

Sumário

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	32
1.1 Breve Histórico.....	32
1.2. Considerações Iniciais sobre Escalas de Turbulência	37
1.3. A Experiência de Reynolds	38
1.4. O Conceito de Camada Limite.....	41
1.5. Existe uma Teoria para a Turbulência?	42
1.6. Considerações Complementares	44
CAPÍTULO 2. ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE A CINEMÁTICA E A DINÂMICA DOS FLUIDOS	46
2.1. Teoria do Movimento Elementar da Partícula Fluida.....	46
2.1.1. Movimento de uma Partícula Fluida.....	46
2.1.2. Tensão Total em um Ponto de um Sistema Fluido.....	48
2.1.3. Dilatação Linear, Tensor Simétrico de Deformação e Tensor Antissimétrico de Rotação.....	49
2.1.3.1. Dilatação Linear e Dilatação Cúbica.....	49
2.1.3.2. Tensor Simétrico.....	50
2.1.3.3. Tensor Antissimétrico.....	52
2.2. Fluidos Newtonianos e Não Newtonianos. Considerações Sobre Escalas Moleculares e Escalas de Turbulência	54
2.3. Equação de Navier Stokes.....	56
2.4. Equação da Continuidade.....	58
2.5. Equação da Energia Cinética.....	58
2.6. A Dinâmica da Vorticidade.....	59
CAPÍTULO 3. INSTABILIDADES HIDRODINÂMICAS E TRANSIÇÃO PARA A TURBULÊNCIA	62
3.1. Preliminares	62
3.2. Conceito de Estabilidade de escoamentos Sujeitos a Pequenas Perturbações.....	65
3.2.1. Exemplo de escoamento Absolutamente Instável Sujeito a Pequenas Perturbações.....	67
3.3. Teoria Linear da Estabilidade. Equação de Orr-Sommerfeld	69
3.4. Amplificações Espaciais. Critério de Jaffe/Wazzan /Okamura.....	76
3.5. Comparação entre a Aplicação da Teoria da Estabilidade e a Análise Experimental.....	77
3.6. Transição Para a Turbulência	79
3.7. Análise Não-Linear no Processo de Transição	81
3.7.1. Sistemas Dinâmicos e Sistemas Caóticos.....	82
3.7.2. O Processo de Intermitência no Caminho para a Turbulência	85
CAPÍTULO 4. A NATUREZA DA TURBULÊNCIA	88
4.1 Turbulência, Ordem e Caos: Algumas Considerações Filosóficas	89
4.2. Definição de Turbulência.....	89
4.3. O Conceito de Turbulência Plena e Livrementemente Desenvolvida	95

4.4. Métodos de Análise de Escoamentos Turbulentos.....	96
4.4.1. Método Determinístico	97
4.4.2. Método Estatístico	97
4.4.3. Análise Dimensional	98
4.5. A Teoria de Kolmogorov.....	98
4.5.1. A Hipótese de Isotropia Local de Kolmogorov	98
4.5.2. A Primeira e a Segunda Hipótese de Similaridade de Kolmogorov	99
4.6. A Fenomenologia do Escoamento Turbulento.....	101
4.7. O Conceito de Difusividade e de Viscosidade Turbulenta.....	104
4.7.1. Histórico	104
4.7.2. A Analogia entre Difusividade (ou Viscosidade) Molecular e Turbulenta	105
4.7.2.1. Difusão Molecular.....	105
4.7.2.2. Difusão Turbulenta.....	106
4.7.2.3. Exercício Aplicativo.....	106
4.8. Microescalas de Kolmogorov	109
4.9. Relações Entre as Micro-Escalas de Kolmogorov e a Escala Integral	110
4.10. Micro-Escala de Taylor.....	112
4.11. A Hipótese do Contínuo Para Escoamento Turbulento	112
4.12. Número de Reynolds e Graus de Liberdade.....	113
4.13. Exercícios Seleccionados.....	113
4.13.1. Extraído e Adaptado de TENNEKES & LUMLEY (1972).....	113
4.13.2. Exercício Adaptado dos Resultados de Saltara & Ortiz (1994).....	118
4.13.3. Exercício adaptado de Vilalta Alonso & Ortiz (2000).....	119
4.13.4. Exercício aplicado ao sistema vascular	120
4.13.5. Extraído e adaptado de Kleinstreuer (1997)	122
4.14. Comparação de alguns resultados dos exercícios seleccionados	122
CAPÍTULO 5. A CINEMÁTICA E A DINÂMICA DA TURBULÊNCIA A PARTIR DA	
APROXIMAÇÃO ESTATÍSTICA UTILIZANDO-SE AS EQUAÇÕES BÁSICAS DA	
MECÂNICA DOS FLUIDOS.....	123
5.1. Mecanismo da Turbulência.....	123
5.2. Aproximação Estatística da Turbulência	123
5.3. A Equação da Continuidade	127
5.4. Equação da Quantidade de Movimento ou Equação de Reynolds.....	128
5.5. Equação da Energia Cinética do Escoamento Médio.....	134
5.6. Equação da Energia Cinética da Turbulência.....	138
5.7. Equação da Vorticidade.....	139
5.8. Função de Densidade de Probabilidade de um Sinal Aleatório.....	141
5.9. Momentos de Diversas Ordens de um Sinal Aleatório.....	142
5.10. Função de Densidade de Probabilidade Conjunta.....	144
5.11. Função de Correlação ou Covariância.....	145
5.12. Função de Autocorrelação	147
5.13. Escala Integral de Tempo	148

5.14. Correlação Espacial e Escala Integral Espacial.....	149
CAPÍTULO 6. TURBULÊNCIA EM ESTRUTURAS DE DISSIPACÃO DE VERTEDORES DE USINAS HIDRELÉTRICAS COM FORMAÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO - ESTUDOS DE CASO.....	151
6.1. Considerações Gerais – Lei de Parede.....	151
6.2. O Ressalto Hidráulico como Dissipador de Energia.....	152
6.3. Flutuações de Pressão no Ressalto Hidráulico.....	161
6.4. A Simulação Numérica do Ressalto Hidráulico Afogado.....	166
6.5. Estudos de Caso.....	169
6.5.1. O Estudo de Caso da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira.....	169
6.5.1.1 Considerações Gerais.....	169
6.5.1.2. Estudos em Modelo Físico.....	173
6.5.1.3. Resultados.....	175
6.5.2. O Estudo de Caso da Usina Hidrelétrica de Porto Colômbia.....	178
6.5.2.1. Considerações Gerais.....	178
6.5.2.2. Medições de Flutuações de Pressão na Bacia de Dissipação do Protótipo da UHE Porto Colômbia.....	183
6.5.2.3. Resultados.....	189
6.6. A Calibração de Transdutores de Pressão Acoplados a Mangueiras para a Medição de Pressões Instantâneas em Laboratório de Hidráulica.....	203
CAPÍTULO 7. JATOS E PLUMAS TURBULENTAS – EMISSÁRIOS SUBMARINOS E SUBAQUÁTICOS – ESTUDOS DE CASO.....	206
7.1. Jatos Planos Turbulentos.....	206
7.2. Jatos Circulares Turbulentos.....	209
7.2.1. Observações Experimentais de Jatos Circulares Turbulentos.....	210
7.3. Jatos e Plumias Turbulentas Submersas em Meio Hídrico.....	212
7.4. A Modelagem Física de Jatos e Plumias Turbulentas em Meio Hídrico.....	213
7.5. Modelagem Hidrotérmica de Jatos e Plumias, com Lançamento Horizontal Submerso, em Reservatório Estagnado.....	216
7.5.1. Modelo Matemático Hidrodinâmico Unidimensional.....	217
7.5.2. Instalações do Modelo Experimental.....	220
7.5.3. Resultados do Modelo Experimental.....	222
7.6. Difusão e Advecção de Jatos e Plumias Turbulentas.....	229
7.7. A Disposição de Efluentes no Mar Através de Descargas Submersas -Emissários Submarinos.....	233
7.7.1. Descargas Submersas de Jatos Simples.....	234
7.7.2. Descarga Submersa de Jatos de Saídas Múltiplas- Sistemas Difusores de Emissários Submarinos.....	237
7.7.3. O Sistema Especialista CORMIX.....	243
7.7.4. O Conceito de Zona de Mistura.....	247
7.7.5. Sistematização dos Projetos de Emissários Submarinos da SABESP e Avaliação de Desempenho Através do Modelo Computacional CORMIX.....	248
7.7.5.1. A Disposição Oceânica Através de Emissários Submarinos no Litoral Paulista.....	249
7.7.5.2. Caracterização de Projeto dos Emissários Submarinos da SABESP.....	251

7.7.5.3. A Modelagem do Processo de Dispersão a partir da Utilização das Fórmulas da Literatura e da Aplicação do CORMIX	255
7.7.5.4. Resultados do Trabalho de Marcellino (2000)	257
7.7.6. Novas Considerações sobre o Processo de Dispersão das Plumas dos Emissários da Baixada Santista.....	263
7.7.6.1. Praia Grande – Subsistema I:.....	263
7.7.6.2. Praia Grande – Subsistema III.....	266
7.7.6.3. Santos – Reforma de Emissário.....	268
7.7.6.4. A Simulação em Modelo Físico e Numérico das Plumas dos Efluentes dos Emissários Submarinos da Baixada Santista.....	270
7.7.6.4.1. Simulações em Modelo Físico	270
7.7.6.4.2. Simulações Computacionais	273
7.7.7. Modelagem Computacional da Dispersão da Pluma do Efluente dos Emissários Submarinos do TEBAR – PETROBRÁS.....	283
7.7.7.1. Dados Ambientais e Características do Efluente de Descarga.....	284
7.7.7.2. Modelo de Transporte de Espécies e de Escoamentos Reativos.....	285
7.7.7.3. Criação da Geometria e Geração da Malha	286
7.7.7.4. Resultados	289
7.8. A Disposição de Efluentes Industriais Através de Descargas Fluviais Submersas – Emissários Subaquáticos	293
7.8.1. O Estudo de Caso da Veracel Celulose S.A.....	294
7.8.2. Campanhas de Medição de Campo.....	294
7.8.3. Simulações Computacionais.....	295
7.8.4. Resultados.....	297
CAPÍTULO 8. ESTRUTURA DE TURBULÊNCIA DE PAREDE NOS ESCOAMENTOS COM SOLUÇÕES POLIMÉRICAS.....	300
8.1. O Fenômeno da Redução de Atrito Em Soluções Poliméricas: Uma Visão Geral	300
8.2. Procedimento Experimental para o Estudo de Turbulência de Parede em Escoamentos Poliméricos – Primeira Instalação Experimental.....	304
8.2.1. Resultados.....	306
8.2.2. Comentários Adicionais.....	310
8.3. Procedimento Experimental para o Estudo de Turbulência de Parede em Escoamentos Poliméricos – Segunda Instalação Experimental.....	311
8.3.1. Instalação e Procedimento Experimental.....	311
8.3.2. Sistema de Injeção das Soluções Poliméricas	313
8.3.3. Sistema de Medição, Aquisição e Processamento de Dados.....	314
8.3.4. Análise Reológica das Soluções Poliméricas.....	314
8.3.5. Resultados.....	315
8.3.5.1. Lei de Parede	316
8.3.5.2. Relação f versus Re	320
8.3.5.3. Perfis de Intensidade Turbulenta.....	322
8.3.5.4. Tensões de Reynolds	324
8.3.5.5. Produção de Energia Cinética Turbulenta.....	326
8.3.5.6. Análise Espectral	327

8.3.5.7. Taxas de Dissipação e Escalas de Turbulência.....	331
8.3.5.8. Conclusões do Trabalho Experimental	332
CAPÍTULO 9. TURBULÊNCIA NOS ESCOAMENTOS EM SISTEMAS ARTERIAIS	334
9.1. O escoamento Sanguíneo Através do Sistema Circulatório.....	334
9.1.1. Sístole e Diástole	337
9.1.2. Forças Que Dirigem ou Que Se Opõem ao Fluxo Sanguíneo.....	338
9.1.3. O escoamento de Poiseuille e a Resistência Total Periférica.....	340
9.1.4. Semelhança Dinâmica e Números Adimensionais no escoamento Através do Sistema Circulatório.....	342
9.1.5. Perfil de Velocidade em escoamento Não Permanente (Pulsátil).....	344
9.2. O Estabelecimento da Turbulência em escoamentos Pulsáteis Fisiológicos	350
9.3. A Análise Comparativa de Fluxo em Fístula Arteriovenosa	353
9.3.1. Trabalho de Mestrado de <i>BESSA, 2005</i>	357
9.4. Considerações Complementares Sobre a Simulação do escoamento em Fístulas Arteriovenosas	368
9.4.1. Resultados.....	369
9.5. Redução de Arrasto por Adição de Polímeros em escoamentos Vasculares	373
9.5.1. Simuladores Hidrodinâmicos	374
9.5.2. Redução de Arrasto Por Adição de Polímeros em escoamento Pulsátil Laminar e Turbulento.	376
9.5.2.1. Bancada Experimental da EPUSP	377
9.5.2.2. Bancada Experimental do ICB/USP.....	382
9.6. A Formação de Turbulência em Aneurisma de Aorta Abdominal Infra-Renal	392
9.6.1. Estudo de Comportamento de Fluxo Através de Modelo de Aneurisma de Aorta Infra-Renal Obtido por Tomografia	393
9.6.1.1. Modelo Real de Aneurisma de Aorta Abdominal	394
9.6.1.2. A Construção do Modelo Experimental por Prototipagem Rápida.....	396
9.6.1.3. A Construção do Modelo Experimental para a Bancada de Teste	396
9.6.1.4. Construção e Calibração da Bancada Experimental e Fluido de Trabalho	397
9.6.1.5. Modelo Computacional.....	399
9.6.1.6. Resultados.....	400
9.6.2. A Formação de Turbulência no Interior do Aneurisma	408
CAPÍTULO 10. CONCLUSÕES.....	410
REFERÊNCIAS	415

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1 Breve Histórico

O estudo de temas relacionados à Mecânica dos Fluidos, e às aplicações da Hidráulica, começaram muitos anos antes da era cristã. Repassando a História, percebe-se que Arquimedes [285-213 AC] já estudava a flutuação de corpos submersos, através da célebre “Experiência de Arquimedes”.

Muitas barragens, vertedores, estruturas fluviais, canais de irrigação etc, foram construídos antes do período da Renascença. Tanto no Ocidente (Império Romano), como no Oriente (China, Japão) existem diversos exemplos de obras hidráulicas construídas no começo da era cristã (NEZU e NAKAGAWA, 1993).

Todavia, foi na era do Renascimento, através do genial Leonardo da Vinci (1452-1519), que nasceu a hidráulica empírica (clássica), pois Da Vinci foi o primeiro a justificar a necessidade da observação e da experimentação não somente em ciência, mas também em arte e filosofia. Suas posições, certamente, estavam centenas de anos à frente de seu tempo. Da Vinci, na época, já fazia incursões na área hoje conhecida por Engenharia Biomédica, procurando estabelecer uma analogia entre os estudos de circulação da água na natureza e os estudos de circulação do sangue no corpo humano: *“Adunque potremo dire, La Terra avere anima vegetativa, e Che La sua carne sai La terra, li suoi ossi sieno li ordini delle colegazioni de ´ sassi, di Che si compongono le montagne, Il suo tenerume sono li tufi, Il suo sangue sono le vene delle acque, il lago del sangue, Che sta intorno al core, è Il maré oceano.....”* (ISTITUTO GEOGRAFICO DE AGOSTINI, 1956).

A visão de Da Vinci sobre a circulação da água na natureza era de um sistema fechado como ocorre na circulação do sangue no corpo humano registrando em seus escritos: *“...si che si può conchiudere che l´acqua vadi daí fiumi al maré e dal mare ai fiume sempre cosi raggirando e voltandose.”* (ISTITUTO GEOGRAFICO DE AGOSTINI, 1956).

A representação esquemática (*figura 1.1*) de Da Vinci de filetes de água em um canal que apresenta obstáculos ao longo de sua parede faz pensar na analogia com o fluxo sanguíneo no interior de um vaso.

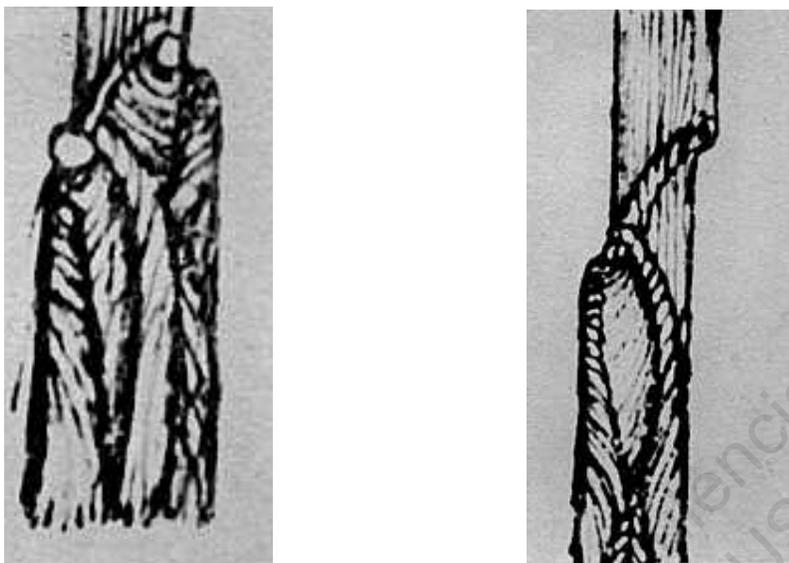


Figura 1.1. Representação do caminhamento de filetes de água em um canal que apresenta obstáculos em sua parede. Manoscritto F, fol. 90 recto (Fonte: apud INSTITUTO GEOGRÁFICO DE AGOSTINI, 1956).

Segundo os historiadores a observação do escoamento na natureza por Da Vinci foi quase uma obsessão desde seu período de juventude. O primeiro desenho de Da Vinci mostrando o escoamento em uma cascata de água em leito rochoso data de 1473. A figura 1.2 é uma representação de uma queda d'água, resultando, a jusante, em turbilhões (ou eddies) que são representados em seu estágio final na forma de crisântemos (CLAYTON, 1996). A interpretação do escoamento torrencial e turbilhonar já era tratada desde essa época, segundo as palavras de Da Vinci: “...if the wave is at an angle to the normal course of the water then its reflection will be composite, in the sense that the percussed water, in addition to making a reflected motion along the same obliquity of the incident longitudinal motion, acquires a circular motion”. (apud CLAYTON, 1996).

Já na parte final de sua vida Da Vinci passou a retratar cenas de um grande dilúvio traduzidas em quatro desenhos dessa época (apud INSTITUTO GEOGRAFICO DE AGOSTINI, 1956 e CLAYTON, 1996). A visão de um processo turbulento, como uma composição de turbilhões de diversas dimensões, como numa cascata de turbilhões, parece estar implícita na figura 1.3, o que faz pensar em Leonardo Da Vinci como o primeiro pesquisador a estudar a **turbulência** sob o ponto de vista da observação e o

primeiro a utilizar uma técnica de observação de estruturas de coerência de **escoamento turbulento**.



Figura 1.2. Representação de turbilhões formados a partir de uma queda d'água segundo Da Vinci (Fonte: CLAYTON, 1996).

É interessante observar que ele foi o primeiro a descrever e a interpretar o escoamento turbulento em geral e o comportamento de vórtice *ferradura* (*horse-shoe vortex*) em torno de pilar de ponte, conforme esquematizado nas *figuras 1.4 e 1.5*.



Figura 1.3. Representação da Gigantesca Explosão de Da Vinci – 1515 – Raccolta Reale di Windsor n. 12380 (Fonte: apud INSTITUTO GEOGRÁFICO DE AGOSTINI, 1956).



Figura 1.4. Gravura de Da Vinci observando o escoamento em torno de um pilar de ponte (Fonte: NEZU e NAKAGAWA, 1993)

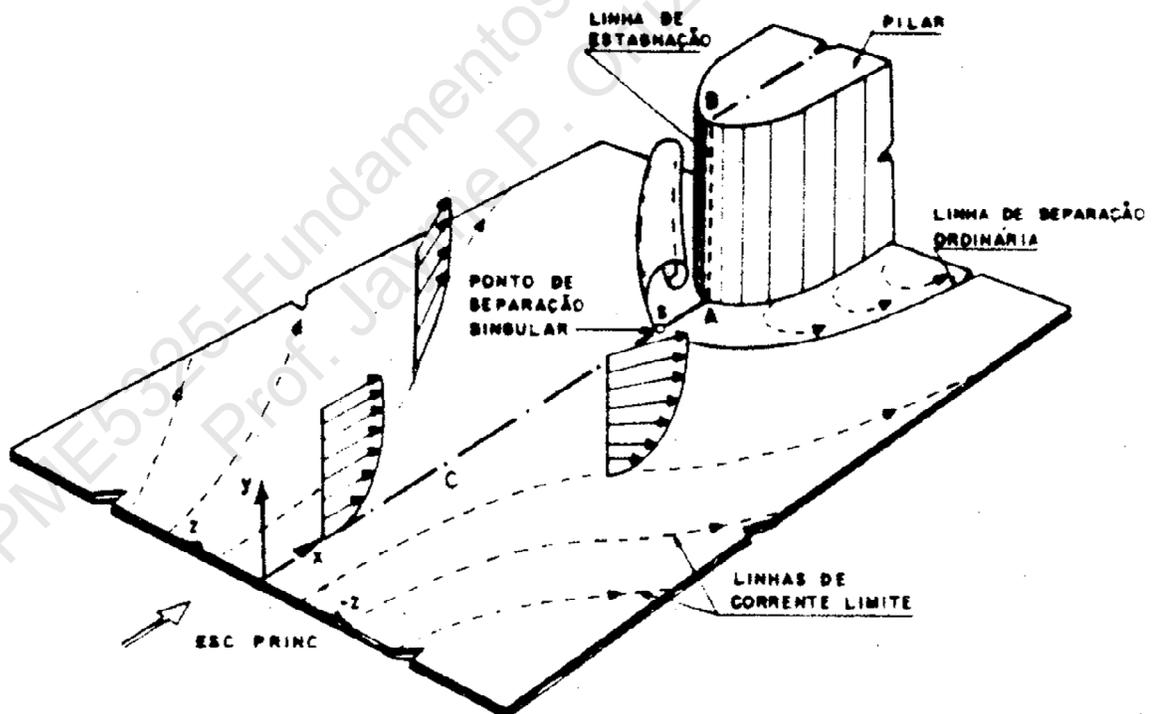


Figura 1.5. Representação esquemática da formação de um vórtice tipo ferradura em torno de um pilar

Após Leonardo Da Vinci a pesquisa em turbulência progrediu lentamente até o desenvolvimento do trabalho de Osborne Reynolds que classificou os escoamentos laminar e turbulento em 1883, embora, no período de 1500 a 1900, tenha sido concebida a formulação das equações da hidrodinâmica através dos trabalhos de John Bernoulli (1667-1748), Daniel Bernoulli (1700-1782) e Leonhard Euler (1707-1783), apoiados na teoria Newtoniana, que emergia, na época, e que até hoje é um dos pilares da física e da mecânica. Esses autores contribuíram substancialmente para o desenvolvimento matemático do escoamento de fluidos ideais, construindo-se assim a teoria do escoamento potencial. Vale a pena mencionar as palavras de Daniel Bernoulli, que como bom matemático, argumentava, a propósito de sua hidrodinâmica: *“Concebí toda la teoria em mi mente, escribí el tratado, hice conocer en privado, entre amigos, la mayor parte de él, hasta bosquejé algunas cosas en presencia de nuestra asociación, antes de emprender ningún experimento; y esto para evitar que mediciones preconcebidas me enganaran por una opinión falsa que, sin embargo, las satisficiera com buena aproximación.....Luego de todo eso, por fin, se realizaron los experimentos frente a mis amigos; y concordaron com la teoria, tanto como yo mismo apenas habria podido esperar”*(apud LEVI, 1989).

Em seguida vieram os trabalhos de Navier (1827) e Stokes (1845) desenvolvidos independentemente e que generalizaram as equações do movimento, com a inclusão do conceito de viscosidade para fluidos newtonianos na equação de Euler.

Embora o conceito de viscosidade molecular já fosse conhecido na época, através da teoria de Maxwell, a partir da introdução do termo viscoso nas equações da hidrodinâmica por Navier, em 1827, levantou-se a questão se o coeficiente de viscosidade era constante em qualquer ponto, idéia abordada pioneiramente por Saint Venant, em 1851 e posteriormente por seu aluno Boussinesq em 1870 (apud FRISCH, 1995). Boussinesq, partindo do trabalho de Poiseuille para escoamento laminar apresentou idéias pioneiras sobre o conceito de viscosidade turbulenta (*eddy viscosity*) e em um artigo de 1870 propôs uma expressão de cálculo de viscosidade turbulenta em escoamento em conduto (apud FRISCH, 1995).

É importante enfatizar que no século XIX havia um conceito errôneo que definia moléculas verdadeiras e fictícias, e os turbilhões eram considerados como uma forma particular de moléculas.

As equações de Navier-Stokes se constituem, hoje, no principal arcabouço teórico matemático da Mecânica dos Fluidos.

A equação de Navier-Stokes para a velocidade $u(r,t)$ de uma partícula fluida como função do ponto \mathbf{r} e do instante de tempo t , escrita abaixo, iguala a aceleração da partícula (lado esquerdo da equação) com as forças por unidade de volume agindo devida ao gradiente de pressão $p(\mathbf{r},t)$, a viscosidade do fluido μ e aceleração da gravidade, seguindo a equação de Newton para uma partícula do fluido:

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (1.1)$$

Em princípio, teríamos que resolver essa equação em todos os pontos do espaço e do tempo para compreender todos os fenômenos de turbulência, o que é inviável para altos números de Reynolds considerando os termos não lineares dessa equação.

Vale citar ainda dentro desta introdução histórica a teoria dos movimentos turbilhonares que repousa sobre o teorema de Helmholtz, e que contribuiu para o desenvolvimento da teoria da hidrodinâmica, apresentada por Poincaré em 1893.

1.2. Considerações Iniciais sobre Escalas de Turbulência

A *figura 1.3* fornece a visão de *Da Vinci* sobre escalas de turbulência. Esse conceito de se definir a turbulência como um movimento composto por diversas escalas, desde as macro-escalas, da ordem de grandeza das dimensões do escoamento até as micro-escalas (escalas de Kolmogorov), conforme veremos no capítulo 4, vigora até hoje. As escalas de comprimento de fenômenos turbulentos variam de distâncias galáticas de 10^{16} - 10^{18} km, a distâncias planetárias de 1000 - 10.000 km; de distâncias de escalas na atmosfera e nos rios de 10-1000 m, a distâncias na escala vascular do corpo humano de 3 cm a 1 μm .

São muitos os pesquisadores em todo o mundo que estão tentando encontrar soluções e modelos que nos ajudem a entender o fenômeno de turbulência por aproximações da equação de Navier-Stokes, o que continua sendo um desafio nesse século.

1.3. A Experiência de Reynolds

“The equations of hydrodynamics, although they are applicable to direct motion, i.e., without eddies, and show that then the resistance is as the velocity, have hitherto through no light on the circumstances on which such motion depends. And although of late years these equations have been applied to the theory of the eddy, they have not been in the least applied to the motion of water which is a mass of eddies, i.e., in sinuous motion, nor have they yielded a clue to the cause of resistance varying as the square of velocity”. Com essas palavras Reynolds apresentou o resultado de sua famosa experiência consagrada em uma extensa publicação de 1883, como artigo científico publicado na Universidade de Cambridge, sob título não menos extenso: *“An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and the law of resistance in parallel channels”.* Mais tarde, os termos *“movimentos direto e sinuoso”*, foram apropriadamente substituídos por *“movimentos laminar e turbulento”*, respectivamente. Mais adiante, em seu famoso trabalho, Reynolds agrega: *“Thus, while as applied to waves and the motion of water in capillary tubes the theoretical results agree with the experimental, the theory of hydrodynamics has so far failed to afford the slightest hint why it should explain these phenomena, and signally fail to explain the law of resistance encountered by large bodies moving at sensibly high velocities through water, or that of water in sensibly large pipes”.*

Portanto, Reynolds introduziu novas informações à teoria da hidrodinâmica apresentada pelos matemáticos da época, que não esclarecia a influência da mudança de regime (laminar para turbulento) na lei de resistência ao escoamento. Por outro lado, interpretou esses regimes a partir da formação de perturbações, turbilhões ou vórtices (*eddies*) argumentando a falha da teoria hidrodinâmica na interpretação de movimentos turbilhonares (*mass of eddies*).

Ainda enfocando sua famosa publicação de 1883, Reynolds conceitua: *“direct and sinuous flow”* citando uma analogia que adaptaremos para a língua portuguesa com a ajuda de Levi (1989): *“As circunstâncias que determinam se o movimento de tropas será uma marcha ou uma confusão se parecem muito com aquelas que determinam se o movimento da água será direto ou sinuoso. Em ambos os casos, existe certa influência necessária para a ordem: com as tropas é a disciplina, com a água sua viscosidade ou*

aglutinação. Quanto maior for a disciplina das tropas ou mais aglutinado esteja o fluido, é menos provável que o movimento regular se altere em alguma ocasião. Por outro lado, tanto maior a armada e mais rápidas suas evoluções, tanto maior é a oportunidade de desordem; assim como, para o fluido, tanto mais largo o canal e mais rápida sua velocidade, tanto maior a probabilidade de formação de turbilhões”.

Portanto, estabelece-se, a partir do parágrafo anterior, o conceito de que a viscosidade é o agente responsável por destruir continuamente as perturbações ou os pequenos turbilhões (*ou eddies*). Sob o ponto de vista macroscópico, a viscosidade é uma propriedade física dos fluidos associada à resistência a deformação nos escoamentos.

O aparato construído por Reynolds, reproduzido mundialmente, e experiência obrigatória de todos os cursos das disciplinas de graduação de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica, hoje é peça de museu em Manchester/Inglaterra, e está reproduzido na *figura 1.6*.



Figura 1.6. Representação esquemática do aparato original da experiência de Reynolds, em exposição na universidade de Manchester.

O saudoso Enzo Levi, físico teórico italiano, radicado muitos anos na América Latina, em particular na UNAM – Universidade Autônoma do México, e do qual tive o prazer de ser aluno, quando frequentei um curso de aperfeiçoamento na Universidade de Padova em 1978, nessa época, desenvolvia em Padova, um estudo histórico da evolução

da Hidráulica, dentro de seu período sabático, e que resultou em uma interessante publicação (LEVI, 1989). Nesta publicação relata-se em detalhe a experiência conduzida por Reynolds em 22 de fevereiro de 1880: *“Neste dia Reynolds e Foster, seu auxiliar, chegaram cedo no Laboratório, encheram o reservatório de água deixando-o descansar das 10 horas da manhã às 2 horas da tarde, quando começaram o experimento. Permitiram inicialmente que a tinta fluísse bem devagar, a partir de uma pequena abertura da válvula terminal. O filamento de corante permaneceu estável paralelo a corrente de água, passando-se a se expandir com maior abertura da válvula, até se misturar totalmente com a água, obtendo-se coloração uniforme, para aberturas máximas da válvula”*.

Reynolds, portanto, mais de 400 anos após Leonardo Da Vinci, utilizou uma técnica de visualização de escoamento (que hoje parece trivial) e que permitiu um grande salto tecnológico de conhecimento sobre a estrutura de escoamentos turbulentos. Uma leitura mais atenta da experiência de Reynolds revela um filete colorido deslizando em movimento oscilatório bem definido, seguido por um trem de ondas de perturbações, que acarreta uma sequência de turbilhões. A experiência de Reynolds comprovou que existe uma velocidade crítica para regime laminar que é função, principalmente, da viscosidade do fluido e do diâmetro da tubulação, já que suas experiências foram feitas em conduto forçado rígido de seção circular, usando água. Para efeito de análise dos escoamentos ele introduziu o conceito de número de Reynolds, definido como uma relação de força de inércia e força viscosa, resultando no seguinte número adimensional:

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$$

(1.2)

Portanto, através da experiência de Reynolds concluiu-se que para valores abaixo de um certo Reynolds crítico em tubulações ($Re_c \approx 2400$) as perturbações eram amortecidas e o escoamento permanecia estável (laminar), enquanto que para valores acima de Re_c , as perturbações eram amplificadas na forma de turbilhões e o escoamento perdia a estabilidade (turbulento).

Sabe-se hoje que pode se obter escoamentos laminares com valores de Re da ordem de 90.000, mantendo-se condições experimentais rigorosas de ausência de

perturbações. Em outras palavras, a intensidade e a ordem de grandeza das perturbações introduzidas no sistema experimental, em particular na entrada no tubo, podem induzir a transição para a turbulência.

Consagrava-se assim a experiência de Reynolds que ainda hoje, decorrido mais de um século, permanece como uma das mais importantes contribuições ao entendimento do escoamento turbulento, apesar das sofisticadas técnicas de visualização de escoamento disponíveis nos dias de hoje, e das diversas experiências laboratoriais e numéricas, nessa área.

Sob o ponto de vista de engenharia o Re_c citado acima tem sido aceito na maioria dos problemas de escoamento em conduto forçado em tubulações. Todavia, o valor de Re_c vai depender da turbulência do escoamento de entrada e de outros fatores e não há, ainda hoje, uma teoria de estabilidade não linear, que seja satisfatória, para o estabelecimento de um Re_c de transição para turbulência, considerando os diversos escoamentos encontrados na natureza. No escoamento vascular que é transitório, onde a parede do tubo é flexível, este valor crítico não é claramente conhecido, embora alguns experimentos realizados *in vitro e in vivo*, na região da aorta descendente de animais, mostram a ocorrência de turbulência para $Re_c < 2400$. Nesses casos, as perturbações geradas na fase de diástole de certos escoamentos vasculares conduzem a menores valores para o número de Reynolds crítico, o que será discutido em capítulo posterior.

1.4. O Conceito de Camada Limite

O conceito de camada limite foi introduzido por Ludwig Prandtl em seus estudos de aerodinâmica em 1904.

Antes de Prandtl, a Mecânica dos Fluidos se desenvolvia em duas direções distintas. A hidrodinâmica teórica evoluiu a partir das equações de Euler (1755) para o escoamento potencial de fluido perfeito e como os resultados eram contraditórios com as observações experimentais, os engenheiros desenvolveram sua própria arte empírica, através da Hidráulica.

Embora a equação completa que descreve o movimento de fluido viscoso seja anterior as equações de Prandtl (Navier – 1827 e Stokes – 1845), soluções exatas dessa equação ficaram restritas a alguns problemas sem grande aplicação prática. Prandtl propôs a simplificação de uso das equações de Navier – Stokes, dividindo o escoamento

em duas regiões distintas, uma perto da fronteira sólida, onde seriam aplicadas suas equações e a outra englobando o restante do escoamento, onde a teoria do escoamento potencial poderia ser aplicada.

O sucesso da teoria de Prandtl foi maior nas aplicações em escoamentos externos dentro da linha de interesse da aeronáutica, pela própria formação de Prandtl e de seus discípulos como Blasius, o primeiro a propor uma metodologia de cálculo de camada limite laminar em placa plana, através de aplicação de solução de similaridade em 1908. Esse sucesso já não foi tão grande nas aplicações de escoamentos internos, e não é exagero dizer, que, ainda nos dias de hoje, a hidrodinâmica teórica e a hidráulica empírica trilham caminhos diversos.

Sob o ponto de vista prático é preciso enfatizar que a teoria da camada limite tem uma aceitação limitada, tendo em vista as dificuldades de sua aplicação para os problemas do mundo real (camada limite turbulenta), em que há necessidade da utilização de túneis de vento ou de água para o estudo de problemas práticos. Historicamente, embora o conceito de transição para turbulência tenha sido bem fundamentado, a partir da experiência de Reynolds (1883), a teoria da estabilidade linear aplicada ao escoamento externo em torno de placa plana, não teve a mesma aceitação, conforme será discutido no capítulo 3.

Por outro lado, a teoria linear fornece uma ideia da amplificação ou do amortecimento das pequenas perturbações, a partir da equação proposta, independentemente, por Orr (1907) e Sommerfeld (1908), que, à medida que crescem, passam a ser não-lineares, exigindo a aplicação de uma teoria não-linear até a passagem para a turbulência.

Os primeiros experimentos em túnel de vento não conseguiram, a partir da teoria linear da estabilidade, detectar as chamadas ondas de Tollmien & Schlichting (T&S) devido a problemas de ruídos associados à medição de turbulência em túneis de vento, exigindo a aplicação de uma teoria não-linear até a passagem para a turbulência.

1.5. Existe uma Teoria para a Turbulência?

Turbulência corresponde ao estado natural de um escoamento, ou, em outras palavras, o escoamento laminar é a exceção e não a regra na natureza e nas aplicações

tecnológicas. Como uma primeira definição formal de escoamento turbulento, pode-se dizer que é aquele que reúne as seguintes características:

- a) O campo de velocidades flutua aleatoriamente no tempo e apresenta alto nível de variações espaciais, exibindo uma larga faixa de escalas de comprimento;
- b) O campo de velocidades é imprevisível no sentido de que uma mudança nas condições iniciais produzirá mudança significativa no movimento subsequente.

Para ilustrar o que está dito acima, suponha-se que um experimento é repetido uma centena de vezes. Apesar das mesmas condições impostas para a realização do experimento a flutuação de velocidade medida num ponto é diferente em cada instante e isso ocorre porque sempre existirá uma diferença infinitesimal no modo em que o experimento é realizado e é da natureza da turbulência que essas diferenças sejam amplificadas. Por outro lado, medindo-se o valor da média temporal da velocidade, várias vezes, considerando-se o processo estocástico estacionário ergódico, o valor da média não varia. Isso mostra que as propriedades estatísticas da turbulência são determinadas unicamente pelas condições de fronteira e pelas condições iniciais, e dessa forma, em uma seqüência idêntica de experimentos realizados, as propriedades estatísticas do escoamento não mudam de um experimento para o outro, embora em termos dos detalhes do escoamento cada realização experimental será diferente. A *figura 1.7* representa um sinal de velocidade instantânea $u(t)$, medida na esteira turbulenta de um cilindro, podendo-se verificar, a invariância do valor de velocidade média, apesar dos diferentes resultados de valores instantâneos de velocidade para cada realização do processo.

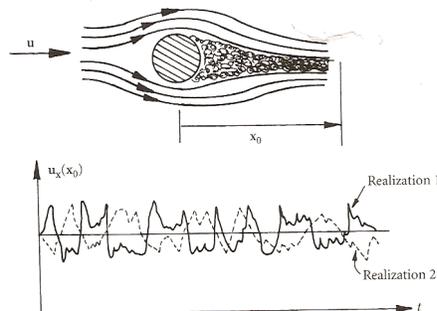


Figura 1.7. Registros de velocidade instantânea medida na esteira turbulenta de um escoamento em torno de cilindro (Fonte: DAVIDSON, 2007)

A ironia é que a velocidade instantânea $u(r)$ se comporta como uma variável aleatória, embora seja governada por uma equação determinística (NAVIER-STOKES, equação 1.1), por outro lado, as propriedades estatísticas de $u(t)$ parecem ter um comportamento bem definido, embora a solução da equação de Navier-Stokes, para a equação da turbulência média, conduza a incógnitas adicionais (*closure problem*).

1.6. Considerações Complementares

O fenômeno da “*turbulência*” está presente em muitas áreas de pesquisa e da engenharia, além de estar presente também no dia a dia da população.

A definição de “*turbulência*”, embora seja difícil de ser dada em poucas palavras, pode ser compreendida até mesmo pelos cidadãos leigos.

- Quem não teme o aviso de um piloto para apertar os cintos quando o avião deve ultrapassar uma zona de turbulência??
- Imagine o nível de *stress* dos astronautas ao ingressar na atmosfera terrestre, em sua viagem de retorno??
- Como avaliar a força de fenômenos meteorológicos turbulentos e seu potencial de destruição??
- Imagine sua queda no interior de um ressalto hidráulico de uma barragem de grande porte??
- Qual seria a sensação de um indivíduo com problemas arteriais com recirculações de escoamento na região da aorta??
- Como avaliar o que aconteceria ao país se o processo inflacionário não fosse detido??

O estudo da *turbulência*, portanto, constitui-se em um problema não resolvido e a aplicação de uma teoria universal a todos os problemas que envolvem *turbulência* ainda está por vir, o que mostra que a evolução nas técnicas digitais (computadores, informática etc) nem sempre é acompanhada pela evolução do conhecimento no mundo real, na mesma velocidade.

A teoria do matemático russo Kolmogorov de 1941 foi a que mais se aproximou até hoje de uma proposta de uma teoria universal da turbulência, cuja aceitação é mantida, apesar das diversas opiniões em contrário, mencionadas em Jimenez (1991).

O estudo da *turbulência* permanece como um desafio de pesquisa que não prescinde da análise experimental e contribui para o desenvolvimento de novas fronteiras do conhecimento em termos de pesquisa básica e aplicada a Engenharia.

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2017
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP