

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA MASSA MOLECULAR NA CALIBRAÇÃO DINÂMICA DE TRANSDUTORES DE PRESSÃO EM UM TUBO DE CHOQUE

Alessandro Borges de Sousa Oliveira

Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior

João Nildo de Souza Vianna

Universidade de Brasília - UnB, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, 70910-900, Brasília, DF, Brasil. E-mail :borges@enm.unb.br

Resumo

Esse trabalho tem como objetivo apresentar um estudo experimental dos fenômenos físicos que ocorrem no tubo de choque na calibração dinâmica de sensores de pressão. A metodologia utilizada permite a verificação da influência da diferença de massa molecular dos gases utilizados sobre o sinal de pressão. Todo o estudo é realizado com base nas curvas de resposta em frequência de um sensor de pressão padrão com relação a um sensor de pressão de trabalho. A utilização de um gás com pequena massa molecular na câmara de alta pressão de um tubo de choque em conjunto com um gás de grande massa molecular na câmara de baixa pressão apresenta um excelente comportamento metrológico para calibração de sensores que operam em elevadas frequências.

Palavras-chave: Metrologia Dinâmica, Tubo de Choque, Calibração Dinâmica

1. INTRODUÇÃO

A evolução do conhecimento técnico-científico tem requerido métodos confiáveis de medição de pressão dinâmica em frequências de 0 a 10 MHz. O conhecimento amplo do comportamento dinâmico dos sensores de pressão é de grande importância. Entretanto a caracterização destes sensores é limitada pelos dispositivos de calibração dinâmica existentes.

A calibração dinâmica de um instrumento de medição visa a determinação de seu sinal de saída no tempo por meio de um sinal de entrada conhecido, de modo a se avaliar o seu tempo de resposta. O nível de confiabilidade da calibração depende do profundo conhecimento do sinal de referência e do conjunto de aparelhos utilizados na aquisição deste sinal.

Atualmente, dentro da bibliografia especializada (Carvalho, 1995; Damion, 1997; Damion, 1993), o tubo de choque é reconhecido como o instrumento mais indicado para a calibração dinâmica de sensores de pressão de alta frequência. Sua primeira utilização como dispositivo de calibração ocorreu em 1943, por G.T. Reynolds. Desde então o Tubo de Choque tem sido empregado como meio de calibração de instrumentos para estudos experimentais de fenômenos que variam rapidamente.

A qualidade metrológica do degrau de pressão gerado pelo tubo de choque depende do controle de diversas variáveis, tais como geometria e técnicas de construção do tubo, diferença de massa molecular dos gases utilizados e fatores que afastam os processos reais, que ocorrem no interior do tubo, dos ideais. Os eventos que ocorrem no interior de um tubo de choque são extremamente rápidos e de difícil medição.

O trabalho consiste da determinação de forma quantitativa de como as diferentes massas moleculares e propriedades dos gases influenciam na qualidade do degrau de pressão, no fundo de um tubo de choque. Esse estudo é desenvolvido em um tubo de choque metrológico (TCM) do Laboratório de Metrologia Dinâmica (LMD) da Universidade de Brasília. O tubo de choque metrológico é feito de aço, podendo suportar à pressão máxima de 20 bar. O tubo de choque é instrumentado com sensores de pressão piezelétricos, onde são utilizados com diferentes gases.

2. METODOLOGIA E APARATO EXPERIMENTAL

A qualidade do sinal metrológico de um tubo de choque pode ser afetada pelas diferentes massas moleculares e propriedades dos gases utilizados. Então, o objetivo desse estudo está centrado na determinação de metodologias que possam melhorar as qualidades metrológicas desse sinal, fazendo ensaios com diferentes gases, em diversas combinações no interior do tubo. Cada ensaio é feito usando-se apenas um nível de pressão entre as câmaras, que é 3 bar no tubo indutor e 2 bar no tubo induzido. Este nível é escolhido de modo a seguir um padrão utilizado em ensaios, que é adotado pela grande maioria de pesquisadores que trabalham com tubo de choque no mundo (Damion, 1997; Damion, 1993).

Tabela 2.1: Combinações dos gases nos ensaios

Ensaio	Tubo Indutor	Tubo Induzido
Ensaio 1	Ar atmosférico	Dióxido de Carbono
Ensaio 2	Dióxido de Carbono	Ar atmosférico
Ensaio 3	Hélio	Ar atmosférico

As combinações de gases que são aqui apresentadas, são assim escolhidas de modo a otimizar o uso dos gases, evitando desperdício e podendo avaliar a interação de gases com pequenas massas moleculares com gases de grandes massas moleculares.

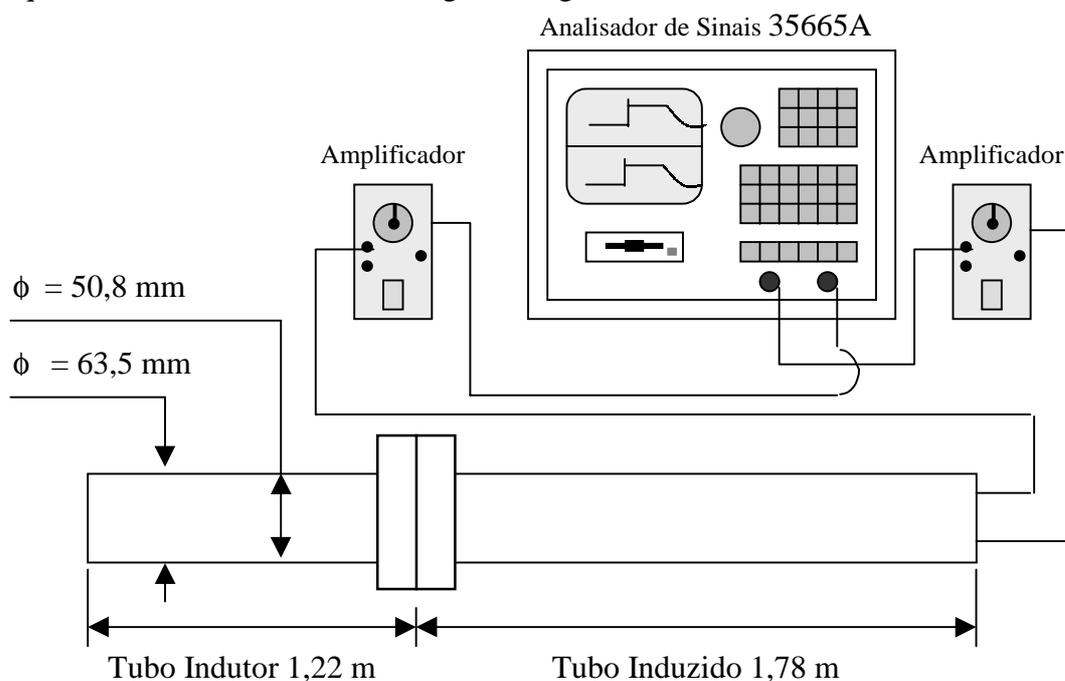


Figura 2.1: Esquema dos instrumentos de medição na bancada de ensaios para realização da medição da resposta em frequência dos sensores de pressão Padrão e de Trabalho.

Os sensores de pressão Padrão e o de Trabalho são posicionados faceando o fundo do tubo induzido. A partir dessa montagem são realizados os ensaios para se observar a curva de resposta de frequência destes sensores. Nesse ensaio não é usada a configuração de gás com ar nas duas câmaras, pois sua curva de resposta de frequência já é bem conhecida.

Para garantir a fidelidade dos resultados obtidos, é realizado um procedimento de limpeza dos tubos indutor e induzido, de forma que garanta, em cada uma das câmaras a pureza dos gases nelas contidos (Guimarães, 1997). Por impurezas entende-se os outros gases presentes na câmara, que sejam diferentes do gás de ensaio. O procedimento de limpeza das câmaras é descrito a seguir.

- 1) Após ou ao se iniciar cada ensaio, faz-se a abertura do tubo colocando-se uma nova membrana.
- 2) Fecha-se o tubo e despressuriza-se as câmaras, com auxílio de uma bomba, até uma pressão cerca de 65 kPa absoluta.
- 3) Depois, pressuriza-se cada câmara, com os respectivos gases. A pressurização é feita ao mesmo tempo nos dois lados do tubo com o objetivo de evitar que a membrana sofra grandes deformações ou que se rompa.

A execução deste trabalho utiliza o seguinte aparato experimental:

- Sensores piezelétrico (KISTLER) Sensor de pressão Padrão (referência) tipo ^A
Sensor de pressão de Trabalho (calibração) tipo
- Amplificadores de carga (KISTLER; modelo analógico 5007 e modelo digital 5011):

Esses aparelhos amplificam e convertem o sinal de carga em função do tempo em um sinal de diferença de potencial em função do

- Filtros de sinais (DL INSTRUMENTS; modelo: 4213): Esses instrumentos realizam a filtragem dos sinais de diferença potencial no tempo fornecidos pelos amplificadores, utilizando uma faixa operação de 0 a 40kHz. No trabalho experimental realizado é empregado um filtro de sinal para cada

- Analisador de Sinais (Hewlett Packard; modelo: 35665A): Captura o sinal do anemômetro de fio frio e do sensor piezelétrico de pressão. Pode ser operado em altas faixas de frequência, sendo mais que o suficiente para a aquisição de sinais dos sensores

3.RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE

A análise dos resultados está centrada na observação dos resultados de resposta em frequência das diferentes combinações de gases utilizadas. Os valores de resposta em frequência obtidos não sofreram nenhum tipo de tratamento especial além do cálculo da média e do desvio padrão (GUM, 1993; Mayer; Siqueira). Isto porque esses valores já são adquiridos em sua forma final, ou seja, os valores de diferença de potencial já possuem uma relação direta com a unidade da grandeza medida.

Tabela 3.1: Valores obtidos para o cálculo de massa residual de ar no tubo de choque metrológico em cada combinação de gás utilizada

	Ensaio		
	Ar – CO2	CO2 - Ar	He – Ar
Massa residual de ar [kg]	0,002736	0,0018598	0,001936
Razão mássica [%]	23,57	15,06	67,05
Razão volumétrica [%]	31,92	21,22	21,94

Comparando-se as curvas de resposta em frequência obtidas para cada configuração de gás utilizada, observa-se que tanto o gráfico de Amplificação como o de Fase possuem melhor comportamento quando utiliza-se a configuração He – Ar. As diferenças entre o sensor Padrão e o de Trabalho utilizando-se a configuração He-Ar ocorrem a partir da frequência de 9kHz. Enquanto que as diferenças para a configuração Ar-CO₂ ocorrem a 3kHz e para a configuração CO₂-Ar ocorrem a 4kHz.

Gráfico da Magnitude da Resposta em Frequência dos sensores de pressão no fundo do Tubo de Choque Metrológico na configuração Ar - CO₂

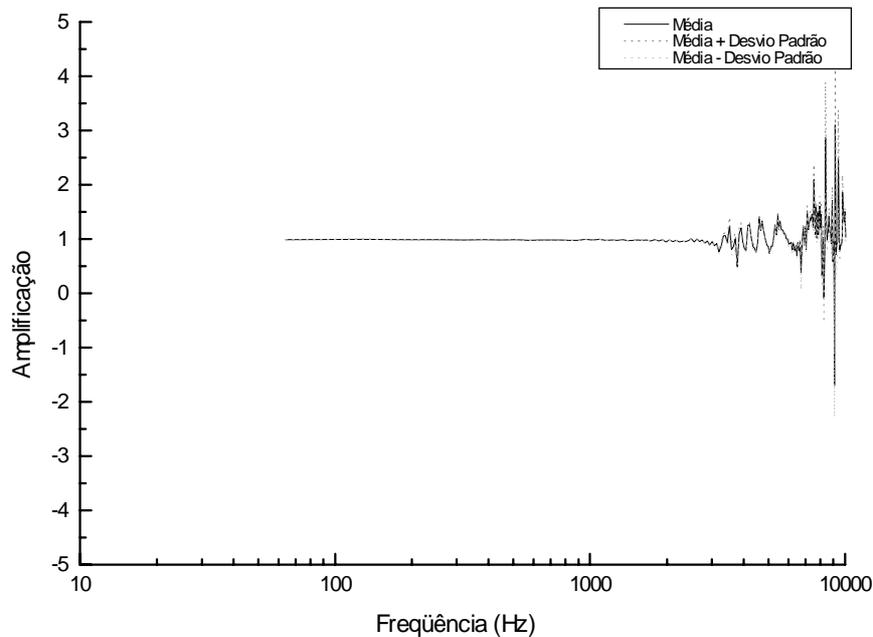


Gráfico da Fase da Resposta em Frequência dos sensores de pressão no fundo do Tubo de Choque Metrológico na configuração Ar - CO₂

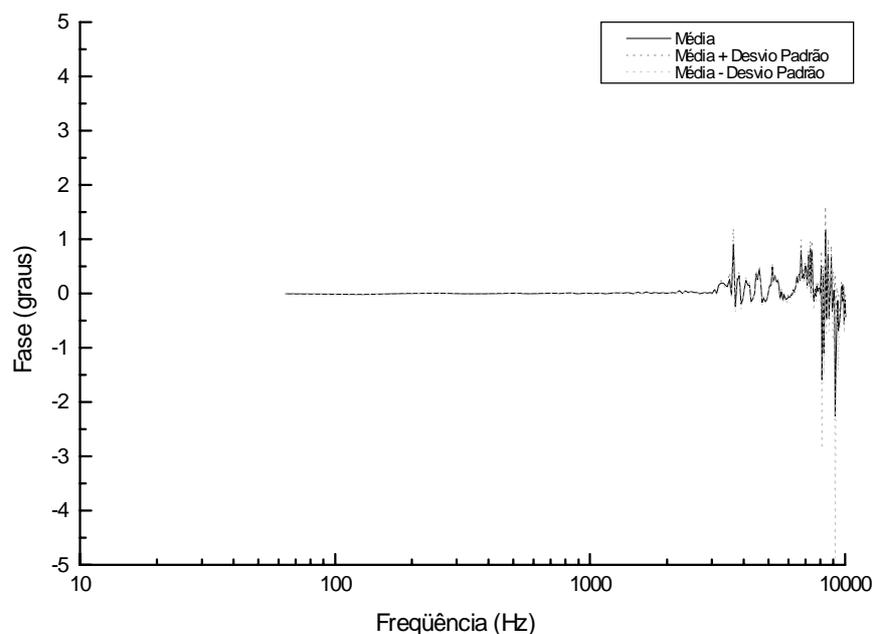


Figura 3.1: Curvas de resposta em frequência dos sensores de pressão Padrão e de Trabalho no fundo do tubo de choque Metrológico na configuração Ar – CO₂.

No gráfico de Fase da figura 3.3 da configuração He – Ar observa-se que os valores de pressão medidos pelo sensor de Trabalho, a partir de uma alta intensidade de frequência, possuem uma pequena defasagem, cerca de 0,1 graus, em relação aos valores medidos pelo sensor Padrão. Quanto a defasagem para a configuração Ar-CO₂, esta é de 0,6 graus e para a configuração CO₂-Ar é de 0,3 graus.

Gráfico da Magnitude da Resposta em Frequência dos sensores de pressão no fundo do Tubo de Choque Metrológico na configuração CO₂ - Ar

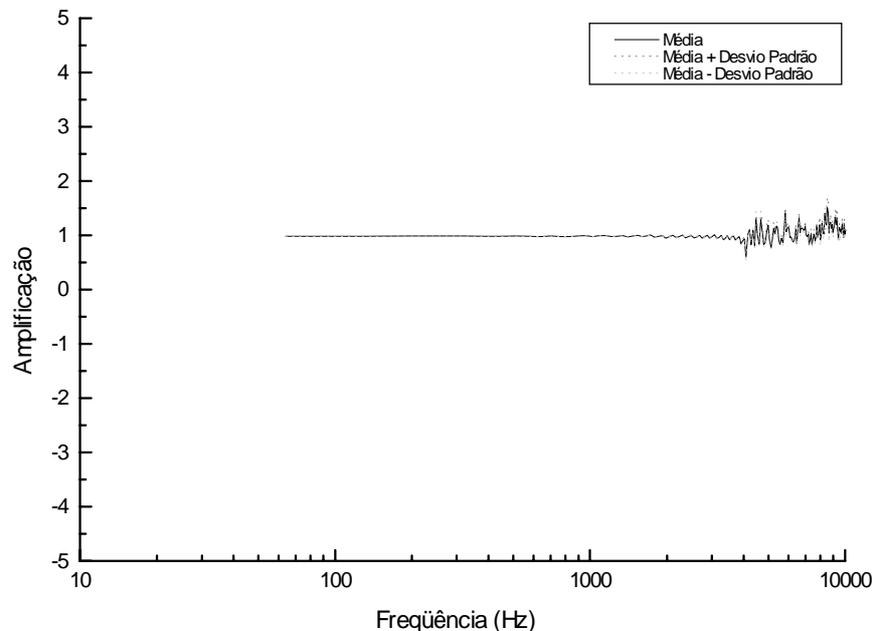


Gráfico da Fase da Resposta em Frequência dos sensores de pressão no fundo do Tubo de Choque Metrológico na configuração CO₂ - Ar

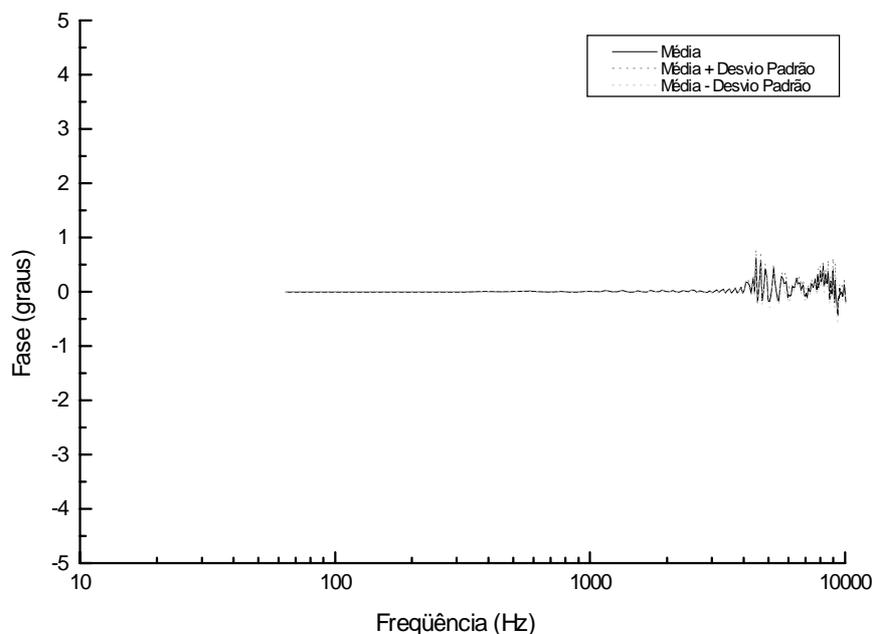


Figura 3.2: Curvas de resposta em frequência dos sensores de pressão Padrão e de Trabalho no fundo do tubo de choque Metrológico na configuração CO₂ – Ar.

Com relação ao gráfico da grandeza Amplificação da figura 3.3 observa-se, também, que a magnitude do sinal de pressão medido pelo sensor de Trabalho difere da magnitude do sinal medido pelo sensor Padrão por uma parcela muito pequena, de cerca de 5%. Já a diferença para a configuração Ar-CO₂ é de 30% e para a configuração CO₂-Ar é de 15%. Um outro fato que valoriza a configuração He – Ar é a curta duração de tempo do degrau de pressão, indicando esta configuração para trabalhos de calibração com sensores que operam em alta frequência. São esses fatores, aqui destacados, que apresentam a configuração He – Ar como a de melhor comportamento para fins metrológicos utilizando-se o tubo de choque, dentre as observadas.

Gráfico da Magnitude da Resposta em Frequência dos sensores de pressão no fundo do Tubo de Choque Metrológico na configuração He - Ar

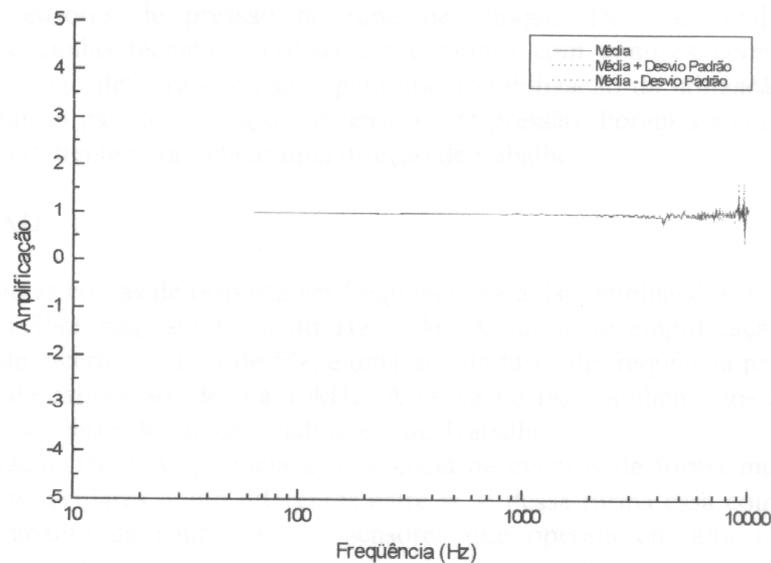


Gráfico da Fase da Resposta em Frequência dos sensores de pressão no fundo do Tubo de Choque Metrológico na configuração He - Ar

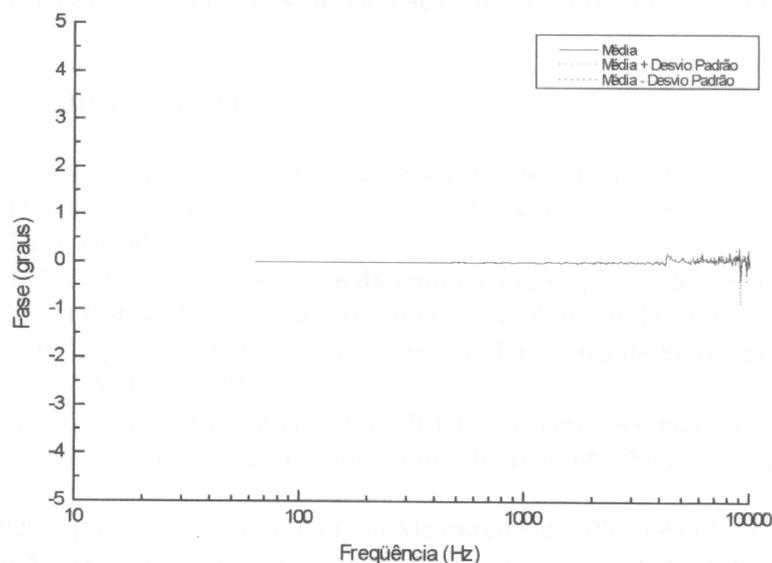


Figura 3.3: Curvas de resposta em frequência dos sensores de pressão Padrão e de Trabalho no fundo do tubo de choque Metrológico na configuração He – Ar.

Depois da configuração He – Ar, a que apresenta melhor comportamento metrológico é a CO₂ – Ar da figura 3.2, e em último lugar tem-se a configuração Ar – CO₂ da figura 3.1. Isto se processa seguindo o que já era esperado pela teoria, ou seja, que quanto maior for a diferença entre as massas moleculares dos gases do tubo, mais rápido se processam os eventos e melhor é o trabalho de calibração em altas frequência. Faz-se necessário ressaltar que a faixa de frequência que se está usando para a comparação das diversas combinações é a faixa de frequência utilizada para calibração de sensores de pressão no tubo de choque, que é de cerca de 10 kHz.

Não se pode dizer, que a análise aqui colocada por si só é o suficiente para se ter um conclusão absoluta para se adotar a configuração He – Ar como a melhor para ser utilizada na calibração de sensores de pressão no tubo de choque. Deve-se, ainda, fazer outras comparações de cunho técnico-científico em conjunto com análises econômicas para se chegar a uma opinião definitiva, ou seja, para que a viabilização da utilização do gás ser de extrema importância para a calibração de sensores de pressão. Porém a análise mostrada por este estudo é o suficiente para indicar uma direção de trabalho.

4. CONCLUSÃO

Com relação as curvas de resposta em frequência para as combinações de gases utilizadas a que obteve melhor resposta foi a do He – Ar. A curva de amplificação apresenta um pequeno valor de incerteza, cerca de 5%, e uma grande faixa de frequência para utilização em procedimentos de calibração, de 0 a 10kHz. A curva de fase também mostra uma pequena defasagem entre o sensor de pressão Padrão e o de Trabalho.

A configuração He – Ar propicia a ocorrência de eventos de forma muito rápida, pois possui massas moleculares muito diferentes entre si. E dessa forma essa configuração tem o potencial de trabalho de calibração de sensores que operam em alta frequência. Mas, entretanto, é importante, ainda, a realização de um trabalho de análise de viabilidade econômica, pois se sabe que o Hélio é muito caro; em conjunto com uma avaliação mais profunda de cunho técnico-científico para dirimir qualquer dúvida sobre a adoção dessa configuração de ensaio nos trabalhos de calibração de sensores de pressão com o tubo de choque.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARVALHO, Marco A. M. de, “Estudo e Aplicação Metrológica do Tubo de Choque para a Calibração Dinâmica de Sensores de Pressão – Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica”, UnB, Brasília - DF, 1995.
- DAMION, J. P., “Moyens d’étalonnage dynamique des Capteurs de Pression”, Bulletin d’information du Bureau National de Métrologie, vol. 8, nº 30, (1997).
- DAMION, J. P., “Apostilas do Curso de Calibração Dinâmica de Sensores de Pressão e Temperatura”, ENM/UnB, 1993.
- DELALE, Can F.; SCHNERR, Günter H. e ZIEREP, Jurgen, “Asymptotic Solution of Shock Tube Flows with Homogeneous Condensation, Journal of Fluid Mechanics, p. 93-118, (1995).
- “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”, ISO TAG/WG3, 1993.
- GUIMARÃES, Antonio M. F., “Análise de Processos em um Tubo Gerador de Ondas de Choque - Relatório submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico”, UnB, Brasília - DF, 1997.
- HENRIQUES, Durval S. F., “Aerodinâmica da Asa e Fuselagem - Apostila”, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos - SP, 1994.

- HOLMAN, J. P., "Metodos Experimentales para Ingenieros", Libros McGraw-Hill de Mexico, Mexico, 1977.
- HOUAS, L. e CHEMAOUNI, I., "Experimental Investigation of Richtmyer-Meshkov Instability in Shock Tube", Physics Fluids, vol. 8, nº 2, p. 614-627, (1996).
- JONES, M. A. e JACOBS, J. W., "A Membraneless Experiment for the Study of Richtmyer-Meshkov Instability of a Shock-Accelerated Gas Interface", Physics Fluids, vol. 9, nº 10, p. 3078-3085, (1997).
- KARIMIAN, S. M. H. e SCHNEIDER, G. E., "Application of a Control-Volume-Based Finite-Element Formulation to the Shock Tube Problem", AIAA Journal, vol. 33, nº 1, p. 165-167, 1995.
- KIM, K. -S.; LEE, Y. e SETTLES, G. S., "Laser Interferometer/Preston Tube Skin-Friction Comparison in Shock/Boundary-Layer Interaction", AIAA Journal, vol. 29, p. 1007-1009, (1991).
- MAKAREVICH, G. A. e LISENKOVA, G. S., "Shock-Tube for Calibration of Pressure Detectors", Instruments and Experimental Techniques, vol. 23, p. 811-812, (1980).
- MAYER, Paul L., "Probabilidade: Aplicações a Estatística", Editora Livros Técnicos e Científicos AS, São Paulo - SP.
- ORTEGA, Marcos A., "Dinâmica dos Gases – Apostila do Curso de Escoamentos Copressíveis", ITA - IEA - IEAA, São José dos Campos - SP.
- PAI, Shihi-I, "Introduction to the Theory of Compressible Flow", D. Van Norstrand Company Inc., 1959.
- SCHWEPPE, J.L.; EICHBERGER, L. C.; MUSTER, D. F.; MICHAELS, E. L e PASKUSZ, G. F., "Methods for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers - National Bureau of Standards Monograph 67", U.S. Government Printing Office, Washington - D.C., 1963.
- SHAPIRO, Ascher H., "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow - Volume I", The Ronald Press Company, New York, 1953.
- SHAPIRO, Ascher H., "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow - Volume II", The Ronald Press Company, New York, 1953.
- SIQUEIRA, Mário B. B. de, "Incerteza de Medição segundo a ISO TAG4/WG3 - Apostila de Curso", Unb, Brasília - DF.
- STACEY, C. H. B. e SIMMONS, J. M., "Measurement of Shock-Wave/Boundary-Layer Interaction in a Free-Piston Shock Tunnel", AIAA Journal, vol. 30, nº 8, p. 2095-2098, (1992).
- STEIDEL, Robert F. Jr., "An Introduction to Mechanical Vibrations", John Wiley & Sons Inc., New York, 1989.
- TAKANO, Y. e AKAMATSU, T., "A Diaphragmless Shock Tube", Journal of Physics. E: Scientific Instruments, vol. 17, p. 644-646, (1984).