

MEDIDAS DE VELOCIDADE DE UM GAS EM ESCOAMENTO  
SUPERSÔNICO UTILIZANDO UM FEIXE LASER

Vladimir J.T. Airoidi e Reginaldo dos Santos  
Instituto de Estudos Avançados (IEA-CTA)  
Rod. dos Tambois, Km 5,5 - S.J. dos Campos - SP.

Realizou-se estudo sobre medidas de velocidades supersônicas em um túnel de vento pulsado, utilizando uma técnica de velocimetria por laser. As técnicas de velocimetria por laser são as mais adequadas por não causarem perturbações no escoamento. Suas possibilidades de utilização são mais amplas que as técnicas de velocimetria convencionais.

Neste trabalho, a técnica utilizada chama-se "Técnica de Franjas". Tem como princípio a formação de um padrão de interferência devido ao cruzamento de dois feixes lasers no volume de prova. Os resultados experimentais são comparados com medidas simultâneas utilizando a técnica convencional de velocimetria a fio quente.

Laser, Vácuo, Molecular

## 1. INTRODUÇÃO

A técnica de medir velocidade utilizando feixe laser surgiu em 1964. A partir desta data o interesse por esta técnica cresceu nas áreas de pesquisas em combustão, escoamento supersônico, turbulência, laser de gás-dinâmica, etc. As vantagens principais da técnica de velocimetria por laser sobre as técnicas convencionais são a inexistência de pontas de provas físicas no escoamento, a precisão de medida, a não necessidade de calibração prévia e a possibilidade de avaliar o grau de turbulência com menor erro.

Existem 4 técnicas principais de medir velocidade com laser a saber: Feixe de Referência, Franjas, Efeito Doppler por Ressonância e Duplo Foco. Todas usam dois feixes Laser, um sistema óptico, um sistema eletrônico de detecção e um sistema de aquisição de dados. A principal diferença entre elas é a maneira pela qual são usados os dois feixes lasers.

A medida da velocidade no escoamento é feita pela detecção da luz espalhada na região onde se deseja estudar. A luz espalhada é proveniente de pequenas partículas que acompanham o escoamento.

As principais limitações da técnica de velocimetria por laser são a eletrônica de detecção e o sistema óptico. O primeiro devido ao sinal ser muito rápido para velocidades altas e o segundo devido aos problemas inerentes ao alinhamento.

Neste trabalho a técnica utilizada é a Técnica das Franjas. Foi feito medidas para velocidades altas, até 408m/s, sendo que as medidas para velocidades até cerca de 200m/s são comparadas com as efetuadas utilizando a técnica do fio quente.

## 2. PRINCÍPIO E MONTAGEM

O princípio básico usado na Técnica das Franjas é a formação de um padrão de interferência com franjas planas e paralelas entre si, devido ao cruzamento de dois feixes de luz coerente. A frequência com que uma partícula espalha luz ao passar por um sistema de franjas é dado por <sup>(1)</sup>:

$$\Delta v_D = v' - v_0 = \frac{v_0}{C} \left| \vec{k}_2 \cdot \vec{v} - \vec{k}_1 \cdot \vec{v} \right| \quad (1)$$

onde:

$v_0$  é a frequência da luz incidente.

$v'$  é a frequência da luz espalhada

$\vec{k}_1$  e  $\vec{k}_2$  são os vetores de onda dos dois feixes de luz incidentes

$C$  é a velocidade da luz

$\vec{v}$  é o vetor velocidade da partícula.

A partir da equação (1), observa-se que medindo a frequência  $\Delta v_D$  e conhecendo a direção de  $\vec{v}$  com respeito a  $\vec{k}_1$  e  $\vec{k}_2$ , a velocidade do escoamento ficam determinados.

A frequência  $\Delta v_D$  independe da direção da luz espalhada, enquanto que a intensidade depende. A teoria de espalhamento de Mie fornece a dependência da intensidade da luz espalhada com o ângulo de espalhamento <sup>(2)</sup>. Para partículas esféricas com dimensões sub-micrométricas, o ângulo de 180° formado entre a bissetriz dos dois feixes lasers incidentes e a direção de observação da luz espalhada foi convenientemente escolhido.

As dimensões das partículas são também convenientemente escolhidas para garantir que estas acompanhem o escoamento <sup>(3)</sup>. Em geral partículas em suspensão no próprio ar podem ser usadas <sup>(3)</sup>, ou fumaça de cigarro <sup>(4)</sup>, ou ainda partículas confeccionadas artificialmente <sup>(5)</sup>.

A região onde se formam as franjas dá-se o nome de volume de

prova por ser o local de diagnóstico de velocidades. Seu contorno é limitado quando a intensidade máxima vai de um fator de  $1/e^2$  formando um elipseóide, ver figura 1.

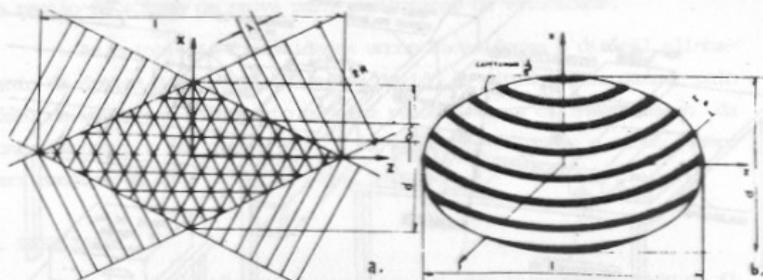


Figura 1: Superposição de duas ondas planas, a) vista em plano sem considerar o contorno, b) vista espacial considerando o contorno  $1/e^2$ .

As dimensões do volume de prova podem ser obtidas conhecendo o raio da seção reta dos feixes lasers e o ângulo de incidência entre eles, ver figura 1, onde  $d$  é a largura,  $\ell$  o comprimento,  $\delta$  a distância entre as franjas e  $N$  é o número de franjas que são dados por:

$$d = \frac{2R}{\cos \alpha} \quad (2)$$

$$\ell = \frac{2R}{\sin \alpha} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{\lambda_0}{2 \sin \alpha} \quad (4)$$

$$N = \frac{d}{\delta} \quad (5)$$

Desde que o vetor velocidade é perpendicular às franjas planas, a velocidade da partícula é dada por:

$$v = \delta \Delta v_D \quad (6)$$

Para usar a técnica das franjas, tornou-se os devidos cuidados com respeito ao gradiente das franjas<sup>(6)</sup>, alargamento das franjas<sup>(7)</sup>, visibilidade das franjas e do sinal de luz espalhada pela partícula<sup>(8,9)</sup>. Para isso, foi feito uma investigação do volume de prova por meio de um microscópio certificando-se do paralelismo e nitidez das franjas.

## 3. EXPERIMENTO

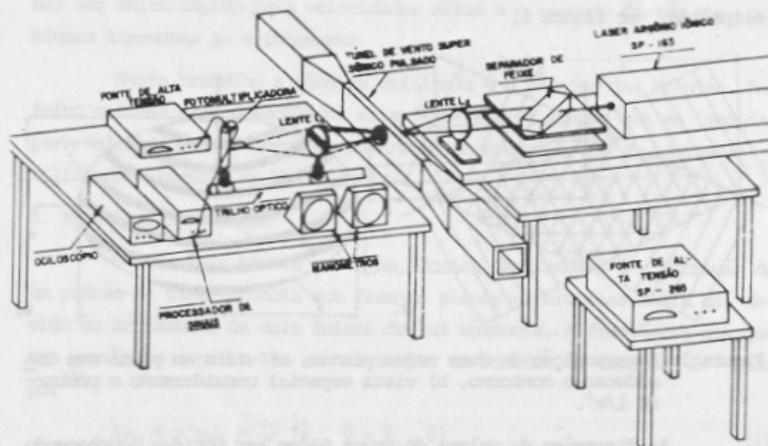


Figura 2 - Arranjo experimental do sistema de medidas.

A montagem experimental conforme mostrado na figura 2 consiste de: um laser de argônio-iônico SP-165, com potência máxima de 0,8 watts na linha  $\lambda = 514,5\text{nm}$ , um túnel de vento supersônico pulsado TE65, com tempo de duração do pulso de aproximadamente 30 segundos, um compressor Ingersol Rang W7PKN24-N-2, um separador de feixe laser, uma fotomultiplicadora Hamamatsu R-777 para detecção da luz espalhada, uma fonte de tensão Pacific Instruments modelo 204 para polarização da fotomultiplicadora, duas lentes com distância focal de 203mm (uma para convergir os dois feixes lasers e outra para receber a luz espalhada), um osciloscópio Tektronik modelo 7834, dois manômetros Wallace para monitorar a pressão no exponsor do túnel de vento, um manômetro de precisão tipo Betz (0-800mm H<sub>2</sub>O) para monitorar a pressão na câmara de estagnação do túnel de vácuo, um filtro passa faixa (1KH<sub>2</sub>-200MHz) acoplado a um processador de sinal TSI 1990A, este usado para filtrar e limitar a amplitude do sinal proveniente da fotomultiplicadora, um sistema de velocimetria a fio quente DISA 55N usado para medir velocidade e posterior comparação com as obtidas pela técnica de velocimetria por laser e uma câmara fotográfica polaroid C50/C70 para registro dos sinais de velocimetria por laser.

A experiência foi efetuada utilizando partículas do orórioar.

Próximo ao volume de prova foi colocado uma ponta de prova

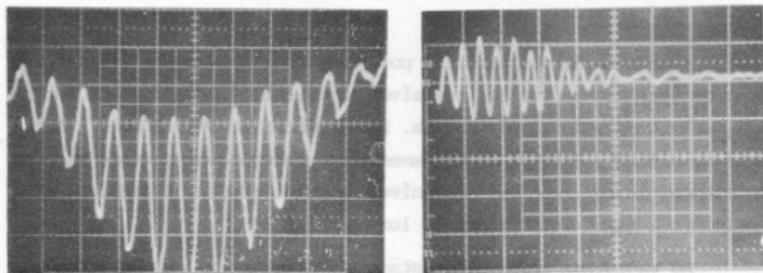
(fio quente) para fazer medidas comparativas com as obtidas através da técnica das franjas.

Foi feito ainda tomadas de pressão na câmara de estagnação e na região do volume de prova para monitoração da velocidade.

As principais dificuldades encontradas foram o difícil alinhamento da óptica à fotomultiplicadora devido às vibrações causadas pelo túnel de vento com escoamento em alta velocidade, a difícil fixação da ponta de prova a fio quente devido às vibrações e também o curto tempo para medidas em cada pulso do túnel de vento.

#### 4. RESULTADOS

Dois sinais típicos de velocimetria por laser é mostrado na figura 3. A velocidade é obtida medindo-se a frequência dos picos em cada pulso, uma vez conhecida a distância entre as franjas.



a)

b)

Figura 3 - Sinais de velocimetria por laser, a) sem filtro pas sa faixa após a fotomultiplicadora b) com filtro

As medidas estão agrupadas na tabela I.

Os erros atribuídos às medidas de velocimetria a fio quente são devido aos erros sistemáticos de calibração e de leitura e os erros atribuídos às medidas de velocimetria por laser são devido à leitura no papel fotográfico.

TABELA I: Resultados obtidos com as técnicas de Velocimetria por Laser e a fio quente.

ORDEM	Velocidade a fio quente (m/s)	Velocidade por laser (m/s)	Desvio Relativo
1	10,8±0,4	11,7±0,1	8%
2	-	19,0±0,2	-
3	27,0±0,8	26,3±0,3	3%
4	34±1	33.3±0,4	3%
5	52±1	55,5±0,7	6%
6	81±3	85±1	5%
7	74±3	72±1	3%
8	111±4	111±2	0%
9	197±6	219±3	11%
10	-	278±3	-
11	-	408±4	-
12	-	350±4	-

## 5. CONCLUSÃO

A técnica de velocimetria por laser baseia-se em princípios básicos de óptica e mostra ser acessível a qualquer laboratório de óptica para medidas de velocidades baixas. Para medidas de velocidades altas torna-se bastante crítico o alinhamento do sistema óptico com o sistema de detecção da luz espalhada e o nível de ruído que surge devido, principalmente à baixa intensidade de luz espalhada.

As vantagens principais estão em não perturbar o escoamento com pontas de provas e medir velocidades mais altas (408m/s) que a técnica a fio quente e com erro de medida menor.

A técnica de velocimetria por laser permite ainda a utilização de um sistema de aquisição de dados através de um processador de sinal que poderá fornecer cerca  $10^6$  medidas por segundo, permitindo principalmente estudos adequados em escoamento turbulento.

## 6. REFERÊNCIAS

1. V.J.T. Airolidi, Velocimetria por Laser - Tese de Mestrado (IIT/1981).
2. M. Born e E. Wolf, Principles of Optics, 5ª edição Pergamon Press (1975).
3. H.J. Pfeifer, Journal of Physics E: Sc Instruments, 8 (1975) 245.
4. H.J. Pfeifer, H.D von Stein e B. Koch, Appl. Opts., 4 (1974) 367.
5. D.K. Kreid e D.S. Rowe, Appl. Opts., 15 (1976) 321
6. S. Hanson, J. Phys. D: Appl Phys, 6 (1974) 164.

7. R.J. Goldstein e D.K. Kreid, *J. Appl. Mech.*, 34 (1967) 813  
 8. D.B. Brayton, *Appl. Opts.*, 13 (1974) 2346  
 9. W.M. Farmer, *Appl. Opts.* 11 (1972) 2603

SOCIETY OF BRAZILIAN PHYSICISTS

AV. - CP 10025 - CUN 2224

Rio de Janeiro - RJ

CXC 18531975/0002-43

Directoria Executiva:

Presidente: Santiago XXI

Prof. Wilson Brand Rodrigues Av. de Assunção XXI

Departamento de Física - UNICAMP 49 UNICAMP, Campinas XXI

Vice-Presidente: Douglas Wilson XXI

Prof. Ross Alan Peoples Camp XXI

Instituto de Física - UNICAMP Campinas, 49 XXI

1º Secretário: CXC/SP

Prof. José Ribeiro C. Pinto Indústria S.A. XXI

Lab. Microeletrônica - USP São Carlos XXI

2º Secretário: Telônio, Jr. XXI

Geiz Carlos Barbosa Trabalho, Brasília XXI

Gepts de Eng. Mecânica - UNICAMP São Carlos XXI

Tesouraria: XXI

João Maria F. Nicolau XXI

CP 10025 XXI