

2. VISUALIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTOS

Sérgio Said Mansur

Edson Del Rio Vieira

Universidade Estadual Paulista – UNESP Ilha Solteira

Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Brasil Centro, 56

Ilha Solteira – SP

mansur@dem.feis.unesp.br

delrio@dem.feis.unesp.br

2.1 Introdução

O sucesso de um trabalho científico depende de múltiplos fatores, incluindo a escolha adequada e a correta utilização de ferramentas capazes de gerar os resultados pretendidos, bem como a interpretação consistente destes resultados, dentro de um determinado contexto. Ocorre, porém, que, em muitas áreas do conhecimento humano, os fenômenos tratados apresentam alto grau de complexidade, exigindo a disponibilidade de uma enorme quantidade de dados, para permitir estudos aprofundados ou conclusivos. Nestes casos, o tratamento e a análise dos resultados obtidos pode se tornar uma tarefa demasiadamente árdua ou, até mesmo, impossível de ser realizada.

Capaz de processar um enorme conjunto de informações num pequeno intervalo de tempo, o sentido da visão constitui um instrumento extremamente eficiente de diagnóstico e análise. Uma única imagem pode condensar milhões de dados, facilitando sobremaneira a compreensão de eventos físicos, químicos e biológicos. Em vista disto, o uso científico de imagens tem se proliferado de forma espantosa, tornando-se corriqueiro em muitos ramos das ciências.

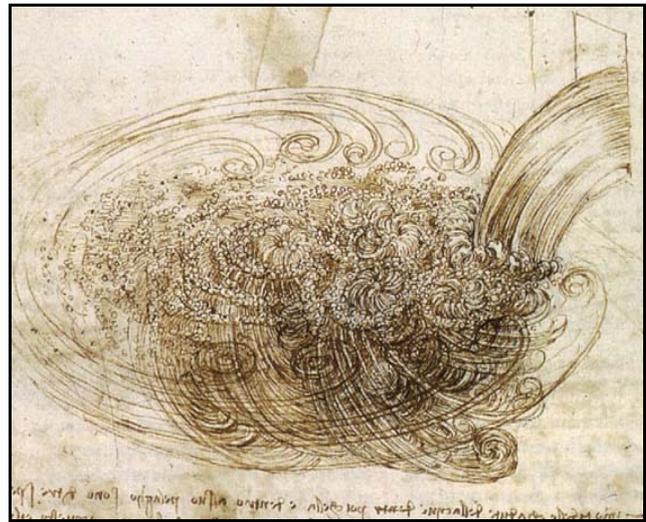
No campo da mecânica dos fluidos, em particular, uma ampla variedade de técnicas de visualização de escoamentos, com diferentes níveis de sofisticação, tem sido desenvolvida e relatada na literatura. Nas últimas décadas, artigos empregando a visualização numérica ou experimental de escoamentos para subsidiar a análise de problemas físicos aparecem em praticamente todos os números dos principais periódicos consagrados ao estudo dos fluidos em movimento. Além disto, excelentes textos, publicados por renomados autores, têm sido inteiramente dedicados ao tema, dentre os quais figuram as obras de Merzkirch (1974), Van Dyke (1984) e Yang (1989), que se destacam, não apenas pela beleza das imagens selecionadas para ilustrá-los, mas, sobretudo, pela clareza com que determinados fenômenos são colocados em evidência.

No que concerne ao estudo dos escoamentos turbulentos e transicionais, os métodos de visualização sempre assumiram papel de elevada importância, contribuindo para decifrar importantes enigmas fenomenológicos associados a este tipo de escoamento. Ainda no período da Renascença, o sábio italiano Leonardo da Vinci (1452-1519) serviu-se extensivamente da visualização de escoamentos em suas reflexões sobre o movimento dos fluidos, deixando como legado uma série de projetos e croquis de veículos aquáticos, máquinas voadoras e dispositivos de bombeamento, além de vários esboços e manuscritos retratando ondas de superfície, ressaltos hidráulicos, jatos livres, esteiras de corpos rombudos e muitos outros tipos de escoamentos – Figura 1. A contribuição de da Vinci neste campo abrange vários outros feitos notáveis para sua época, incluindo a dedução da equação de conservação da massa para escoamentos unidimensionais permanentes e, ainda, a representação da distribuição de velocidades no interior de um vórtice.

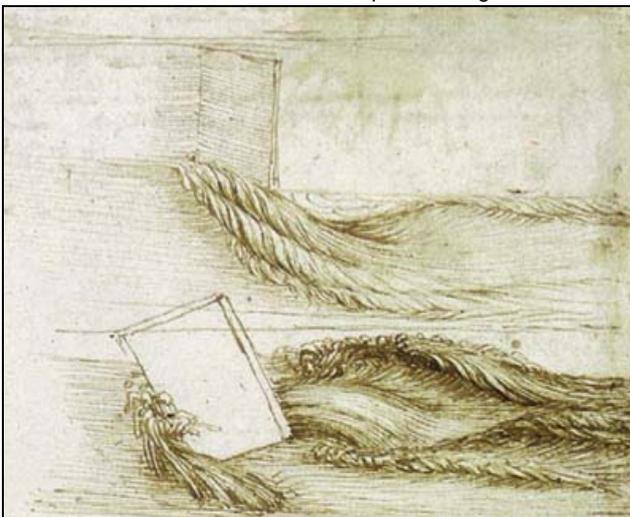
A partir do século XIX, foram muitas as descobertas realizadas com o auxílio da visualização de escoamentos. Além do clássico experimento de Osborn Reynolds (1842-1912), que permitiu delimitar a transição do regime laminar para o turbulento dentro de um tubo, vários outros exemplos



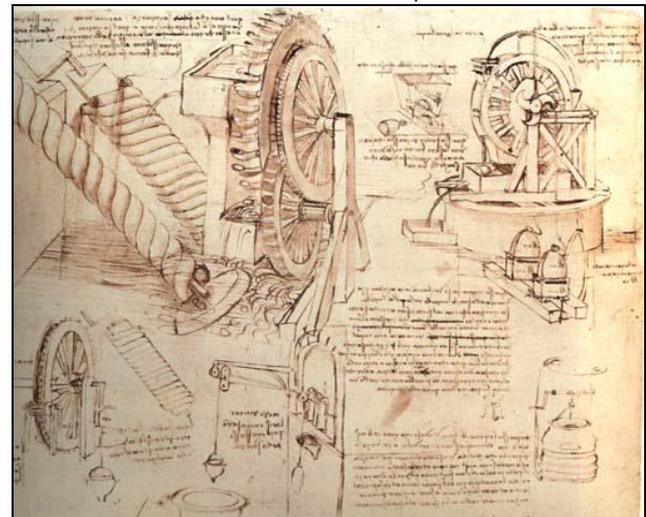
<http://www.eng.warwick.ac.uk>



<http://www.eas.caltech.edu>



<http://www2.faculty.sbc.edu>

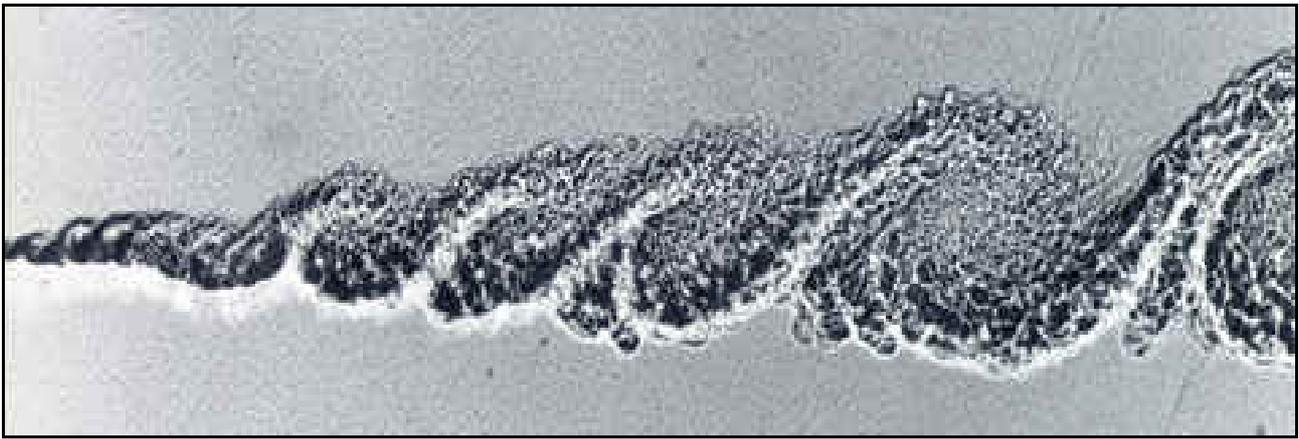


<http://www.italian-art.org>

Figura 1. Provável auto retrato, croquis, esboços e anotações de Leonardo da Vinci sobre o movimento dos fluidos.

podem ser citados. De fato, foi observando o deslocamento de pequenos flocos de mica em suspensão num escoamento de água que Ludwig Prandtl (1875-1953) estabeleceu o conceito de camada limite. Com a ajuda da visualização de escoamentos, Theodor von Kármán (1881-1963) pôde identificar a esteira de vórtices alternados que se forma a jusante de cilindros, oferecendo explicação aos fenômenos que, anos antes, haviam sido constatados e estudados por Cenek Strouhal (1850-1922) e John William Strutt (1842-1919), mais conhecido como Lord Rayleigh. Também foi com o auxílio de técnicas de visualização que Stephen Kline (1922-1997) estudou o processo de bombeamento induzido por instabilidades parietais (*bursting*), que constitui um importante mecanismo de produção e transporte de energia cinética turbulenta em escoamentos do tipo camada limite.

Não raro, a visualização de escoamentos tem sido empregada em associação com técnicas de medição, produzindo resultados notáveis. Em meio aos muitos exemplos bem sucedidos desta combinação, encontra-se o conhecido artigo de Brown e Roshko (1974), cujos resultados realçaram a grande diversidade de escalas que compõem uma camada de mistura turbulenta em desenvolvimento espacial, mostrada na Figura 2, ressaltando o papel dominante que as estruturas coerentes exercem sobre este tipo de escoamento. Além da importante contribuição que ofereceu à compreensão dos escoamentos cisalhantes livres, este trabalho mudou conceitos já estabelecidos, apontando novos rumos para o estudo e o controle da turbulência nos fluidos.



<http://www.nisidriv.cv.noda.sut.ac.jp>

Figura 2. Camada de mistura turbulenta em desenvolvimento espacial. Imagem obtida por Anatol Roshko, Caltech, USA.

A partir do início da década de 80, a considerável evolução dos equipamentos de informática, aliada à crescente disponibilidade de computadores digitais nas universidades e centros de pesquisa, propiciou o desenvolvimento e a disseminação das tecnologias de processamento de imagem, favorecendo o uso de técnicas de visualização também na análise quantitativa de escoamentos. Atualmente, diferentes alternativas para a medição de campos de escoamentos a partir do processamento de imagens encontram-se disponíveis e sua utilização tem se tornado rotineira em muitos laboratórios de dinâmica dos fluidos, notadamente a velocimetria por imagem de partículas (PIV – *particle image velocimetry*).

Sem a menor pretensão de constituir um tratado amplo e abrangente sobre a visualização experimental de escoamentos, o presente trabalho aborda aspectos importantes do tema, com alguma ênfase nas técnicas tradicionalmente empregadas em meio líquido, onde se concentra a maior experiência dos autores.

2.2 Visualização espontânea de escoamentos

A Terra é uma imensa esfera, ligeiramente achatada nos pólos, com quase 13 mil km de diâmetro na região equatorial. Cerca de 70% de sua superfície é coberta por águas, que ocupam um volume aproximado de 1,6 bilhões de km³. Ao seu redor, uma atmosfera formada por diferentes tipos de gases se estende a uma altura superior a 400 km. Abaixo da crosta terrestre, encontram-se o manto e o núcleo, constituídos por uma mistura de metais líquidos, elementos radioativos e vários outros componentes, que fluem a alta temperatura e cujo movimento contínuo dá origem ao campo magnético terrestre. O ar e as águas também se movimentam permanentemente, produzindo fenômenos de grande complexidade, muitos dos quais, essenciais para a manutenção da vida no planeta. Em muitas situações, tais escoamentos podem ser visualizados espontaneamente, sem a utilização dos métodos usualmente empregados em laboratório.

A presença de uma superfície livre permite observar as correntes de um grande rio ou de um pequeno curso d'água contornando pedras, troncos de árvores, pilares de pontes e outros obstáculos sólidos imersos no escoamento, como mostram as imagens da Figura 3. Da mesma forma, esteiras e ondas gravitacionais, formadas por embarcações ou animais aquáticos em movimento, podem ser facilmente identificadas. Vórtices são observados na pia da cozinha ou numa xícara de café e, ainda, diferentes regimes de escoamento podem ser identificados no jato d'água que deixa uma torneira.

A Figura 4 apresenta as famosas correntes do Naruto, na província de Awa, no Japão, várias vezes retratada por Hiroshige Utagawa (1797-1858), onde magníficos turbilhões são criados.

No encontro das águas escuras do rio Negro com as águas mais claras do Solimões, instabilidades de Kelvin-Helmholtz tornam-se nítidas, como mostra a Figura 5. Na imagem da



<http://ky.water.usgs.gov>



Cortesia Dr. Aristeu da Silveira Neto – FEM/UFU



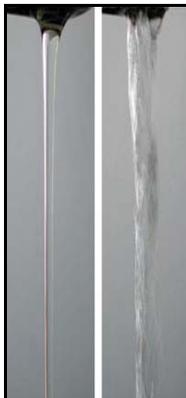
Acervo do LVE/UNESP/IS



www.alaskapassages.com



<http://www.efluids.com>



Acervo do LVE/UNESP/IS

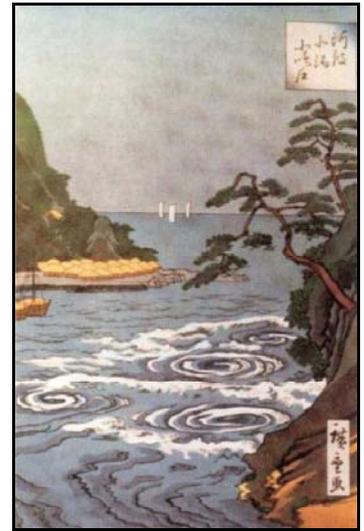
Figura 3. Visualização de escoamentos através do movimento de uma superfície livre.

direita, o barco que navega próximo às ilhas permite estimar o tamanho das estruturas turbilhonares que desfilam rio abaixo, mesclando as duas correntes.

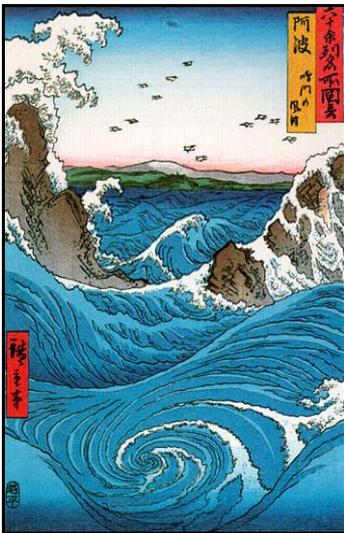
Ainda que o ar seja transparente, seu movimento também pode ser frequentemente percebido, sem a necessidade da utilização de métodos artificiais. No feixe de luz que penetra em um quarto escuro através de uma pequena fresta, por exemplo, observam-se minúsculas partículas de poeira em suspensão no ambiente. Os raios luminosos, ao incidirem sobre as partículas sólidas, são refletidos em diferentes direções, produzindo um efeito óptico bastante peculiar, conhecido como espalhamento (*scattering*). As partículas de poeira tornam-se, então, extremamente visíveis, dando a impressão de serem bem maiores do que realmente o são. Com isto, o movimento do ar, que normalmente as transporta sem escorregamento expressivo, pode ser identificado, como comprova a Figura 6.



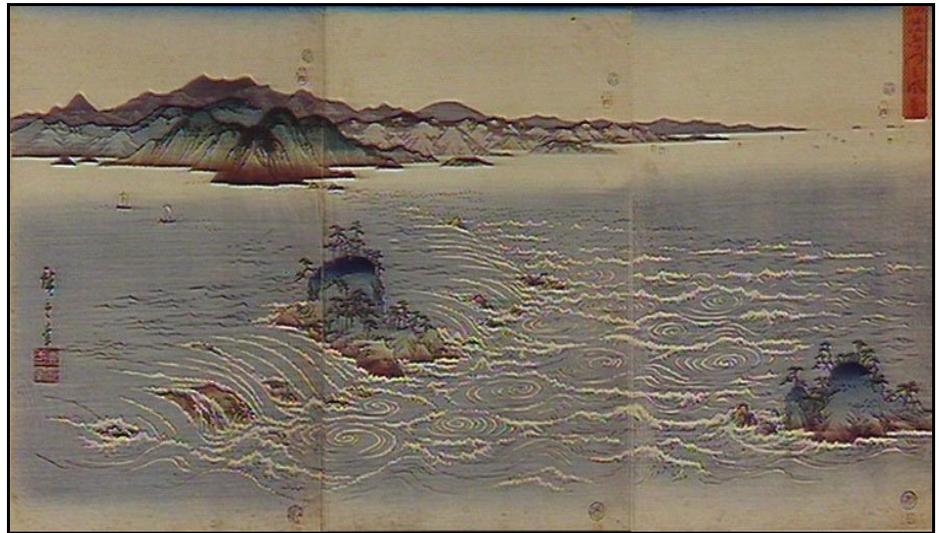
<http://p.bunri-u.ac.jp>



<http://www.nga.gov.au>



<http://p.bunri-u.ac.jp>



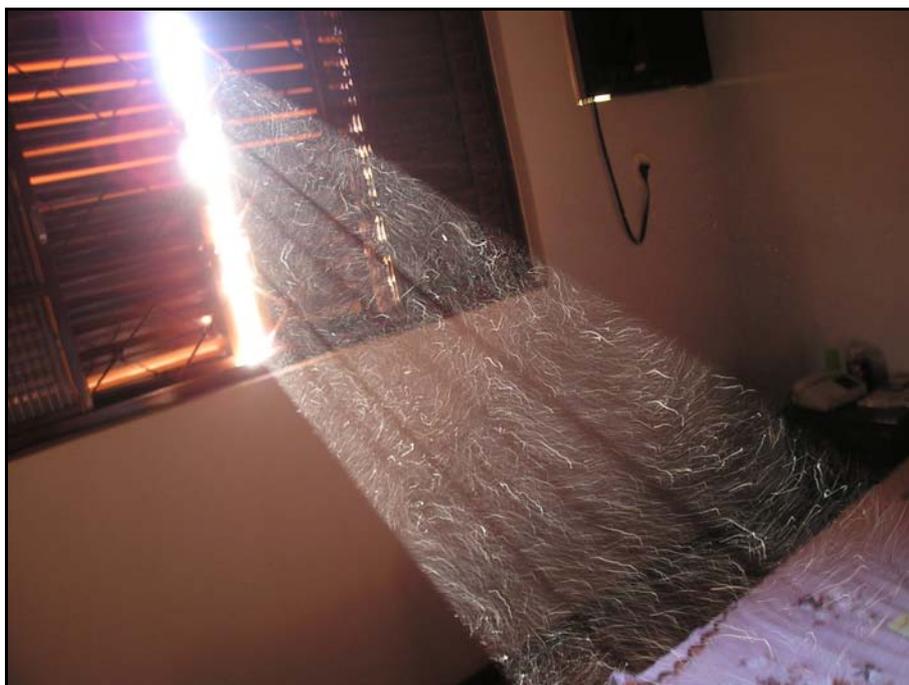
<http://www.nga.gov.au>

Figura 4. As correntes do Naruto, Província de Awa, Japão, e sua representação nas telas de Hiroshige Utagawa (1797-1858).



Secretaria de Turismo de Manaus

Figura 5. Instabilidades de Kelvin-Helmholtz no encontro dos rios Negro e Solimões.



Acervo do LVE/UNESP/IS

Figura 6. Visualização do escoamento do ar num quarto escuro, através do movimento de partículas de poeira em suspensão.

Se há fumaça, pode ser que não haja fogo, mas, quase sempre, haverá uma boa oportunidade de visualização de escoamentos – é o que atestam as imagens da Figura 7. A fumaça que se desprende de um cigarro, sobe num belíssimo movimento espiralado. Na erupção de um vulcão, na descarga de uma chaminé ou no lançamento de um foguete, um emaranhado de estruturas turbilhonares pode ser reconhecido. O movimento do vento natural num campo incendiado dá origem a uma série de pequenos tornados, que se tornam visíveis na presença das cinzas resultantes do processo de incineração.

O deslocamento das nuvens no céu indica a direção e a velocidade dos ventos que as impelem, fornecendo informações valiosas aos meteorologistas. Mas, na presença de nuvens, muitos outros fenômenos atmosféricos podem ser observados, alguns deles, extremamente violentos, com ventos que, em casos excepcionais, podem superar os 500 km/h. A Figura 8 mostra o que talvez seja o primeiro registro fotográfico de um tornado, realizado em agosto 1884, no estado americano de Dakota. Ao seu lado, o ciclone extratropical Catarina, que, em março de 2004, atingiu a região sul do Brasil, causando grande destruição.

Na Figura 9, duas correntes de ar paralelas e com velocidades diferentes dão origem a uma camada de mistura em desenvolvimento temporal. Nuvens posicionadas sobre esta região tornam visíveis as instabilidades de Kelvin-Helmholtz.

Em regiões montanhosas, a interação entre o escoamento do ar e a topografia local favorece o desenvolvimento de ondas gravitacionais atmosféricas. Nuvens lenticulares pairando sobre o cume de uma montanha, como na Figura 10, sinalizam a inequívoca presença das chamadas ondas *lee*, que recebem este nome por se formarem *on the lee of the mountain*, ou seja, sobre a encosta da montanha protegida do vento.

Do espaço, imagens de satélite frequentemente revelam escoamentos atmosféricos espetaculares, quase sempre impossíveis de serem visualizados por um observador na superfície terrestre. A Figura 11 mostra uma esteira de von Kármán formada a jusante das ilhas Canárias, que se estende por centenas de quilômetros. Na imagem da direita, a composição de três fotografias, tiradas em dias consecutivos, permite observar o trajeto do furacão Andrew, que passou entre o norte de Cuba e o sul da Flórida, em agosto de 1992, vindo do leste para o oeste.



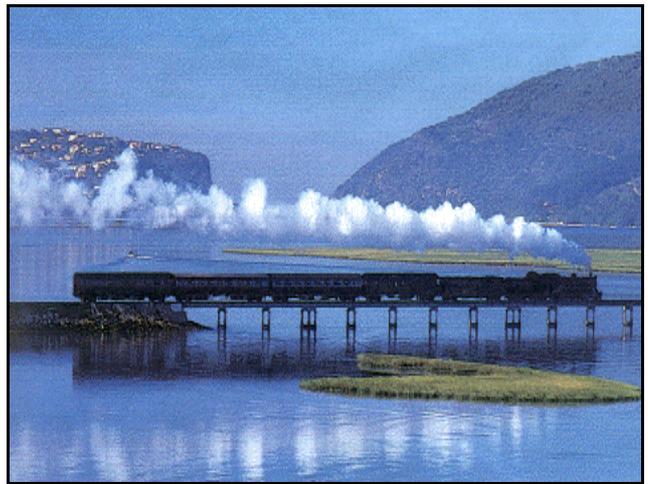
<http://members.aol.com>



<http://165.158.1.110>



Acervo do LVE/UNESP/IS



<http://www.efluids.com>



Acervo do LVE/UNESP/IS

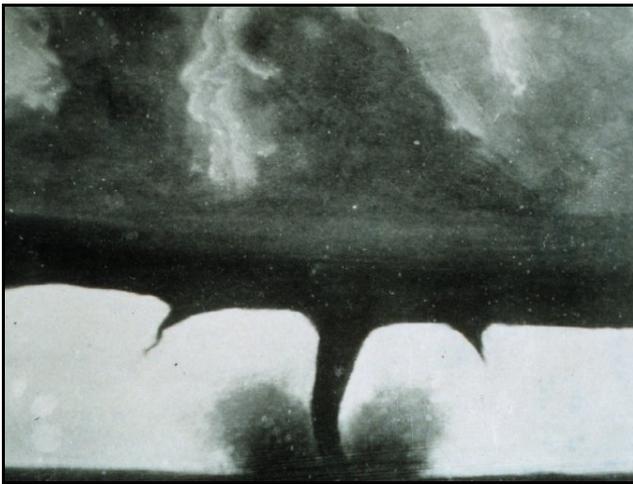


<http://www.eng.vt.edu>



<http://www.ksc.nasa.gov>

Figura 7. Escoamentos visualizados naturalmente, com a presença de fumaça.



<http://www.srh.noaa.gov>



<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov>

Figura 8. Tornado e ciclone extratropical, visualizados graças à presença de nuvens.



Cortesia Dr. Márcio T. Mendonça – CTA/IAE



<http://hsu.as.ntu.edu.tw>

Figura 9. Instabilidades de Kelvin-Helmholtz numa camada de mistura em desenvolvimento temporal.

Na Figura 12, dois grandes vórtices podem ser nitidamente identificados na esteira de um avião a jato voando ligeiramente acima das nuvens. A magnitude das instabilidades produzidas no ar circundante, depende, dentre alguns outros fatores, do tamanho e da velocidade da aeronave que as gerou. Na presença de vento forte, a atmosfera é, em geral, turbulenta e estes vórtices perdem rapidamente sua identidade. Em situações de calmaria atmosférica, entretanto, estas estruturas turbilhonares podem guardar sua coerência por um período bastante longo, constituindo um sério risco à navegação aérea. Graves acidentes já aconteceram com aviões de menor porte que, inadvertidamente, entraram na esteira turbilhonar de uma aeronave maior. Para evitar este tipo de ocorrência, distâncias mínimas entre aeronaves em vôo são rigorosamente definidas por normas internacionais de segurança aérea.

Mesmo sem nuvens, aeronaves em vôo têm a incrível capacidade de transformar a atmosfera adjacente em um verdadeiro laboratório de visualização de escoamentos. Com efeito, sob determinadas condições, asas de sustentação podem provocar a condensação do ar úmido ao seu redor. A razão física para isto baseia-se em princípios fundamentais da aerodinâmica, podendo ser explicada da maneira como segue. A sustentação é ocasionada pela pressão relativamente baixa de um dos lados da asa – no extradorso – e relativamente alta do lado oposto – no intradorso. Se a



<http://www.efluids.com>



<http://www.fin.ucar.edu>

Figura 10. Ondas *lee* sobre montanhas alpinas.



<http://www.visibleearth.nasa.gov>



<http://rsd.gsfc.nasa.gov>

Figura 11. Estruturas turbilhonares atmosféricas vistas a partir do espaço.

pressão no extradorso for suficientemente baixa, a temperatura do vapor d'água contido no ar poderá cair a níveis que permitam sua condensação. Este fenômeno é usual em circunstâncias que requerem elevada sustentação, tais como em aterrissagens de grandes aeronaves ou nas manobras a alto-g, típicas de aviões de combate. Exemplos destas duas situações são apresentados nas imagens da Figura 13.

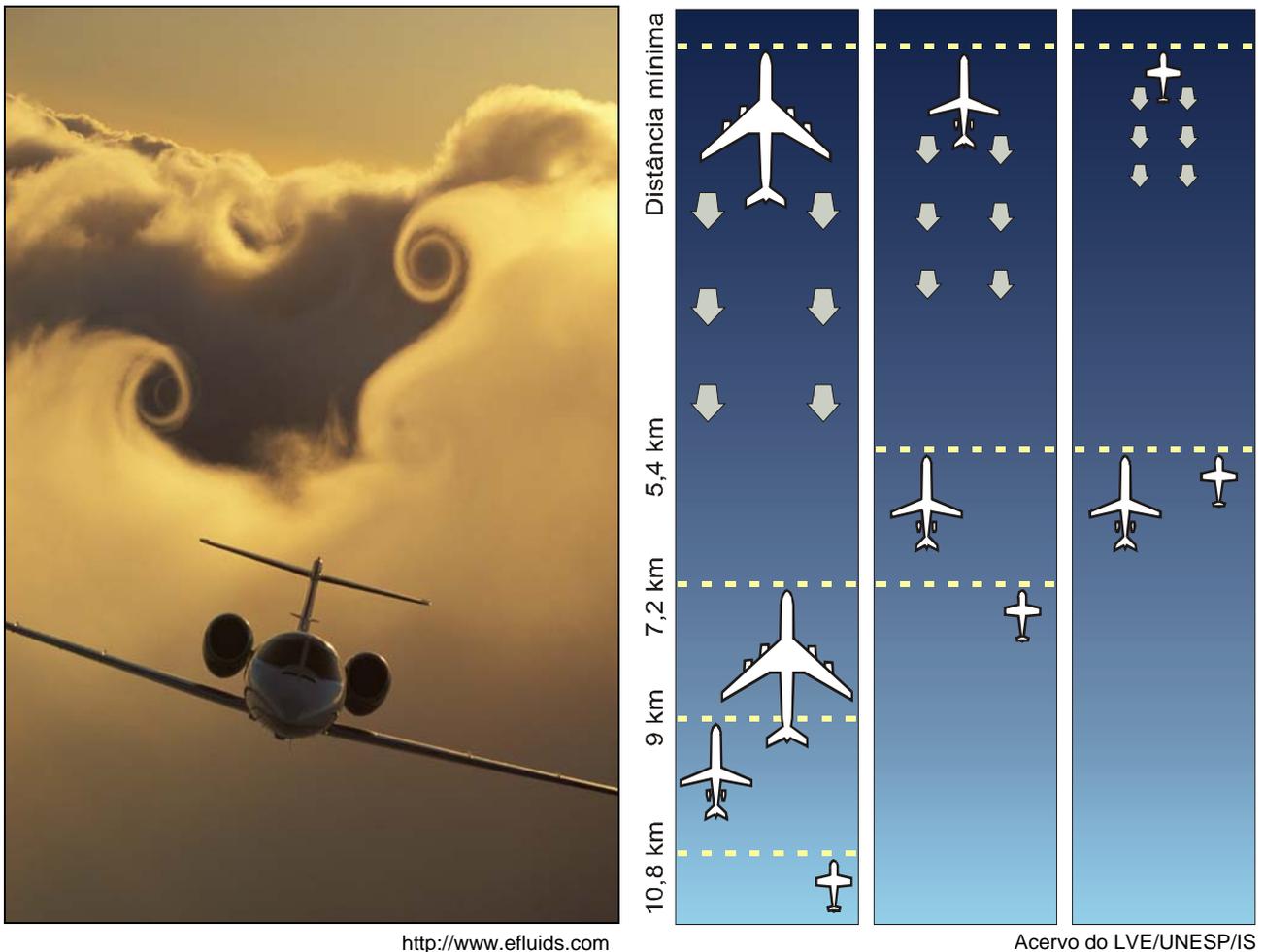


Figura 12. Esteira turbilhonar a jusante de um avião a jato e distâncias mínimas de segurança recomendadas entre aeronaves em vôo.

Os frequentes traços brancos (*condensation trails* ou, simplesmente, *contrails*) deixados por aeronaves em dias de céu azul também se prestam à materialização dos vórtices de esteira e podem ter duas origens distintas. No caso mais comum, são constituídos por cristais de gelo, produzidos a partir da condensação do vapor d'água descarregado violentamente na atmosfera, junto com os gases de escape do motor. Para que este processo ocorra, é necessário que a temperatura ambiente seja suficientemente baixa – comparáveis às encontradas na tropopausa – e, por isto, o fenômeno quase sempre ocorre em elevadas altitudes. No segundo caso, os rastros mostram-se bem menos densos que os da situação anterior e são provocados diretamente pela condensação do vapor d'água contido no ar ambiente, capturado nos centros de baixa pressão – e, conseqüentemente, de baixa temperatura – dos turbilhões de esteira. Em virtude das condições termodinâmicas que lhe são inerentes, este último mecanismo raramente ocorre durante o vôo de pequenas aeronaves ou em dias de baixa umidade relativa.

Em atmosfera calma, os rastros de condensação podem permanecer visíveis por horas a fio, até se dissiparem completamente. Em contrapartida, quando perturbações turbulentas se manifestam no ar ambiente, os dois vórtices contra rotativos da esteira interagem mutuamente, propiciando o desenvolvimento de instabilidades de Crow. Com isto, as listras de condensação tornam-se sinuosas, se desagregam e, finalmente, formam anéis turbilhonares que se dispersam rapidamente. Rastros de condensação em diferentes ângulos visuais e estágios de evolução podem ser distinguidos nas imagens da Figura 14. Com o auxílio de fotografias tiradas em intervalos regulares de 15 segundos, a seqüência extraída de van Dyke (1982) mostra a evolução temporal das instabilidades de Crow no rastro de um bombardeio B-47.



<http://www.efluids.com>



<http://www.efluids.com>



<http://www.simviation.com>



E.J.van Koningsveld (C)
www.sky-flash.com

<http://www.eng.vt.edu>



<http://www.eng.vt.edu>



<http://www.ksc.nasa.gov>

Figura 13. Condensação do ar úmido no extradorso de asas de sustentação.

Para finalizar, é interessante acrescentar que, muito frequentemente, características importantes de um escoamento podem ser identificadas, examinando-se os vestígios deixados no ambiente que lhe serviu de cenário. Na Figura 15, dois exemplos bastante ilustrativos deste tipo de situação. No primeiro deles, o percurso do ar sobre o capô de um veículo encontra-se perfeitamente registrado pelas marcas de lama impressas na pintura. Na segunda imagem, as ondulações estampadas sobre as



<http://www.sciam.com>



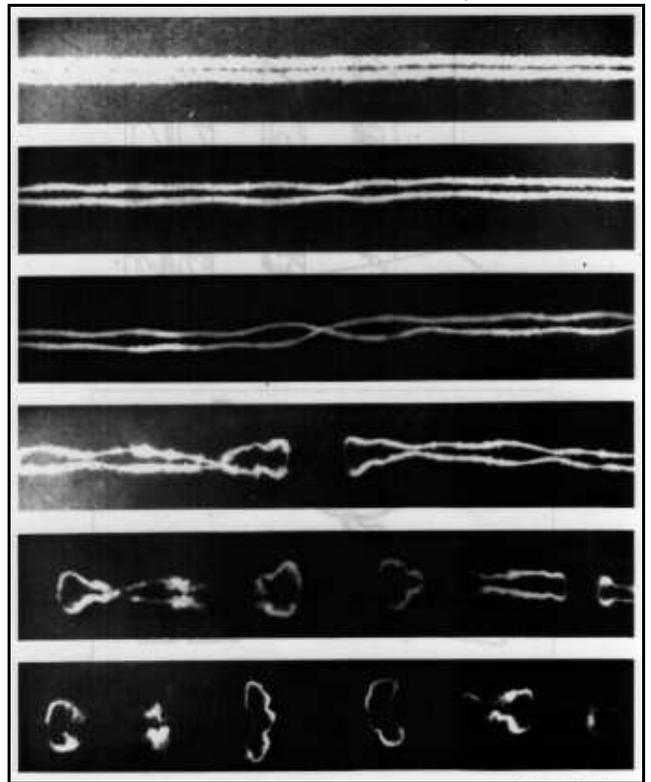
<http://www.vangeelpilot.com>



<http://www.sciam.com>



<http://www.ahoymatey.com>



van Dyke (1982)

Figura 14. Rastros de condensação deixados por aeronaves em vôo e instabilidades de Crow.

areias do Saara resultam, provavelmente, da propagação de ondas de Tollmien-Schlichting, desenvolvidas na região da camada limite adjacente ao solo, com o vento soprando na direção perpendicular aos sulcos. Estruturas ondulatórias de mesma natureza podem, também, ser observadas no fundo arenoso de um pequeno riacho ou nas areias de uma praia, em dias de maré baixa.



Acervo do LVE/UNESP/IS



<http://www.guiageografico.com>

Figura 15. Marcas deixadas pelo escoamento do ar sobre o capô de um veículo e sulcos nas areias do deserto do Saara produzidas pelo vento.

2.3 Visualização experimental de escoamentos

A visualização de escoamentos é a ciência – e a arte – que se dedica ao desenvolvimento e à aplicação de métodos capazes de tornar visíveis fenômenos ou propriedades associadas ao movimento dos fluidos. Em sua essência, a visualização de escoamentos transforma grandezas físicas em imagens que possam ser capturadas, para posterior análise.

Mas, uma vez obtidas, o que as imagens de um escoamento são capazes de revelar? A resposta a esta questão não é simples e nem única. Em primeiro lugar, as informações que podem ser extraídas de uma dada imagem dependem fortemente da competência técnica de quem a analisa e de sua experiência no estudo de escoamentos correlatos. Em segundo lugar, qualquer diagnóstico nesta área torna-se muito mais simples e, ao mesmo tempo, confiável, quando as técnicas empregadas na geração e na captura das imagens são, também, conhecidas daquele que as interpreta.

2.3.1 Conceitos fundamentais

Vários conceitos cinemáticos e dinâmicos são importantes para a compreensão das técnicas de visualização e para a interpretação de imagens de escoamentos. Ainda que possam ser encontrados em qualquer texto clássico de mecânica dos fluidos, algumas noções fundamentais são sumarizadas a seguir.

Campo

Um campo pode ser entendido como uma função escalar, vetorial ou tensorial distribuída no espaço e no tempo.

Campo escalar

É aquele que associa a cada ponto no espaço, e a cada instante, uma magnitude, seguida de uma unidade de medida. A pressão, a temperatura e a massa específica do fluido são exemplos de grandezas escalares de interesse na visualização de escoamentos.

Campo vetorial

É aquele que associa a cada ponto no espaço, e a cada instante, um vetor. Na visualização de escoamentos, a velocidade, a vorticidade e alguns gradientes de propriedades escalares constituem grandezas vetoriais da mais alta relevância para a análise de campos de escoamento.

Campo tensorial

É aquele que associa a cada direção no espaço, e a cada instante, um vetor. O tensor das tensões e o tensor das taxas de deformação são exemplos típicos de grandezas tensoriais associadas ao escoamento de um fluido.

Escoamento permanente (*steady flow*) e não permanente (*unsteady flow*)

Um escoamento é dito permanente quando as propriedades que o caracterizam são invariantes no tempo, caso contrário, ele é definido como não permanente. Sob esta ótica, todo escoamento turbulento é, a rigor, não permanente. Entretanto, pode-se caracterizar como estatisticamente permanente um escoamento turbulento que não apresente variações em suas propriedades médias temporais. A Figura 16 distingue estas duas situações, mostrando a evolução de uma grandeza genérica ϕ – escalar, vetorial ou tensorial – num ponto qualquer de um escoamento turbulento, ao longo do tempo. A visualização de escoamentos não permanentes sempre impõe interessantes desafios aos experimentalistas.

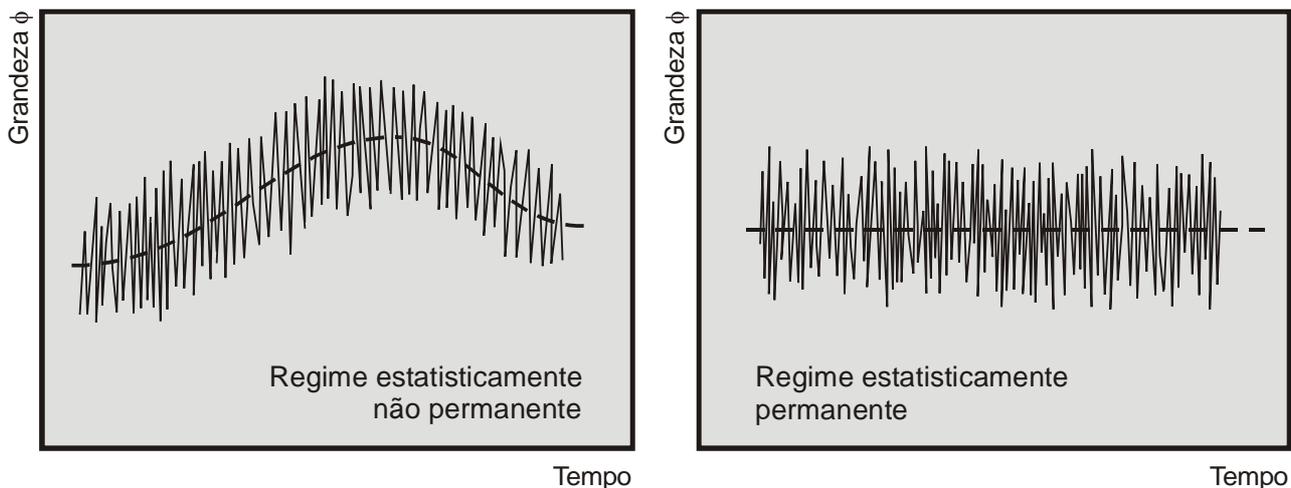


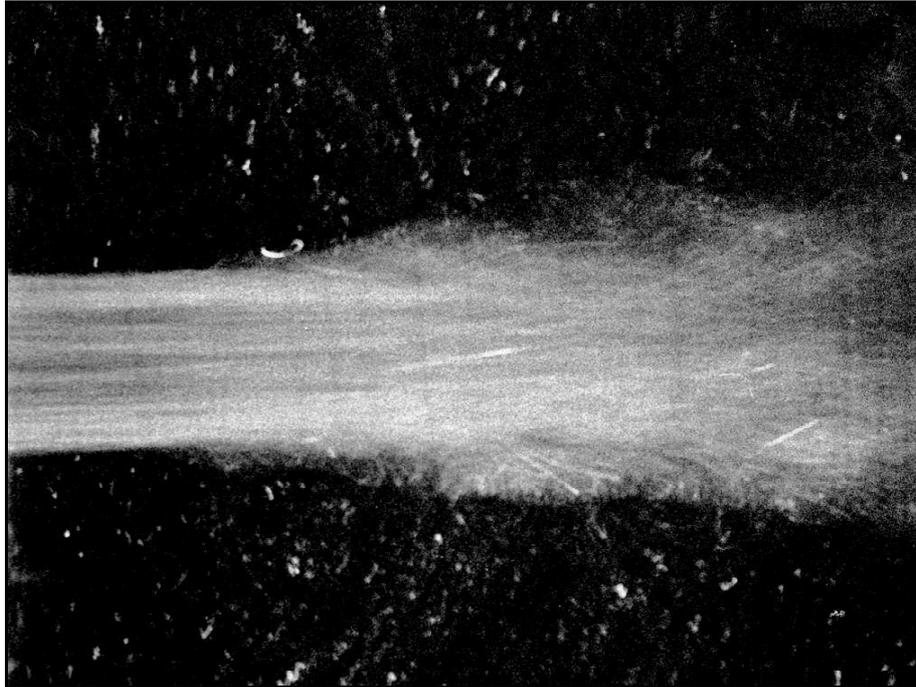
Figura 16. Variação temporal de uma grandeza física num escoamento turbulento.

Trajetória de uma partícula (*pathline*)

É o lugar geométrico dos pontos pelos quais uma determinada partícula passou ao longo de seu percurso. Na visualização de escoamentos, pequenas partículas sólidas ou gasosas são, muitas vezes, semeadas no escoamento, para serem transportadas pelo movimento do fluido. Com uma iluminação adequada, trajetórias de partículas podem ser registradas numa fotografia tirada com tempo de exposição suficientemente longo. Para ilustrar, a Figura 17 mostra a raiz de um jato de água em meio estacionário, fotografado com película de alta sensibilidade e 4 segundos de exposição. Nas regiões de baixa velocidade, algumas micro-partículas podem ser identificadas como pequenos pontos claros sobre o fundo negro.

Linha de corrente (*streamline*)

É a linha que, num dado instante, tem como tangente o vetor velocidade em cada um de seus pontos. Decorre, daí, que duas linhas de corrente jamais se cruzam. Além disso, em escoamentos



Acervo do LVE/UNESP/IS

Figura 17. Trajetória de partículas na raiz de um jato axissimétrico – $Re = 1920$.

bidimensionais, a distância entre duas linhas de corrente é inversamente proporcional à velocidade local do fluido.

Na prática experimental, a visualização por meio de linhas de corrente fica, quase que exclusivamente, restrita à análise de escoamentos em regime permanente.

Linha de emissão (*streakline*)

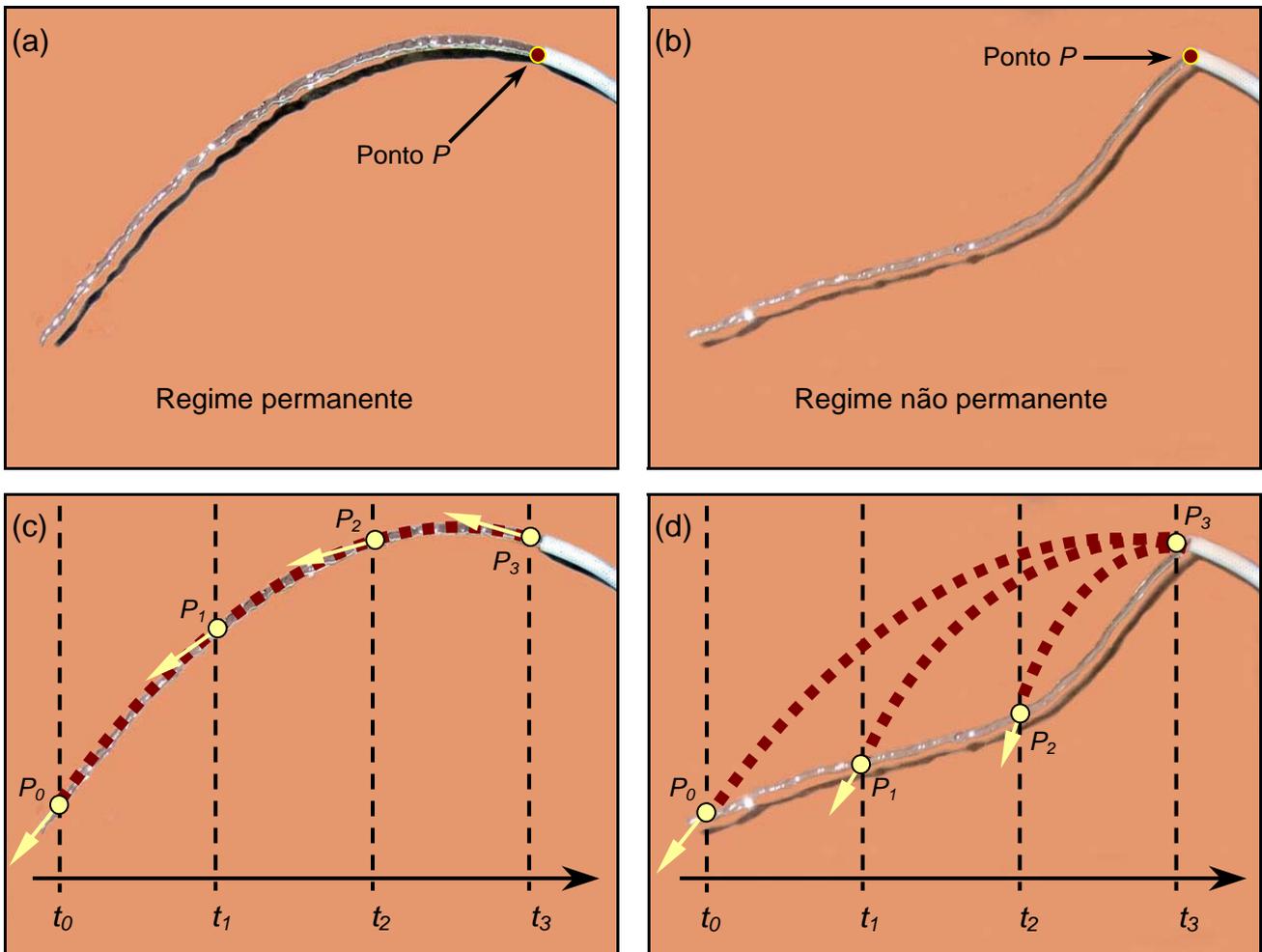
É a linha que, em um dado instante, liga todas as partículas que passaram por um determinado ponto no campo de escoamento. Assim, uma linha obtida através da injeção contínua de um traçador – líquido ou gasoso – em um ponto fixo do escoamento constitui uma linha de emissão.

Em situações práticas, um conjunto de linhas de emissão pode ser identificado quando se observa a fumaça que sai de uma chaminé ou quando se acompanha o contaminante descarregado por uma tubulação na margem de um rio.

Como exemplo, as fotografias das Figuras 18(a) e (b) mostram o jato de água que deixa uma mangueira, em dois diferentes regimes, permanente e não permanente, este último, obtido durante o fechamento da torneira. Desprezando-se a espessura do jato, pode-se considerar que, em ambas as situações, todas as partículas que num mesmo instante aparecem sobre a imagem, em algum momento passaram pelo ponto P , satisfazendo, portanto, a definição de linha de emissão.

Na representação esquemática das Figuras 18(c) e (d), são identificadas as partículas P_0, P_1, P_2 e P_3 , que passaram pelo ponto P nos instantes t_0, t_1, t_2 e t_3 , respectivamente. Neste caso, é interessante observar que, em regime permanente, todas as partículas que deixam a mangueira seguem o mesmo trajeto. Assim, como o vetor que caracteriza a velocidade instantânea de uma partícula é sempre tangente à sua trajetória, conclui-se que a mesma linha que define a trajetória das partículas define, também, uma linha de corrente. Por outro lado, é fácil notar, com o auxílio da Figura 18(d), que o mesmo não acontece quando o regime é não permanente, uma vez que, ao passar pelo ponto P , cada partícula apresentará uma velocidade diferente daquela que a antecedeu, resultando em movimentos não coincidentes.

Em outras palavras, embora constituam conceitos completamente distintos, num escoamento permanente, a trajetória das partículas que passam por um ponto qualquer do escoamento coincide com as linhas de corrente e com as linhas de emissão passando por este mesmo ponto.



Acervo do LVE/UNESP/IS

Figura 18. Trajetórias de partículas, linhas de corrente e linhas de emissão na água que deixa uma mangueira.

Linha de tempo (*timeline*)

Enquanto uma linha de emissão interliga partículas que, em instantes diferentes, passaram por um mesmo ponto fixo no campo de escoamento, uma linha de tempo conecta todas as partículas que, num mesmo instante, passaram por uma linha arbitrária, preferencialmente transversal ao escoamento médio. Na visualização de escoamentos, é prática usual a emissão intermitente de linhas de tempo, em intervalos regulares, como sugere a Figura 19(a), onde cinco linhas podem ser observadas, emitidas, seqüencialmente, entre os instantes t_0 e t_5 . Nestes casos, conhecendo-se a frequência de geração das linhas de tempo e respectivas distâncias que as separam, pode-se ter uma boa noção da velocidade das partículas no seio do fluido, sobretudo em regiões onde o movimento se dá de maneira bem comportada. Por outro lado, mesmo em escoamentos onde a turbulência se manifesta, a emissão periódica de linhas de tempo pode fornecer importantes informações acerca do movimento do fluido, como demonstra a Figura 19(b).

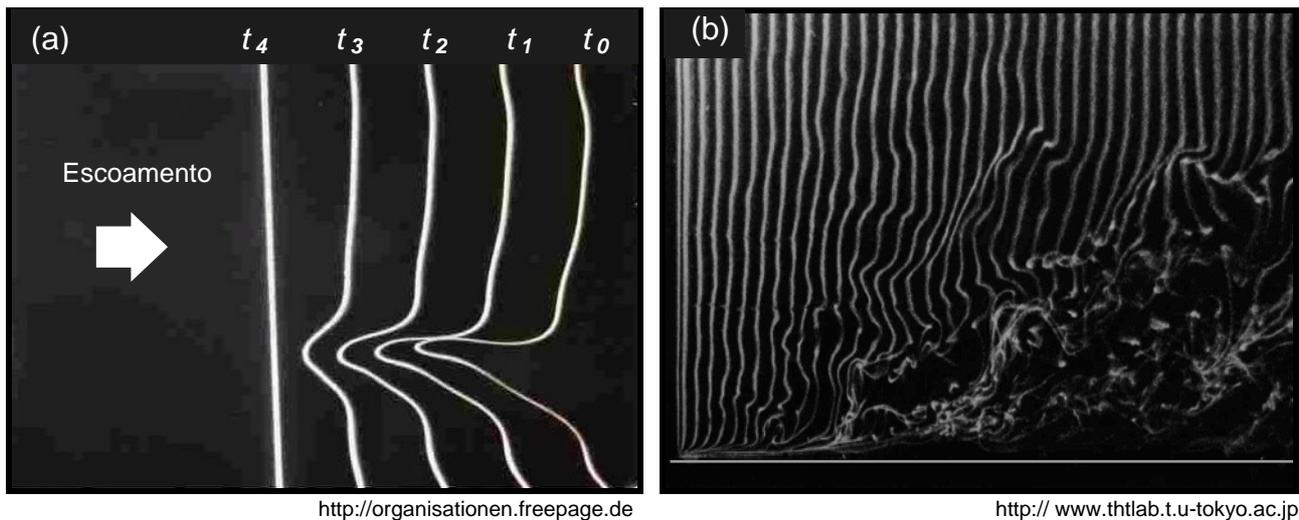


Figura 19. Visualização de escoamentos mediante a geração periódica de linhas de tempo.

2.3.2 Dispositivos de geração de escoamentos

A concepção de um experimento de visualização envolve diferentes etapas, passando, obrigatoriamente, pela escolha do dispositivo onde será gerado o escoamento de interesse. Muitos destes aparatos são especialmente projetados para a realização de um estudo específico. Outros constituem instalações fixas e de grande versatilidade, onde uma ampla variedade de experiências pode ser conduzida. Nesta última categoria, enquadram-se os túneis aerodinâmicos, os túneis hidrodinâmicos e os canais de superfície livre, que equipam inúmeros centros de pesquisa ao redor do mundo e que, frequentemente, prestam-se à realização de experiências de visualização de escoamentos.

Do ponto de vista morfológico, existem vários tipos de túneis aerodinâmicos, como discutido por Barlow et al. (1999). Em linhas gerais, todos eles cumprem o mesmo objetivo fundamental de produzir, no interior da seção de testes, uma corrente de ar com propriedades controladas, permitindo o ensaio de modelos, que tanto podem ser aviões, automóveis ou qualquer outro tipo de obstáculo sólido. Mais recentemente, até mesmo esportistas de alto nível, principalmente ciclistas e esquiadores, têm se submetido a ensaios de visualização em túneis aerodinâmicos, a fim de aprimorarem a posição que devem assumir em competições, para minimizar a força de arrasto que atua contra eles. É isto o que ilustra a Figura 20.



Figura 20. Visualização do escoamento ao redor de esportistas em túnel aerodinâmico.

Enquanto os túneis aerodinâmicos utilizam ar como fluido de trabalho, os túneis hidrodinâmicos, operam com água, facilitando sobremaneira a realização de ensaios de visualização. Além disso, para um mesmo modelo de ensaios e uma mesma velocidade da corrente livre, pode-se obter números de Reynolds bem mais elevados em meio hidrodinâmico do que em ar, uma vez que a viscosidade cinemática da água é até quinze vezes menor de que a do ar.

A exemplo dos túneis aerodinâmicos, também existem diferentes modelos de túneis hidrodinâmicos. Os túneis em circuito aberto quase sempre apresentam seção de testes vertical e, via de regra, são operados pela ação da gravidade. Os túneis em circuito fechado, por sua vez, podem apresentar seção de testes horizontal ou vertical, e são operados apenas em fluxo contínuo, necessitando de um sistema de bombeamento para manter o fluido em movimento. Embora construtivamente mais elaborados, estes aparatos tornaram-se mais usuais que os túneis de circuito aberto, por assegurarem uma faixa de velocidades mais ampla nos ensaios.

Ao contrário dos túneis hidrodinâmicos, na maioria dos canais de água – ou tanques de prova, como também são chamados – o fluido permanece estacionário, enquanto o modelo é arrastado por um dispositivo que, normalmente, desliza sobre trilhos. Uma instalação desta natureza pode ter dimensões bastante variadas, atingindo, em alguns casos, centenas de metros de comprimento.

2.3.3 Classificação das técnicas de visualização

As técnicas de visualização de escoamentos podem ser classificadas de diferentes maneiras, como atestam as publicações de Merzkirch (1974), Freymuth (1993) e Nakayama (1990), entre outras. Por simplicidade, a classificação proposta no presente trabalho aglutina os principais métodos de visualização em torno de apenas três grandes categorias, como apresentado na Tabela 1.

2.4 Principais técnicas de visualização

2.4.1 Deposição de filmes líquidos ou gotas de óleo sobre superfícies sólidas

Uma fina camada de um líquido aderente é aplicada sobre a superfície do modelo, antes de sua imersão no escoamento. Os materiais de deposição adequados à implementação desta técnica devem apresentar forte sensibilidade às propriedades do escoamento nas proximidades da superfície sólida. Incluem-se entre eles, as tintas sensíveis à temperatura ou à pressão, que alteram sua coloração segundo a magnitude destas grandezas físicas. Cristais líquidos sensíveis à temperatura e à tensão cisalhante foram utilizados por Nishimura et al. (1992), para a visualização em meio hidrodinâmico. Misturas especiais de aglutinantes líquidos – diesel, querosene ou óleo de transformador elétrico – pigmentados com dióxido de titânio, argila ou pó de substâncias fluorescentes, são sugeridas por Merzkirch (1974). Resultados similares são, também, obtidos com a deposição de gotas de óleo – em vez de películas – sobre a superfície do corpo.

A título de ilustração, a Figura 21 mostra o resultado da aplicação deste método, na visualização do escoamento em torno da fuselagem de duas aeronaves. A primeira delas, recém chegada de um ensaio em vôo, foi impregnada com uma mistura de óleo e pigmento avermelhado, enquanto a segunda foi coberta com óleo fluorescente, para ensaio em túnel de vento.

Como discutido por Nakayama (1990), a técnica pode ser aplicada adequadamente para a visualização de linhas de corrente junto ao modelo em escoamentos fortemente cisalhantes. Os resultados, entretanto, devem ser analisados com cautela, uma vez que se mostram bastante sensíveis à presença de forças centrífugas e gravitacionais.

O uso de filmes de óleo em túneis hidrodinâmicos ou canais de superfície livre podem impor dificuldades adicionais, devido às baixas velocidades inerentes aos ensaios desta natureza. A imagem da Figura 22 mostra uma asa delta submetida a um ensaio em túnel hidrodinâmico. Depois

de vários testes, resultados de boa qualidade foram obtidos recobrando-se o modelo apenas com pigmento à base de PVA, sem a adição de nenhum outro componente. Para a realização de ensaios em condições similares, outras misturas alternativas foram testadas com sucesso por Ishihara et al. (1980) e Nishikawa e Suzuki (1988). Por último, vale observar que, além de indicar a direção do escoamento na região parietal, este método é capaz de revelar zonas de transição e de separação da camada limite, bem como a existência de escoamentos secundários.

Tabela 1. Principais técnicas de visualização de escoamentos.

Metodologia de visualização	Agente	Técnica	Meio
Por traçadores na superfície sólida	Mecânicos	Filmes de óleo	G,L
		Gotas de óleo	G,L
		Injeção de corantes líquidos	G,L
		Injeção de fumaça	G
		Tufos de superfície	G,L
	Físicos	Sublimação	G
		Evaporação	G
		Filmes solúveis	L
		Cristais líquidos	G,L
		Filmes sensíveis à temperatura	G,L
		Filmes sensíveis à pressão	G,L
	Químicos	Corrosão eletrolítica	L
		Reação química superficial	L
		Coloração superficial	L
Por traçadores no interior do escoamento	Mecânicos	Grade de tufos	G,L
		Sonda de tufos	G,L
	Injeção direta	Partículas sólidas	G,L
		Corantes líquidos	L
		Fumaças, vapores e névoas	G
		Bolhas de hidrogênio	L
		Reagentes químicos	L
	Elétricos	Faiscamento	G
	Globais	Partículas em suspensão	G,L
	Por meios óticos		Shadowgrafia
		Schlieren	G,L
		Interferometria	G,L
		Holografia a laser	G,L
		Absorção de emissões	G,L
		Método de Moiré	L
		Estereofotografia	L
		Birefringência	L
	Termografia	G,L	

G – meio gasoso; L – meio líquido

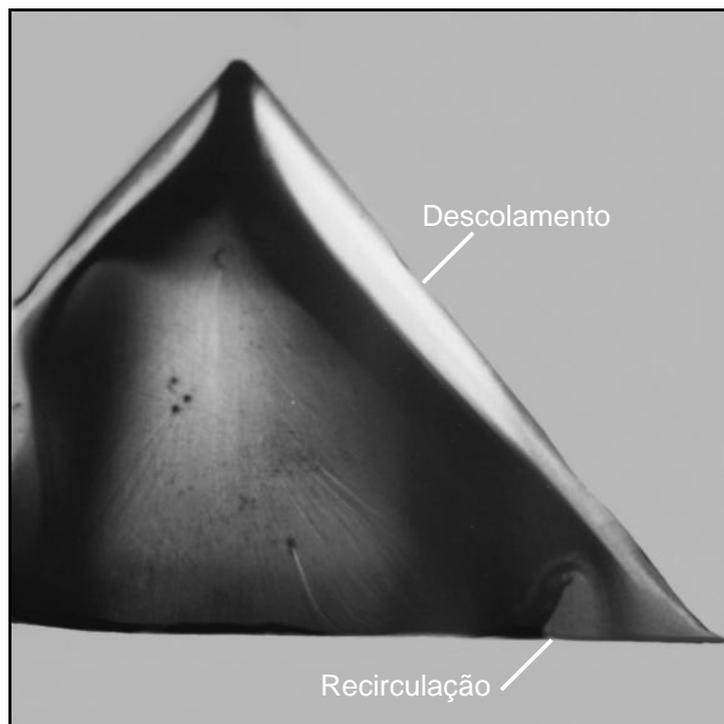


<http://www.dfrc.nasa.gov>



<http://wind.tamu.edu>

Figura 21. Visualização do escoamento em torno de aeronaves, através da deposição de um filme de óleo sobre a fuselagem.



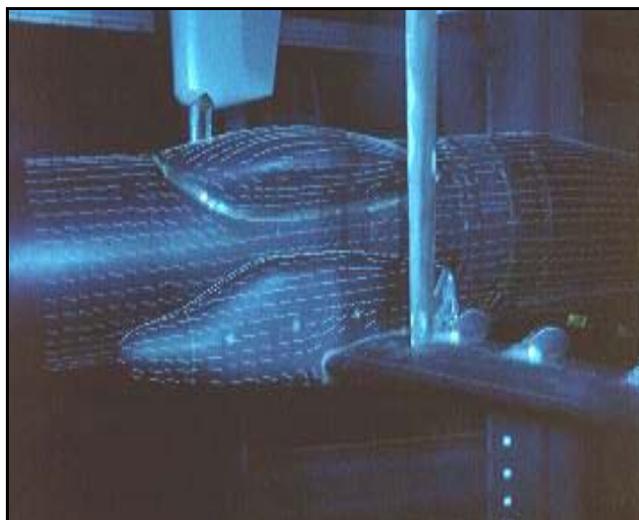
Acervo do LVE/UNESP/IS

Figura 22. Visualização do escoamento em torno de uma asa delta, através da deposição de um filme líquido sobre a superfície do modelo, para um ângulo de ataque $\alpha = 10^\circ$ e $Re = 1500$.

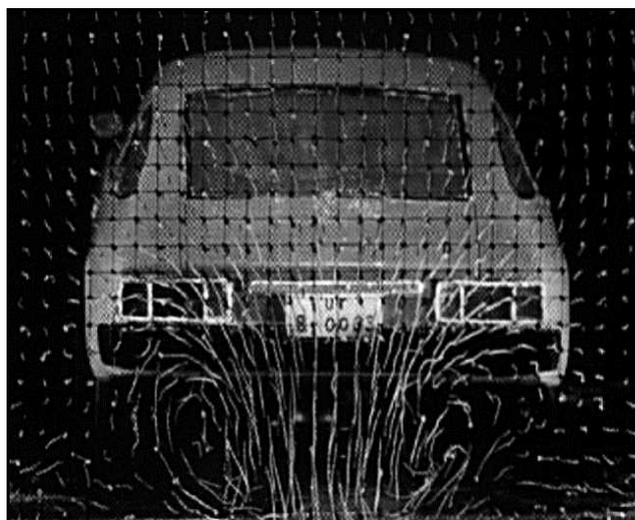
2.4.2 Tufos e mini-tufos

Esta técnica, bastante simples e eficaz, baseia-se na colagem de chumaços ou fios de algodão, lã ou material similar, sobre a superfície de ensaios – tufos de superfície. Uma variante do método, adequada à visualização do escoamento a jusante de modelos, pode ser facilmente obtida, confeccionando-se uma malha com fios de aço ou de nylon, com tufos de lã amarrados em cada um

de seus nós – tufos de profundidade. Exemplos destas duas situações podem ser observadas na Figura 23.



<http://lagg.or.id>



<http://www.efluids.com>

Figura 23. Visualização do escoamento com a utilização de tufos de superfície e de profundidade.

Detalhes adicionais sobre este método de visualização de escoamentos são apresentados por Shapiro (1963), que também relaciona uma vasta gama de aplicações, inclusive biomédicas e esportivas. Neste contexto, Hay e Thayer (1989) relatam a utilização da técnica no aprimoramento de nadadores de alto nível. Os autores fornecem, ainda, informações pormenorizadas para a adequada confecção de tufos.

2.4.3 Traçadores sólidos

Traçadores sólidos também têm sido exaustivamente empregados na visualização de escoamentos em meio líquido, desde longa data. Segundo Winter e Deterding (1956), os primeiros traçadores utilizados incluíam o pó de alumínio, o pó de serra tratado, o minério de ferro e a baquelite. Alguns destes materiais, entretanto, introduzem erros experimentais significativos, uma vez que trajetória do particulado dificilmente acompanha o escoamento, em razão da grande diferença de densidade que apresentam em relação ao fluido de trabalho.

De maneira geral, polímeros de hidrocarbonetos, como o polietileno, polistireno e o polisobutileno são considerados ótimos traçadores, quando se apresentam na forma de pelotas esféricas (*pellets*) de 0,4 a 1 mm de diâmetro. Embora incorporem micro bolhas de ar em seu interior, a densidade relativa das esferas de polistireno são muito próximas da unidade, variando entre 0,93 e 1,053. Do ponto de vista prático, este desvio é considerado suficientemente pequeno para não introduzir erros apreciáveis nos experimentos.

Muitos outros traçadores sólidos foram testados para ensaios em meio hidrodinâmico, tais como os cristais líquidos em micro cápsulas, grafite, contas de resina, diversos materiais plásticos e, até mesmo, pó cosmético. Hoje, com o advento da velocimetria por imagem de partículas (PIV), novos produtos para semeadura de escoamentos são comercialmente disponíveis, com dimensões inferiores a 50 μm , boa esfericidade, alta refletividade e densidade muito próxima à da água, o que estimula fortemente o emprego desta técnica. Alguns importantes trabalhos que empregam traçadores sólidos como agentes de visualização são relacionados na Tabela 2.

Para exemplificar, a Figura 24 mostra o escoamento através de uma prótese mecânica de válvula cardíaca do tipo esfera (*cage-ball*), formando um jato descarregando em meio quiescente. Os ensaios foram realizados em regime permanente, com a válvula em sua posição totalmente aberta.

Neste caso, a visualização foi realizada empregando-se micro partículas sólidas da Optimage Co., de Edinburg, com tamanho médio de 30 μm e densidade relativa de $1,0 \pm 0,02$. Tais partículas são recomendadas para utilização como sementeira na medição de campos de escoamento com o auxílio de sistemas de anemometria laser Doppler (LDA) ou de velocimetria por imagem de partículas (PIV). Segundo o fabricante, a refletividade deste produto é de até cinco vezes superior às partículas de Pliolite – nome comercial do poliviniltolueno butadieno, fabricado pela Goodyear Rubber Co.

Tabela 2. Traçadores sólidos utilizados para a visualização de escoamentos em meio líquido.

Autores	Traçadores	Densidade	Diâmetro [mm]
Hagiwara et al. (2004)	Polietileno fluorescente		0,2-0,3
Lambert e Gursul (2004)	Esferas de poliamida	1,03	0,050
Cawley e McBride (2004)	Esferas de poliamida	1,03	0,050
Kiml et al (2004)	Resina plástica		0,200
Nishimura et al. (1992)	Cristais líquidos ¹	1,02	0,01-0,015
Imamoto e Ishigaki (1992)	Contas plásticas	1,05	0,45
Denk e Nirschl (1991)	Grafite ²	-	0,004
Popiel e Turner (1991)	Polistireno	-	0,2
Ozoe et al. (1991)	Liquid Crystal Power ³	0,9	-
Schuster e Wagner (1988)	Resina troca iônica	-	0,4
Winard et al. (1988)	Polietileno ⁴	1,0	\approx 2,0
Savas (1985)	Flocos de alumínio		
Rhee et al. (1984)	Liquid crystal slurry ⁵	0,002	0,05
Tatterson et al. (1980)	Nylon	1,14	1,0
	Poliestireno	1,06	1,0-4,0
Nychas et al. (1973)	Pliolite ⁶	1.026	0,044-0,074
Philbert e Boutier (1972)	Esferas de vidro	-	0,020
Hassingier (1968)	Pó cosmético	2,0	0,030
	Contas de vidro	2,0	0,030
Winter (1958)	Polistireno	-	0,25-0,50
Winter e Deterding (1956)	Polistireno	0,98-1,02	0,4-1,0
Werlé (1953)	Polistireno	1,0	0,5-2,0
Fage e Preston (1941)	Pó de alumínio	-	0,04

¹ Cristais líquidos encapsulados em esferas plásticas, fabricados na Inglaterra, pela BDH Chemical Ltd.

² Fluido de trabalho: óleo de silicone de baixa pressão de vapor (10^{-8} mbar).

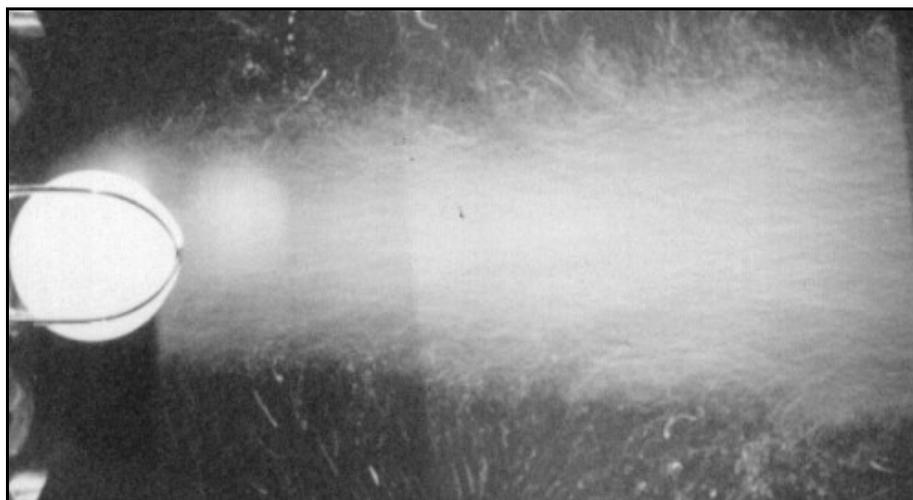
³ Japan Capsule products (faixa medida 24 - 10,5°C com 0,5°C de precisão).

⁴ A densidade do polietileno foi ajustada com a aplicação de uma película de tinta branca sobre as esferas.

⁵ Rheoscopic liquid AQ100, Kalliroscope Co., cristais líquidos de $6 \times 30 \times 0,07 \mu\text{m}$, encapsulados em esferas plásticas pela Liquid Crystal Technology, Inc.

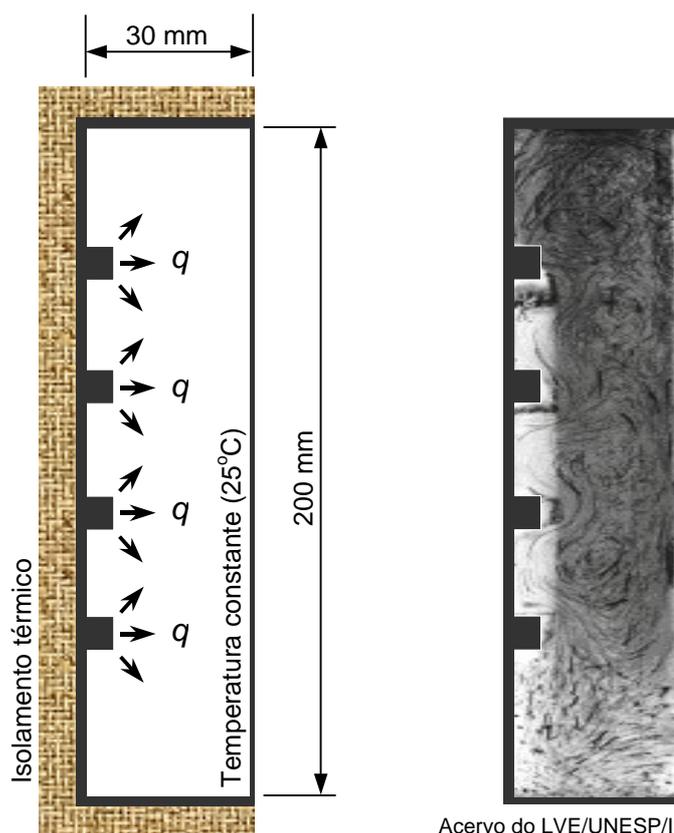
⁶ Nome comercial do Poliviniltolueno Butadieno, da Goodyears Chemicals Co.

Um outro exemplo de aplicação é apresentado na Figura 25, permitindo observar a convecção natural no interior de uma cavidade com fontes protuberantes de calor em uma de suas paredes verticais. Partículas de Pliolite, com densidade igual a $1,026 \text{ g/cm}^3$ e $100 \mu\text{m}$ de diâmetro, foram utilizadas nestes ensaios. Devido ao aumento da temperatura do fluido no interior da cavidade, um cuidadoso ajuste da densidade da água tornou-se necessário, mediante a adição de carbonato de cálcio. Uma folha de luz foi gerada a partir de um ampliador fotográfico P&B, adaptado com uma lâmpada halogênea de 1000 W.



Acervo do LVE/UNESP/IS

Figura 24. Visualização do escoamento através de uma prótese de válvula cardíaca do tipo *cage-ball* por injeção de micro partículas sólidas.



Acervo do LVE/UNESP/IS

Figura 25. Visualização da convecção natural em uma cavidade térmica com fontes de calor protuberantes, empregando-se partículas sólidas em suspensão na água.

2.4.4 Traçadores gasosos

Traçadores gasosos, na forma de minúsculas bolhas de ar ou de hidrogênio, também podem ser usados na visualização em meio hidrodinâmico, para produzir informações valiosas sobre o campo

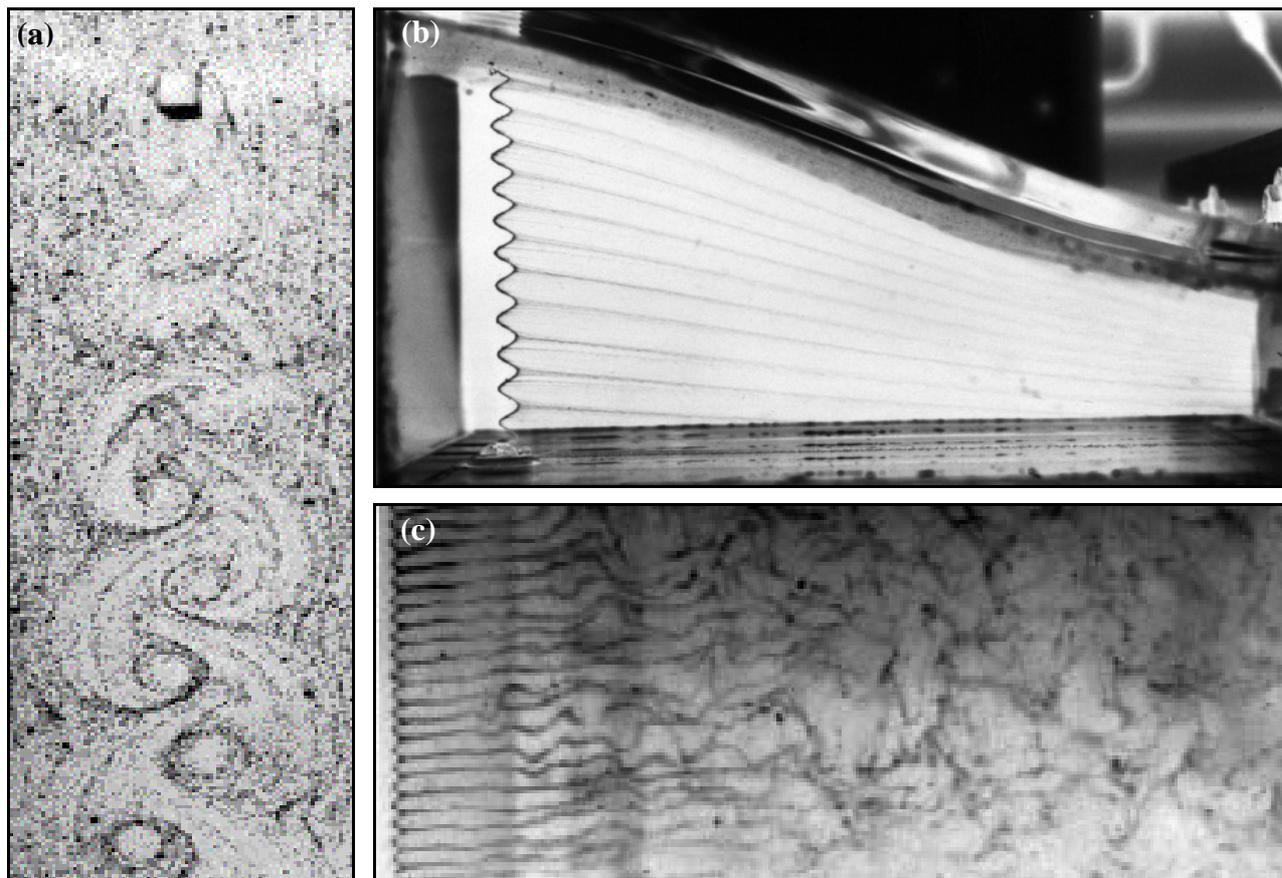
de escoamento. A implementação da técnica, entretanto, não é tão simples quanto afirmam Merzkirch (1974), Goldstein (1976) e alguns outros autores. De fato, a geração de bolhas pequenas e com boa uniformidade dimensional, que possam ser arrastadas pelo escoamento sem produzir alterações significativas no campo de velocidade, nem sempre constitui tarefa trivial. Além disso, este tipo de traçador possui ainda baixa refletividade, criando uma certa dificuldade para a captura de imagens nítidas. Assim, cuidados especiais devem ser tomados na iluminação do experimento, visando aumentar o contraste entre as bolhas e sua vizinhança.

Um rápido levantamento da literatura sobre o tema revela que bolhas de hidrogênio são muito mais utilizadas do que bolhas de ar. De maneira bastante sintética, a técnica envolve a introdução, no interior do escoamento, de um fino fio metálico, com diâmetro inferior a 0,3 mm, ligado a um circuito elétrico de corrente contínua, usado como cátodo. O ânodo, por sua vez, consiste de um objeto metálico em contato com o escoamento, posicionado nas proximidades do cátodo, à jusante da região de visualização. Se a voltagem aplicada for suficiente, ocorrerá a eletrólise da água, com a conseqüente liberação de bolhas de hidrogênio no cátodo e de oxigênio no ânodo. Ainda que o diâmetro das bolhas dependa da condutividade elétrica e da velocidade do fluido de trabalho, bem como da voltagem e da corrente empregadas, suas dimensões médias dificilmente irão superar o diâmetro do fio de cátodo onde são geradas. As bolhas de oxigênio, ao contrário, despertam pouco interesse para a visualização de escoamentos, pois são geradas em número bem menor que as bolhas de hidrogênio e com um diâmetro significativamente maior.

Se a voltagem fornecida for mantida constante, as bolhas de hidrogênio produzidas em um fio perpendicular à corrente livre assumirão a forma de uma folha contínua. Se, por outro lado, a tensão que alimenta o circuito for de natureza pulsátil – na forma de onda quadrada, por exemplo – as bolhas serão liberadas como linhas discretas perpendiculares ao escoamento médio, formando linhas de tempo. Por último, linhas longitudinais ao escoamento podem ser obtidas pelo recobrimento parcial de regiões alternadas do fio de cátodo, o que pode ser feito com verniz ou esmalte. O mesmo efeito pode, também, ser obtido empregando-se um fio de cátodo espiralado, como descrito por Clutter e Smith (1961). A Figura 26 mostra imagens obtidas com o auxílio desta técnica, para três diferentes tipos de escoamento: (a) esteira de von Kármán em torno de um cilindro quadrado; (b) escoamento laminar no interior de uma contração e (c) transição à turbulência a jusante de um fio de cátodo espiralado.

Na Figura 27, são apresentadas imagens do escoamento em torno de um cilindro de base quadrada munido de *end plates*. Diferentemente da fotografia mostrada na Figura 26(a), o fio de cátodo encontra-se, agora, posicionado paralelamente ao cilindro, permitindo observar diferentes modos de emissão de vórtices.

Na Figura 27(a), os rolos de vórtices se formam paralelamente ao cilindro, a esteira pode ser considerada bidimensional e a frequência de emissão dos vórtices é constante. Na Figura 27(b) observa-se que os vórtices são emitidos em forma de arco, com sua corda paralela ao eixo longitudinal do cilindro. Neste caso, a esteira já não pode mais ser considerada como bidimensional, e a frequência de emissão dos vórtices passa a depender da forma dos rolos emitidos na esteira. Uma outra configuração é mostrada na Figura 27(c), onde se verifica a formação de filamentos entre dois vórtices emitidos consecutivamente. Estas estruturas interagem com os rolos de vórtices, deformando seu eixo de rotação na direção do escoamento e conferindo-lhes o aspecto de uma rede de vórtices entrelaçados. A Figura 27(d), por sua vez, apresenta uma configuração tridimensional clássica, freqüentemente observada na esteira de corpos cilíndricos. Os rolos são, aqui, emitidos de maneira oblíqua, formando um determinado ângulo com o eixo de simetria longitudinal do cilindro. Quando a esteira possui esta configuração, a frequência de emissão pode ser relacionada com a frequência obtida no modo emissão paralela, através da fórmula do co-seno, proposta por Williamson (1989), dada por:



Acervo do LVE/UNESP/IS

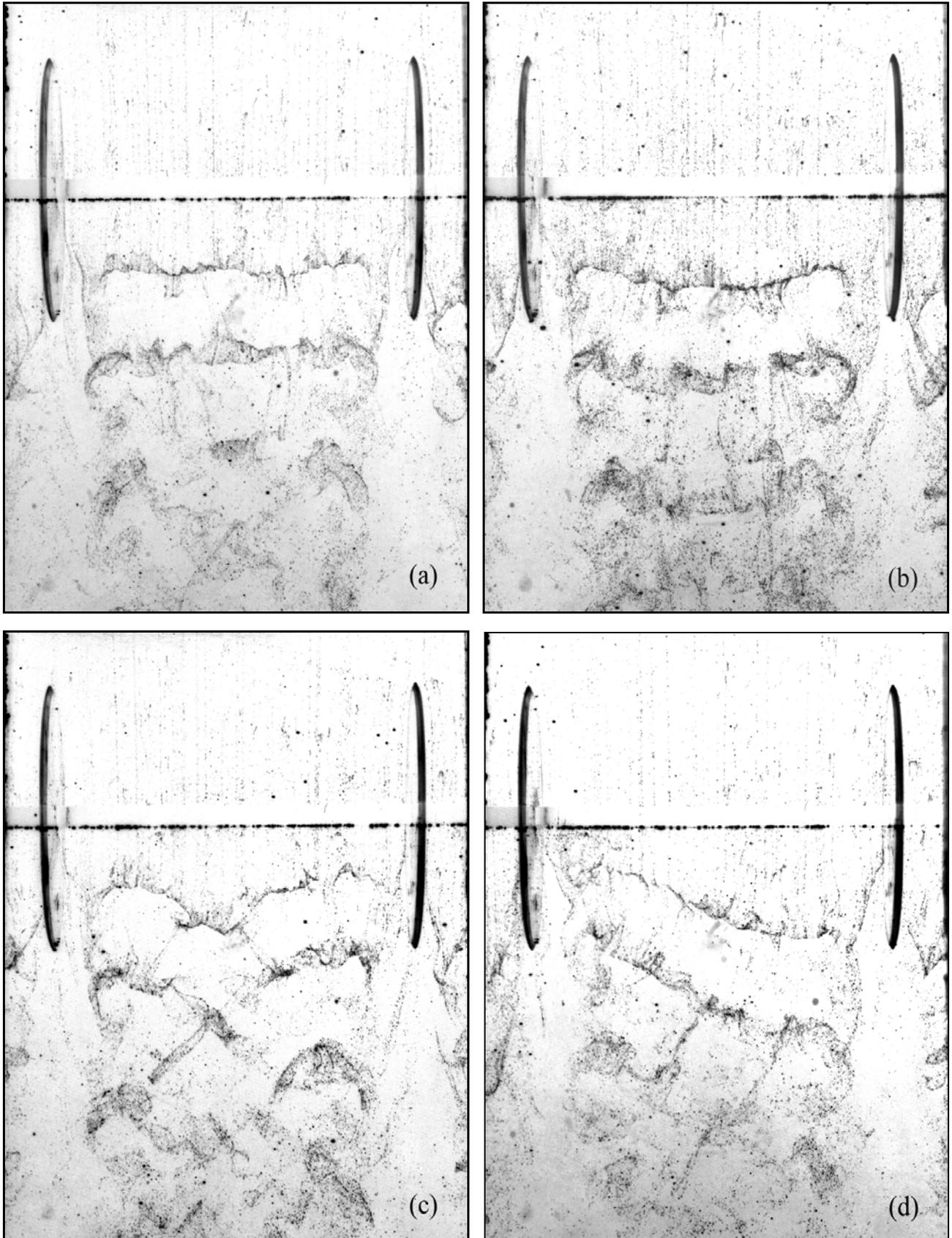
Figura 26. Visualização de escoamentos por geração de bolhas de hidrogênio.

$$St_{\parallel} = \frac{St_{\theta}}{\cos \theta} \quad (1)$$

onde St_{\parallel} é o número de Strouhal obtido com emissão paralela de vórtices, St_{θ} é o número de Strouhal obtido com emissão oblíqua, e θ é o ângulo de emissão oblíqua dos vórtices, que pode ser obtido através da visualização do escoamento.

Diversos autores – Goldstein (1976), Merzkirch (1974), Schraub et al. (1965) e Davis e Fox (1967) – observaram que a qualidade e a uniformidade das bolhas modificam-se substancialmente, após alguns minutos de operação contínua do sistema, como resultado da deposição de materiais contaminantes no cátodo. Estes mesmos autores, proclamam que tal problema pode ser facilmente corrigido revertendo-se a polaridade do circuito elétrico, durante alguns minutos. Na prática porém, a existência de impurezas na água provoca eletroerosão no cátodo e a inversão de polaridade só acentua o processo, provocando, na maioria das vezes, o rompimento do fio de cátodo. O uso de fios confeccionados com materiais resistentes à corrosão eletrolítica, tais como a platina, é fortemente recomendado, amenizando sensivelmente este inconveniente.

A Tabela 3 relaciona, a título de informação, algumas publicações que utilizam bolhas de hidrogênio como agente de visualização, discriminando as características do fio de cátodo, a voltagem aplicada e, também, a substância utilizada como eletrólito, que alguns autores adicionam à água para melhorar sua condutividade elétrica.



Acervo do LVE/UNESP/IS

Figura 27. Visualização dos padrões de emissão de vórtices a jusante de um cilindro de base quadrada, empregando-se a técnica de geração de bolhas de hidrogênio.

Tabela 3. Trabalhos que utilizam a geração de bolhas de hidrogênio para a visualização de escoamentos em meio hidrodinâmico.

Autores	Fio de cátodo	Diâmetro [mm]	Voltagem [V]	Amperagem [A]	Eletrólito
Alam et al. (2003)	Platina	0,020			
Kocherscheidt (2001)	Platina	0,150	38 - 176		
Kereny et al (2001)	Platina	0,025			
Imamoto e Ishigaki (1992)	Platina	0,05			-
Lu e Smith (1991)	Platina	0,020			Na ₂ SO ₃
Dargahi (1989)	Ouro	0.05			-
Gad-El-Hak (1986)	Inox	0,05	100		-
Dobrodzicki (1982)	Platina	0,127	100	1,5	-
Dumas et al. (1980)	Inox	0,050	100		-
Goldstein (1976)	Platina	0,025-0,05	90	2,5	Na ₂ SO ₄
Merzkirch (1974)	Platina./inox	0,01-0,02	100		Na ₂ So4
Durelli e Norgard (1972)	Platina	0,25	> 200		-
Odel e Kovaszny (1971)	Platina	0,020	7		-
Roos e Willmarth (1969)	Platina	0,127	100		NaCl
Davis e Fox (1967)	Tungstênio	0,05			Na ₂ So ₄
Schraub et al. (1965)	Platina	0,01-0,05	250		Na ₂ So ₄
Clutter e Smith (1961)	Aço	0,127-0,254	> 400	1,0	-

2.4.5 Injeção direta de corantes e fumaça

Perfeitamente adequada para aplicação em meio líquido ou gasoso, a injeção direta de traçadores alia baixo custo e relativa facilidade de implementação, constituindo, seguramente, a mais empregada das técnicas de visualização de escoamentos.

O processo de injeção pode ser efetuado por intermédio de orifícios confeccionados na própria superfície de um modelo de ensaio ou, ainda, com o auxílio de uma ou mais agulhas posicionadas no interior do escoamento. Em ambos os casos, a injeção do filete de corante ou de fumaça deve ocorrer de forma a introduzir a menor perturbação possível no escoamento. Em razão disto, a velocidade e a pressão de injeção devem ser controladas e mantidas em valores próximos àqueles encontrados no seio do fluido, a fim de que o filete de traçador possa permanecer nítido e estável.

Embora existam alguns produtos fabricados especialmente para a visualização de escoamentos em meio líquido, os traçadores mais freqüentemente empregados são os corantes alimentícios e os corantes para pintura solúveis em água, além de uma grande variedade de produtos de uso doméstico, tais como o leite desnatado, o leite condensado e o nanquim. Como discutido por Kurada (1994), Douglas (1991) e Yurechko e Ryazantsev (1991), o uso de tintas fotocromáticas também tem sido bastante difundido. Nesta categoria, incluem-se a Fluoresceína, (Anacheima Chemical Ltda), Rhodamine e WT-Rhodamine B (Rhodia), Multicolors Dyes (Shannon Lumindus Materials Co.), 4-MBF (Eastman Chemical Co.), Luminol e EDTA (Eastman Kodak) e Leucophor (Sandoz Co.). Para a visualização em ar, geradores de fumaça utilizados em espetáculos artísticos são corriqueiramente empregados por diferentes laboratórios.

Para ilustrar a versatilidade da técnica, a Figura 28 apresenta imagens obtidas em condições de ensaio bastante distintas. Na Figura 28(a), a injeção de fumaça é realizada diretamente no nariz de uma aeronave em vôo, acompanhada de perto por uma outra aeronave, dita madrinha, a partir da

qual são obtidos os registros fotográficos para posterior análise. A Figura 28(b), mostra o escoamento ao redor de um perfil aerodinâmico NACA 0012, em dois diferentes ângulos de ataque. Neste caso, os ensaios foram realizados num túnel hidrodinâmico vertical de baixa turbulência, para um número de Reynolds de $5 \cdot 10^3$, e a injeção de corante foi efetuada como o auxílio de uma agulha dobrada em L, com 0,7 mm de diâmetro externo. O alto contraste obtido na imagem é, em boa parte, provocado pela correta iluminação difusa, realizada em contraluz. Na Figura 28(c), um motor de combustão interna, alimentado com uma mistura de gasolina e óleo lubrificante, é utilizado para a produção de fumaça, num experimento de campo, visando o estudo do escoamento do vento natural em torno de um pequeno observatório astronômico. Por último, a Figura 28(d) permite observar quatro filetes de corante líquido, injetados simultaneamente no interior de uma contração. Esta prática é bastante usual e permite a emissão de filetes com cores diferentes.



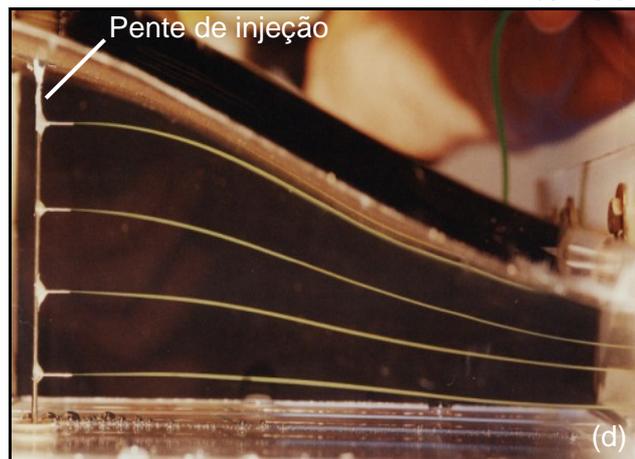
<http://www.dfrc.nasa.gov>



Acervo do LVE/UNESP/IS



Acervo do LVE/UNESP/IS



Acervo do LVE/UNESP/IS

Figura 28. Visualização de escoamentos por injeção direta de fumaça ou corante líquido.

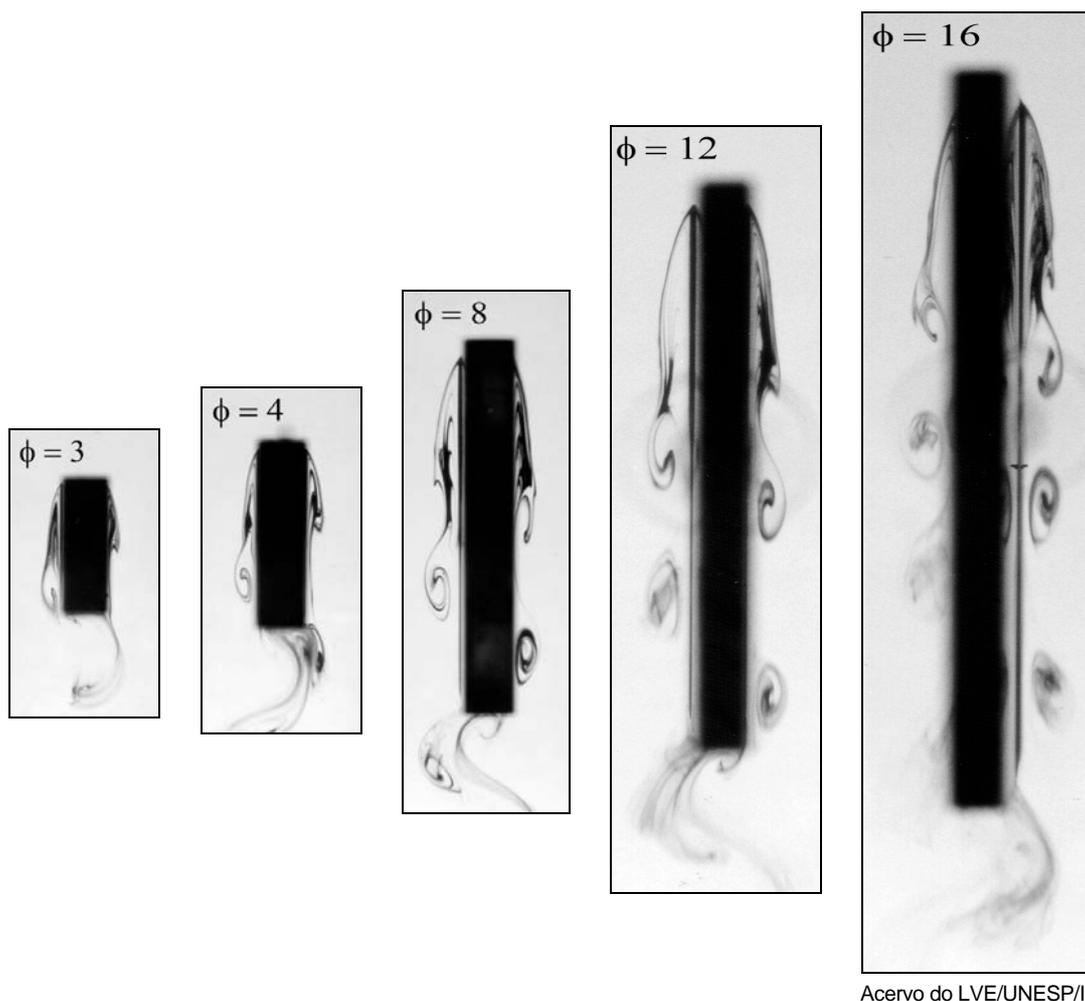
Uma outra forma de utilização de corante líquido, conhecida como lavagem de tinta (*dye wash*), é empregada freqüentemente na visualização de esteiras de corpos rombudos e de outros tipos de escoamento contendo zonas de recirculação ou de baixa velocidade. Neste caso, também, a injeção

é feita a montante do modelo ou da região de interesse, por intermédio de uma ou mais agulhas, preferencialmente, retráteis. Subitamente, a injeção é interrompida e o corante, propositalmente injetado em abundância, é rapidamente arrastado pelo escoamento, permanecendo retido apenas nas regiões de baixa velocidade, tais como camadas limite de modelos, esteiras, zonas de descolamento e de recirculação.

Um interessante resultado obtido com esta variante da técnica de injeção de corante líquido é apresentado na Figura 29, que mostra o escoamento em torno de cilindros retangulares com diferentes razões de forma ϕ , para um número de Reynolds da ordem de 400. Segundo Ohya et al. (1992) e Nakamura et al. (1996), o número de Strouhal (St_A) calculado com base no comprimento da face lateral do cilindro, pode ser aproximado pela correlação empírica:

$$St_A \cong 0,6 n \quad (2)$$

onde n é o número de vórtices observados simultaneamente sobre uma das superfícies laterais do cilindro. Assim, pode-se constatar que $n = 1$ e $St_A = 0,6$, para cilindros com $\phi = 3$ e 4, $n = 2$ e $St_A = 1,2$, para cilindros com $\phi = 8$, $n = 3$ e $St_A = 1,8$, para cilindros com $\phi = 12$ e, finalmente, $n = 4$ e $St_A = 2,4$, para cilindros com $\phi = 16$. Estes resultados apresentam boa concordância com dados oriundos de medições experimentais e simulações numéricas do escoamento em torno desta geometria.



Acervo do LVE/UNESP/IS

Figura 29. Padrões do escoamento sobre as superfícies laterais de cilindros retangulares com diferentes razões de forma ϕ , para $Re = 400$.

2.4.6 Métodos óticos

Dentre os métodos óticos empregados na visualização de escoamentos destacam-se aqueles que utilizam a variação do índice de refração do meio – schlieren, shadowgrafia e interferometria¹ – associados ou não a técnicas holográficas, os métodos que utilizam fluidos bi-refringentes e, ainda, os métodos que se valem da variação de densidade do meio, identificada pela absorção de raio-x, raio-gama, radiação ultravioleta ou ultra-som. Uma descrição sumária de alguns destes métodos é apresentada a seguir.

Método Schlieren

Esta técnica, também utilizada para a determinação do gradiente de concentração em soluções químicas, é baseada na mudança do índice de refração do fluido, provocada por variações de densidade. Desta forma, o método schlieren permite a obtenção da primeira derivada do campo de densidades. Apesar de utilizada mais freqüentemente na visualização de escoamentos compressíveis, nos primeiros trabalhos de Mach, ensaios bem sucedidos foram realizados com velocidades do ar da ordem de apenas 6 m/s – Balint (1953). Apenas para ilustrar as potencialidades da técnica, a Figura 30 apresenta quatro belas imagens obtidas por schlieren, representando diferentes tipos de escoamentos, caracterizados por velocidades que variam de alguns poucos milímetros a centenas de metros por segundo.

É importante salientar, ainda, que, em princípio, o método schlieren pode ser convenientemente adaptado também para uso em água, como sugerido Bland e Pelick (1962), e confirmado nos estudos de Clayton e Massey (1967) e Weinstein (1993), que apresentam fotografias de excelente qualidade, com definição ainda melhor do que muitas imagens obtidas no escoamento de gases.

Shadowgrafia

Para aplicação em meio líquido, esta técnica se adapta, principalmente, ao estudo de problemas envolvendo superfícies livres, onde se pode, inclusive, estabelecer uma analogia entre as ondas de gravidade e as ondas de choque. Em meio líquido, a shadowgrafia pode ser empregada na determinação da segunda derivada dos campos de concentração ou de densidade de escoamentos estratificados, e, em geral, é utilizada em associação com a presença de traçadores no interior do escoamento. As perspectivas de utilização da shadowgrafia na obtenção de dados quantitativos têm se mostrado cada vez mais promissoras, sobretudo pelas novas possibilidades que se abrem com a notável evolução do processamento digital de imagens e das técnicas de reconstrução tomográfica.

Interferometria

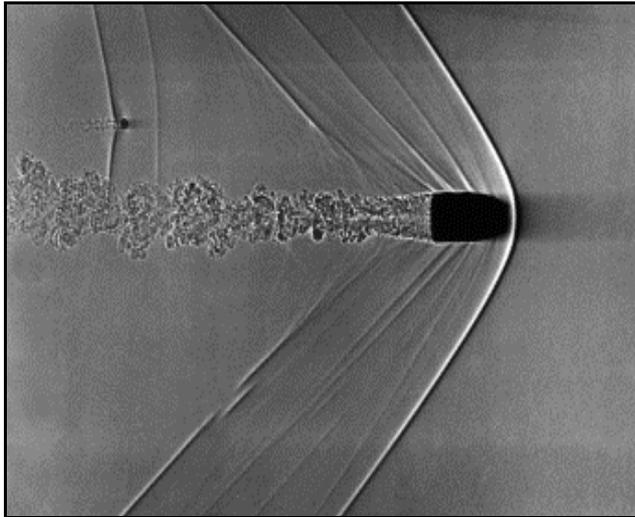
A interferometria é utilizada na determinação do campo de densidades. Existem muitos trabalhos sobre a utilização de interferometria em mecânica de fluidos, principalmente após o advento do laser, que ampliou consideravelmente as possibilidades de arranjos óticos. Tanner (1966) oferece uma boa descrição de aparatos concebidos para esta finalidade, incluindo seus respectivos princípios de funcionamento. Algumas arquiteturas óticas de interferometria estão associadas ao processamento digital de imagens, o que auxilia, principalmente, na filtragem dos ruídos.

Holografia

Na holografia, um feixe de luz coerente é dividido em dois, um dos quais atravessa o escoamento, enquanto o outro, chamado de feixe de referência, é desviado. Em seguida, os dois se feixes são recombinados em uma chapa fotográfica especial, para gerar um holograma, resultante de

¹ Schlieren, shadowgrafia, holografia e até mesmo a birefringência podem ser considerados como métodos de interferometria, uma vez que, em sua essência, comparam dois sinais luminosos.

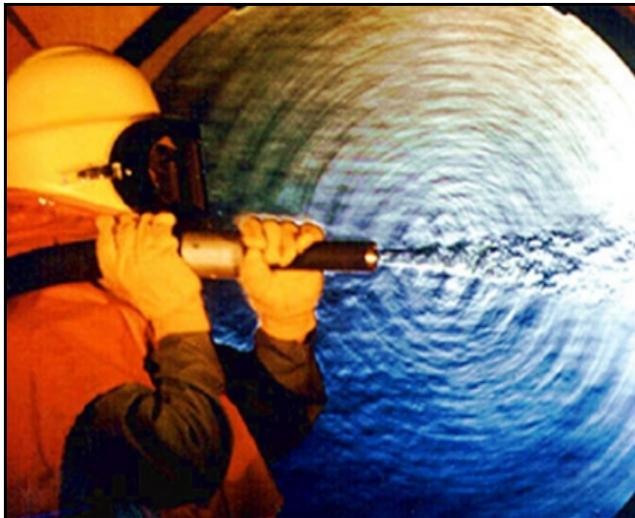
uma grade de difração, formada pela emulsão na chapa fotográfica. Os padrões de interferência podem ser interpretados de modo análogo àqueles obtidos com um interferômetro de Mach-Zehnder. A principal vantagem da holografia é a possibilidade de congelar uma cena holograficamente, a qual, posteriormente, poderá ser reconstituída. Em combinação com a interferometria ótica, a holografia pode permitir o levantamento tridimensional do campo de densidade em escoamentos estratificados, dando origem à chamada interferometria holográfica. Outros exemplos de aplicações holográficas em mecânica de fluidos podem encontrados nos trabalhos de Tanner (1966) e de Yano (1980). Várias informações sobre esta técnica são oferecidas na revisão de Hesselink (1988).



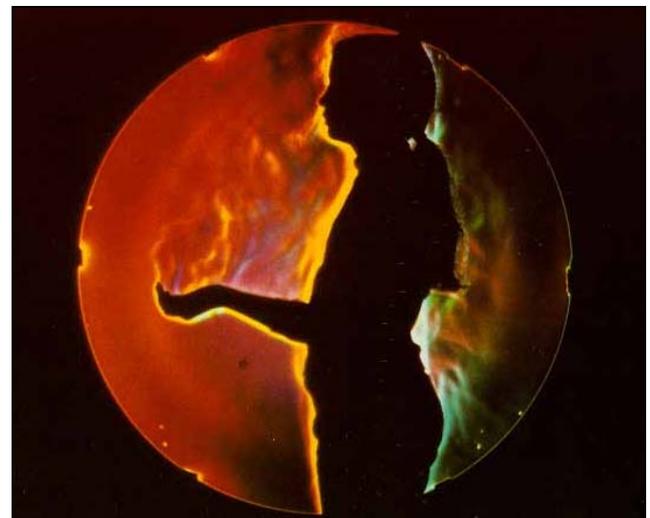
<http://www.rit.edu>



<http://www.sm.go.dlr.de>



<http://www.efluids.com>



<http://www.vsj.or.jp>

Figura 30. Diferentes tipos de escoamentos, visualizados com o auxílio do método schlieren.

Birefringência

Alguns líquidos puros e algumas suspensões orgânicas newtonianas e não newtonianas apresentam o fenômeno de dupla refração da luz, ou birefringência. Esta propriedade, que pode ser empregada na visualização de escoamentos, é discutida em detalhes por Balint (1953), Clayton e Massey (1967), Goldstein (1976) e Prados e Peebles (1959). Estudos utilizando a birefringência, inclusive para a obtenção de dados quantitativos, são apresentados por Cressely e Decruppe (1992), Peebles e Liu (1965) e Durelli e Norgard (1972).

Termografia

A termografia infravermelha permite detectar variações das radiações térmicas (com comprimento de onda entre 3 e 5 μm) emitidas por um meio físico. Esta técnica se mostra atraente porque uma única imagem pode fornecer informações simultâneas sobre todo o campo de temperaturas, com excelente acuracidade. No entanto, a água absorve quase que totalmente a radiação, tornando o meio opaco para este comprimento de onda. Em vista disso, as aplicações desta técnica em túnel de água se restringem à observação da temperatura de superfícies externas, produzidas pela influência do escoamento, conforme mostrado nos trabalhos de Vreeburg (1985) e Settles (1986).

Tomografia

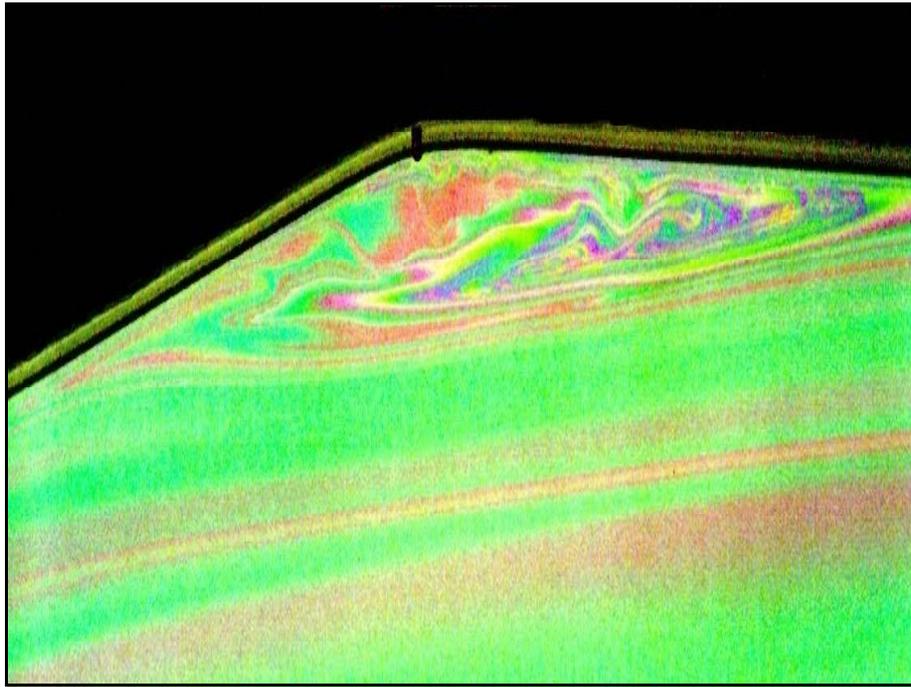
Fazendo uso de algoritmos computacionais bastante complexos, a tomografia permite a reconstrução de uma imagem, a partir da distribuição de propriedades físicas da matéria em diferentes planos paralelos entre si. As técnicas de visualização de escoamento por tomografia de ultra-som, raio-x, raio gama, ultra violeta, rádio frequência e ressonância magnética nuclear podem ser utilizadas indiferentemente em meio líquido, em escoamentos multifásicos e em escoamentos estratificados, constituindo uma poderosa ferramenta para a análise do movimento de fluidos não transparentes, ou quando a região de interesse se localiza em zonas de difícil acesso ótico.

Exemplos da visualização de escoamentos por tomografia de ultra-som (efeito Doppler) em aplicações biomédicas podem ser encontrados no trabalho de Picot et al. (1993), que, através de ensaios *in vivo*, avalia o escoamento tridimensional do sangue no sistema vascular periférico, e no artigo de Costa et al. (1992), que avalia quantitativamente o escoamento no interior de um dispositivo experimental que simula um vaso sanguíneo. Um outro exemplo de aplicação é fornecido no artigo de McCarthy et al. (1992), onde a tomografia por ressonância magnética é empregada na análise do escoamento de suco de tomate – fluido não newtoniano e altamente corrosivo – no interior de reômetro de tubo.

2.5 Iluminação e captura de imagens

Nem sempre a geração de um escoamento, ou a implementação da técnica selecionada para torná-lo visível, constitui o maior desafio enfrentado pelo experimentalista encarregado de conduzir um ensaio de visualização de escoamentos. Em muitas situações, a captura de imagens exploráveis cientificamente representa a maior dificuldade a ser transposta. Neste contexto, o primeiro problema geralmente surge logo na escolha de uma iluminação adequada, capaz de produzir os efeitos desejados. Características fundamentais de uma imagem, tais como nitidez e contraste, estão diretamente associadas ao tipo de iluminação utilizada – se difusa ou incidente –, à temperatura de cor empregada, ao ângulo de iluminação ajustado e à intensidade luminosa adotada, dentre outros fatores. Infelizmente, não existe uma fórmula única que oriente a combinação simultânea de todos estes parâmetros, aplicável a qualquer situação. Na maioria das vezes, resultados satisfatórios só podem ser conseguidos depois de várias tentativas frustradas. Dificuldades desta natureza foram encontradas na obtenção da imagem apresentada na Figura 31, permitindo identificar o descolamento da camada limite e a formação de recirculações, num escoamento com mudança brusca de direção.

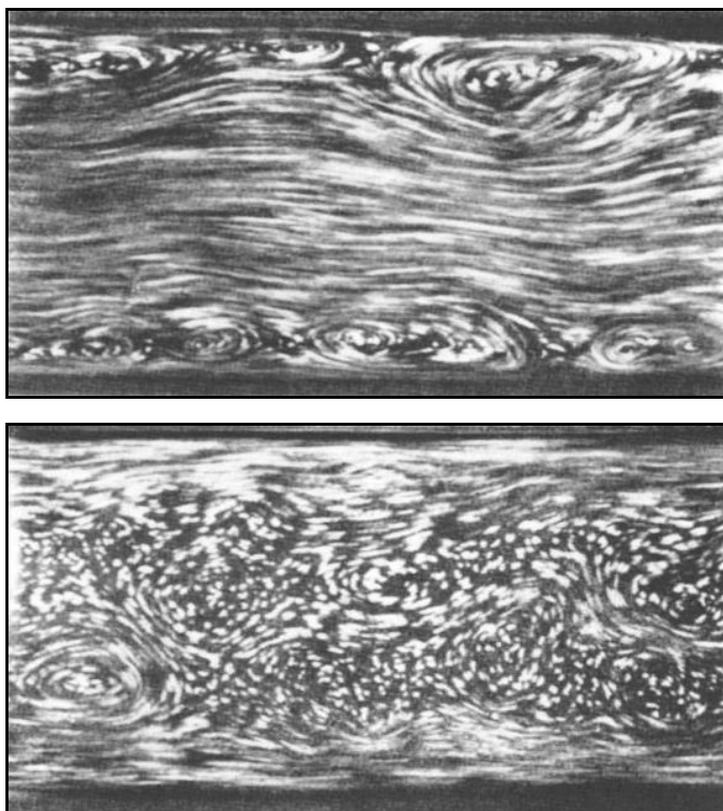
Um outro aspecto a ser levado em consideração quando se analisam imagens de escoamentos, refere-se à ausência de uma relação direta entre aquilo que pode ser observado visualmente e o que efetivamente aparece sobre a imagem capturada. Em outras palavras, diferentes fenômenos ou mecanismos relacionados a um campo de escoamento podem ser colocados em evidência, dependendo do processo de captura das imagens. Par ilustrar esta situação, a Figura 32 mostra duas fotografias distintas, obtidas por Prandtl e Tietjens (1957), correspondentes a um mesmo escoamento turbulento no interior de um canal aberto. Na primeira delas, a câmera se desloca com uma velocidade equivalente àquela da água nas imediações das paredes do canal, permitindo



Acervo do LVE/UNESP/IS

Figura 31. Visualização do escoamento em filme de sabão.

identificar a presença de vórtices naquela região. Na segunda imagem, a câmera é arrastada com a velocidade do escoamento no centro do canal, onde diferentes estruturas turbilhonares tornam-se visíveis.



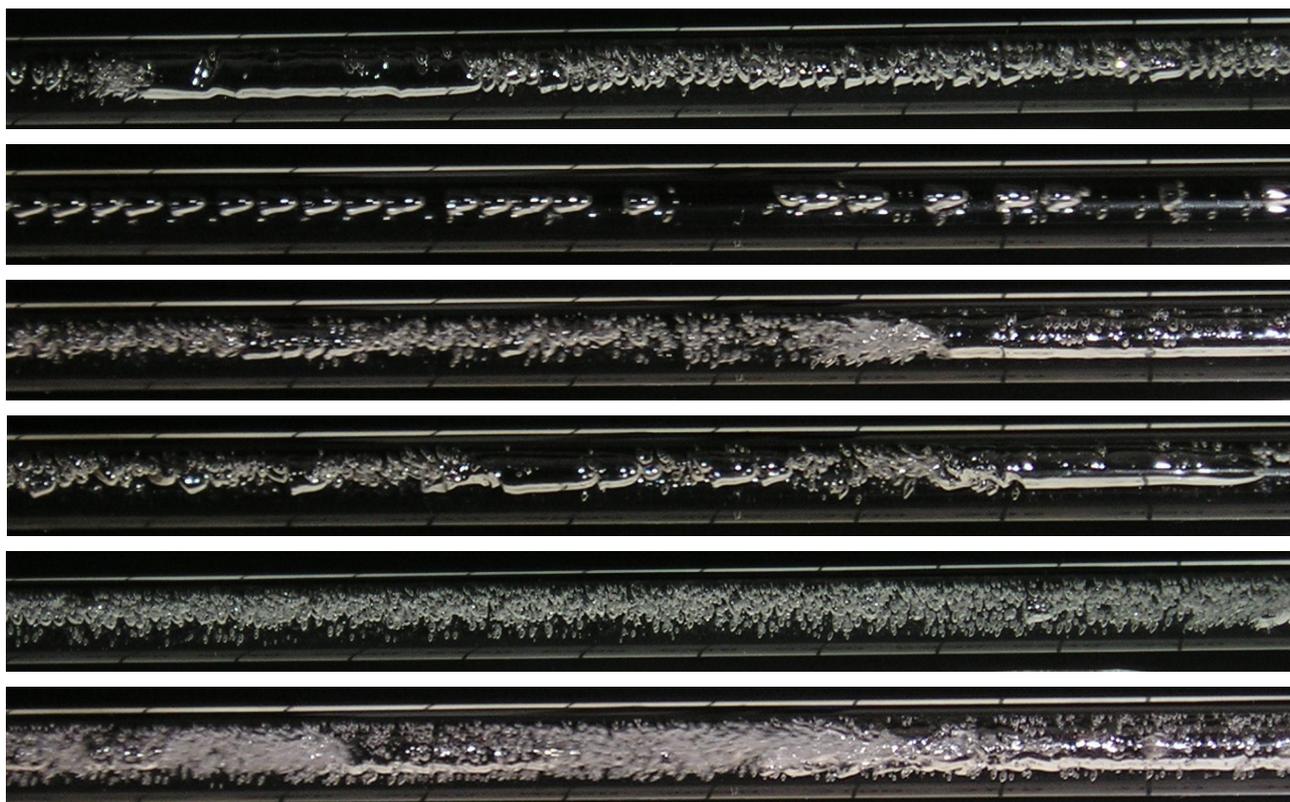
Yang (1989)

Figura 32. Visualização do escoamento de água no interior de um canal aberto.

De maneira geral, as câmeras utilizadas na captura de imagens de escoamentos são do mesmo tipo e modelo usualmente empregados pelos profissionais da fotografia. Para a obtenção de imagens de qualidade, recomenda-se a utilização de objetivas do tipo macro, de alta luminosidade e de baixa aberração ótica. Câmeras produzidas por fabricantes tradicionais, com visor através da objetiva e regulagem manual, via de regra, permitem a obtenção dos melhores resultados.

Com o advento da fotografia digital, a obtenção de imagens em apenas 8 bits (256 tons de cinza) é suficiente para a maioria das aplicações técnicas. Para evitar uma acentuada perda de qualidade, a utilização de arquivos não compactados, do tipo RAW ou TIF, é altamente recomendada. Caso isto não seja possível, recomenda-se o emprego de baixos níveis de compactação, menores que 15 %.

As imagens da Figura 33 foram obtidas com o auxílio de uma câmera digital de apenas 3,2 Mpixel e mostram diferentes configurações apresentadas por um escoamento bifásico gás-líquido, de uma mistura óleo lubrificante e refrigerante R134a, no interior de um tubo de apenas 3,2 mm de diâmetro interno. Após o ajuste de uma iluminação adequada, três outras dificuldades tiveram que ser superadas. Em primeiro lugar, o pequeno diâmetro do tubo obriga a realização de uma fotografia macro, onde o ajuste de foco sempre se mostra bastante crítico. O segundo problema decorre da presença de curvatura na parede externa do tubo, que produz um efeito de lente, provocando distorções da imagem. Por último, a velocidade relativamente elevada do escoamento obriga a utilização de baixos tempos de varredura.



Acervo do LVE/UNESP/IS

Figura 33. Padrões do escoamento bifásico gás-líquido no interior de um tubo com 3,2 mm de diâmetro interno, para $Re = 2400$.

Finalmente, deve-se comentar que a captura de fenômenos de curta duração é, normalmente, fonte de sérios desafios experimentais. Ainda que as filmadoras de alta velocidade disponíveis no mercado já sejam capazes de registrar milhares de fotogramas por segundo, seu custo de aquisição é, ainda, elevado e a qualidade das imagens, em termos de contraste e resolução, deixa bastante a

desejar. Uma alternativa de baixo custo para o registro de fenômenos repetitivos e de alta velocidade é conhecida como fotografia ultra-rápida. Uma câmera convencional de 35 mm, associada a um *flash* eletrônico e um dispositivo de sincronismo relativamente simples, permitiram a obtenção da seqüência de imagens apresentada na Figura 34, que mostra uma gota de óleo com 5,3 mm em queda livre, chocando-se contra um filme do mesmo óleo, com 8 mm de espessura. As diferentes fases do fenômeno (*splash*), caracterizadas pela formação da coroa, das gotas satélites e do jato de Rayleigh, podem ser nitidamente observadas.

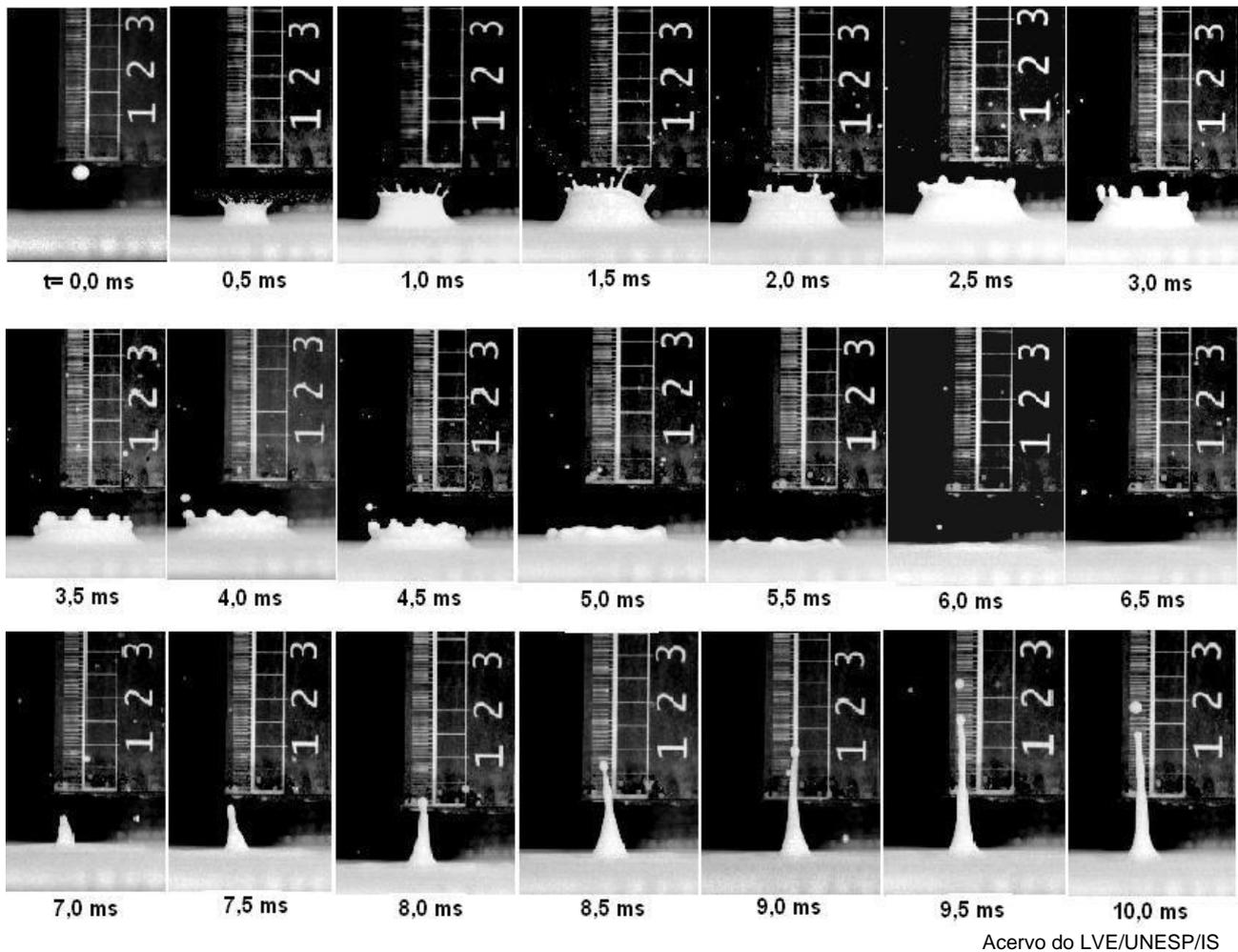


Figura 34. Impacto de uma gota de óleo solúvel contra um filme do mesmo óleo, para $Re = 1200$ e $We = 4400$.

2.6 O passado, o presente e o futuro da visualização de escoamentos

Decorridos cerca de 500 anos desde os esboços pioneiros de da Vinci, retratando – de maneira muito mais intuitiva do que propriamente técnica – o movimento dos fluidos, a visualização de escoamentos ainda se impõe, no cenário atual, como um instrumento eficaz de interpretação e análise de escoamentos. Ao longo do último século, novas técnicas de visualização foram desenvolvidas, oferecendo efetiva contribuição para o progresso da ciência nesta área do conhecimento.

Hoje, além de permitir a identificação qualitativa de fenômenos, os métodos de visualização evoluíram no sentido de fornecer, também, detalhadas informações quantitativas acerca dos campos de escoamento. Como discutido nos trabalhos de Miles e Lempert (1997), Gharib et al. (2002) e

Machacek e Rösgen (2002), o notável avanço observado na tecnologia dos novos computadores digitais já permite o processamento de imagens em tempo real, de regiões razoavelmente amplas de um escoamento, abrindo perspectivas bastante promissoras para o estudo da turbulência nos fluidos e dos mecanismos que conduzem à transição.

2.7 Agradecimentos

Os autores desejam expressar seus agradecimentos à FAPESP, ao CNPq, à CAPES e à FUNDUNESP, pelo apoio financeiro que têm recebido para o desenvolvimento de seus projetos. O reconhecimento dos autores é endereçado, também, a toda a equipe do Laboratório de Visualização de Escoamentos – LVE/UNESP/IS e, em particular, aos colegas Reginaldo Cordeiro da Silva, Ricardo Alan Verdú Ramos e José Luiz Gasche, bem como aos orientados, e amigos, Cláudio Lindquist, Odenir de Almeida, Rubens Campregher, Herbert Gonçalves, Ângelo Hirai, Gustavo Bifaroni, Ricardo Ferreira e Carlos Eguti, pela valiosa colaboração na obtenção das imagens que ilustram o presente texto.

2.8 Referências

- Alam, Md.M., Moriya, M. e Sakamoto H., 2003, “Aerodynamic Characteristics of Two Side-by-Side Circular Cylinders and Application of Wavelet Analysis on the Switching Phenomenon”, *Journal of Fluids and Structures*, v.18, pp.325-346.
- Balint, E., 1953, “Techniques of Flow Visualization”, *Aircraft Engineering*, v.25, pp.161-167.
- Barlow, J.B., Rae, W.H. e Pope, A., 1999, “Low Speed Wind Tunnel Testing”, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Bland, R.E. e Pelick, T.J., 1962, “The Schlieren Method Applied to Flow Visualization in a Water Tunnel”, *Journal of Basic Engineering*, v.84, pp.587-592.
- Brown, G.L. e Roshko, A., 1974, “On Density Effects and Large Scale Structure in Turbulent Mixing Layers”, *Journal of Fluid Mechanics*, v.64, pp.775-816.
- Cawley, M.F. e McBride, P., 2004, “Flow Visualization of Free Convection in a Vertical Cylinder of Water in the Vicinity of the Density Maximum”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v.47, n.6-7, pp.1175-1186.
- Clayton, B.R. e Massey, B.S., 1967, “Flow Visualization in Water: A Review of Techniques”, *Journal of Science and Instrumentation*, v.44, pp.2-11.
- Clutter, D.W. e Smith, A.M.O., 1961, “Flow Visualization by Electrolysis of Water”, *Aerospace Engineering*, v.20, pp.24-27 e 74-76.
- Costa, A., Franciscis, A., Glória, A., Faraboschi, P. e Olivieri, M., 1992, “Spectral Estimation for 2-D Doppler Ultrasound Imaging”, *Electronics Letters*, v.28, n.23, pp.2177-2179.
- Cressely, R. e Decruppe, J.P., 1992, “Flow Birefringence Visualization of a Transitions in Circular Couette Flow”, *Experiments in Fluids*, v.13, n.1, pp.43-48.
- Dargahi, B., 1989, “The Turbulent Flow Field Around a Circular Cylinder”, *Experiments in Fluids*, v.8, n.1, pp.1-12.
- Davis, W. e Fox, R.W., 1967, “An Evaluation of the Hydrogen Bubble Technique for the Quantitative Determination of Fluid Velocities Within Clear Tubes”, *Journal of Basic Engineering*, v.89, pp.771-781.
- Denk, V. e Nirschl, H., 1991, “Flow Visualization in a Scanning Electron Microscope Scale”, *Experiments in Fluids*, v.11, pp.401-402.
- Dobrodzicki, G.A., 1982, “Flow Visualization Water Tunnel - Its Construction and Capabilities”, NAE - National Aeronautical Establishment, Aeronautical Report LR-610 NRC n.20235.

- Douglas, P., 1991, "Photosensitive Materials for Use in Velocity Profile Measurements in the Water Phase of Air-Water Systems and in Single Phase Liquid Systems", *Chemical Engineering Technology*, v.14, pp.275-287.
- Dumas, R., Domptail, C. e Daien, E., 1980, "Hydrodynamic Visualizations of Some Turbulent Flow Structures. Flow Visualization II", *Proceedings of the Second International Symposium on Flow Visualization*, Merzkirch, W. (ed.), Bochum, Alemanha.
- Durelli, A.J. e Norgard, J.S., 1972, "Experimental Analysis of Slow Viscous Flow Using Photoviscosity and Bubbles", *Experimental Mechanics*, v.12, n.4, pp.169-177.
- Fage, A. e Preston, J.H., 1941, "Description of a Water Tunnel and Apparatus for the Investigation of Flow Problems", *Journal of the Royal Aeronautical Society*, v.45, pp.124-140.
- Freymuth, P., 1993, "Flow Visualization in Fluid Mechanics", *Revue Science Instruments*, v.64, n.1, pp.1-18.
- Gad-El-Hak, M. e Fazl -Hussain, A.K.M., 1986, "Coherent Structures in a Turbulent Boundary Layer. Part 1: Generation of Artificial Bursts", *Physics of Fluids*, v.29, n.7, pp.2124-2139.
- Gharib, M., Pereira, F., Dabiri, D. e Modarress, D., 2002, "Quantitative Flow Visualization – Toward a Comprehensive Flow Diagnostic Tool", *Annals of the New York Academy of Sciences*, v.972, pp.1-9.
- Goldstein, R.J., 1976, "Fluid Mechanics Measurements", Hemisphere Publishing Corporation.
- Hagiwara, Y., Suzuki, T. e Saegusa, D., 2004, "Interaction Between Near-wall Turbulence Structure and Immiscible Droplets Falling with Wobbling Motion in Upward Water Flow", *Energy* (no prelo).
- Hassinger, S.H., 1968, "An Experiment with Particles in a Free Vortex", *AIAA Journal*, v.6, n.5, pp.939-940.
- Hay, J.G. e Thayer, A.M., 1989, "Flow Visualization of Competitive Swimming Techniques: The Tufts Method", *Journal of Biomechanics*, v.22, n.1, pp.11-19.
- Hesselink, L., 1988, "Digital Image Processing in Flow Visualization", *Annual Review of Fluid Mechanics*, v.20, pp.421-485.
- Imamoto, H. e Ishigaki, T., 1992, "Flow Visualization in a Transverse Cross Section of an Open-Channel Flow", *Experimental Thermal and Fluid Science*, v.5, n.3 pp.268-273.
- Kerenyi, K., Stein, S. e Sterling Jones, J., 2001, "Advanced Flow Visualization Techniques for the Federal Highway Administration Hydraulics Research Laboratory", ASCE 2001.
- Kiml, R., Magda, A., Mochizuki, S. e Murata, A., 2004, "Rib-induced Secondary Flow Effects on local Circumferential Heat Transfer Distribution Inside a Circular Rib-roughened Tube", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v.47, n.6-7, pp.1403-1412.
- Kocherscheidt, H., Schmidts, M. e Ram, V.I.V., 2001, "Transition Studies of the Flow in Longitudinal Vortices Embedded in a Channel by Visualization through Hydrogen Bubbles", *Optical Diagnostics in Engineering*, v.5, n.1, pp.1-12.
- Kurada, S., 1994, "Flow Visualization Using Photochromic Dyes: A Review", *Optics and Lasers in Engineering*, v.20, pp.177-192.
- Lambert, C. e Gursul, I., 2004, "Characteristics of Fin Buffeting Over Delta Wings", *Journal of Fluids and Structures*, v.19, n.3, pp. 307-319.
- Lu, L.J. e Smith, C.R., 1991, "Use of Flow Visualization Data to Examine Spatial-Temporal Velocity and Burst-type Characteristics in a Turbulent Boundary Layer", *Journal of Fluid Mechanics*, v.232, pp.303-340.
- Machacek, M. e R sgen, T., 2002, "Photogrammetric and Image Processing – Aspects in Quantitative Flow Visualization", *Annals of the New York Academy of Sciences*, v.972, pp. 36-42.

- Miles, R.B e Lempert, W.R., 1997, “Quantitative Flow Visualization in Unseeded Flows”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, v.29, pp.285-326.
- McCarthy, K.L., Kauten, R.J. e McCarthy, M.J., 1992, “Flow Profiles in a Tube Rheometer Using Magnetic Resonance Imaging”, *Journal of Food Engineering*, v.16, pp.109-125.
- Merzkirch, W., 1974, “Flow Visualization”, Academic Press Inc., New York.
- Nakamura, Y., Ohya, Y., Ozono, S. e Nakayama, R., 1996, “Experimental and Numerical Analysis of Vortex Shedding from Elongated Rectangular Cylinders at Low Reynolds Numbers 200-10³”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.65, p.301-308.
- Nakayama, Y. (ed.), 1990, “Visualized Flow – Fluid Motion in Basic and Engineering Situations Revealed by Flow Visualization”, Japan Society of Mechanical Engineers, Pergamon Press, Oxford.
- Nishimura, T., Fujiwara, M. e Miyashita, H., 1992, “Visualization of Temperature Fields and Double-Diffusive Convection Using Liquid Crystals in an Aqueous Solution Crystallizing Along a Vertical Wall”, *Experiments in fluids*, v.12, pp.245-250, 1992.
- Nychas, S.G., Hershey, H.C. e Brodkey, R.S., 1973, “A Visual Study of Turbulent Shear Flow”, *Journal of fluid Mechanics*, v.61, part 3, pp.513-540.
- Odell, G.M. e Kovasznay, L.S.G., 1971, “A New Type of Water Channel With Density Stratification”, *Journal of Fluid Mechanics*, v.50, part 3, pp.535-543.
- Ohya, Y., Nakamura, Y., Ozono, S., Tsuruta, H. e Nakayama, R., 1992, “A Numerical Study of Vortex Shedding from Flat Plates with Square Leading and Trailing Edges”, *Journal of Fluid Mechanics*, v.236, pp.445-460.
- Ozoe, H., Toh, K. e Inoue, T., 1991, “Transition Mechanism of Flow Modes in Czochralski Convection”, *Journal of Crystal Growth*, v.110, n.3, pp. 472-480.
- Peebles, F.N. e Liu, K.C., 1995, “Photoviscous Analysis of Two Dimensional Laminar Flow in an Expanding Jet”, *Experimental Mechanics*, v.5, n.9, pp.229-304.
- Philbert, M. e Boutier, A., 1972, “Méthodes Optiques de Mesure de Vitesses de Particules Entraînées Dans les Écoulements”, *La Recherche Aérospatiale*, n.3, pp.171-184.
- Picot, P.A., Rickey, D.W., Mitchell, R., Rankin, R.N. e Fenster, A., 1993, “Three Dimensional Colour Doppler Imaging”, *Ultrasound in Medicine and Biology*, v.19, n.2, pp.95-104.
- Popiel, C.O. e Turner, J.T., 1991, “Visualization of High Blockage Flow Behind a Flat Plate in a Rectangular Channel”, *Journal of Fluids Engineering*, v.113, n.1, pp.143-146.
- Prados, J.W. e Peebles, F.N., 1959, “Two Dimensional Laminar Flow Analysis, Utilizing a Doubly Refracting Liquid”, *A.I.Ch.E. Journal*, v.5, n.2, pp.225-234.
- Prandtl, L. e Tietjens, O.G., 1957, “Applied Hydro/ and Aeromechanics”, Reimpressão da edição de 1934, Dover Publications, Inc. New York.
- Rhee, H.S., Koseff, J.R. e Street, R.L., 1984, “Flow Visualization of a Recirculating Flow by Rheoscopic Liquid and Liquid Crystal Techniques”, *Experiments in Fluids*, v.2, n.1, pp.57-64.
- Roos, F.W. e Willmarth, W.W., 1969, “Hydrogen Bubble flow Visualization at Low Reynolds Numbers”, *AIAA Journal*, v.7, n.8, pp.1635-1637.
- Savas, Ö., 1985, “On Flow Visualization Using Reflective Flakes”, *Journal of Fluid Mechanics*, v.152, pp.235-248.
- Schraub, F.A., Kline, S.J., Henry, J., Runstadler Jr., P.W. e Littell, A., 1965, “Use of Hydrogen Bubbles for Quantitative Determination of Time-Dependent Velocity Fields in Low-Speed Water Flows”, *ASME Paper n° 64-WAIFE20 ou Journal of Basic Eng.*, v.87, pp.429-444.
- Schuster, P.R. e Wagner, J.W., 1988, “Holographic Velocimetry for Flow Diagnostics”, *Experimental Mechanics*, v.28, n.4, pp.402-409.
- Settles, G.S., 1986, “Modern Developments in Flow Visualization”, *AIAA Journal*, v.24, n.8, pp.1313-1323.

- Shapiro, A.H., 1963, "Design of Tufts for Flow Visualization", *AIAA Journal*, v.1, n.1, pp.213-214.
- Tanner, L.H., 1966, "The Design of Laser Interferometers for use in Fluid Mechanics", *Journal of Science Instrumentation*, v.43, pp.878-886.
- Tatterson, G.B., Yuan, H.H.S. e Brodkey, R.S., 1980, "Stereoscopic Visualization of the Flows for Pitched Blade Turbines", *Chemical Engineering Science*, v.35, pp.1369-1375.
- Van Dyke, M., 1982, "An Album of Fluid Motion", The Parabolic Press, Stanford.
- Vreeburg, J.P.B., 1985, "Fluid Physics Instrumentation Study - Part IV: Executive Summary, Conclusions and Recommendations", N.L.R. TR 85017 U, National Aerospace Laboratory.
- Yang, W.J., 1989, "Handbook of Flow Visualization", Hemisphere Publishing Co.
- Yano, M., 1980, "Improved Holographic Method for the Measurement of Velocity in Water Flow", *Flow Visualization II*, Merzkirch, W. (ed), Proceedings of the Second International Symposium on Flow Visualization, pp.719-723, Bochum, Alemanha.
- Yurechko, V.N. e Ryazantsev, Y.S., 1991, "Fluid Motion Investigation by the Photocromic Flow Visualization Technique", *Experimental Thermal and Fluid Science*, v.4, pp.273-288.
- Weinstein, L.M., 1993, "Large-Field High-Brightness Focusing Schlieren System", *AIAA Journal*, v.31, n.7, pp.1250-1255.
- Werlé, H., 1953, "Visualisation en Tunnel Hydrodynamique - Dispositifs Réalisés - Méthodes Utilisées - Résultats Obtenus", *La Recherche Aéronautique*, n.33, pp.3-7.
- Williamson, C.H.K., 1989, "Oblique and Parallel Modes of Vortex Shedding in the Wake of a Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers", *Journal of Fluid Mechanics*, v.206, pp.579-627.
- Winardi, S., Nakao, S. e Negase, Y., 1988, "Pattern Recognition in Flow Visualization Around a Paddle Impeller", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, v.21, n.5, pp.503-508.
- Winter, E.F., 1958, "Flow Visualisation Techniques Applied to Combustion Problems", *Journal of the Royal Aeronautical Society*, v.62, pp.268-276.
- Winter, E.F. e Deterding, J.H., 1956, "Apparatus and Techniques for the Application of a Water Flow System to the Study of Aerodynamic Systems", *British Journal of Applied Physics*, v.7, n.7, pp.247-260.