

HENRIQUE PINTO MACEDO

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS A
DESCARGA DE JATO HORIZONTAL EM CONDUTO EM UM LABORATÓRIO
DIDÁTICO DE MECÂNICA DOS FLUIDOS**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo por ocasião da
conclusão do Projeto de Formatura.

São Paulo
1998

HENRIQUE PINTO MACEDO

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS A
DESCARGA DE JATO HORIZONTAL EM CONDUTO EM UM LABORATÓRIO
DIDÁTICO DE MECÂNICA DOS FLUIDOS**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo por ocasião da
conclusão do Projeto de Formatura.

Área de Concentração:
Energia e Fluidos

Orientador:
Jayme Pinto Ortiz

São Paulo
1998

SUMÁRIO

Lista de Figuras	
Lista de Tabelas	
Lista de Símbolos	
Resumo	

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Histórico	1
1.2 Fundamentação Teórica	3
1.2.1 Equações Diferenciais Simplificadas para Escoamento em Camadas Limite Laminares Bidimensionais	5
1.2.2 Aplicação da Equação de Prandtl a uma Simplificação do Caso em Estudo	10
1.2.3 Aplicação da Equação de Prandtl a um Jato Axissimétrico - Caso em Estudo	15
2 ANÁLISE DE MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO	18
2.1 Necessidades e Exigências do Projeto do Sistema de Visualização	18
2.2 Proposta e Análise de Soluções para a Visualização do Jato Horizontal	20
2.2.1 Método da Grade com Fitas	21
2.2.2 Método de Injeção de “Streak Line” (Linha de Corrente)	22
2.2.3 Método de Suspensão de Partículas	24
2.2.4 Método de Injeção de “Time Line” (Linha de Tempo)	25
2.2.5 Método das Bolhas de Hidrogênio	26
2.2.6 Método “Shadowgraph”	27

2.2.7 Método Schlieren	29
2.2.8 Visualização por “Laser/Light Sheet” (Lençol de Laser/Luz)	31
2.3 Escolha das Melhores Alternativas	33
3 IMPLEMENTAÇÃO	35
3.1 Considerações Preliminares	35
3.2 Equipamento para a Visualização	38
3.3 Resultados Experimentais	41
4 CONCLUSÕES	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Esquema das Instalações Atuais do Laboratório	2
Figura 1.2 - Interferograma de um jato supersônico bidimensional	4
Figura 1.3 - Linhas de corrente no escoamento de um jato através de uma fenda longa	10
Figura 2.1 - Visualização do escoamento de ar a jusante de uma asa delta pelo método de grade com fitas	21
Figura 2.2 - Visualização do escoamento em torno de um aerofólio usando o método de linhas de corrente	23
Figura 2.3 - Visualização do escoamento em torno de um cilindro pelo método de suspensão de partículas de alumínio	24
Figura 2.4 - Linhas de corrente e linhas de tempo feitas com bolhas de hidrogênio	26
Figura 2.5 - Visualização "Shadowgraph" com Fonte de Luz Pontual	28
Figura 2.6 - Visualização da reflexão de uma onda de choque oblíqua através do método "Shadowgraph"	28
Figura 2.7 - Método Schlieren de Visualização	29
Figura 2.8 - Visualização através do método Schlieren de escoamento transônico sobre uma placa plana delgada e perfilada	30
Figura 2.9 - Esquema do aparato para visualização do tipo PIV - Laser Sheet	31
Figura 3.1 - Esquema da instalação utilizada por Brücker	35
Figura 3.2 - Diferença de Percurso dos Feixes de Laser de um Leque em um Conduto Retangular	38
Figura 3.3 - Aspectos dos Suportes para as Lentes (Vistas Frontal e Lateral).	40

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características Analisadas	20
Tabela 2 - Notas Atribuídas à Solução da Grade com Fitas	22
Tabela 3 - Notas Atribuídas ao Método de Injeção de Linhas de Corrente	23
Tabela 4 - Notas Atribuídas ao Método da Suspensão de Partículas	25
Tabela 5 - Notas Atribuídas ao Método de Injeção de Linhas de Tempo	26
Tabela 6 - Notas Atribuídas ao Método das Bolhas de Hidrogênio	27
Tabela 7 - Notas Atribuídas ao Método Shadowgraph	29
Tabela 8 - Notas Atribuídas ao Método Schlieren	30
Tabela 9 - Notas Atribuídas ao Método "Laser Sheet"	33
Tabela 10 - Resumo das notas atribuídas a cada método	33

Lista de Símbolos

Re	Número de Reynolds
U	Velocidade média do fluido em dada seção
L	Comprimento de uma placa plana
ν	Viscosidade cinemática
u	Velocidade de uma partícula na direção x
v	Velocidade de uma partícula na direção y
p	Pressão em dado ponto do fluido
μ	Viscosidade dinâmica
$O()$	Da ordem de; Se $u \equiv O(1)$, a velocidade na direção x é da ordem de 1
δ	Espessura da camada limite numa dada distância no escoamento
ρ	Massa específica do fluido
$\sum \vec{M}_{ext_{VC}}$	Somatória dos momentos externos atuantes sobre o volume de controle
$\forall C$	Volume de controle
SC	Superfície de controle
$\vec{r}$	Vetor posição de uma partícula do fluido
$\vec{n}$	Versor normal a uma superfície de controle
M_0	Momento de módulo constante
ψ	Função de corrente
η	Variável auxiliar
ξ	Variável auxiliar
Q	Vazão

RESUMO

Uma das maiores dificuldades de um curso de Mecânica dos Fluidos é talvez passar ao aluno uma imagem daquilo que ele está estudando. Muitas vezes, como em outros cursos que compõem o currículo de Engenharia Mecânica, o aluno não tem como enxergar aquilo que aprende na teoria. No caso de Mecânica dos Fluidos é prática comum tentar suprir esta deficiência com experiências práticas em laboratórios, contando com a participação dos alunos.

No laboratório de Mecânica dos Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo tenta-se fazer esta ilustração com diversos experimentos. Infelizmente, mesmo nestes casos em geral não há uma visualização do escoamento estudado propriamente dita, mas sim uma medição quantitativa como por exemplo o levantamento de perfis de velocidade com o auxílio de um anemômetro laser.

Com o objetivo de fornecer material visual para a análise dos alunos e para a ilustração de fenômenos explicados em sala de aula, pretende-se com este trabalho montar uma bancada de ensaios onde se consiga visualizar um escoamento. Mais especificamente, deseja-se visualizar a descarga de um jato horizontal de água através de um orifício.

Foram estudados diversos métodos de visualização de escoamentos em uso atualmente, e por fim selecionou-se o método PIV - Particle Imaging Velocimetry (Velocimetria por Imagens de Partículas). Indicou-se também uma possível disposição do aparato experimental para uma primeira montagem.

Neste primeiro momento de implementação detectaram-se problemas como a falta de potência do Laser disponível, a imperfeição das lentes confeccionadas, e problemas com a estrutura do suporte das lentes.

Obteve-se, entretanto, uma visualização razoável da descarga de um jato em um conduto horizontal. Para observar o fenômeno será necessário que os alunos participantes do laboratório tenham uma preparação prévia, caso contrário não saberão interpretar a imagem obtida e não enxergarão o jato. Com a preparação adequada, entretanto, é

possível observar, através da variação da posição do equipamento, o desenvolvimento do jato.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Histórico

Há vários anos ministra-se na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo o curso de Mecânica dos Fluidos VI, como aprofundamento dos conhecimentos básicos de Mecânica dos Fluidos para os alunos de graduação que optam pela Engenharia Mecânica com ênfase em Energia e Fluidos. Neste curso, apresentam-se aos alunos assuntos como a formação da camada limite de Prandtl e os efeitos dos fluidos sobre corpos imersos em escoamentos, e as ferramentas matemáticas básicas para a análise destes fenômenos. Para que estes assuntos sejam compreendidos de maneira melhor, os alunos participam também de experiências em laboratório, onde levantam-se perfis de velocidade em diversas situações, como no escoamento sobre um vertedouro, a formação da camada limite, e o escoamento em torno de um corpo rombudo imerso no escoamento. Estes perfis são então analisados pelos alunos, que devem apresentar relatórios ao professor, demonstrando se os resultados experimentais correspondem ou não à teoria vista em aula e suas conclusões a respeito da experiência. Infelizmente, o aparato experimental utilizado permite apenas que os alunos tomem medidas de grandezas como a velocidade, por exemplo, mas não fornecem nenhum tipo de ilustração do efeito além da correspondência dos resultados com a teoria. Isto fez com que surgisse a necessidade de desenvolver um novo aparato experimental ou adaptar o existente para fornecer uma visualização dos fenômenos estudados.

Como proposta inicial, colocou-se o estudo de um aparato que permita a visualização da descarga de um jato horizontal de água em um conduto ou tanque para demonstrar o desenvolvimento do escoamento na seção a jusante do orifício de onde é descarregado o jato. Atualmente, o laboratório da Escola dispõe de uma bancada de ensaios de escoamentos de água composta por um conduto de acrílico transparente conectando dois tanques do mesmo material, como na Fig. 1.1. Um destes é alimentado por uma bomba hidráulica, e a bancada funciona em circuito fechado, com a água saindo do segundo tanque para um tanque de regulagem de nível, que serve como “buffer” de água para que o nível da água não suba demais nos condutos. Dispõe-se também de um anemômetro laser de baixa potência. Deseja-se, então, criar uma aparelhagem que permita a visualização de um escoamento de água dentro do conduto.

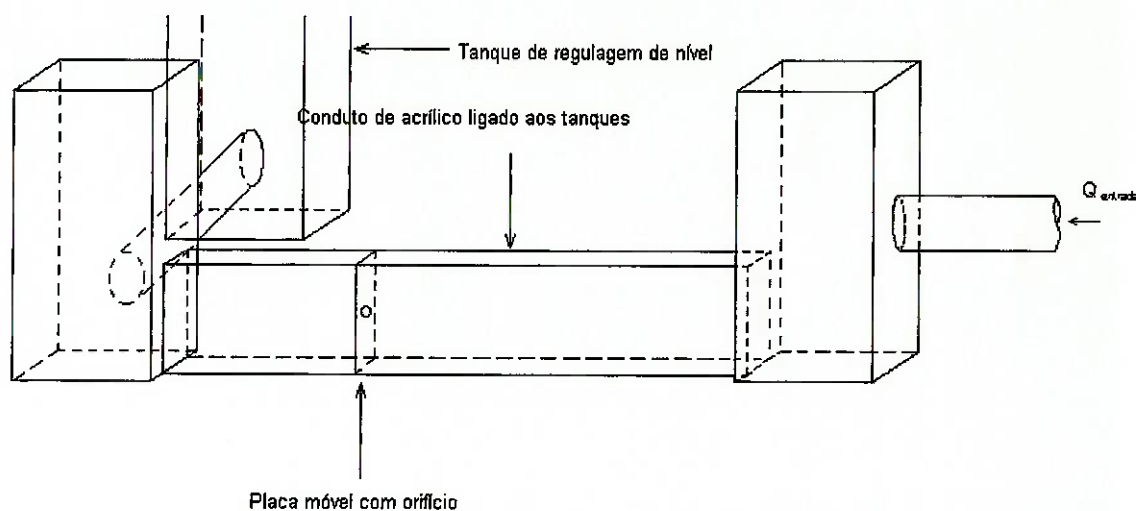


Figura 1.1 - Esquema das Instalações Atuais do Laboratório

Para este trabalho consultou-se a literatura disponível e também foram feitas visitas ao Laboratório de Vazão do Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Analisaram-se então as técnicas experimentais atualmente em uso e consideraram-se diversos fatores para a escolha da melhor

alternativa para aplicação no laboratório didático. Manteve-se em mente que o método escolhido, qualquer que fosse, deveria proporcionar uma boa visualização do fenômeno aliada a simplicidade de execução e compreensão, já que será usado para instruir alunos de graduação e num primeiro momento não tem o intuito de fornecer informações quantitativas, mas qualitativas.

1.2 Fundamentação Teórica

Será feita agora breve discussão do fenômeno estudado, a descarga de jato horizontal, conforme encontrada na literatura.

De acordo com PAI¹ (1954), o escoamento de um jato pode ser dividido em duas partes: a região de mistura e o núcleo potencial. A Fig. 1.2 mostra um escoamento típico de um jato bidimensional supersônico em total expansão, i.e., a pressão na saída do bocal é praticamente a mesma do meio circundante em repouso. Nesta figura vê-se claramente que há duas regiões distintas. O núcleo potencial é a porção no meio do jato e próxima à saída do bocal.

No núcleo potencial, os efeitos viscosos são desprezíveis e o fluido pode ser considerado como invíscido. A primeira parte da região de mistura está na fronteira do jato próxima à saída do bocal. Esta região de mistura se alarga a jusante no escoamento. Ao longe, a jusante, o jato todo se tornará uma região de mistura. Na região de mistura, há grande variação de velocidade e massa específica, e os efeitos da transferência de calor e viscosidade devem ser considerados. Entretanto, se a temperatura do jato for muito próxima à do fluido e a velocidade do jato baixa, o fluido pode ser considerado como incompressível na região de mistura. Portanto, os efeitos de

variação de temperatura, viscosidade e massa específica podem ser desprezados na análise do movimento do jato.

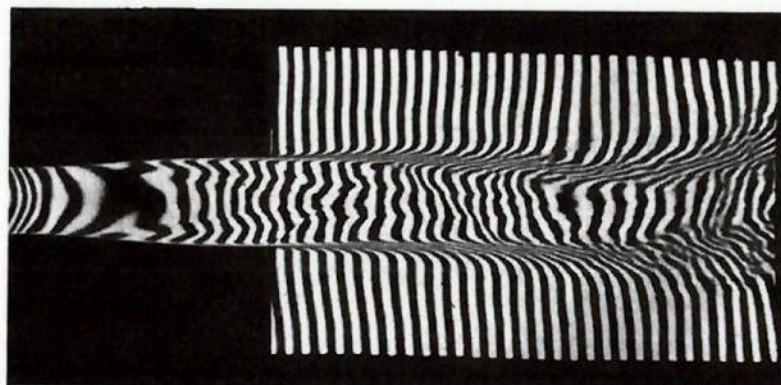


Figura 1.2 - Interferograma de um jato supersônico bidimensional

Por outro lado, caso haja grande diferença entre a temperatura do jato e a do fluido circundante, ou se as velocidades forem altas, o jato deve necessariamente ser considerado como compressível e os efeitos da variação de massa específica, temperatura e viscosidade devem ser levados em conta na análise. Assumiremos então que o escoamento em estudo será sempre laminar. Para que isto seja verdade, devemos ter números de Reynolds pequenos, o que significa que $Re = \frac{UL}{\nu}$ deverá ser pequeno, e veremos que, com as hipóteses que adotaremos, isto só será verdadeiro se UL for um valor pequeno, porque teremos que ter uma viscosidade cinemática muito baixa para podermos simplificar as equações necessárias e conseguir uma solução matemática.

Para a discussão de problemas de mecânica dos fluidos em aplicações de engenharia, e em particular para o caso em estudo, a descarga de uma jato de água a baixas velocidades em um conduto, é em geral suficiente considerar a hipótese de Navier-Stokes que o tensor das tensões em um ponto do fluido é uma função isotrópica da taxa de

deformação sem dissipação de energia, o que faz com que haja apenas um coeficiente de viscosidade. Mesmo com uma hipótese tão simples, ainda não é possível resolver analiticamente as equações de Navier-Stokes para qualquer problema prático por causa das dificuldades matemáticas envolvidas. Com a introdução dos conceitos da camada limite por Prandtl, as equações de Navier-Stokes puderam ser simplificadas de tal maneira que problemas práticos podem ser resolvidos com estas hipóteses da camada limite. Na região de mistura de um jato, estas hipóteses podem ser aplicadas, e a região é muitas vezes chamada de camada limite livre.

1.2.1 Equações Diferenciais Simplificadas para Escoamento em Camadas Limite Laminar Bidimensionais

Serão apresentadas agora as simplificações feitas às equações de Navier-Stokes em coordenadas cartesianas para a análise de escoamentos em camadas limites laminares bidimensionais conforme Prandtl apud IKEDA².

Hipóteses:

1) Fluido incompressível - Como o fluido em questão é a água líquida a baixas velocidades, e assumindo que o jato tem temperatura próxima à do fluido circundante, a hipótese de incompressibilidade é razoável, conforme exposto anteriormente.

2) Camada limite laminar - O fenômeno se dá a baixas velocidades, e por simplicidade consideraremos o escoamento como laminar.

3) A viscosidade cinemática ν é muito pequena. - Uma das hipóteses feitas por Prandtl para a simplificação das equações.

4) O eixo do jato coincide com a direção x .

5) Escoamento plano.

6) Desprezam-se as forças de campo.

Temos então, para estas condições, as Equações de Navier Stokes para o escoamento bidimensional:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

E a Equação da Continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

O problema com estas equações é que elas são altamente não-lineares e não podem ser resolvidas nas formas apresentadas. Prandtl propôs a simplificação destas equações por análise da ordem de grandeza de cada termo individualmente. Alguns termos são muito pequenos quando comparados com outros, podendo ser desprezados, simplificando consideravelmente as equações.

Sabemos que a espessura da camada limite δ é muito pequena em todos os pontos, ou seja, $\delta \ll x$ e $dy \ll dx$ exceto para a região próxima à extremidade onde a camada limite

começa a se desenvolver, i.e., $x \rightarrow 0$. Podemos então escolher uma escala tal que x e u sejam da ordem de grandeza 1, i.e.,

$$x \equiv O(1) \quad (4)$$

$$u \equiv O(1) \quad (5)$$

Dentro da camada limite $y \equiv O(\delta)$ onde $O(\delta) \ll O(1)$.

As 1^{as} e 2^{as} derivadas têm as seguintes ordens de grandeza:

$$\frac{\partial u}{\partial x} \equiv O(1) \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \equiv O(1) \quad (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} \equiv O\left(\frac{1}{\delta}\right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \equiv O\left(\frac{1}{\delta^2}\right) \quad (9)$$

Da Equação da Continuidade, temos:

$$\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial u}{\partial x} \equiv O(1) \quad (10)$$

Mas dentro da camada limite $y \equiv O(\delta)$ e concluímos, combinando isto com (10)

acima, que $v \equiv O(\delta)$. Portanto:

$$\frac{\partial v}{\partial x} \equiv O(\delta) \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \equiv O(\delta^2) \quad (12)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} \equiv O(1) \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \equiv O\left(\frac{1}{\delta}\right) \quad (14)$$

Além disto, $\frac{\partial u}{\partial t}$ precisa ser da mesma ordem de grandeza que os termos

convectivos:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} \equiv O(1) \therefore \frac{\partial u}{\partial t} \equiv O(1) \quad (15)$$

E analogamente:

$$\frac{\partial v}{\partial t} \equiv O(\delta) \quad (16)$$

Analisando agora a Equação de Navier-Stokes na direção x (1):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \ll \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \therefore \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \text{ é desprezível e o termo restante } \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

representa as forças viscosas que devem ser da mesma ordem de grandeza que as forças de inércia, ou seja, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ deve ser de ordem de grandeza $O(\delta^2)$. Isto implica que o fluido deve ter um coeficiente de viscosidade cinemática muito pequeno, que é coerente com a hipótese feita por Prandtl para a teoria da camada limite.

Analisando os termos dos gradientes de pressão em (1) e (2) vemos que:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \equiv O(1) \quad (17)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \equiv O(\delta) \quad (18)$$

Portanto dentro da camada limite o gradiente de pressão $\frac{\partial p}{\partial y}$ é desprezível e p é praticamente independente de y . Podemos considerar então que p é invariável na direção de y e é igual à pressão na corrente livre na extremidade externa da camada limite, que pode

ser determinada pela teoria do escoamento irrotacional desprezando a camada limite. Além disto, concluímos que:

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \Rightarrow \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{dp}{dx} \text{ pois } p=p(x). \quad (19)$$

Como $v \equiv O(\delta) \ll u \equiv O(1)$ nós não precisamos da equação (2), que tem v como principal variável dependente. Assim, as equações:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} \right) = - \frac{dp}{dx} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (20)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (21)$$

são as chamadas equações de Prandtl, e formam o sistema de equações diferenciais simplificadas para escoamentos na camada limite laminar bidimensional.

1.2.2 Aplicação da Equação de Prandtl a uma Simplificação do Caso em Estudo

Considerar-se-á agora o problema de um jato plano de uma fenda longa e estreita se misturando com o fluido adjacente em repouso, conforme estudado por Schlichting e Bickley apud PAI¹ (1954). Este é um dos poucos casos em que as equações da camada limite podem ser integradas exatamente. Por causa dos efeitos viscosos o jato arrasta consigo parte do fluido em repouso durante seu escoamento. Resulta disto uma configuração de linhas de corrente conforme a Fig. 1.3.

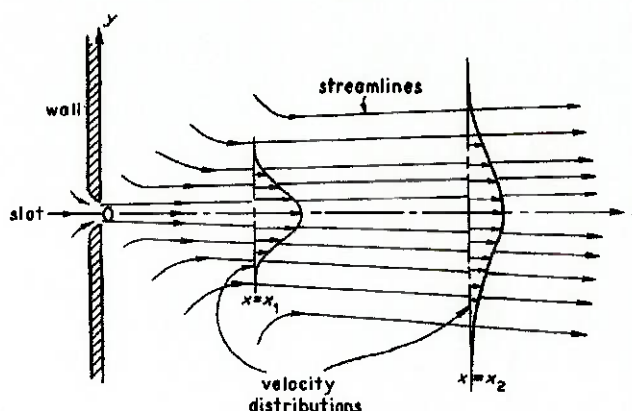


Figura 1.3 - Linhas de corrente no escoamento de um jato através de uma fenda longa

Suponha-se que a direção x coincide com o eixo do jato e que a origem do sistema de coordenadas se encontra na fenda. Torna-se então imediatamente aparente que a largura do jato aumenta com a distância x e a velocidade média no eixo do jato diminui com a distância. Para efeito do cálculo, considere-se que a fenda é infinitamente estreita e o momento no escoamento do jato é finito. Tomem-se agora as Equações de Navier-Stokes

simplificadas para um escoamento bidimensional (20) e (21), com as seguintes hipóteses:

1) Fluido incompressível - Como o fluido em questão é a água líquida a baixas velocidades, a hipótese de incompressibilidade é razoável, já que as variações da massa específica serão desprezíveis ($\rho = \text{cte.}$).

2) Como as linhas de corrente são praticamente paralelas, a variação de pressão no jato é tão pequena que pode ser desprezada.

3) A espessura da região de mistura do jato é nula.

4) Regime permanente.

Tem-se:

$$\left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} \right) = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (22)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (23)$$

já levando em consideração as hipóteses descritas acima e dividindo (20) por ρ para chegar-se a (22), com as condições de contorno

$$y = 0 \Rightarrow v = 0 ; \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (24)$$

$$y = \infty \Rightarrow u = 0$$

Como a pressão é constante e o regime é permanente, a taxa M_0 à qual o momento atravessa uma seção do jato deve ser a mesma para todas as seções. De acordo com IKEDA², temos a Equação do Momento da Quantidade de Movimento para um volume de

controle:

$$\sum \vec{M}_{ext_{VC(t)}} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC(t)} \rho \vec{r} \wedge \vec{v} dV + \int_{SC(t)} \rho (\vec{r} \wedge \vec{v}) \vec{v} \cdot \vec{n} dS \quad (25)$$

Como há regime permanente, o primeiro termo do lado direito da equação (25) é nulo. Tomando uma superfície de controle qualquer no jato, e considerando que as linhas de corrente permanecem paralelas dentro de um elemento infinitesimal, chega-se em:

$$M_0 = 2\rho \int_0^\infty u^2 dy = cte. \quad (26)$$

Se for buscada uma solução do tipo $\Psi = x^{b_1} f\left(\frac{y}{x^{b_2}}\right)$ onde ψ é a função de corrente,

será descoberto que, para que M_0 permaneça constante e $u \frac{\partial u}{\partial x}$ do mesmo grau em x que

$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$, tem-se que ter $b_1 = \frac{1}{3}$ e $b_2 = \frac{2}{3}$. Isto fará com que a largura do jato aumente com

$x^{2/3}$ e a velocidade máxima diminua com $x^{1/3}$. Faz-se então

$$\eta = \frac{1}{3} \frac{y}{v^{\frac{1}{2}} x^{\frac{2}{3}}}; \quad (27)$$

$$\Psi = v^{\frac{1}{2}} x^{\frac{1}{3}} f(\eta) \quad (28)$$

Logo,

$$u = \frac{1}{3} \frac{v^{\frac{1}{2}}}{x^{\frac{1}{3}}} f(\eta) \quad (29)$$

$$v = -\frac{v^2}{3x^{\frac{1}{3}}}(f - 2\eta f') \quad (30)$$

Substituindo (29) e (30) em (22), acha-se a seguinte equação para f :

$$(ff')' + f'' = 0 \quad (31)$$

onde “ ’ ” indica diferenciação com relação a η . A integração da equação (31) com relação a η dá a seguinte equação onde a constante de integração é zero por causa das condições de contorno (24), i.e.,

$$\eta = 0, f = f' = 0, ff' + f'' = 0 \quad (32)$$

Seja c uma constante qualquer. Escreve-se:

$$\xi = c\eta \Rightarrow f = 2cF(\xi) \quad (33)$$

(31) torna-se então

$$F'' + 2FF' = 0$$

onde ‘ indica agora diferenciação com relação a ξ . As condições de contorno (24) requerem que $F(0) = 0$ e $F''(0) = 0$, e que $F'(\infty) = 0$. Como introduziu-se uma constante arbitrária c , pode-se tomar a solução para a qual $F'(0) = 1$. Então a solução

$$F = \tanh \xi \quad (34)$$

satisfaz todas as condições necessárias e torna

$$u = \frac{2c^2}{3x^{\frac{1}{3}}} \operatorname{sech}^2 \xi \quad (35)$$

c é determinado em termos de M_0 a partir de (26):

$$c = \left(\frac{9}{16} \frac{M_0}{\rho v^2} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,8255 \left(\frac{M_0}{\rho v^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (36)$$

Finalmente,

$$\Psi = 1,6510 \left(\frac{M_0 v x}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}} \tanh \xi \quad (37)$$

$$u = 0,4543 \left(\frac{M_0^2}{\rho^2 v x} \right)^{\frac{1}{3}} \operatorname{sech}^2 \xi \quad (38)$$

$$v = 0,5503 \left(\frac{M_0 v}{\rho x^2} \right)^{\frac{1}{3}} (2\xi \operatorname{sech}^2 \xi - \tanh \xi) \quad (39)$$

onde

$$\xi = 0,2752 \left(\frac{M_0}{\rho v^2} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{y}{x^{\frac{2}{3}}} \right) \quad (40)$$

Estas aproximações são adequadas contanto que $\frac{M_0 x}{\rho v^2}$ seja um número grande. Há

uma singularidade em $x = 0$. A vazão em massa Q através de uma seção qualquer do jato é dada por:

$$Q = 2\rho \int_0^\infty u \, dy = 3,3019 \rho \left(\frac{M_0 v x}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (41)$$

1.2.3 Aplicação da Equação de Prandtl a um Jato Axissimétrico - Caso em Estudo

Suponha-se que se queira estudar agora o caso exato do laboratório, que é de um jato de fluido saindo de um pequeno orifício numa parede e se misturando com o fluido circundante em repouso. De acordo com Andrade e Tsien apud PAI¹, este é um caso em que o movimento é simétrico com relação ao eixo x , eixo do movimento do jato. Denotando por r a distância até este eixo, as equações de Prandtl podem ser escritas como:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\nu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (42)$$

e

$$u = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} ; \quad v = - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (43)$$

onde u e v são as componentes axial e radial da velocidade respectivamente. Além disto, a taxa à qual o momento atravessa uma dada seção do fluido é:

$$M_0 = 2\pi\rho \int_0^\infty u^2 r \, dr \quad (44)$$

As hipóteses e o significado dos símbolos são os mesmos que para o caso do jato bidimensional (1.3) acima. As condições de contorno são $u = 0$ em $r = \infty$, e $v = 0$ e

$\frac{\partial u}{\partial r} = 0$ em $r = 0$. Além disto, M_0 é constante. A solução pode ser obtida da forma

$$\Psi = \nu x g(\eta) , \quad \eta = \frac{1}{\sqrt{x}} \frac{r}{\nu} \quad (45)$$

e também

$$u = \frac{g}{\eta x}, \quad v = \frac{1}{x} \left(g' - \frac{g}{\eta} \right) \quad (46)$$

A equação diferencial para a função g fica:

$$-\frac{d}{d\eta} \left(\frac{gg'}{\eta} \right) = \frac{d}{d\eta} \left(g'' - \frac{g'}{\eta} \right) \quad (47)$$

Pelas condições de contorno tem-se que $g'(\infty) = 0$, enquanto que, para $\eta = 0$, $\frac{g'}{\eta}$

deve permanecer finito e tanto $g' - \frac{g}{\eta}$ quanto $\frac{d}{d\eta} \left(\frac{g'}{\eta} \right)$ devem desaparecer. Assim, $g(0) = 0$

e $g'(0) = 0$; como $g' - \frac{g}{\eta}$ e $\frac{gg'}{\eta}$ ambos desaparecem na origem, então (47) pode ser

imediatamente integrada na forma

$$\eta g'' - g' + gg' = 0 \quad (48)$$

A solução de (48) é então

$$g(\xi) = \frac{\xi^2}{1 + \left(\frac{\xi^2}{4} \right)} \quad (49)$$

onde $\xi = c\eta$, sendo c uma constante arbitrária determinada a partir de M_0 , i.e.,

$$M_0 = \left(\frac{16}{3} \right) \pi \mu c^2 \quad (50)$$

Tem-se assim finalmente:

$$u = \frac{3M_0}{8\pi\mu} \frac{1}{x} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\xi^2}{4}\right)\right]^2} \quad (51)$$

$$v = \frac{1}{4} \left(\frac{3M_0}{\pi\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{x} \frac{\xi \left[1 - \left(\frac{\xi^2}{4}\right)\right]}{\left[1 + \left(\frac{\xi^2}{4}\right)\right]^2} \quad (52)$$

com

$$\xi = \frac{1}{4\nu} \left(\frac{3M_0}{\pi\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{r}{x} \quad (53)$$

A aproximação é válida contanto que $\frac{M_0}{\rho\nu^2}$ seja grande. A vazão em massa Q

através de uma seção do jato é dada por

$$Q = 2\pi\rho \int_0^\infty ur \, dr = 8\pi\mu x \quad (54)$$

e é portanto independente fluxo de quantidade de movimento no jato, i.e., da pressão sob a qual o fluido é forçado através do orifício na parede. Se esta for grande, o jato permanece relativamente estreito; se for pequena, o jato se alarga, fazendo com que mais fluido em repouso se ponha em movimento.

2 ANÁLISE DE MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO

Mantendo em mente a descrição teórica do escoamento da descarga de jato horizontal feita em 1.2, estudaram-se métodos comumente empregados de visualização de escoamentos para selecionar aquele que melhor se encaixava nas necessidades.

2.1 Necessidades e Exigências do Projeto do Sistema de Visualização

Serão estudadas agora as especificações exatas do projeto do método de visualização para a experiência de descarga de jato horizontal do laboratório de Mecânica dos Fluidos, para que se possa escolher da melhor forma possível a solução mais vantajosa.

Estabelece-se, como necessidade, um método que permita enxergar, a olho nu, o escoamento de uma certa vazão Q de água descarregada de um tanque de acrílico transparente em um conduto também de acrílico transparente através de um orifício circular (Fig. 1.1).

Para atender a esta necessidade, podem-se destacar as seguintes exigências:

- O método usado deve produzir o melhor visual possível - Como será usado para ilustrar um fenômeno para alunos de graduação em um experimento de curta duração, o método deve ser fácil de enxergar e compreender.

- Deve-se, à medida do possível, utilizar o equipamento disponível no laboratório - Por limitações de orçamento e sendo a Escola Politécnica um órgão público, devem-se usar, se possível, apenas os recursos já disponíveis, evitando a alocação de recursos para a aquisição de

novos materiais e aparelhos.

- O método deve ser de fácil reprodução - A solução adotada terá tanto mais valor quanto mais turmas de alunos ela puder atender, portanto deve ser não-destrutiva e também não-consumível, de preferência.

- Deve ser de fácil execução - O método de visualização deve ser simples de montar, operar e desmontar para que os alunos possam realizar a experiência sem o auxílio do professor e para que não atrapalhe outras pesquisas que utilizam o mesmo conjunto tanques-condutos.

- O aparato deve ter as menores dimensões possíveis - Não se pode ocupar muito espaço, já que as dimensões do laboratório são bastante reduzidas.

- O método não deve perturbar o escoamento - Caso haja perturbação do escoamento a qualidade da demonstração poderá ser comprometida, dando falsos resultados em relação ao fenômeno real.

- O método deve ser adaptável a outros tipos de medições - O aparelho deve preferencialmente funcionar para a visualização de escoamentos de ar, a medição de grandezas como o perfil de velocidades, etc.

- Deve ser de fácil manutenção.

- Grande vida útil.

- Deve oferecer segurança aos operadores - O aparato experimental não deve oferecer risco algum a alunos, professores, ou funcionários.

2.2 Proposta e Análise de Soluções para a Visualização do Jato Horizontal

As alternativas expostas a seguir foram selecionadas dentre os métodos atualmente em uso para a visualização de escoamentos. Para fazer a escolha, as alternativas receberam notas nos seguintes aspectos, com respectivos pesos:

Tabela 1 - Características Analisadas

Característica	Peso
Efeito Visual	10
Custo	10
Facilidade de Reprodução	9
Facilidade de Execução	10
Pequenas Dimensões	8
Não Perturbação do Escoamento	10
Adaptabilidade	7
Vida Útil	8
Manutenção	8
Segurança	9
Total	60

Os pesos atribuídos são subjetivos, mas levam em conta as características que são mais importantes para o preenchimento das necessidades do projeto.

2.2.1 Método da Grade com Fitas

Este método consiste de colocar uma grade num plano perpendicular ao escoamento e prender, nos cruzamentos da grade, fitas ou tiras de tecido ou material semelhante, que são arrastadas na direção do escoamento, dando uma idéia da configuração do escoamento naquele plano (Fig. 2.1). Tem como grande desvantagem o fato de perturbar demais o escoamento, que pode se tornar um problema. É demorado de preparar a primeira vez, mas depois de pronto pode ser deslocado pelo escoamento com alguma facilidade, revelando o aspecto de seções diferentes do escoamento.

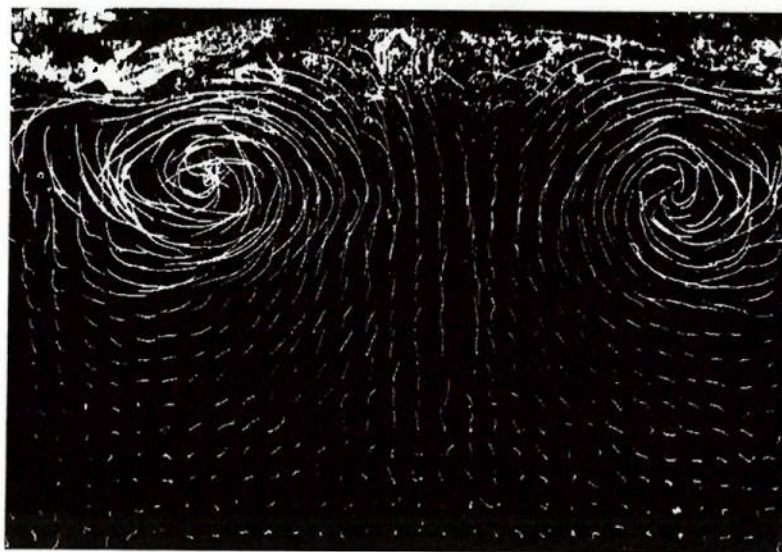


Figura 2.1 - Visualização do escoamento de ar a jusante de uma asa delta pelo método de grade com fitas

É de fácil compreensão e manuseio, e de baixíssimo custo, mas não produz resultados ótimos do ponto de vista da visualização do escoamento, já que para se ter uma idéia da evolução do escoamento precisa-se deslocar a grade e reiniciar o experimento.

Tabela 2 - Notas Atribuídas à Solução da Grade com Fitas

Característica	Nota
Efeito Visual	7
Custo	10
Facilidade de Reprodução	10
Facilidade de Execução	8
Pequenas Dimensões	7
Não Perturbação do Escoamento	5
Adaptabilidade	5
Vida Útil	9
Manutenção	9
Segurança	10

2.2.2 Método de Injeção de “Streak Line” (Linha de Corrente)

Neste método, injetam-se constantemente quantias de corante, de massa específica semelhante à do fluido estudado, no escoamento, e podem-se observar então as linhas de corrente ao longo do tempo (Fig. 2.2). Dá um bom efeito visual, mas requer cuidados especiais com a seleção do corante, a velocidade do escoamento (só fornece bons resultados para escoamentos laminares) e é de difícil execução. Para a injeção do corante podem ser usados pequenos bicos colocados estrategicamente no escoamento nos pontos a partir de onde se deseja ver as linhas de corrente. Isto pode perturbar de forma considerável o escoamento, o que deve ser levado em conta.

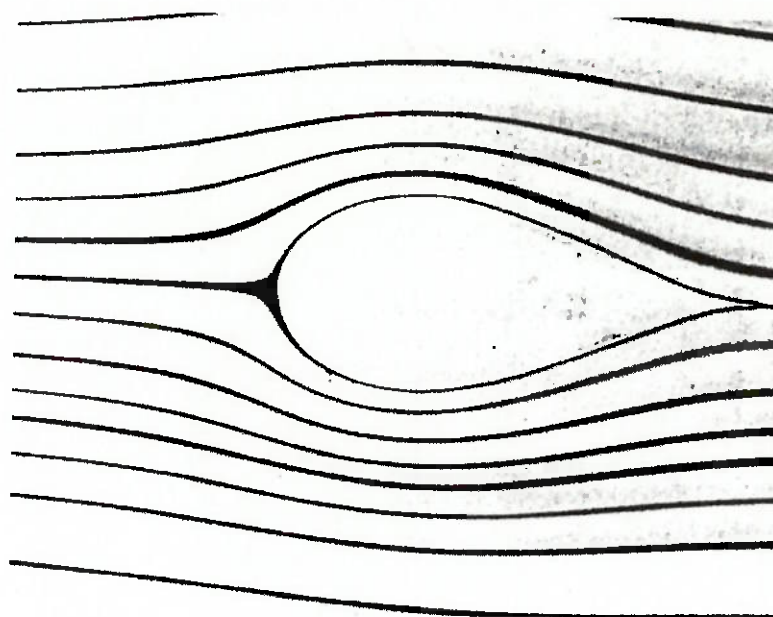


Figura 2.2 - Visualização do escoamento em torno de um aerofólio usando o método de linhas de corrente

Tabela 3 - Notas Atribuídas ao Método de Injeção de Linhas de Corrente

Característica	Nota
Efeito Visual	9
Custo	8
Facilidade de Reprodução	7
Facilidade de Execução	6
Pequenas Dimensões	9
Não Perturbação do Escoamento	6
Adaptabilidade	9
Vida Útil	8
Manutenção	8
Segurança	10

2.2.3 Método de Suspensão de Partículas

Partículas de um sólido ou fluido visível em contraste com o fluido em estudo são espalhadas no fluido, normalmente antes de se iniciar o escoamento. O estado do escoamento é revelado pelo movimento das partículas. Produz bons efeitos em alguns casos, como por exemplo no estudo do escoamento num tanque ou escoamento bastante lento em torno de um corpo imerso (Fig. 2.3), mas não seria um bom método no caso em estudo. Oferece dificuldades em reproduzir os resultados, por ser difícil obter uma distribuição uniforme das partículas, e contamina o fluido em estudo, inutilizando-o para outros fins ou ensaios.

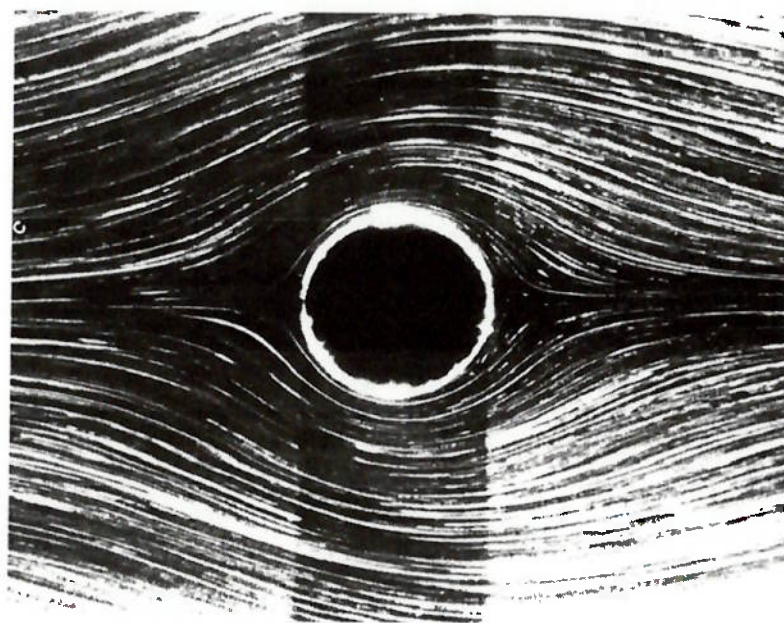


Figura 2.3 - Visualização do escoamento em torno de um cilindro pelo método de suspensão de partículas de alumínio

Tabela 4 - Notas Atribuídas ao Método da Suspensão de Partículas

Característica	Nota
Efeito Visual	8
Custo	7
Facilidade de Reprodução	6
Facilidade de Execução	8
Pequenas Dimensões	10
Não Perturbação do Escoamento	7
Adaptabilidade	9
Vida Útil	7
Manutenção	7
Segurança	10

2.2.4 Método de Injeção de "Time Line" (Linha de Tempo)

Bastante semelhante ao método de injeção de linhas de corrente, só que neste caso injetam-se linhas de tempo de corante, ou seja, o corante é injetado transversalmente ao escoamento. Fornece resultados bastante semelhantes ao método das linhas de corrente, exceto que agora visualizam-se as posições de partículas que se encontravam numa mesma distância ao longo de x no instante 0, enquanto no outro método visualizavam-se os caminhos seguidos por partículas naquelas condições. Os métodos podem ser combinados para gerar uma grade que facilita a compreensão do percurso das partículas em função do tempo. A combinação, entretanto, dificulta ainda mais a execução.

Tabela 5 - Notas Atribuídas ao Método de Injeção de Linhas de Tempo

Característica	Nota
Efeito Visual	9
Custo	8
Facilidade de Reprodução	7
Facilidade de Execução	6
Pequenas Dimensões	9
Não Perturbação do Escoamento	6
Adaptabilidade	9
Vida Útil	8
Manutenção	8
Segurança	10

2.2.5 Método das Bolhas de Hidrogênio

Em escoamentos de água como no caso em estudo pequenas bolhas de hidrogênio são geradas por eletrólise num fio delgado usado como cátodo (Fig. 2.4). Estas bolhas atuam como o corante nos casos de injeção 2.2.2 e 2.2.4 acima, bastando que se muda a configuração dos fios. Para linhas de corrente, usam-se fios em zigue-zague ou isolados em pontos alternados ao longo do fio, e uma tensão constante. Para obterem-se as linhas de tempo, usam-se fios retos e



Figura 2.4 - Linhas de corrente e linhas de tempo feitas com bolhas de hidrogênio

pulsos de voltagem.

Este método alia facilidade de reprodução e baixo custo a pouca perturbação do escoamento e excelente efeito visual. Tem como desvantagens o fato de as bolhas de hidrogênio tenderem a subir, os riscos de um eventual acúmulo de hidrogênio em algum ponto da aparelhagem, e também a baixa durabilidade, já que os eletrodos também são consumidos na eletrólise. Também é de difícil execução.

Tabela 6 - Notas Atribuídas ao Método das Bolhas de Hidrogênio

Característica	Nota
Efeito Visual	10
Custo	9
Facilidade de Reprodução	9
Facilidade de Execução	6
Pequenas Dimensões	9
Não Perturbação do Escoamento	9
Adaptabilidade	9
Vida Útil	6
Manutenção	7
Segurança	7

2.2.6 Método “Shadowgraph”

A luz de uma fonte pontual ou um feixe paralelo de luz atravessa o escoamento e é projetada em uma tela ou filme fotográfico (Fig. 2.5). O estado do escoamento é indicado pelo padrão de luz. Este método é sensível à segunda derivada espacial da massa específica do fluido. Este método produz resultados interessantes, mas envolve um maior cuidado na montagem e uma maior complexidade na execução e na compreensão dos resultados.

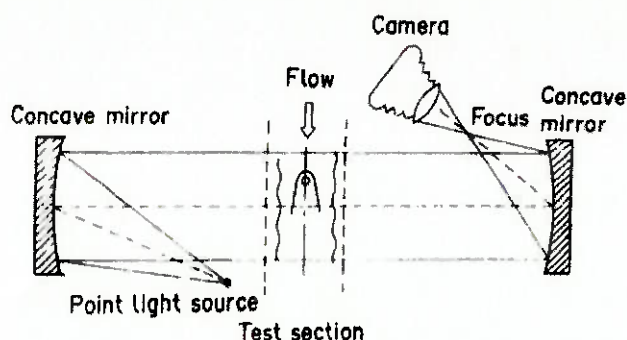


Figura 2.5 - Visualização "Shadowgraph" com Fonte de Luz Pontual

É um ótimo método para visualização de fenômenos em que o fluido é considerado compressível (Fig. 2.6). Considerando que já se tenha uma câmera ou tela em mãos, é um método de baixíssimo custo. É de fácil reprodução, embora possam haver dificuldades na obtenção de uma boa imagem. Tem manutenção quase nula, é muito seguro e não perturba o escoamento, além de poder ser adaptado a qualquer outro fluido que seja transparente à luz.

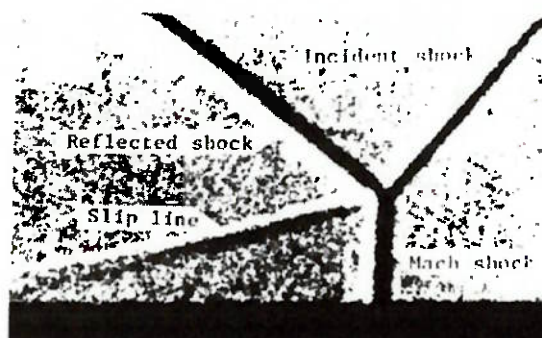


Figura 2.6 - Visualização da reflexão de uma onda de choque oblíqua através do método "Shadowgraph"

Tabela 7 - Notas Atribuídas ao Método Shadowgraph

Característica	Nota
Efeito Visual	9
Custo	9
Facilidade de Reprodução	8
Facilidade de Execução	6
Pequenas Dimensões	8
Não Perturbação do Escoamento	10
Adaptabilidade	8
Vida Útil	9
Manutenção	9
Segurança	10

2.2.7 Método Schlieren

Um feixe paralelo de luz é refratado através do fluido, focalizado sobre o gume de uma faca, e então usado para formar uma imagem em uma tela ou em um filme fotográfico atrás da faca (Fig. 2.7).

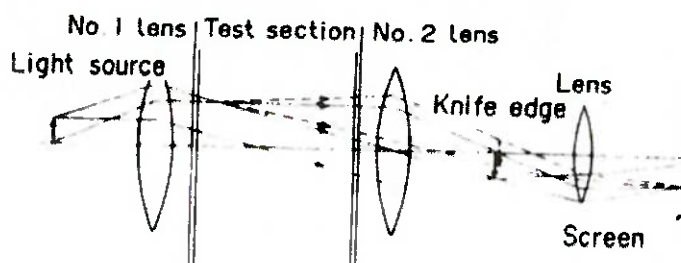


Figura 2.7 - Método Schlieren de Visualização

O estado do escoamento é visualizado através de uma imagem clara e escura na tela ou no filme. Este método é sensível à segunda derivada espacial da massa específica. Tem

características muito semelhantes ao “Shadowgraph”, e pode ser usado nas mesmas situações, ou em situações em que seja mais interessante estudar como varia a segunda derivada da massa específica com o espaço (Fig. 2.8).

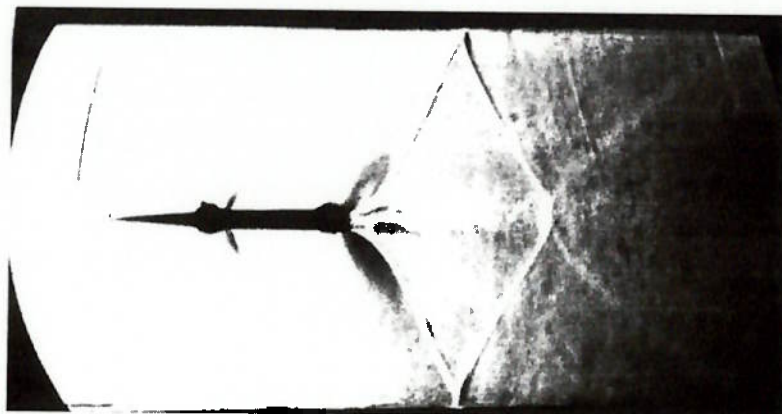


Figura 2.8 - Visualização através do método Schlieren de escoamento transônico sobre uma placa plana delgada e perfilada

Tabela 8 - Notas Atribuídas ao Método Schlieren

Característica	Nota
Efeito Visual	9
Custo	8
Facilidade de Reprodução	7
Facilidade de Execução	6
Pequenas Dimensões	9
Não Perturbação do Escoamento	10
Adaptabilidade	9
Vida Útil	8
Manutenção	8
Segurança	10

2.2.8 Visualização por “Laser/Light Sheet” (Lençol de Laser/Luz)

Uma técnica razoavelmente recente, a visualização “laser/light sheet” (também chamada de PIV - Particle Imaging Velocimetry - Velocimetria por Imagens de Partículas) consiste de abrir um feixe de laser ou de luz concentrada com o auxílio de uma lente cilíndrica em um leque ou lençol e usar este lençol para iluminar um plano do escoamento (fig. 2.9). As impurezas presentes no escoamento refletem e refratam então esta luz de maneira que se consegue visualizar o escoamento como uma “mancha” em movimento no plano iluminado. Pode haver a necessidade de contaminar o fluido com algum tipo de partícula de flutuação nula em suspensão, caso se esteja estudando um fluido muito puro. Um bom exemplo deste tipo de visualização é a iluminação de anéis de fumaça emitidos por fumantes por feixes de luz solar refratados por janelas, onde pode-se ver claramente a evolução do escoamento da fumaça na seção iluminada.

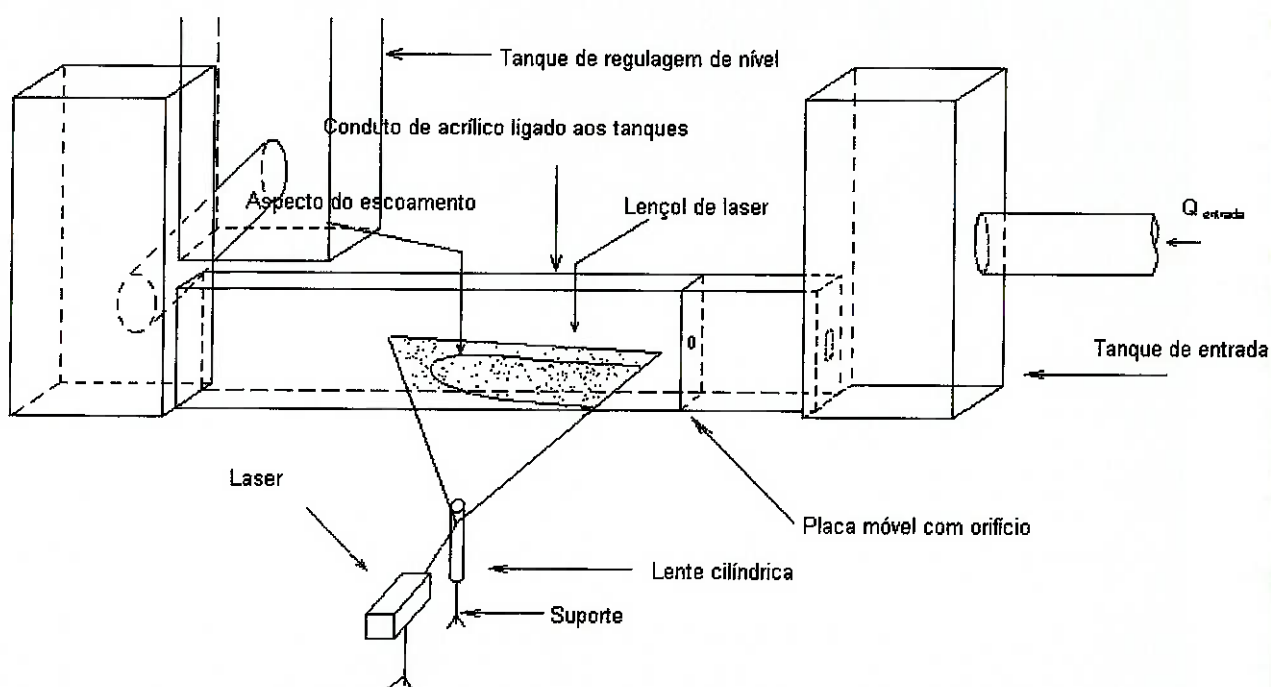


Figura 2.9 - Esquema do aparato para visualização do tipo PIV - Laser Sheet

No caso de água, os efeitos são semelhantes, e mais visíveis quanto mais contaminada a água. Este método tem muitas vantagens, considerando que o anemômetro laser disponível no laboratório de Mecânica dos Fluidos é perfeitamente utilizável para estes fins. O efeito visual é ótimo, embora limitado a uma seção do escoamento por vez. Ele é facilmente transportável e adaptável para outras seções do escoamento para que estas possam ser também visualizadas. Pode ser usado para outros fluidos, inclusive gases, e o equipamento pode ser usado para outros fins, como o levantamento de perfis de velocidade através da filmagem e processamento das imagens obtidas, de onde se obtém o caminho percorrido por uma partícula e de onde pode-se obter sua velocidade instantânea a instantânea. O custo, considerando que o laser já se encontra disponível, é praticamente nulo, bastando providenciar uma lente cilíndrica, que pode ser inclusive um bastão de agitação de soluções químicas, prontamente disponível e de baixíssimo custo. É de fácil reprodução, com o equipamento necessário, e de fácil execução, tanto a montagem quanto a visualização propriamente dita. Ocupa pouco espaço e não perturba de forma alguma o escoamento. Em termos de segurança quase não oferece riscos, pois o laser usado é de baixíssima potência. As possíveis desvantagens estão na durabilidade e na manutenção, pois no caso de quebra acidental do laser podem se tornar um grande inconveniente, tanto em termos de custo quanto em termos de tempo para manutenção.

Tabela 9 - Notas Atribuídas ao Método "Laser Sheet"

Característica	Nota
Efeito Visual	10
Custo	9
Facilidade de Reprodução	9
Facilidade de Execução	9
Pequenas Dimensões	9
Não Perturbação do Escoamento	10
Adaptabilidade	9
Vida Útil	7
Manutenção	7
Segurança	9

2.3 Escolha das Melhores Alternativas

Tabela 10 - Resumo das notas atribuídas a cada método

Características \ Soluções	Nota na Característica x Peso da Característica							
	Grade com Fitas	Injeção de Streak Line	Suspensão de Partículas	Injeção de Time Line	Bolhas de Hidrogênio	Shadowgraph	Schlieren	PIV (Laser Sheet)
Efeito Visual	70	90	80	90	100	90	90	100
Custo	100	80	70	80	90	90	80	90
Facilidade de Reprodução	90	63	54	63	81	72	63	81
Facilidade de Execução	80	60	80	60	60	60	60	90
Pequenas Dimensões	56	72	80	72	72	64	72	72
Não Perturbação do Escoamento	50	60	70	60	90	100	100	100
Adaptabilidade	35	63	63	63	63	56	63	63
Vida Útil	72	64	56	64	48	72	64	56
Manutenção	72	64	56	64	56	72	64	56
Segurança	90	90	90	90	63	90	90	81
TOTAL	715	706	699	706	723	766	746	789

Da tabela 10 podem-se tirar algumas conclusões a respeito dos métodos de visualização propostos. Percebe-se claramente que no caso do Laboratório de Mecânica dos Fluidos VI, para o qual foi proposta a pesquisa de um método de visualização de

escoamento, o método PIV ou “Laser Sheet” é o mais apropriado, levando em conta o equipamento disponível e as finalidades do experimento. Com os pesos estipulados por característica atribuídos às notas recebidas por esta solução, ela é isoladamente a de melhor desempenho.

Portanto selecionou-se o método “Laser Sheet” como o mais apropriado para visualizar o escoamento em questão, e será desenvolvida então uma bancada de visualização baseada neste método na segunda parte deste trabalho.

3 IMPLEMENTAÇÃO

3.1 Considerações Preliminares

Para a segunda parte deste trabalho consultaram-se trabalhos versando sobre a utilização da técnica PIV para se obterem idéias para a implementação no caso particular do laboratório de Mecânica dos Fluidos da Escola Politécnica. Decidiu-se utilizar uma montagem semelhante à de Brücker¹¹. Em seu trabalho ele demonstra como obter as velocidades de partículas de um fluido em torno de um corpo rombudo imerso através da variação da profundidade de uma superfície de laser. Para tanto, ele utiliza a disposição de

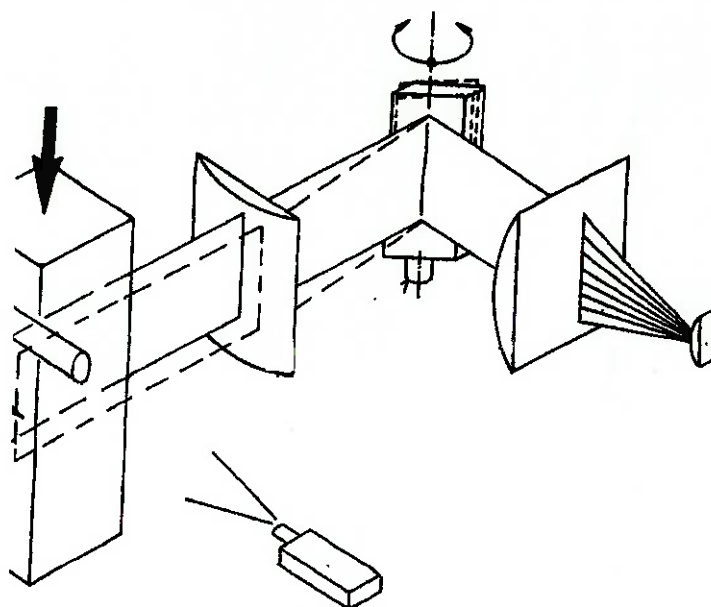


Figura 3.1 - Esquema da instalação utilizada por Brücker
equipamento da Fig. 3.1.

Nesta instalação utiliza-se um laser de 2 Watts, cujo feixe é transformado em um leque através da primeira lente cilíndrica, à direita na Fig. 3.1. Em seguida, este leque é transformado em um “lençol” de feixes paralelos através da utilização de outra lente cilíndrica, de diâmetro maior. Como o autor desejava uma visualização e medição de velocidades tridimensional, a profundidade é dada através da reflexão deste lençol por um espelho acoplado a um motor de passo, com variação de 500 posições por segundo. Como haveria perda de exatidão dos resultados caso o laser atravessasse a seção de medição de uma forma não perpendicular, como ele faria caso fosse projetado diretamente do espelho na seção, coloca-se mais uma lente cilíndrica, esta com seu eixo na vertical, em frente à seção de medição, de modo que todos os leques a atravessem de modo satisfatório. A partir desta idéia, que também está presente nos trabalhos de RASHIDI¹² e HAMADY¹³, decidiu-se construir uma aparelhagem para a bancada que reproduzisse parte deste trabalho.

Como o objetivo deste trabalho é apenas o de fornecer uma visualização qualitativa para o laboratório didático e também pelo fato de o laser disponível ser de baixa potência limitou-se o conjunto ótico de formação da superfície laser a uma lente, formando assim um leque de laser. Para fins de observação visual, ou mesmo para filmagens em equipamentos convencionais, isto é mais que suficiente, já que a diferença de tempos de percurso para os feixes será desprezível. Isto será abordado em detalhes na parte 3.2, a seguir, que trata da confecção da lente do aparelho de visualização. Outra consideração importante é o fato de que a experiência-alvo para este equipamento seria a de observação da descarga de um jato em um conduto. Por isto a aparelhagem foi projetada tendo em mente que pode-se querer observar o escoamento em qualquer um dos planos formados pela direção do

escoamento e as direções horizontal e vertical, perpendiculares a esta. Em função disto, o equipamento foi feito de maneira que, colocando-se o laser na posição adequada, ele pode ser utilizado para criar-se um leque de laser em uma de duas orientações, perpendiculares entre si, incidindo em qualquer uma das faces do conduto em estudo.

3.2 Equipamento para a Visualização

Como já se encontravam no laboratório os equipamentos mostrados na Fig. 1.1 e mais um anemômetro laser, conforme descrito anteriormente, precisava-se apenas construir um equipamento para segurar as lentes que formariam o leque de laser, levando em consideração os fatos colocados na introdução acima, além da confecção das próprias lentes. Conforme já mencionado, se projetar-se um leque de laser em uma seção retangular do conduto como se pretende, haverá uma diferença de tempo de percurso para um feixe que parte do eixo da lente e atinge uma partícula na direção deste eixo em relação a um feixe que parte do eixo da lente e atinge uma partícula em um dos extremos do conduto. Este fato fica evidente pela figura 3.2.

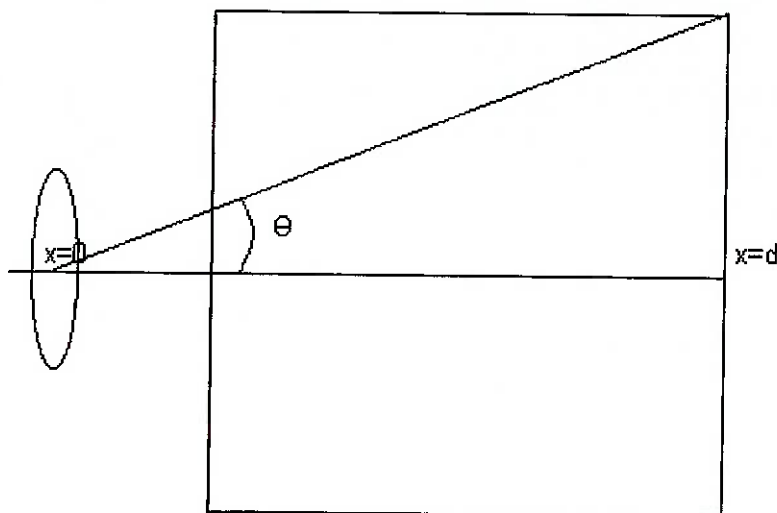


Figura 3.2 - Diferença de percurso dos feixes de laser de um leque em um conduto retangular

É fácil de perceber que, se o feixe na direção do eixo percorreu d , o feixe diagonal percorreu $(d/\cos(\theta))$, e tendo velocidades iguais, eles chegam em tempos diferentes aos respectivos destinos. Isto, juntamente com o fato de o feixe inclinado atravessar a parede do conduto de forma semelhante, poderia acarretar em algum erro nos cálculos de velocidades das partículas, caso isto fosse utilizado como um verdadeiro PIV. Como o intuito aqui é de apenas visualizar o escoamento, e estas diferenças são pequenas, desprezou-se este fenômeno na elaboração do equipamento.

O primeiro passo da construção foi a confecção das lentes. Não foram efetuados cálculos neste sentido, visto que a especificação de uma lente com parâmetros rigidamente definidos implicaria em um custo, de acordo com as dimensões e tolerâncias, de mais de US\$ 100,00 por peça, de acordo com orçamentos obtidos para dimensões estimadas. Assim, decidiu-se partir do princípio que o acrílico seria o material indicado para as lentes, por ter boas características óticas e ser bastante resistente em comparação ao vidro (já que o material será operado preferencialmente por alunos). A partir de uma matriz de acrílico de dimensões 50x50x20mm obtiveram-se, por usinagem e posterior polimento, duas lentes cilíndricas, de diâmetro 49mm e 14mm de largura, para uma primeira tentativa de obter o efeito desejado de visualização.

Procedeu-se então à idealização e construção de um suporte para duas lentes, uma na horizontal e uma na vertical, com ajuste para altura, de modo que se possa medir qualquer seção do escoamento. Optou-se por madeira como principal material para sua construção por causa do baixo custo e da leveza que ela confere ao equipamento. Ele foi idealizado para que se ajuste a altura através do ajuste da posição do braço intermediário, conforme se vê abaixo, na Fig. 3.3.

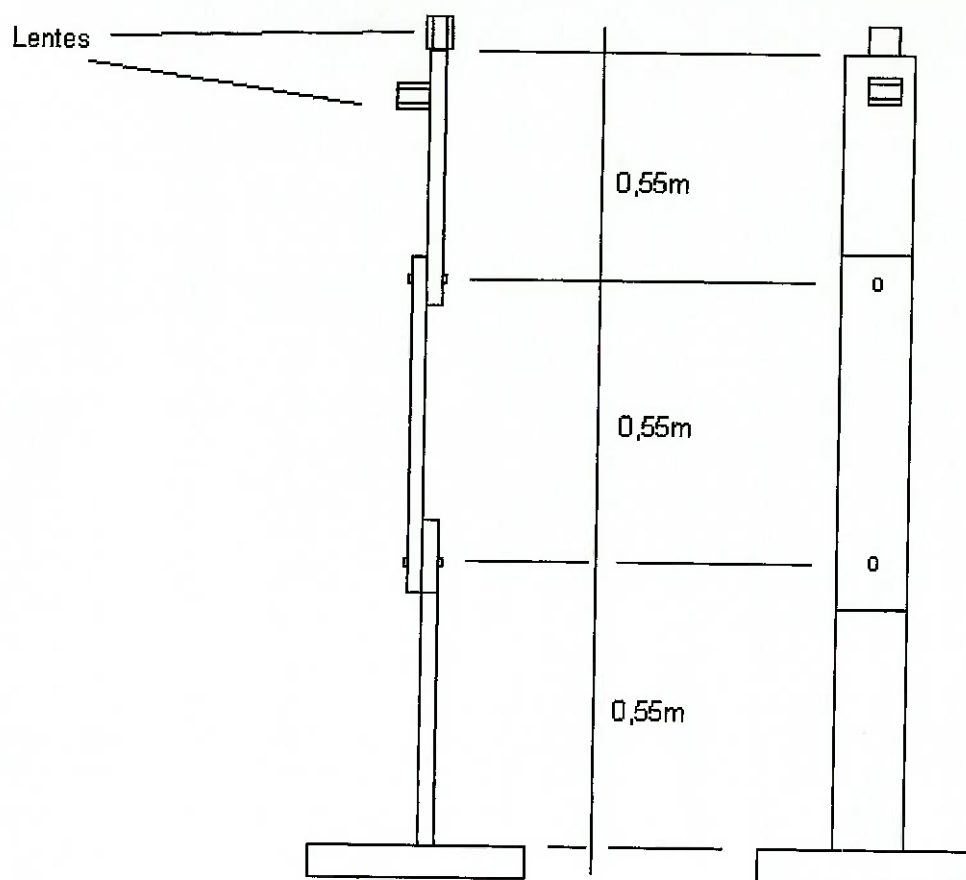


Figura 3.3 - Aspecto dos suportes para as lentes (vistas frontal e lateral).

Pode-se notar também que este suporte pode ser ajustado para que o braço superior fique na horizontal, de modo que se possa projetar o leque de laser em uma seção com o laser apontado para baixo, por exemplo, para observar um corte longitudinal do jato em estudo.

3.3 Observações Experimentais

Após as primeiras experiências realizadas com o equipamento descrito acima, notaram-se algumas falhas no projeto original. Obteve-se uma visualização da descarga do jato no conduto, onde pode-se perceber uma zona central onde há partículas se locomovendo em alta velocidade (o jato propriamente dito) e mal se vêem as partículas refletindo o feixe de laser. Percebe-se também uma zona em torno desta zona central, que é o fluido arrastado pelo jato, onde há uma reflexão do laser em maior intensidade, por causa do grande número de partículas que se deslocam em diversas direções com velocidades baixas nesta região. Surgiram, entretanto, alguns problemas. O laser disponível é de baixa potência (20mW, aproximadamente) e por isto o leque de laser formado pelas lentes fica demasiadamente fraco para proporcionar uma boa visão do que ocorre. A estante originalmente projetada para portar as lentes, descrita acima, teve de ser abandonada pois oscilava demasiadamente por causa da flexibilidade da madeira no comprimento utilizado. Ao invés da estante original, construiu-se uma bastante diminuta, para se encaixar na estrutura metálica que suporta os condutos de acrílico do laboratório através de presilhas metálicas.

Uma observação surpreendente, e cuja causa não foi determinada, é que os leques de laser formados pelas lentes têm uma orientação perpendicular àqueles que se esperava baseado na literatura. Com a lente na horizontal, por exemplo, forma-se um leque vertical de laser. Isto não proporcionou maiores problemas, visto que basta utilizar as lentes na orientação inversa àquela planejada, mas é um fato cuja explicação não foi encontrada e cuja pesquisa foge ao escopo deste trabalho.

4 Conclusões

Ao final da primeira etapa de experimentação com o equipamento, foi possível perceber uma série de fatos que poderiam orientar uma eventual melhoria do sistema de visualização no futuro. Primeiramente, o laser disponível claramente não é o ideal para este trabalho. Idealmente, seria necessário um laser de um só feixe (o do laboratório produz dois, que são cruzados para efetuar a medição de velocidade) e de maior potência, para produzir um leque mais intenso e de mais fácil visualização, e também possibilitar a utilização de lentes maiores. Com as lentes utilizadas já se tem perda suficientemente grande de intensidade para tornar a visualização difícil. Também seria interessante estudar a elaboração de uma fixação permanentemente acoplada à bancada do laboratório, com ajustes mais precisos de posição e orientação da lente, para evitar oscilações e garantir o posicionamento do leque na seção que se deseja estudar. Outro aspecto interessante de se melhorar é a construção das lentes. As lentes para este primeiro estudo foram confeccionadas de material apropriado, mas foram polidas à mão, por causa da indisponibilidade de uma politriz na oficina da Escola Politécnica. Por este motivo o acabamento ficou aquém do ideal, e interfere em maior ou menor grau na operação do sistema de visualização conforme a posição da lente e a incidência dos feixes do laser.

O efeito visual obtido foi razoável, mas é necessário que se saiba exatamente o que procurar para poder interpretar o resultado. No caso da descarga do jato, conforme anteriormente descrito, basta procurar pela região central do jato rodeada pelo fluido em baixas velocidades. Para a utilização no laboratório didático, seria interessante que fosse pedido aos alunos, antes de realizarem a experiência, que estudassem o

comportamento do jato e desenhassem aquilo que imaginassem que veriam na experiência.

Desta maneira os alunos estariam preparados para procurar o formato do jato no leque de laser.

De forma geral, pode-se dizer que os resultados da experiência foram satisfatórios, mas conforme já mencionado houve problemas com o sistema de visualização. Seria interessante que este trabalho continuasse em anos posteriores para a melhoria do sistema e se possível a correção de todos os problemas que foram detectados até aqui.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PAI, SHIH-I. - **Fluid Dynamics of Jets**. - 1ª ed., New York, D. Van Nostrand Company, Inc., 1954.
- [2] IKEDA, S., - **Apostilas de Mecânica dos Fluidos VI**. - s.n.t.
- [3] ÁSSY, T.M. - **Mecânica dos Fluidos**. - São Paulo, Plêiade, 1996.
- [4] RUSSELL, J.B. - **Química Geral**. - São Paulo, Editora McGraw-Hill do Brasil, 1981.
- [5] INCROPERA, F.P.; DE WITT, D.P. - **Fundamentos da Transferência de Calor e Massa**. - 3ª ed., Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos S.A , 1992.
- [6] PIMENTA, M. - **Apostila de Transferência de Massa**. - s.n.t.
Introdução à Dinâmica dos Gases. s.n.t.
- [7] KUAE, L.K.N. et al. - **Diretrizes para apresentação de dissertações e teses**. - s. ed., São Paulo, 1991.
- [8] MADUREIRA, O.M. - **Apostila de Metodologia do Projeto**. - s.ed., São Paulo, 1989.
- [9] THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. - **Visualized Flow**. - 1ª ed., Aylesbury, Pergamon Press, 1988.
- [10] SANCHEZ, M.G. - **Coletânea de Exercícios de Mecânica dos Fluidos**. - s. ed., São Paulo, 1981.
- [11] BRÜCKER, C. - **Whole Volume PIV by the Concept of a Scanning Light Sheet: Technique and Application to 3D Unsteady Bluff Body Wakes** - FED-Vol.229, ASME 1995

- [12] RASHIDI, M. ; DICKENSON, E. - **Experimental Investigation of Pore-Scale Transport in Aqueous Heterogenous Porous Media** - FEDSM97-3091, ASME, 1997
- [13] HAMADY, F. et.al. - **Experimental Analysis of Blowby and Flow Field Interaction in a Motores Rotary Engine** - s.n.t.
- [14] CHAN, S. et.al. - **Investigation of Swirl on Mixing Within a Kraft Recovery Boiler** - FEDSM97-3059, ASME, 1997
- [15] COGHE, A. et. al. - **Test Bench for Industrial Burners: a Diagnostic Study for Combustion Control and Process Regulation** - s.n.t.
- [16] RASHIDI, M. ; DICKENSON, E. - **Small Scale Flow Processes in Aqueous Heterogenous Porous Media** - FED-Vol.239, ASME, 1996
- [17] BERNARD, A. et.al. - **Study of Several Jets Impinging on a Plane Wall: Visualizations and Laser Velocimetry Investigations** - FEDSM97-3085, ASME, 1997
- [18] INADA, S. et.al. - **Visualization of Fin Effects on Rayleigh-Bernard Convection Inside a Horizontal Fluid Enclosure** - FEDSM97-3075, ASME, 1997
- [19] KU-HO, S. ; YANG, W. - **Three-Phase Flow in Mixing Inside a Ladle with Thoroughflow** - FEDSM97-3055, ASME, 1997
- [20] SCHIPPERIJN, F.W. ; SAWYER, R. F. - **Particle Image Velocimetry Measurements of Internal Combustion Engine Flows** - s.n.t.

- [21] BRAUN, M.J. et.al. - **Temperature Distribution and Flow Characteristics of a Concentric Horizontal Cylinder Configuration** - FEDSM97-3088, ASME, 1997
- [22] Thorpe, S. J. et. al. - **Time-Averaged Free-Jet Measurements Using Doppler Global Velocimetry** - FED-Vol. 239, ASME, 1996