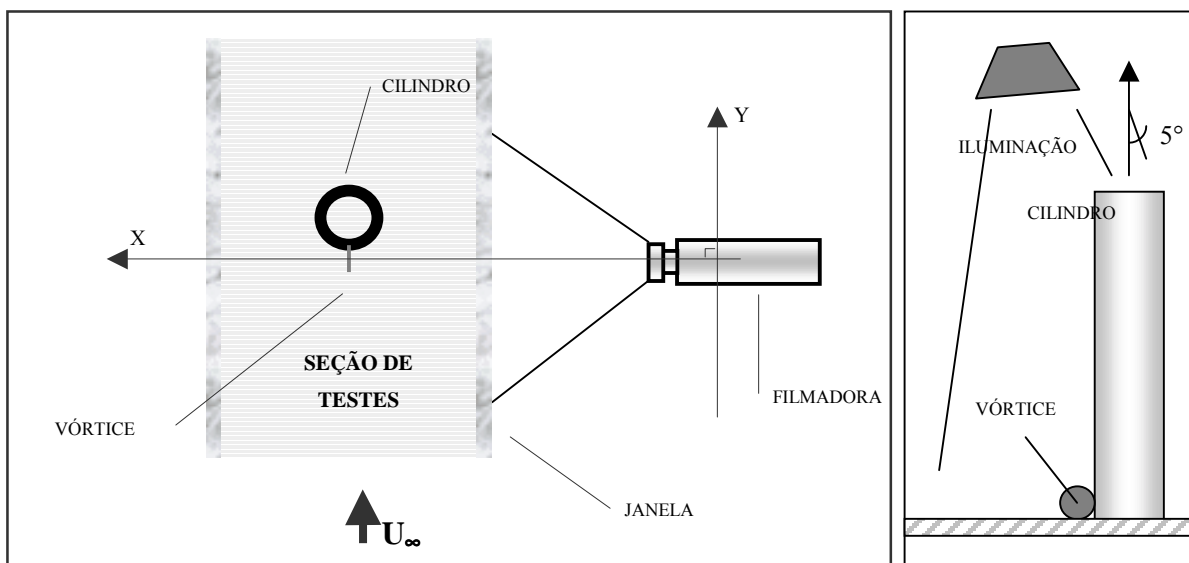


Fig. 3.10 – Posicionamento: da (a) filmadora (em planta) e da (b) (Iluminação (em vista).

A visualização do vórtice foi obtida através da injeção de corante Permanganato de Potássio ($KMnO_4$) diluído em água, proveniente do interior do cilindro através de orifícios em sua superfície de 1mm de diâmetro.

A série de pré-ensaios realizados, referentes à aquisição de imagens, objetivaram encontrar a condição ótima para os parâmetros de ensaio (velocidade, lâmina de água, etc), no sentido a obter representatividade do comportamento do vórtice e resolução na filmagem e aquisição das imagens. Os pré-ensaios também foram importantes no reconhecimento das condições necessárias para garantir a reprodutividade dos ensaios.

As condições de ensaios de visualização estão resumidas na seguinte tabela:

Tabela 3.1 – Resumo dos Ensaios de Visualização - ν ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

ENSAIO	Hv (cm)	a (°)	Q (l/s)	H (cm)	V (m/s)	ReD
1	24,52	30	10,97	22,27	0,12	4920
2	28,49	30	28,00	27,05	0,26	10360
3	29,43	20	32,82	22,09	0,37	14840
4	29,43	10	32,82	15,19	0,54	21600
5	32,90	10	52,86	19,30	0,69	27400
6	32,90	0	52,86	15,65	0,84	33760
7	34,48	0	63,12	17,55	0,90	35960

Os ensaios de visualização tiveram que atender às seguintes condições:

- Qualidade de imagem que permitisse tratamento posterior;
- As condições de iluminação deveriam ser controláveis e reproduzíveis, sob iluminação artificial;
- A quantidade de corante deveria permitir uma boa visualização do vórtice, em todas as velocidades ensaiadas, compensado os efeitos de transporte pelo escoamento.

A potência e o tipo de iluminação foram adotados visando fornecer intensidade luminosa adequada à filmagem. Sua disposição foi admitida procurando evitar eventuais reflexões dos materiais da seção de testes (como o vidro da janela, por exemplo). Pelo mesmo motivo, e procurando obter características padronizadas e reproduzíveis de iluminação em todos os ensaios, a influência da iluminação natural foi reduzida através do emprego de painéis, dispostos próximos à seção de teste. Todas estas questões foram resolvidas durante a fase de pré-ensaios. Optou-se por empregar uma lâmpada de halogênio de 500 W de potência, produzindo aproximadamente 2000 Lux, no ponto de formação do vórtice, disposta a 1m de altura do leito do canal e levemente inclinada ($\sim 5^\circ$ com o eixo central do cilindro, Fig. 3.10-b), de forma a iluminar sua face de montante, com maior intensidade e evitar sombras.

A conversão dos ensaios em fita VHS, para o formato digital, foi feita através de uma placa de captura de vídeo WaveWatcher TV-PCI, com resolução de 320 X 240 pixels, em 24 bits "true color". O computador empregado foi um AMD-K6 II – 350 MHz, com 128 Mb de RAM. Possui HD (disco rígido) de 6 Gb e placa de vídeo AGP-8 Mb. Este perfil assegurou bom desempenho geral do sistema, necessário para viabilizar a captura, em padrão de qualidade adequado aos objetivos do experimento. Os arquivos de saída tinham o formato *AVI* (Audio Video Interleave), o qual acredita-se, ainda hoje, ser o formato digital de vídeo mais popularizado. Este formato de arquivo digital trata-se de uma especialização do formato *RIFF* (Resource Interchange File Format), que é uma proposta de formato genérico para intercâmbio de arquivos multimídia.

A taxa de captura foi de 30 quadros por segundo (30 Hz), tendo sido gerenciado por programas que acompanham a placa. Portanto, segundo o Teorema de Nyquist (Bendat e

Piersol, 1986), somente fenômenos até a frequência de 15 Hz podem ser confiantemente analisados através destas imagens. No caso do Vórtice Ferradura, os fenômenos estão restritos a frequências menores que 1Hz (Ferreira e Schettini, 2000).

O processo de captura, em si, traz enorme exigência quanto ao desempenho de cada um dos componentes do computador. As principais características estão relacionadas à velocidade de captura da placa de vídeo, no sentido de permitir a aquisição de todos os quadros gravados (igual ou superior a 30 por segundo), condição esta que, caso não fosse cumprida, poderia acarretar um "dropping" ou perda de quadros. A aquisição consiste na conversão matemática do sinal analógico, através da placa de vídeo, através de operações matemáticas, utilizando a Transformada de Fourier. Condição de igual importância está relacionada aos tempos de acesso em disco, que devem ser garantidamente menores que 30 ms, dado que o computador gerencia diversas outras atividades, simultaneamente. Descreveram-se tempos de ordens menores a 10ms (Gomes, 2000).

Adicionalmente, salienta-se que a taxa de transferência interna de dados do computador e a capacidade de RAM devem ser capazes de permitir o deslocamento de grandes "pacotes" de dados, devido ao tamanho excessivamente alto, requerido ao armazenamento de dados de vídeo.

As gravações dos ensaios resultaram em filmes, com durações entre 10 e 15 minutos, aproximadamente. Devido às limitações quanto ao espaço físico requerido em disco, para armazenar as imagens digitalizadas, tornou-se inviável a digitalização de toda a filmagem relativa a cada ensaio. Assim, de cada ensaio foram selecionadas quatro amostras, de duração aproximada de 3 minutos, retiradas em intervalos considerados representativos do fenômeno. O produto final foram 28 arquivos de vídeo com tamanho médio de 120 Mb. Destas amostras, para cada ensaio foi selecionada uma para análise, perfazendo um total de 7 arquivos.

Os arquivos digitais foram, então, discretizados em seus quadros constituintes, no formato *.TIFF* (Tagged Image Format File), na mesma seqüência temporal dos quadros do vídeo original. Assim, com estes quadros, procedeu-se à análise das imagens através de um programa "freeware" de edição de vídeo: o *Image Tool*. O Image Tool é um software livre de análise e processamento de imagens que, entre outras funções, adquire, edita e analisa imagens de 8 e 16 bits em escala de cinza, e imagens coloridas de 24 bits ou mais, trabalhando, entre outros, com formatos BMP, PCX e JPEG.

As funções de análise de imagem permitem, entre outras possibilidades, a realização de medições, a partir da imagem, de dimensões físicas tais como distância, ângulo, perímetro e área, de elementos que se encontram presentes na imagem, e que sejam de interesse de estudo. A calibração espacial traz a possibilidade de que essas medições possam ser realizadas em unidades de medida reais (como centímetros, por exemplo). O programa permite, entre outras funções, o processamento de imagens como: manipulação de contraste, detecção de limites, filtragem e convolução, além de manipulações geométricas tais como, rotação, reversão, aumento e redução de escala.

Para a pesquisa, foram empregadas as funções de análise para realizar medições do diâmetro do vórtice, que empregaram como referência de calibração, o diâmetro do cilindro. Assim, as distorções na imagem, causadas pela refração entre os meios ar / vidro / água, também puderam ser compensadas através de comparação entre as dimensões reais e as dimensões da imagem, do cilindro. As maiores distorções encontravam-se nos limites da filmagem.

3.8 O MÉTODO DE MEDIÇÃO DE PRESSÃO

Os ensaios de medição de pressão visaram a caracterização dos campos de flutuações de pressão. Assim, durante os ensaios, cada transdutor entrega um sinal elétrico (analógico) que, através de uma função de transferência - função associada às características do equipamento, fornece um valor para a grandeza de interesse, no caso, a pressão instantânea.

Por esse motivo, as funções de transferência adquirem especial importância no processo de aquisição, e a sua obtenção, durante o processo de calibração, exige especial cuidado. Procurando obter uma curva bem definida, as mesmas foram obtidas com número de 10 pontos, durante o processo de calibração. O procedimento de calibração é melhor detalhado no anexo A2. Apesar das garantias de estabilidade de funcionamento dadas pelo fabricante do equipamento, julgou-se como procedimento mais prudente, efetuar a calibração no mesmo dia de ensaio, no próprio canal de ensaio.

Os ensaios preliminares, neste grupo de ensaios, foram relevantes na identificação do sinal analógico que era enviado pelos transdutores. A partir disto, pôde-se fazer o ajuste dos

circuitos amplificadores e simultaneamente, escolher a faixa de tensão de saída mais adequada para a detecção do vórtice. Também, este tipo de procedimento, permitiu reconhecer as características do sinal, com o canal vazio e com água (sem escoamento), na intenção de detectar, a priori, quaisquer interferências provenientes de fontes externas. Os dados dos pré-ensaios de transdutores apresentaram uma série de frequências que correspondiam a efeitos da rede elétrica, ou a ruídos não identificados, que não correspondiam a fenômenos hidráulicos, dados que estas frequências estavam presentes em aquisições feitas com canal vazio.

Os ensaios, propriamente ditos, foram divididos em duas situações principais: os ensaios de medição da pressão no leito, em regiões próximas ao cilindro; e os ensaios de medição na superfície do cilindro. As aquisições de pressão foram realizadas através de cinco transdutores de pressão, simultaneamente. Cada transdutor foi calibrado antes de cada bateria de ensaios e as funções de transferência e as tabelas de calibração podem ser conferidas no anexo A2. Para cada ensaio, as aquisições feitas pelos transdutores foram simultâneas.

Sobre a disposição e localização das tomadas de pressão, tendo já sido tratadas no capítulo anterior, resta agora apenas discutir as razões que condicionaram sua escolha. Na distribuição das tomadas, nos ensaios de leito, as quais, estando espaçadas entre si em 5 cm e localizadas três a montante e duas a jusante do cilindro, obviamente, deram preferência de caracterização hidrodinâmica do escoamento à região de montante do cilindro, onde ocorre o Vórtice. As tomadas localizadas depois do cilindro justificam-se pelo interesse de correlacionar o comportamento do escoamento de montante e jusante do cilindro. O eixo central do cilindro estava localizado no espaço que separa o terceiro do quarto transdutor, posicionado exatamente na metade da distância. Este alinhamento entre os pontos com o eixo longitudinal do canal, procurou caracterizar o escoamento na face de estagnação do cilindro. Como o cilindro esteve instalado entre a 3ª e 4ª tomadas, as mesmas acabaram por capturar a condição do escoamento 0,5 cm antes e depois do cilindro, respectivamente.

Nos ensaios de superfície, as tomadas - duas localizadas na face de estagnação, uma à 10 cm do leito e a outra a 0,3 cm; e as três restantes - localizadas todas a 0,3 cm do leito, dispostas entre si de 45° e posicionadas nos ângulos de 45°, 90° e 135° com a face de estagnação, tiveram a intenção de correlacionar o comportamento das regiões de escoamento onde ocorre o escoamento descendente, na face de estagnação, e o escoamento ao redor do cilindro, além de, procurar correlacionar as modificações do escoamento no leito, ao contornar o cilindro.

A frequência utilizada na aquisição foi 200 Hz (filtrada em 20 Hz – filtro passa-baixa), durante um tempo de 3 min, por ensaio. Isto gerou um total de 36000 dados por transdutor, por amostra. Um total de 21 ensaios foi realizado, sendo 14 referentes às medições no leito do canal e 7 na superfície do cilindro. Os dados de pressão foram gerenciados pelo software da placa de aquisição.

O resultado da medição era a tensão (sinal analógico), convertido para sinal digital em um número inteiro entre 0 e 4095, devido à resolução da placa de 12 bits ($2^{12} = 4096$ níveis). Após a conversão o número era transformado em valor de pressão através da função de transferência.

A faixa de variação da tensão de entrada (0 a 2,5 volts), na placa, foi escolhida procurando-se otimizar os níveis de conversão da placa.

As velocidades médias desenvolvidas, para os ensaio de leito, variaram de 0,11 a 1,02 m/s, resultando em números de Reynolds baseados no diâmetro do cilindro (Re_D), entre 4250 e 40800 (moderados a altos números de Reynolds). O resumo das características dos ensaios é apresentado nas tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Resumo dos Ensaio (leito do canal) - v (10^{-6} m²/s).

Ensaio	Q (l/s)	H (cm)	V (m/s)	Re_D
1	9.6	22.50	0.11	4250
2	27.2	28.02	0.24	9720
3	33.5	22.67	0.36	14780
4	33.4	15.20	0.55	22000
5	51.4	18.81	0.68	27330
6	51.4	12.98	0.99	39610
7	63.7	15.62	1.02	40800

Para os ensaios de superfície, as velocidades médias desenvolvidas, variaram de 0,13 a 0,89 m/s, resultando em números de Reynolds do cilindro, entre 5090 e 35690. O resumo das características dos ensaios é apresentado nas tabela 3.3:

Tabela 3.3 – Resumo dos Ensaios (superfície do cilindro) - v (10^{-6} m²/s).

Ensaio	Q (l/s)	H (cm)	V (m/s)	Re_D
1	11.6	22.72	0.13	5090
2	28.5	28.03	0.25	10160
3	32.4	22.26	0.36	14580
4	32.4	14.98	0.54	21660
5	55.0	19.50	0.71	28200
6	55.0	15.68	0.88	35060
7	62.4	17.48	0.89	35690

A caracterização dos campos de flutuação de pressão leva em conta a aplicação, sobre os dados aquisitados, de metodologias de cálculo de momentos estatísticos julgo adequados a este tipo de grandeza. Assim, os registros foram tratados visando a determinação de médias quadráticas (r.m.s.), desvios, autocorrelações, correlações cruzadas e função densidade espectral (f.d.e.) das flutuações de pressão. Nestes cálculos constavam os testes de periodicidade e ergodicidade.

4. RESULTADOS

4.1 VISUALIZAÇÕES

Durante esta etapa, o campo de escoamento ao redor de um cilindro circular foi investigado experimentalmente, no sentido de desenvolver uma sistemática experimental de visualização e aquisição de imagens, bem como investigar o comportamento do Vórtice Ferradura. Os ensaios foram realizados para Reynolds variando de 4900 a 36000. O objetivo principal consistiu em investigar, o quanto possível, qualitativa e quantitativamente, a dinâmica do (sistema) Vórtice Ferradura, ao redor do cilindro, empregando imagens geradas através de uma metodologia de visualização. Para isso, foi necessário desenvolver uma técnica para visualização em água, de baixo custo.

As imagens do Vórtice Ferradura foram feitas em uma seção transversal, no plano de simetria. O escoamento de aproximação, em todas as imagens adquiridas, tem o sentido da esquerda para a direita.

Primeiramente, foi constatado que as visualizações permitiriam, com resolução adequada de imagens, o reconhecimento de algumas características (em geral geométricas), como: por exemplo, a posição ou o diâmetro do Vórtice; e não possuindo, no entanto, resolução suficiente para descrever fenômenos menores: por exemplo identificar “plumas” de ejeção de fluido.

Nos ensaios a velocidades baixas, a qualidade da imagem foi levemente superior, fato este atribuído a que, nas velocidades mais altas, há maior dispersão da luz causada pela turbulência do escoamento, assim como, pela entrada de ar no escoamento. Obviamente, nos maiores números de Reynolds a visualização também começa a ficar prejudicada pelo transporte de corante. Não obstante estas constatações, salienta-se que o fator mais importante associado à qualidade das imagens, para análise, é a velocidade de obturação da câmera empregada: quanto maior a velocidade de obturação maior a qualidade das imagens obtidas.

Os resultados obtidos levantam considerações sobre o processo de formação do Vórtice, a variabilidade espacial da posição do seu núcleo, a presença, além do Vórtice Primário, de um Vórtice Secundário nos escoamentos de número de Re mais elevado, assim como,

constatações sobre o diâmetro do vórtice, ao longo dos ensaios. A seguir, encontram-se descritos os resultados obtidos.

A Formação do Vórtice

Um resultado de especial interesse foi a obtenção de uma seqüência de quadros (fig. 4.1), mostrando o processo de formação do vórtice. As imagens concordam com descrições fornecidas pela literatura (Dargahi 1987, et al), que afirmam a existência de um escoamento descendente na face de estagnação do cilindro que, após encontrar o leito, escoar em direção contrária ao escoamento principal até sofrer a influência do mesmo, havendo então uma rotação deste, em sentido horário, dando origem a uma região de concentração de vorticidade.

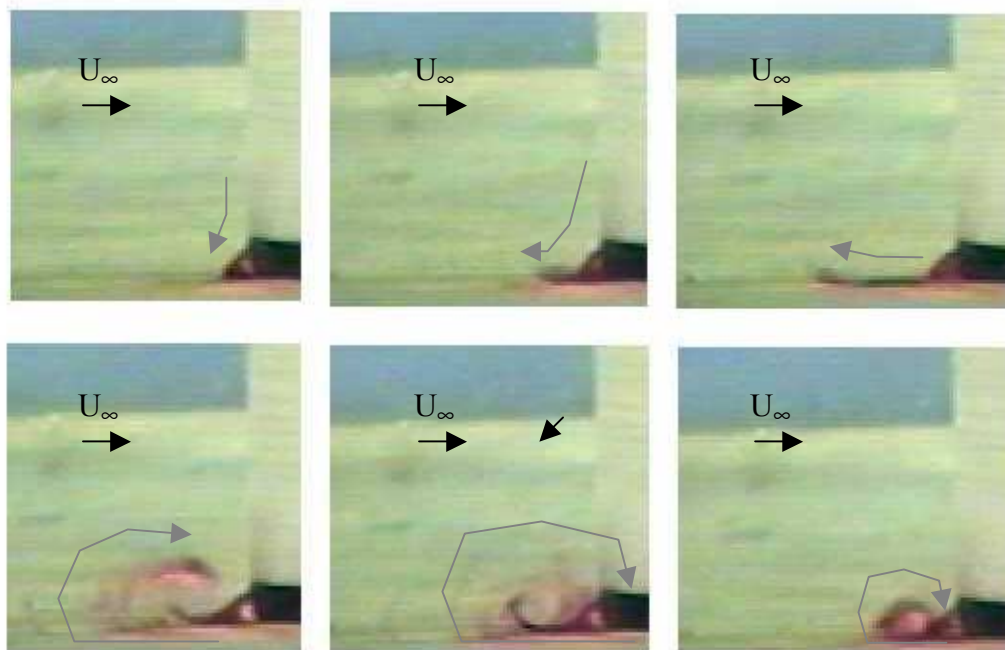


Fig. 4.1 – Formação do Vórtice ($Re = 4920$).

Um resultado curioso, descrito por Dargahi (1989), foi o reconhecimento de que os processos hidrodinâmicos de formação do vórtice, assim como os desprendimentos, ocorrem não só quando o Vórtice está muito próximo ao cilindro, mas também quando o Vórtice se distancia de sua superfície.

As imagens sugerem que os intervalos de formação e desprendimento do vórtice são aproximadamente constantes, aparentando periodicidade. À medida que o número de Reynolds aumenta, estes intervalos tendem a se reduzir.

Variabilidade Espacial

Como resultado qualitativo da análise das imagens, constatou-se a existência de variabilidade da localização do Vórtice Ferradura (fig. 4.2), tendo sido notada, tanto durante o período de formação, como na permanência do vórtice.

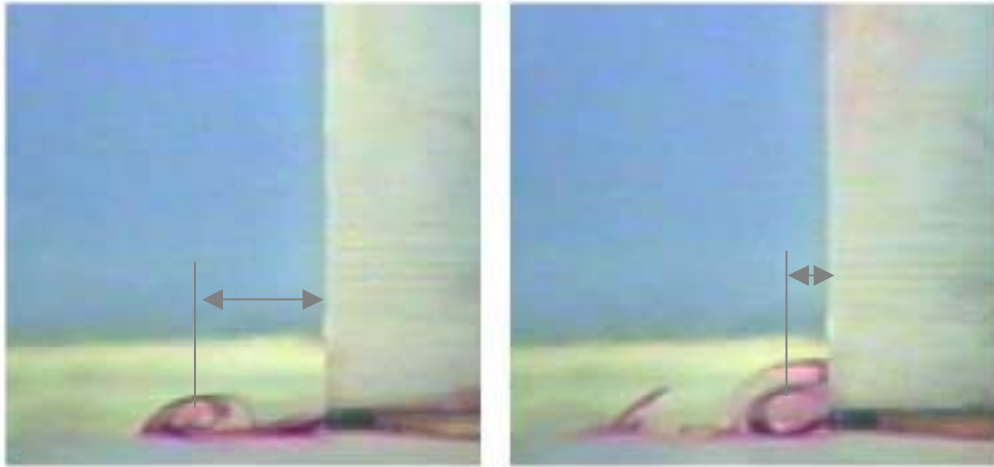


Fig. 4.2 – A Variabilidade Espacial ($Re = 4920$).

Esta variabilidade apresentou-se como oscilações do núcleo do Vórtice, dentro de uma faixa de distância próxima ao cilindro de aproximadamente meio diâmetro do cilindro, podendo, como já dito no item anterior, ocorrer processos de formação e desprendimento do vórtice, dentro deste intervalo de oscilação. A magnitude desta variação gradativamente diminui, à medida que o número de Reynolds aumenta, adotando uma posição mais definida e estável nos números de Reynolds mais altos do experimento. Isto torna clara a influência do escoamento de aproximação na estabilidade do vórtice.

Esta variabilidade do vórtice, aparentemente pode estar relacionada com a região de separação do escoamento, que, no caso de baixas velocidades, é pouco definida, sofrendo constantemente influência do escoamento de aproximação e das irregularidades no leito do canal. Porém, com o aumento das velocidades, a separação torna-se melhor definida e estável, e o escoamento externo tem sua influência reduzida. A posição do Vórtice parece variar de acordo com uma frequência mais ou menos definida que pode estar relacionada com a frequência de desprendimento do Vórtice.

O Vórtice Secundário

A presença de um vórtice secundário (fig. 4.3), citado anteriormente, foi constatada a partir de valores do número de Re acima de 10000. As imagens apontam que o mesmo é causado pelo surgimento de uma região de vorticidade oposta à do primário (possuindo, portanto, sentido de rotação oposto a este), confirmando a afirmação de que vórtices vizinhos sempre giram em direções opostas.

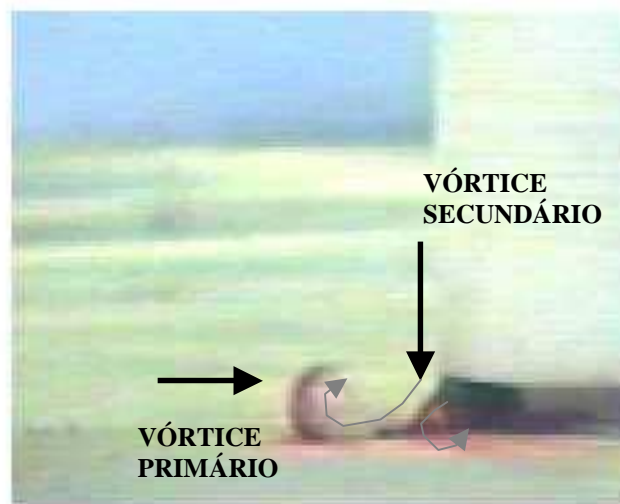


Fig. 4.3 – O Vórtice Primário e o Secundário (Re = 14840).

Diâmetro do Vórtice

Finalmente, como produto da análise das imagens obtidas, teve-se a indicação de que o Vórtice possui uma sutil tendência de crescimento com o aumento do número de Reynolds até um valor superior, assintótico, mais ou menos característico que, segundo a literatura, está relacionado com o diâmetro do cilindro. A figura 4.4 traz as médias adimensionalizadas dos resultados de medições expeditas do diâmetro do Vórtice, empregando o software *Image Tool*.

A linha de tendência apresentada na figura 4.4 deve ser entendida apenas como uma representação de uma tendência genérica de comportamento, dado que as medições foram feitas em caráter expedito a partir de imagens que foram escolhidas como representativas, e dado o fato de que o diâmetro dos Vórtices variou bastante dentro de cada ensaio.

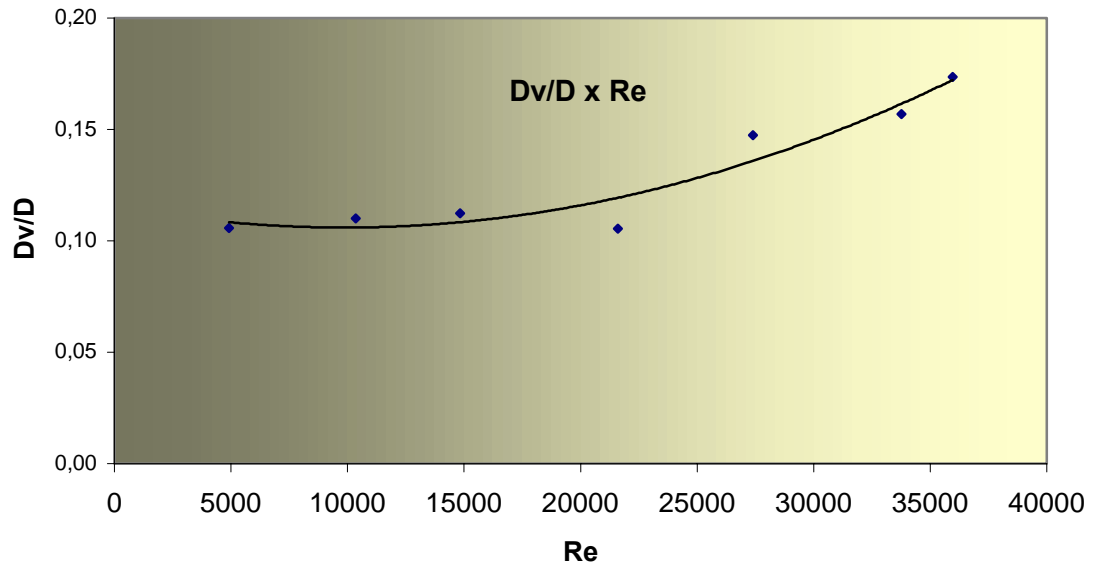


Fig. 4.4 – Variação do diâmetro do Vórtice (D_v) com o número de Reynolds.

4.2 MEDIÇÕES DE PRESSÃO

Nesta nova etapa, o campo de escoamento foi investigado experimentalmente, buscando caracterizar o campo de pressões, no intuito de obter elementos para caracterizar o comportamento do Vórtice Ferradura.

Nos ensaios para medição de pressão foram empregados cinco transdutores, tendo sido, os ensaios, divididos entre medições com tomadas de pressão no leito, ao longo da linha de simetria do canal, e tomadas na superfície, ao redor do cilindro, conforme descrito no capítulo 3. No primeiro caso, os ensaios foram conduzidos para números de Reynolds variando de 4250 a 40800 e para o segundo caso, os ensaios foram conduzidos para números de Reynolds variando de 5100 a 35000. O objetivo destes ensaios foi o de fornecer subsídios para uma análise estatística e espectral, tendo como principal variável de análise a flutuação de pressão, visando, por fim, sua caracterização.

Os dados obtidos, antes do processamento matemático e estatístico, foram analisados preliminarmente quanto à sua integridade, estacionariedade e ergodicidade. Esta análise consistiu, para os dados de cada transdutor, em cada ensaio, do cálculo de médias parciais de intervalos sucessivos de 1000 valores. A partir dos valores destas médias, foram calculadas regressões lineares, que serviram para identificar a presença de tendências.

Assim, na análise das médias dos dados dos ensaios de leito, considerou-se como de tendência significativa, as retas que apresentaram valores para o coeficiente angular, acima de duas casas decimais. Os resultados apuraram que, em geral, os dados apresentaram baixa tendência, com exceção feita ao transdutor 2, no ensaio 1. Também, foram detectadas perturbações do sinal registrado, nos seguintes casos: dados dos transdutores 1 e 2, no ensaio 3 ($Re = 14780$) – a média dos dados do transdutor 1 apresentou um transiente no valor de variação de pressão de 1,83 cm.c.a em 10 segundos; e do transdutor 1 no ensaio 4 ($Re = 22000$), ambos de origem não determinada, relacionados a fenômenos não-hidráulicos, possivelmente, elétricos.

As perturbações no sinal estão, possivelmente, relacionadas a problemas nas conexões e contatos dos transdutores. A maior tendência encontrada nos dados refere-se ao

coeficiente angular igual a $-0,0156$ cm.c.a./1000 valores, correspondente ao transdutor 2, no ensaio 1 ($Re = 4250$), o que implicaria em uma variação absoluta de pressão de $0,56$ cm.c.a, em média, durante toda a aquisição. Estas constatações acabaram por inviabilizar o emprego destes dados na obtenção de pressões médias e flutuações de pressão, tendo sido, contudo, empregados na maior parte das demais análises.

A análise dos dados dos ensaios na superfície do cilindro verificou que, os mesmos, não apresentaram perturbações no sinal e baixa tendenciosidade. O valor de tendenciosidade que pode ser identificada nestes dados refere-se ao coeficiente angular igual a $0,0035$ cm.c.a./1000 valores, relativo ao transdutor 3, no ensaio 7 ($Re = 35690$), o que implicaria em uma variação de pressão de $0,126$ cm.c.a., na média, durante toda a aquisição. Os resultados de todas estas análises podem ser consultados no anexo C.

Na etapa seguinte, os dados provenientes dos transdutores, tanto nos ensaios de leito como nos de superfície foram processados por análise estatística e espectral, estando esta última relacionada aos processos turbulentos. O Anexo D apresenta um resumo dos resultados estatísticos obtidos nos ensaios. Para a análise dos processos turbulentos foram retiradas as médias e as tendenciosidades das séries. A seguir, são apresentados em gráficos dos resultados obtidos, onde, sobre os mesmos (exceto na Análise Espectral), foram introduzidas linhas (contínuas ou tracejadas), visando auxiliar a análise visual.

4.2.1 As Pressões no leito ao longo da linha de Simetria

4.2.1.1 Análise Estatística

A análise estatística teve como parâmetros de cálculo as Pressões Médias e as Intensidades da Turbulência (valores de RMS da flutuação de pressão).

Características Médias

A variável escolhida para análise neste item foi a Pressão Dinâmica, dado que a Pressão Total está referenciada à lâmina de água que, obrigatoriamente variou, nos ensaios. Assim, o valor médio da pressão foi obtido empregando os 36000 valores de pressão de cada ensaio.

A figura 4.5 apresenta os resultados de Pressão Dinâmica Média para as posições adimensionalizadas X/D , permitindo uma comparação para as situações de escoamento sem (4.5-a) e com cilindro (4.5-b). As posições estão referenciadas ao eixo central do cilindro e seus valores crescendo em direção a jusante. Na figura 4.5 (a), pode-se notar a característica de baixas pressões dinâmicas, sem a presença do cilindro, em especial, no transdutor em $X/D = -3,125$.

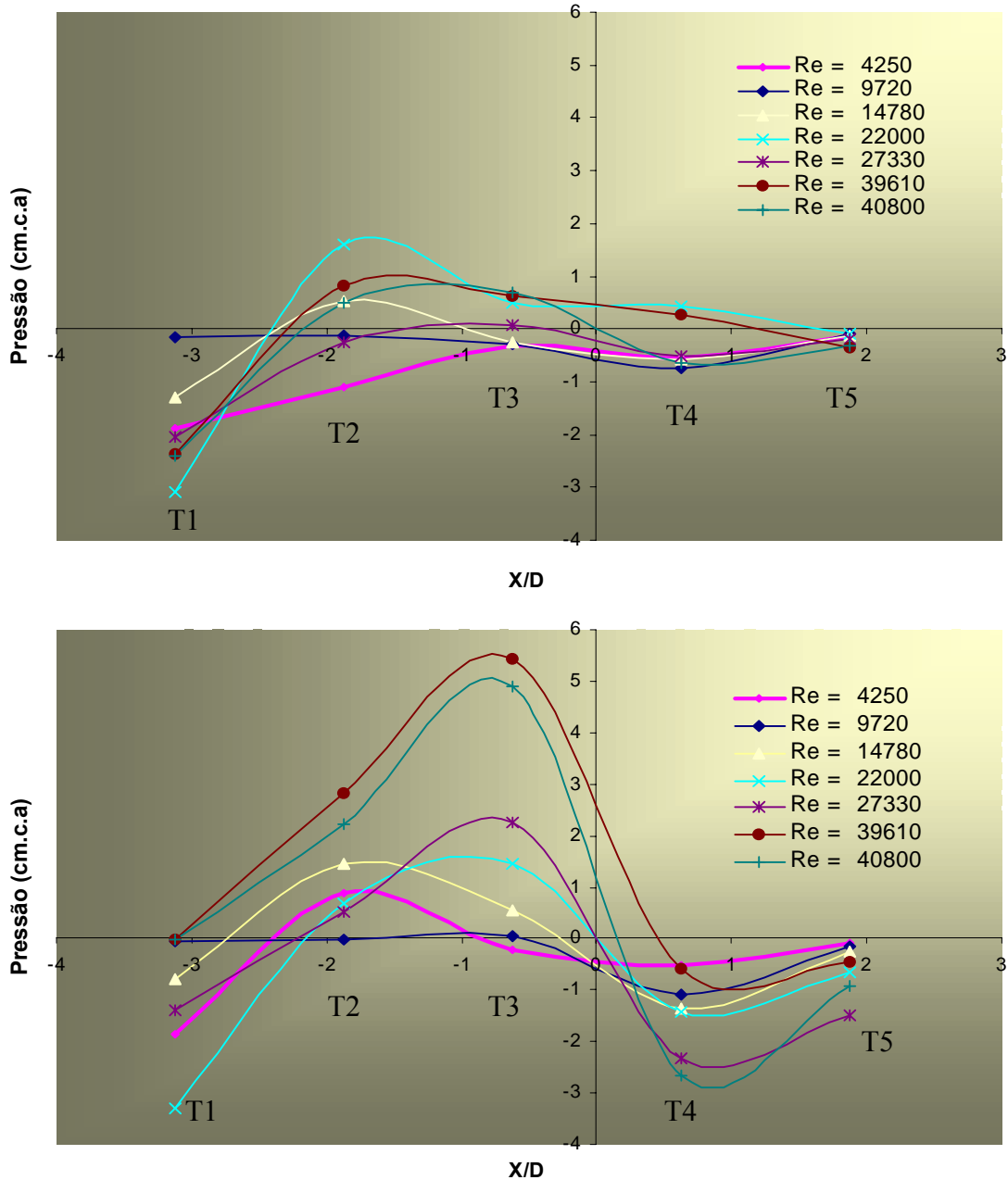


Fig. 4.5 – Pressão Dinâmica Média no leito do canal: (a) sem cilindro e (b) com cilindro, nos ensaios no leito.

A existência de tais valores negativos de pressão pode estar relacionada, talvez, à influência de irregularidades no leito do canal nos pontos de tomada de pressão, modificando o escoamento. Não obstante a causa, interessante perceber-se que esta influência deva ser

retirada da análise, o que pode ser visualizado no gráfico 4.6, a partir da qual a análise dos resultados será feita. Na figura e em outras posteriores relacionadas aos ensaios de leito, os índices T1, T2, T3, T4 e T5 referem-se aos transdutores localizados em $X/D = -3,125, -1,875, -0,625, 0,625$ e $1,875$, respectivamente.

Como pode ser visto na figura 4.6, os dados indicam influência no campo de pressões causada pela presença do cilindro que, em geral, manifestou-se como acréscimo de pressão a montante e redução a jusante do cilindro. Curiosamente, em linhas gerais, isto torna-se menos intenso à medida que o número de Reynolds aumenta. Os registros dos ensaios de número de $Re = 4250$ e 14780 encontram-se incompletos devido à retirada dos registros que apresentaram problema, referidos anteriormente. Também, é importante destacar os valores negativos de pressão apresentados, pelos dois primeiros transdutores, no ensaio de número de $Re = 22000$, talvez associados ao problema de irregularidade do fundo.

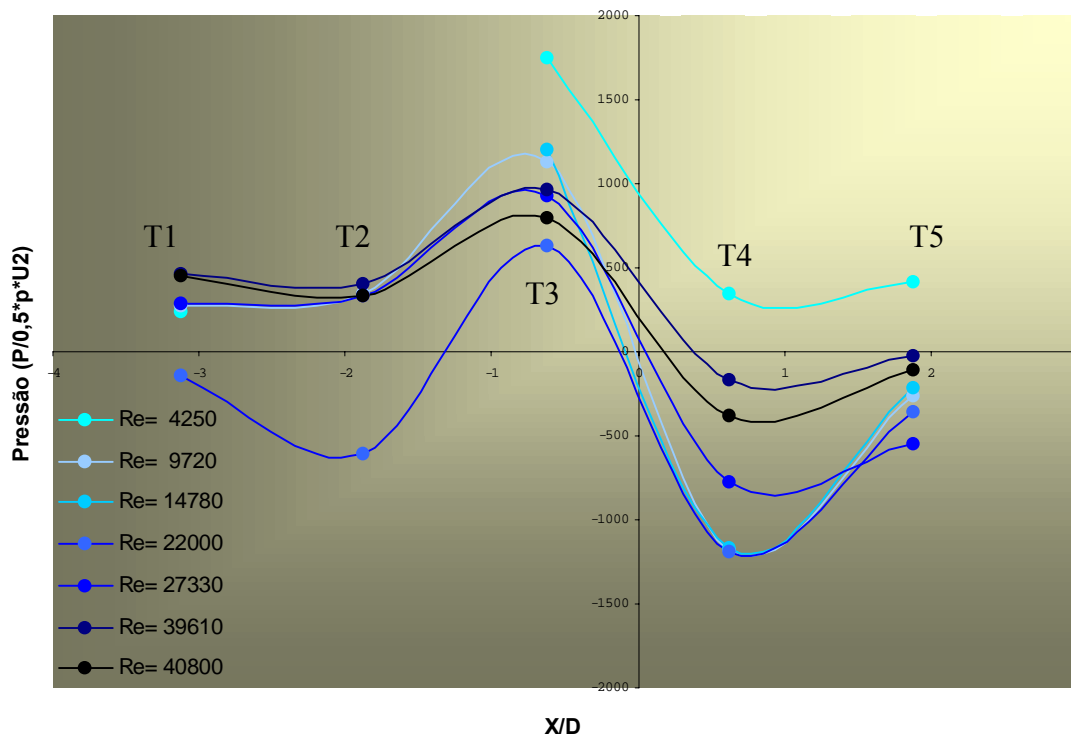


Fig. 4.6 – Pressão Dinâmica Final adimensionalizada, com o cilindro.

Intensidades da Turbulência - RMS

O cálculo das intensidades da turbulência (RMS) fornece indicações valiosas ao demonstrar, especialmente, onde se concentram as atividades turbulentas. A figura 4.7 apresenta valores de flutuação de pressão para as posições X/D – distância do ponto de aquisição ao eixo do cilindro, adimensionalizadas pelo diâmetro do cilindro, para as situações de escoamento sem e com cilindro.

Os resultados demonstraram que a característica geral foi, com o aumento do Reynolds, concentrar atividade turbulenta em $X/D = -3,125, -0,625, 0,625$ e $1,875$, mantendo $X/D = -1,875$ (T2) com baixa atividade. Até $Re = 9720$, as flutuações de pressão apresentam, em grande parte, baixos valores, contudo, a partir de $Re = 22000$, é que a atividade turbulenta aumenta passando a ter maior importância. Em $Re = 27330$ ocorre um fato interessante: a flutuação de pressão de $X/D = -0,625$ apresenta valor superior ao encontrado em $X/D = 0,625$, seu análogo a jusante do cilindro, indicando maior atividade a montante, possivelmente devido à presença do vórtice. Em Reynolds maiores, estes transdutores tendem a apresentar RMS próximos. Aparentemente, pode-se distinguir dois comportamentos dos resultados, aparentemente, relacionados com o comportamento da esteira: um apresentado até o número de Reynolds igual a 22000, e outro para os resultados de número de Reynolds acima deste valor.

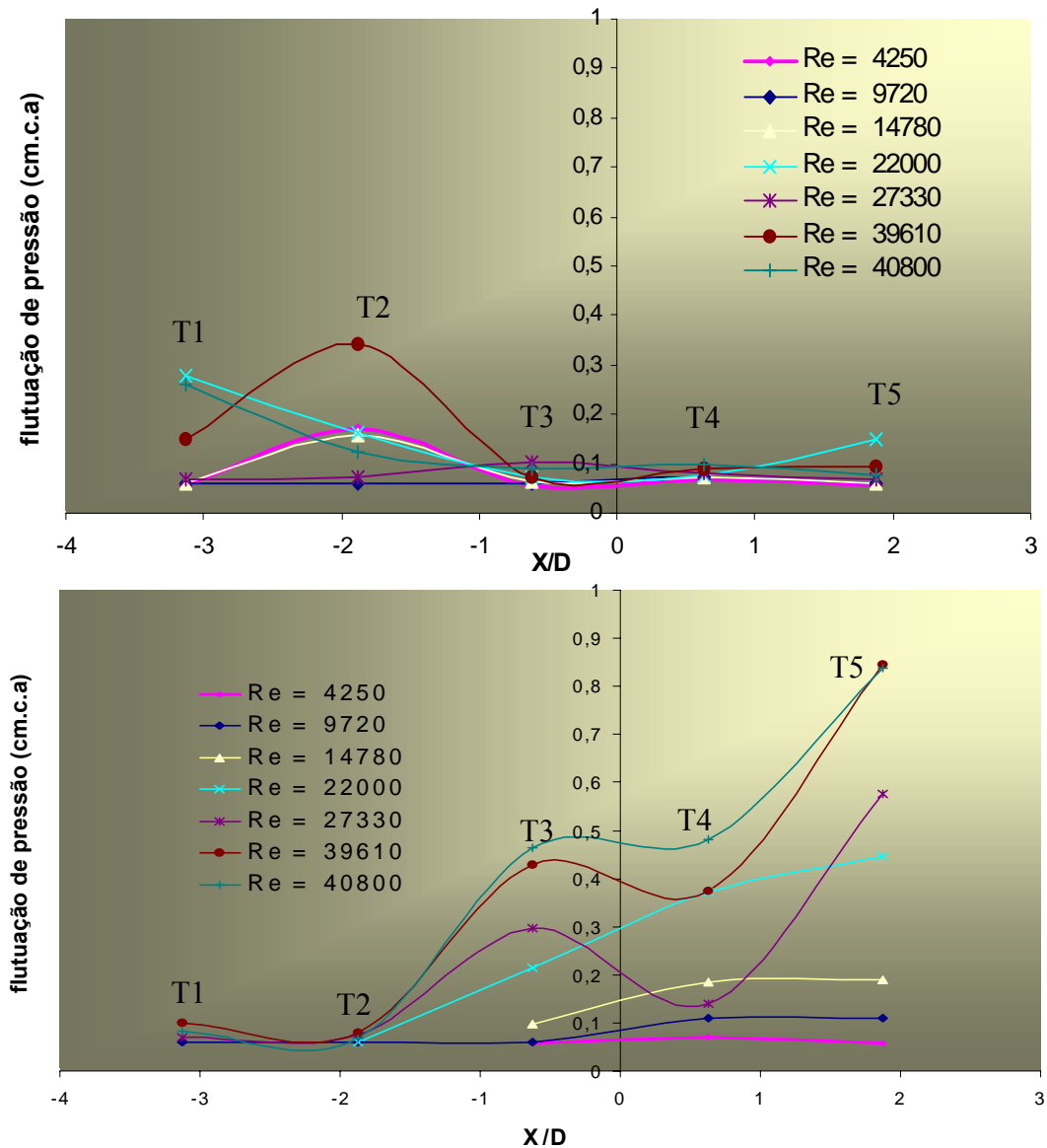


Fig. 4.7 – A flutuação de pressão sem (a) e com (b) cilindro, nos ensaios no leito.

Também, é curiosa a existência de baixos valores de flutuação de pressão apresentados na resposta do segundo transdutor, ao longo de todos os ensaios, não obstante todos os demais tenham sofrido aumento, tanto maior, à medida que o Reynolds aumenta. Outra constatação interessante é o fato de no ensaio de número de $Re = 4250$, o segundo transdutor ($X/D = -1,875$) apresentar flutuação de pressão superior aos demais. Em $Re = 9720$, a flutuação de pressão em $X/D = -1,875$ diminui relativamente em relação aos demais enquanto aumentam em $X/D = 0,625$ e $1,875$. Para $Re = 14780$, os transdutores em $X/D = -3,125$ e $-0,625$ aumentam a flutuação de pressão enquanto $X/D = -1,875$ permanece inalterado e, em $Re = 22000$, se reduz, enquanto todos os demais aumentam significativamente.

4.2.1.2 Análise de Correlações e Análise Espectral

Correlação Espacial

A correlação espacial procura encontrar relações de correspondência entre o comportamento da resposta dos transdutores. Na figura 4.8 é apresentada a correlação espacial obtida para os dados para os ensaio no leito.. Justifica-se esta forma de apresentação por suas vantagens na análise dos resultados.

Os resultados apresentam, como era de se esperar, tendência de redução de correlação com o aumento do número de Reynolds. Para o menor número de Reynolds ($Re = 4250$), as medições mostram uma excelente correlação, com exceção do transdutor 2 ($X/D = -1,875$). A tomada deste transdutor pode estar localizada em uma região de recirculação, com baixas velocidades, o que justificaria sua baixa correlação com a pressão medida nos outros pontos.

Em $Re = 14780$, todos passam a apresentar baixa correlação entre si, o que é, então, acentuado em $Re = 22000$. Em 27330 , os dados dos transdutores localizados em $X/D = -3,125$ e $-1,875$ passam a apresentar maior correlação entre si e os demais, diminuindo esta correlação em direção a jusante.

É interessante notar a maior correlação apresentada pelo transdutor em $X/D = 0,625$, com os localizados em $X/D = -3,125$ e $-1,875$ em relação à correlação com $X/D = 0,625$ (mais próximo), a partir de $Re = 22000$. Esta diferença se apresenta bastante significativa em $Re = 27330$.

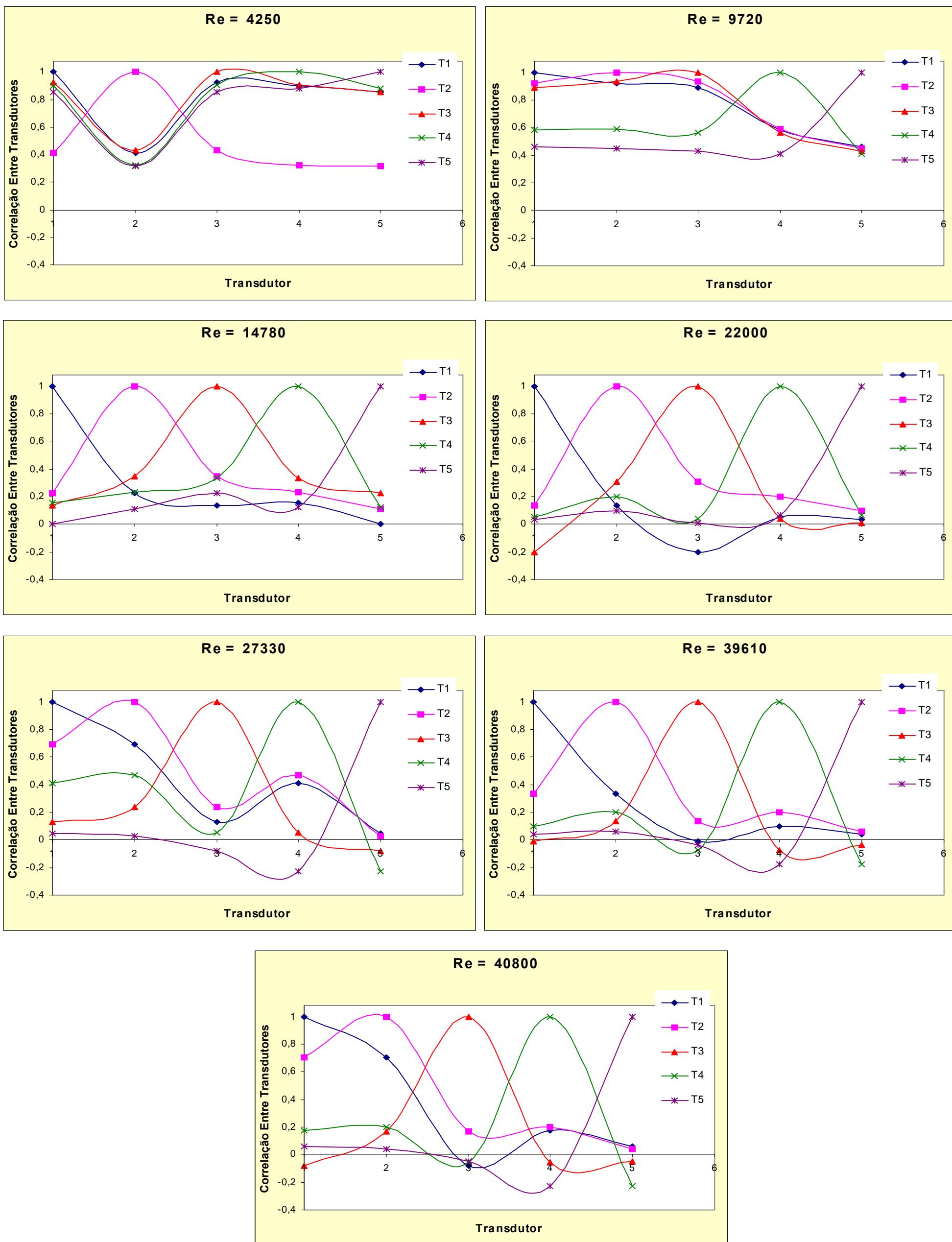


Fig. 4.8 – A Correlação Espacial das flutuações de pressão, nos ensaios no leito do canal.

Autocorrelação

Como pode ser visto na figura 4.9, os dados dos ensaios de leito apresentaram a tendência geral de redução de autocorrelação, a valores cada vez maiores de Defasagem (ou Retardo Temporal) Adimensional: $\Delta t * U/D$. As legendas são as mesmas empregadas nos gráficos de correlação espacial. Dentro do intervalo 0,01 e 0,3 de defasagem pode ser constatada, na maior parte dos dados, a existência de “picos” de autocorrelação de mínimos e máximos, alternadamente, indicando a presença de “harmônicos” (repetição de picos de autocorrelação) nas características de pressão do escoamento. Alguns destes mínimos locais apresentam elevadas autocorrelações negativas e é interessante notar que, ao seguir a direção de aumento de defasagem, após a região que concentra os “harmônicos” surge uma evidente elevação de autocorrelação e, logo após esta, entra em “declínio”.

Pode-se supor que, o fenômeno que ocasiona este processo, no escoamento próximo a ambos os transdutores é o mesmo, havendo uma leve distinção devido à maior proximidade de um deles, ao cilindro. Identificou-se, ainda, nos dados provenientes dos transdutores localizados em X/D iguais a -0,625, 0,625 e 1,875 (T3, T4 e T5), uma tendência geral à suavização da amplitude destes harmônicos, a medida que o número de Reynolds aumenta. Comportamento distinto foi encontrado nos dados provenientes dos transdutores localizados a X/D iguais a -3,125 e -1,875, dispostos mais a montante do cilindro. Estes dados apresentaram, com o aumento do número de Reynolds, alternância na intensidade de seus “harmônicos”, ora estes ocorrendo de forma discreta (com pequenas amplitudes), ora, bem caracterizados (grandes amplitudes).

Assim, os dados provenientes do transdutor localizado a X/D igual a -1,875, inicialmente, em número de Reynolds igual a 4250, apresentaram “harmônicos” discretos. Posteriormente, em número de Reynolds igual a 9720, passaram a apresentar harmônicos com grande amplitude de variação. No entanto, no ensaio seguinte (Reynolds igual a 9720), novamente houve uma suavização das amplitudes dos harmônicos que, a partir do ensaio seguinte, se reverte, havendo um novo aumento nas amplitudes, situação esta que se manterá nos ensaios seguintes.

Nos dados provenientes do transdutor localizado a X/D igual a -3,125, inicialmente (Re = 4250 e 9720), apresentaram “harmônicos” bem caracterizados e, em ensaios posteriores

($Re = 14780$ e 22000), passaram a apresentar harmônicos com amplitudes mais discretas. A partir do próximo ensaio ($Re = 27330$), a situação novamente se reverte, havendo aumento das amplitudes dos harmônicos, situação que se manterá até o último ensaio.

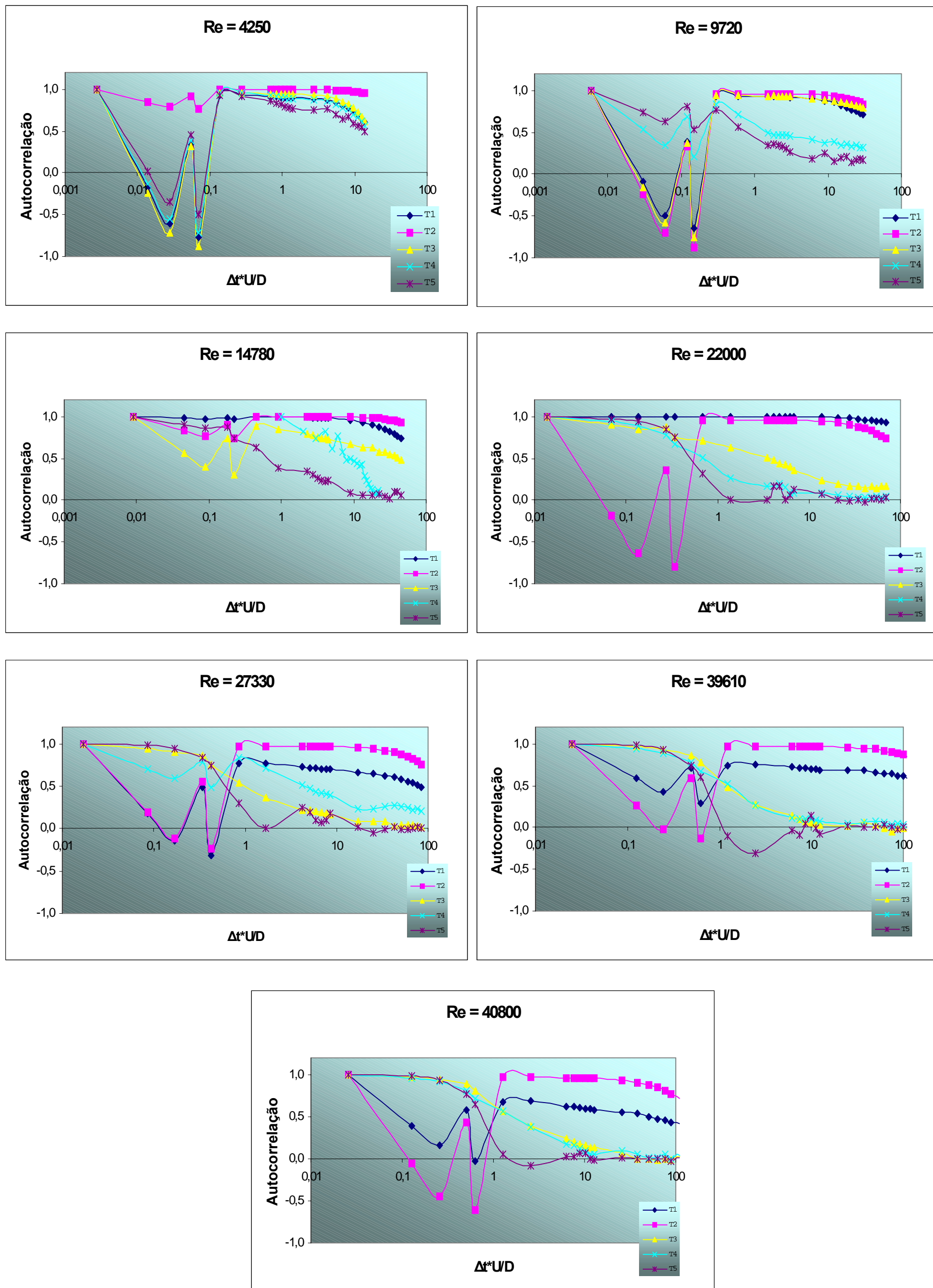


Fig. 4.9 – A Autocorrelação dos dados, nos ensaios no leito.

Análise espectral

A análise espectral revela de que forma é realizada a distribuição de energia, proveniente do escoamento de aproximação, entregue às frequências componentes do sinal do transdutor. Para sua determinação, empregou-se o software Matlab 4.2, através da função psd (função de densidade auto-espectral), empregando como parâmetros: número de pontos igual a 1024, frequência de amostragem 200 e janela 1024, o que determinou uma largura de janela de 0,2 Hz.

A figura 4.10 apresenta os espectros de potência calculados, para os dados provenientes dos ensaios no leito, na coluna da esquerda para a situação sem o cilindro e, na coluna da direita, com cilindro. A comparação destes espectros permite esclarecer de que forma se manifesta a influência do cilindro, na distribuição local de energia.

Conforme os resultados, como esperado, a presença do cilindro propicia, a nível local, um significativo aumento da proporção de energia entregue aos processos turbulentos, em relação à situação sem cilindro. Este comportamento é tanto mais evidente, quanto maior o número de Reynolds. Assim, nos números de Reynolds mais altos dos experimentos, quantidades bem superiores de energia são entregues à processos turbulentos, proporcionalmente ao sinal original.

A tendência geral dos resultados foi apresentar, nos menores valores de Reynolds, duas ou três frequências bem definidas, com máximos de energia localizados em frequências menores que 1 Hz. À medida que o números de Reynolds aumenta, estas frequências gradativamente perdem definição em um processo de “espalhamento”, no qual a energia passa a distribuir-se sobre um intervalo de frequências, com grande número de componentes de menor expressão energética.

Porém, em dado momento ($Re = 22000$), os espectros dos transdutores em $X/D = 0,625$ (T4) e $X/D = 1,875$ (T5) passam a apresentar frequências acima de 3 Hz com expressão energética, muito provavelmente relacionada ao desprendimento dos vórtices da esteira. Em todos o ensaios, o número de Strouhal, dado por $St = fD/U$, praticamente, não ultrapassaram o valor de 0,42.

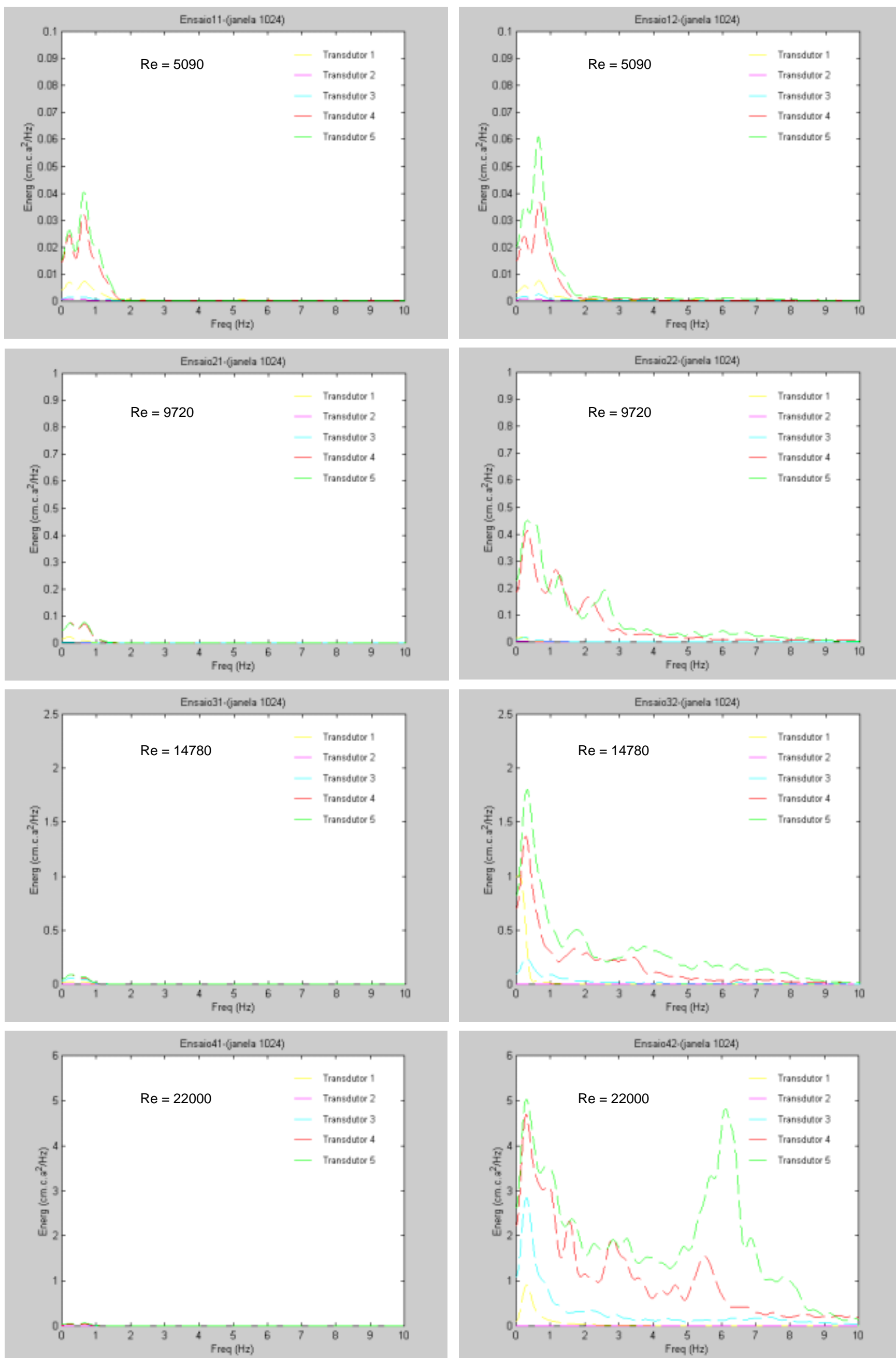


Fig. 4.10 – Os Espectros de Potência dos dados, nos ensaios no leito (continua).

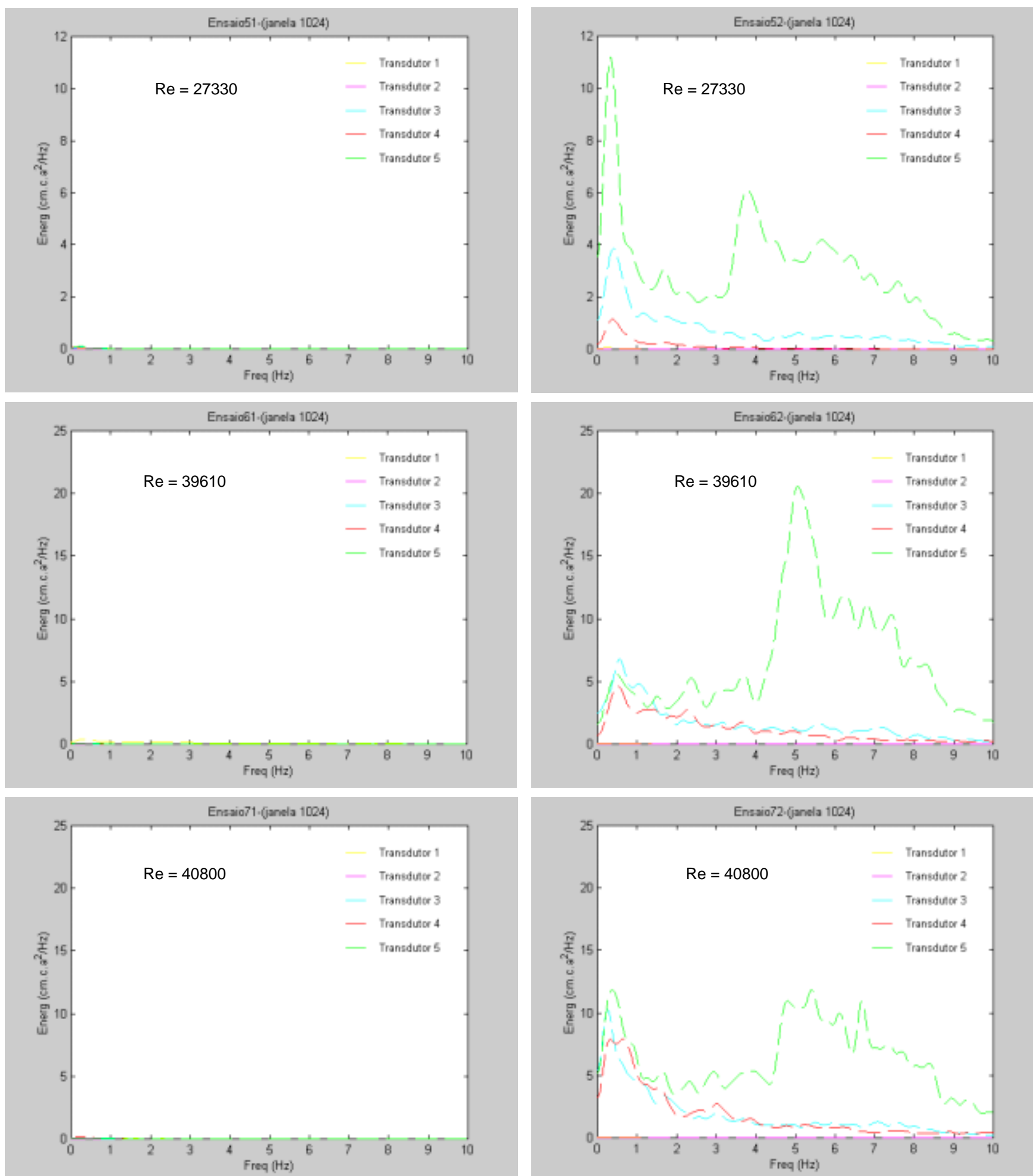


Fig. 4.10 – Os Espectros de Potência dos dados, nos ensaios no leito (continuação).

4.2.2 As Pressões ao redor do cilindro

4.2.2.1 Análise Estatística

Características Médias

As figuras 4.11 – a e b apresentam valores absolutos e adimensionalizados, respectivamente, de Pressão Dinâmica Média para as posições adimensionalizadas X/D , para os ensaios de superfície. A característica geral apresentada pelos resultados foi redução do valor da Pressão Dinâmica, à medida que se percorre a superfície do cilindro, com esta redução tornando-se mais intensa, à medida que o número de Reynolds aumenta. Os dados apresentam grande simetria e demonstram a existência de um ponto onde a pressão passa a assumir valores negativos, o qual estima-se estar localizado em torno 22° e 23° . Estas regiões de pressão negativa, ao redor do cilindro, estão associados ao descolamento a Camada Limite. Os valores obtidos também indicam que o transdutor 0° - superior, apresenta em todas as situações, Pressão Dinâmica superior ao seu análogo, o transdutor em 0° - inferior, o que pode ser justificado pela influência do perfil de velocidades do escoamento de aproximação.

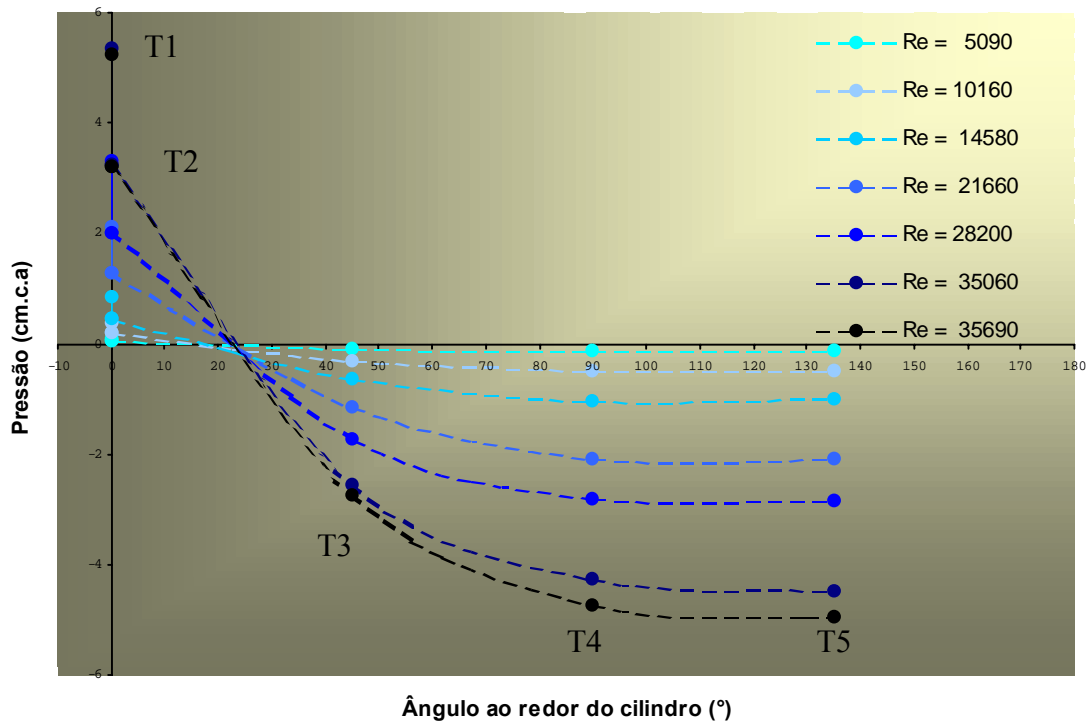


Fig. 4.11.a – Pressão Dinâmica Média, nos ensaios de superfície.

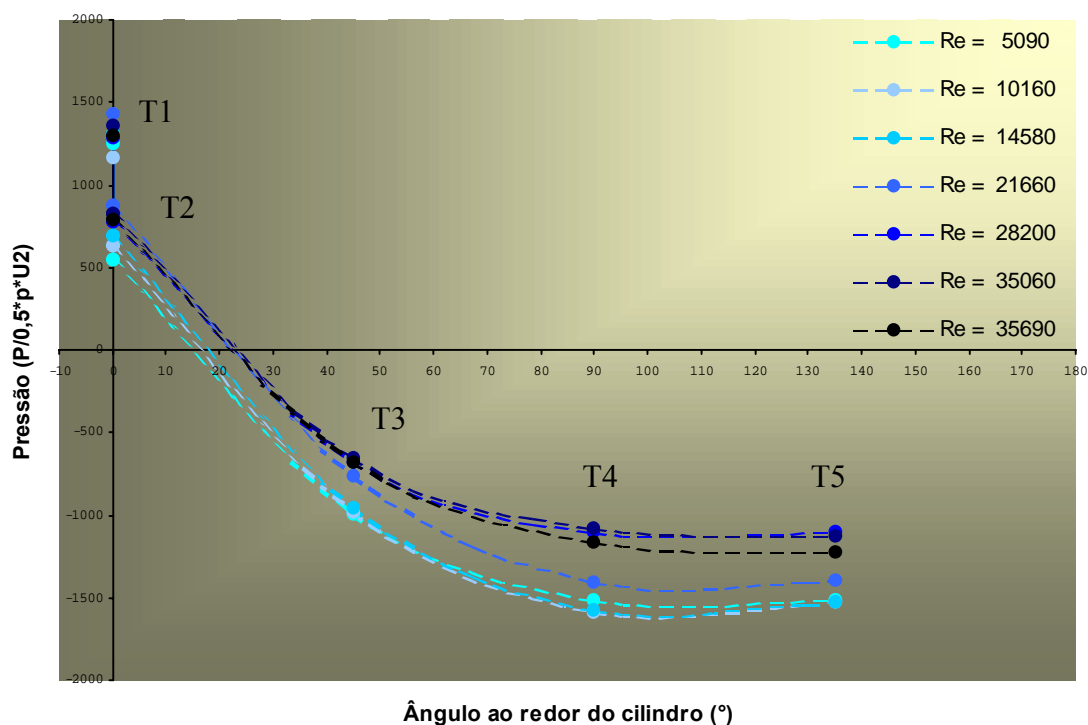


Fig. 4.11.b – Pressão Dinâmica Média adimensionalizada, nos ensaios de superfície.

Apesar dos dados terem sido obtidos da superfície do cilindro em posições próximas ao leito, havendo, então, forte influência da parede, pode-se notar grande semelhança com o gráfico apresentado na figura 2.5.

Intensidades da Turbulência – RMS

A figura Fig. 4.12, traz, para os ensaios de superfície, a análise dos RMS de pressão. A figura demonstrou que, conforme o esperado, o valor nominal do RMS aumenta para todos os transdutores, com o acréscimo do Re. Nesta figura e posteriores relacionadas aos ensaios de superfície, os índices T1, T2, T3, T4 e T5 referem-se aos transdutores localizados em 0° - superior, 0° - inferior, 45°, 90° e 135°, respectivamente, sendo esta abordagem novamente justificada, pelas vantagens na apresentação dos resultados.

Até $Re = 21660$, os RMS de pressão apresentam-se com pouca variação. Contudo, a partir de $Re = 28200$, o transdutor T2 (0° - inferior) passa a apresentar um aumento em relação aos demais. Posteriormente, o mesmo ocorre com os transdutores T4 e T5 (90° e 135°, respectivamente), a partir de $Re = 35060$. Pode-se verificar nos resultados que, o transdutor T3 (45°) se apresenta como uma região de menor atividade turbulenta que o transdutor

T4 (90°), o que se justifica por este localizar-se após o ponto de separação que nesta faixa de números de Reynolds, deve estar em torno de 80° (White, 1991).

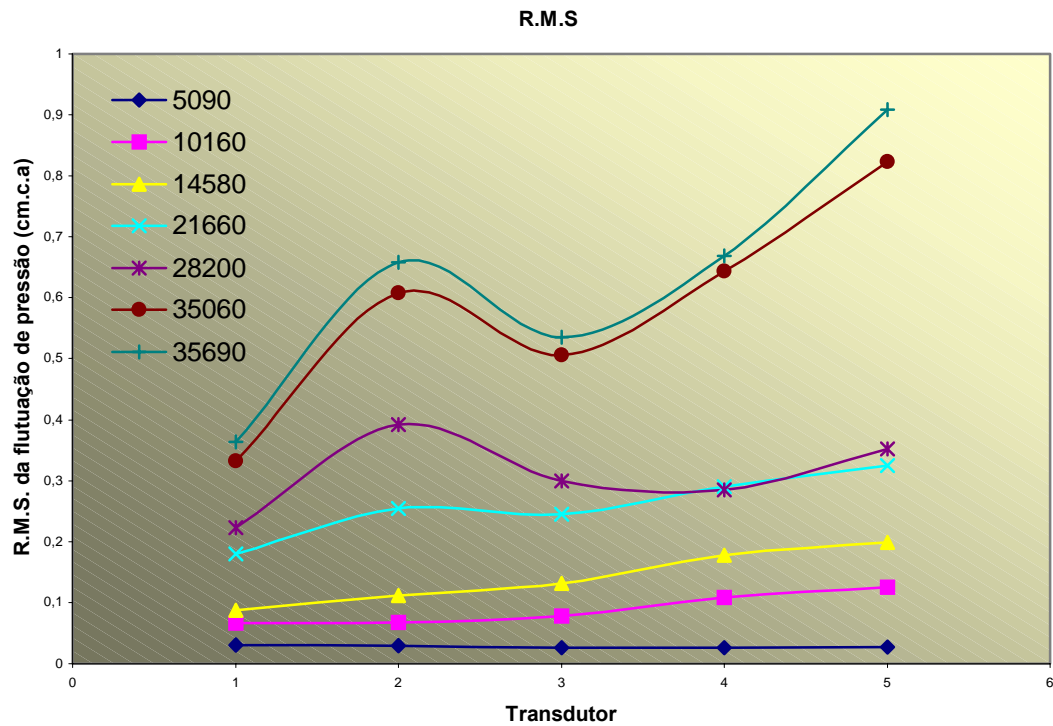


Fig. 4.12 – R.M.S dos dados, nos ensaios de superfície.

4.2.2.2 Análise de Correlações e Análise Espectral

Correlação Espacial

Na figura 4.13 é apresentada a correlação espacial entre os dados, para os ensaios na superfície do cilindro. No princípio, em $Re = 5090$, todos os transdutores apresentaram, relativamente, boa correlação entre si. No entanto, a partir do ensaio de $Re = 9720$, com o aumento do número de Reynolds, passou a haver uma perda gradativa das correlações entre os transdutores. Isto ocorreu, mais intensamente, entre os transdutores a 0° (superior e inferior ou T1 e T2, respectivamente), enquanto que, os transdutores localizados em 45° , 90° e 135° (T3, T4 e T5, respectivamente), exibiam patamares superiores de correlação.

Entre $Re = 5090$ e 9720 houve uma substancial diminuição das correlações entre os transdutores e, a partir de $Re = 9720$, passa a haver uma perda gradativa das correlações entre os transdutores, com o aumento do número de Reynolds. Isto ocorre de modo mais intenso com os dois transdutores a 0° , do que com os transdutores a 45° , 90° e 135° , que exibem patamares superiores de correlação, quando comparados àqueles. É interessante salientar esta elevada correlação apresentada pelo transdutor T3 com relação aos transdutores T4 e T5, em contrapartida com a baixa correlação com T1 e T2. A julgar que T3 encontra-se localizado na face de montante do cilindro seria de se esperar que as maiores correlações entre transdutores estivessem entre aqueles dispostos na mesma face. Contudo, não é o que ocorre, estando T3 melhor correlacionado com os dois transdutores da face de jusante.

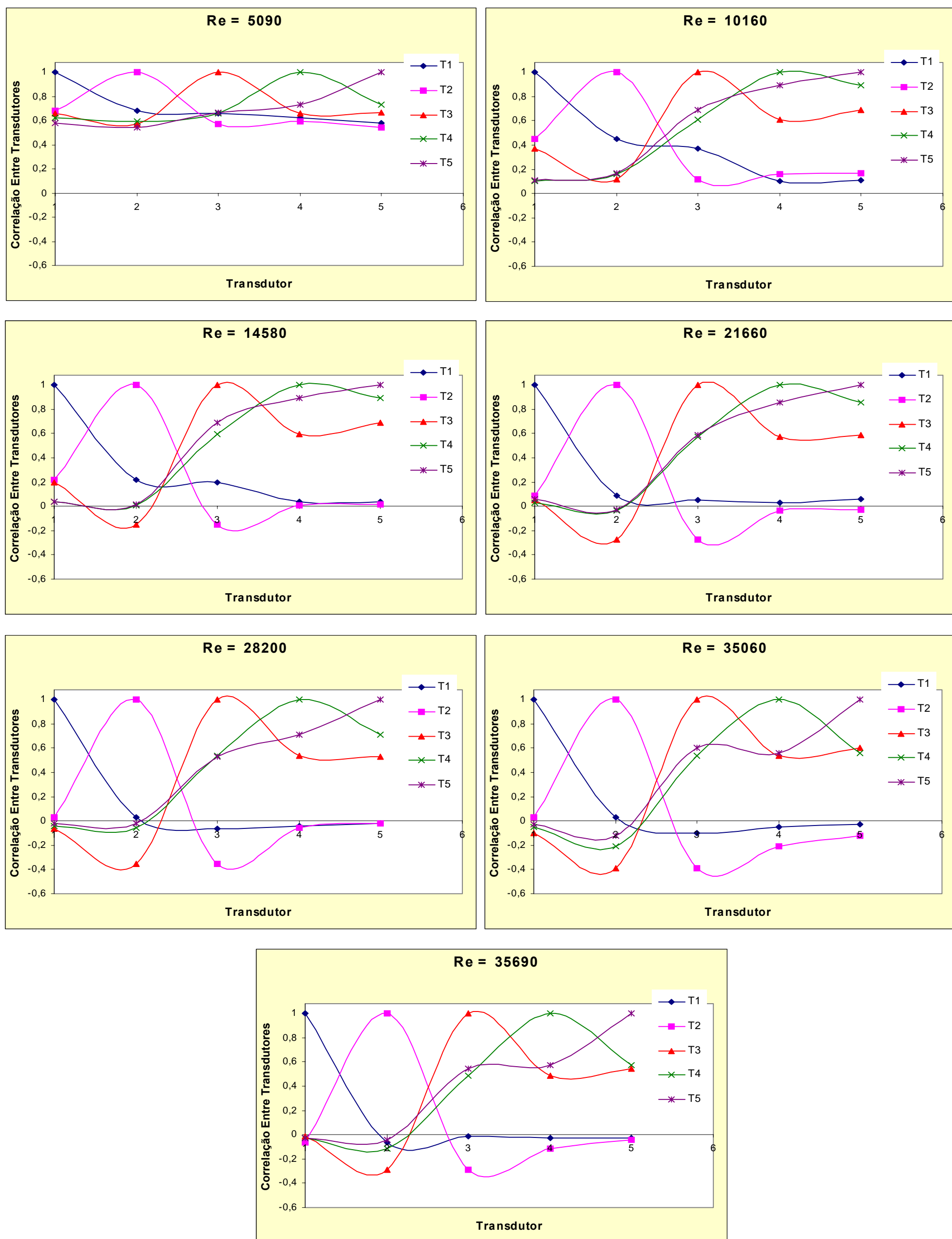


Fig. 4.13 – A Correlação Espacial das flutuações de pressão, nos ensaios de superfície.

Autocorrelação

Nos ensaios na superfície do cilindro, como pode ser verificado na figura 4.14, a tendência geral dos dados dos transdutores foi, ao se percorrer o eixo das abcissas, na direção de valores crescentes de defasagem, de apresentar elevadas autocorrelações para valores de Defasagem (ou Retardo Temporal) Adimensional ($\Delta t \cdot U/D$) levemente menores que 1 e começando, então, a perder rapidamente correlação em um processo de acentuado declínio, alcançando valores praticamente nulos em defasagens superiores a, aproximadamente, 25.

Em todos os resultados, como ocorre nos dados dos ensaios de leito, também são identificados diversos máximos e mínimos locais, em alternância e, ainda, certa periodicidade de ocorrência, formando “harmônicos”. No entanto, estes “harmônicos”, diferentemente dos dados de leito, ocorrem dentro da região de “declínio”, sofrendo influência deste processo. Estes harmônicos do escoamento têm seus primeiros mínimos localizados entre um intervalo de defasagem de 1,35 e 2,25, sendo que, grande parte dos transdutores apresenta correlações negativas. Os transdutores localizados à 45°, 90° e 135° (T3, T4 e T5, respectivamente), apresentam as menores correlações. Logo após estes mínimos, no sentido crescente de valores de defasagem, em todos os resultados, constata-se a ocorrência de máximos relativos, entre defasagem de 4 e 5,6, aproximadamente. Posteriormente a estes, diversos outros mínimos e máximos locais, cada vez mais discretos (acompanhando o processo de declínio de correlação), podem ser identificados.

Em resumo, os dois transdutores localizados à 0° apresentaram um comportamento mais conservador apresentando menores amplitudes entre máximos e mínimos, enquanto que os transdutores localizados à 45°, 90° e 135°, mostraram maior amplitude entre picos, demonstrando, em linhas gerais, maior presença de características periódicas do escoamento, a qual é tanto mais intensa, à medida que se percorre diametralmente o contorno do cilindro em direção a jusante. Este fato não é completamente óbvio, quando se leva em consideração o fato do transdutor localizado a 90° apresentar, geometricamente, menores componentes do vetor velocidade, do escoamento de aproximação, podendo-se esperar menor intensidade de componentes transversais ao escoamento, direção na qual o sensor do transdutor atua.

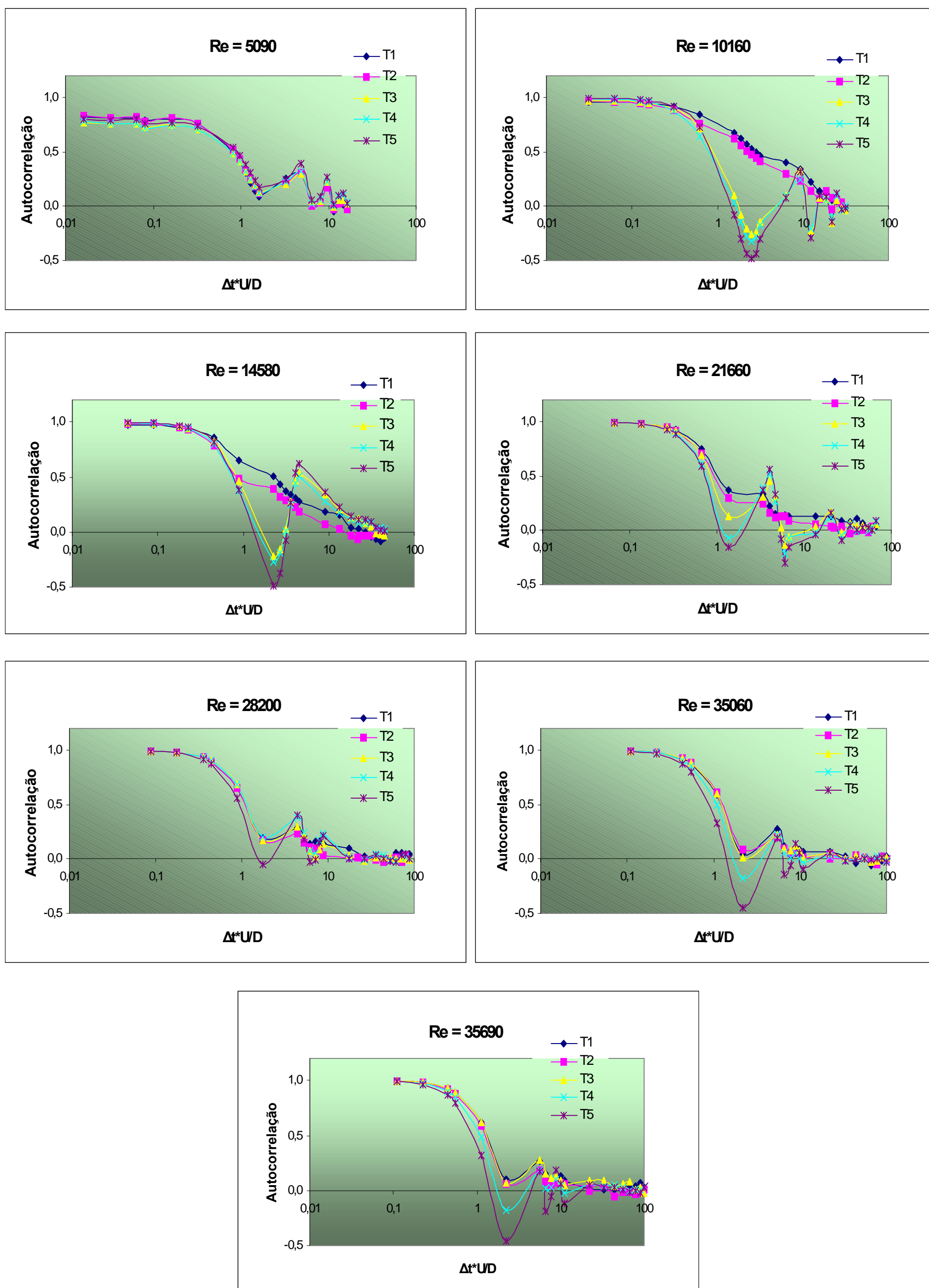


Fig. 4.14 – A Autocorrelação dos dados, nos ensaios de superfície.

Análise espectral

Neste momento, então, são apresentados os resultados (Fig. 4.15), para os espectros de potência calculados, a partir dos dados provenientes dos ensaios de superfície. Estes espectros, assim, permitem um reconhecimento da distribuição local de energia, entregue às frequências componentes dos sinais dos transdutores, ao redor do cilindro. A determinação dos espectros foi realizada do modo que nos dados de leito.

Estes espectros apresentam máximos em frequências bem melhor caracterizadas, do que no caso dos ensaios de leito. Porém, da mesma forma que os ensaios de leito, à medida que o Reynolds aumenta, estas frequências gradativamente perdem definição em um processo de “espalhamento”, com a energia distribuindo-se sobre um intervalo de frequências. O número de Strouhal associado a estas frequências variou entre 0,02 e 0,24, aproximadamente.

São evidentes nos resultados, basicamente, duas frequências dominantes, das quais a primeira varia entre aproximadamente 0,3 Hz e 0,7 Hz, ao longo dos ensaios; e a segunda cresce com Reynolds de um valor definido de 0,7 Hz, no menor Re , até uma faixa de dispersão de frequências entre 2 e 4 Hz, para os números de Reynolds mais elevados. A segunda frequência apresentou predominância energética sobre a primeira até $Re = 28200$, onde começa a haver “espalhamento” do sinal, e as frequências se equiparam na mesma ordem de importância.

O espectro do transdutor a 0° – superior, apresentou menor atividade turbulenta que os demais transdutores, numa indicação que o leito, ao redor do cilindro, desempenha um papel mais ativo, quanto à atividade hidrodinâmica.

Também, é interessante notar o comportamento apresentado pelo transdutor localizado a 135 graus que, a partir de $Re = 35060$, apresenta um máximo de grande energia em torno de 5 Hz. O número de Strouhal associado a este pico é calculado em aproximadamente 0,22 e muito provavelmente, descreve a energia entregue aos fenômenos da esteira.

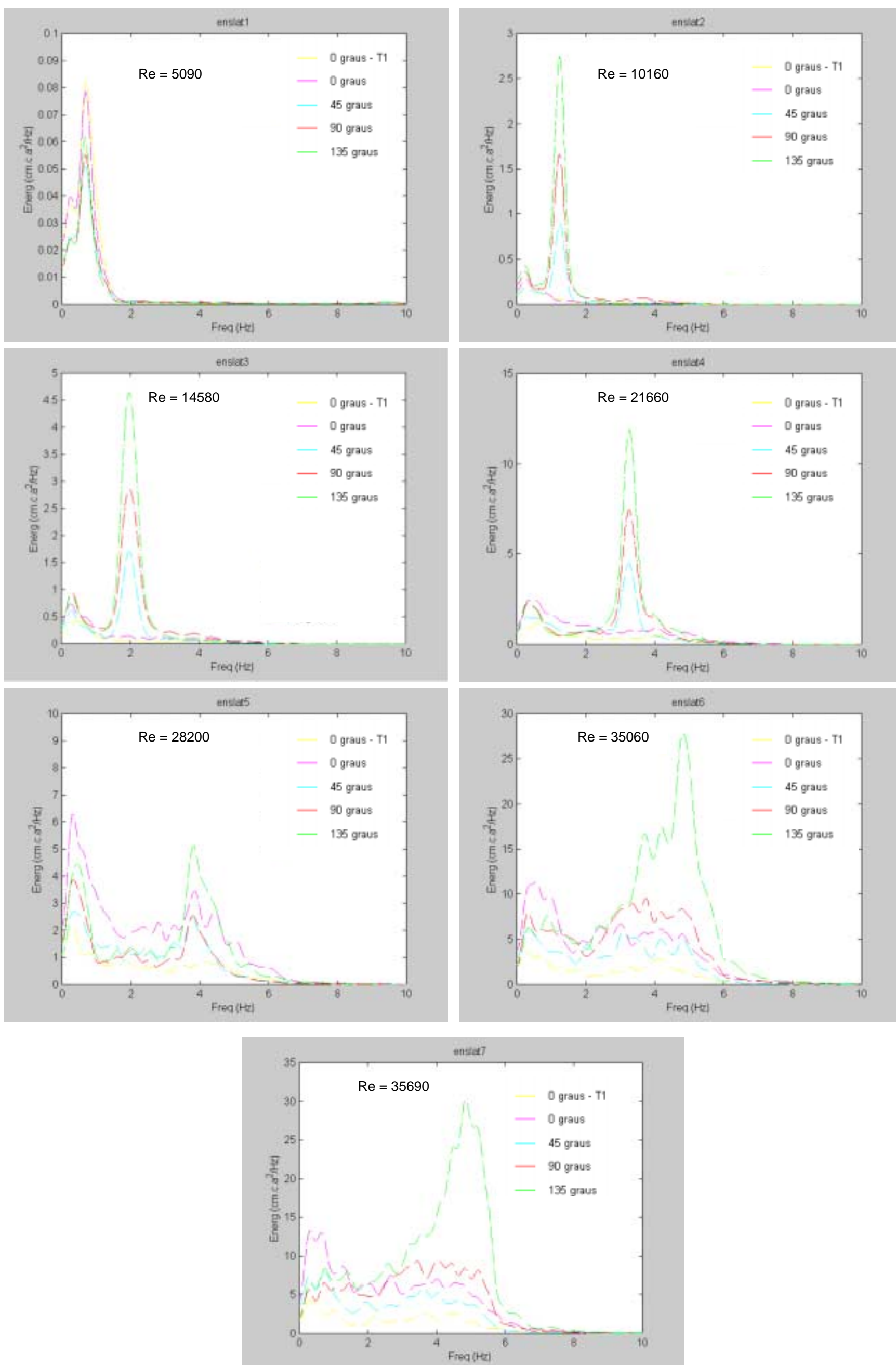


Fig. 4.15 – Os Espectros de Potência dos dados, nos ensaios na superfície do cilindro.

4.2.3 Número de Strouhal para os Resultados

Como síntese dos resultados obtidos a partir dos espectros de potência para as medições de pressão, no leito do canal e na superfície do cilindro, na figura 4.16, pode ser visualizado o comportamento do número de Strouhal, calculado para as frequências que apresentaram máximos de energia.

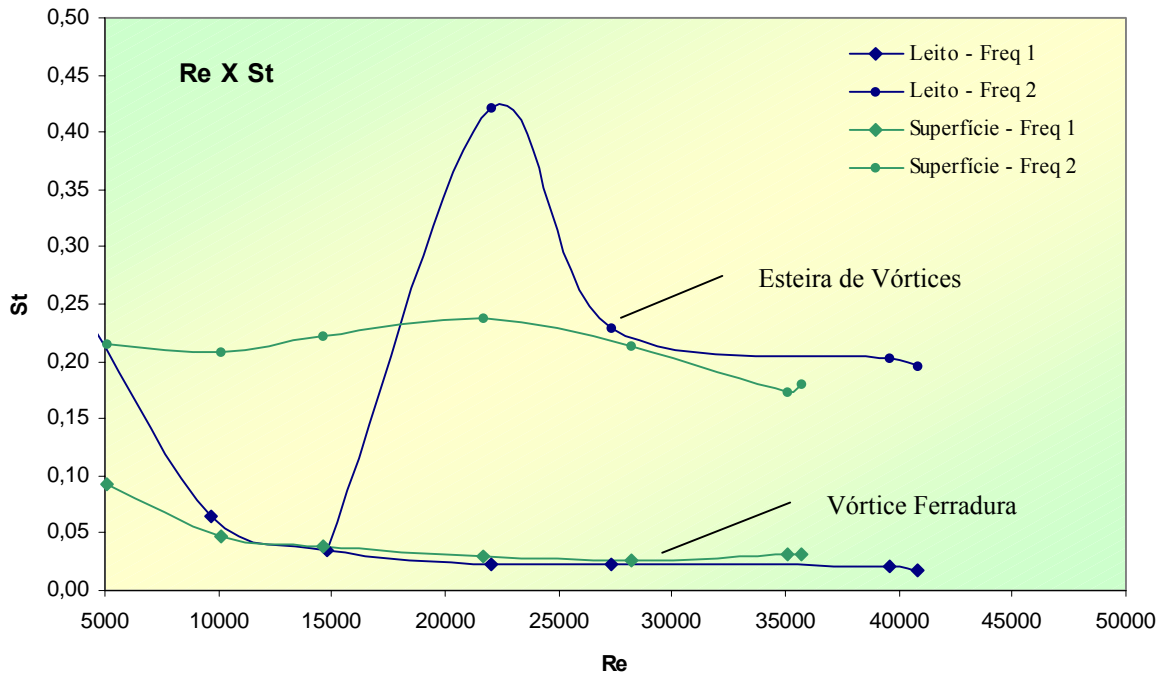


Fig. 4.16 – O Número de Strouhal para frequências obtidas dos Espectros de Energia.

Na figura são apresentados os números de Strouhal calculados para as duas frequências predominantes encontradas pela análise espectral dos dados, e desenvolvidas ao longo dos ensaios. A primeira frequência estaria relacionada ao Vórtice ferradura (Frequência 1), e a segunda (Frequência 2) ao desprendimento de vórtices da esteira.

Pode-se notar que as primeiras frequências (Vórtice Ferradura), para ambos ensaios apresentam valores e comportamentos muito próximos, culminando em um número de Strouhal de aproximadamente 0,025, nos Reynolds mais altos.

Quanto à segunda frequência (esteira), para ambos ensaios, a comparação já demonstra comportamentos mais distintos, contudo, culminando em um resultado interessante: Strouhal de aproximadamente 0,2 para os números de Reynolds mais altos, que pode ser verificado na figura 2.15. Não foram representados os “espalhamentos” de frequência.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

5.1.1 VISUALIZAÇÕES

A maior vantagem no emprego da técnica de visualização sobre outras é o fato de tratar-se de uma metodologia não-intrusiva, não interferindo nas características do escoamento, exceto pela injeção de corante. As imagens adquiridas neste trabalho, adicionalmente às análises conduzidas aqui, ainda podem servir de substrato de estudo para outras características hidrodinâmicas que não fazem parte do escopo deste estudo, ficando, então, sugestão para trabalhos posteriores.

É importante lembrar que, o maior pressuposto que está por trás deste processo de visualização de escoamento é o de que o corante, injetado no escoamento, representa fielmente as características do Vórtice Ferradura. Acreditando que este pressuposto tenha se cumprido, diversas características do comportamento hidrodinâmico do Vórtice Ferradura puderam ser reconhecidas e analisadas, a partir das imagens obtidas. São elas: o processo de formação do vórtice, a variabilidade espacial da posição do núcleo do vórtice, a presença de um vórtice secundário e o comportamento do diâmetro do vórtice. Os diversos pares de vórtices, citados na literatura, não puderam ser detectados.

A obtenção de uma seqüência de quadros detalhando o processo de formação do vórtice pôde ser obtido, comprovando descrições fornecidas pela literatura. As imagens, também, permitiram o reconhecimento de processos hidrodinâmicos de permanência e desprendimento do Vórtice, os quais, regularmente se repetem. Como esperado, em altos números de Reynolds, os intervalos de formação e desprendimento do Vórtice, reduzem-se drasticamente.

A variabilidade espacial do Vórtice Ferradura constituiu-se de sucessivos deslocamentos e oscilações de posição, em distâncias próximas ao cilindro, ocorrendo tanto durante o período de formação, como de permanência do Vórtice. Os deslocamentos ficaram restritos à distância de, aproximadamente, metade do diâmetro do cilindro e, aparentemente, possuem frequência mais ou menos definida. A amplitude destas variações diminui, gradativamente, à medida que o número de Reynolds aumenta, com o Vórtice adotando uma

posição mais definida e relativamente estável, nos números de Reynolds mais altos do experimento.

As imagens permitiram, também, detectar a presença de um vórtice secundário, em imagens de diversos ensaios. As imagens concordam com os resultados da bibliografia consultada, que atribui sua existência ao surgimento de uma região concentradora de vorticidade oposta à vorticidade do vórtice primário. Porém, aparentemente, o vórtice secundário é estável, pois a turbulência do escoamento provoca o seu surgimento e remoção, assim como, dificulta sua detecção.

Por fim, obtiveram-se indicações de uma leve tendência de aumento do diâmetro do Vórtice, com o crescimento do número de Reynolds, tendendo a um valor máximo possível, relacionado ao diâmetro do cilindro.

O trabalho, portanto, comprovou a viabilidade do método, apresentando uma metodologia de baixo custo de implantação (principalmente por não demandar a aquisição de equipamentos científicos específicos ao experimento), para visualização, em água, do Vórtice Ferradura. Resultados muito satisfatórios foram obtidos, dado os objetivos propostos, podendo a metodologia ser estendida ao emprego em canais de tamanho reduzido, em acrílico ou vidro, por exemplo. Como esta análise se deu, predominantemente, em termos qualitativos, os erros inerentes aos fenômenos óticos de difração e refração, assim como, os provenientes dos processos de aquisição e tratamento das imagens, não foram quantificados.

5.1.2 MEDIÇÕES DE PRESSÃO

O campo de escoamento, na vizinhança de um cilindro circular, foi investigado experimentalmente, através de medições de pressão. O objetivo geral destas medições foi a caracterização do campo de pressões modificado pela presença do Vórtice.

Os ensaios empregaram cinco transdutores e foram divididos entre medições com tomadas de pressão no leito, no eixo de simetria, e ao redor da superfície do cilindro estando, todos, descritos no capítulo 3. Os ensaios de leito foram conduzidos para o número de Reynolds variando entre 4250 a 40800 e, os ensaios de superfície foram conduzidos para o número de Reynolds variando entre 5090 a 35690.

Os dados obtidos dos transdutores, antes de sofrer o processamento, foram avaliados quanto à sua integridade, estacionariedade e ergodicidade e apresentaram, em geral, baixa tendenciosidade, salvo exceções. Estas, possivelmente, relacionadas a fenômenos não-hidráulicos como, por exemplo, de origem elétrica que conduziu à retirada de alguns dados das análises.

As análises tiveram como parâmetros de cálculo a obtenção das variáveis pressões médias, flutuações de pressão (intensidades da turbulência ou RMS), correlações espaciais e temporais, espectros de potência e o número de Strouhal.

Para as pressões médias, foi adotada como variável de análise a Pressão Dinâmica, por ser independente da lâmina de água, a qual foi, obrigatoriamente, diferente ao longo dos ensaios. Os resultados para o leito, sem a presença do cilindro, detectaram a existência de baixas pressões dinâmicas (inclusive valores negativos), numa indicação de influência, muito provavelmente, de irregularidades do leito do canal. Ainda, os resultados indicaram que a presença do cilindro, em geral, se manifestou como acréscimo de pressão a montante e redução a jusante do cilindro, a qual torna-se menos intensa a medida que o número de Reynolds aumenta.

O cálculo das intensidades da turbulência (RMS) fornece indicações valiosas ao demonstrar espacialmente onde se concentram as atividades turbulentas. Obviamente, os resultados demonstraram a tendência geral de aumento de atividade turbulenta com o aumento do Reynolds. É curiosa a existência de baixos valores de RMS apresentados na resposta do segundo transdutor ($X/D = -1,875$), ao longo de todos os ensaios, não obstante todos os demais tenham sofrido aumento, à medida que o Reynolds aumentava.

Para os ensaios de superfície do cilindro, os resultados de pressão dinâmica média mostram, no transdutor à posição angular 0° - superior, pressão dinâmica superior ao seu análogo (o transdutor na posição 0° - inferior), o que pode ser justificado pelo perfil de velocidades do escoamento de aproximação. Em termos gerais, os dados indicam redução do valor da pressão dinâmica, à medida que se percorre radialmente a superfície do cilindro, com esta redução tornando-se mais acentuada, à medida que o Reynolds aumenta. Os dados apresentam grande simetria e demonstram a existência de um ponto onde a pressão passa a assumir valores negativos, o qual estima-se estar localizado entre 22° e 23° .

Para os ensaios de superfície, a análise dos RMS de pressão também mostrou, como esperado, um crescimento com o aumento do número de Reynolds, em especial nos transdutores colocados nas posições 90° e 135°, os quais, estão relacionados aos processos de despreendimento dos vórtices da esteira. Os RMS do transdutor à posição angular 0° - superior apresentou valores bem inferiores aos demais transdutores, numa indicação de que os processos hidrodinâmicos de maior importância, que ocorrem ao redor do cilindro, estão mais limitados a regiões próximas ao leito. Também é interessante notar que nos $Re = 35060$ e 35690 , o transdutor localizado a 45° apresentou reduzidos valores de RMS, se comparado aos demais transdutores.

A correlação espacial procura encontrar correspondência entre os comportamentos dos transdutores. A autocorrelação, ao procurar correspondência temporal dentro de uma série de dados, objetiva identificar comportamentos periódicos, dentro dos dados. Os resultados de correlação espacial apresentam tanto para leito como superfície, como esperado, a tendência geral de redução de correlação, com o aumento do número de Reynolds.

Os dados de autocorrelação dos ensaios de leito, também apresentaram a tendência geral de redução, a valores cada vez maiores de Defasagem (ou Retardo Temporal) Adimensionalizado e que, dentro do intervalo 0,01 e 0,3 pode ser constatada na maior parte dos dados, a existência de “picos” de mínimos e máximos de autocorrelação, alternadamente. Alguns destes mínimos locais apresentam elevadas autocorrelações negativas e é interessante notar que, ao seguir a direção de aumento de defasagem, após a região que concentra estes “harmônicos” surge uma evidente elevação de autocorrelação e, logo após, esta entra em “declínio”.

Nos resultados de autocorrelação, para os ensaios de superfície, a tendência geral dos dados dos transdutores foi, para o acréscimo de defasagem, apresentar elevadas autocorrelações para valores de defasagem até aproximadamente 1 e, então, perder correlação dentro de um processo de acentuado declínio que alcança valores praticamente nulos em defasagens superiores à aproximadamente 25. Do mesmo modo, como ocorre nos dados dos ensaios de leito, também são identificados diversos máximos e mínimos locais, em alternância, formando “harmônicos” estes, contudo, ocorrendo dentro da região de “declínio” e sofrendo sua influência. Os harmônicos têm seus primeiros mínimos locais localizados entre um intervalo de defasagem adimensional de 1,35 e 2,25, em grande parte dos transdutores

apresenta correlações negativas e, logo após estes mínimos, no sentido crescente de valores de defasagem, em todos os resultados, constata-se a ocorrência de máximos relativos, entre defasagem de 4 e 5,6, aproximadamente.

Em suma, na análise da autocorrelação dos dados de superfície dos dois transdutores localizados a 0° apresentaram um comportamento mais conservador ao apresentar menores amplitudes entre máximos e mínimos, enquanto que os transdutores localizados a 45°, 90° e 135°, mostraram maior amplitude entre picos, demonstrando, em linhas gerais, maior presença de características periódicas do escoamento, a qual é tanto mais intensa, à medida que se percorre o contorno do cilindro em direção à jusante. Este fato não é completamente óbvio, quando se leva em consideração o fato do transdutor localizado a 90° apresentar, geometricamente, menores componentes do vetor velocidade, do escoamento de aproximação, podendo-se esperar menor intensidade de componentes transversais ao escoamento, direção na qual o sensor do transdutor atua.

A análise espectral, nos ensaios de leito, com os espectros de potência calculados para as situações sem e com cilindro permitiu comparações que podem ajudar a esclarecer de que forma acontece a influência do cilindro, na distribuição local de energia. Já os espectros de potência calculados a partir dos dados provenientes dos ensaios de superfície permitem um reconhecimento da distribuição local de energia, ao redor do cilindro. Contudo, o resultado de maior importância reside na possibilidade de identificação da frequência do vórtice e na comparação entre as quantidades de energia envolvidas no desprendimento do Vórtice Ferradura e dos vórtices da esteira.

A tendência geral de todos resultados foi apresentar, nos menores valores do número de Reynolds, dois ou três máximos locais bem definidos, localizados em baixas frequências (<10 Hz), com o primeiro acontecendo em frequências menores que 1 Hz. À medida que o número de Reynolds aumenta, estes máximos locais sofrem (principalmente o segundo), gradativamente, um processo de “espalhamento”, no qual a energia passa a distribuir-se sobre um intervalo maior de frequências, de menor expressão energética, denunciando a entrega de energia a processos turbulentos.

No leito, a energia dos espectros, sem o cilindro, apresentou aumento discreto, com o aumento do número de Reynolds, caracterizando nesta situação em específico, pouca influência deste parâmetro na turbulência próxima ao leito. Não obstante, obviamente, os

resultados revelam, também, que a presença do cilindro propicia, a nível local, um significativo aumento na quantidade de energia entregue aos processos turbulentos, em relação à situação sem cilindro. Este comportamento é tanto mais pronunciado, quanto maior o número de Reynolds. Assim, nos números de Reynolds mais altos dos experimentos, quantidades bem superiores de energia são entregues a processos turbulentos. Contudo, em dado momento ($Re = 22000$), os espectros dos transdutores em $X/D = 0,625$ e $X/D = 1,875$ passam a apresentar máximos acima de 3 Hz, com significativa expressão energética, muito provavelmente, relacionados ao desprendimento de vórtices na esteira. Em todos os ensaios, o número de Strouhal, praticamente, não ultrapassou o valor de 0,4.

Os espectros de superfície apresentam máximos em frequências bem melhor caracterizadas, do que no caso dos ensaios de leito. Porém, da mesma forma que os ensaios de leito, à medida que o número de Reynolds aumenta, estas frequências gradativamente degeneram-se. O número de Strouhal associado a estas frequências variou entre 0,02 e 0,24, aproximadamente. São evidentes nestes resultados, basicamente, duas frequências dominantes, das quais a primeira varia, ao longo dos ensaios, entre aproximadamente 0,3 Hz e 0,7 Hz; e a segunda cresce com o número de Reynolds de um valor definido de 0,7 Hz, no menor Re , até uma faixa de dispersão de frequências entre 2 e 4 Hz, nos números de Reynolds mais elevados. A segunda frequência apresentou predominância energética sobre a primeira até $Re = 28200$, onde começa a haver o “espalhamento” do sinal, e as frequências se equiparam na mesma ordem de importância.

O espectro do transdutor a 0° – superior, apresentou menor atividade energética que os demais transdutores, numa indicação que o leito, ao redor do cilindro, desempenha um papel mais ativo, quanto à atividade hidrodinâmica. É interessante notar, também, o comportamento apresentado pelo transdutor localizado a 135° que, a partir de $Re = 35060$, apresenta um máximo de grande energia em torno de 5 Hz. O número de Strouhal associado a este pico é calculado em aproximadamente 0,24 e muito provavelmente, descreve a energia entregue aos fenômenos da esteira.

Quanto ao cálculo do número de Strouhal, encontraram-se resultados interessantes. Para as frequências relacionadas ao Vórtice Ferradura, para ambos resultados dos ensaios apresentam valores e comportamentos muito próximos, culminando em um número de Strouhal de aproximadamente 0,025, nos números de Reynolds mais altos e quanto à frequência de desprendimento de vórtices da esteira, apesar de comportamentos distintos,

contudo, culminam em um número de Strouhal de aproximadamente 0,2 para uma ampla gama de números de Reynolds altos, conforme previsto pela literatura.

Adicionalmente, a análise conjunta dos resultados aponta para a possibilidade de existência de transições do escoamento, dado que diversas variáveis de (pressão média ou correlação espacial, por exemplo), a partir de determinado número de Reynolds, tiveram seu comportamento modificado. A literatura chega a identificar regimes de escoamento laminar e turbulento para o Vórtice.

Finalmente, com base nos resultados obtidos, conclui-se que a técnica empregada foi satisfatória aos objetivos propostos, na medida que permitiu o reconhecimento de diversas características hidrodinâmicas do campo de pressões, ao redor do cilindro.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Como característica inerente à técnica, o processo de análise através de visualização, além dos aspectos ditos exatos, pode apresentar uma componente subjetiva que está mais ou menos presente, de acordo com o tipo de processamento escolhido para as imagens. Dado o grande volume de dados obtidos, optou-se por um processo de amostragem visual, o que pode acarretar maior influência deste fator sobre o resultado final, por parte de quem procede as análises. Portanto, é de interesse a trabalhos futuros que estes resultados sejam revistos, de forma a quantificar e reduzir a presença desta influência, assim como, o aprimoramento da técnica de análise.

Quanto à qualidade das imagens obtidas, a resolução final permitiu o reconhecimento de características mais evidentes. A obtenção de resoluções superiores, buscando um produto para fins mais específicos, pode ser feita através do emprego de aparato experimental de menor dimensão como, por exemplo, canais de larguras menores que dispersam menos a luz, devido à menor quantidade de água na seção, devendo, obviamente, serem respeitados os efeitos de escala. Quando comparadas às visualizações feitas em túnel de vento empregando fumaça, as imagens obtidas apresentam resolução levemente inferior. Atribui-se isto às características inerentes ao fluido, como: refração, dispersão de luz, as interfaces entre o meio do vórtice (água) e o meio de instalação da câmera (ar), entre outros. Como alternativa para superar estes inconvenientes, poder-se-ia sugerir o emprego de uma câmera imersível. Porém, esta, além de tornar a medição intrusiva (interferindo no escoamento), ainda permitiria

distorções, sendo que estas, agora, seriam relativas à interface água/lente/ar. Assim, entende-se como melhoria ao método, o emprego de uma câmara de vídeo, com velocidades de obtenção maiores, portanto, capaz de obter imagens mais nítidas, devido a um menor tempo de exposição.

O estudo do campo de pressões fez emprego de um pequeno número de transdutores, na aquisição de informação de um considerável intervalo de valores do número de Reynolds, sendo que, ao longo deste intervalo, diversos aspectos foram constatados. Assim, faz-se alusão para um trabalho posterior, de investigação destas questões, principalmente a causa de alguns resultados intrigantes ocorridos entre $Re = 15000$ e 25000 , aproximadamente. Também, o emprego de um maior número de transdutores, reduzindo a discretização dos dados obtidos, pode fornecer resultados mais apurados. Outrossim, salienta-se a necessidade de um estudo detalhado sobre a influência das mangueiras empregadas nos ensaios laterais, no sentido a obter-se mais resultados quantitativos.

Em suma, diversos processos hidrodinâmicos foram reconhecidos, porém, não quantificados. Portanto, para uma análise futura, sugere-se o cálculo estatístico dos tempos e frequências de formação do Vórtice tanto para os resultados de visualização quanto para os dados de pressão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Ahmed, F. & Rajaratnam, N.**, The Three-dimensional Turbulent Boundary Layer Around Bridge Piers, *Journal of Hydraulics Research* vol.35, p. 209-224, 1997.
- [2] **Antonia, R. A.**, Conditional Sampling in Turbulence Measurement, *Annual Review of Fluid Mechanics* 13, p. 131-156, 1981.
- [3] **Agui, J. H., Andreopoulos, J.**, 1992, Experimental Investigation of a Three-dimensional Boundary Layer Flow in the vicinity of an Upright Wall Mounted Cylinder, *Journal of Fluids Engineering*, vol. 114, No. 4.
- [4] **Baker, C. J.**, 1991, The Oscillations of Horseshoe Vortex Systems, *Journal of Fluids Engineering*, vol. 113, No. 3.
- [5] **Ballio, F., Bettoni, C. e Franzetti, S.**, 1998, A survey of time-averaged characteristics of laminar and turbulent Horse Shoe Vortex, *Journal of Fluids Engineering*, vol. 120, NO. 2.
- [6] **Bendat, J. S. & Piersol, A. G.** Random Data, J. Wiley & Sons, N. York, 1986.
- [7] **Dargahi, B.**, 1987, Flow Field and Local Scouring Around a Cylinder, *Experiments in Fluids* TRITA-VBI-137 – Estocolmo – The Royal Institute of Technology Stockholm - Suécia.
- [8] **Dargahi, B.**, 1989, The Turbulent Flow Field Around a Cylinder, *Experiments in Fluids* 8, pp. 1-12 – Estocolmo – The Royal Institute of Technology Stockholm – Suécia.
- [9] **Doligalski, T. L., Smith, C. R., Walker, J. D. A.** Vortex Interactions With Walls, *Annual Review of Fluid Mechanics* 26, p. 573-616, 1994.
- [10] **Endres, L. A. M.**, Análise Experimental do Campo de Pressões Flutuantes em Bancos de Tubos Submetidos A Escoamento Transversal Turbulento, Tese (Doutorado), Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS, Porto Alegre, 1997.
- [11] **Ferreira, P. H. & Schettini, E. B. C.** Análise Experimental das Intensidades Turbulentas e Frequências da Pressão Dinâmica do Campo de Escoamento em torno de um Cilindro Circular, Próximo ao Fundo do Canal – *Anais do XIX Congresso Latino Americano de Hidráulica*, Vol. 2, p. 663-672 Córdoba, Argentina, 2000.
- [12] **Graf, W. H. e Yulistiyanto, B.** 1998, Experiments on Flow Around a Cylinder; the Velocity and Vorticity Fields. – *Journal of Hydraulic Research*, vol. 36, No. 4.
- [13] **Gomes, J. F.** Visualização de Escoamento Macroturbulento – Ressonância a Jusante de uma Comporta, Dissertação (Mestrado), Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS, Porto Alegre, 2000.
- [14] **Hughes, W. F. & Brighton, J. A.**, Dinâmica dos Fluidos, McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1979

- [15] **Krajnović, S., Davidson, L.**, Flow around A Three-Dimensional Bluff Body, 9th *International Symposium on Flow Visualization*, p. 177-1 to 177-10, 2000.
- [16] **Lesieur, M.**, Turbulence in Fluids, Kluwer Academic Publishers, London, 1997.
- [17] **Okamoto, S. & Sunabashiri, Y.**, , 1992, Vortex Shedding From a Circular Cylinder of Finite Length Placed on a Ground Plane, *Journal of Fluids Engineering*, vol. 114, No. 4.
- [18] **Panasonic**, 2000, Operating Instructions, OmniMovie VHS PV-610D.
- [19] **Richardson, J. E. & Panchang, V.**, 1998, Three-dimensional Simulation of Scour-Inducing Flow At Bridge Piers, *Journal of Fluids Engineering*, vol. 124, No. 5.
- [20] **Robinson, S. K.**, Coherent Motions in the Turbulent Boundary Layer, *Annual Review of Fluid Mechanics* 23, p. 131-156, 1991.
- [21] **Schlichting, H.**, Boundary Layer Theory, Oxford Science Publications, Oxford, 1979.
- [22] **Sumer B..M., Christiansen N. & Fredsoe J.**, The Horseshoe Vortex and Vortex Shedding Around a Vertical Wall-Mounted Cylinder Exposed to Waves, *Journal of Fluid Mechanics* 332: 41-70, FEB 10, 1997.
- [23] **Tritton, D. J.**, Physical Fluid Mechanics, McGraw Hill Publishing Company, New York 1988.
- [24] **Visbal, M.R.**, Structure of laminar juncture flows, *AIAA Journal*. Vol 29, N° 8, p. 1273-1282, 1991.
- [25] **White, F. M.**, Fluid Mechanics, McGraw Hill Publishing Company, New York, 1986.
- [26] **White, F. M.**, Viscous Fluid Flow, McGraw Hill Publishing Company, New York, 1991.

ANEXOS

Anexo A – Métodos de Aferição e Calibração

A.1 Aferição da Vazão

Na determinação das vazões de ensaio, empregou-se o vertedor do canal, apresentado na fig. 3.4. O mesmo já houvera sido aferido anteriormente e verificado para o experimento. Possui como equação da curva-chave:

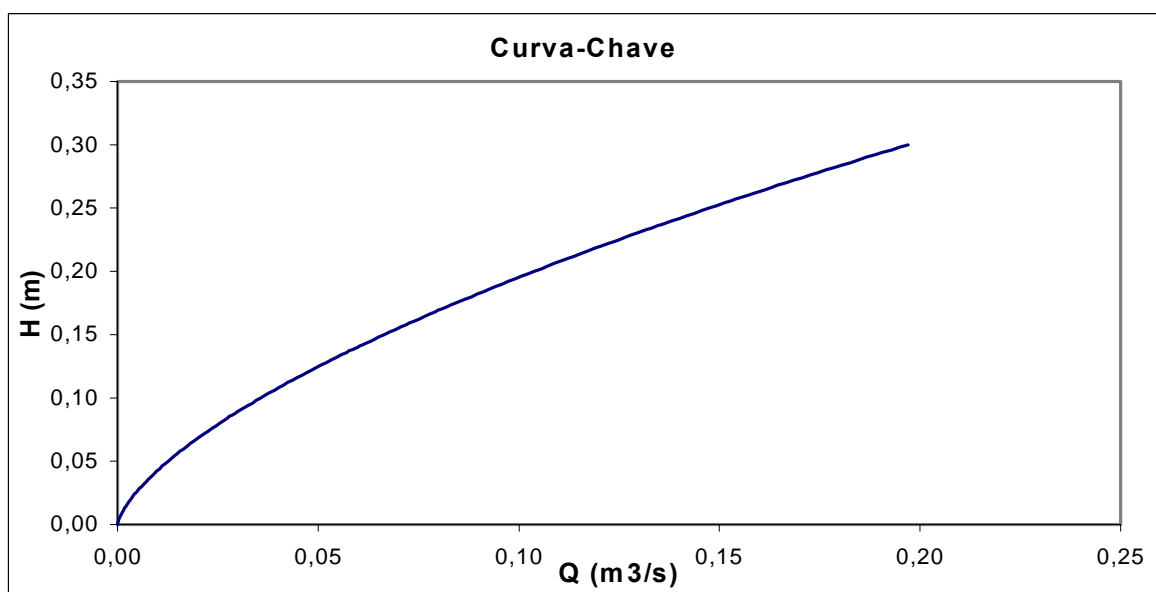
$$Q = [1,0692 + 0,410256 (h + 0,0011)](h + 0,0011)^{1,5}$$

onde:

h – profundidade no vertedor (m)

Q – Vazão (l/s)

a qual pode ser verificada no seguinte gráfico:

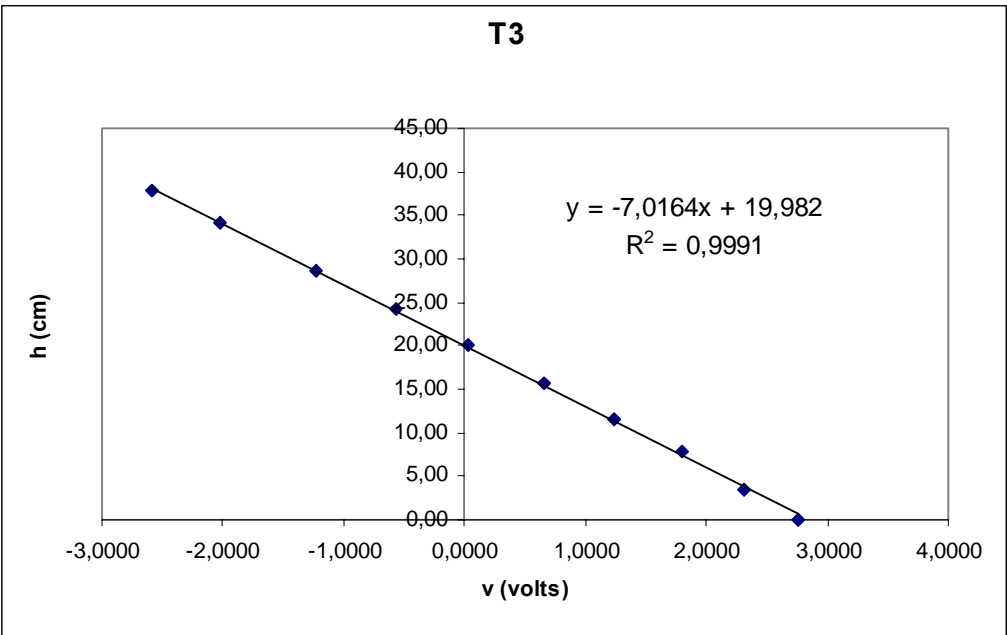
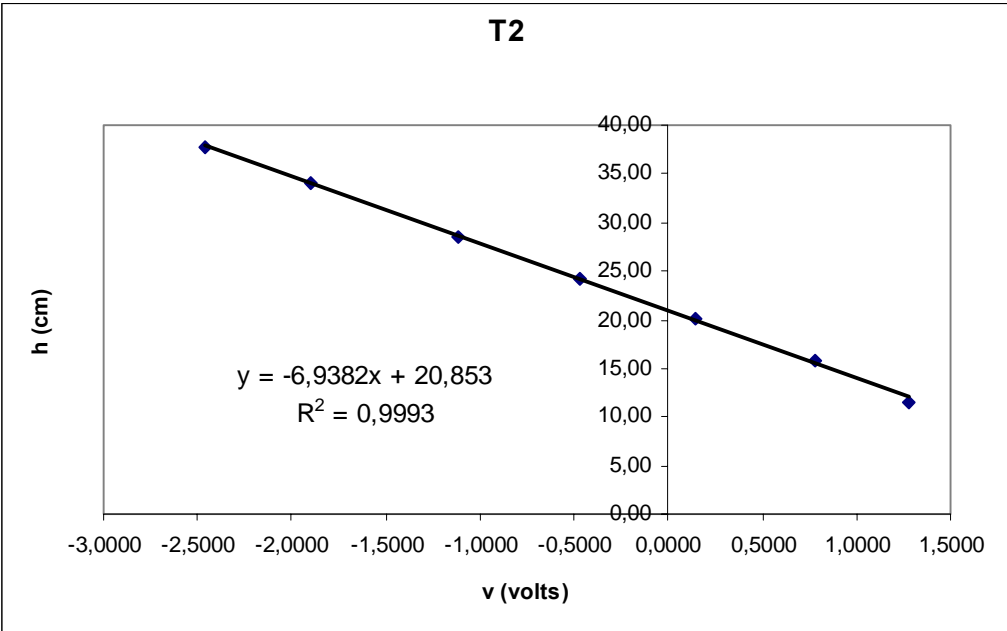
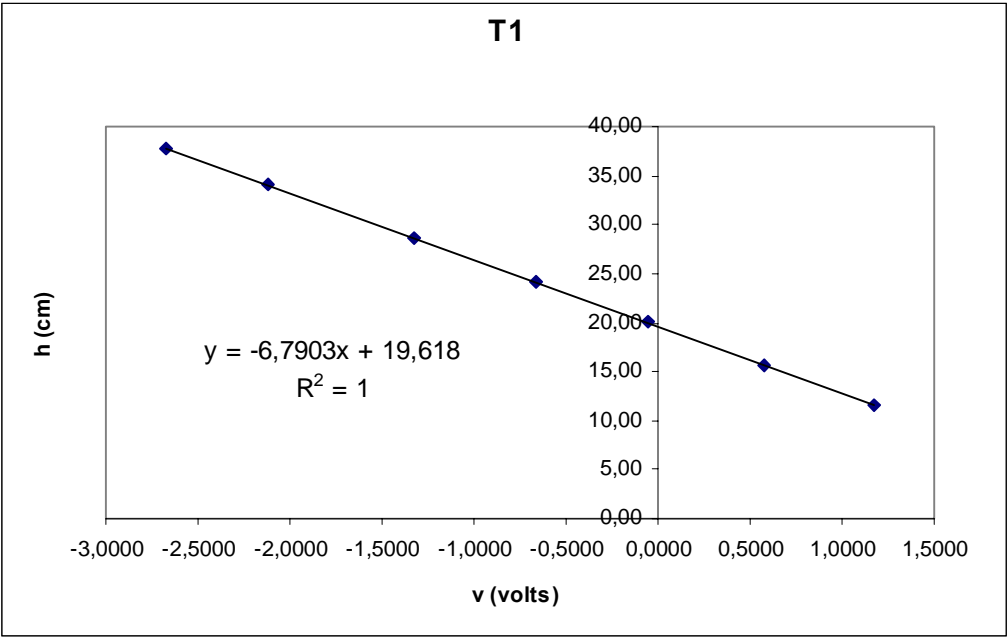


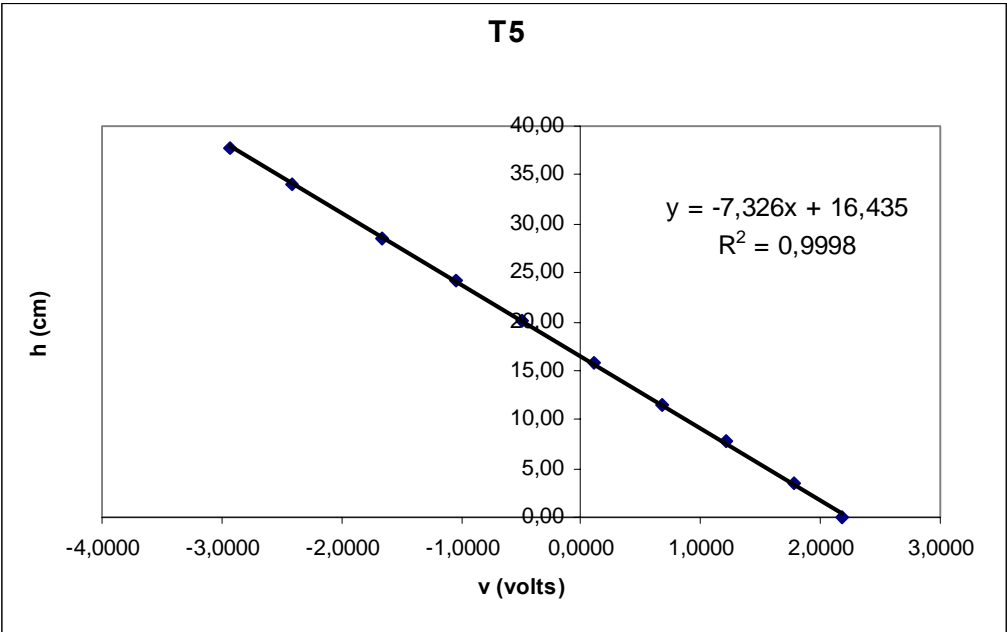
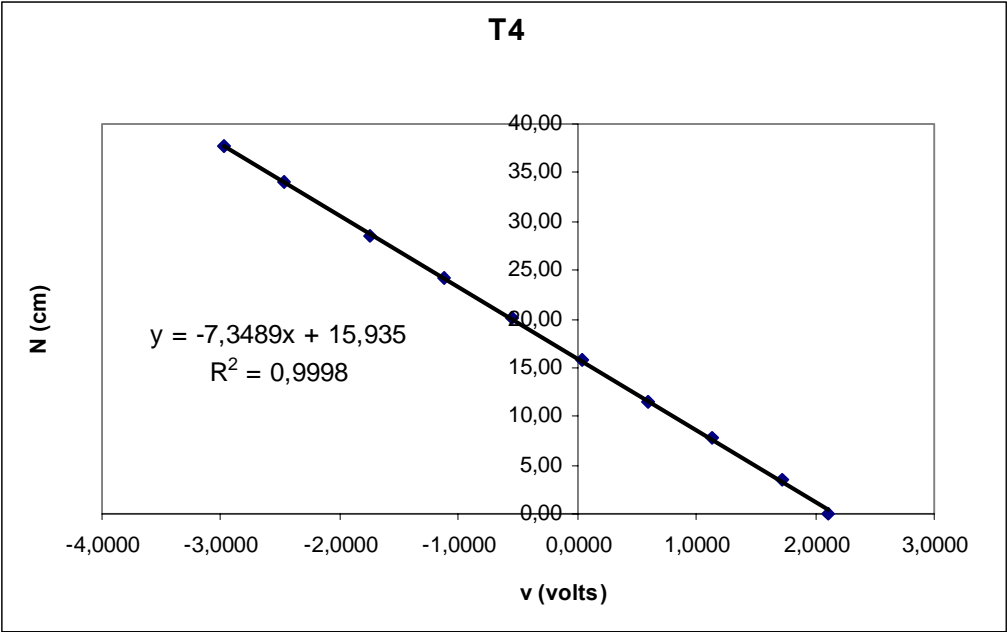
A.2 Calibração dos transdutores

A determinação das funções de transferência dos transdutores, para cada grupo de ensaios, implicou no desenvolvimento de um processo de calibração, no qual os transdutores eram calibrados no próprio local de medição, dentro do canal, evitando incertezas quanto ao transporte de um local de calibração para o de instalação final. A calibração foi feita com a aquisição dos sinais de pressão, de cada transdutor, para aproximadamente 10 níveis de água conhecidos onde o canal, fechado, funcionou como um reservatório estanque. Os resultados provenientes deste processo, podem ser visualizados nas tabelas e gráficos, a seguir.

Calibração dos Ensaio de Leito

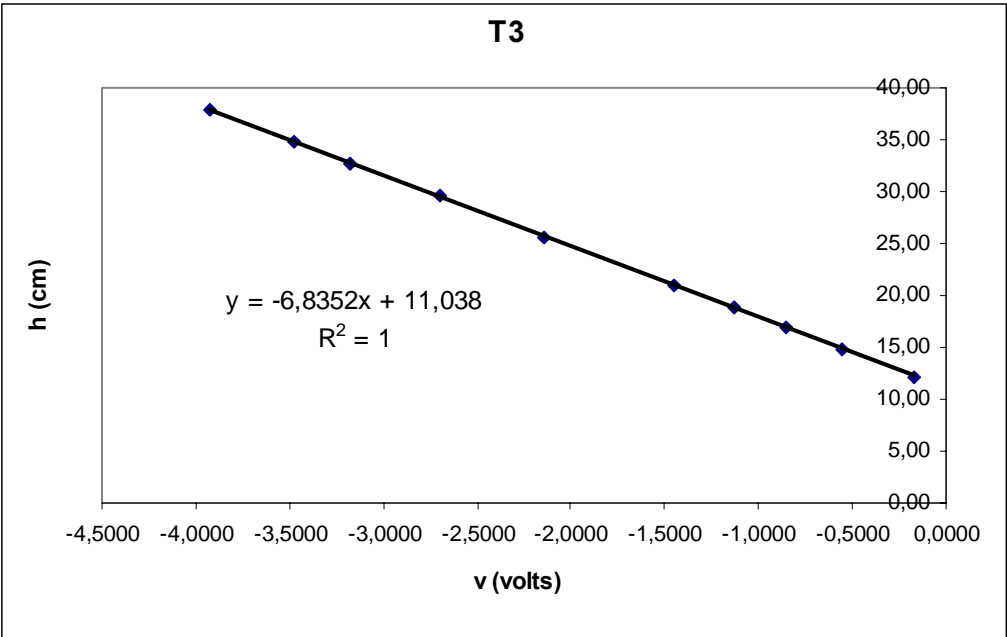
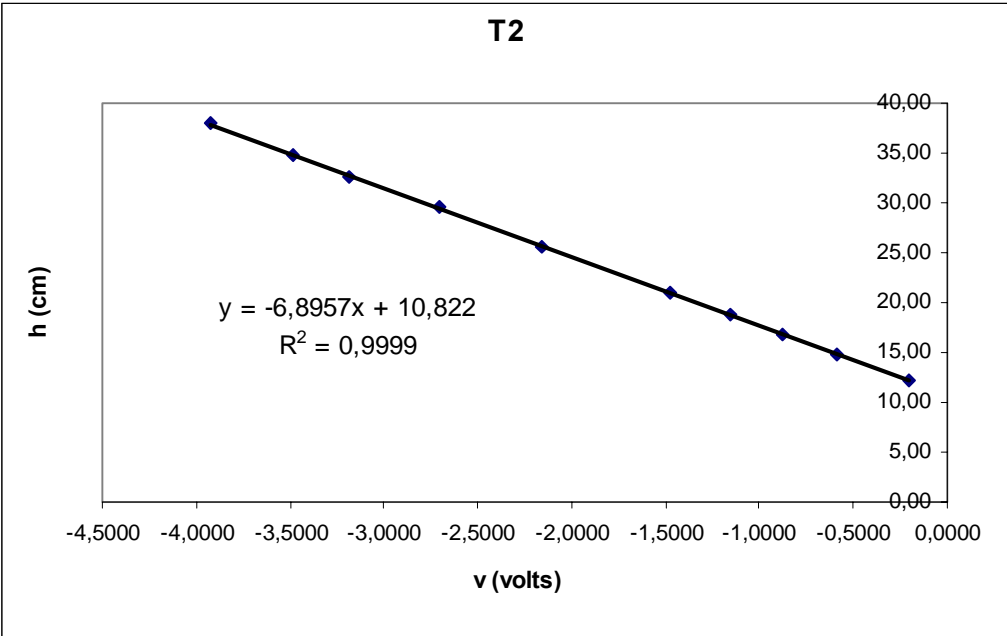
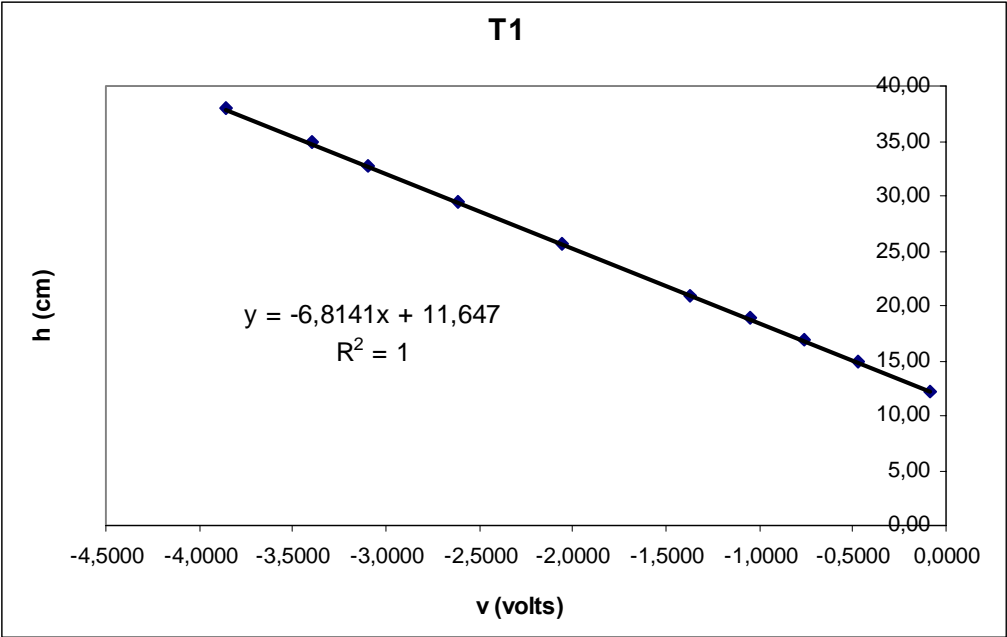
	T1(volts)	T2 (volts)	T3 (volts)	T4 (volts)	T5 (volts)	Nível		T1(volts)	T2 (volts)	Nível
n1	-2,6790	-2,4600	-2,5890	-2,9770	-2,9300	37,74		-2,6790	-2,4600	37,74
n2	-2,1160	-1,8980	-2,0220	-2,4650	-2,4050	34,06		-2,1160	-1,8980	34,06
n3	-1,3310	-1,1180	-1,2370	-1,7400	-1,6690	28,61		-1,3310	-1,1180	28,61
n4	-0,6663	-0,4645	-0,5721	-1,1150	-1,0490	24,20		-0,6663	-0,4645	24,20
n5	-0,0596	0,1424	0,0312	-0,5563	-0,4835	20,03		-0,0596	0,1424	20,03
n6	0,5790	0,7852	0,6648	0,0419	0,1156	15,72		0,5790	0,7852	15,72
n7	1,1780	1,2730	1,2360	0,6015	0,6745	11,56		1,1780	1,2730	11,56
n8		1,7210	1,8010	1,1290	1,2050	7,81		1,3410	1,5530	10,53
n9	1,3850	2,4830	2,3040	1,7240	1,7840	3,44		0,1194	0,3194	18,59
n10	1,8420	2,9420	2,7560	2,1150	2,1890	0,00		-2,2160	-1,9640	34,70
t1	1,3410	1,5530	1,4280	0,7342	0,8316	10,53				
t2	0,1194	0,3194	0,2201	-0,3037	-0,2995	18,59				
t3	-2,2160	-1,9640	-2,1140	-2,4200	-2,4950	34,70				

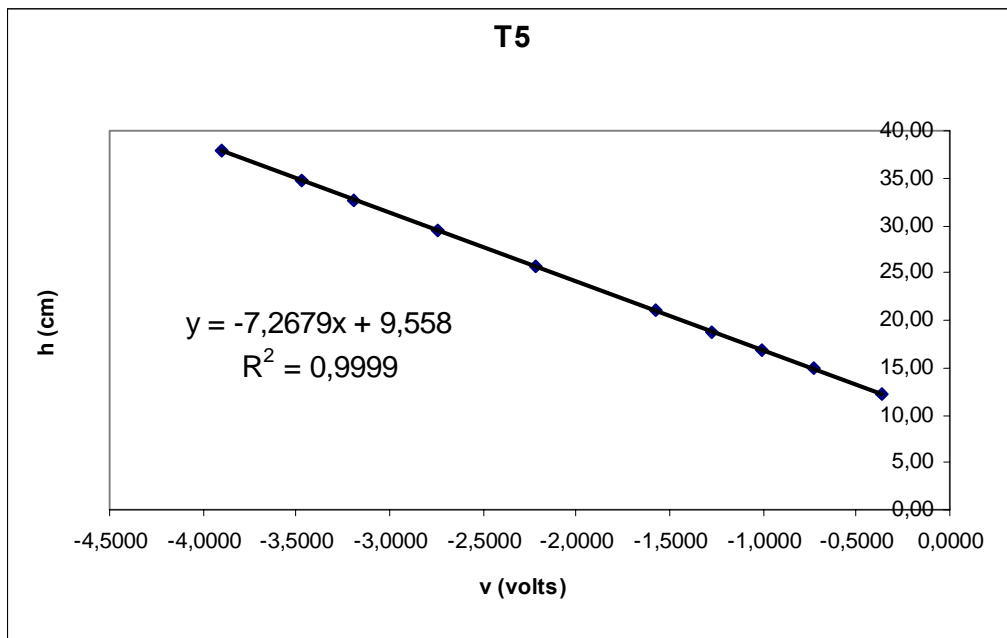
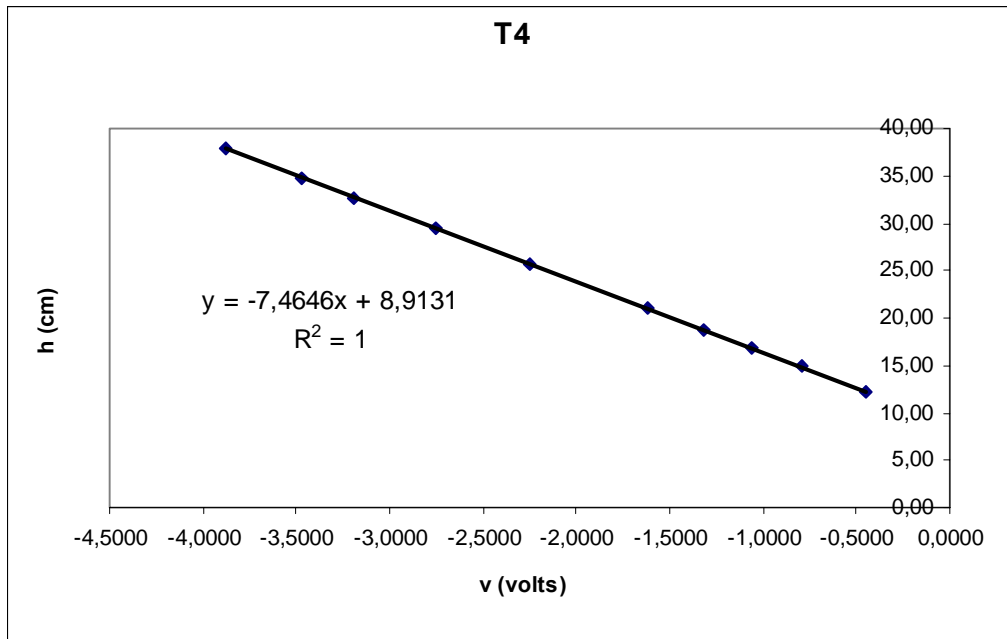




Calibração dos Ensaio nas Laterais do Cilindro

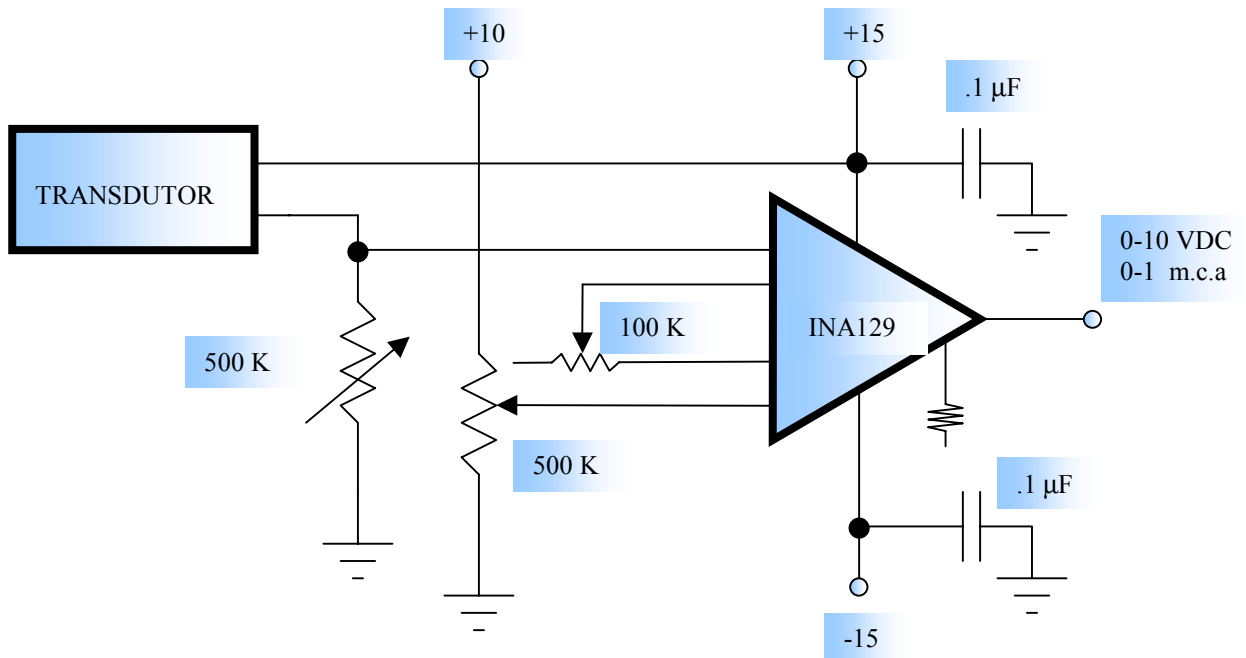
	T1(volts)	T2 (volts)	T3 (volts)	T4 (volts)	T5 (volts)	Nível
n1	-3,8520	-3,9250	-3,9270	-3,8810	-3,8980	37,95
n2	-3,4010	-3,4800	-3,4800	-3,4710	-3,4760	34,84
n3	-3,0970	-3,1810	-3,1780	-3,1950	-3,1920	32,65
n4	-2,6160	-2,7050	-2,6990	-2,7560	-2,7400	29,54
n5	-2,0600	-2,1550	-2,1420	-2,2460	-2,2190	25,58
n6	-1,3690	-1,4740	-1,4550	-1,6150	-1,5720	20,97
n7	-1,0480	-1,1550	-1,1330	-1,3220	-1,2700	18,84
n8	-0,7637	-0,8737	-0,8502	-1,0630	-1,0030	16,88
n9	-0,4695	-0,5832	-0,5570	-0,7956	-0,7273	14,87
N10	-0,0862	-0,2044	-0,1750	-0,4454	-0,3680	12,20
t1	-0,7205	-0,8308	-0,8053	-1,0230	-0,9624	16,57
t2	-1,6250	-1,7230	-1,7050	-1,8480	-1,8100	22,70
t3	-3,4520	-3,5280	-3,5250	-3,5110	-2,9150	35,24



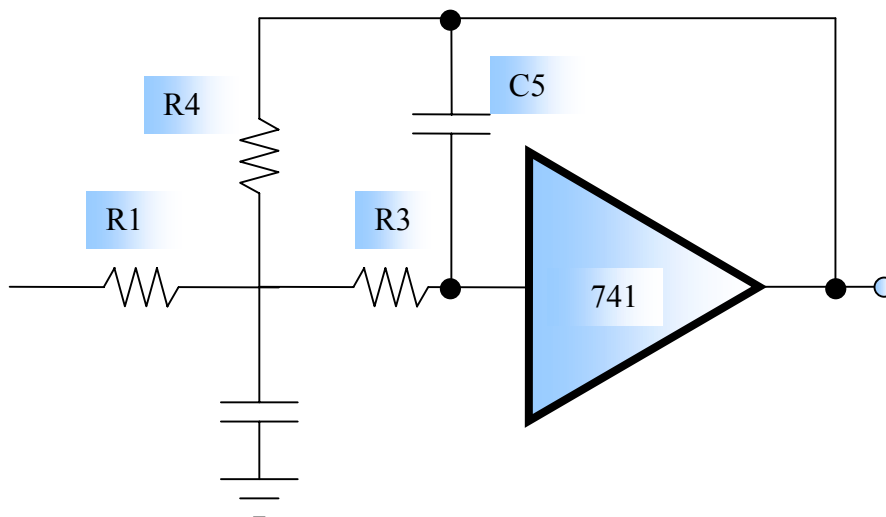


Anexo B – Diagramas dos Circuitos Eletrônicos

Circuito dos Transdutores



Filtros



Obs.: R1, R2, R3 e C5 são determinados a partir da frequência de corte desejada.

Anexo C – Estacionariedade: Verificação das Séries de Dados

ENSAIOS NO LEITO

Re	Transdutor	Equação	R ²
4250	T1	$y = -0,0006x + 20,639$	R2 = 0,2506
	T2	$y = -0,0156x + 23,669$	R2 = 0,9966
	T3	$y = -0,0006x + 22,296$	R2 = 0,5298
	T4	$y = -0,0001x + 21,981$	R2 = 0,0068
	T5	$y = -0,0002x + 22,407$	R2 = 0,0223
9720	T1	$y = 9E-05x + 27,955$	R2 = 0,0024
	T2	$y = 0,0002x + 27,986$	R2 = 0,0554
	T3	$y = 0,0007x + 28,067$	R2 = 0,2579
	T4	$y = -0,0007x + 26,936$	R2 = 0,0607
	T5	$y = -0,0009x + 27,875$	R2 = 0,1217
14780	T1	$y = -0,0111x + 22,093$	R2 = 0,0749
	T2	$y = 0,0022x + 24,065$	R2 = 0,0222
	T3	$y = -0,0033x + 23,277$	R2 = 0,3721
	T4	$y = -0,0019x + 21,353$	R2 = 0,0816
	T5	$y = -0,0012x + 22,428$	R2 = 0,0538
22000	T1	$y = 0,0634x + 10,716$	R2 = 0,6175
	T2	$y = 0,0005x + 15,857$	R2 = 0,1055
	T3	$y = -0,0067x + 16,783$	R2 = 0,6394
	T4	$y = -0,0009x + 13,806$	R2 = 0,0095
	T5	$y = -0,0002x + 14,564$	R2 = 0,0009
27330	T1	$y = -1E-04x + 17,423$	R2 = 0,0025
	T2	$y = -0,0038x + 19,411$	R2 = 0,7978
	T3	$y = -0,0004x + 21,069$	R2 = 0,0027
	T4	$y = -0,0021x + 16,512$	R2 = 0,2075
	T5	$y = 3E-05x + 17,334$	R2 = 8E-06
39610	T1	$y = 0,0033x + 12,887$	R2 = 0,3087
	T2	$y = -0,0043x + 15,897$	R2 = 0,7897
	T3	$y = 0,0007x + 18,416$	R2 = 0,0069
	T4	$y = -0,0027x + 12,43$	R2 = 0,0831
	T5	$y = -0,0017x + 12,542$	R2 = 0,0372
40800	T1	$y = 0,0004x + 15,599$	R2 = 0,0181
	T2	$y = 0,0003x + 17,845$	R2 = 0,0124
	T3	$y = -0,0009x + 20,526$	R2 = 0,0061
	T4	$y = -0,0004x + 12,949$	R2 = 0,0013
	T5	$y = 0,0006x + 14,701$	R2 = 0,0026

Legenda:

x – ordem do dado

y – valor de tensão elétrica (volts)

ENSAIOS NA SUPERFÍCIE DO CILINDRO

Re	Transdutor	Equação	R ²
5090	T1	$y = 0,0002x + 22,8239$	R2 = 0,0268
	T2	$y = 0,0003x + 22,7613$	R2 = 0,0788
	T3	$y = 0,0001x + 22,6317$	R2 = 0,0220
	T4	$y = 0,0003x + 22,5846$	R2 = 0,0597
	T5	$y = 0,0003x + 22,5827$	R2 = 0,1183
10160	T1	$y = 0,0005x + 28,39$	R2 = 0,0208
	T2	$y = 0,0003x + 28,223$	R2 = 0,0103
	T3	$y = -0,0002x + 27,718$	R2 = 0,0055
	T4	$y = 7E-05x + 27,523$	R2 = 0,0006
	T5	$y = -0,0001x + 27,545$	R2 = 0,0015
14580	T1	$y = 0,0005x + 23,118$	R2 = 0,0189
	T2	$y = 0,0004x + 22,706$	R2 = 0,0136
	T3	$y = 0,0006x + 21,613$	R2 = 0,0362
	T4	$y = 0,0003x + 21,217$	R2 = 0,0033
	T5	$y = -5E-05x + 21,25$	R2 = 0,0001
21660	T1	$y = -0,0032x + 17,165$	R2 = 0,2367
	T2	$y = -0,0016x + 16,308$	R2 = 0,0648
	T3	$y = -0,0018x + 13,886$	R2 = 0,0695
	T4	$y = -0,0014x + 12,914$	R2 = 0,0592
	T5	$y = -0,0014x + 12,932$	R2 = 0,0574
28200	T1	$y = 0,0014x + 22,783$	R2 = 0,0431
	T2	$y = -0,0015x + 21,528$	R2 = 0,0359
	T3	$y = -0,0025x + 17,81$	R2 = 0,1416
	T4	$y = -0,0022x + 16,717$	R2 = 0,1218
	T5	$y = -0,0022x + 16,696$	R2 = 0,1098
35060	T1	$y = -0,0005x + 21,039$	R2 = 0,0047
	T2	$y = 0,0005x + 18,922$	R2 = 0,002
	T3	$y = -0,0008x + 13,121$	R2 = 0,006
	T4	$y = 0,0003x + 11,408$	R2 = 0,0009
	T5	$y = 0,0014x + 11,19$	R2 = 0,0129
35690	T1	$y = 0,0005x + 22,712$	R2 = 0,0035
	T2	$y = -0,0016x + 20,711$	R2 = 0,0134
	T3	$y = 0,0035x + 14,668$	R2 = 0,0486
	T4	$y = 0,0012x + 12,734$	R2 = 0,0069
	T5	$y = 0,0011x + 12,506$	R2 = 0,006

Legenda:

x – ordem do dado

y – valor de tensão elétrica (volts)

Anexo D – Estatística das Medições de Pressão

D.1 Medições no leito

PRESSÃO TOTAL

ENS 11	T1	T2	T3	T4	T5
média =	20,61316	21,39604	22,17574	21,95721	22,37774
desv pad =	0,056514	0,170098	0,057423	0,068752	0,054808
máx =	20,75793	21,76354	22,31157	22,12443	22,53445
mín =	20,46401	21,02444	22,0375	21,80148	22,21251
ENS 21	T1	T2	T3	T4	T5
média =	27,87709	27,88931	27,74623	27,26978	27,93646
desv pad =	0,059922	0,059816	0,058188	0,073102	0,058269
máx =	28,06686	28,03737	27,87877	27,45312	28,11484
mín =	27,71415	27,76235	27,60469	27,02252	27,73923
ENS 31	T1	T2	T3	T4	T5
média =	21,37407	23,20061	22,42315	22,08944	22,55099
desv pad =	0,060492	0,158028	0,066013	0,074121	0,060643
máx =	21,56133	23,58553	22,61991	22,30385	22,76697
mín =	21,22821	22,84642	22,22593	21,87325	22,37348
ENS 41	T1	T2	T3	T4	T5
média =	12,10925	16,79729	15,68582	15,63152	15,11241
desv pad =	0,277865	0,163503	0,073337	0,076785	0,149867
máx =	12,76319	17,1742	15,90502	15,86278	15,55897
mín =	11,5679	16,4179	15,44251	15,41423	14,73622
ENS 51	T1	T2	T3	T4	T5
média =	16,75652	18,55069	18,87497	18,28597	18,62613
desv pad =	0,068982	0,073062	0,103674	0,080923	0,067298
máx =	16,95651	18,75555	19,17681	18,53609	18,84997
mín =	16,52542	18,3774	18,57727	18,01578	18,42071
ENS 61	T1	T2	T3	T4	T5
média =	10,60349	13,79734	13,58914	13,23088	12,64114
desv pad =	0,150479	0,343204	0,074267	0,090238	0,094653
máx =	11,05843	14,54435	13,79805	13,53036	13,0013
mín =	10,0003	13,37553	13,31841	12,9024	12,33952
ENS 71	T1	T2	T3	T4	T5
média =	13,21842	16,1067	16,29628	14,98239	15,28935
desv pad =	0,261826	0,125778	0,090294	0,097827	0,075126
máx =	13,8997	16,43509	16,6416	15,30658	15,57686
mín =	12,62603	15,8163	16,0078	14,58892	14,98663

Unidades: cm

Legenda:

Ens 11 – Ensaio 1 (Re = 4250) sem cilindro (1)

Ens 32 – Ensaio 3 (Re = 14780) com cilindro (2)

PRESSÃO TOTAL

ENS 12	T1	T2	T3	T4	T5
média =	20,6276	23,38155	22,28368	21,97877	22,4035
desv pad =	0,056811	0,172473	0,058017	0,069467	0,05699
máx =	20,79712	23,77461	22,41435	22,16032	22,57022
mín =	20,5032	23,01831	22,14028	21,69383	22,21251
ENS 22	T1	T2	T3	T4	T5
média =	27,95669	27,99016	28,07964	26,9237	27,85786
desv pad =	0,060867	0,060317	0,059612	0,11065	0,109468
máx =	28,14524	28,12331	28,2385	27,29165	28,4189
mín =	27,79253	27,84829	27,93016	25,89219	26,55877
ENS 32	T1	T2	T3	T4	T5
média =	21,8885	24,10527	23,21591	21,31759	22,4063
desv pad =	0,44904	0,163695	0,097703	0,184479	0,188817
máx =	22,67824	24,49653	23,6477	21,78354	22,94583
mín =	20,58158	23,79179	22,92825	19,23582	21,35399
ENS 42	T1	T2	T3	T4	T5
média =	11,88788	15,86559	16,65844	13,78932	14,56003
desv pad =	0,843057	0,059731	0,214497	0,372602	0,446281
máx =	14,09565	16,00538	17,73791	15,19893	16,11343
mín =	10,98005	15,69598	16,0078	10,98263	11,58831
ENS 52	T1	T2	T3	T4	T5
média =	17,4215	19,33993	21,06137	16,47386	17,33429
desv pad =	0,07003	0,075249	0,296252	0,139063	0,57634
máx =	17,68153	19,56341	22,31157	17,15458	19,38654
mín =	17,17206	19,11651	20,15322	15,57571	13,89559
ENS 62	T1	T2	T3	T4	T5
média =	12,94812	15,81719	18,42802	12,38096	12,5103
desv pad =	0,100662	0,079299	0,427896	0,37362	0,845906
máx =	13,25306	16,03975	20,42729	13,49447	15,46954
mín =	12,52805	15,61004	17,00133	7,071339	8,976982
ENS 72	T1	T2	T3	T4	T5
média =	15,60565	17,85001	20,50951	12,9412	14,71142
desv pad =	0,08302	0,066556	0,463894	0,480241	0,837768
máx =	15,93757	18,05081	22,72269	14,78628	18,49225
mín =	15,25175	17,67267	19,34811	9,870246	10,33631

Unidades: cm

Legenda:

Ens 11 – Ensaio 1 (Re = 4250) sem cilindro (1)

Ens 32 – Ensaio 3 (Re = 14780) com cilindro (2)

PRESSÃO DINÂMICA

ENS 11	T1	T2	T3	T4	T5
média =	-1,88684	-1,10396	-0,32426	-0,54279	-0,12226
desv pad =	0,056514	0,170098	0,057423	0,068752	0,054808
máx =	20,75793	21,76354	22,31157	22,12443	22,53445
mín =	20,46401	21,02444	22,0375	21,80148	22,21251
ENS 21	T1	T2	T3	T4	T5
média =	-0,14291	-0,13069	-0,27377	-0,75022	-0,08354
desv pad =	0,059922	0,059816	0,058188	0,073102	0,058269
máx =	28,06686	28,03737	27,87877	27,45312	28,11484
mín =	27,71415	27,76235	27,60469	27,02252	27,73923
ENS 31	T1	T2	T3	T4	T5
média =	-1,29593	0,530613	-0,24685	-0,58056	-0,11901
desv pad =	0,060492	0,158028	0,066013	0,074121	0,060643
máx =	21,56133	23,58553	22,61991	22,30385	22,76697
mín =	21,22821	22,84642	22,22593	21,87325	22,37348
ENS 41	T1	T2	T3	T4	T5
média =	-3,09075	1,597289	0,48582	0,431517	-0,08759
desv pad =	0,277865	0,163503	0,073337	0,076785	0,149867
máx =	12,76319	17,1742	15,90502	15,86278	15,55897
mín =	11,5679	16,4179	15,44251	15,41423	14,73622
ENS 51	T1	T2	T3	T4	T5
média =	-2,05348	-0,25931	0,064974	-0,52403	-0,18387
desv pad =	0,068982	0,073062	0,103674	0,080923	0,067298
máx =	16,95651	18,75555	19,17681	18,53609	18,84997
mín =	16,52542	18,3774	18,57727	18,01578	18,42071
ENS 61	T1	T2	T3	T4	T5
média =	-2,37651	0,817338	0,60914	0,250879	-0,33886
desv pad =	0,150479	0,343204	0,074267	0,090238	0,094653
máx =	11,05843	14,54435	13,79805	13,53036	13,0013
mín =	10,0003	13,37553	13,31841	12,9024	12,33952
ENS 71	T1	T2	T3	T4	T5
média =	-2,40158	0,486695	0,676283	-0,63761	-0,33065
desv pad =	0,261826	0,125778	0,090294	0,097827	0,075126
máx =	13,8997	16,43509	16,6416	15,30658	15,57686
mín =	12,62603	15,8163	16,0078	14,58892	14,98663

Unidades: cm

Legenda:

Ens 11 – Ensaio 1 (Re = 4250) sem cilindro (1)

Ens 32 – Ensaio 3 (Re = 14780) com cilindro (2)

PRESSÃO DINÂMICA

ENS 12	T1	T2	T3	T4	T5
média =	-1,8724	0,881547	-0,21632	-0,52123	-0,0965
desv pad =	0,056811	0,172473	0,058017	0,069467	0,05699
máx =	20,79712	23,77461	22,41435	22,16032	22,57022
mín =	20,5032	23,01831	22,14028	21,69383	22,21251
ENS 22	T1	T2	T3	T4	T5
média =	-0,06331	-0,02984	0,05964	-1,0963	-0,16214
desv pad =	0,060867	0,060317	0,059612	0,11065	0,109468
máx =	28,14524	28,12331	28,2385	27,29165	28,4189
mín =	27,79253	27,84829	27,93016	25,89219	26,55877
ENS 32	T1	T2	T3	T4	T5
média =	-0,7815	1,435272	0,545911	-1,35241	-0,2637
desv pad =	0,44904	0,163695	0,097703	0,184479	0,188817
máx =	22,67824	24,49653	23,6477	21,78354	22,94583
mín =	20,58158	23,79179	22,92825	19,23582	21,35399
ENS 42	T1	T2	T3	T4	T5
média =	-3,31212	0,665586	1,458438	-1,41068	-0,63997
desv pad =	0,843057	0,059731	0,214497	0,372602	0,446281
máx =	14,09565	16,00538	17,73791	15,19893	16,11343
mín =	10,98005	15,69598	16,0078	10,98263	11,58831
ENS 52	T1	T2	T3	T4	T5
média =	-1,3885	0,529933	2,251374	-2,33614	-1,47571
desv pad =	0,07003	0,075249	0,296252	0,139063	0,57634
máx =	17,68153	19,56341	22,31157	17,15458	19,38654
mín =	17,17206	19,11651	20,15322	15,57571	13,89559
ENS 62	T1	T2	T3	T4	T5
média =	-0,03188	2,837192	5,448025	-0,59904	-0,4697
desv pad =	0,100662	0,079299	0,427896	0,37362	0,845906
máx =	13,25306	16,03975	20,42729	13,49447	15,46954
mín =	12,52805	15,61004	17,00133	7,071339	8,976982
ENS 72	T1	T2	T3	T4	T5
média =	-0,01435	2,230012	4,889511	-2,6788	-0,90858
desv pad =	0,08302	0,066556	0,463894	0,480241	0,837768
máx =	15,93757	18,05081	22,72269	14,78628	18,49225
mín =	15,25175	17,67267	19,34811	9,870246	10,33631

Unidades: cm

Legenda:

Ens 11 – Ensaio 1 (Re = 4250) sem cilindro (1)

Ens 32 – Ensaio 3 (Re = 14780) com cilindro (2)

D.2 Medições laterais

PRESSÃO TOTAL

	0°-T1	0°-T2	45°	90°	135°
ENSLAT 1					
média =	22,82761	22,76729	22,63444	22,58911	22,5899
desv pad =	0,030834	0,029461	0,026651	0,026999	0,027707
máx =	22,94294	22,89328	22,73554	22,69053	22,70625
mín =	22,72667	22,67443	22,53529	22,47184	22,47558
ENSLAT 2					
média =	28,40008	28,22939	27,71518	27,52435	27,54256
desv pad =	0,066167	0,06731	0,077888	0,108111	0,124737
máx =	28,63248	28,4994	28,02549	27,84796	27,92295
mín =	28,1833	27,99434	27,39136	27,02788	26,9293
ENSLAT 3					
média =	23,12697	22,71282	21,62389	21,22249	21,24867
desv pad =	0,087205	0,111803	0,131322	0,17822	0,198845
máx =	23,39211	23,12898	22,06804	21,74287	21,8368
mín =	22,72667	22,3714	20,94998	20,2485	20,13339
ENSLAT 4					
média =	17,10542	16,27852	13,85244	12,88798	12,90528
desv pad =	0,180109	0,254829	0,245219	0,289853	0,324928
máx =	17,75249	17,25351	14,92579	14,1434	14,34888
mín =	16,2386	15,56999	12,78979	10,99062	11,084
ENSLAT 5					
média =	22,8083	21,50058	17,76478	16,67545	16,65526
desv pad =	0,222718	0,392478	0,299906	0,285041	0,35227
máx =	23,65829	22,85961	18,78061	17,60599	17,96864
mín =	21,89487	20,2165	16,5111	14,78125	14,40211
ENSLAT 6					
média =	21,03001	18,93114	13,10615	11,41418	11,21504
desv pad =	0,331814	0,608081	0,506305	0,643918	0,82305
máx =	22,12777	21,68116	14,94248	13,59668	13,85205
mín =	19,51591	17,08516	10,72053	7,382241	8,795037
ENSLAT 7					
média =	22,7216	20,68074	14,73248	12,75711	12,52654
desv pad =	0,363749	0,658423	0,535377	0,668738	0,908433
máx =	23,9411	22,89328	16,89491	15,45554	15,36028
mín =	21,39578	18,78551	12,28916	7,382241	8,777293

Unidades: cm

Legenda:

Ens 11 – Ensaio 1 (Re = 4920) sem cilindro (1)

Ens 32 – Ensaio 3 (Re = 14840) com cilindro (2)

PRESSÃO DINÂMICA

ENSLAT 1	0°-T1	0°-T2	45°	90°	135°
média =	0,107608	0,047285	-0,08556	-0,13089	-0,1301
desv pad =	0,030834	0,029461	0,026651	0,026999	0,027707
máx =	22,94294	22,89328	22,73554	22,69053	22,70625
mín =	22,72667	22,67443	22,53529	22,47184	22,47558
ENSLAT 2	0°-T1	0°-T2	45°	90°	135°
média =	0,370084	0,199386	-0,31482	-0,50565	-0,48744
desv pad =	0,066167	0,06731	0,077888	0,108111	0,124737
máx =	28,63248	28,4994	28,02549	27,84796	27,92295
mín =	28,1833	27,99434	27,39136	27,02788	26,9293
ENSLAT 3	0°-T1	0°-T2	45°	90°	135°
média =	0,866968	0,452823	-0,63611	-1,03751	-1,01133
desv pad =	0,087205	0,111803	0,131322	0,17822	0,198845
máx =	23,39211	23,12898	22,06804	21,74287	21,8368
mín =	22,72667	22,3714	20,94998	20,2485	20,13339
ENSLAT 4	0°-T1	0°-T2	45°	90°	135°
média =	2,125417	1,29852	-1,12756	-2,09202	-2,07472
desv pad =	0,180109	0,254829	0,245219	0,289853	0,324928
máx =	17,75249	17,25351	14,92579	14,1434	14,34888
mín =	16,2386	15,56999	12,78979	10,99062	11,084
ENSLAT 5	0°-T1	0°-T2	45°	90°	135°
média =	3,308304	2,000585	-1,73522	-2,82455	-2,84474
desv pad =	0,222718	0,392478	0,299906	0,285041	0,35227
máx =	23,65829	22,85961	18,78061	17,60599	17,96864
mín =	21,89487	20,2165	16,5111	14,78125	14,40211
ENSLAT 6	0°-T1	0°-T2	45°	90°	135°
média =	5,350007	3,251141	-2,57385	-4,26582	-4,46496
desv pad =	0,331814	0,608081	0,506305	0,643918	0,82305
máx =	22,12777	21,68116	14,94248	13,59668	13,85205
mín =	19,51591	17,08516	10,72053	7,382241	8,795037
ENSLAT 7	0°-T1	0°-T2	45°	90°	135°
média =	5,241596	3,200743	-2,74752	-4,72289	-4,95346
desv pad =	0,363749	0,658423	0,535377	0,668738	0,908433
máx =	23,9411	22,89328	16,89491	15,45554	15,36028
mín =	21,39578	18,78551	12,28916	7,382241	8,777293

Unidades: cm

Legenda:

Ens 11 – Ensaio 1 (Re = 4920) sem cilindro (1)

Ens 32 – Ensaio 3 (Re = 14840) com cilindro (2)