

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB
FACULDADE DE TECNOLOGIA – FT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – ENM**

**CONTRIBUIÇÃO A CALIBRAÇÃO DINÂMICA DE
TRANSDUTORES DE PRESSÃO EM ALTAS PRESSÕES**

LEONARDO MOREIRA LEÓDIDO

ORIENTADORES: ALESSANDRO BORGES DE SOUSA OLIVEIRA

ROBERT REY – ENSAM/PARIS

CO-ORIENTADOR: JEAN-PIERRE DAMION – ENSAM/PARIS

**TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS
DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARTS ET
MÉTIERES**

PUBLICAÇÃO: 11/2011

BRASÍLIA/DF: 15 DE DEZEMBRO – 2011

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB
FACULDADE DE TECNOLOGIA – FT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – ENM**

**CONTRIBUIÇÃO A CALIBRAÇÃO DINÂMICA DE
TRANSDUTORES DE PRESSÃO EM ALTAS PRESSÕES**

LEONARDO MOREIRA LEÓDIDO

TESE SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM CIÊNCIAS MECÂNICAS E A ESCOLA DE DOUTORADO 432 SMI DA ARTS ET MÉTIERS PARISTECH PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOCTEUR ARTS ET MÉTIERS.

APROVADA POR:

**PROF. ALESSANDRO BORGES DE SOUSA OLIVEIRA,
DOCTEUR (ENSAM/PARIS)
ORIENTADOR**

**PROF. ROBERT REY,
DOCTEUR D'ÉTAT (ENSAM/PARIS)
ORIENTADOR**

**PROF. JEAN PIERRE DAMION,
DOCTEUR (CNAM/PARIS)
CO-ORIENTADOR**

**PROF. JOSE ROBERTO DE FRANÇA ARRUDA,
DOCTEUR (UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE)
RELATOR E EXAMINADOR EXTERNO**

**PROF. DOMINGOS ALVES RADE,
DOCTEUR (UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ)
RELATOR E EXAMINADOR EXTERNO**

**PROF. SMAINE KOUIDRI,
DOCTEUR (ENSAM)
EXAMINADOR EXTERNO**

**PROF. ALBERTO CARLOS GUIMARÃES CASTRO DINIZ
DOCTEUR (ÉCOLE CENTRALE DE LYON)
EXAMINADOR - INTERNO**

BRASÍLIA/DF, 15 DE DEZEMBRO DE 2011

FICHA CATALOGRÁFICA

LEÓDIDO, LEONARDO MOREIRA

Contribuição a Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão em Altas Pressões [Distrito Federal] 2011. xiv, 201p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Doutor, Ciências Mecânicas, 2011).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Metrologia Dinâmica

2. Cálculo de incerteza

3. Altas Pressões

4. Sensor de pressão

I. ENM/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LEÓDIDO, L. M. (2011). Contribuição a Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão em Altas Pressões. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas, Publicação 11/2011, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 201p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Leonardo Moreira Leódido.

TÍTULO: Contribuição à Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão em Altas Pressões.

GRAU: Doutor

ANO: 2011

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Leonardo Moreira Leódido
QNA 56 Bloco A apt. 205 - Taguatinga
72.110-560 Brasília – DF – Brasil.

RESUMO

Contribuição à Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão em Altas Pressões

A variação dinâmica de grandezas físicas está presente na maior parte dos fenômenos físicos. Mas medir e avaliar esta variação não são tarefas simples, sendo necessário então, o desenvolvimento de sistemas de medição, que por sua vez devem ser caracterizados dinamicamente. Ou seja, é preciso submetê-los a um processo de calibração dinâmica, que consiste em determinar experimentalmente a função de transferência e as características dinâmicas do sistema. No domínio da pressão, a medição dinâmica vem sendo estudada desde a década de 60 de onde surgiram dispositivos e métodos capazes de fornecer os elementos necessários a um processo de calibração dinâmica e o estabelecimento de padrão primário em pressão dinâmica. Os trabalhos do Laboratório de Metrologia Dinâmica da Arts et Métiers ParisTech (LMD-ENSAM/Paris) e levaram ao desenvolvimento de um método de calibração e cálculo da incerteza para uma amplitude de pressão de 1 MPa . É nesse contexto que se insere esse trabalho, que tem como objetivo utilizar o mesmo método de calibração e cálculo de incerteza, utilizado em baixas, para altas pressões ($> 1\text{ MPa}$). Ou seja, desenvolver meios e/ou melhorias nos já existentes que visem reduzir as fontes de incerteza e permitir a aplicação do método sem alterá-lo. Para isso esse trabalho foi realizado no âmbito de um acordo de cooperação entre o LMD-ENSAM e o LMD-UnB.

ABSTRACT

DYNAMIC CALIBRATION OF PRESSURE TRANSDUCERS AT HIGH PRESSURES

The dynamic change of physical quantities is present in most physical processes. But, measuring and evaluating this variation is not a simple task. This leads to the development of measurement systems, which be characterized dynamically. In other words, submit it to a dynamic calibration process (the experimental transfer function and the dynamic characteristics of the system). In the field of pressure, dynamic measurement has been studied since the 60's, enabling the development of devices and methods for a dynamic calibration and the establishment of primary standard in dynamic pressure. The works of the *Laboratoire de Métrologie Dynamique* of the *Arts et Métiers ParisTech* (LMD-ENSAM/Paris) led to the development of a method of calibration and uncertainty for a range of pressure of 1 MPa . This study aims to use the same method used in low pressure to high pressures ($> 1\text{ MPa}$), and develop the means or make upgrades in the devices to reduce the uncertainty and allow the application of the method without changing it. This work is part of a cooperation agreement between the LMD and LMD-ENSAM-UNB.

RESUME

Contribution à l'étalonnage dynamique de capteurs de pression en hautes pressions

La variation dynamique de grandeurs physiques est présente dans la plupart de phénomènes physiques. Mais, mesurer et évaluer ce changement n'est pas évident. Donc, il faut développer systèmes de mesure qui doivent être soumis à un étalonnage dynamique, c'est-à-dire déterminer sa fonction de transfert et ses caractéristiques dynamiques. Dans le domaine de la pression, l'étalonnage dynamique est étudié depuis les années 60, avec le développement de dispositifs, de méthodes et d'un, possible, étalon collectif. Les travaux du Laboratoire de Métrologie Dynamique des Arts et Métiers ParisTech (LMD-ENSAM/Paris) ont amené au développement d'une méthodologie d'étalonnage et de calcul de l'incertitude jusqu'à la pression de 1 MPa (10 bar). Donc, cette thèse a comme objectif utiliser cette même méthode en hautes pressions ($> 1 \text{ MPa}$). C'est à dire, développer les moyens d'étalonnage et/ou faire des mises à jour aux méthodes déjà disponibles, de façon à réduire les sources d'incertitude. Cette thèse est faite dans le cadre de la coopération entre le LMD-ENSAM et le LMD-UnB.

SUMARIO

RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
RESUME	VIII
SUMARIO	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE FIGURAS	XII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	2
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.1.3 <i>Hipóteses</i>	3
1.2 <i>Metodologia</i>	4
1.3 <i>Organização da Tese</i>	4
2. METROLOGIA DINÂMICA	6
2.1 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	6
2.1.1 <i>Calibração Dinâmica em Pressão</i>	7
2.1.2 <i>Outros trabalhos sobre a calibração dinâmica em pressão</i>	10
2.2 MEIOS DE CALIBRAÇÃO	14
2.2.1 <i>Dispositivos Geradores de Pressão Periódicos</i>	15
2.2.2 <i>Dispositivos Geradores Aperiódicos de Pressão</i>	22
2.3 METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO	27
2.3.1 <i>Função de Transferência</i>	28
2.3.2 <i>Modelo Matemático de um Transdutor</i>	28
2.3.3 <i>Metodologia de Calibração do LMD-ENSAM</i>	37
3. O TUBO DE CHOQUE E O DISPOSITIVO DE ABERTURA RÁPIDA	40
3.1 O TUBO DE CHOQUE	40
3.1.1 <i>Formulação Teórica do Tubo de Choque</i>	46
3.1.2 <i>Características Operacionais e Construtivas</i>	54
3.1.3 <i>Tubos de Choque</i>	74
3.2 O DISPOSITIVO DE ABERTURA RAPIDA	92
3.2.1 <i>Aspectos teóricos</i>	92
3.2.2 <i>Aspectos Operacionais e Construtivos</i>	94
3.2.3 <i>Dispositivo de Abertura Rápida</i>	99
4. O MÉTODO DE CÁLCULO DA INCERTEZA	106
4.1 CALIBRAÇÃO QUASE-ESTÁTICA EM TENSÃO	112
4.1.1 <i>Repetitividade – Tipo A</i>	114
4.1.2 <i>Incerteza do Multímetro – Tipo B</i>	114
4.1.3 <i>Desvio – Tipo B</i>	115
4.1.4 <i>Deriva Temporal – TIPO B</i>	116
4.1.5 <i>Resolução do Multímetro</i>	116
4.1.6 <i>Arredondamento (KetStaTension) – Tipo B</i>	116
4.1.7 <i>Flutuação</i>	117
4.1.8 <i>Resultado da Calibração</i>	117
4.2 CALIBRAÇÃO QUASE-ESTÁTICA EM PRESSÃO	118
4.2.1 <i>Repetitividade – Tipo A</i>	119
4.2.2 <i>Incerteza do Transdutor de Referência – Tipo B1</i>	119
4.2.3 <i>Calibração Quase-estática do Sistema de Aquisição – Tipo B2</i>	119
4.2.4 <i>Deriva Temporal do Transdutor de Referência – Tipo B3</i>	120
4.2.5 <i>Deriva Térmica do Transdutor de Referência – Tipo B4</i>	120

4.2.6	<i>Leitura do Transdutor de Referência – Tipo B5</i>	120
4.2.7	<i>Tratamento dos Dados – Tipo B6</i>	120
4.2.8	<i>Arredondamento do Software (KetStaPression) – Tipo B7</i>	121
4.2.9	<i>Modelagem da Pressão – Tipo B8</i>	121
4.2.10	<i>Resultado da Calibração Quase-Estática em Pressão</i>	121
4.3	CALIBRAÇÃO DINAMICA EM TENSÃO	123
4.3.1	<i>Repetitividade – Tipo A</i>	124
4.3.2	<i>Função de Transferência – Tipo B1</i>	124
4.3.3	<i>Tratamento dos Dados (EDYCAP) – Tipo B2</i>	124
4.3.4	<i>Incerteza Quase-estática em Tensão – Tipo B3</i>	125
4.3.5	<i>Resultados da Calibração Dinâmica em Tensão</i>	126
4.4	CALIBRAÇÃO DINAMICA EM PRESSÃO	127
4.4.1	<i>Repetitividade – Tipo A</i>	128
4.4.2	<i>Função de Transferência – Tipo B1</i>	128
4.4.3	<i>Incerteza Quase-estática em Tensão – Tipo B2</i>	129
4.4.4	<i>Incerteza Quase-estática em Pressão – Tipo B3</i>	129
4.4.5	<i>Incerteza Dinâmica em Tensão – Tipo B4</i>	129
4.4.6	<i>Resultado da Calibração</i>	129
5.	RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DINÂMICA EM ALTAS PRESSÕES	132
5.1	ESTUDOS DOS SISTEMAS DE AQUISIÇÃO.....	132
5.2	CALIBRAÇÃO QUASE-ESTATICA EM TENSÃO.....	149
5.3	CALIBRAÇÃO DINAMICA EM TENSÃO.....	153
5.4	CALIBRAÇÃO QUASE-ESTATICA EM PRESSÃO.....	157
5.5	CALIBRAÇÃO DINAMICA EM PRESSÃO.....	159
5.5.1	<i>DAR – Baixas Frequências</i>	159
5.5.3	<i>TCFB – Médias Frequências</i>	164
5.5.4	<i>TC100 – Altas Frequências</i>	167
5.6	RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DE UM TRANSDUTOR DE REFERENCIA.....	170
6.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	174
6.1	CONCLUSÕES.....	174
6.2	RECOMENDAÇÕES.....	175
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	177

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Incertezas associadas a um processo de calibração dinâmica de um transdutor de referência, para amplitudes de até 1 MPa.....	9
Tabela 2.2 – Respostas de um elemento de segunda ordem a um degrau.....	36
Tabela 2.3 – Características dinâmicas de um transdutor de segunda ordem.....	37
Tabela 3.1 – Softwares utilizados para explorar dos dados.....	73
Tabela 3.2 – Grupo de tubos de choque do LMD-ENSAM/Paris.....	74
Tabela 5.1 – Componentes do sistema de aquisição.....	133
Tabela 5.2 – Parâmetros de análise do sistema de aquisição 1.....	134
Tabela 5.3 – Parâmetros de análise do sistema de aquisição 2.....	142
Tabela 5.4 – Resultado da Calibração Quase-estática do sistema de aquisição 2.....	150
Tabela 5.5 – Tabela de Fontes de Incertezas da calibração quase-estática do sistema de aquisição 2 (LMD-ENSAM).....	151
Tabela 5.6 – Resultado da Calibração Quase-estática do sistema de aquisição 3.....	151
Tabela 5.7 – Tabela de Fontes de Incertezas da calibração quase-estática do sistema de aquisição 3 (LMD-UnB).....	152
Tabela 5.8 – Tabela de Fontes de Incertezas da calibração dinâmica em baixas frequências do sistema de aquisição 2 (LMD-ENSAM).....	154
Tabela 5.9 – Tabela de Fontes de Incertezas da calibração dinâmica em médias frequências do sistema de aquisição 3 (LMD-UnB).....	155
Tabela 5.10 – Tabela de Fonte de Incertezas da calibração dinâmica em altas frequências do sistema de aquisição 2 (LMD-ENSAM).....	156
Tabela 5.11 – Resultados da calibração quase-estática em pressão.....	158
Tabela 5.12 – Valores máximos de incerteza em função das amplitudes de pressão e dos intervalos de frequência.....	173

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Domínio de utilização de dispositivos periódicos.....	16
Figura 2.2 – Domínio de utilização de dispositivos periódicos particulares.	17
Figura 2.3 – Esquema simplificado de um dispositivo do tipo sirene.....	17
Figura 2.4 – Esquema simplificado de um conversor eletropneumático.....	18
Figura 2.5 – Cavidade não ressonante com modulação de volume.....	19
Figura 2.6 – Esquema de um vaso de pressão.	19
Figura 2.7 – Esquema de um ressonador acústico.....	20
Figura 2.8 – Esquema do gerador periódico de coluna de líquido.	21
Figura 2.9 – Gerador de Ondas Quadradas.....	21
Figura 2.10 – Esquema de um Excitador Eletrostático.	22
Figura 2.11 – Limites de utilização de alguns dispositivos aperiódicos.	23
Figura 2.12 – Esquema simplificado de um DAR.....	23
Figura 2.13 – Dispositivo de Abertura Rápida (DAR) do LMD-UnB.....	24
Figura 2.14 – Esquema simplificado de uma bomba de pressão.....	25
Figura 2.15 – Representação simplificada de um tubo de choque.	26
Figura 2.16 – Esquema de geradores de impulso.	27
Figura 2.17 – Sistema massa-mola com amortecimento.	32
Figura 2.18 – Estímulos mais utilizados em processos de calibração dinâmica.	33
Figura 2.19 – Resposta de um transdutor de primeira ordem submetido a um degrau de Heaviside.....	35
Figura 2.20 – Resposta de um transdutor de segunda ordem submetido a um degrau de Heaviside.....	36
Figura 2.21 – Características dinâmicas.	37
Figura 2.22 – Diagrama esquemático do método de calibração e cálculo de incerteza em pressão dinâmica, desenvolvido pelo <i>Laboratoire de Métrologie Dynamique</i> – ENSAM/Paris.....	39
Figura 3.1 – Diagrama dos processos no tubo de choque.	40
Figura 3.2 – Diagrama das propriedades dentro do tubo de choque.	43
Figura 3.3 – Formação do degrau de pressão no fundo do tubo induzido. Para um transdutor ali fixado.....	44

Figura 3.4 – Formação do degrau de pressão na parede do tubo induzido. Para um transdutor fixado num ponto após a posição de reflexão da onda na superfície de contato.	45
Figura 3.5 – Formação do degrau de pressão na parede do tubo induzido. Para um transdutor fixado na posição da reflexão da onda na superfície de contato.	45
Figura 3.6 – Representação esquemática da variação das propriedades provocada por um choque normal.	49
Figura 3.7 – Desenho esquemático de uma membrana deformada.	56
Figura 3.8 – Campo de pressão no interior de um tubo de choque após o rompimento da membrana.....	56
Figura 3.9 – Função de transferência para os ensaios com a rugosidade interna original do TC100.....	58
Figura 3.10 – Função de transferência para os ensaios após o polimento interno do TC100.	59
Figura 3.11 – Rompimento forçado da membrana com um perfurador. (a) perfurador no fundo do tubo indutor. (b) perfurador no porta membrana.....	61
Figura 3.12 – Função de transferência para um rompimento natural da membrana no tubo de choque de alta frequência.	62
Figura 3.13 – Função de transferência para um rompimento natural da membrana com o perfurador instalado no tubo de choque de alta frequência.	62
Figura 3.14 – Esquema de um dispositivo de rompimento com perfurador externo.....	63
Figura 3.15 – Esquema do rompimento a laser.	64
Figura 3.16 – Montagem experimental com laser.	64
Figura 3.17 – Montagem experimental de avaliação da viabilidade do dispositivo de fio quente. Na imagem é testada a configuração de dois fios cruzados.	65
Figura 3.18 – Função de transferência para um rompimento com fio quente no tubo de choque de alta frequência.....	66
Figura 3.19 – Dispositivo de fio quente usado no TC100.....	67
Figura 3.20 – Esquema simplificado da montagem do sistema de controle de pressão.....	67
Figura 3.21 – Curva de subida da pressão em tubo de choque.....	68
Figura 3.22 – Resposta temporal com uma relação de pressão igual 2,25 (TC100).	69
Figura 3.23 – Função de Transferência com uma relação de pressão igual 2,25 (TC100).....	69

Figura 3.24 – Resposta temporal com uma relação de pressão igual 1,10, membrana celofane, pressão no tubo indutor de 1 MPa e rompimento natural (TC100).....	70
Figura 3.25 – Função de Transferência com uma relação de pressão igual 1,10 (TC100).....	70
Figura 3.26 – Vários tipos de membranas após o ensaio.....	72
Figura 3.27 – Geradores de degrau de tensão. (a) Dispositivo do LMD-ENSAM; (b) Dispositivo do LMD-UnB.	74
Figura 3.28 – Primeira versão do TC100.	75
Figura 3.29 – TC100 após as atualizações para permitir a conexão do sistema automatizado de controle de pressão.	76
Figura 3.30 – TC100 depois da primeira atualização.....	77
Figura 3.31 – Novo TC100 inteiriço com instrumentação completa. À esquerda o sistema automatizado de pressão e a direita o sistema de aquisição de dados.....	78
Figura 3.32 – Ensaio no TC100 após a última atualização. A pressão no tubo indutor igual a 3 MPa , membrana de celofane e relação de pressão igual a 1,1.....	78
Figura 3.33 – Ensaio no TC100 original com relação de pressão aproximada de 2,2. Pressão no tubo induzido igual a 1 MPa , membrana de poliéster de $0,19\text{ mm}$ e rompimento natural. Média de 8 ensaios.	79
Figura 3.34 – Ensaio no TC100 original com uma relação de pressão igual 1,5, pressão no tubo induzido igual a 100 kPa , pressão no tubo indutor igual a 150 kPa membrana de celofane e rompimento com perfurador. Média de 8 ensaios.....	79
Figura 3.35 – Ensaio no TC100 após a primeira atualização com uma relação de pressão igual 2,2, pressão no tubo induzido igual a 1 MPa , membrana de poliéster de $0,19\text{ mm}$ e rompimento natural. Média de 8 ensaios.....	80
Figura 3.36 – Ensaio no TC100 após a primeira atualização com uma relação de pressão igual 2, pressão no tubo induzido igual a 100 kPa , pressão no tubo indutor igual a 150 kPa membrana de celofane e rompimento com perfurador. Média de 8 ensaios.....	80
Figura 3.37 – Ensaio no TC100 após última atualização a com uma relação de pressão igual 1,1, pressão no tubo induzido igual a 1 MPa , pressão no	

tubo indutor igual a <i>1,1 MPa</i> membrana de celofane e rompimento com perfurador. Média de 4 ensaios.....	81
Figura 3.38 – Resposta temporal do ensaio no TC100 após última atualização com uma relação de pressão igual <i>1,6</i> , pressão no tubo induzido igual a <i>4 MPa</i> , membrana de poliéster com <i>0,19 mm</i> de espessura e rompimento por fio quente.....	82
Figura 3.39 – Função de transferência do ensaio no TC100 após última atualização com uma relação de pressão igual <i>1,6</i> , pressão no tubo induzido igual a <i>4 MPa</i> , membrana de poliéster com <i>0,19 mm</i> de espessura e rompimento por fio quente.....	82
Figura 3.40 – Resposta temporal do ensaio no TC100 após última atualização com uma relação de pressão igual <i>1,05</i> , pressão no tubo induzido igual a <i>4 MPa</i> , membrana de celofane e rompimento por fio quente.....	83
Figura 3.41 – Função de transferência do ensaio no TC100 após última atualização com uma relação de pressão igual <i>1,05</i> , pressão no tubo induzido igual a <i>4 MPa</i> e rompimento por fio quente.....	83
Figura 3.42 – Tubo de choque de referência (TCR) utilizado na calibração em baixas pressões.....	85
Figura 3.43 – Partes do TCFB.....	87
Figura 3.44 – Pilares de sustentação com as bases do TCFB instalados no LMD- UnB.....	88
Figura 3.45 – Sistema de abertura e fechamento do TCFB.....	88
Figura 3.46 – Suporte da membrana com o perfurador de membrana.....	89
Figura 3.47 – Central de gás para alimentação do TCFB, com a montagem para utilização com dois gases diferentes.....	90
Figura 3.48 – Quadro de controle de pressurização e despressurização do TCFB. No detalhe, as conexões pneumáticas de alimentação e de medição de pressão.....	90
Figura 3.49 – Vista geral do TCFB.....	91
Figura 3.50 – Resposta temporal do primeiro ensaio realizado no TCFB. Pressão no tubo indutor <i>100 kPa</i> , membrana celofane, relação de pressão igual <i>2,5</i> e rompimento natural.....	91
Figura 3.51 – Função de transferência do primeiro ensaio realizado no TCFB.....	92

Figura 3.52 – Esquema simplificado de um dispositivo de abertura rápida a eletroválvula.	95
Figura 3.53 – Dispositivo de abertura rápida PCB 903B02.	95
Figura 3.54 – Esquema simplificado de um dispositivo de abertura rápida a válvula elétrica ou pneumática.	96
Figura 3.55 – Dispositivos de abertura rápida disponíveis.....	97
Figura 3.56 – DAR a válvula PCB 907A02.	98
Figura 3.57 – Esquema simplificado de um dispositivo de abertura rápida.....	99
Figura 3.58 – DAR manual utilizado para calibração em baixas frequências. No detalhe a câmara menor com a válvula.....	100
Figura 3.59 – Evolução da incerteza expandida em função da amplitude de pressão.....	101
Figura 3.60 – Resposta temporal do DAR manual. Diferença de pressão de 200 kPa.....	102
Figura 3.61 – Ampliação da resposta temporal. As linhas horizontais representam os patamares de 10% e 90% que definem o tempo de subida.....	102
Figura 3.62 – Função de transferência do DAR manual.	103
Figura 3.63 – Resposta temporal do DAR manual.....	103
Figura 3.64 – Ampliação da resposta temporal. As linhas horizontais representam os patamares de 10% e 90% que definem o tempo de subida.....	104
Figura 3.65 – Função de transferência do DAR manual.	104
Figura 4.1 – Diagrama de Ishikawa (Oliveira, 2004).	108
Figura 4.2 – Representação do fluxo da calibração. As indicações I_i representam as incertezas no final de cada processo.....	109
Figura 4.3 – Representação da técnica de intercomparação das funções de transferência.....	109
Figura 4.4 – Dispositivos do LMD-ENSAM, com seus limites em pressão e frequência.	110
Figura 4.5 – Dispositivos de calibração e zona e intercomparação em altas pressões.....	111
Figura 4.6 – Diagrama de Ishikawa da calibração quase-estática em tensão.....	113
Figura 4.7 – Esquema da montagem experimental da calibração quase-estática em tensão.	113
Figura 4.8 – Exemplo de medição dos patamares inferiores e superiores dos degraus registrados pelo multímetro (U_i) e pelo sistema de aquisição (V_i).	114
Figura 4.9 – Distribuição do desvio.....	115

Figura 4.10 – Exemplo de um resultado final de uma calibração quase-estática em tensão.	117
Figura 4.11 – Diagrama de Ishikawa da calibração quase-estática em pressão.	118
Figura 4.12 – Esquema da montagem experimental da calibração quase-estática em pressão.	118
Figura 4.13 – Modelagem da pressão e curva de uma calibração quase-estática em pressão.	122
Figura 4.14 – Resultado de uma calibração quase-estática em pressão.	122
Figura 4.15 – Diagrama de Ishikawa da calibração dinâmica em tensão (Oliveira, 2004).	123
Figura 4.16 – Esquema da montagem experimental da calibração dinâmica em tensão.	123
Figura 4.17 – Distribuição das diferenças entre as funções de transferência na avaliação do software EDYCAP.	125
Figura 4.18 – Função de transferência (traço azul) e incerteza (traço vermelho) para uma calibração dinâmica em tensão em altas frequências realizada no sistema de aquisição do LMD-ENSAM/Paris.	126
Figura 4.19 – Tabela com os valores das fontes de incerteza para a frequência de 1 kHz , do ensaio mostrado na figura 4.17.	126
Figura 4.20 – Diagrama de Ishikawa da calibração dinâmica em pressão.	127
Figura 4.21 – Esquema da montagem experimental da calibração quase-estática em pressão.	127
Figura 4.22 – Função de Transferência (traço azul) e incerteza (traço vermelho) para uma calibração dinâmica em pressão em altas pressões realizada no TC100.	130
Figura 4.23 – Tabela com os valores das fontes de incerteza para a frequência de 1 kHz , do ensaio mostrado na figura 4.22.	130
Figura 4.24 – Função de Transferência de um transdutor de referência após as etapas de calibração. O resultado para a calibração dinâmica em pressão em baixas pressões (Oliveira, 2004).	131
Figura 5.1 – Resultados da análise do sistema de aquisição 1 em regime quase-estático.	136
Figura 5.2 – Resultados da análise do sistema de aquisição 1 em regime quase-estático.	137

Figura 5.3 – Resultados para o sistema de aquisição 1 em regime dinâmico. Os gráficos a direita são a ampliação dos gráficos à esquerda.	139
Figura 5.4 – Resultados para o sistema de aquisição 1 em regime dinâmico. Os gráficos a direita são a ampliação dos gráficos à esquerda.	140
Figura 5.5 – Resultados para o sistema de aquisição 1 em regime dinâmico. Os gráficos a direita são a ampliação dos gráficos à esquerda.	141
Figura 5.6 – Resultados da análise do sistema de aquisição 2 em regime quase-estático.	144
Figura 5.7 – Resultados da análise do sistema de aquisição 2 em regime quase-estático.	145
Figura 5.8 – Resultados para o sistema de aquisição 2 em regime dinâmico. Os gráficos a direita são a ampliação dos gráficos à esquerda.	146
Figura 5.9 – Resultados para o sistema de aquisição 2 em regime dinâmico. Os gráficos a direita são a ampliação dos gráficos à esquerda.	147
Figura 5.10 – Resultados para o sistema de aquisição 2 em regime dinâmico. Os gráficos a direita são a ampliação dos gráficos a esquerda.	148
Figura 5.11 – Resultado com os pesos de cada fonte de incerteza da calibração quase-estática em tensão do sistema de aquisição 2 (LMD-ENSAM).	151
Figura 5.12 – Resultado com os pesos de cada fonte de incerteza da calibração quase-estática em tensão do sistema de aquisição 3 (LMD-UnB).	152
Figura 5.13 – Função de transferência do sistema de aquisição 2 (baixas frequências). ..	154
Figura 5.14 – Função de transferência do sistema de aquisição 3 (em médias frequências).	155
Figura 5.15 – Função de transferência do sistema de aquisição 2 (altas frequências).	156
Figura 5.16 – Evolução do valor da incerteza na calibração quase estática em pressão.	157
Figura 5.17 – Evolução da incerteza na calibração quase estática em pressão.	157
Figura 5.18 – Evolução da incerteza na calibração quase estática em pressão.	158
Figura 5.19 – Comparação entre os ensaios com e Ar Industrial e com Hélio.	159
Figura 5.20 – Comparação entre os ensaios com e Ar Industrial e com Hélio.	160
Figura 5.21 – Funções de transferência em baixas frequências (amplitude de 1 bar).	161
Figura 5.22 – Funções de transferência em baixas frequências (amplitude de 5 bar).	162
Figura 5.23 – Funções de transferência em baixas frequências (amplitude de 10 bar). ...	162
Figura 5.24 – Funções de transferência em baixas frequências (amplitude de 20 bar). ...	163

Figura 5.25 – Funções de transferência em baixas frequências (amplitude de 30 bar)	163
Figura 5.26 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 1 bar).	164
Figura 5.27 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 5 bar).	165
Figura 5.28 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 10 bar). ..	165
Figura 5.29 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 20 bar). ..	166
Figura 5.30 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 30 bar). ..	166
Figura 5.31 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 1 bar).	167
Figura 5.32 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 5 bar).	168
Figura 5.33 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 10 bar). ..	168
Figura 5.34 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 20 bar). ..	169
Figura 5.35 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 30 bar). ..	169
Figura 5.36 – Funções de transferência do transdutor (amplitude de 1 bar).....	170
Figura 5.37 – Funções de transferência do transdutor (amplitude de 5 bar).....	170
Figura 5.38 – Funções de transferência do transdutor (amplitude de 10 bar).....	171
Figura 5.39 – Funções de transferência do transdutor (amplitude de 20 bar).....	171
Figura 5.40 – Funções de transferência do transdutor (amplitude de 30 bar).....	172

1. INTRODUÇÃO

A variação dinâmica de grandezas físicas está presente na maior parte dos fenômenos físicos. No entanto, medir e avaliar esta variação não são tarefas simples, devido às características dos fenômenos, à ausência de uma correta caracterização dinâmica da instrumentação e também por suas limitações.

Para caracterizar dinamicamente um sistema de medição, é necessário realizar um processo de calibração dinâmica, que consiste em determinar experimentalmente a função de transferência e as características dinâmicas do sistema.

A calibração de um instrumento de medição consiste, basicamente, em comparar a sua resposta a resposta de um padrão metrológico, quando são submetidos ao mesmo estímulo. Com isso, a incerteza é calculada e determinam-se as características do transdutor. Dessa forma, a confiabilidade de um processo de medição passa pela sua calibração, que por sua vez depende do conhecimento e da caracterização dos dispositivos de calibração, dos fenômenos físicos envolvidos, da aquisição e tratamento do resultado, dos procedimentos experimentais e do método de calibração e cálculo da incerteza.

No domínio da pressão, a medição dinâmica teve um grande progresso com o surgimento do transdutor piezoelétrico (Oliveira, 2004). Desde a década de 60 trabalhos estudam dispositivos e métodos capazes de fornecer os elementos necessários à viabilização de um processo de calibração dinâmica e o estabelecimento de padrão primário em pressão dinâmica.

Para gerar o estímulo que é utilizado em uma calibração dinâmica são necessários dispositivos capazes de gerar uma variação rápida de pressão, conhecida e repetitiva. Existem dois grupos de dispositivos: os periódicos e os aperiódicos. Os clássicos são o tubo de choque (TC) e o dispositivo de abertura rápida (DAR). Para as baixas frequências, utiliza-se o DAR e, para médias e altas, o TC.

Os trabalhos de Schweppe et al. (1963) e Lederer (1967) contribuíram na criação do “Guia para Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão” (ANSI B88.1 – 1972). Na França, o Escritório Nacional de Metrologia (*Bureau National de Métrologie* - BNM) encarregou o

Laboratório de Metrologia Dinâmica da *Arts et Métiers ParisTech* (LMD-ENSAM/Paris) pela realização de estudos sobre as técnicas de calibração dinâmica (Damion, 1977). Os trabalhos do LMD-ENSAM/Paris conduziram ao desenvolvimento de métodos e meios de calibração e à acreditação do laboratório no domínio da pressão dinâmica na década de 80 (CE BNM N° 82-02-26).

A partir dos trabalhos do LMD-ENSAM/Paris, o conceito de padrão coletivo foi formulado. As experiências e os trabalhos realizados dentro do laboratório permitiram o desenvolvimento do método e das ferramentas necessárias para o cálculo de incerteza associada ao processo de calibração dinâmica para pressões com amplitude de 1 MPa (Oliveira, 2004).

Para realizar a calibração com amplitudes de pressão maiores que 1 MPa é necessário reavaliar os métodos e meios do processo calibração dinâmica em pressão, uma vez que em altas pressões ocorre a intensificação dos fenômenos físicos e chega-se aos limites dos dispositivos de calibração. Por exemplo, em (Oliveira, 2004) o autor descreve que a utilização de altas pressões no TC causa flutuações de pressão que contribuem para formação de ondas transversais, além de outros fatores que, também, contribuem à complexidade do processo, como a deformação e o rompimento da membrana.

Basicamente, esse trabalho tem como objetivo utilizar o mesmo método de calibração e cálculo de incerteza, utilizado em baixas pressões, para altas pressões ($> 1 \text{ MPa}$). Ou seja, desenvolver meios e/ou melhorias nos métodos já existentes que visem reduzir as fontes de incerteza e permitir a aplicação do método.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Em um processo de medição dinâmica, o transdutor passa por duas fases distintas: a fase transiente (dinâmica), cuja duração depende das características intrínsecas do transdutor e a fase contínua (estática), onde há uma estabilização da condição de medida. A caracterização completa de um transdutor deve descrever o seu comportamento nessas duas fases (dinâmica e estática).

Entretanto alguns tipos de transdutores não passam pela componente contínua e, dessa forma, não podem ser caracterizados estaticamente, sendo necessária a realização de uma calibração quase-estática, que entre outras características permite calcular a sensibilidade do transdutor. A caracterização quase-estática e em regime transiente compõem a calibração dinâmica.

A calibração dinâmica de transdutores de pressão é estudada desde a década de 60, sendo que em países da Europa e nos EUA, há trabalhos científicos e normas que descrevem o processo de calibração dinâmica. Na década de 90, o laboratório de metrologia dinâmica da escola de engenheiros *Arts et Métiers ParisTech*, em Paris-França, desenvolveu um método para o cálculo de incerteza associada ao processo. Esse método foi completamente implementado para amplitudes de pressão de até 1 MPa .

Com base nesse método de cálculo da incerteza associada a um processo de calibração dinâmica, este trabalho tem como objetivo geral aplicar o método para calibração em altas pressões, isto é para amplitudes maiores que 1 MPa , mantendo a mesma ordem de grandeza da incerteza.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Avaliar os dispositivos de calibração dinâmica em altas pressões disponíveis e executar modificações e atualizações tecnológicas que visem à redução das fontes de incertezas;
2. Montar e validar um tubo de choque de referência em altas pressões, que permitirá a intercomparação dos resultados no domínio frequencial;
3. Executar a calibração dinâmica em altas pressões;
4. Atualizar as ferramentas de cálculo de incerteza e de estudo dos sistemas.

1.1.3 Hipóteses

Tendo como referência os objetivos propostos foram formuladas as seguintes hipóteses, que serão verificadas no desenvolvimento e na conclusão do trabalho:

1. O método de calibração e cálculo de incerteza para baixas pressões é adequado para calibração em altas pressões;
2. O intervalo frequencial de trabalho do tubo de choque de referência em altas pressões é suficiente para permitir a intercomparação entre as baixas e altas frequências;
3. O método de cálculo de incerteza fornece resultados metrologicamente confiáveis.

1.2 Metodologia

Para atingir os objetivos propostos e verificar as hipóteses formuladas no item anterior adotou-se uma metodologia de trabalho, suficientemente, abrangente de forma a contemplar todos os aspectos científicos e tecnológicos da calibração dinâmica de transdutores de pressão, bem como, a construção e atualização de dispositivos e a realização dos ensaios. Nesse sentido, as seguintes o trabalho foi executado seguindo as etapas:

- Realização de uma revisão bibliográfica sobre metrologia dinâmica, principalmente no que concerne o cálculo de incerteza;
- Análise e atualização das ferramentas de cálculo da incerteza;
- Identificação das fontes de incertezas associadas aos dispositivos de calibração já existentes e desenvolvimento de modificações tecnológicas que visem a redução dessas incertezas. Execução e validação dessas modificações;
- Realização dos ensaios com os dispositivos de calibração;
- Montagem e validação do tubo de choque de referência para altas pressões;
- Realização dos ensaios com o tubo de choque de referência;
- Cálculo da incerteza e análise dos resultados;
- Redação do trabalho.

1.3 Organização da Tese

O trabalho é organizado em sete capítulos. O primeiro apresenta a introdução do trabalho, os objetivos, hipóteses e metodologia de trabalho. O segundo trata da metrologia dinâmica em pressão apresentando os dispositivos de calibração, os transdutores e as definições das

características dinâmicas e da função de transferência, além do método de calibração e de cálculo da incerteza.

O terceiro apresenta os dispositivos de calibração utilizados. São apresentadas as formulações teóricas e as características construtivas e operacionais, além da descrição das atualizações tecnológicas desenvolvidas nesses dispositivos.

O quarto apresenta a metodologia de cálculo da incerteza. É apresentada a formulação matemática do método, os resultados esperados em cada etapa e como essas se relacionam.

No quinto apresentam-se os resultados da calibração dinâmica em altas pressões, mostrando a evolução do valor da incerteza à medida que se aumenta a amplitude em pressão.

O sexto capítulo apresenta a conclusão e recomendações para futuros trabalhos. E no sexto e último capítulo apresenta-se as referências bibliográficas.

2. METROLOGIA DINÂMICA

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Inicia-se a apresentação da revisão bibliográfica apresentando as aplicações da medição dinâmica de grandezas físicas e em seguida apresenta-se a revisão da medição dinâmica de pressão.

A medição de variações dinâmicas de grandezas físicas está presente em diversas áreas da engenharia. Por exemplo, em (Cruz, 2005), o autor trata da turbulência em um motor de combustão interna. Os autores (Saggin et al., 2001) descrevem a correção do erro dinâmico na medição da temperatura atmosférica. Shu (2003) realiza a detecção de cavitação em turbinas hidroelétricas. Em (Lee et al., 2006), é apresentada uma abordagem para a medição dinâmica de micro-ondas em discos rígidos magnéticos. Roe (1982) realiza a medição de turbulência no desenvolvimento de aeronaves. Em (Paton, 2008), é realizada uma comparação interlaboratorial da medição dinâmica de escoamento de hidrocarbonetos. Brown (2000) apresenta a validação dos mecanismos de Biot no estudo de abalos sísmicos. Kluber et al. (1987) realizam ensaios balísticos e de explosivos.

Tratando mais especificamente da variação dinâmica de pressão, o trabalho de Hjelmgren (2002) apresenta uma série de exemplos, nos quais se faz necessária a medição dinâmica de pressão desde motores de combustão interna até ensaios balísticos, passando pela robótica, acústica, medicina, entre outros. Já o trabalho de Patrick (2004) apresenta uma discussão sobre a importância da calibração dinâmica de pressão na indústria aeronáutica.

Um ponto comum, a todos os trabalhos citados nos parágrafos anteriores, é a necessidade de se ter confiabilidade metrológica sobre o registro temporal da variação de uma grandeza física. E é nesse contexto que se insere a metrologia dinâmica, que é uma ciência que tem como objetivo básico a caracterização do comportamento dinâmico de transdutores, incluindo o cálculo da incerteza e o desenvolvimento de metodologias e dispositivos de calibração. O seu campo de atuação é vasto e abrange todas as áreas da engenharia, uma vez que constantemente depara-se com medições onde o conhecimento da variação rápida do mensurando é essencial à completa compreensão do fenômeno físico em estudo.

Apesar de haver uma constante demanda por medidas dinâmicas metrologicamente confiáveis, em geral, os fabricantes de transdutores não fornecem informações sobre as características dinâmicas e as respectivas incertezas, nem sobre os efeitos das grandezas de influência no comportamento dinâmico dos transdutores. Isso mostra que há uma lacuna metrológica, pois mesmo com a existência de normas que definem as características dinâmicas, métodos e dispositivos de calibração, há uma falta de normalização com relação aos métodos de cálculo da incerteza associada ao processo de calibração dinâmica (Damion, 1995 e Oliveira, 2004).

2.1.1 Calibração Dinâmica em Pressão

A medição dinâmica em pressão teve um grande impulso com o desenvolvimento dos transdutores piezoelétricos que, devido às suas características, tornou-se o transdutor “padrão” em pressão dinâmica (Oliveira, 2004). A partir da década de 60, buscou-se desenvolver metodologias e métodos capazes de caracterizar dinamicamente esses transdutores. A primeira grande contribuição veio com a publicação de um manual de métodos e meios para a calibração dinâmica de transdutores de pressão pelo governo dos EUA, por meio do *National Bureau of Standards*, (Schweppe et al., 1963). Esse manual mostra as soluções analíticas das equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico dos transdutores de pressão, os diferentes tipos de dispositivos que podem ser utilizados como geradores de sinais padrão de pressão dinâmica e o tratamento de sinais para a determinação das características dinâmicas, da função de transferência e da curva de resposta em frequência.

Na década de 70, nos EUA, foi publicada pela *The American Society of Mechanical Engineers* (ASME) a norma ANSI B88.1, 1972 – *A guide for the Dynamic Calibration of Pressure Transducer*. Em 1996 essa norma foi revisada, reeditada com pela *International Society of Automation* (ISA) com o número ISA 37.16 e em 2002 foi republicada. Esse guia apresenta as definições das propriedades dinâmicas dos transdutores de pressão nos domínios temporal e frequencial, além de considerações sobre os dispositivos de calibração, sistemas de aquisição, efeitos das grandezas de influências e montagens experimentais.

Nos anos 80 um grupo de pesquisa internacional, formado por vários pesquisadores de diversos países, foi montado pelo *National Institut of Standards and Technology* (NIST), como o objetivo de delimitar as necessidades dos usuários de transdutores de pressão dinâmica, além de definir os objetos de pesquisas futuras.

Paralelamente na França, o *Bureau National de Métrologie* (BNM), na década de 70, delegou ao *Laboratoire de Métrologie Dynamique* da *Ecole Nationale des Arts et Métiers* (LMD-ENSAM/Paris) a missão de realizar estudos no domínio da metrologia dinâmica de transdutores de pressão. Em 1977, o LMD-ENSAM/Paris publicou um boletim sobre os métodos e meios de calibração dinâmica (Damion, 1977a) e, em 1979, outro boletim (Damion, 1979) que tratava das aplicações da medição dinâmica de pressão foi publicado. Os estudos realizados pelo LMD-ENSAM/Paris durante a década de 70 levaram à acreditação do laboratório em 1982, pelo *Bureau national de métrologie* (BNM), no domínio: pressão dinâmica (CE BNM N° 82-02-26).

Outros trabalhos realizados pelo LMD-ENSAM, tendo como tema o desenvolvimento de novos métodos e dispositivos de calibração (Damion, 1993; Damion, 1995), levaram ao desenvolvimento do conceito de “padrão coletivo” em pressão dinâmica e ao seu respectivo cálculo de incerteza. Basicamente, esse conceito define que o padrão em pressão dinâmica é composto pelos dispositivos de calibração, pelo transdutor e a sua eletrônica associada, pelo tratamento do sinal e pelos procedimentos operacionais. Com base nisso, o laboratório começou o desenvolvimento do método de cálculo da incerteza e, com o objetivo de aumentar a repetitividade do processo, foi realizada a modernização dos sistemas de regulação das condições iniciais de ensaio.

Em 2004, o trabalho de Oliveira (2004) no LMD-ENSAM apresentou as ferramentas para o cálculo da incerteza associada à calibração dinâmica de transdutores de pressão para amplitudes de até 1 MPa . A tabela 2.1 (Oliveira, 2004) mostra o resultado da calibração dinâmica de um transdutor de referência para frequências até 1 kHz . O valor da incerteza é apresentado por intervalo de frequências, em porcentagem e em unidade de pressão, na segunda e terceira coluna, respectivamente.

Tabela 2.1 – Incertezas associadas a um processo de calibração dinâmica de um transdutor de referência, para amplitudes de até 1 MPa.

Intervalo de Frequência:	Incerteza Expandida [%]	Incerteza Expandida [kPa]
1 Hz 4 10 Hz	0,35	1,7
10 Hz 4 49 Hz	0,51	2,6
49 Hz 4 100 Hz	0,51	2,5
100 Hz 4 400 Hz	0,98	4,9
400 Hz 4 1 kHz	1,10	5,5

Atualmente, o LMD-ENSAM é responsável pela manutenção da referência francesa em pressão dinâmica e desenvolve trabalhos nas áreas de aperfeiçoamento dos dispositivos, na calibração dinâmica em meio líquido e no desenvolvimento de ferramentas para o cálculo de incerteza.

O trabalho de Bean (1993), nos EUA, discutiu o desenvolvimento de um padrão primário para a medição dinâmica de pressão e temperatura. O método proposto pelo autor requer uma fonte dinâmica e uma técnica de calibração. A fonte utilizada foi o tubo de choque e a técnica baseou-se na medição das propriedades de uma molécula diatômica por meio da espectroscopia a laser, uma vez que, a pressão é proporcional à frequência de vibração dos átomos de uma molécula diatômica ao longo do seu eixo. Para medir a temperatura usaram-se os níveis de energia rotacional das moléculas. A técnica da espectroscopia a laser utilizada foi a Raman Anti-Stokes Coerentes (CARS), que permite determinar o espectro CARS de uma molécula diatômica em um ambiente de pressão e temperatura dinâmica, com tempo de resposta da ordem do nano-segundo. Os testes apresentados foram realizados para um intervalo de pressão de 5 kPa a 1 MPa. Os resultados preliminares mostraram que a incerteza associada era menor que 5%.

No Brasil, o Laboratório de Metrologia Dinâmica da Universidade de Brasília (LMD-UNB) é o principal responsável pelos estudos no domínio da metrologia dinâmica em pressão. Os trabalhos desenvolvidos no LMD-UnB abordam os mais diversos temas ligados à metrologia dinâmica em pressão, entre os quais se pode citar: o relatório técnico sobre os métodos e meios de calibração dinâmica de transdutores de pressão (Vianna et al., 1993); a construção de um tubo de choque metrológico (Carvalho, 1993); a utilização de geradores periódicos de pressão (Diniz, et al 1995 e 1997); o estudo dos efeitos da curvatura da membrana no desempenho do tubo de choque (Barcelos Jr., 1999);

caracterização do dispositivo de abertura rápida (Fritsche, 1999); a influência da deformação da membrana na incerteza associada à calibração dinâmica em um tubo de choque (Vianna et al., 1999); o efeito da massa molecular na calibração dinâmica de transdutores de pressão (Oliveira et al., 2000) e a calibração dinâmica de transdutores de dióxido de carbono (Leódido, 2006).

O intercâmbio científico entre o LMD-UnB e o LMD-ENSAM iniciou-se na década de 80, com o desenvolvimento do estudo sobre a calibração dinâmica de transdutores de temperatura (Vianna, 1983). Desde então, houve o estreitamento das relações entre os laboratórios por meio da publicação conjunta de trabalhos, da intercomparação de resultados e do intercâmbio de recursos humanos e de tecnologia. Atualmente, existe um acordo de cooperação para o desenvolvimento de métodos e meios de calibração de transdutores de pressão para amplitudes maiores que 1 MPa . Vale ressaltar que o LMD-UnB é o único laboratório na América Latina a possuir experiência e os meios necessários para a realização da calibração dinâmica de transdutores de pressão.

2.1.2 Outros trabalhos sobre a calibração dinâmica em pressão

Jones et al. (1977) apresentaram técnicas fundamentais de interferometria para a medição e calibração dinâmica e quase-estática de transdutores de pressão. Nessas técnicas, utiliza-se a variação linear do índice de refração de um fluido quando a massa específica deste sofre pequenas variações. Para isso, utilizou-se um óleo de baixa viscosidade e com compressibilidade da ordem de 106 kPa , sendo que a variação máxima de pressão aplicada foi de 1 MPa . Nessas condições, a relação linear entre a massa específica e o índice de refração é satisfeita, a variação na temperatura é desprezível e a variação na pressão é proporcional ao índice de refração. No caso quase-estático, são utilizadas massas conhecidas para gerar a variação de pressão e calcular a sensibilidade do transdutor. No caso dinâmico geram-se variações periódicas de pressão por meio de um atuador mecânico.

Em 1986, a patente de um dispositivo de calibração dinâmica em pressão foi depositada no instituto de patentes dos Estados Unidos (Hess et al., 1987). Esse dispositivo utiliza um sistema hidráulico oscilatório para gerar variações de volume em uma câmara e,

consequentemente, variar a pressão. O sistema foi desenvolvido para pressões de $0,1$ a 2 psi ($\sim 0,70$ a 14 kPa) e frequências de 4 a 200 Hz .

A empresa Artec publicou, (Artec, 1976), um trabalho onde é apresentado o projeto de um dispositivo de calibração de transdutores de pressão com amplitude de 100 a 10.000 psi ($\sim 0,7$ a 70 MPa). O gerador de pressão dinâmica é, basicamente, um tubo de choque cujos diâmetros das câmaras de alta e de baixa pressão são bem diferentes. O trabalho não apresenta resultados, mas mostra a representação do degrau de pressão que se esperava que fosse gerado pelo dispositivo. No degrau há vários patamares de pressão devido às várias reflexões da onda de choque. Os resultados do trabalho apresentam uma estimativa de repetitividade do dispositivo menor que 3% .

Zhu Ming et al. (1994) apresentaram a utilização de um tubo de choque com água para a calibração em altas pressões (da ordem de 1000 MPa), onde uma carga explosiva era usada para gerar uma variação dinâmica de pressão. O tubo de choque utilizado era composto por um tubo com 30 mm de diâmetro e 550 mm de comprimento. A água era pressurizada dentro do tubo a uma pressão estática desejada e, então, uma carga explosiva de aproximadamente $0,1 \text{ g}$ era detonada no meio do tubo gerando uma onda de choque esférica que se propaga para todos os lados e é refletida pelas paredes do tubo. Quando a onda de choque chega ao fundo do tubo, ela é refletida e gera um degrau de pressão. Utiliza-se um transdutor padrão para fazer a calibração e os resultados mostram que o dispositivo pode ser usado para calcular a frequência de ressonância do transdutor. Entretanto há ruídos e não há considerações sobre a repetitividade e a incerteza.

Tomasi et al. (2003) apresentaram a proposta de um dispositivo para o estudo comparativo das propriedades dinâmicas de um transdutor de pressão. O dispositivo é capaz de gerar uma variação periódica e aperiódica através de um atuador piezoelétrico, com uma amplitude inicial de 7 MPa . O princípio de funcionamento é baseado na utilização de um piezo-atuador dinâmico de alta potência, que gera uma força sobre uma membrana de aço, que recobre uma câmara de pressão preenchida com um líquido de baixa compressibilidade, onde o transdutor a ser testado é montado. A deflexão da membrana de aço gera uma redução do volume da câmara de pressão e, consequentemente, um aumento da pressão. Com esse dispositivo era possível gerar dois tipos de variações de pressão. Para uma variação periódica, ocorre uma defasagem entre o sinal do atuador e a resposta do

transdutor. Entretanto, não há redução da amplitude e a frequência é da ordem de 300 Hz . Em uma variação aperiódica de pressão (degrau de pressão) o tempo de subida é de $1,2\text{ ms}$.

A seguir, são apresentados outros trabalhos que não estão ligados diretamente à metrologia dinâmica, mas que podem ser utilizados para aperfeiçoar o processo, especialmente os estudos que visam o aperfeiçoamento dos dispositivos de calibração.

Takano et al. (1984) desenvolveram um tubo de choque no qual se utiliza uma válvula pneumática de acionamento magnético no lugar de uma membrana. A vantagem desse método é evitar os efeitos da curvatura, do rompimento da membrana e dos fragmentos que se deslocam junto com a onda de choque. Entretanto, ocorre um aumento no tempo de subida do degrau de pressão.

Em (Sharifian et al., 2006), os autores apresentaram a avaliação de um transdutor de pressão que utiliza um diafragma fixado a uma fibra ótica, que pode medir flutuações com frequência de até 250 kHz e com um tempo de resposta muito pequeno. Devido a essa característica o transdutor foi calibrado utilizando um tubo de choque e os resultados mostraram um erro máximo de 10% a 30% , em função da histerese, dos efeitos viscoelásticos do diafragma e do adesivo utilizado para fixar a fibra ótica.

Uma das principais fontes de incerteza associada ao uso do tubo de choque como gerador de variação rápida de pressão está ligada à curvatura e à ruptura da membrana, que é o que dá início a formação da onda de choque. O ideal seria que não houvesse curvatura e que a ruptura da membrana fosse completa e instantânea. Entretanto, em muitos casos, a ruptura não é completa. Dessa forma alguns trabalhos foram executados a fim de avaliar a influência dos efeitos da membrana sobre os processos no interior do tubo de choque. Daru et al. (1993) realizaram um estudo numérico e experimental sobre os efeitos da deformação da membrana no escoamento dentro de um tubo de choque. A simulação numérica mostrou que no rompimento da membrana, a curvatura dá origem a formação de ondas de choque transversais que se refletem na parede do tubo e retornam ao centro, gerando uma onda de pressão esférica. Essa onda propaga-se na região entre as ondas de rarefação e de choque. A propagação dessa onda é responsável, em grande parte, pelas oscilações de pressão sobre os degraus de pressão gerados em um tubo de choque. Barcelos (2002) mostrou um estudo numérico e experimental dos efeitos da curvatura da membrana sobre o escoamento no

interior do tubo de choque. Vianna et al. (1999) mostraram o efeito a utilização de diferentes tipos de membranas de celofane.

Sasoh et al. (2006) publicaram uma nota técnica na qual é proposta a utilização de um laser para remover completamente a membrana. Para isso, utilizou-se o gerador laser do Instituto de Física Geral de Moscou, que produz raios laser com uma seção transversal de até $150 \times 150 \text{ mm}$ e 380 J de energia em $2,5 \mu\text{s}$. Os resultados mostraram que para uma membrana de Mylar ou celofane, uma energia de 70 J foi a que apresentou os melhores resultados. Os autores verificaram que a técnica é viável, mas que ainda é necessário avaliar a utilização de outros geradores de lasers e de outros materiais como membrana.

No que se refere à incerteza associada e aos erros nas medições dinâmicas tem-se a publicação de alguns trabalhos, principalmente, sobre a aquisição, o tratamento da resposta do transdutor e a variação temporal da incerteza.

Melville (1959) apresentou o desenvolvimento de um oscilador hidráulico para a calibração dinâmica de sistemas de aquisição, que é utilizado para a medição da pressão sanguínea através de cateteres inseridos em uma veia. O dispositivo permite o cálculo da resposta em frequência do sistema de aquisição.

Em (Hessling, 2006) foi apresentado um método para a estimação dos erros em medições dinâmicas. O objetivo era determinar o erro dinâmico linear no domínio temporal, supondo conhecida a função de resposta em frequência do sistema de medição. Esse erro dinâmico pode ser incluído no cálculo da incerteza como um erro sistemático não corrigido. Quando sinais dinâmicos são medidos, uma resposta dinâmica não perfeita do sistema gera distorções excessivas nos erros estáticos, além dos casos onde a resposta temporal do sistema é muito menor que a escala de variação do sinal. Entretanto, em uma calibração dinâmica o erro não pode ser medido diretamente no domínio temporal, sendo necessário determinar a função de transferência do sistema de medição (amplitude e fase). O método é chamado de erro da resposta e pode ser incluído no cálculo da incerteza associado à medição como o valor máximo de um erro sistemático não corrigido.

Elster et al. (2007) apresentaram uma análise da medição dinâmica e da variação temporal da incerteza usando um modelo de segunda ordem. Esse método parte do preceito de que

as características do modelo são conhecidas e que o comportamento do transdutor é descrito por um modelo segunda ordem. Basicamente, a metodologia tem como objetivo determinar, em tempo real, o valor do mensurando a partir da resposta do transdutor, bem como da incerteza associada no domínio temporal. Para determinar o valor do mensurando foram utilizadas as características do modelo que descrevem o transdutor. Essas características foram determinadas a partir de uma calibração dinâmica, de filtros FIR passa baixa e de um diferenciador. Para o cálculo da incerteza foi utilizado o Guia para Expressão das Incertezas de Medição – GUM (ISO-GUM, 1995).

Em 2008, Hessling publicou dois trabalhos. Em (Hessling, 2008a), é proposto um novo método de correção dinâmica no domínio temporal, que propõe a utilização da caracterização parametrizada do sistema de medição e uma amostra de sinais, para corrigir a resposta do sistema através de filtros digitais. Esse tipo de abordagem permite separar a correção do sistema da sua caracterização, tornado possível a utilização de técnicas de otimização. Esse resultado, combinado com a determinação do erro dinâmico apresentado no parágrafo anterior, gera um ferramenta de correção e otimização de sistemas de medição sem a necessidade de modificar ou trocar o equipamento físico. Em (Hessling, 2008b) o autor apresenta uma abordagem da metrologia dinâmica na avaliação de sistemas de medição invariáveis no tempo. É definido o erro dinâmico e as metodologias para calculá-lo. Com isso, é possível, corrigir e otimizar o sistema de medição, que é composto não somente do transdutor, mas também da eletrônica associada (por exemplo, um amplificador de carga).

Hessling (2009) apresentou uma proposta de extensão da metodologia de cálculo da incerteza estática, proposta pelo GUM, ao caso dinâmico. Esse trabalho é semelhante ao apresentado por Esler et al. (2006), mas nesse caso, a incerteza é estimada no domínio frequencial através das transformadas z (discreto) ou s (contínuo).

2.2 MEIOS DE CALIBRAÇÃO

Quando um mensurando varia no tempo os processos de calibração estática, em sua maioria, não fornecem resultados metrologicamente confiáveis. Assim, é necessária a realização de um processo de calibração dinâmica, cujo objetivo principal é estudar o comportamento dinâmico de um sistema de medição a partir da determinação experimental

da sua função de transferência e de suas características dinâmicas. Para isso, é necessário submeter o sistema a uma entrada (estímulo) conhecida e medir a sua saída (resposta).

Vários tipos de entrada podem ser utilizados tais como degrau, impulso, variação periódica, etc. O tipo de estímulo define qual dispositivo de calibração deverá ser utilizado. Esses dispositivos são divididos em dois grupos de acordo com o método utilizado para gerar a variação do mensurando: o método harmônico e o método transitório.

No primeiro grupo, a função de resposta em frequência é utilizada para determinar diretamente a função de transferência. O segundo método determina a função de transferência quando o transdutor é submetido a um impulso ou a um degrau de pressão. A diferença entre os métodos está, fundamentalmente, no tipo de variação de pressão gerado.

No caso da calibração dinâmica em pressão, os dispositivos utilizados são divididos em dois grupos: os dispositivos periódicos e os dispositivos aperiódicos. O primeiro grupo utiliza uma variação periódica de pressão, geralmente senoidal, enquanto, que os dispositivos do segundo geram degraus ou impulsos de pressão. Com isso, a função de transferência do transdutor pode ser determinada (Diniz, 1994).

2.2.1 Dispositivos Geradores de Pressão Periódicos

Os dispositivos periódicos geradores de pressão dinâmica são caracterizados pela geração de uma variação de pressão, geralmente senoidal, que permite determinar a função de resposta em frequência.

Esses dispositivos, basicamente, possuem uma câmara (onde são fixados os sensores) e um sistema de excitação, que gera a variação de pressão por meio da mudança de volume do fluido dentro da cavidade ou pelo controle do fluxo na saída da câmara. Nos dois casos, as modulações são obtidas por motores que geram uma variação senoidal sobre o volume da câmara ou na saída desta (Fritsche, 2002).

Quanto ao tipo de cavidade os dispositivos periódicos podem ser classificados em dois modos distintos de operação: ressonante ou não-ressonante. No primeiro modo, opera-se na frequência de ressonância da cavidade, obtendo um aumento da amplitude do sinal.

Entretanto, para alterar a frequência de ensaio, é necessário alterar as características geométricas da cavidade. No segundo modo de operação, a faixa de trabalho em frequência é limitada pela frequência de ressonância da cavidade, ou seja, quanto mais alta for essa frequência maior será a faixa de trabalho. Entretanto, a amplitude do sinal é baixa. A combinação dos tipos de cavidade, sistemas de excitação e motores de modulação possibilita a montagem de diferentes tipos de dispositivos (Diniz, 1994; Fritsche, 2002 e Schweppe et al., 1963).

Os limites em amplitude do sinal de pressão dos dispositivos periódicos são determinados pelas características geométricas da cavidade (altas frequências) e pelo controle da modulação (baixas frequências). Os limites superiores em frequência são também determinados pela modulação e pela geometria da cavidade. De forma geral, os dispositivos periódicos não são meios de calibração absolutos, ou seja, é necessário utilizar um transdutor de referência (Oliveira, 2004). As figuras 2.1 e 2.2 (Oliveira, 2004) mostram os limites em pressão e frequência de alguns dispositivos periódicos.

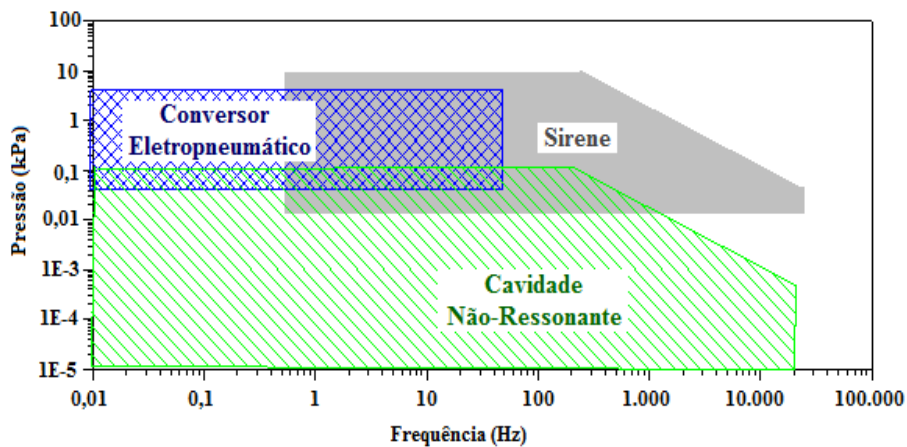


Figura 2.1 –Domínio de utilização de dispositivos periódicos.

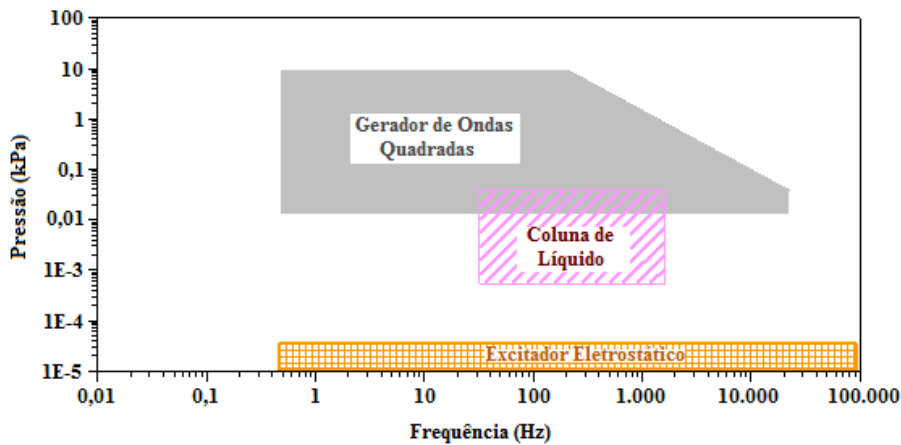


Figura 2.2 – Domínio de utilização de dispositivos periódicos particulares.

2.2.1.1 Modulação por variação da perda de carga

Nesse tipo de dispositivo, a cavidade é alimentada por um fluxo à pressão constante e um sistema de modulação varia a perda de carga na saída gerando, assim, a variação de pressão. A seguir são apresentadas a descrição e o funcionamento de alguns dispositivos.

Sirene

O dispositivo é do tipo cavidade não ressonante que é alimentada por um fluxo de gás a pressão constante. A variação da perda de carga é feita por um disco perfurado que, em rotação, varia a seção de saída. A figura 2.3 (Oliveira, 2004) mostra o esquema simplificado de um dispositivo sirene.

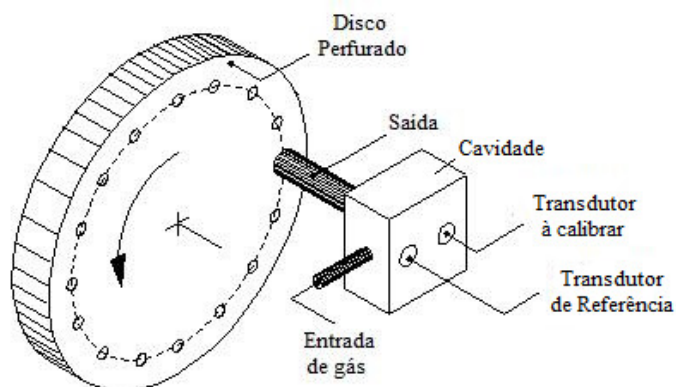


Figura 2.3 – Esquema simplificado de um dispositivo do tipo sirene.

Conversor Eletropneumático

Esse dispositivo utiliza o equilíbrio entre uma força produzida por uma bobina e a força produzida pela pressão na cavidade de comando. Segundo Oliveira (2004), a incerteza da repetitividade é da ordem de 0,3% para frequências inferiores a 10 Hz. Um esquema simplificado desse dispositivo é apresentado na figura 2.4 (Oliveira, 2004).

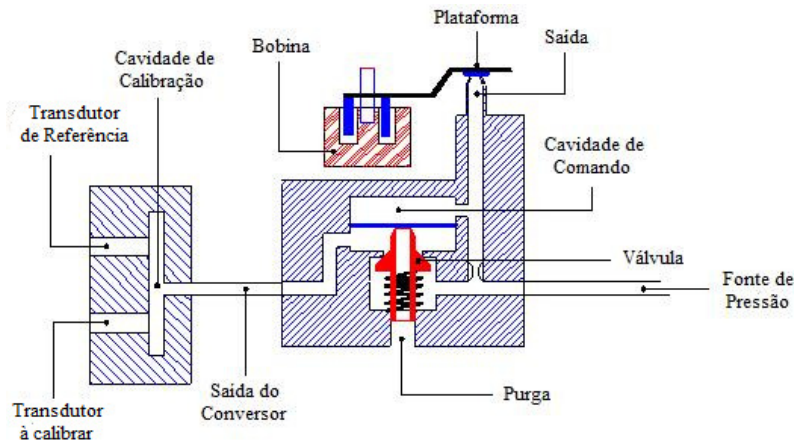


Figura 2.4 – Esquema simplificado de um conversor eletropneumático.

2.2.1.2 Modulação por variação do volume da cavidade

Nesse tipo de dispositivo, a variação de volume é realizada pelo movimento periódico de uma peça dentro da cavidade. A seguir, são apresentadas a descrição e o funcionamento de alguns dispositivos com modulação por variação do volume da cavidade.

Cavidade não ressonante com modulação de volume

Esse dispositivo é composto por uma cavidade, um sistema biela/pistão e um motor. A variação da pressão é proporcional à rotação do motor. O limite inferior em frequência é imposto pelas características do motor e pela estanqueidade entre o pistão e a parede da cavidade e o limite superior é a frequência de ressonância da cavidade (Leódido, 2003). A figura 2.5 (Fritsche, 2002) ilustra uma cavidade não ressonante com modulação de volume.

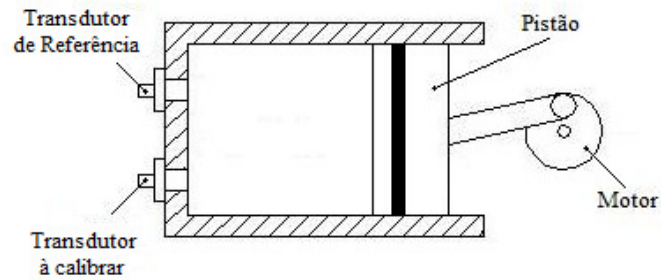


Figura 2.5 – Cavidade não ressonante com modulação de volume.

Vaso de Compressão

Nesse dispositivo há uma membrana e uma cavidade, onde são fixados os transdutores de referência e a calibrar. Na câmara de compressão há uma membrana de alto-falante que, pelo seu movimento gera a variação de volume, conforme mostrado na figura 2.6 (Oliveira, 2004). Esse tipo de dispositivo só pode ser utilizado em calibrações dinâmicas por comparação, pois o campo de pressão não pode ser determinado de forma precisa devido às distorções geométricas da membrana. A complexidade da montagem membrana/parede é a principal desvantagem desse dispositivo, pois é nessa interface que se estabelece o nível de pressão, que é função da frequência e do ponto de medição. Por isso, os transdutores a calibrar e de referência devem ser montados da forma mais simétrica possível (Fritsche, 2003).

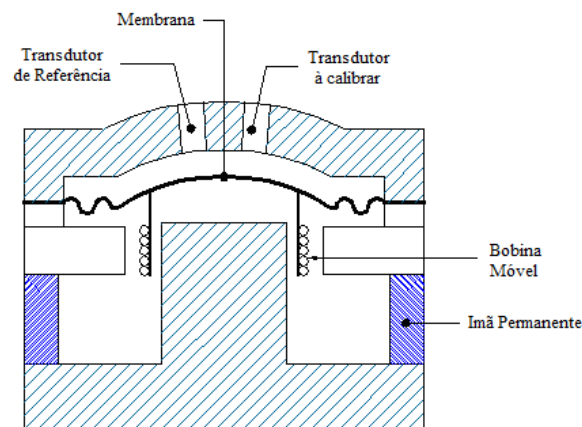


Figura 2.6 – Esquema de um vaso de pressão.

Ressonador Acústico

O princípio de funcionamento do ressonador acústico é o mesmo do vaso de pressão, isto é, a modulação de uma membrana de alto-falante gera a variação de pressão. Entretanto, no

ressonador acústico, a frequência de modulação da membrana é bem próxima da frequência de ressonância da cavidade. Então, para se trabalhar com diferentes frequências é necessário modificar a geometria da cavidade e ajustar a frequência do alto-falante.

A vantagem desse dispositivo em relação ao vaso de pressão está na amplitude do sinal que, nesse caso, é bem maior. A figura 2.7 (Oliveira, 2004) mostra detalhes desse dispositivo.

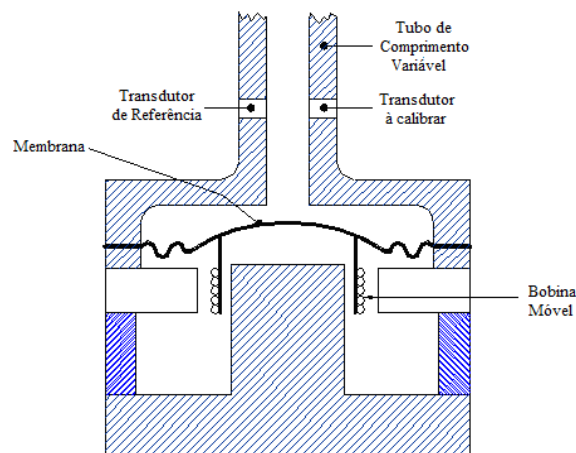


Figura 2.7 – Esquema de um ressonador acústico.

2.2.1.3 Outros dispositivos

Coluna de Líquido

O dispositivo de coluna de líquido possui características semelhantes ao dispositivo tipo cavidade, mas não se enquadra nessa categoria. O método da coluna de fluido ilustrado na figura 2.8 (Diniz, 1994), consiste na utilização do campo hidrostático de pressão gerado por uma coluna de fluido submetida a uma aceleração senoidal. Dessa forma, o campo de pressão depende da densidade do fluido, da altura da coluna e da aceleração.

O uso de excitador mecânico de vibração permite a aplicação de vários valores de amplitude e de frequência de sinal (Diniz et al., 1995 e Leódido, 2003). A desvantagem está na pouca repetitividade e na exigência de um controle rígido da temperatura do fluido. Os limites de trabalho em frequência desse dispositivo dependem da frequência de ressonância da cavidade e da rigidez estrutural do conjunto (Diniz et al., 1995).

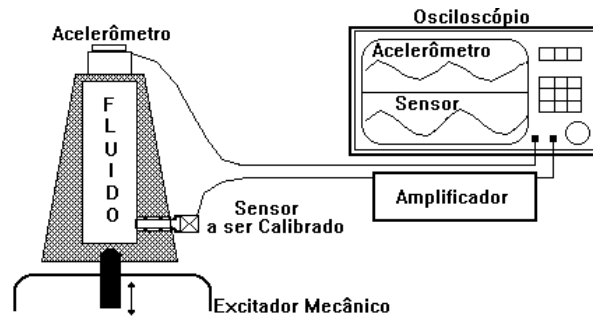


Figura 2.8 – Esquema do gerador periódico de coluna de líquido.

Como os transdutores são submetidos a uma aceleração transversal, esse método de calibração é recomendado para transdutores mais resistentes aos efeitos dessa aceleração. O dispositivo de coluna de líquido montado no LMD-UnB trabalha com um nível de pressão inferior a $3,5 \text{ kPa}$ e com um intervalo de frequência entre 40 e 1900 Hz com 3% de incerteza expandida (Diniz et al., 1997).

Gerador de Ondas Quadradas

Esse dispositivo é constituído de uma ou mais cavidades não ressonantes, de um modulador de perda de carga e de um motor elétrico que gira a (s) cavidade (s), conforme ilustrado na figura 2.9 (Oliveira, 2004). Na posição (a), a cavidade 1 fica sobre pressão; a posição (b) marca o fim do degrau de pressão e na posição (c), a cavidade 1 retorna à pressão inicial e a cavidade 2 é submetida à pressão. A principal característica desse dispositivo é a geração de um sinal retangular de pressão.

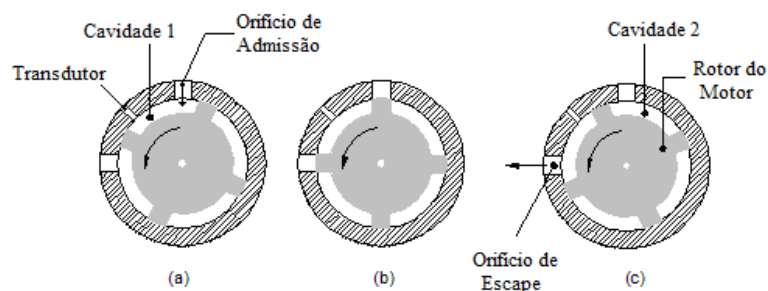


Figura 2.9 – Gerador de Ondas Quadradas.

O tempo de subida é função da amplitude da pressão de admissão, do volume da cavidade e da rotação. O volume das cavidades deve ser o menor possível, a fim de reduzir o tempo de subida e aumentar a frequência de trabalho do dispositivo. A rotação do motor também

interfere no tempo de subida, rotações muito altas causam problemas na admissão na cavidade. Em altas frequências esse dispositivo não ultrapassa 1 kHz (Oliveira, 2004).

Excitador Eletrostático

Segundo Oliveira (2004), este dispositivo utiliza um campo de força comparável a um campo de pressão. Esse campo de força é criado por uma diferença de potencial que é aplicada a uma grade metálica, com superfície isolante, onde são fixados os transdutores, como ilustrado na figura 2.10 (Oliveira, 2004). Esse dispositivo é adequado para transdutores como a membrana exposta, de forma a manter o elemento sensível em contato com o revestimento, o que permite trabalhar com altas frequências e baixas pressões. A calibração deve ser feita com o uso de um transdutor de referência, a fim de evitar a distorção do campo eletrostático.

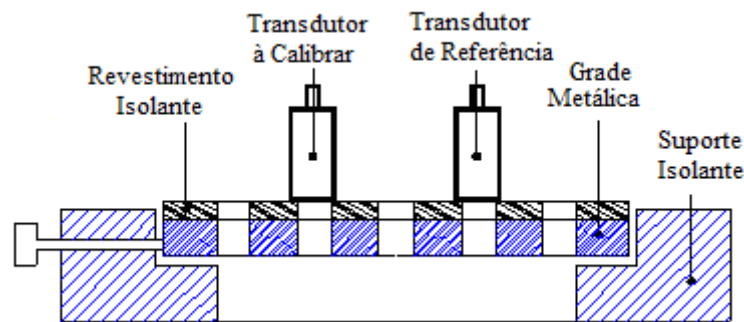


Figura 2.10 – Esquema de um Excitador Eletrostático.

2.2.2 Dispositivos Geradores Aperiódicos de Pressão

Os dispositivos geradores aperiódicos de pressão são equipamentos que geram variações aperiódicas de pressão como degraus ou impulsos (Bean, 1993). Uma das características principais é a capacidade de trabalhar nos domínios de baixas e altas frequências. A figura 2.11 (Damion, 1993a) mostra os limites em pressão e frequências desses dispositivos.

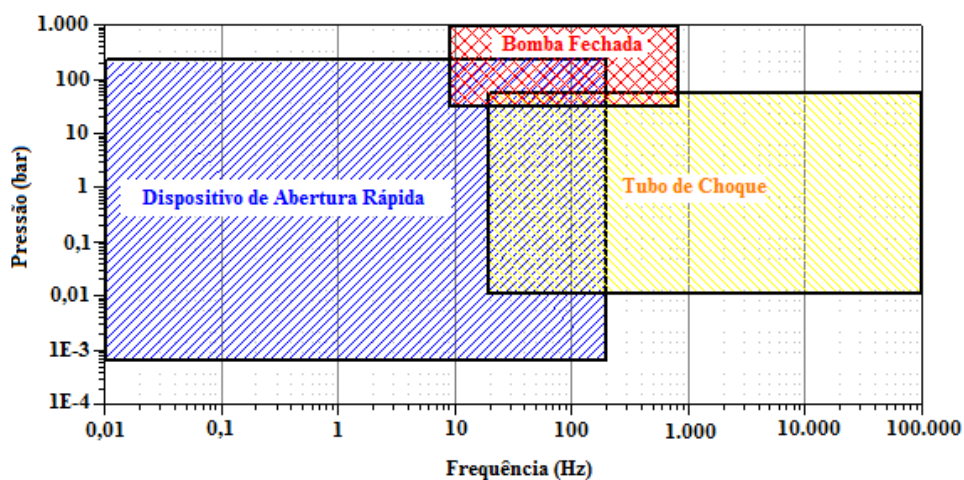


Figura 2.11 – Limites de utilização de alguns dispositivos aperiódicos.

Dispositivo de Abertura Rápida

O Dispositivo de Abertura Rápida (DAR) é composto, basicamente, por duas câmaras (câmara maior e câmara menor) com a razão de volume da ordem de mil ou superior, separadas por um sistema de comunicação. Os transdutores são fixados na câmara menor. Inicialmente, as câmaras são submetidas a pressões diferentes e o degrau de pressão é gerado quando o sistema de comunicação é acionado sendo, então, possível gerar um degrau de pressão positivo ou negativo dependendo da pressão da câmara maior em relação à câmara menor. A figura 2.12 mostra um esquema simplificado de um DAR. No detalhe, são ilustrado exemplos de um degrau positivo e um degrau negativo.

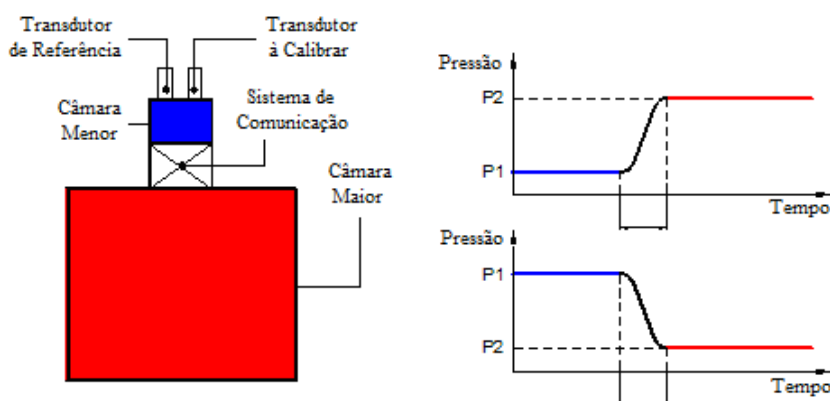


Figura 2.12 – Esquema simplificado de um DAR.

Enquanto o sistema de comunicação estiver acionado a pressão da câmara menor permanece constante, ou seja, o degrau pode ser infinito, o que permite realizar calibrações em baixas frequências. Então, o limite inferior depende da capacidade de armazenamento

do sistema de aquisição. Em altas frequências, o limite depende do volume da câmara menor e da velocidade de abertura do sistema de comunicação (Leódido, 2003).

O DAR pode ser usado para calibrações por comparação, mas também como um dispositivo absoluto, ou seja, usado para realizar a calibração de transdutores de referência dentro dos limites em frequência do dispositivo. Outra utilização para o DAR é a calibração quase-estática, onde se utilizam os patamares superiores e inferiores do degrau para calcular a sensibilidade do transdutor (Damion et al., 2003).

O LMD-ENSAM possui uma família de DAR para baixas e altas pressões que são utilizados para calibrações dinâmicas em baixas frequências e para calibrações quase-estáticas. O LMD-UnB possui um DAR para baixas pressões e um DAR para altas pressões sendo que este último está em fase de fabricação e montagem. A figura 2.13 (Fritsche, 2003) mostra um esquema do dispositivo do LMD-UnB.

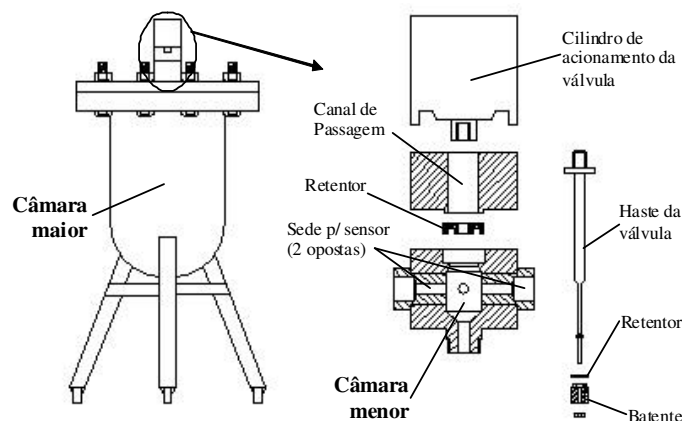


Figura 2.13 – Dispositivo de Abertura Rápida (DAR) do LMD-UnB.

Bomba Fechada

A bomba fechada é um dispositivo capaz de gerar pulsos de pressão de grande amplitude por meio da detonação de uma pequena carga explosiva. Ela é composta de uma câmara, de uma carga explosiva e de uma membrana que separa a câmara do ambiente. A figura 2.14 (Fritsche, 2002) mostra um esquema simplificado desse dispositivo.

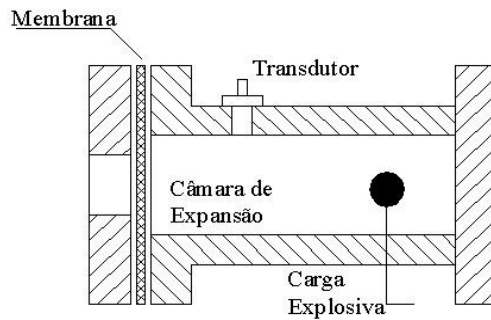


Figura 2.14 – Esquema simplificado de uma bomba de pressão.

O degrau de pressão pode ter duração infinita ou finita, possibilitando a calibração em altas e baixas frequências com grandes amplitudes de pressão. A duração do degrau é o tempo entre a explosão e o rompimento da membrana, caso isso ocorra, junto com a explosão, haverá um impulso no lugar do degrau, permitindo, assim a calibração em altas frequências. Quando a membrana permanece intacta, o degrau pode ter duração infinita, permitindo a calibração em baixas frequências.

A desvantagem desse dispositivo está na baixa repetitividade, uma vez que se utiliza a explosão de uma carga como fonte da variação de pressão. Logo, se faz necessário utilizar um transdutor de referência. No caso de calibração em altas frequências, o rompimento da membrana também interfere na repetitividade.

O limite superior em frequência depende da velocidade da reação química na explosão e do volume da câmara. O limite inferior depende da membrana e do resfriamento da câmara após a explosão.

Tubo de Choque

O tubo de choque é composto por dois tubos de comprimentos diferentes separados por uma membrana. Os tubos são denominados câmara de alta pressão ou tubo indutor e câmara de baixa pressão ou tubo induzido, e possuem volumes da mesma ordem de grandeza. O degrau de pressão gerado é finito e de curta duração. Os transdutores são fixados na câmara de baixa pressão tanto no fundo como na parede. A figura 2.15 mostra um esquema simplificado de um tubo de choque.

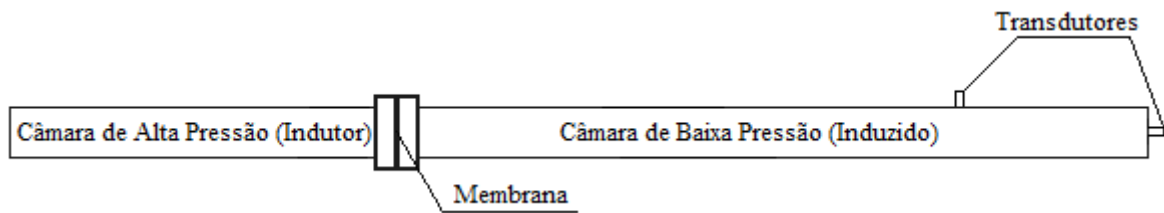


Figura 2.15 – Representação simplificada de um tubo de choque.

As câmaras são pressurizadas separadamente, de forma a obter uma diferença de pressão, sendo a pressão na câmara de alta maior que na câmara de baixa. Os processos dentro do tubo de choque são iniciados com a ruptura da membrana. Com isso, há a formação de uma onda de choque que se propaga na câmara de baixa pressão, e é refletida no fundo do tubo. A passagem da onda pelo tubo indutor gera um degrau de pressão que pode ser medido por um transdutor fixado na parede. A reflexão da onda no fundo gera outro degrau de pressão que pode ser medido pelo transdutor ali fixado. A duração dos degraus depende do comprimento total do tubo. Degraus de velocidade e temperatura também são gerados no tubo de choque.

O tubo de choque pode ser usado como um dispositivo absoluto ou para calibrações por comparação. O tempo de subida do degrau é da ordem de microssegundos, o que permite determinar a função de transferência experimental do transdutor em altas frequências. O uso do tubo de choque em baixas e médias frequências depende do seu comprimento (Carvalho, 1995).

O desenvolvimento dos processos aerotermodinâmicos no tubo de choque e, conseqüentemente, a qualidade metrológica do degrau de pressão depende diretamente das condições iniciais de pressão das câmaras, da rigidez da estrutura, da deformação e do rompimento da membrana, da qualidade superficial do interior do tubo e dos procedimentos de ensaio (Damion, 1993b e Carvalho, 1995).

Gerador de Impulso

O gerador de impulso tem o mesmo princípio de funcionamento de um pêndulo de impacto ou de uma massa em queda livre, ou seja, utiliza a transformação da energia cinética de uma massa em pressão por meio do impacto da massa contra um pistão fixado a uma câmara de pressão (Oliveira, 2004).

Geralmente, utiliza-se um meio líquido no lugar de um gasoso, devido à compressibilidade. A utilização do gerador de impulso como dispositivo absoluto não é recomendada, uma vez que a presença de micro bolhas de ar no líquido causam problemas de forma e amplitude da impulsão, além da interferência do atrito entre o pistão e a parede da cavidade. Na figura 2.16 é apresentado um esquema de geradores de impulso (Oliveira, 2004). Em (a), é mostrado um gerador de impulso por impacto e em (b), um gerador de impulso por queda livre.

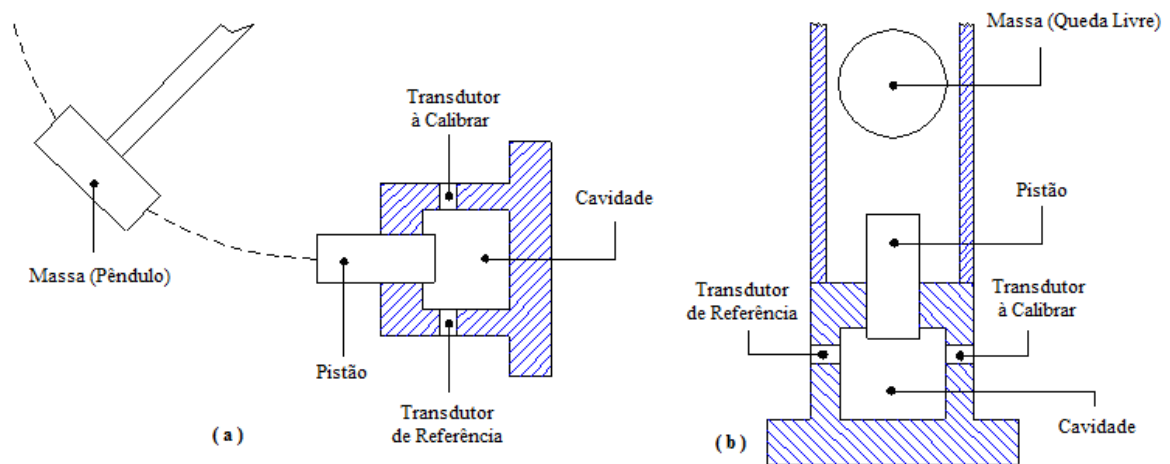


Figura 2.16 – Esquema de geradores de impulso.

2.3 METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO

Em uma calibração estática, o transdutor é caracterizado pela curva de calibração e pela relação entre o valor de saída (resposta do transdutor) e o valor de entrada (referência), sendo, assim, definida a sensibilidade estática do transdutor.

Nos casos onde há uma variação rápida do mensurando ou quando o transdutor não passa pela componente contínua (a resposta do transdutor não entra em regime permanente, por exemplo, o comportamento de transdutores piezoelétricos) é necessário realizar uma calibração dinâmica, que tem como principal objetivo a determinação experimental da função de transferência. Outras características dinâmicas podem, também, ser determinadas, entre elas: o tempo de subida, o tempo de resposta, o *overshoot* e o amortecimento (Bentley, 1988; Damion, 1993a; Damion, 1993b).

A função de transferência experimental descreve o comportamento do transdutor e pode ser determinada a partir da resposta do transdutor quando este é submetido a uma entrada conhecida. A função de transferência fornece uma descrição completa das características dinâmicas do sistema e é uma característica intrínseca do transdutor, independente do tipo e da magnitude da entrada à qual ele é submetido.

2.3.1 Função de Transferência

A transformada de Laplace é uma ferramenta matemática que transforma problemas de valores iniciais (PVI) em equações algébricas, permitindo que a solução do PVI seja encontrada sem o cálculo de integrais e derivadas (Sodré, 2003). A transformada de Laplace de uma função f qualquer é definida como:

$$L[f(t)] = \bar{f}(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} \cdot f(t) \cdot dt \quad \text{Eq. 2.1}$$

A função de transferência de um elemento é definida como “a razão entre a transformada de Laplace da saída $\bar{O}(s)$ e a transformada de Laplace da entrada $\bar{I}(s)$, com as condições iniciais iguais a zero”.

$$G(s) = \frac{\bar{O}(s)}{\bar{I}(s)} \quad \text{Eq. 2.2}$$

Para um sistema com n elementos, a função de transferência global do sistema é igual ao produto das funções de transferência de cada elemento (Bentley, 1988 e Hansman, 1999).

$$G(s) = \frac{\bar{O}(s)}{\bar{I}(s)} = G_{e1}(s) \cdot G_{e2}(s) \cdot \dots \cdot G_{en}(s) \quad \text{Eq. 2.3}$$

2.3.2 Modelo Matemático de um Transdutor

Equações diferenciais ordinárias com coeficientes constantes (sistemas lineares invariantes no tempo) são os modelos matemáticos mais usados para avaliar a resposta dinâmica de um sistema de medição ou de um transdutor. Nessa teoria, a relação entre qualquer entrada e

saída assume a forma da equação 2.4, onde: a_i ($0 \leq i \leq n$) e b_j ($0 \leq j \leq m$) são constantes (Doebelin, 1983; Sydenham, 1999 e Villa, 2000).

$$a_n \frac{d^n O}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} O}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dO}{dt} + a_0 \cdot O(t) = b_m \frac{d^m I}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} I}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dI}{dt} + b_0 \cdot I(t) \quad \text{Eq. 2.4}$$

Outro método que pode ser usado na análise da resposta dinâmica de um transdutor, consiste na determinação de parâmetros de um modelo matemático a partir dos sinais experimentais (Villa, 2000).

Elemento de Ordem Zero

O caso mais simples de um transdutor ou de um sistema de medição é o elemento de ordem zero, que é descrito pela equação 2.5 (Doebelin, 1983). Nesse caso, não há nenhum termo dependente da frequência, ou seja, a saída terá mesma a forma de tempo da entrada (Sydenham, 1999). “Então, um elemento de ordem-zero representa a resposta dinâmica ideal” (Doebelin, 1983). Um exemplo de elemento de ordem zero é o strain gage resistivo.

$$O(t) = \frac{b_0}{a_0} \cdot I(t) \quad \text{Eq. 2.5}$$

A relação entre as constantes b_0 e a_0 na equação 2.6 define a sensibilidade estática como sendo,

$$K = \frac{b_0}{a_0} \quad \text{Eq. 2.6}$$

Elementos de Primeira Ordem

Na equação 2.4, assumindo que a_i é igual a zero para $1 < i \leq n$, chega-se a equação 2.7 que define um elemento de primeira ordem (Doebelin, 1983 e Villa, 2000).

$$a_1 \cdot \frac{dO}{dt} + a_0 \cdot O(t) = b_0 \cdot I(t) \quad \text{Eq. 2.7}$$

Dividindo a equação 2.7 pela constante a_0 , observa-se que no segundo termo aparece a sensibilidade estática K e a relação a_1/a_0 define a constante de tempo (τ) de um elemento.

Dessa forma, tomando $D = d/dt$, a equação 2.7 pode ser reescrita como (Doebelin, 1983 e Villa, 2000):

$$(\tau \cdot D + 1) \cdot O(t) = K \cdot I(t) \quad \text{Eq. 2.8}$$

Segundo Doebelin (1983), a unidade da constante K é a relação entre a unidade da resposta e a unidade do estímulo. Dessa forma, para um elemento de qualquer ordem, K sempre terá o mesmo significado físico, isto é, a quantidade da resposta por unidade do estímulo, quando essa for estática. Da equação 2.8 pode-se definir a função de transferência de um elemento de primeira ordem como sendo,

$$\frac{O}{I}(s) = G(s) = \frac{K}{(\tau \cdot s + 1)} \quad \text{Eq. 2.9}$$

Um exemplo de desempenho dinâmico de primeira ordem é a resposta de um transdutor de temperatura submetido a uma variação rápida. No tempo zero ($t = 0$) a temperatura do transdutor é igual à temperatura do fluido e essa é subitamente elevada. O comportamento dinâmico é descrito pelo balanço de calor no elemento sensível e, com algumas simplificações, chega-se a equação 2.10 (Bentley, 1988).

$$UA \cdot (\Delta T_F - \Delta T) = MC \cdot \frac{d\Delta T}{dt} \Rightarrow MC \cdot \frac{d\Delta T}{dt} + UA \cdot \Delta T = UA \cdot \Delta T_F \quad \text{Eq. 2.10}$$

Comparando as equações 2.7 e 2.10, verifica-se que $a_0 = b_0 = UA$, $a_1 = MC$ e que a constante de tempo e a sensibilidade estática são definidas pela equação 2.11.

$$K = \frac{b_0}{a_0} = \frac{UA}{UA} = 1 \quad \text{e} \quad \tau = \frac{a_1}{a_0} = \frac{MC}{UA} \quad \text{Eq. 2.11}$$

Com a equação 2.11 e aplicando a transformada de Laplace na equação 2.10, tem-se a função de transferência.

$$G(s) = \frac{\Delta T}{\Delta T_F}(s) = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad \text{Eq. 2.12}$$

Elementos de Segunda Ordem

Na equação 2.4 fazendo $a_i = 0$ para $2 < i \leq n$ chega-se a equação 2.13 que define o comportamento dinâmico de um elemento de segunda ordem (Doebelin, 1983 e Villa, 2000).

$$a_2 \cdot \frac{d^2 O}{dt^2} + a_1 \cdot \frac{dO}{dt} + a_0 \cdot O(t) = b_0 \cdot I(t) \quad \text{Eq. 2.13}$$

Os parâmetros matemáticos a_2 , a_1 , a_0 e b_0 , são reduzidos a três características físicas do elemento: a sensibilidade estática (K), que é definida pela equação 2.6; a frequência natural (ω_n) e o fator de amortecimento (ξ), definidos pelas equações 1.14 e 1.15, respectivamente.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}} \quad \text{Eq. 2.14}$$

$$\xi = \frac{a_1}{2 \cdot \sqrt{a_0 \cdot a_2}} \quad \text{Eq. 2.15}$$

Com isso, a equação 2.13 pode ser reescrita como:

$$\left(\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2 \cdot \xi \cdot D}{\omega_n} + 1 \right) O(t) = K \cdot I(t) \quad \text{Eq. 2.16}$$

E a função de transferência para um elemento de segunda ordem é assim definida (Villa, 2000):

$$\frac{O(t)}{I(t)} = \frac{K}{\left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2 \cdot \xi \cdot s}{\omega_n} + 1 \right)} \quad \text{Eq. 2.17}$$

Para exemplificar um elemento de segunda ordem, usa-se o sistema mecânico tipo massa-mola com amortecimento ilustrado na figura 2.17 que converte a força F em movimento na direção x .

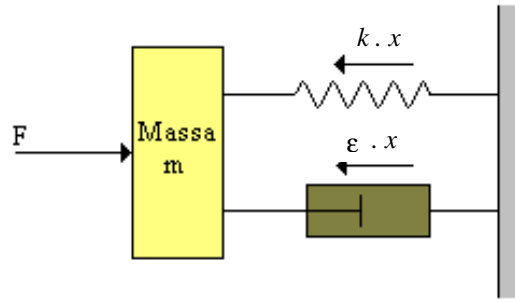


Figura 2.17 – Sistema massa-mola com amortecimento.

No instante $t = 0$, a velocidade e a aceleração iniciais são iguais a zero. A força inicial é dada pela Lei de Hooke, que diz que a força é igual ao produto da constante da mola pelo deslocamento inicial. No tempo $t = 0$, uma força de entrada é, subitamente, imposta ao sistema. Dessa forma, o comportamento dinâmico pode ser descrito pela 2ª Lei de Newton, que diz que a soma de todas as forças envolvidas no sistema é igual ao produto da massa pela aceleração.

$$F - k \cdot x - \varepsilon \cdot \dot{x} = m \cdot \ddot{x} \quad \text{Eq. 2.18}$$

Utilizando as condições iniciais do problema, a equação 2.18 pode ser reescrita como (Bentley, 1988):

$$\frac{m}{k} \cdot \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} + \frac{\varepsilon}{k} \cdot \frac{d \Delta x}{dt} + \Delta X = \frac{1}{k} \cdot \Delta F \quad \text{Eq. 2.19}$$

As características físicas do elemento definidas pelas equações 2.6, 2.14 e 2.15, são iguais a:

$$K = \frac{1}{k} \quad \text{Eq. 2.20}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Eq. 2.21}$$

$$\xi = \frac{\varepsilon}{2 \cdot \sqrt{(k \cdot m)}} \quad \text{Eq. 2.22}$$

Com a definição das características físicas do instrumento, a equação 2.19 pode ser reescrita como:

$$\frac{1}{\omega_n^2} \cdot \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} + \frac{2 \cdot \xi}{\omega_n} \cdot \frac{d\Delta x}{dt} + \Delta x = \frac{1}{k} \cdot \Delta F \quad \text{Eq. 2.23}$$

Aplicando a transformada de Laplace sobre equação 2.23 chega-se à função de transferência do sistema (Bentley, 1988; Oliveira, 2004).

$$G(s) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2} \cdot s^2 + \frac{2 \cdot \xi}{\omega_n} \cdot s + 1} \quad \text{Eq. 2.24}$$

Identificando a Dinâmica de um Transdutor

O comportamento dinâmico de um transdutor é determinado a partir de entradas conhecidas. As mais utilizadas são: o degrau, o impulso, o impulso de Dirac, a rampa, a rampa interrompida e a senóide. A figura 2.18 mostra uma representação simplificada desses estímulos (Bentley, 1988, Doebelin, 1983; Sydenham, 1999; Villa, 2000).

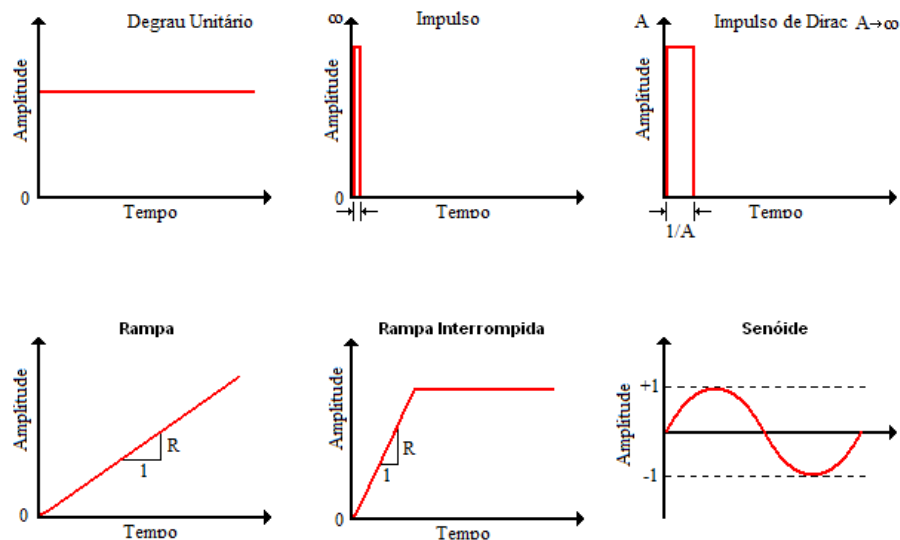


Figura 2.18 – Estímulos mais utilizados em processos de calibração dinâmica.

Nesse trabalho será usado o degrau unitário de Heaviside, que é o estímulo gerado nos instrumentos clássicos de calibração dinâmica (dispositivo de abertura rápida, tubo de choque, cuba rotativa, etc.). O degrau de Heaviside é representado pela equação 2.25.

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 2.25}$$

A transformada de Laplace para um degrau unitário é dada por:

$$L[1] = \frac{1}{s} \quad \text{Eq. 2.26}$$

Transdutor de Primeira Ordem

Quando um transdutor de primeira ordem é submetido a um degrau de Heaviside, a transformada de Laplace do sinal de saída é dada pelo produto entre a função de transferência do transdutor e a transformada do estímulo.

$$\bar{O}(s) = G(s) \cdot \bar{I}(s) = K \cdot \left(\frac{1}{(1 + \tau \cdot s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad \text{Eq. 2.27}$$

Bentley (1988) mostra o desenvolvimento completo para a equação 2.27, que fornece a equação que caracteriza a resposta de um transdutor de primeira ordem submetido a um degrau de Heaviside (função inversa).

A partir da equação 2.28 determinam-se as características dinâmicas de um elemento de primeira ordem, como a constante de tempo, o tempo de subida e tempo de resposta (Villa, 2000).

$$O(t) = K \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad \text{Eq. 2.28}$$

A figura 2.19 ilustra a resposta de um elemento de primeira ordem submetido a um degrau. A constante de tempo é definida como o tempo em que o sinal atinge 63,2% do nível de estabilização. Doebelin (1983) define o tempo de subida como o tempo em que o sinal atinge 90% do nível de estabilização. Oliveira (2004) define o tempo de resposta “como sendo o tempo em que a diferença entre o valor assintótico de equilíbrio do sistema e a resposta

seja desprezível". Geralmente, é assumido que o tempo de resposta ocorre quando $t/\tau = 3$, correspondendo a 95% de $O(t)/K$.

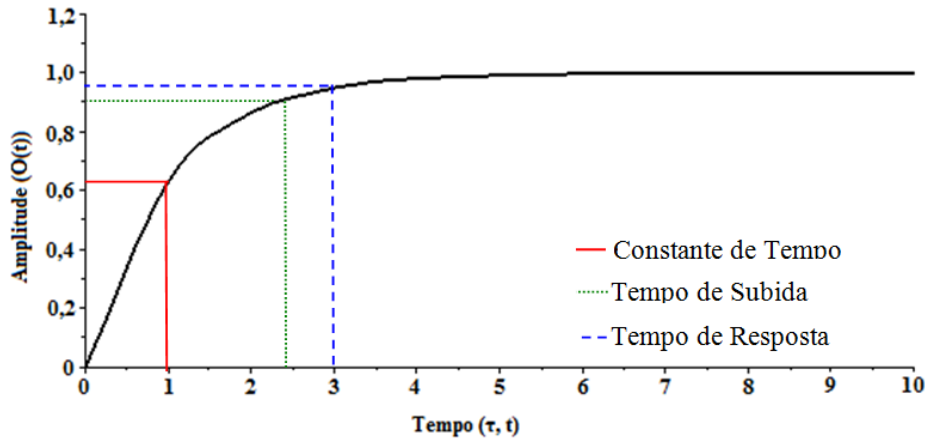


Figura 2.19 – Resposta de um transdutor de primeira ordem submetido a um degrau de Heaviside.

Aplicando o mesmo procedimento para um transdutor de segunda ordem, chega-se à equação 2.29.

$$\frac{\bar{O}(s)}{K} = G(s) \cdot \bar{I}(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\omega_n^2} \cdot s^2 + \frac{2 \cdot \xi}{\omega_n} \cdot s + 1 \right) \cdot s} \quad \text{Eq. 2.29}$$

Desenvolvendo a equação 2.29, chega-se à resposta de um elemento de segunda ordem submetido a um degrau unitário, Bentley (1988).

$$\frac{\bar{O}(s)}{K} = \frac{1}{s} - \frac{(s + \xi \cdot \omega_n)}{(s + \xi \cdot \omega_n)^2 + \omega_n^2 (1 - \xi^2)} - \frac{\xi \cdot \omega_n}{(s + \xi \cdot \omega_n)^2 + \omega_n^2 (1 - \xi^2)} \quad \text{Eq. 2.30}$$

A equação 2.30 pode ser avaliada em termos do valor do coeficiente de amortecimento, isto é, para $\xi < 1$, tem-se uma resposta subamortecida; para $\xi = 1$, um amortecimento crítico; e para $\xi > 1$, uma resposta superamortecido. Aplicando a transformada inversa para cada um dos casos, tem-se as equações que representam o sinal de saída, conforme mostrado na tabela 2.2 (Bentley, 1988).

Tabela 2.2 – Respostas de um elemento de segunda ordem a um degrau.

Amortecimento	Transformada Inversa
$\xi < 1$ Sub amortecido	$\frac{\bar{O}(t)}{K} = 1 - e^{-\xi \omega_n t} \cdot \left[\cos(\omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2} \cdot t) + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \text{sen}(\omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2} \cdot t) \right]$
$\xi = 1$ Crítico	$\frac{\bar{O}(t)}{K} = 1 - e^{-\omega_n t} \cdot (1 + \omega_n \cdot t)$
$\xi > 1$ Super amortecido	$\frac{\bar{O}(t)}{K} = 1 - e^{-\xi \omega_n t} \cdot \left[\cosh(\omega_n \cdot \sqrt{\xi^2 - 1} \cdot t) + \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 - 1}} \cdot \text{senh}(\omega_n \cdot \sqrt{\xi^2 - 1} \cdot t) \right]$

A figura 2.20 mostra as respostas de um elemento de segunda ordem para diferentes valores do fator de coeficiente de amortecimento.

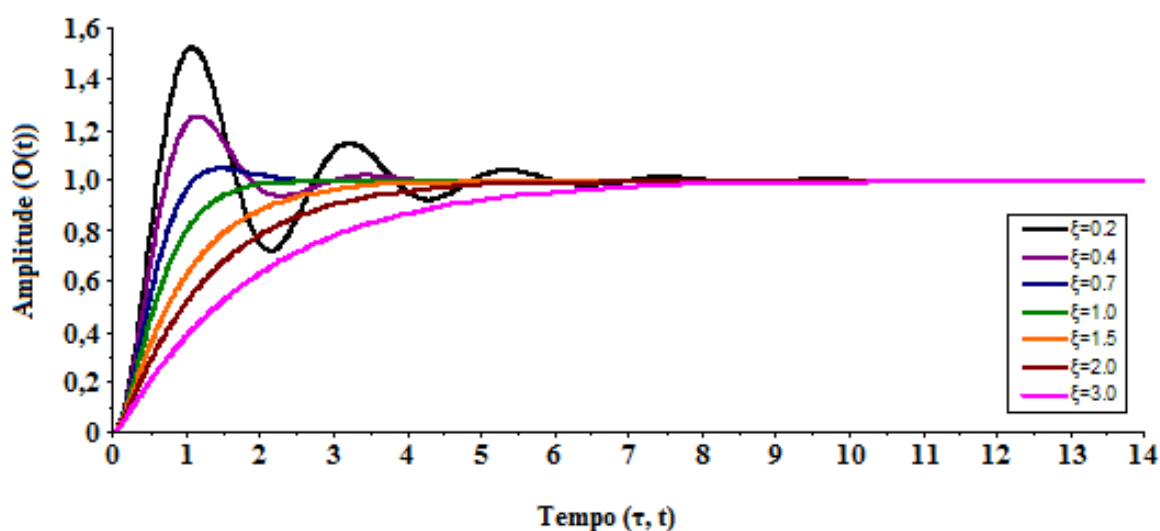


Figura 2.20 – Resposta de um transdutor de segunda ordem submetido a um degrau de Heaviside.

A partir da resposta de um elemento de segunda ordem submetido a um sinal padrão e da sua função de transferência, determinam-se as características dinâmicas (Oliveira, 2004 e Vianna, 1999). A tabela 2.3 (Oliveira, 2004 e Villa, 2005) mostra essas características e suas definições.

Tabela 2.3 – Características dinâmicas de um transdutor de segunda ordem.

Característica	Definição
Banda Passante	É o intervalo em que o transdutor ou um sistema é capaz de medir o fenômeno.
Frequência de Ressonância	É a frequência na qual a amplitude da função de transferência é máxima.
Frequência Própria	É uma frequência natural do amortecimento. $\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}$
Coefficiente de Amortecimento	Caracteriza a dissipação de energia do sistema.
Tempo de Subida	É o tempo em que o sinal leva para passar entre os níveis de 10% e 90% da estabilização.
Overshoot	É o valor máximo alcançado pela resposta do sistema ou transdutor.
Tempo de Resposta	É o tempo compreendido entre o início da subida do sinal e a estabilização dentro de um intervalo definido $\pm \varepsilon$.

A figura 2.21 ilustra as representações gráficas das características dinâmicas sobre o sinal de resposta de um elemento de segunda ordem submetido a um degrau.

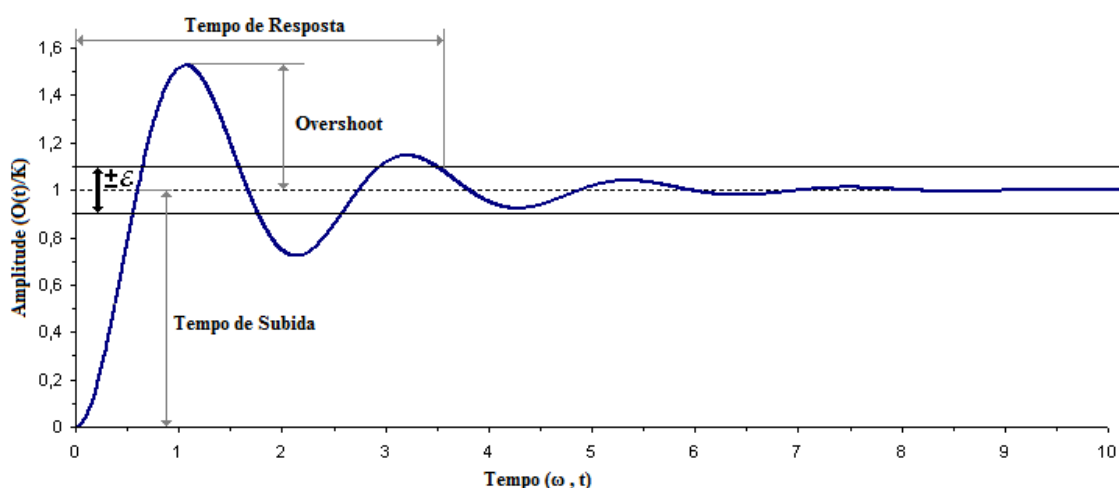


Figura 2.21 – Características dinâmicas.

2.3.3 Metodologia de Calibração do LMD-ENSAM

Em pressão estática, há transdutores padrão que são ligados às grandezas fundamentais ou derivados e os cálculos de incerteza são bem estabelecidos. É possível também realizar comparações em nível mundial entre laboratórios e métodos de calibração. No domínio da calibração dinâmica em pressão, não existe um padrão, ou seja, não há um degrau, um impulso ou uma variação senoidal de pressão, que possam ser rastreados às grandezas fundamentais ou derivadas.

Desde a década de 70, o LMD-ENSAM se dedica ao estudo da calibração dinâmica de transdutores de pressão e é o responsável pela manutenção do padrão francês em pressão dinâmica. Na década de 90, os trabalhos já realizados permitiram o desenvolvimento de uma metodologia de calibração dinâmica em pressão, que tem como objetivo a calibração de um transdutor de referência para ser utilizado para calibrações por comparação.

O Vocabulário Internacional de Metrologia define padrão como “*realização da definição de uma dada grandeza, com um valor determinado e uma incerteza de medição associada, utilizada como referência*”, isto é há um elemento que possui o valor de uma grandeza associado a uma incerteza, como por exemplo, o padrão de massa de $1\text{ kg} \pm 3\text{ }\mu\text{g}$ utilizado como padrão primário. No caso da pressão estática o padrão primário é baseado em medições separadas de força e área e, na prática utilizam-se sistemas que envolvem pistões, massas e balanças calibrados e rastreados aos padrões nacional e internacional para realizar a calibração de outros dispositivos de medição.

Com esses sistemas não é possível gerar uma variação dinâmica de pressão, sendo necessário utilizar os dispositivos apresentados nas seções anteriores. Entretanto, observa-se que os geradores de variações dinâmicas de pressão apresentam limitações tanto em pressão como em frequência. Outro ponto a ser considerado é a eletrônica associada aos transdutores de pressão, uma vez que se faz necessária a utilização de sistemas de amplificação e registro dos sinais. Também se deve considerar os procedimentos de ensaios e o tratamento dos dados (cálculo da função de transferência e das características dinâmicas).

Agrupando todos esses fatores, pode-se concluir que em pressão dinâmica não é possível utilizar o conceito tradicional de padrão, sendo então necessário utilizar o conceito de “padrão coletivo”, ou seja, todos os elementos da calibração (dispositivos geradores de pressão, sistemas de aquisição e tratamento de dados e procedimentos experimentais) formam o padrão. Essa definição é o início da metodologia de calibração e de cálculo de incerteza desenvolvido pelo LMD-ENSAM.

O método do LMD-ENSAM pode ser dividido em duas partes: a calibração em tensão (sistema de aquisição) e calibração em pressão. Para cada uma das partes realizam-se ensaios quase-estáticos e dinâmicos, sendo que esses últimos são realizados em baixas,

médias e altas frequências. Outra etapa importante é a avaliação das ferramentas de tratamento de dados. A figura 2.22 ilustra um diagrama esquemático desse método, que é apresentado em detalhes no capítulo 4 deste trabalho.

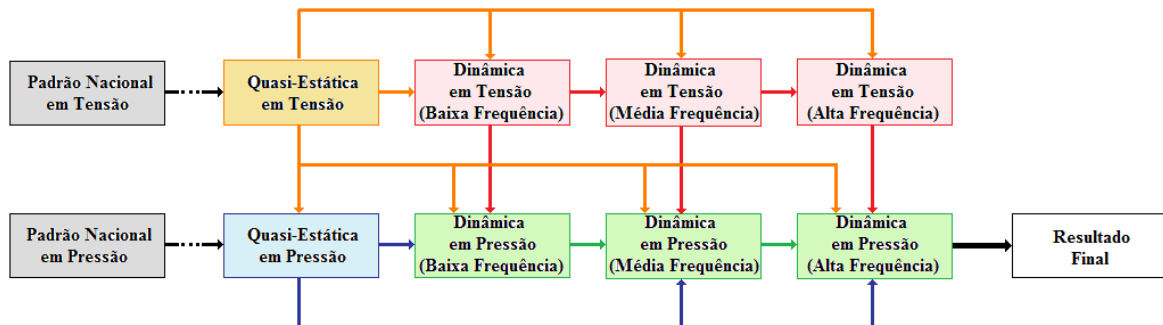


Figura 2.22 – Diagrama esquemático do método de calibração e cálculo de incerteza em pressão dinâmica, desenvolvido pelo *Laboratoire de Métrologie Dynamique* – ENSAM/Paris.

3. O TUBO DE CHOQUE E O DISPOSITIVO DE ABERTURA RÁPIDA

3.1 O TUBO DE CHOQUE

Os processos físicos desenvolvidos no interior de um tubo de choque se iniciam com a ruptura da membrana que separa o tubo indutor do induzido. A figura 3.1 (Leódido, 2003) mostra esses processos em diagrama da variação de pressão no tempo pela posição ao longo do tubo.

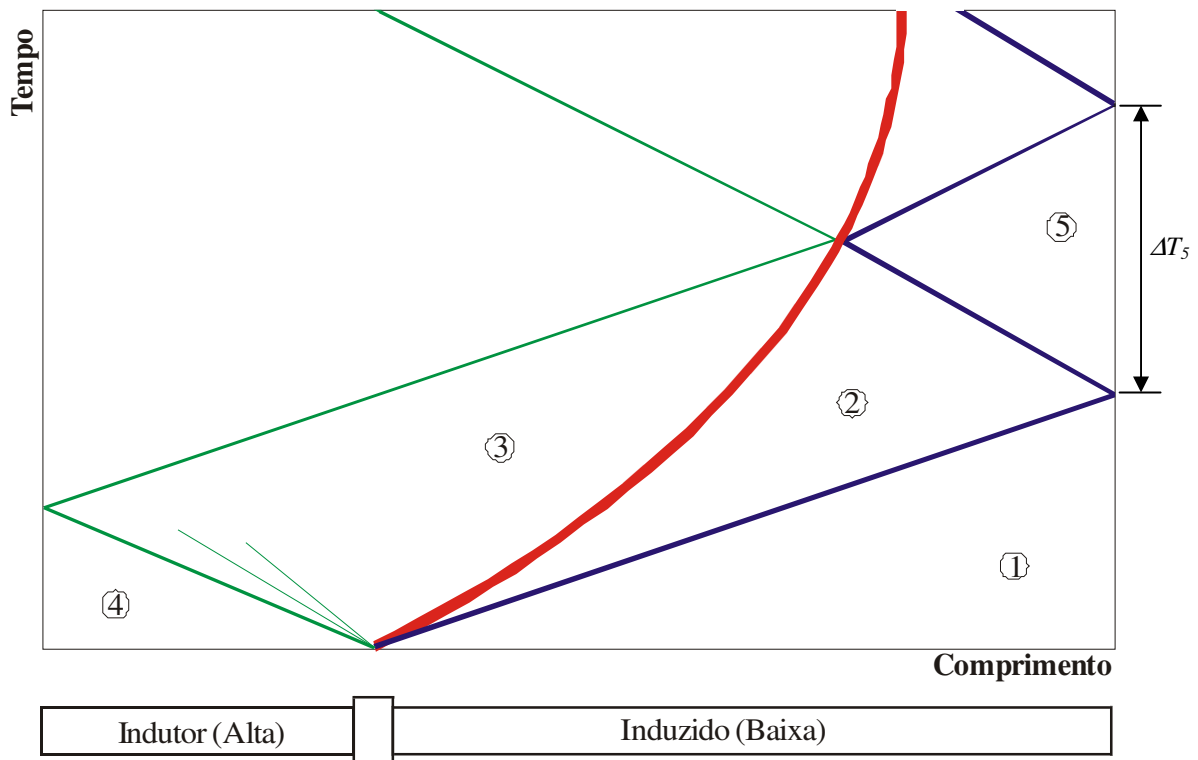


Figura 3.1 – Diagrama dos processos no tubo de choque.

As condições iniciais do gás no interior do tubo são representadas pelas regiões 1 e 4, sendo a região 1 a condição inicial do tubo induzido e a região 4 a do tubo indutor. Nessas regiões, a pressão no tubo indutor é maior que a pressão no tubo induzido e o fluido está em repouso. Normalmente, se trabalha com o mesmo fluido. Entretanto, Oliveira et al. (2000) mostraram que a utilização de diferentes tipos de gases nos tubos não altera a essência dos processos físicos que se desenvolvem, mas modificam a velocidade de propagação da onda, a duração do degrau, as flutuações de pressão, entre outras características.

Com a ruptura da membrana há a formação e a propagação de uma onda de pressão (onda de choque) em direção ao fundo do tubo induzido com velocidade supersônica (W_s). No tubo indutor ocorre a formação e a propagação de uma onda de expansão, com velocidade do som, em direção ao fundo do tubo indutor e depois desta, várias outras com velocidades subsônicas, formando um leque de expansão que é denominado região 3.

No tubo induzido, à medida que a onda de choque se desloca na massa de fluido que estava em repouso, surge atrás dela um escoamento induzido (subsônico), denominado região 2.

A pressão inicial, P_4 , do tubo indutor decresce até o nível P_3 (pressão na região 3), que é igual à pressão P_2 (pressão na região 2). Os gases das regiões 2 e 3 não se misturam, pois além das pressões, as velocidades são iguais. Dessa forma, caracteriza-se, entre as regiões 2 e 3, uma descontinuidade termodinâmica e de densidade do fluido, por onde não há fluxo de massa, ou seja, uma superfície de separação, que também pode ser chamada de superfície de contato. A superfície de contato desloca-se com a mesma velocidade do escoamento induzido.

A onda de choque reflete-se no fim do tubo induzido e retorna em direção à superfície de contato e essa reflete, novamente, a onda em direção ao fundo do tubo, criando a região 5. O tempo característico do tubo de choque (ΔT_5) é determinado como sendo o tempo entre a primeira reflexão da onda de choque no fundo do tubo, a reflexão na superfície de contato e o novo choque com o fundo do tubo. Nesse intervalo de tempo é quando ocorre degrau de pressão com maior duração e maior repetitividade. Outros degraus de pressão podem também ser observados na passagem da onda de choque pelo tubo induzido.

Apesar de poder ser considerada como uma superfície sólida, a reflexão da onda na superfície de contato não é perfeita, ou seja, parte da onda passa pela superfície. Normalmente, considera-se esta parcela desprezível, mas se a superfície de contato tiver suas características alteradas pelo leque de expansão essa parcela se torna importante e a reflexão da onda não será completa e, conseqüentemente, gerando perturbações no degrau (Carvalho, 1995). Com isso, verifica-se que a qualidade do degrau de pressão gerado depende, também, da integridade da superfície de contato. Para isso, não deve haver interferência do leque de expansão sobre a superfície de contato antes da primeira reflexão

da onda de choque. Essa condição é obtida através de relações adequadas de comprimento entre o tubo indutor e tubo induzido.

A posição na qual a onda de choque encontra-se com a superfície de contato e a duração do degrau de pressão dependem, diretamente, das dimensões do tubo. Dessa forma é possível ampliar a utilização do tubo de choque em baixas frequências, uma vez que um tubo de choque maior terá um degrau com maior duração.

Outros fatores que influenciam na qualidade da onda de choque e, conseqüentemente, do degrau de pressão, é a curvatura e o rompimento da membrana. Idealmente, não deveria haver curvatura e o rompimento deveria ser completo e instantâneo. Entretanto, as membranas e as técnicas de rompimento acabam provocando o surgimento de um escoamento complexo com a formação de uma onda de choque com estrutura esférica, gerando flutuações de pressão (Oliveira, 2004).

Essas flutuações contribuem para o aumento da incerteza em processos de calibração dinâmica em pressão. Uma forma de reduzir a influência desses fatores é a utilização de diferenças de pressão não muito grandes entre o tubo indutor e induzido, especialmente em calibrações em altas pressões (Damion, 1993a).

A passagem da onda de choque também leva à formação de degraus de velocidade e temperatura. Tomando como referência a figura 3.1, chega-se a figura 3.2, que ilustra os processos que ocorrem no interior do tubo de choque e a evolução das propriedades termodinâmicas (pressão, temperatura e velocidade) em função das regiões.

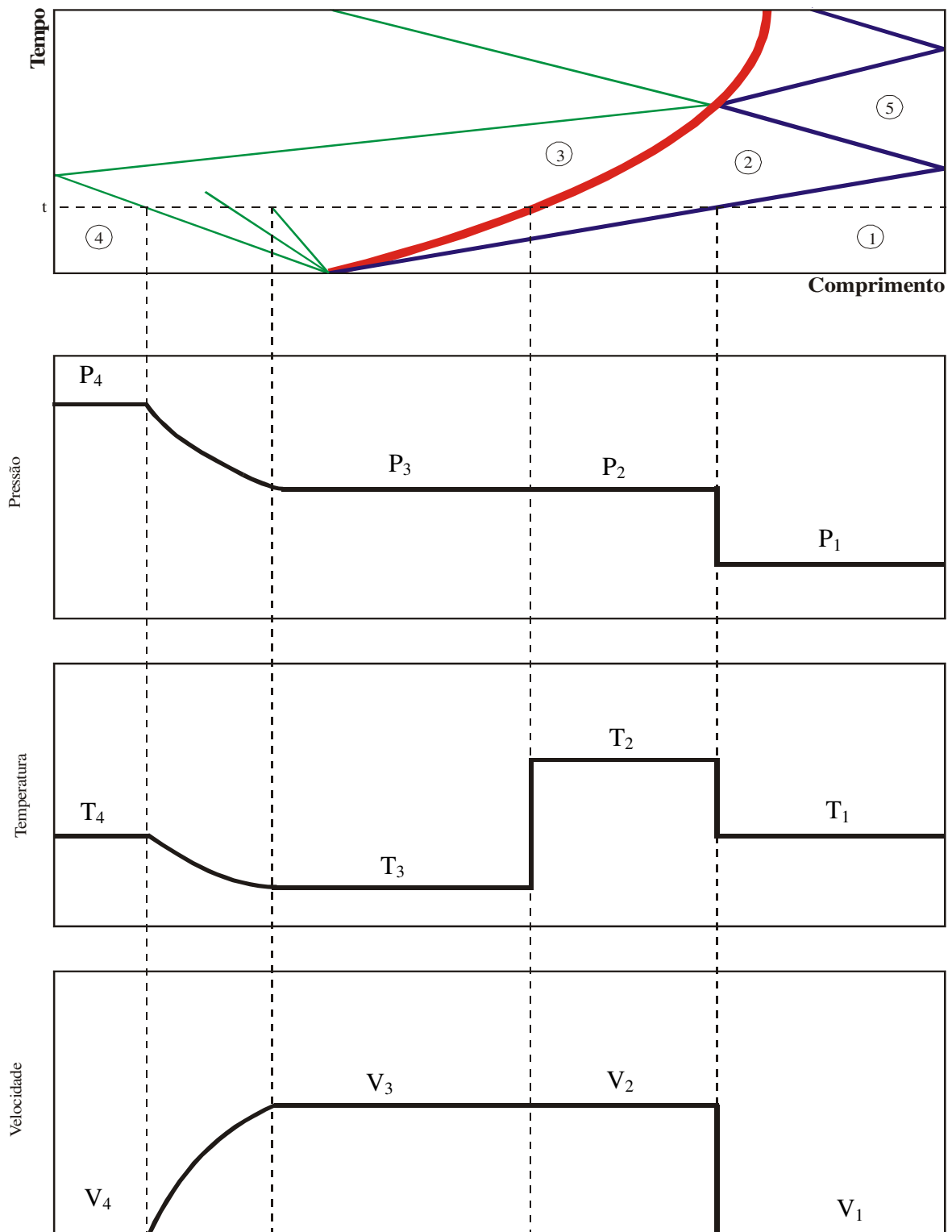


Figura 3.2 – Diagrama das propriedades dentro do tubo de choque.

As condições iniciais no tubo induzido são temperatura igual a T_1 , pressão igual a P_1 e velocidade $V_1 = 0$. Com a passagem da onda de choque, a temperatura passa para um nível T_2 (degrau positivo de temperatura), a pressão para um nível P_2 e velocidade para V_2 (degrau positivo de velocidade).

A pressão em qualquer ponto da parede do tubo induzido após a passagem da onda de choque, até a chegada do leque de expansão ($P_2 = P_3$) ou da onda de choque refletida, a pressão permanece constante em um nível P_2 . O mesmo não ocorre com a temperatura, que sofre uma queda ao passar da região 2 para a 3 (degrau negativo de temperatura: $T_3 < T_2$).

Para melhor visualizar a formação dos degraus de pressão no tubo de choque e a interação desses com as posições de medição, são apresentadas as figuras 2.3, 2.4 e 2.5 (Leódido, 2003), que ilustram a formação do degrau de pressão no fundo do tubo induzido e nas paredes, para um transdutor fixado num ponto após e no ponto onde ocorre a reflexão da onda na superfície de contato do tubo induzido, respectivamente. Em todas as figuras, a linha traço-ponto representa a posição do transdutor.

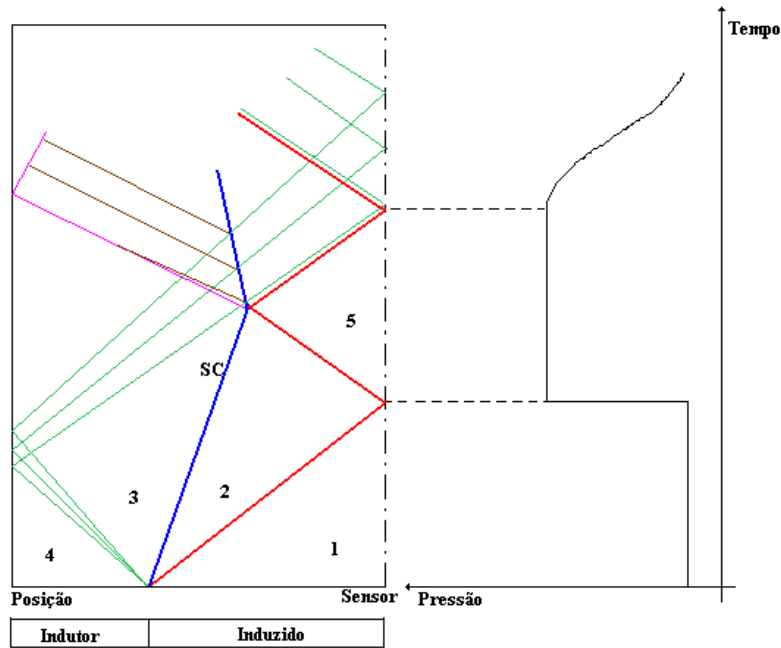


Figura 3.3 – Formação do degrau de pressão no fundo do tubo induzido. Para um transdutor ali fixado.

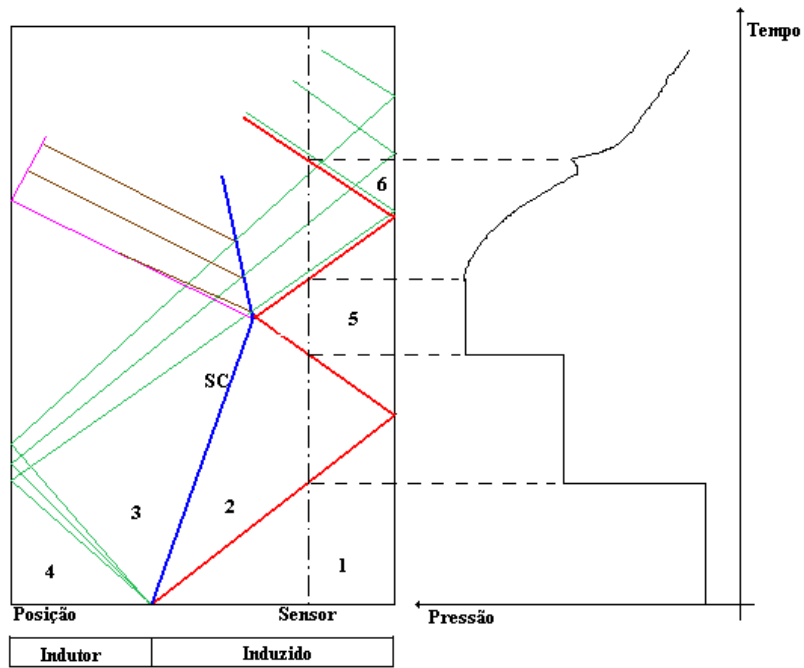


Figura 3.4 – Formação do degrau de pressão na parede do tubo induzido. Para um transdutor fixado num ponto após a posição de reflexão da onda na superfície de contato.

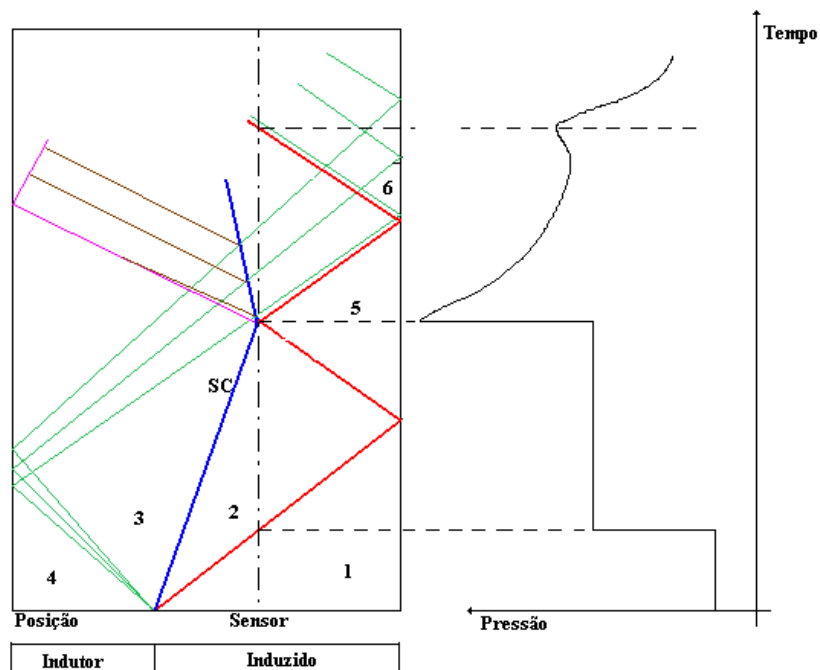


Figura 3.5 – Formação do degrau de pressão na parede do tubo induzido. Para um transdutor fixado na posição da reflexão da onda na superfície de contato.

3.1.1 Formulação Teórica do Tubo de Choque

Para a formulação analítica do tubo de choque, é considerado o rompimento da membrana é completo e instantâneo, e com isso, a formação de uma onda de choque plana (normal). Dessa forma, é possível realizar uma abordagem unidimensional dos fenômenos. Outra hipótese considerada nessa formulação é que o fluido é invíscido, não condutivo e caloricamente perfeito, o que sugere que os efeitos da camada limite podem ser desconsiderados. Na prática, é possível aproximar-se dessas considerações com a determinação adequada das características geométricas do tubo de choque (comprimento e diâmetro) e das condições iniciais de ensaio.

Vale ressaltar que essa formulação do tubo de choque é amplamente divulgada na literatura e em diversos trabalhos, como por exemplo, em (Shapiro, 1958; Carvalho, 1993 e Oliveira, 2004). Neste trabalho apresenta-se uma compilação dessas obras destacando-se os pontos relevantes na caracterização de um tubo de choque como meio de calibração dinâmica em pressão.

Basicamente, as deduções analíticas baseiam-se nas equações de Euler, não considerando a influência da viscosidade e condutividade do escoamento. Uma vez que realiza-se uma abordagem analítica, não serão utilizadas as equações de Navier-Stokes, visto que essas não possuem solução analítica. No entanto, para os pontos onde se faz necessário considerar os termos de perdas, são usados modelos simplificados dos efeitos de dissipação. No caso em estudo, onde os termos inerciais são mais importantes que os termos viscosos, as equações de Euler apresentam melhores resultados numéricos para escoamentos turbulentos compressíveis (Carvalho, 1993).

As equações básicas utilizadas no desenvolvimento analítico dos fenômenos em um tubo de choque são as da continuidade, da quantidade de movimento, da energia, de estado e da energia interna.

- Equação da Continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \cdot \vec{V} = 0 \quad \text{Eq. 3.1}$$

- Equação da Quantidade de Movimento

$$\begin{aligned}\rho \cdot \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho \cdot f_{Cx} \\ \rho \cdot \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho \cdot f_{Cy} \\ \rho \cdot \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho \cdot f_{Cz}\end{aligned}\tag{Eq. 3.2}$$

- Equação da Energia:

$$\rho \cdot \frac{D\left(e + \frac{V^2}{2}\right)}{Dt} = \rho \cdot \dot{q} - \vec{\nabla} \cdot P \cdot \vec{V} + \rho(f_C \cdot V)\tag{Eq. 3.3}$$

- Equação de Estado:

$$P = \rho \cdot R \cdot T\tag{Eq. 3.4}$$

- Equação de Energia Interna:

$$e = C_V \cdot T\tag{Eq. 3.5}$$

Considerando que não há troca de calor, ou seja, que o escoamento é adiabático, então $\dot{q} = 0$. Além disso, como o escoamento não está submetido a intensos campos centrífugos, eletromagnéticos ou gravitacionais, as forças de campo podem ser desprezadas, ou seja, $f_C = 0$. Com essas simplificações a equação da energia (Eq. 3.3) pode ser reescrita na forma da equação 3.6.

$$\rho \cdot \frac{D\left(e + \frac{V^2}{2}\right)}{Dt} = -\vec{\nabla} \cdot P \cdot \vec{V}\tag{Eq. 3.6}$$

Lembrando que a entalpia é definida por:

$$h = e + \frac{P}{\rho} = e + P \cdot V,\tag{Eq. 3.7}$$

Aplicando as equações 3.6 e 3.7 na equação 3.1, desenvolvendo os termos e aplicando as simplificações, obtém-se a equação 3.8, que indica que a derivada total é nula, uma vez que a densidade não pode ser igual a zero.

$$\rho \cdot \frac{D\left(h + \frac{V^2}{2}\right)}{Dt} = 0 \quad \text{Eq. 3.8}$$

Com isso, o termo entre parênteses deve ser constante, ou seja:

$$h + \frac{V^2}{2} = \text{Constante} \quad \text{Eq. 3.9}$$

Quando um fluido é desacelerado adiabaticamente até o repouso define-se a temperatura e a pressão de estagnação. Com isso, as demais propriedades de estagnação podem ser determinadas, logo a entalpia de estagnação (h_0) de um escoamento é representada pela equação 3.10.

$$h_0 = h + \frac{V^2}{2} = \text{Constante} \quad \text{Eq. 3.10}$$

Como foi dito anteriormente considerou-se, nessa formulação, que o escoamento é unidimensional e que não sofre influências de forças de campo. Dessa forma, é possível simplificar a equação da quantidade de movimento.

$$\rho \cdot \frac{Du}{Dt} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad \text{Eq. 3.11}$$

3.1.1.1 – Onda de Choque

A formação da onda de choque acontece por meio da superposição de sucessivos pulsos de pressão gerando uma descontinuidade finita. Simplificadamente a onda de choque é definida como uma superfície delgada, através da qual as propriedades do escoamento mudam bruscamente.

Para a formulação da onda de choque considera-se um referencial fixo na própria onda. Então, nesse caso, utilizam-se as relações de Rabin-Hugoniot que foram desenvolvidas com base nas equações da continuidade, da quantidade de movimento e da energia, para um choque estacionário (Carvalho, 1995).

Outra hipótese considerada nessa formulação é a formação de uma onda de choque plana, ou seja, um choque normal (90°) em relação à parede do tubo, como demonstrado na figura 3.6 (Carvalho, 1993), onde os sub-índices 1 e 2 indicam as propriedades antes e depois do choque, respectivamente. Shapiro (1958) trata detalhadamente do caso onde considera-se um choque oblíquo (ângulo entre a onda e a parede diferente de 90°).

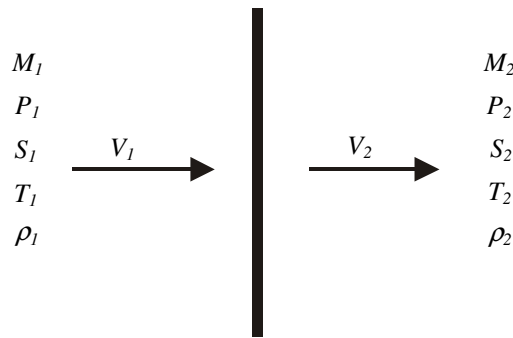


Figura 3.6 – Representação esquemática da variação das propriedades provocada por um choque normal.

As equações apresentadas no item anterior descrevem um choque normal e mostram que durante o processo ocorrem, simultaneamente, a diminuição da velocidade e o aumento da pressão, da temperatura, da densidade e da entropia. Como considerou-se o escoamento adiabático, a entalpia antes e depois do choque são iguais ($h_{0,1} = h_{0,2}$).

Aplicando todas as hipóteses às equações de Euler, com as devidas simplificações e considerações, as equações da continuidade, da quantidade de movimento e da energia podem ser reescritas nas formas das equações 3.12, 3.13 e 3.14, respectivamente.

$$\rho_1 \cdot W_s = \rho_2 \cdot (W_s - V_2) \quad \text{Eq. 3.12}$$

$$P_1 + \rho_1 \cdot W_s^2 = P_2 + \rho_2 \cdot (W_s - V_2)^2 \quad \text{Eq. 3.13}$$

$$h_1 + \frac{W_s}{2} = h_2 + \frac{(W_s - V_2)^2}{2} \quad \text{Eq. 3.14}$$

Para completar a formulação utilizam-se as equações 3.4 e 3.5, juntamente com as equações do número de Mach (3.15), da entalpia específica (3.16) e da velocidade do som (3.17).

$$M = \frac{W_s}{a_1} \quad \text{Eq. 3.15}$$

$$h = \frac{K}{K-1} \cdot \frac{P}{\rho} \quad \text{Eq. 3.16}$$

$$a = \sqrt{K.R.T} \quad \text{Eq. 3.17}$$

Finalmente, a descrição analítica do comportamento do escoamento induzido ao passar pela onda de choque é o sistema das equações formado pelas equações 3.12 a 3.14, 3.4 e 3.5, que representam a relação entre os valores das propriedades nas regiões no interior de um tubo de choque, conforme ilustram as figuras 3.1 e 3.2. A manipulação desse sistema leva às relações analíticas das propriedades antes e depois da onda de choque, conforme descrito nas equações 3.18 a 3.21.

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2.K.M - (K-1)}{K+1} \quad \text{Eq. 3.18}$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{(K-1).M^2}{K+1} \quad \text{Eq. 3.19}$$

$$\frac{V_2}{a_1} = \frac{2}{(K+1)} \cdot \left(M - \frac{1}{M} \right) \quad \text{Eq. 3.20}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\left(K.M^2 - \frac{K-1}{2} \right) \cdot \left(\frac{K-1}{2} . M^2 + 1 \right)^2}{\left(\frac{K+1}{2} \right) . M^2} \quad \text{Eq. 3.21}$$

Nas equações apresentadas acima, K representa a razão entre os calores específicos do gás e o seu valor é considerado constante.

3.1.1.2 – Leque de Expansão

O passo seguinte na formulação analítica dos processos no interior do tubo de choque passa pela descrição do leque de expansão. A primeira onda de choque com velocidade sônica provoca uma elevação da pressão, da temperatura e da entropia específica. Esse aumento está relacionado a um processo adiabático de compressão e, para esse tipo de escoamento, segundo a Segunda Lei da Termodinâmica, a entropia específica do fluido é maior ou igual a zero.

No caso em que há uma queda brusca de pressão, a temperatura também sofrerá uma queda. Entretanto, isso não ocorre com a entropia, que se mantém constante ao longo do processo de expansão. Nesse caso, ocorre a formação de ondas centradas que descrevem uma expansão isentrópica. O leque de expansão não pode ser considerado um choque, uma vez que não há descontinuidade no escoamento. Com essas considerações, o comportamento do leque de expansão pode ser modelado pelas equações desenvolvidas no item anterior e, nesse caso, considera-se a entropia constante. As equações 3.22 e 3.23 representam a relação entre os valores das propriedades nas regiões ilustradas nas figuras 3.1 e 3.2.

$$\frac{2.a_4}{K-1} + V_4 = \frac{2.a_3}{K-1} + V_3 \quad \text{Eq. 3.22}$$

$$\frac{P_4}{P_3} = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{K-1}{K+1} \right) \left(\frac{a_1}{a_4} \right) \left(M - \frac{1}{M} \right) \right]^{\frac{2.K}{K-1}}} \quad \text{Eq. 3.23}$$

Uma vez que $P_2 = P_3$, pode-se relacionar a equação 3.23 com a equação 3.18 e utilizando a definição do número de Mach (equação 3.15) é possível determinar a velocidade teórica de propagação da onda de choque em função das condições iniciais de pressão no tubo de choque.

$$\frac{P_4}{P_1} = \frac{\left(\frac{2K}{K+1}\right) \cdot M^2 - \left(\frac{K-1}{K+1}\right)}{\left[1 - \left(\frac{K-1}{K+1}\right) \cdot \left(\frac{a_1}{a_4}\right) \cdot \left(M - \frac{1}{M}\right)\right]^{\frac{2K}{K-1}}} \quad \text{Eq. 3.24}$$

3.1.1.3 – Reflexões da Onda de Choque

As reflexões da onda de choque no interior do tubo de choque ocorrem tanto no fundo do tubo como na superfície de contato. No primeiro caso, ocorre uma reflexão completa e, no segundo, parte da onda atravessa a superfície e parte é refletida. Essas parcelas são denominadas, respectivamente, choque transmitido e choque refletido. Em alguns usos específicos do tubo de choque, o choque transmitido é maior que o choque refletido. Já para a calibração dinâmica é essencial que o choque transmitido seja o menor possível. Dessa forma, nessa formulação considera-se que a reflexão é total, tanto no fundo como na superfície de contato (Carvalho, 1993 e Shapiro, 1958).

Define-se como velocidade do choque (W_S) a velocidade do choque incidente, isto é, antes da primeira reflexão no fundo do tubo e velocidade do choque refletido (W_R) como a velocidade após esse choque. As velocidades W_S e W_R são diferentes, uma vez que o choque refletido encontra uma região onde as propriedades já foram alteradas pela primeira passagem da onda de choque. Então, definindo um volume de controle no fundo do tubo induzido e considerando o referencial fixo no choque, determina-se a relação entre W_S e W_R (Vianna, 1984).

$$\frac{W_R}{W_S} = 2 \cdot \frac{1 + \frac{P_2}{P_1} \cdot (K-1)}{(K+1) + (K-1) \cdot \frac{P_2}{P_1}} \quad \text{Eq. 3.25}$$

Becker (1968) propõe uma relação entre o número de Mach do choque refletido e do choque incidente, levando em consideração as variações de temperatura e velocidade do som entre as duas regiões, conforme descrito na equação 3.26.

$$\left(M - \frac{I}{M}\right) \cdot \frac{a_1}{a_2} = M_R - \frac{I}{M_R} \quad \text{Eq. 3.26}$$

A partir das relações apresentadas anteriormente e considerando as variações da temperatura em função do número de Mach do choque incidente, pode-se determinar as equações 3.27 e 3.28, que representam, respectivamente, a relação entre a pressão e a temperatura iniciais no tubo induzido e a pressão e a temperatura na região 5.

$$\frac{P_5}{P_1} = \frac{2.K.M^2 - (K-1)}{K+1} \cdot \frac{(3.K-1).M^2 - 2.(K-1)}{(K-1)^2.M^2 + 2} \quad \text{Eq. 3.27}$$

$$\frac{T_5}{T_1} = \left(\frac{2.(K-1).M^2 + (3-K)}{(K+1)^2.M^2} \right) \cdot [(3.K-1).M^2 - 2.(K-1)] \quad \text{Eq. 3.28}$$

3.1.1.4 – Tempos Característicos do Tubo de Choque

Com base nas figuras 3.1 e 3.2, pode-se estabelecer vários tempos característicos de um tubo de choque. Esses intervalos geralmente estão ligados às características geométricas do tubo. No caso da calibração dinâmica, os tempos mais utilizados na caracterização de um tubo de choque são o tempo desde a ruptura da membrana até a reflexão na superfície de contato (t_c) e o tempo de duração do degrau de pressão na região 5 (Δt_5).

Para determinar o t_c e a posição onde o choque refletido encontra a superfície (X_c), considera-se que a superfície de contato não sofre os efeitos do leque de expansão antes da primeira reflexão do choque. Sabendo que a superfície de contato desloca-se com a mesma velocidade do escoamento induzido, pode-se montar o sistema de equações 3.29 e 3.30, sendo L_{bp} o comprimento do tubo induzido.

$$t_c = \frac{X_c}{V_2} \quad \text{Eq. 3.29}$$

$$t_c = \frac{L_{bp}}{W_S} + \frac{L_{bp} - X_c}{W_R} \quad \text{Eq. 3.30}$$

A duração do degrau na região 5 é obtida a partir da relação entre as velocidades do choque incidente e refletido. Para melhor caracterizar o tubo de choque, utiliza-se a relação entre a duração do degrau e o comprimento do tubo induzido, descrita na equação 3.31.

$$\frac{\Delta T_5}{L_{bp}} = \frac{\left(M - \frac{V_2}{a_1}\right) \left(M_R + \frac{a_5}{a_1}\right)}{\left(M_R + \frac{V_2}{a_1}\right) M \cdot a_5} \quad \text{Eq. 3.31}$$

3.1.2 Características Operacionais e Construtivas

O tubo de choque é um dispositivo relativamente simples, uma vez que é constituído de dois tubos com comprimentos distintos e uma membrana de separação. Entretanto, para o uso de um tubo de choque como instrumento metrológico, deve ser dada atenção a alguns detalhes operacionais e construtivos que interferem diretamente na qualidade do degrau gerado, como, por exemplo, a estanqueidade, o tipo de membrana, o perfurador de membrana, a limpeza do tubo e os controladores de condições iniciais.

Neste tópico, além das descrições dos processos operacionais e construtivos no uso do tubo de choque como um instrumento metrológico, serão destacados, também, os aspectos relacionados a calibrações em altas pressões.

3.1.2.1 Membranas: Tipos, Dimensões e Deformação

Os primeiros pontos a serem destacados são as dimensões geométricas do tubo de choque. Tais medidas são definidas, basicamente, em função da máxima pressão de trabalho, da duração do degrau e, conseqüentemente, do intervalo de frequência com os quais deseja-se trabalhar.

As dimensões do tubo de choque são caracterizadas pela relação entre os comprimentos dos tubos indutor e induzido e pela relação entre o comprimento do tubo induzido e o diâmetro dos tubos. Para o uso em calibrações, Damion (1993b) recomenda que a relação entre os comprimentos esteja entre 1.5:1 e 2:1 e a relação com o diâmetro não seja maior que 40 para calibrações em altas frequências.

A utilização de uma relação de comprimentos inadequada interfere no desenvolvimento dos processos no interior do tubo de choque causando, por exemplo, a degradação da superfície de contato pelo leque de expansão antes da primeira reflexão da onda de choque, gerando os efeitos já discutidos anteriormente.

A escolha da relação entre o diâmetro e o comprimento é feita, principalmente, baseando-se na deformação da membrana, uma vez que a flecha da deformação depende diretamente do diâmetro do tubo, e no comprimento necessário para a estabilização do escoamento (Barcelos, 2001). O efeito de uma deformação exagerada da membrana leva à intensificação da geração de ondas transversais, que refletidas na parede cilíndrica do tubo, contribuem para a formação de uma onda de choque esférica (Oliveira, 2004).

Barcelos (2001) apresenta um modelo matemático para a deformação de uma membrana, quando submetida à pressão de um fluido, no qual a deformação e os esforços são caracterizados pelas equações de Courbon (1971). Essas equações descrevem a deformação (eq. 2.32), a tensão meridional (eq. 2.33) e a tensão perpendicular ao meridiano (eq. 2.34).

$$z = \frac{3 \cdot q(1 - \mu^2)}{16 \cdot E \cdot e^3} \cdot (R^2 - x^2)^2 \quad \text{Eq. 3.32}$$

$$\sigma_m = \frac{p \cdot r_m}{2 \cdot e} \quad \text{Eq. 3.33}$$

$$\sigma_p = \frac{p \cdot r_p}{e} \cdot \left(1 - \frac{r_p}{2}\right) \quad \text{Eq. 3.34}$$

sendo, e : espessura da membrana;

μ : coeficiente de Poisson;

q : carga por unidade de comprimento;

R : raio da membrana;

r_m : raio da curva meridiana;

r_p : raio da curva da seção perpendicular ao meridiano;

p : pressão.

Oliveira (2004) apresenta um esquema analítico (figura 3.7) da deformação de uma membrana. Barcelos (2001 e 2002) mostra que o aumento da formação de ondas

transversais após o rompimento da membrana está ligado à geometria da membrana e consequentemente da sua deformação.

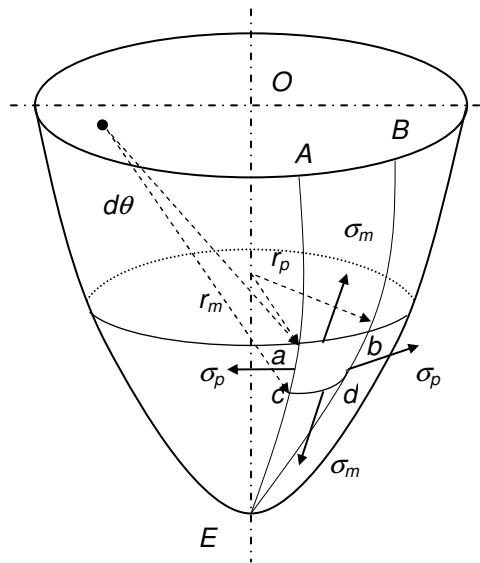


Figura 3.7 – Desenho esquemático de uma membrana deformada.

Daru et al. (1995) apresentam, também, o resultado de uma simulação do campo de pressão no interior de um tubo de choque após o rompimento da membrana, ilustrado na figura 3.8. No trabalho de Daru et al. (1995) a simulação foi realizada como base no código/algorithmo desenvolvido pelos autores. Observando o campo de pressão em quatro instantes diferentes, verifica-se que a deformação da membrana tem uma forte influência sobre a forma da onda e sobre a desuniformidade do campo de pressão.

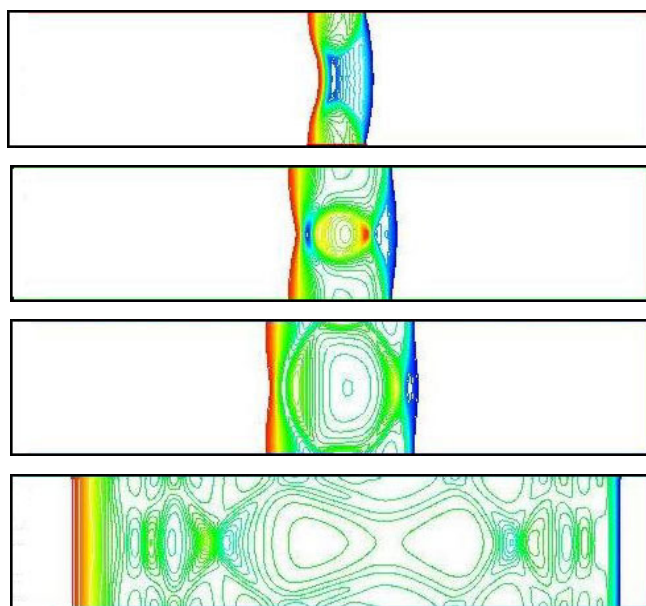


Figura 3.8 – Campo de pressão no interior de um tubo de choque após o rompimento da membrana.

Além da deformação da membrana, há outros fatores a serem considerados. A membrana deve garantir a separação entre o tubo indutor e o tubo induzido e, como já discutido, a sua deformação deve ser a mínima possível. Ela também não deve romper-se antes que as condições iniciais de ensaio estejam plenamente estabelecidas, especialmente em tubos muito longos. Uma vez que nesse caso o gás já pressurizado no tubo será descartado e todo o processo de montagem da membrana deverá ser refeito. Apesar de simples, esse processo demanda muito tempo em alguns tubos de choque, como por exemplo, no tubo de choque de referência do LMD-ENSAM.

Quando se trabalha com altas pressões em tubos longos, o rompimento antecipado da membrana gera atrasos significativos, pois o tempo necessário para despressurizar e pressurizar e a quantidade de gás que é descartada são muito elevados. Dessa forma, o material que é utilizado como membrana deve suportar a diferença de pressão com a mínima deformação possível.

Outra questão operacional relacionada à membrana, a ser considerada, é a direção da deformação da membrana, que deve ser em um único sentido. Para tanto, a velocidade de subida da pressão no tubo indutor até o nível de ensaio deve ser ligeiramente maior que a no tubo induzido. Isso pode ser realizado manualmente através do ajuste das válvulas de alimentação do tubo ou por meio de um controlador automático de pressão. A deformação da membrana em um único sentido contribui para uma melhor repetitividade e reprodutibilidade dos ensaios (Oliveira, 2004).

As membranas mais utilizadas em tubos de choque metrológicos são celofane, poliéster e celisol, sendo que cada tipo de membrana é capaz de suportar uma diferença máxima de pressão. O primeiro fator a ser considerado na seleção de uma membrana é a relação de pressão entre os tubos indutor e induzido, uma vez que as dimensões do tubo não podem ser modificadas. As experiências em ensaios com o tubo de choque mostram que nem sempre a membrana mais espessa será a mais adequada às altas pressões. Por exemplo, é possível trabalhar com o celofane em altas pressões, desde que a diferença de pressão máxima suportada pelo material seja respeitada. Em casos nos quais se trabalha com diferenças de pressão extremamente elevadas pode-se utilizar membranas de metálicas.

3.1.2.2 Rugosidade

Outro ponto a ser destacado na construção de um tubo de choque é a qualidade do acabamento superficial da parede interna dos tubos, uma vez que a rugosidade pode aumentar os efeitos da camada limite sobre o escoamento e, conseqüentemente, gerar flutuações de pressão que contribuiriam no aumento da incerteza, especialmente nas calibrações em altas frequências.

Nesse sentido, para avaliar os efeitos da rugosidade, foram realizados ensaios com o tubo de choque TC100 do LMD-ENSAM/Paris, nos quais variou-se a rugosidade e mantiveram-se constantes as outras condições. Nos ensaios, a pressão no tubo induzido foi de *10 bar* e utilizou-se uma membrana de poliéster com *0,19 mm* de espessura. Para avaliar o efeito da rugosidade analisou-se a função de transferência média de uma série de ensaios. Para o cálculo da função de transferência utilizou-se como entrada o degrau perfeito e como saída o degrau gerado no tubo de choque e medido pelo transdutor fixado no fundo do tubo.

Inicialmente, foi realizada uma série de oito ensaios com a rugosidade interna original do tubo. Em seguida realizou-se um processo de polimento interno do tubo, a fim de reduzir a rugosidade, e os ensaios foram repetidos. A figura 3.9 mostra a média das funções de transferência para os ensaios com a rugosidade original e a figura 3.10 mostra a média após o polimento interno do tubo.

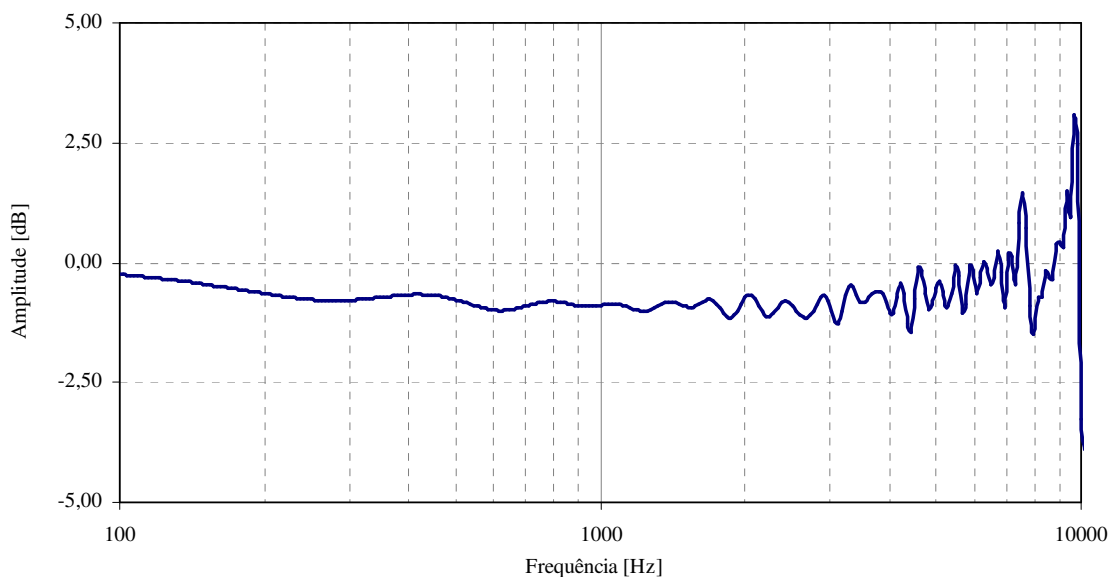


Figura 3.9 – Função de transferência para os ensaios com a rugosidade interna original do TC100.

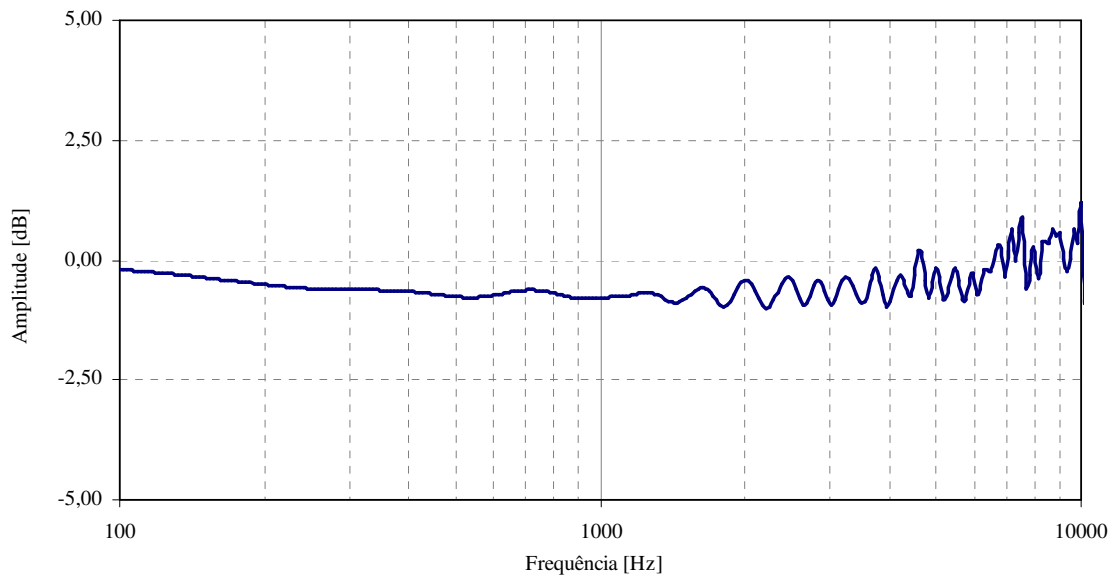


Figura 3.10 – Função de transferência para os ensaios após o polimento interno do TC100.

Comparando os resultados apresentados nas figuras 3.9 e 3.10, observa-se que, após o processo de polimento (redução da rugosidade), há uma atenuação nas flutuações de alta frequência, especialmente a partir de 3 kHz . Considerando esse resultado em conjunto com outros fatores, optou-se por realizar uma atualização tecnológica do TC100, onde uma das etapas foi a troca dos tubos indutor e induzido. Essa atualização será detalhada no próximo tópico.

3.1.2.3 Base de Sustentação do Tubo de Choque

Outro ponto importante a ser destacado na construção de um tubo de choque para uso metrológico se refere à base onde o tubo será montado, especialmente quando se trabalha com altas pressões. A base deve apresentar algumas características, como permitir a abertura e o fechamento do tubo, garantir o alinhamento dos tubos e ser rígida o suficiente para minimizar a deformação do tubo e os efeitos de vibrações externas.

3.1.2.4 Sistema de Abertura e Fechamento

Para a troca da membrana entre um ensaio e outro é necessário um sistema que abra e feche o tubo de choque. Isso pode ser realizado com a movimentação do tubo indutor, do induzido ou de ambos. Para isso, utilizam-se pistões pneumáticos ou hidráulicos e um sistema de buchas e guias que permita o deslocamento dos tubos. Em altas pressões,

devido às forças envolvidas, geralmente são utilizados pistões hidráulicos. O correto dimensionamento do pistão e da sua pressão de trabalho é essencial, pois garantem que o tubo permanecerá fechado durante o ensaio.

Em alguns casos de calibrações em altas pressões utiliza-se um pistão hidráulico para realizar a abertura e o fechamento do tubo e a manutenção desse estado é feita por meio de parafusos e porcas que fixam um tubo no outro.

3.1.2.5 Estanqueidade

Como o tubo de choque não é uma peça inteiriça a estanqueidade entre suas partes é essencial para garantir a geração de um degrau de pressão com qualidade metrológica. Mesmo com uma curta duração do degrau, falhas de estanqueidade interferem significativamente no resultado de uma calibração, uma vez que dificultam o estabelecimento e a manutenção das condições iniciais de pressão. Esses fatores contribuem negativamente na repetitividade dos ensaios, influenciando diretamente no valor da incerteza.

Para manter a estanqueidade, podem-se destacar alguns pontos, como a utilização de anéis de borracha (*o-rings*), mantas de borracha e pelo correto dimensionamento do rasgo onde esses anéis serão encaixados. A esses itens junta-se um sistema de fechamento corretamente dimensionado, o alinhamento entre o tubo indutor e o induzido, as conexões pneumáticas e o sistema de pressurização. Outro fator que interfere na estanqueidade do tubo de choque é a qualidade dos processos de fabricação das peças do tubo de choque, especialmente quando são utilizadas roscas e encaixes.

3.1.2.6 Rompimento da Membrana

Os processos no interior do tubo de choque têm início com o rompimento da membrana. Para isso, podem-se usar dois métodos diferentes: o rompimento natural ou rompimento forçado. O primeiro é o mais simples, sendo a membrana rompida por um aumento da pressão no tubo indutor. E no segundo mantêm-se as pressões nos tubos e utiliza-se um elemento externo para o rompimento.

As vantagens do rompimento natural são as facilidades de implementação e uso e a não utilização de um elemento no interior do tubo. Entretanto, quando se deseja trabalhar com diferenças de pressão muito específicas, o rompimento natural não garante que essas diferenças serão iguais para todos os ensaios, pois mesmo que se utilizem membranas do mesmo tipo, o rompimento ocorrerá com valores de pressão diferentes.

O rompimento forçado pode ser feito utilizando-se vários elementos. O mais comum é um perfurador montado no fundo do tubo indutor ou no suporte da membrana, conforme ilustrado na figura 3.11. O rompimento se dá pelo choque entre o perfurador e a membrana.

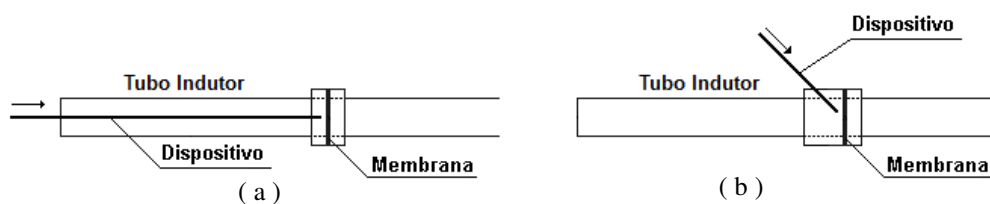


Figura 3.11 – Rompimento forçado da membrana com um perfurador. (a) perfurador no fundo do tubo indutor. (b) perfurador no porta membrana.

A utilização do rompimento forçado com o perfurador permite utilizar a mesma diferença de pressão nos ensaios. Por outro lado, estudos realizados no LMD-ENSAM/Paris com o tubo de choque de alta frequência (TCHF) mostraram que, a simples presença de um elemento no interior do tubo de choque gera perturbações nos processos físicos que reduzem a qualidade metrológica do degrau de pressão. Nas figuras 3.12 e 3.13 é possível comparar os resultados obtidos com o rompimento natural e como perfurador de membrana para os ensaios realizados no TCHF.

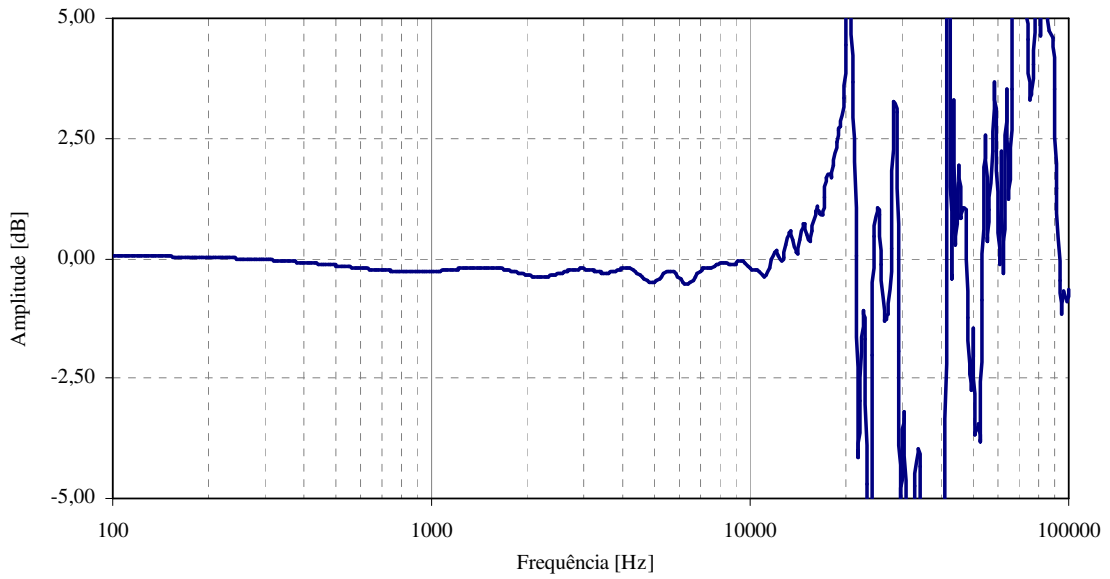


Figura 3.12 – Função de transferência para um rompimento natural da membrana no tubo de choque de alta frequência.

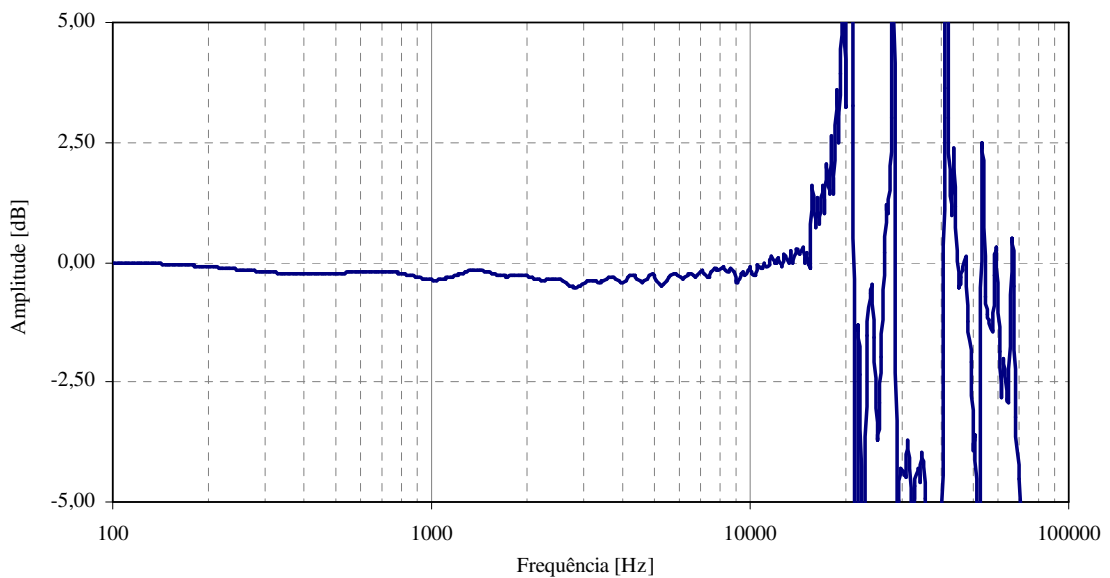


Figura 3.13 – Função de transferência para um rompimento natural da membrana com o perfurador instalado no tubo de choque de alta frequência.

A influência do perfurador no resultado, especialmente em altas frequências, pode ser percebida pelas perturbações provocadas na função de transferência. Os estudos apontaram a vibração do perfurador e o choque com a membrana como causas prováveis dessas alterações.

Com base nesses resultados, buscou-se desenvolver outros métodos de rompimento forçado que tivessem as vantagens do rompimento natural. Para isso seria necessário minimizar os elementos no interior do tubo de choque e controlar o momento do rompimento. As pesquisas do LMD-ENSAM/Paris e a experiência na construção de tubos de choque levaram a três novos métodos: o rompimento externo, o rompimento a laser e o rompimento a fio quente.

O primeiro método baseia-se na utilização de uma membrana maior que o diâmetro dos tubos e na atuação de um perfurador na parte da membrana que ficaria externa ao tubo. Para isso, o tubo indutor e o induzido não estariam completamente fechados e para manter a estanqueidade, a união dos tubos e a montagem dos dispositivos, seriam selados dentro de uma câmara. O dispositivo foi projetado, especificado e está em processo de construção, montagem e testes. A figura 3.14 mostra o projeto e um esquema simplificado desse dispositivo.

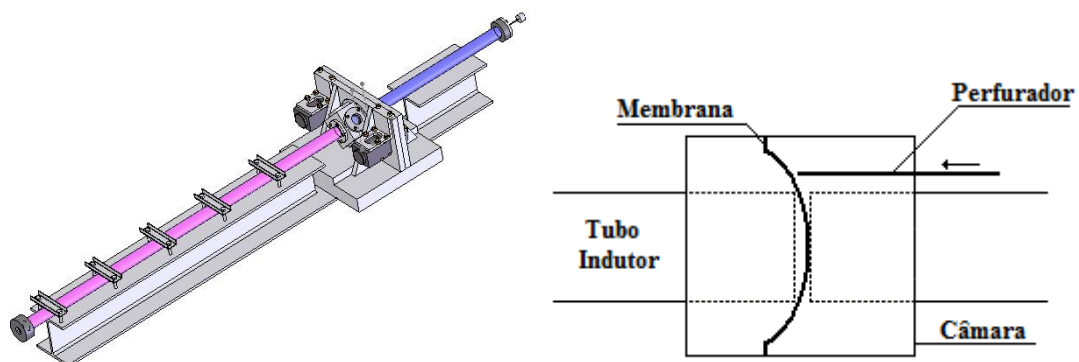
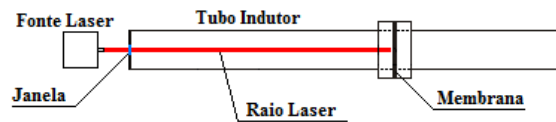
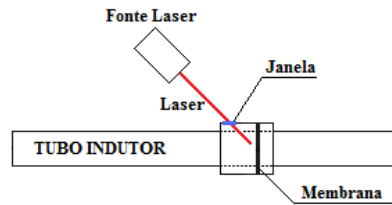


Figura 3.14 – Esquema de um dispositivo de rompimento com perfurador externo.

O segundo método foi desenvolvido baseando-se no trabalho de Sasoh et al. (2006), onde foi mostrada a viabilidade do uso do laser para romper membranas em tubos de choque, o detalhamento desse estudo foi apresentado na revisão bibliográfica no capítulo anterior. Entretanto, o porte e o custo de um aparelho laser similar ao usado no trabalho de Sasoh et al. (2006) dificultam a utilização desse método de rompimento. Então, buscou-se um dispositivo de laser mais adequado, que no lugar de suprimir toda a membrana como no trabalho de Sasoh et al. (2006), atuasse como um perfurador. A figura 3.15 mostra um esquema desse método. Em (a) tem-se a montagem com laser no fundo do tubo e em (b) a montagem com laser no suporte da membrana.



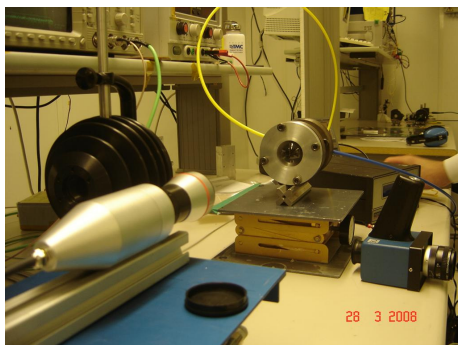
(a)



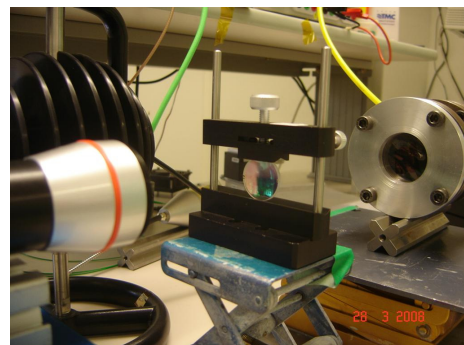
(b)

Figura 3.15 – Esquema do rompimento a laser.

A primeira etapa do estudo de viabilidade consistiu em verificar se o laser romperia a membrana. Para isso, foi montado um experimento no qual foram testadas algumas potências de laser. Os primeiros resultados não foram conclusivos, pois em cerca de 40% dos ensaios, o laser rompeu a membrana e nos outros apenas um orifício foi produzido. Verificou-se que nos casos onde a membrana foi rompida, a pressão no tubo estava entre 85% e 95% da pressão máxima suportada pela membrana. A figura 3.16 mostra as montagens experimentais para testar a viabilidade do laser como instrumento para romper a membrana. Em (a) testou-se o laser direto sobre a membrana e em (b) ensaio com uma janela entre a membrana e o laser.



(a)



(b)

Figura 3.16 – Montagem experimental com laser.

Esse método continua em desenvolvimento, sendo necessário avaliar a absorção de energia por parte da membrana e assim definir a potência ideal para o rompimento. Além disso, deve-se analisar a possibilidade de utilizar um raio laser inclinado (figura 3.15b), de forma

que o laser não atinja o sensor localizado no fundo do tubo induzido. Outro ponto que demanda estudos mais aprofundados refere-se ao dimensionamento e a montagem do conjunto ideal de laser, janela e membrana.

A base do desenvolvimento do terceiro método, a ser apresentado, não implica a eliminação completa de um elemento interno ao tubo, mas a minimização de suas dimensões e, conseqüentemente, a redução de sua influência sobre os processos físicos. Dessa forma, foi desenvolvido o método do fio quente, que basicamente consiste em colocar em contato com a membrana um fio metálico e aplicar uma corrente elétrica. E o aquecimento do fio devido à passagem da corrente seria o responsável pelo rompimento da membrana.

Para verificar a viabilidade desse método, foi montado o dispositivo mostrado na figura 3.17, com o qual foi possível avaliar a forma mais adequada do contato entre a membrana e o fio (um ou dois fios, cruzados ou não), a pressão ideal no tubo indutor (em termos da pressão máxima de rompimento da membrana), o estiramento ideal do fio e a corrente que circularia no fio.

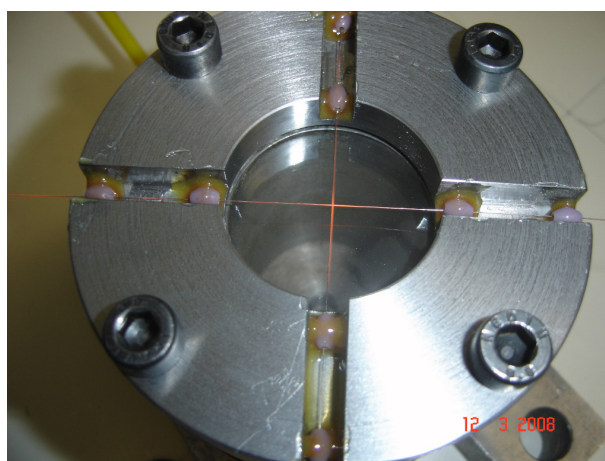


Figura 3.17 – Montagem experimental de avaliação da viabilidade do dispositivo de fio quente. Na imagem é testada a configuração de dois fios cruzados.

Para avaliar a montagem, foram considerados o rompimento da membrana e a facilidade de fabricação e montagem. Nesse caso, a configuração mais vantajosa foi a montagem com um apenas fio que passa pelo centro da membrana. Os resultados levaram ao

desenvolvimento de um dispositivo para ser adaptado ao tubo de choque de alta frequência e, assim, avaliar o método em uma situação real de ensaio.

O tubo de choque de alta frequência é instrumento de ensaio em desenvolvimento no LMD-ENSAM/Paris com o objetivo de ampliar o intervalo de frequência da calibração dinâmica em pressão, ou seja, esse tubo seria um quarto instrumento na cadeia de dispositivos de ensaio. A figura 3.18 apresenta o resultado de uma série de ensaios com o uso do fio quente no tubo de choque de alta frequência.

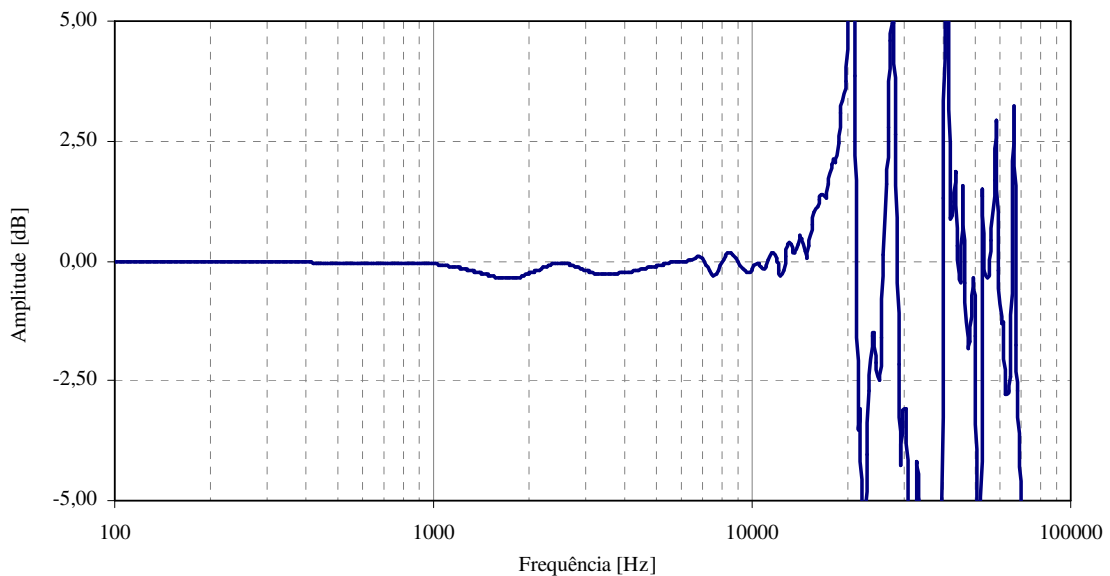


Figura 3.18 – Função de transferência para um rompimento com fio quente no tubo de choque de alta frequência.

Comparando a figura 3.18 com as figuras 3.12 e 3.13 observa-se que a utilização da técnica do fio quente apresenta um resultado muito próximo do rompimento natural, com a vantagem de controlar o momento do rompimento. Os resultados com outras membranas e outras relações de pressão mostraram a viabilidade do método, levando à construção de um dispositivo a fio quente para ser utilizado no tubo de choque TC100, esse dispositivo é apresentado na figura 3.19. Devido a questões de estanqueidade e ao rompimento do fio durante os ensaios, esse dispositivo é recomendado para calibrações com baixas diferenças de pressão e com membrana de celofane.



Figura 3.19 – Dispositivo de fio quente usado no TC100.

Os resultados em baixas pressões estimularam o início do desenvolvimento de dispositivos para serem utilizados no TC100 para altas pressões e no tubo de choque franco-brasileiro (TCFB). Atualmente, esses dispositivos estão em fase de projeto.

3.1.2.7 Controle de Condições Iniciais

Para controlar as condições iniciais de ensaio, mais especificamente as pressões nos tubos indutor e induzido, utilizam-se controladores automatizados de pressão que permitem um controle reproduzível (Oliveira, 2004). Esses dispositivos utilizam um sistema de válvula que controla o fluxo de gás para dentro e para fora dos tubos. O controle dos dispositivos é feito remotamente por softwares desenvolvidos no LMD-ENSAM/Paris, que permitem desligar e ligar o controle, determinar a velocidade de pressurização, entre outras funcionalidades.

Para controlar os geradores de pressão, os *softwares* utilizam as leituras de transdutores de pressão fixados aos tubos. Esses transdutores são calibrados e rastreados até o padrão nacional em pressão. Os dados obtidos com os transdutores são gravados e, dessa forma, é possível conhecer exatamente o ponto de rompimento. A figura 3.20 mostra um esquema da montagem do controle de pressão.

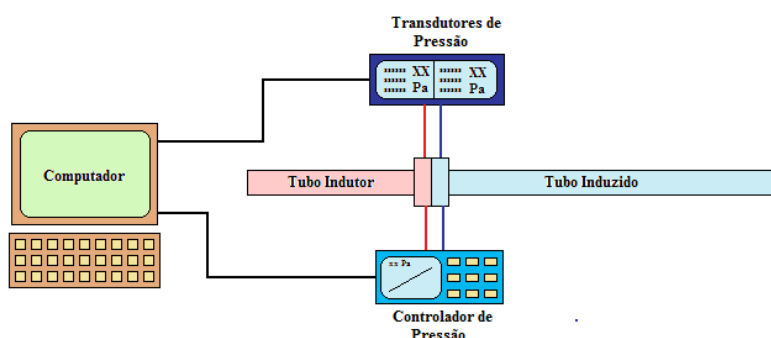


Figura 3.20 – Esquema simplificado da montagem do sistema de controle de pressão.

Para garantir que a deformação da membrana ocorra somente em um sentido, os *softwares* de controle estabelecem velocidades de pressurização diferentes para os tubos indutor e induzido. Oliveira (2004) mostra o registro da subida e a estabilização da pressão durante a preparação de um ensaio (figura 3.21). Devido aos valores máximos de pressão e à resolução dos transdutores, os dispositivos usados em baixas e altas pressões são diferentes.

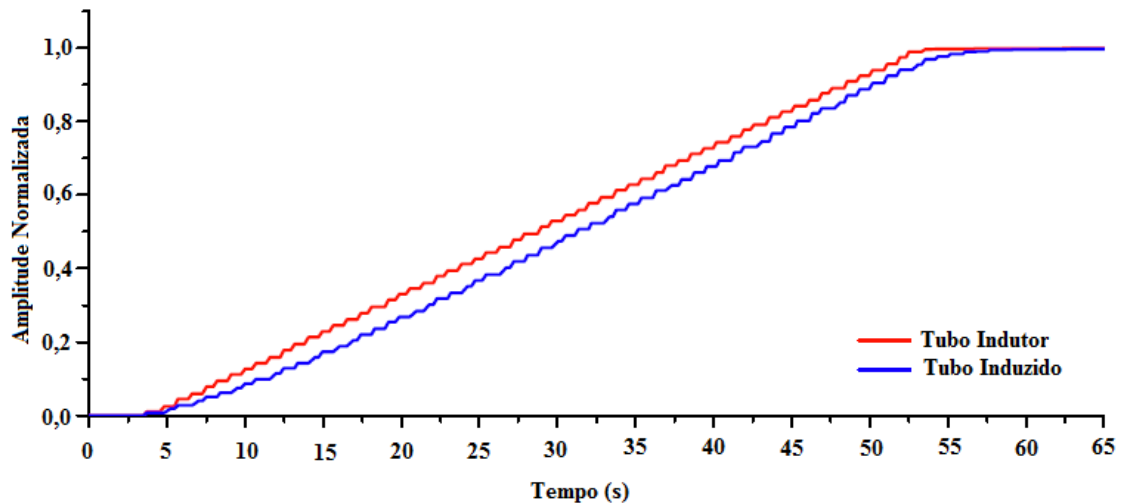


Figura 3.21 – Curva de subida da pressão em tubo de choque.

Outro fator importante no controle das condições iniciais de pressão é a relação entre as pressões no tubo indutor e induzido. Segundo Damion (1993b e 1995), para calibrações dinâmicas, essa relação de pressão deve ser próxima de 1 , uma vez que relações mais elevadas favorecem a um desvio do degrau de pressão em relação a um degrau perfeito. Esse efeito é ilustrado na figura 3.22, que mostra a resposta temporal de um ensaio com a relação de pressão igual $2,25$ e a figura 3.23 apresenta a função de transferência correspondente.

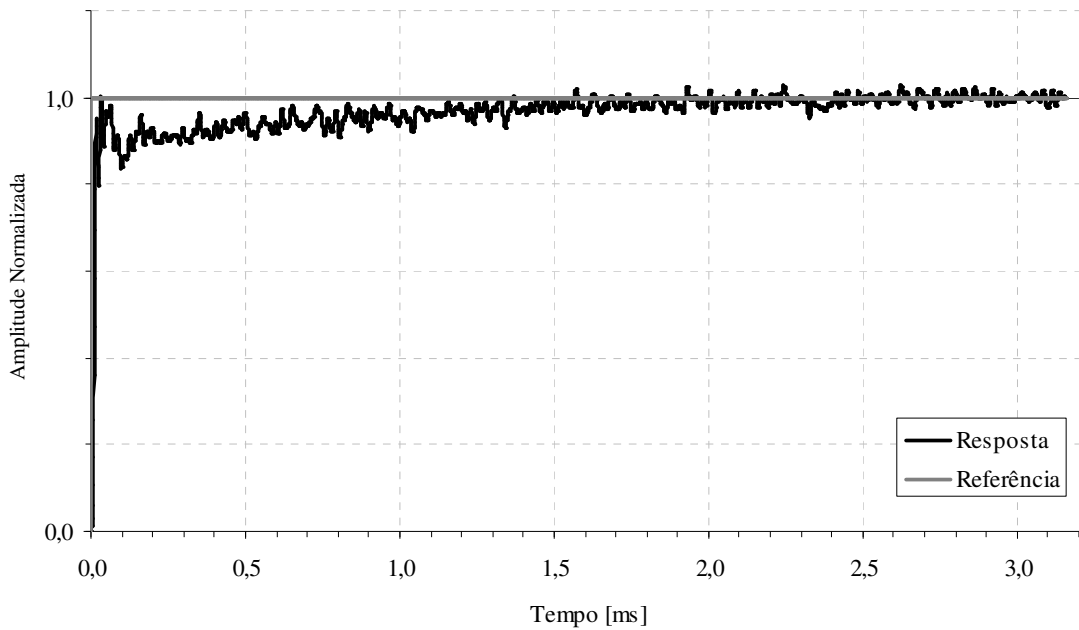


Figura 3.22 – Resposta temporal com uma relação de pressão igual 2,25 (TC100).

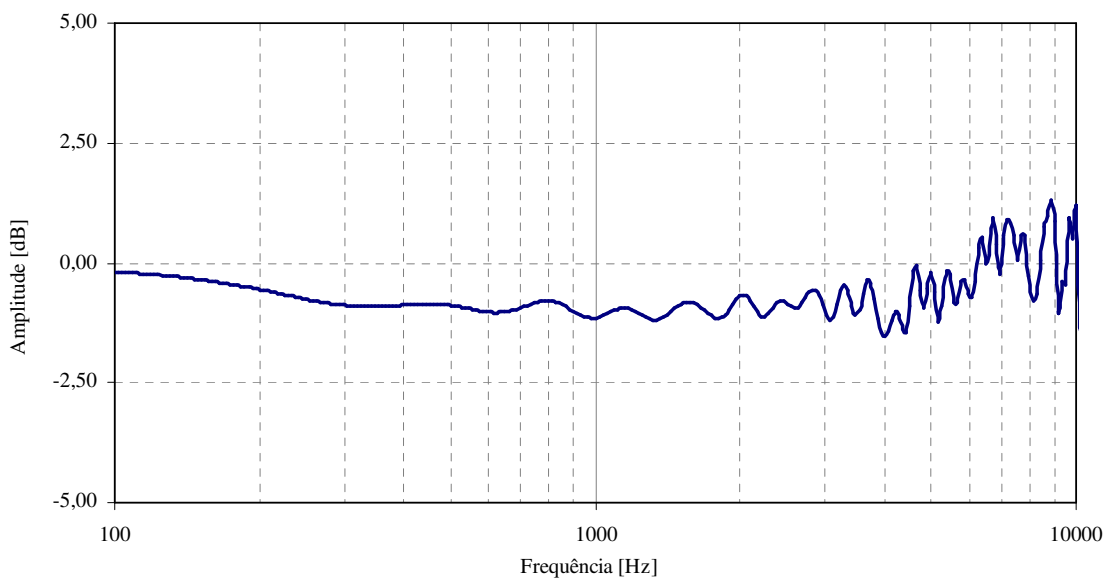


Figura 3.23 – Função de Transferência com uma relação de pressão igual 2,25 (TC100)

Idealmente, o ganho de uma função de transferência deveria ser igual a zero, isto é não atenuar e nem amplificar o sinal. Entretanto, não há sistemas ideais que levem a esse resultado. Na prática os melhores sistemas oscilam em torno de zero, de tal forma que a média fique o mais próximo possível do ideal e que as oscilações ocorram dentro de um intervalo pré-determinado. Como pode-se observar na figura 3.23, o desvio do degrau de pressão levou a um afastamento significativo do ideal entre as médias e altas frequências.

Para mostrar a influência da relação de pressão sobre o resultado, a figura 3.24 mostra a resposta temporal de um ensaio com uma relação de pressão igual a 1,10 e a figura 3.25 apresenta a respectiva função de transferência.

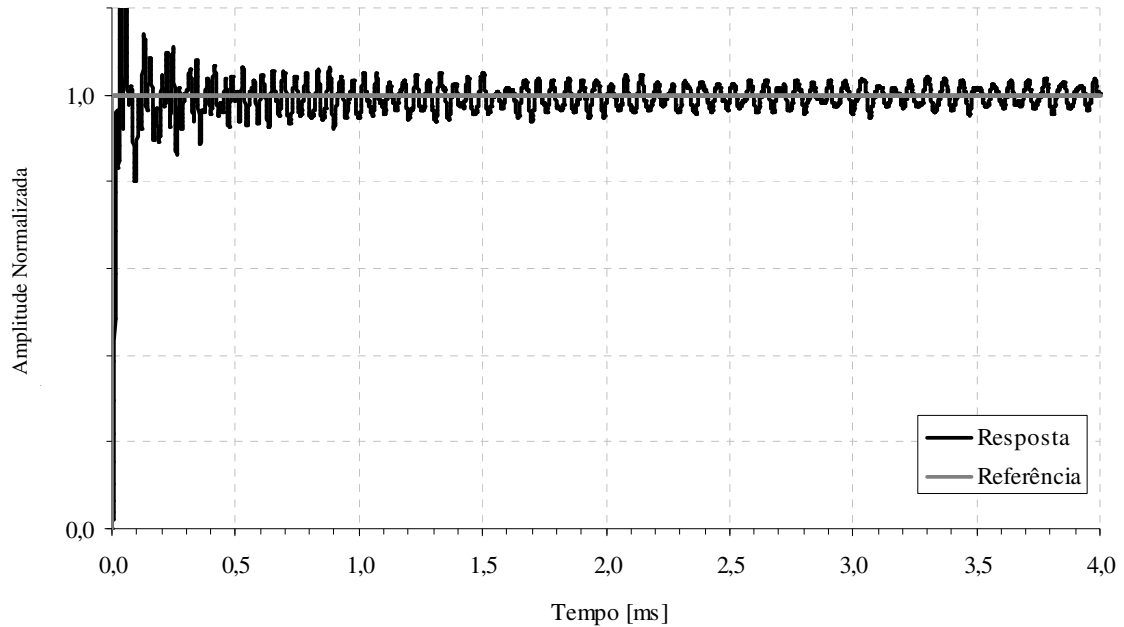


Figura 3.24 – Resposta temporal com uma relação de pressão igual 1,10, membrana celofane, pressão no tubo indutor de 1 MPa e rompimento natural (TC100).

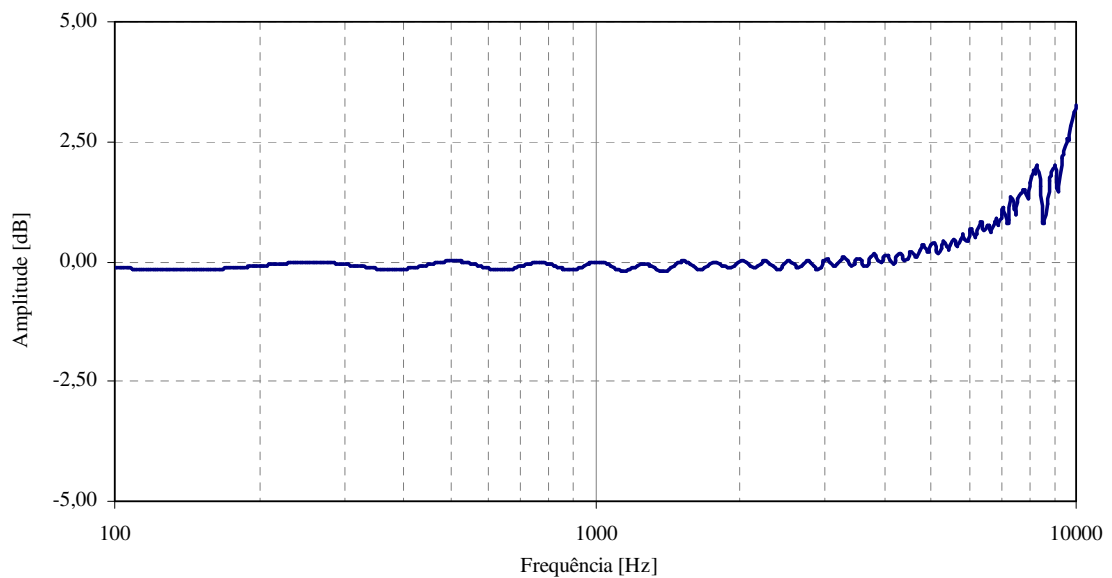


Figura 3.25 – Função de Transferência com uma relação de pressão igual 1,10 (TC100).

A análise das figuras mostra que não há desvio do degrau de pressão e, conseqüentemente, o ganho da função de transferência se aproxima mais do ideal. Comparando as figuras 3.22, 3.23, 3.24 e 3.25, observa-se a influência da relação de pressão no resultado final de um ensaio.

A definição de qual relação de pressão utilizar é feita com base na pressão inicial no tubo indutor, no tipo de membrana, nos resultados esperados e na experiência de outros ensaios. Na calibração de transdutores de referência, considera-se que o tubo de choque gera um degrau de pressão perfeito e esse é comparado com o resultado do transdutor. Nesse caso, quanto mais afastado do ideal for o resultado maior será a incerteza associada.

O desvio do degrau de pressão em relação ao degrau perfeito quando são utilizadas elevadas relações de pressão ainda não foi objeto específico de estudos. Entretanto trabalhos do LMD-ENSAM/Paris e do LMD-UnB (Damion, 1993b; Carvalho, 1995; Barcelos, 2002) sugerem que essa inclinação ocorre devido à formação de uma onda de choque esférica, a intensificação dos processos termodinâmicos no na região onde o degrau é gerado e/ou a uma mudança na interação mesurando/sensor.

2.1.2.8 Limpeza do tubo

O rompimento da membrana acaba por lançar no tubo induzido fragmentos da membrana e, após alguns ensaios, essas partes acumulam-se no fundo e nas paredes do tubo interferindo na qualidade do degrau de pressão. Assim, após certo número de ensaios, é necessário realizar a limpeza do tubo. Uma das formas de executar esse procedimento é a utilização de dispositivos específicos de limpeza. Entretanto, não existe um instrumento padrão, uma vez que cada tubo de choque possui características diferentes.

Outra forma mais simples de se realizar a limpeza do tubo consiste em abrir o fundo do tubo induzido e realizar um ensaio com uma pequena diferença de pressão. Dessa forma, a passagem da onda de choque e o escoamento induzido expulsam os fragmentos de membrana.

Não há uma quantidade padrão de ensaios que podem ser realizados entre uma limpeza e outra. Isso depende do material da membrana, do diâmetro do tubo e da facilidade em

montar e desmontar o fundo do tubo induzido. Por exemplo, nos ensaios em altas frequências a influência das partes da membrana é mais evidente. Logo a limpeza pode ser realizada entre um ensaio e outro. Em tubos com grandes diâmetros é gerada uma grande quantidade de fragmentos da membrana, que se depositam no fundo do tubo. Por exemplo, no tubo de choque de referência em baixas pressões é necessária a realização da limpeza a cada dois ou quatro ensaios.

Os ensaios mostram que é possível observar que, dependendo do material, haverá uma maior ou menor quantidade de material e, conseqüentemente, de procedimentos de limpeza. Dentre as membranas mais utilizadas nos laboratórios, a de celofane gera mais fragmentos que as de poliéster. A figura 3.26 mostra diferentes tipos de membrana após o ensaio, em (a) e (b) observa-se membranas de celofane com rompimento por perfurador, em (c) membrana de celofane com rompimento natural, em (d) membrana de poliéster com 0,19 mm de espessura e rompimento por perfurador e em (e) membrana de poliéster com 0,19 mm de espessura e rompimento natural.

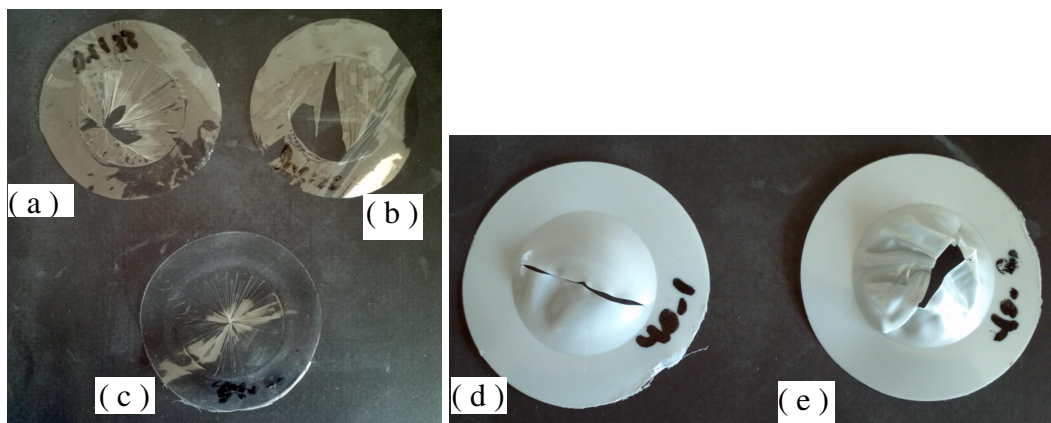


Figura 3.26 – Vários tipos de membranas após o ensaio.

2.1.2.9 Sistema de aquisição e Tratamento de Dados

O registro dos dados dos transdutores de pressão é feito por meio de um analisador de sinal que utiliza um conversor analógico/digital de até 16 bits de resolução e uma estrutura de aquisição paralela (que permite a aquisição de um dado enquanto outro é gravado).

A utilização de filtros de sinal em associação com o analisador de sinal é essencial, uma vez que há interferências e se trabalha com a discretização de um sinal contínuo. O uso dos

filtros permite reduzir ruídos (como os gerados pela frequência da rede elétrica), além de possibilitar o ajuste do intervalo de frequência mais adequado a cada tipo de ensaio. Para reduzir os efeitos da discretização do sinal (como a replicação do espectro) utilizam-se filtros analógicos que adequam a frequência de corte à frequência de amostragem. Com isso, consegue-se reduzir a incerteza associada à aquisição (Oliveira, 2004).

O tratamento do sinal é feito por meio de *softwares* desenvolvidos especificamente para cada tipo de calibração. A escolha do *software* é feita considerando a calibração e as informações que se deseja obter. A tabela 3.1 mostra os softwares utilizados.

Tabela 3.1 – Softwares utilizados para explorar dos dados.

Software	Calibração	Plataforma/ Desenvolvedor	Resultado
KetStaTension	Quase Estática em Tensão	Matlab/LMD-ENSAM	Sensibilidade volt/volt do sistema de aquisição
TensionAutomatique	Quase Estática em Tensão	Matlab/LMD-ENSAM	Sensibilidade volt/volt do sistema de aquisição
KetStaPression	Quase Estática em Pressão	Matlab/LMD-ENSAM	Sensibilidade <i>MPa/volt</i> dos sensores
TmTr	Definição das características dinâmicas	Matlab/LMD-ENSAM	Tempo de subida, de resposta, constante de tempo, etc.
Edycap	Dinâmica em Tensão e Pressão	Windows/LMD-ENSAM	Função de Transferência

A calibração quase-estática e dinâmica do sistema de aquisição é uma etapa fundamental para cálculo da incerteza associada ao processo. Para isso, foi desenvolvido um dispositivo gerador de degrau de tensão, cujo tempo de subida do degrau é muito menor que $1 \mu s$. A figura 3.27 mostra os dispositivos do LMD-ENSAM/Paris e do LMD-UnB.



Figura 3.27 – Geradores de degrau de tensão. (a) Dispositivo do LMD-ENSAM; (b) Dispositivo do LMD-UnB.

Esses dispositivos são constituídos basicamente de um circuito com potenciômetros, baterias de corrente contínua, conexões e de um interruptor de alto desempenho que utiliza metal líquido para gerar o degrau. O dispositivo permite o controle dos níveis inferior e superior do degrau e, dessa forma, é possível calibrar as diversas faixas de amplitude do sistema de aquisição. A calibração dos softwares é realizada com o uso de uma base de dados padrão (Oliveira, 2004).

3.1.3 Tubos de Choque

Neste trabalho são utilizados dois tubos de choques que estão instalados no LMD-ENSAM/Paris e no LMD-UnB. No primeiro laboratório foram realizados os ensaios em altas frequências (TC100) e no segundo os ensaios em médias frequências (TCFB). Nos parágrafos seguintes serão apresentadas as descrições dos tubos de choque. A Tabela 3.2 mostra as principais características desses tubos.

Tabela 3.2 – Grupo de tubos de choque do LMD-ENSAM/Paris

Nome	Diâmetro Interno (mm)	Comprimento (m)	Pressão Máxima (MPa)	Intervalo de Frequência (Hz)
TC100	32	2,3	10	500 – 10000
TCFB	50	15	3	100 – 5000

3.1.3.1 TC100

O tubo de choque TC100 foi projetado e construído pelo LMD-ENSAM/Paris, para calibrações em alta frequência e com uma amplitude de até 10 MPa . Em sua versão original o tubo era composto de seis partes, de 350 mm cada, e quatro buchas. Os tubos eram montados sobre bases de alumínio fundido que deslizam sobre trilhos, permitindo assim o movimento de abertura e fechamento do tubo.

O fundo do tubo induzido não é fixo, o que permite realizar a limpeza entre um ensaio e outro. Originalmente, o sistema de abertura era controlado por uma bomba manual que atuava sobre um pistão hidráulico. Como o TC100 foi concebido na década de 80, o controle das pressões era feito por um sistema de válvulas e manômetros.

O TC100 não possui um perfurador de membrana fixo, então para se trabalhar com esse tipo de rompimento utiliza-se uma peça opcional que é acoplada ao tubo. Para o rompimento natural retira-se a peça como o perfurador. Essa flexibilidade é importante, pois permite realizar ensaios sem nenhum elemento no interior do tubo de choque. A figura 3.28 mostra uma imagem da primeira versão do TC100, em (a) apresenta-se o conjunto de ensaio, em (b) ilustração esquemática do TC100 e em (c) detalhe dos controles de pressão.

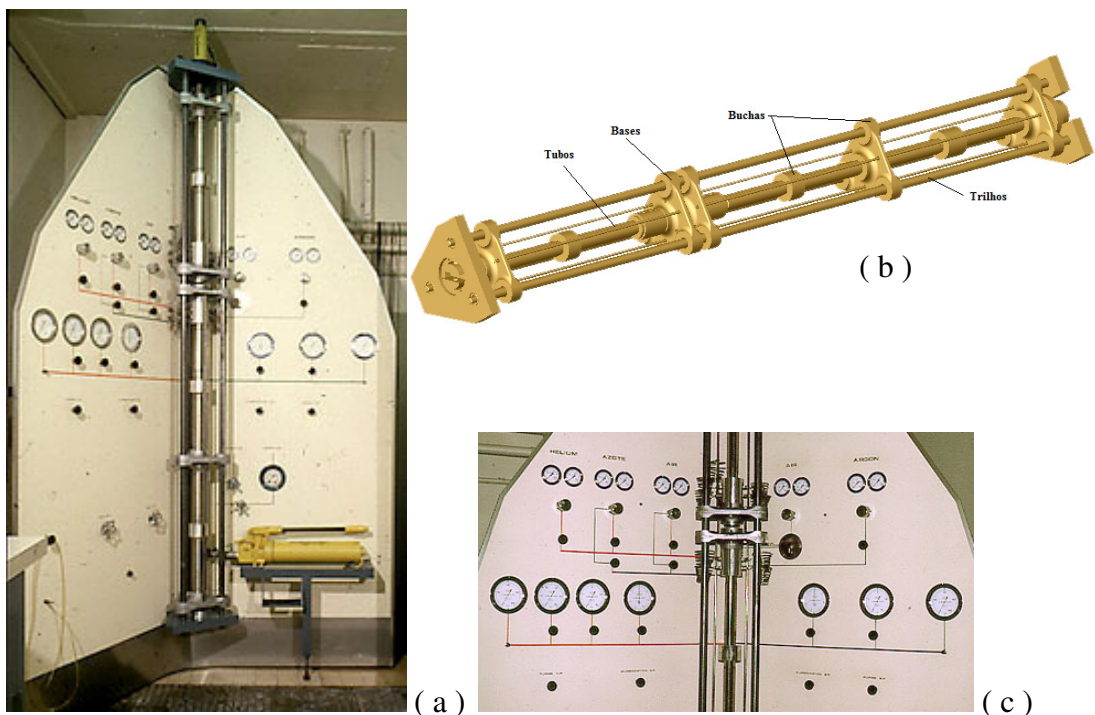


Figura 3.28 – Primeira versão do TC100.

Nos anos 90 o TC100 passou por atualizações tecnológicas de adaptação do sistema de controle da pressão automatizado. A figura 3.29 mostra o TC100 após essa primeira atualização, onde observa-se a esquerda o sistema de aquisição de dados e a direita o sistema automatizado de controle de pressão.

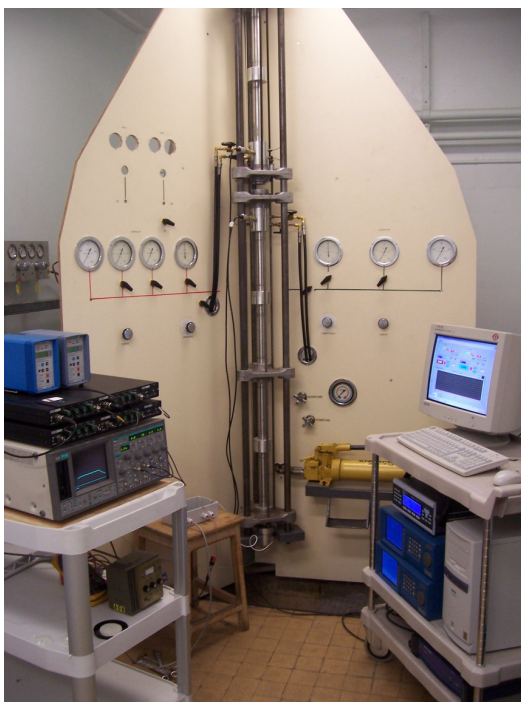


Figura 3.29 – TC100 após as atualizações para permitir a conexão do sistema automatizado de controle de pressão.

O objetivo principal deste trabalho é a calibração dinâmica de um transdutor de pressão de referência em altas pressões. Deseja-se que a incerteza seja a menor possível, uma vez que esse transdutor será utilizado para realizar calibrações por comparação. Dessa forma, com base na metodologia proposta analisaram-se quais poderiam ser os principais agentes que contribuiriam para o aumento da incerteza nos ensaios em altas pressões. Essa análise (ensaios apresentados no tópico 3.1.2) mostrou a necessidade de realizar novas atualizações no TC100, a fim de reduzir as fontes de incerteza associadas ao processo de calibração em altas pressões.

Então, a primeira etapa da atualização consistiu em desmontar o tubo de choque e toda estrutura de controle manual de pressão. A fim de melhorar a rigidez da base, o tubo foi remontado em uma estrutura de aço fixada à parede do laboratório, pois antes estava montado sobre uma estrutura de aço e madeira. Manteve-se o pistão hidráulico para

controlar a abertura e o fechamento do tubo, mas a bomba manual foi substituída uma bomba hidráulica com acionamento pneumático. Com isso foi possível reduzir em, aproximadamente, 50% o tempo entre um ensaio e outro, além possibilitar um controle mais preciso da pressão de fechamento do tubo e com isso melhorar a estanqueidade sem causar deformações no tubo.

Com o TC100 desmontado executou-se o processo de redução da rugosidade apresentada no tópico anterior, além de uma revisão e/ou substituição dos itens ligados a estanqueidade, tais como juntas de vedação, *o-rings* e ajuste entre buchas e tubos. A figura 3.30 mostra a nova montagem do TC100, em (b) o fundo do tubo induzido e em (c) a bomba de acionamento pneumático.

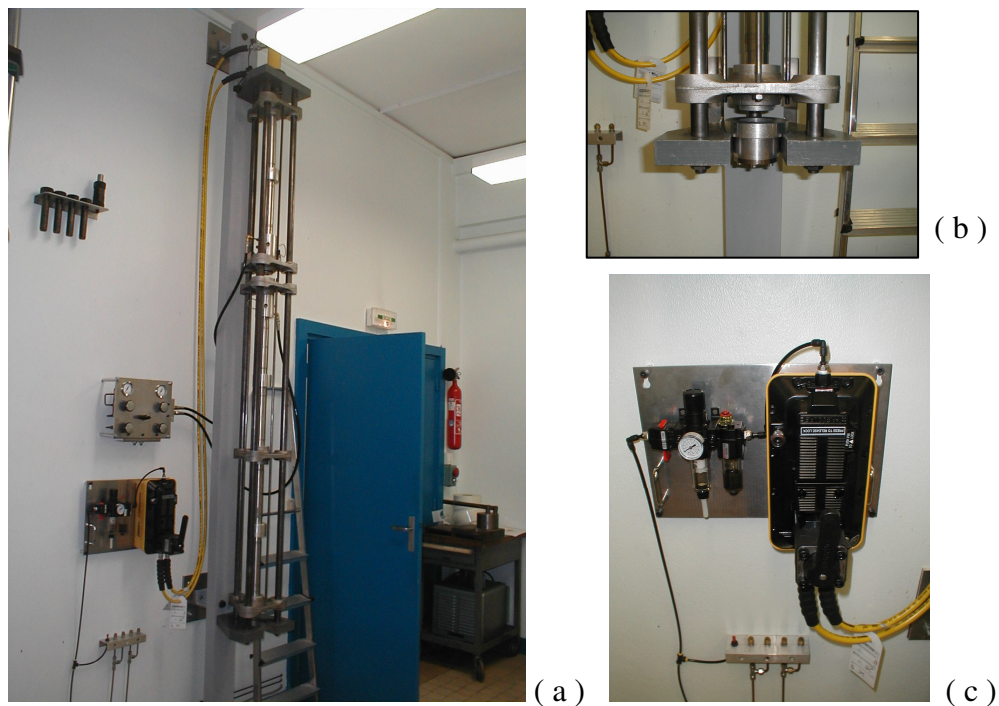


Figura 3.30 – TC100 depois da primeira atualização.

O tubo foi remontado e testado. Os resultados foram satisfatórios, entretanto ainda havia flutuações de pressão em médias e altas frequências. Dessa forma, decidiu-se realizar uma segunda atualização, envolvendo, principalmente, a substituição dos tubos. Os tubos indutor e induzido foram substituídos por peças inteiriças e polidas internamente. Outra ação consistiu em trocar o sistema automatizado de controle de pressão por equipamentos mais modernos. A figura 3.31 mostra o novo tubo TC100, vale destacar que se mantiveram algumas buchas de alumínio a fim de garantir o alinhamento dos tubos. A figura 3.32 representa o resultado com essa nova montagem.

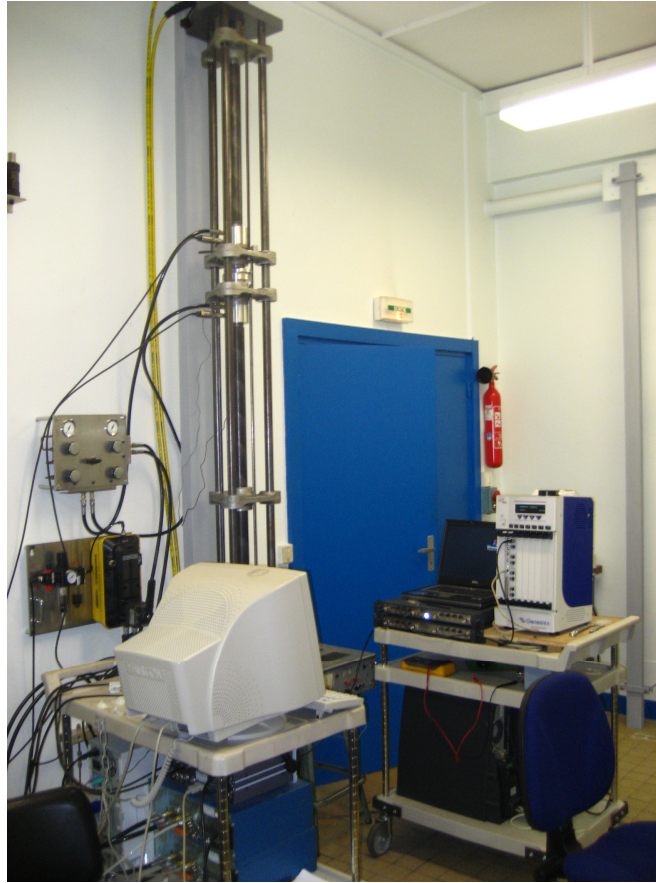


Figura 3.31 – Novo TC100 inteiriço com instrumentação completa. À esquerda o sistema automatizado de pressão e a direita o sistema de aquisição de dados.

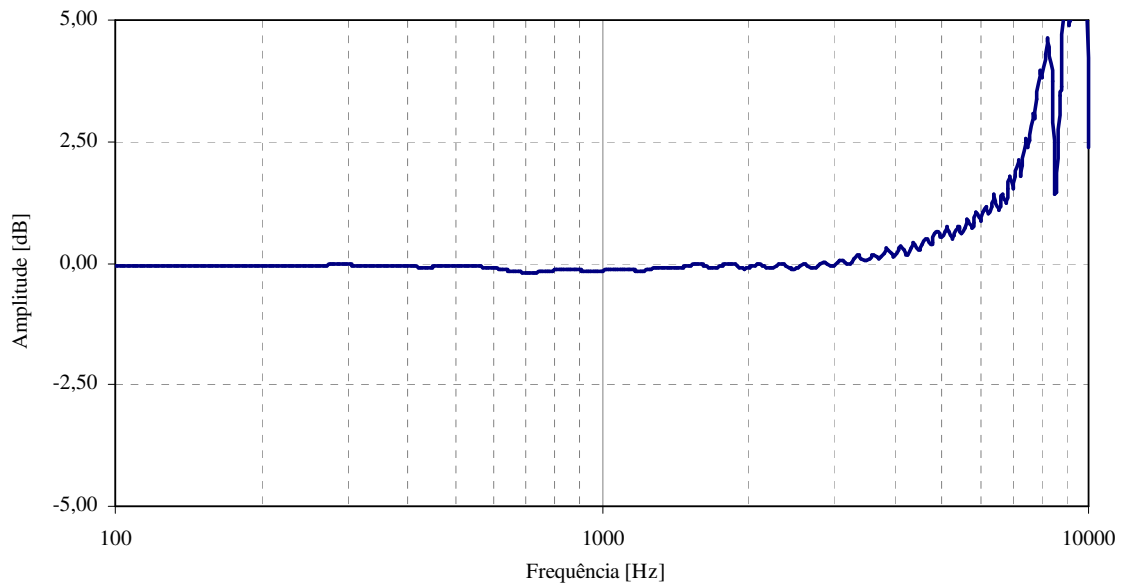


Figura 3.32 – Ensaio no TC100 após a última atualização. A pressão no tubo indutor igual a 3 MPa, membrana de celofane e relação de pressão igual a 1,1.

Para mostrar a evolução dos resultados obtidos com o TC100 abaixo se apresenta as funções de transferência para as várias versões do tubo de choque desde a primeira versão até a atual que é utilizada nesse trabalho.

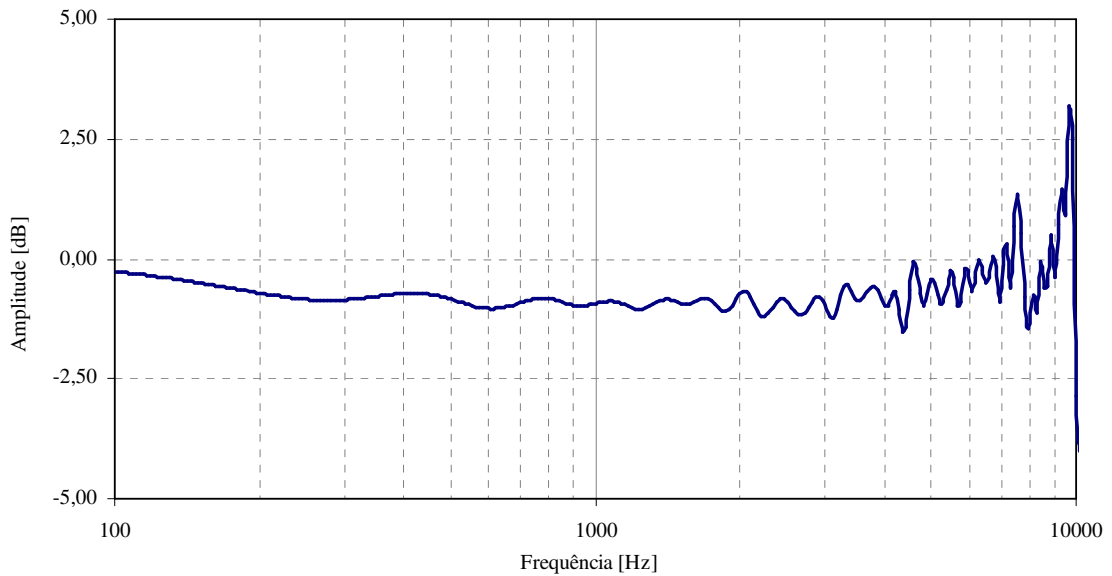


Figura 3.33 – Ensaio no TC100 original com relação de pressão aproximada de 2,2. Pressão no tubo induzido igual a 1 MPa , membrana de poliéster de $0,19\text{ mm}$ e rompimento natural. Média de 8 ensaios.

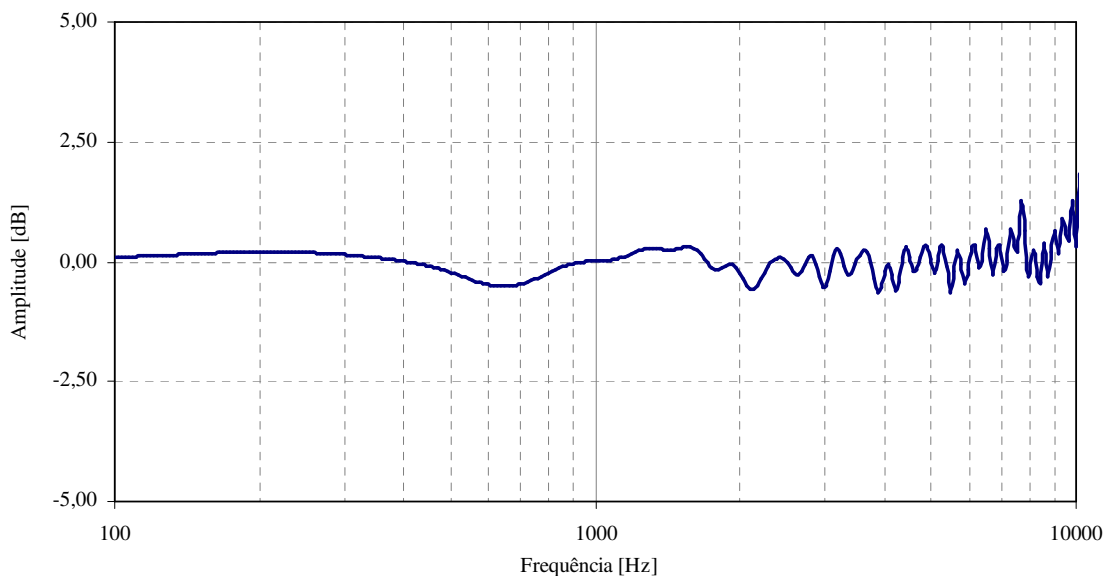


Figura 3.34 – Ensaio no TC100 original com uma relação de pressão igual 1,5, pressão no tubo induzido igual a 100 kPa , pressão no tubo indutor igual a 150 kPa membrana de celofane e rompimento com perfurador. Média de 8 ensaios.

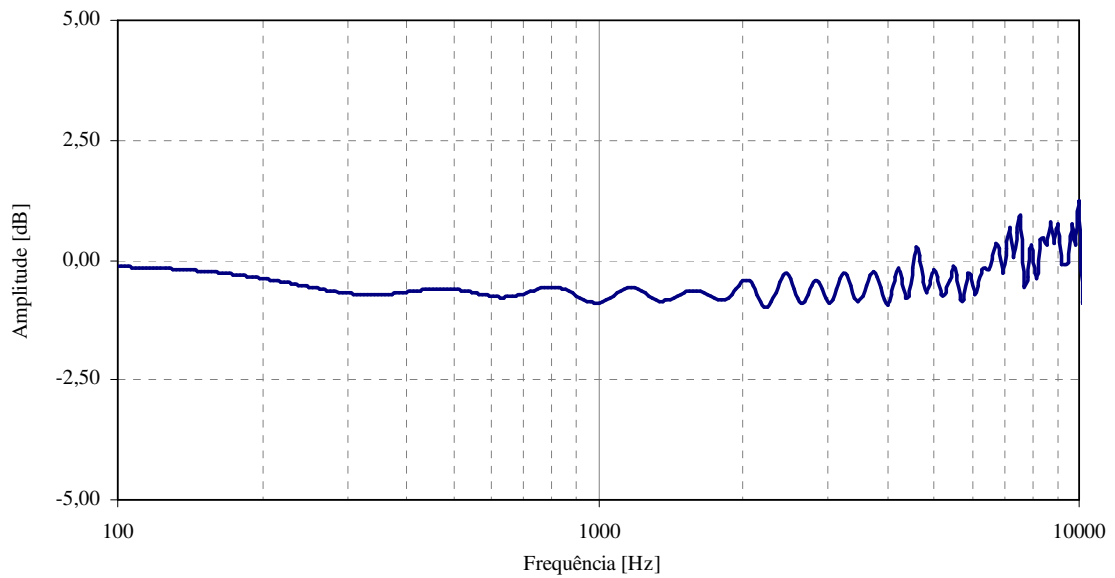


Figura 3.35 – Ensaio no TC100 após a primeira atualização com uma relação de pressão igual 2,2, pressão no tubo induzido igual a 1 MPa , membrana de poliéster de $0,19\text{ mm}$ e rompimento natural. Média de 8 ensaios.

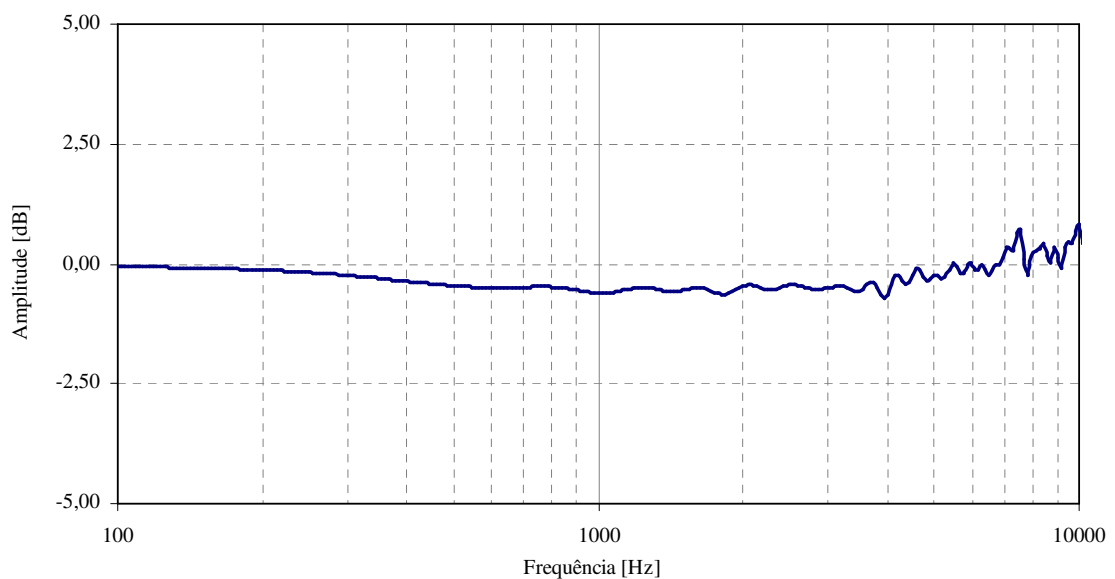


Figura 3.36 – Ensaio no TC100 após a primeira atualização com uma relação de pressão igual 2, pressão no tubo induzido igual a 100 kPa , pressão no tubo indutor igual a 150 kPa membrana de celofane e rompimento com perfurador. Média de 8 ensaios.

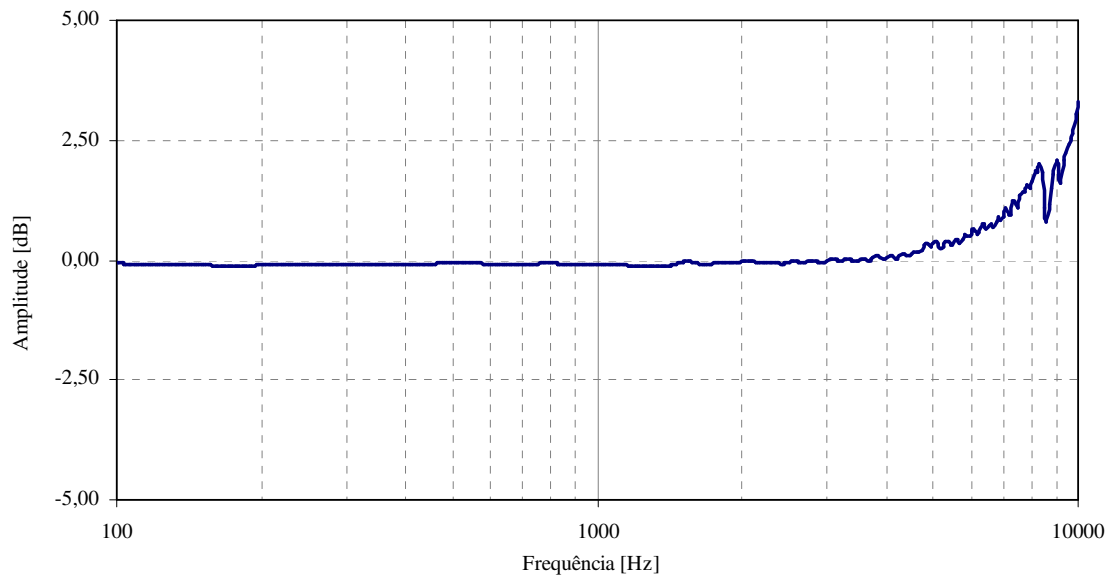


Figura 3.37 – Ensaio no TC100 após última atualização a com uma relação de pressão igual 1,1, pressão no tubo induzido igual a 1 MPa, pressão no tubo indutor igual a 1,1 MPa membrana de celofane e rompimento com perfurador. Média de 4 ensaios.

No tópico anterior foi destacada a utilização do fio quente como método de rompimento da membrana, mostrou-se também o dispositivo experimental que foi fabricado para testar a viabilidade desse método no TC100. A figura 3.38 apresenta a resposta temporal de um ensaio com o fio quente e membrana de poliéster e a figura 3.39 a função de transferência para esse ensaio. A figura 3.40 mostra a resposta temporal para o mesmo ensaio com membrana de celofane e nas mesmas configurações do ensaio com poliéster e a figura 3.41 mostra a função de transferência para esse ensaio.

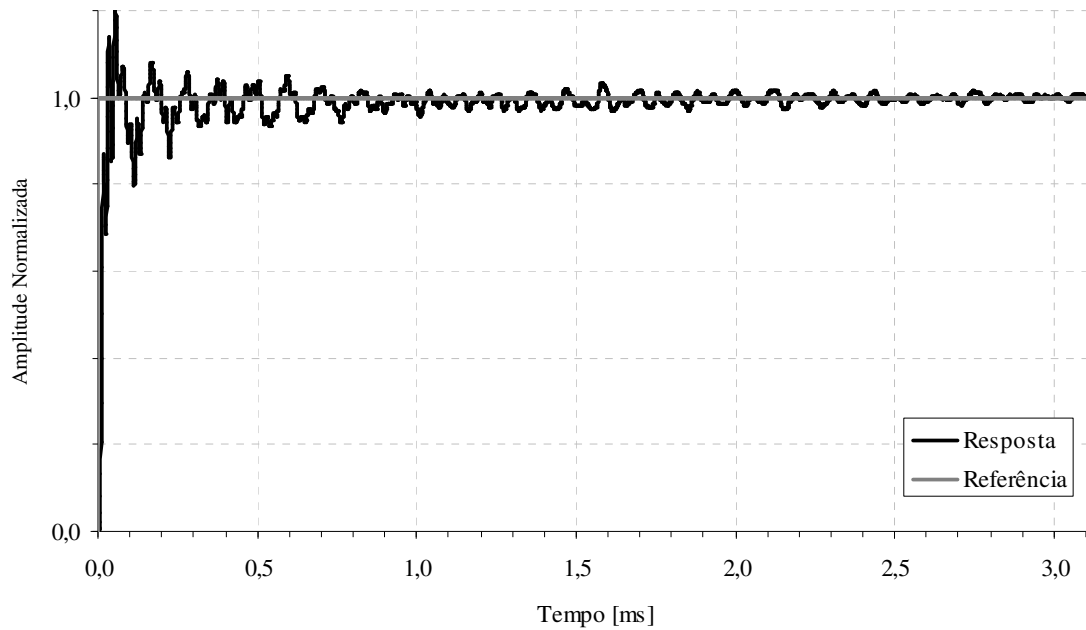


Figura 3.38 – Resposta temporal do ensaio no TC100 após última atualização com uma relação de pressão igual 1,6, pressão no tubo induzido igual a 4 MPa, membrana de poliéster com 0,19 mm de espessura e rompimento por fio quente.

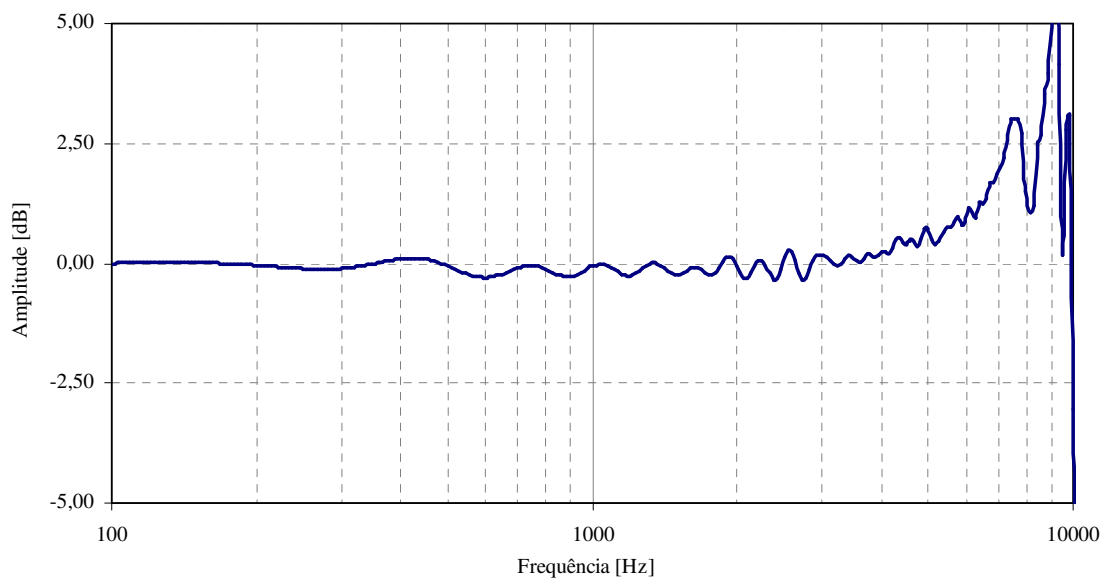


Figura 3.39 – Função de transferência do ensaio no TC100 após última atualização com uma relação de pressão igual 1,6, pressão no tubo induzido igual a 4 MPa, membrana de poliéster com 0,19 mm de espessura e rompimento por fio quente.

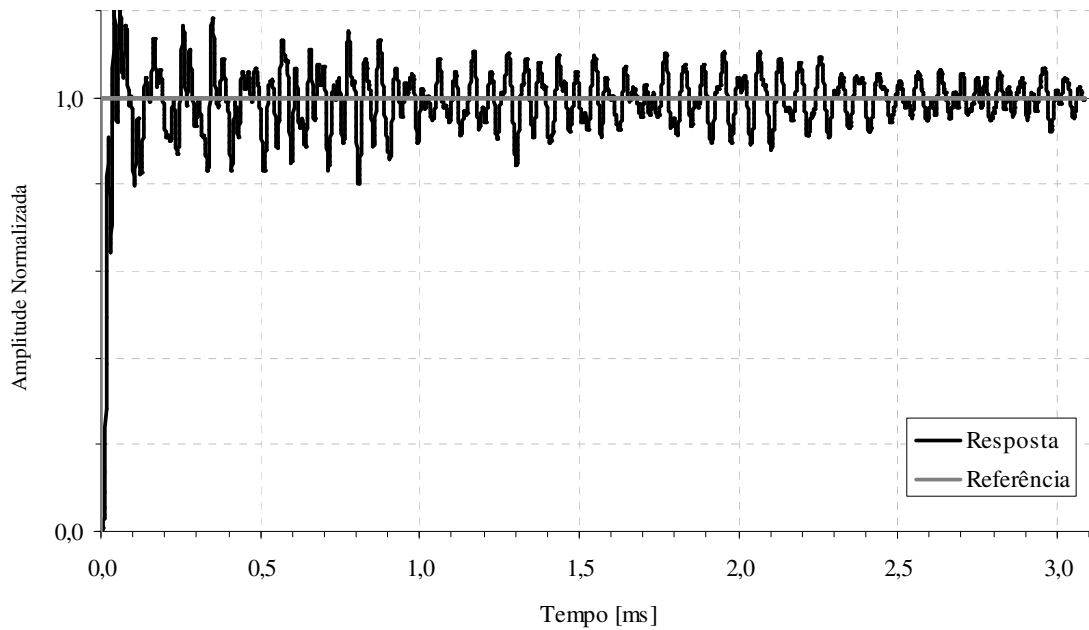


Figura 3.40 – Resposta temporal do ensaio no TC100 após última atualização com uma relação de pressão igual 1.05, pressão no tubo induzido igual a 4 MPa, membrana de celofane e rompimento por fio quente.

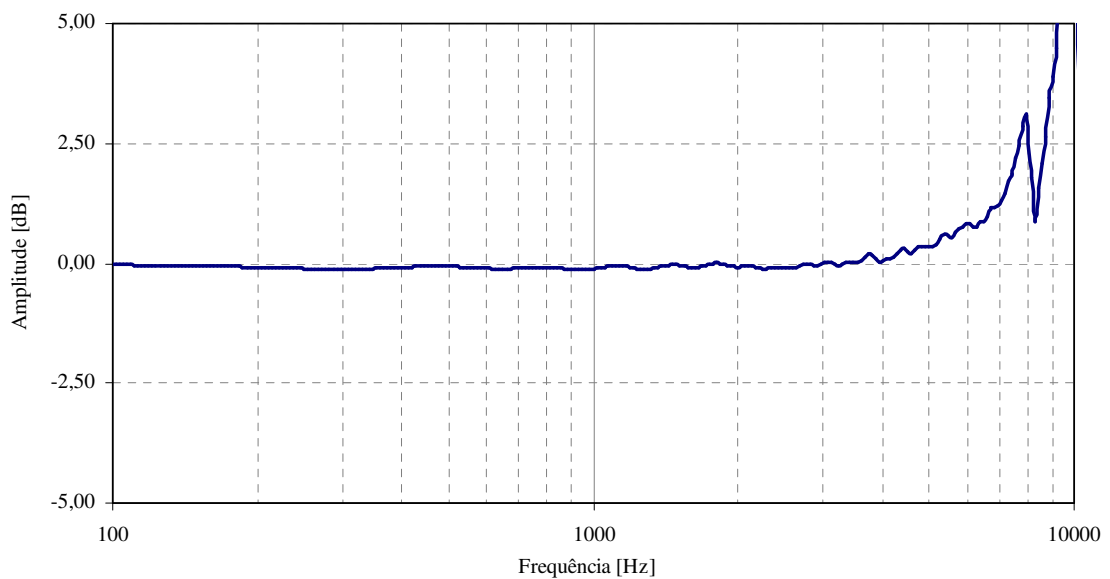


Figura 3.41 – Função de transferência do ensaio no TC100 após última atualização com uma relação de pressão igual 1.05, pressão no tubo induzido igual a 4 MPa e rompimento por fio quente.

Apesar dos resultados apresentados nas figuras acima motivarem a utilização desse dispositivo, ainda é necessário aprimorar o projeto e a fabricação, uma vez que há

problemas de estanqueidade na interface entre o dispositivo e o suporte da membrana, especialmente, em altas pressões. Os testes mostraram que também é necessário remodelar o contato elétrico e o sistema de estiramento e montagem do fio, pois em alguns ensaios o fio rompeu antes ou junto com a membrana. Outro item a ser considerado é o fato do tubo de choque e todas as suas partes serem metálicas se fazendo necessário, então, um sistema de isolamento que impeça a corrente utilizada para aquecer o fio de circular pela estrutura do tubo gerando ruídos na aquisição dos dados. Os ensaios com a membrana de poliéster foram os que mais apresentaram problemas relacionados ao rompimento e a estanqueidade. Dessa forma, no atual estágio de desenvolvimento é recomendado usar dispositivo de fio quente com membrana de celofane.

TCFB

A metodologia de calibração dinâmica em pressão de um transdutor de referência que é apresentada no próximo capítulo consiste em realizar ensaios em baixas, médias e altas frequências. Para isso são utilizados três diferentes tipos de dispositivos. Em baixas frequências o dispositivo clássico é o dispositivo de abertura rápida e em altas frequências é o tubo de choque. Para cobrir o espaço das médias frequências utiliza-se, também, o tubo de choque, entretanto o seu comprimento é muito maior que o utilizado para altas frequências, uma vez que se necessita de um degrau com maior duração e isso depende diretamente do comprimento do tubo induzido. A duração do degrau determina o limite inferior em frequência de um tubo de choque. Com isso consegue-se estabelecer zonas de intercomparação que possibilitam a calibração de um transdutor de referência para ser utilizada em um largo intervalo de frequência.

Para baixas pressões há o tubo de choque de referência (TCR) que está instalado no LMD-ENSAM, possui 23 m de comprimento, diâmetro interior igual a 200 mm e pressão máxima de trabalho de 400 kPa. A cadeia completa de dispositivos para calibrações em baixa pressão é: o dispositivo de abertura rápida (DAR 20), o tubo de choque de referência (TCR) e o tubo de choque (TC20). A figura 3.42 mostra uma imagem do TCR.



Figura 3.42 – Tubo de choque de referência (TCR) utilizado na calibração em baixas pressões.

Para a calibração em altas pressões, objeto desse trabalho, os ensaios em baixas frequências, inicialmente, seriam realizados com o dispositivo de abertura rápida DOR200 e as altas frequências o tubo de choque TC100. Já para as médias frequências não havia nenhum dispositivo. Então, a partir de 2004 o LMD-ENSAM/Paris e o LMD-UnB uniram-se, no âmbito de um convênio de cooperação técnica, para o desenvolvimento de um tubo de choque franco-brasileiro (TCFB), que cobriria o intervalo das médias frequências e assim possibilitaria a calibração em altas pressões.

Vale destacar que o TCFB foi desenvolvido visando à possibilidade de se trabalhar tanto em altas como em baixas pressões. Uma vez que o LMD-UnB já possui um tubo de choque e um dispositivo de abertura que possibilitam a calibração em altas e baixas frequências, respectivamente, mas não possui nenhum dispositivo que complete a faixa das médias frequências em baixas pressões.

A concepção e o projeto do TCFB foram realizados em conjunto pelos laboratórios e a construção, montagem e testes ficaram a cargo do LMD-UnB, local onde está instalado o tubo de choque. O primeiro trabalho do projeto foi realizado por Benjamin (2006) onde foram definidas as principais características geométricas do TCFB. Para isso, considerou-se a duração do degrau que permitiria a intercomparação com as baixas frequências e as principais fontes de incerteza.

O comprimento do TCFB foi estabelecido em 15 metros o que, pela formulação analítica, possibilitaria obter um degrau com uma duração da ordem de no mínimo 30 ms , isto é, o limite inferior em frequência do TCFB seria algo próximo de 35 Hz . O limite superior depende da rigidez da base e da curvatura e rompimento da membrana. Assim, foi definido o diâmetro interno do tubo em 50 mm . A definição desse diâmetro tomou como base os trabalhos de Barcelos (2001) e Damion (1993b). Para definir os tamanhos do tubo indutor e induzido utilizou-se a relação de $1,5$ que é a recomendada para tubos de choque utilizados como dispositivos metrológicos (Damion, 1993b). Dessa forma o tubo indutor possui comprimento igual a 6 m e o tubo induzido igual a 9 m . O fornecedor dos tubos os fabrica com o comprimento máximo de 3 m , dessa forma o tubo indutor é formado por duas peças e o tubo induzido por três peças.

Com a definição das principais características do TCFB o trabalho de Viegas (2007) dimensionou e fabricou as diversas partes que compõem o tubo, como suportes, apoios, buchas, porta membrana, porta-sensor e perfurador de membrana.

Para os tubos indutor e induzido utilizaram-se tubos sem costura, fabricados em aço 1020 e brunidos internamente. O brunimento é um processo de polimento mecânico que visa diminuir a rugosidade interna do tubo e assim reduzir os efeitos já discutidos anteriormente. A pressão máxima suportada pelo tubo é de $33,5\text{ MPa}$, mas o limite de trabalho foi definido em 7 MPa , devido à capacidade do equipamento de controle automatizado de pressão.

A abertura e fechamento do tubo são realizados por uma bomba manual e um pistão hidráulico de simples ação, que deslocam o tubo indutor por meio de buchas de latão. A figura 3.43 mostra diversas partes do TCFB, em (a) e (b) tem-se o perfurador da membrana em (c) o suporte do tubo indutor com bucha de latão em (d) e (e) o suporte da membrana e em (f) a primeira montagem do TCFB (Viegas, 2007).

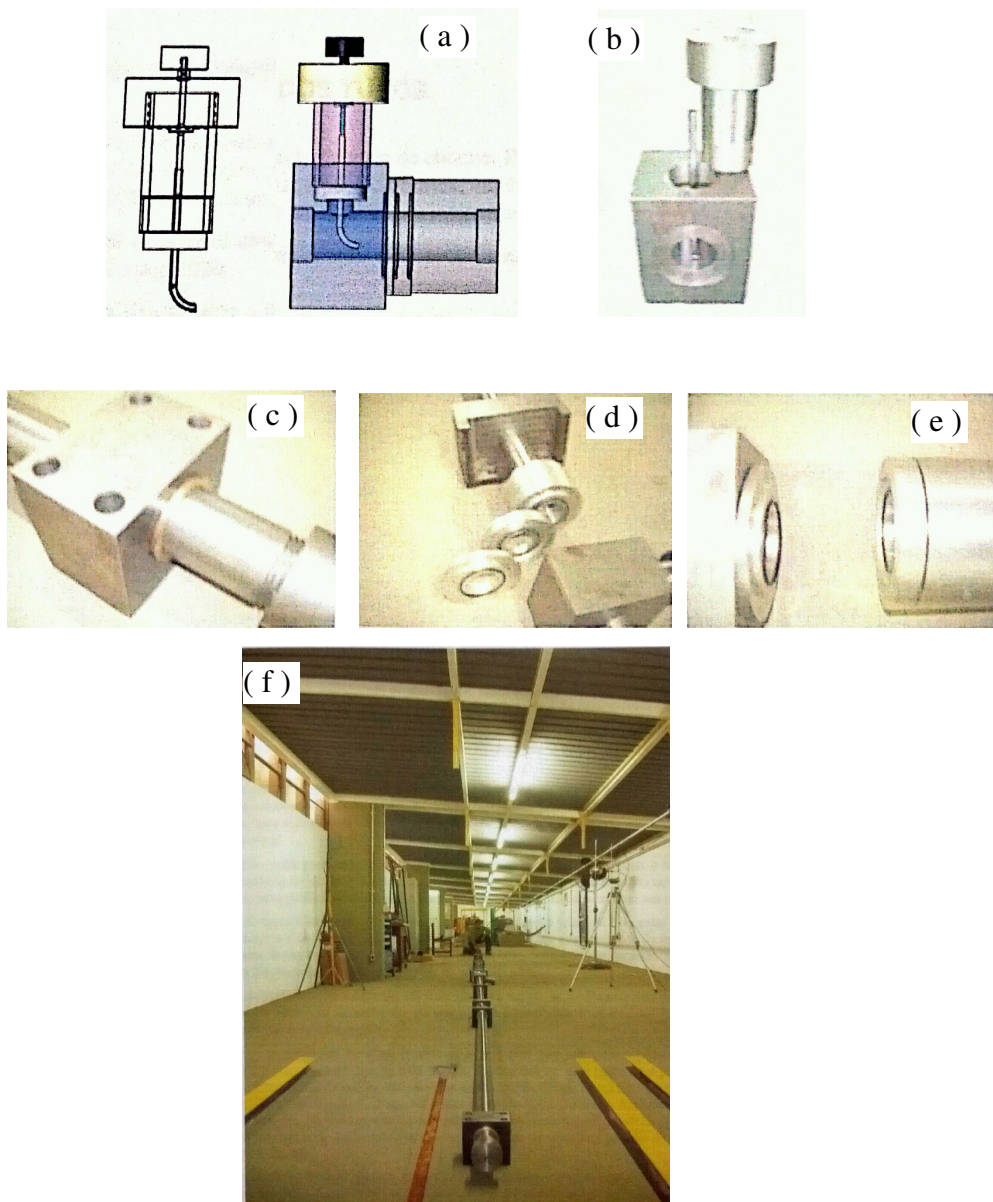


Figura 3.43 – Partes do TCFB.

Coube a esse trabalho realizar a construção da base, a montagem e validação do TCFB. A primeira etapa consistiu em definir o tipo de base e o local onde TCFB seria montado. Devido a limitações do espaço físico optou-se por construir bases e pilares metálicos de 2 m de altura. A figura 3.44 mostra o projeto da base e a sua instalação antes da montagem do tubo.



Figura 3.44 – Pilares de sustentação com as bases do TCFB instalados no LMD-UnB.

Em seguida iniciou-se o processo de montagem dos tubos e suportes sobre os pilares. Essa etapa é importante, pois são nesse estágio que se realizam os procedimentos de estanqueidade entre os tubos e buchas, além da execução do nivelamento do tubo em relação à base, a fim de garantir o alinhamento entre os tubos, uma vez que qualquer desalinhamento dos tubos prejudica a realização dos ensaios. Por exemplo, falhas de alinhamento do tubo indutor dificultam ou impedem a abertura e o fechamento do TCFB.

O sistema de abertura previsto pelos trabalhos precedentes utilizava um pistão de simples acionamento, dessa forma foi necessário desenvolver o mecanismo que reabriria o TCFB. Para isso, concebeu-se um sistema de molas e guias montadas no fundo do tubo indutor. A figura 3.45 mostra esse dispositivo.

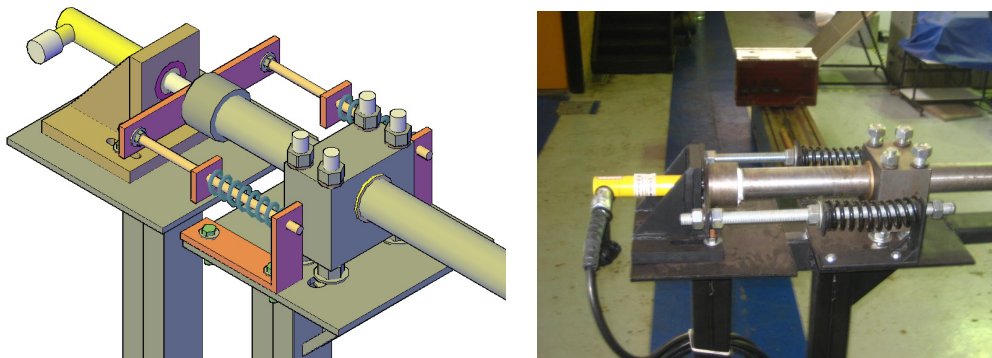


Figura 3.45 – Sistema de abertura e fechamento do TCFB.

O perfurador da membrana está fixado permanentemente no suporte da membrana. Com isso, foi necessário realizar um trabalho especial que garantisse ao mesmo tempo a estanqueidade do sistema e o movimento do embolo do perfurador de membrana. A figura 3.46 mostra o suporte da membrana com o perfurador já instalado no tubo.

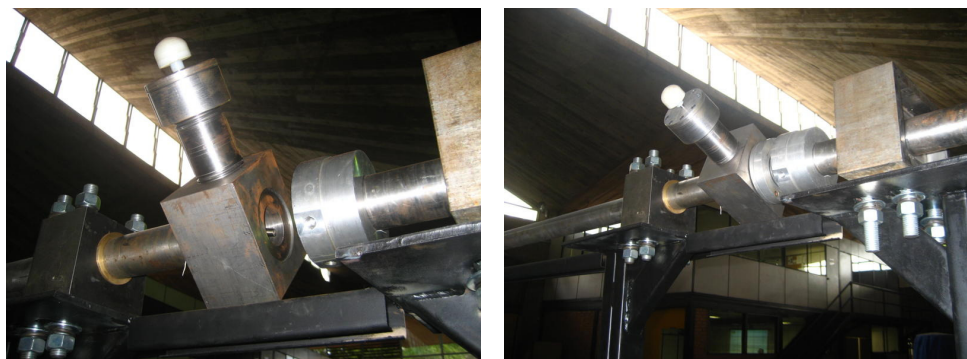


Figura 3.46 – Suporte da membrana com o perfurador de membrana.

Com o TCFB montado e alinhado iniciou-se o processo de validação, cuja primeira etapa contemplava a avaliação da estanqueidade do sistema. O procedimento consiste em subir gradativamente a pressão do TCFB e avaliar a ocorrência de vazamentos nas juntas entre os tubos e peças. A junção entre os tubos e as peças é feita por meio de roscas, especialmente dimensionadas para trabalhar com gases. E para a montagem foram utilizados selantes químicos, além de fios e fitas de vedação. Entretanto, em algumas junções, devido a pequenos defeitos na fabricação da rosca, foi necessário retrabalhar as peças.

Apesar do sistema de controle de pressão garantir uma pressão de até 7 MPa , a pressão máxima de trabalho do TCFB teve que ser revista em função da capacidade do sistema bomba/mangueira/pistão hidráulico em manter fechado o tubo de choque. Em função disso, a pressão máxima foi limitada a $3,5\text{ MPa}$. Vale ressaltar que é extremamente importante não ultrapassar essa pressão, pois isso ocasionaria a abertura dos tubos. O que por sua vez pode causar acidentes aos usuários, além de danificar o suporte da membrana, as juntas de vedação e os *o-rings*.

Para alimentar o TCFB foi montada uma central de gás que pode trabalhar até com dois gases diferentes (por exemplo: ar industrial e hélio). Para isso, foi montado um quadro de controle que regula a vazão e a pressão de gás na linha pneumática que segue até o TCFB

(figura 3.47). Outro quadro de controle foi montado junto ao TCFB de forma a regular a pressurização e a despressurização do tubo (figura 3.48).



Figura 3.47 – Central de gás para alimentação do TCFB, com a montagem para utilização com dois gases diferentes.



Figura 3.48 – Quadro de controle de pressurização e despressurização do TCFB. No detalhe, as conexões pneumáticas de alimentação e de medição de pressão.

A figura 3.49 mostra uma vista geral do TCFB. É possível observar o sistema de abertura e fechamento, as linhas pneumática de alimentação, entre outros componentes já citados. Nas figuras 3.50 e 3.51 observa-se o resultado do primeiro ensaio realizado no TCFB, no qual é possível avaliar se a duração do degrau correspondia ao esperado. Nesse caso, a duração de degrau é de aproximadamente 32 ms , o que corresponde ao que foi calculado pela solução analítica. Os resultados definitivos com o TCFB em altas pressões são apresentados no capítulo quatro.



Figura 3.49 – Vista geral do TCFB.

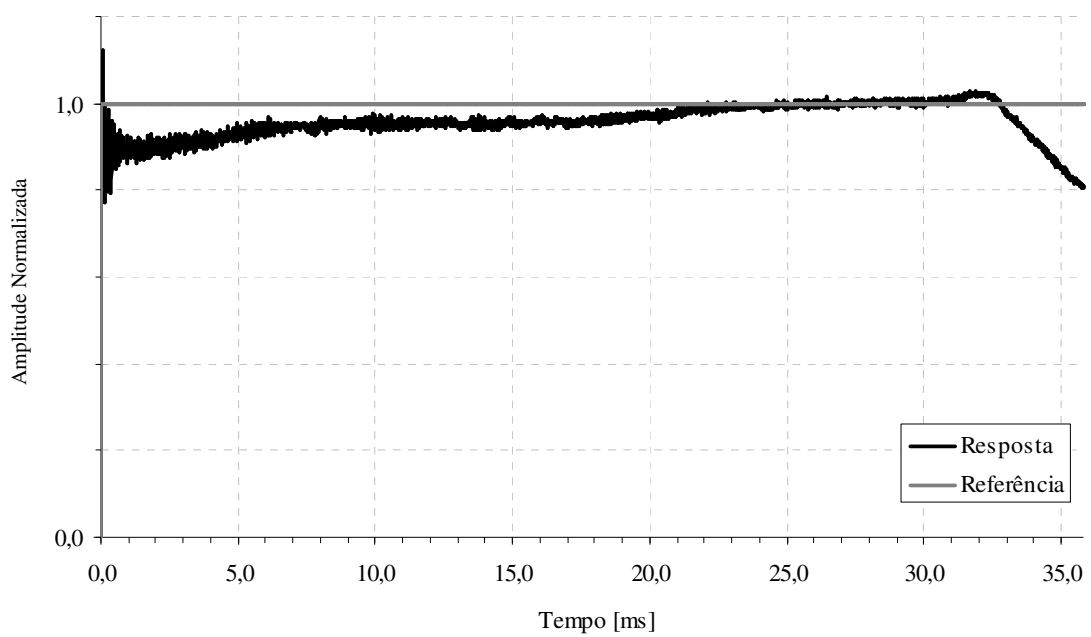


Figura 3.50 – Resposta temporal do primeiro ensaio realizado no TCFB. Pressão no tubo indutor 100 kPa , membrana celofane, relação de pressão igual 2,5 e rompimento natural.

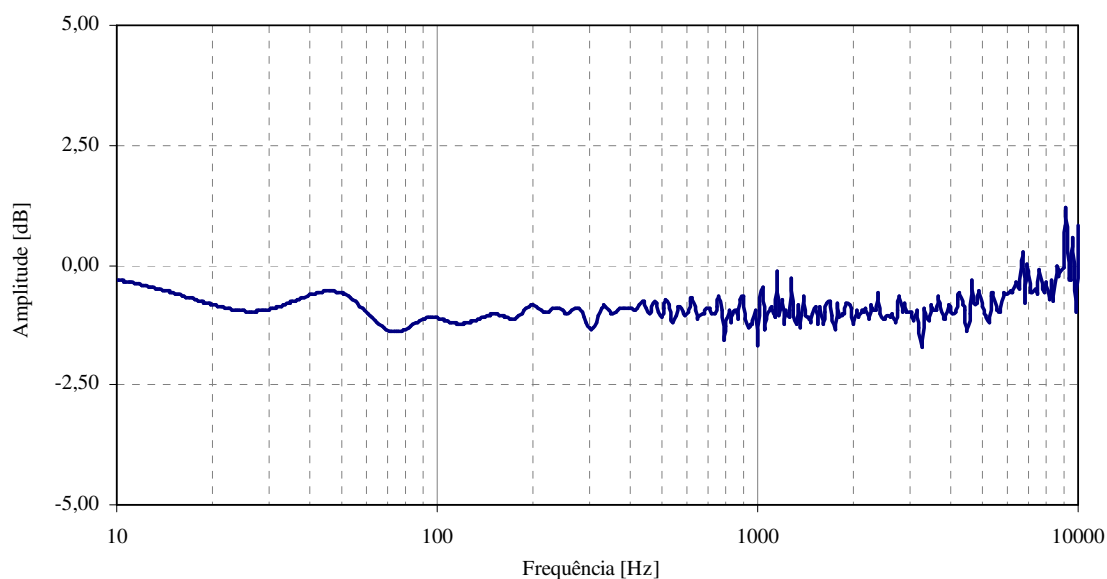


Figura 3.51 – Função de transferência do primeiro ensaio realizado no TCFB.

3.2 O DISPOSITIVO DE ABERTURA RÁPIDA

3.2.1 Aspectos teóricos

O dispositivo de abertura rápida (DAR) é um instrumento muito simples, uma vez que é composto, basicamente, por duas câmaras e por um sistema de comunicação, cuja principal característica é a formação de um degrau pressão com duração infinita. Damion (1993b) e Fritsche (2002) recomendam que a razão entre os volumes da câmara deve ser maior que 1000. O limite inferior em frequência do DAR é determinado pela capacidade do sistema de aquisição em registrar os dados (degrau infinito). Já o limite superior depende de duas características construtivas: a razão de volumes e a velocidade de abertura do sistema de comunicação entre as câmaras.

Segundo Damion (1993b) e Oliveira (2004), quanto menor for o volume da câmara menor em relação ao da câmara maior mais curto será o tempo de subida do degrau; entretanto esse tempo de subida também dependerá da velocidade de abertura do sistema de comunicação.

Na literatura não há nenhum trabalho de análise teórica dos processos no interior de um DAR. Apesar de simples no que tange às características físicas o modelamento matemático

do DAR é complexo, uma vez que envolveria interações fluido/estrutura, além da formulação do escoamento em três dimensões.

Leódido (2006) apresenta uma formulação teórica para o DAR na calibração de transdutores de dióxido de carbono, ou seja, quando se trabalha com a difusão mássica em gases com concentrações diferentes. Essa formulação apresenta no primeiro caso onde a velocidade mássica média é zero, isto é, considera-se que os gradientes de pressão, temperatura e velocidade sejam iguais a zero. No segundo caso apresentado é aquele onde há um gradiente de velocidade grande o suficiente para que se desprezem os termos difusivos. Nesse caso a solução do sistema em uma dimensão é um degrau de Heaviside na forma da equação 3.32.

$$f(x) = x_0 \cdot H\left(t - \frac{x}{v}\right) \quad \text{Eq. 3.32}$$

sendo,

- $f(x)$: e a variação de pressão em função da posição na câmara menor;
- x : a distância entre a entrada da câmara menor e posição do transdutor;
- v : a velocidade de escoamento para dentro da câmara menor.

Então, considerando três hipóteses apresentadas abaixo, pode-se, em uma primeira análise, estimar que uma solução para o DAR seria um degrau de pressão na forma da equação 3.32.

1. O volume da câmara menor é muito menor que o da câmara maior;
2. A comunicação entre as câmaras ocorre de maneira instantânea e perfeita (sem interferência do sistema de abertura);
3. A diferença de pressão gera um gradiente de velocidade na direção da câmara menor.

A hipótese 1 depende exclusivamente do projeto, da fabricação e montagem do DAR, a 3 é uma hipótese que pode ser comprovada, uma vez que ocorre o escoamento do gás na direção do gradiente de pressão. Com isso, pode-se concluir que 2 será o principal fator que limitará o tempo de subida do degrau de pressão e, conseqüentemente, o limite superior em frequência. Então, é no dispositivo de comunicação que se concentra a maioria

dos estudos sobre o DAR. Vale ressaltar que, para uma melhor compreensão dos fenômenos no interior do DAR, é necessário realizar um estudo numérico dos fenômenos físicos e das interações fluido-estrutura e, dessa forma, avaliar novas soluções para as limitações do DAR, ou seja, é necessário avaliar, por exemplo, as influências da movimentação do sistema de abertura e do estrangulamento da câmara menor sobre o escoamento do fluido.

3.2.2 Aspectos Operacionais e Construtivos

Nesse tópico serão apresentadas as principais características construtivas e operacionais do DAR levando em consideração o seu uso na calibração dinâmica, especialmente em altas pressões.

3.2.2.1 Câmaras

As câmaras do DAR não possuem uma forma ou características específicas, tendo como diretriz principal a relação de volume. Entretanto, o projeto de um DAR deve, também, considerar todos os elementos necessários à realização dos ensaios. A câmara menor deve ter o menor volume possível considerando que nela são fixados os transdutores de referência e/ou a calibrar, além das conexões de controle e medição de pressão.

A câmara maior é projetada baseando-se no volume da câmara menor e no sistema de comunicação. Muitas vezes o próprio ambiente pode ser usado como câmara maior. Por exemplo, pode-se gerar um degrau de pressão negativo pressurizando uma câmara menor e colocando-a em comunicação com o ambiente. O mesmo pode ser feito para um degrau positivo, mas nesse caso seria necessário gerar um vácuo na câmara menor.

3.2.2.2 Sistema de Comunicação

Como base no que foi discutido no tópico anterior os dispositivos de abertura rápida podem ser divididos segundo o sistema de comunicação (Oliveira, 2004), aqui se destaca quatro tipos: DAR a eletroválvula, DAR a válvula (pneumática ou elétrica), DAR a membrana e DAR manual.

DAR a eletroválvula

No DAR a eletroválvula o sistema de comunicação é externo ao dispositivo e utiliza-se uma eletroválvula entre as câmaras menor e maior. A ligação entre os elementos é feita por meio de tubos que também devem ter os seus volumes contabilizados no cálculo da razão de volume. O tubo que liga a câmara maior à eletroválvula deve ser dimensionado de tal forma que a perda de carga seja mínima para não aumentar o tempo de subida do degrau. A figura 3.52 (Oliveira, 2004) mostra um esquema simplificado do DAR a eletroválvula.

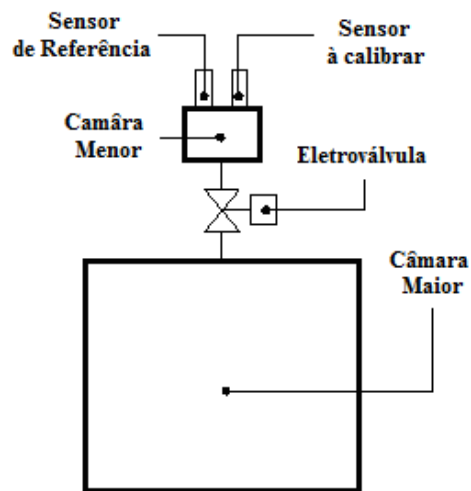


Figura 3.52 – Esquema simplificado de um dispositivo de abertura rápida a eletroválvula.

O fabricante de sensores PCB comercializa um dispositivo desse tipo que possui um tempo de subida de 5 ms e que trabalha com pressões de até 100 kPa . A figura 3.53 apresenta uma imagem do dispositivo 903B02 da PCB.



Figura 3.53 – Dispositivo de abertura rápida PCB 903B02.

DAR a Válvula Elétrica ou Pneumática

O DAR a válvula elétrica ou pneumática diferencia-se do dispositivo a eletroválvula pelo princípio de funcionamento e montagem, que é interna à câmara maior. Nesse dispositivo a válvula tem a função de isolar as duas câmaras. A grande vantagem desse dispositivo é a possibilidade de reduzir o volume da câmara, uma vez que não se faz necessário a utilização de canais de comunicação, além de oferecer uma grande seção para a passagem do gás. Nesse dispositivo as principais limitações são a interface entre válvula e a entrada da câmara menor e a velocidade de acionamento da válvula, acionamento esse que pode ser feito por meio de uma válvula solenoide ou um pistão pneumático. A figura 3.54 ilustra um esquema da montagem do DAR (Oliveira, 2004).

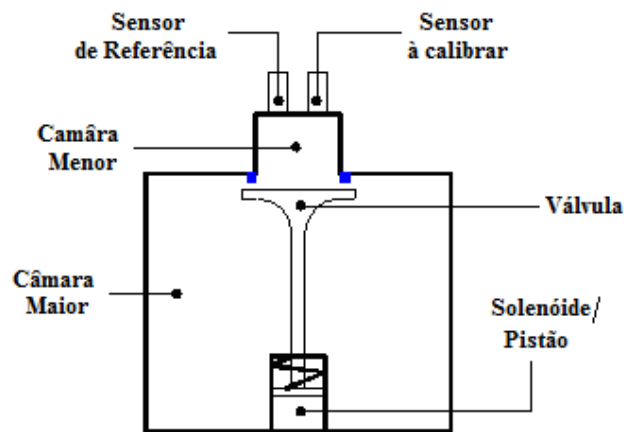
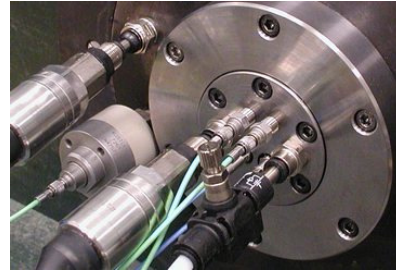


Figura 3.54 – Esquema simplificado de um dispositivo de abertura rápida a válvula elétrica ou pneumática.

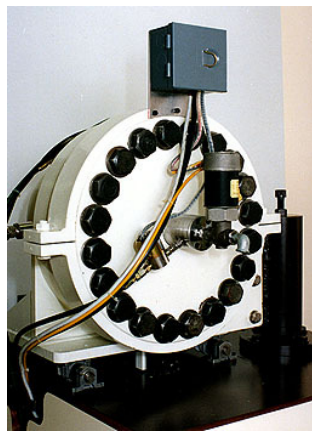
Esse tipo de dispositivo é o utilizado na família de DAR do LMD-ENSAM e no DAR do LMD-UnB. A figura 3.55 mostra imagens de alguns desses dispositivos, em (a) apresenta-se o DOR10 LDM-ENSAM/Paris, tempo de subida 4 ms , pressão máxima de trabalho de 1 MPa , em (b) o DOR20 LMD-ENSAM/Paris, tempo de subida $0,4\text{ ms}$, pressão máxima de trabalho de 2 MPa , em (c) DOR200 LMD-ENSAM/Paris, tempo de subida $0,4\text{ ms}$, pressão máxima de trabalho de 20 MPa . (d) DOR10 LMD-UnB, tempo de subida 4 ms , pressão máxima de trabalho de 1 MPa .



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.55 – Dispositivos de abertura rápida disponíveis.

A PCB também comercializa uma variação desse dispositivo chamado de Gerador de Degrau de Pressão Aronson (modelo 907A02) que utiliza um peso no lugar de uma solenoide ou pistão para abrir a válvula. Esse dispositivo possui um tempo de subida entre 30 e 50 ms e uma pressão máxima de trabalho de 7 MPa. A figura 3.56 mostra uma imagem desse dispositivo e um desenho esquemático.

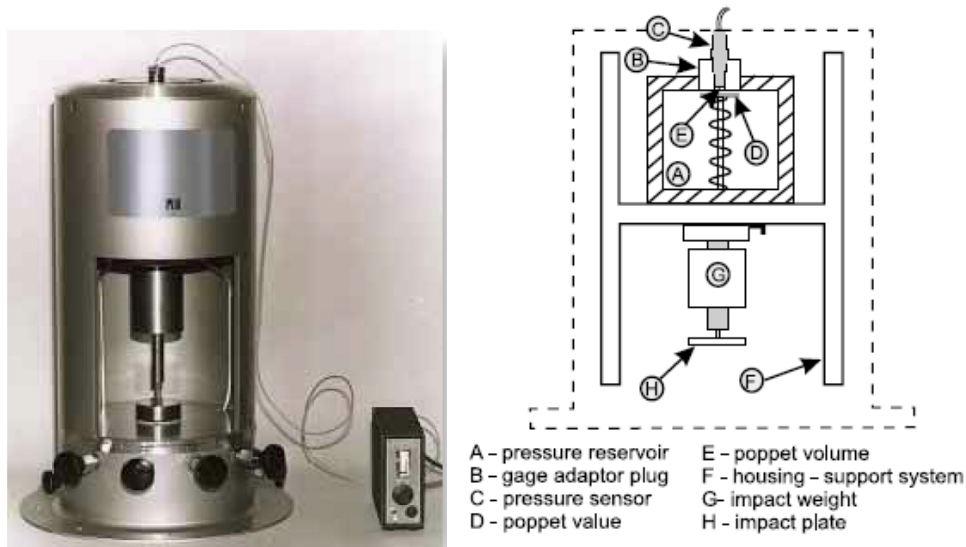


Figura 3.56 – DAR a válvula PCB 907A02.

Outro fator importante a ser considerado nesse tipo de sistema de comunicação é o retorno da válvula à posição original, pois após a comunicação das câmaras as pressões da câmara menor e maior se igualam e, com isso, é preciso que um sistema de retorno (mola, pistão, etc.) consiga retornar a válvula à sua posição original sem que seja necessário depressurizar o DAR.

DAR a Membrana

No DAR a membrana, a separação entre as câmaras é realizada da mesma forma que em um tubo de choque, ou seja, por meio de uma membrana. Esse dispositivo permite construir câmaras menores com volume muito pequeno, além de uma abertura máxima para a passagem do gás e um curto tempo de comunicação entre as câmaras, uma vez que esse processo se inicia com o rompimento da membrana (figura 3.57).

O rompimento da membrana é semelhante ao tubo de choque (rompimento natural ou forçado). Entretanto a deformação da membrana gera variações consideráveis do volume da câmara menor prejudicando a reprodutibilidade entre os ensaios.

Para a troca da membrana é necessário depressurizar completamente o DAR. Esse procedimento inviabiliza o uso em altas pressões, uma vez que, devido ao volume da câmara maior, o tempo necessário para executar operação é muito longo, além da quantidade de gás que seria descartada.

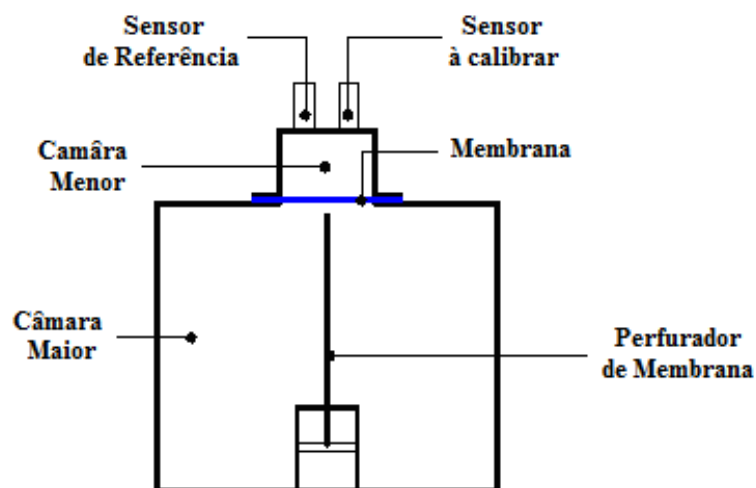


Figura 3.57 – Esquema simplificado de um dispositivo de abertura rápida a membrana (Oliveira, 2004).

DAR Manual

O DAR manual utiliza o mesmo princípio de funcionamento e montagem do DAR a eletroválvula, a diferença está no acionamento, uma vez que substitui-se a eletroválvula por uma válvula manual. Esse dispositivo conserva as vantagens e as mesmas recomendações do DAR a eletroválvula, mas o tempo de subida é prejudicado em função da velocidade de acionamento da manual da válvula.

3.2.3 Dispositivo de Abertura Rápida

O DAR é utilizado para calibrações quase-estáticas e dinâmicas em baixas frequências. Inicialmente, o dispositivo utilizado seria o DOR200, que foi concebido pelo LMD-ENSAM na década de 80 para trabalhos em altas pressões e baixas frequências. Entretanto, a atualização do sistema de comunicação entre as câmaras, que inclui um novo sistema de válvulas que permitirá reduzir o tempo de subida do DAR, não foi concluída.

Com isso, foi utilizado um DAR manual para gerar degraus de pressão. Esse dispositivo é composto basicamente por um reservatório, duas válvulas de alimentação, uma válvula manual de três vias e um câmara menor. Devido à forma da câmara menor, a relação exata entre os volumes não pode ser calculada, mas foi estimada em aproximadamente 1200.

Esse dispositivo foi utilizado para os ensaios quase-estáticos e dinâmicos. Numa primeira etapa de validação foram realizados ensaios com ar comprimido industrial. A figura 3.58 mostra uma imagem desse dispositivo.

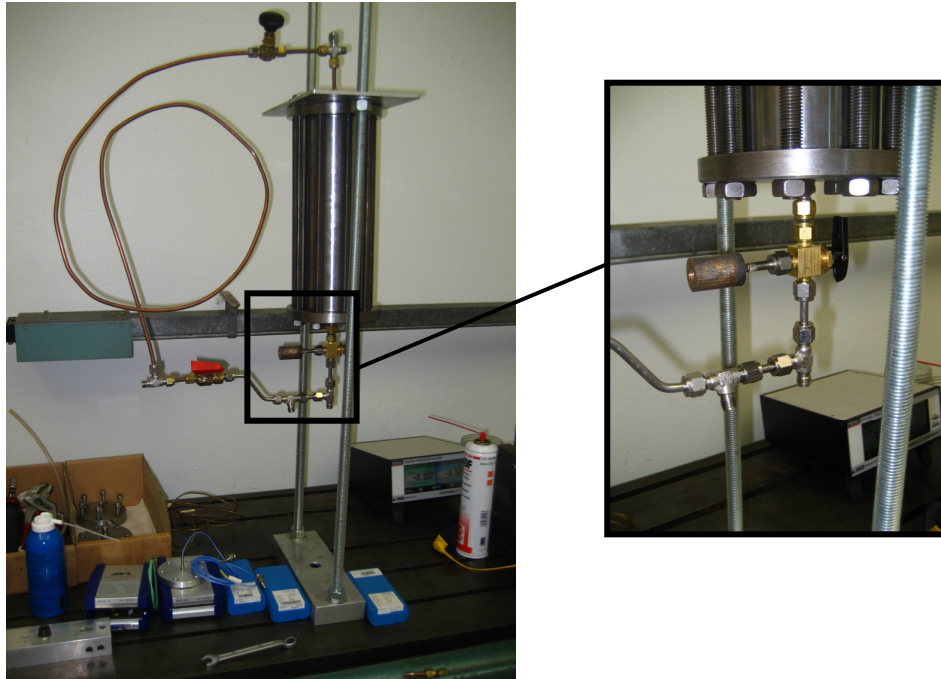


Figura 3.58 – DAR manual utilizado para calibração em baixas frequências. No detalhe a câmara menor com a válvula.

A figura 3.59 mostra o resultado da calibração quase-estática. O procedimento experimental consiste em realizar cinco pontos de calibração dentro de uma amplitude de pressão, cada ponto do ensaio é repetido quatro vezes. A partir desses cinco pontos é que são definidos a sensibilidade quase-estática do sensor e incerteza associada. Os pontos apresentados na figura 3.59 representam a incerteza expandida para cada amplitude de pressão.

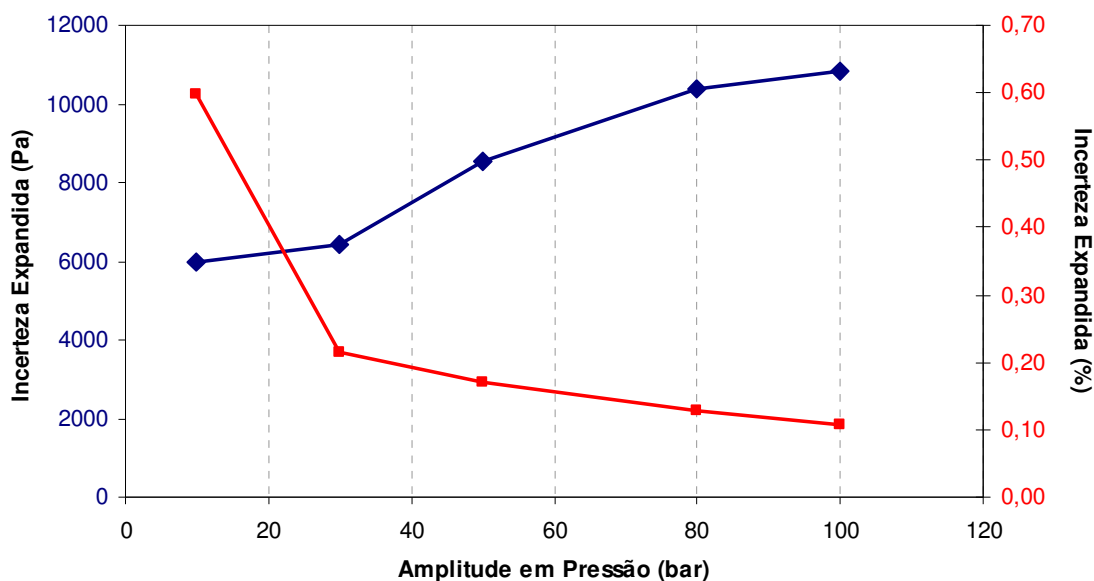


Figura 3.59 – Evolução da incerteza expandida em função da amplitude de pressão.

Os resultados apresentados na figura 3.59 mostra que do ponto de vista da calibração quase-estática o DAR manual atende às necessidades dos limites em frequência necessários a intercomparação com as médias frequências. Uma vez que a incerteza expandida em Pascal tem evolução próxima de um comportamento linear e à medida que aumenta-se a amplitude de pressão a incerteza expandida em porcentagem da amplitude se reduz e tende a torna-se constante.

Com a validação da calibração quase-estática coube avaliar a desempenho do DAR manual na calibração dinâmica. Para isso analisou-se o tempo de subida e o limite em frequência. A figura 3.60 mostra a resposta temporal de um ensaio dinâmico, a figura 3.61 mostra uma ampliação da resposta temporal onde é possível determinar o tempo de subida (que representa o tempo entre 10% e 90% do nível de estabilização da resposta do transdutor), que foi da ordem de 4 ms e levaria a uma frequência máxima de 250 Hz. Entretanto na função de transferência (figura 3.62) observa-se que a partir de 60 Hz já há uma atenuação de aproximadamente 20%. Isso ocorre devido ao tipo de gás, a interface de entrada do gás na câmara menor, a velocidade de acionamento da válvula de comunicação e a relação de volume.

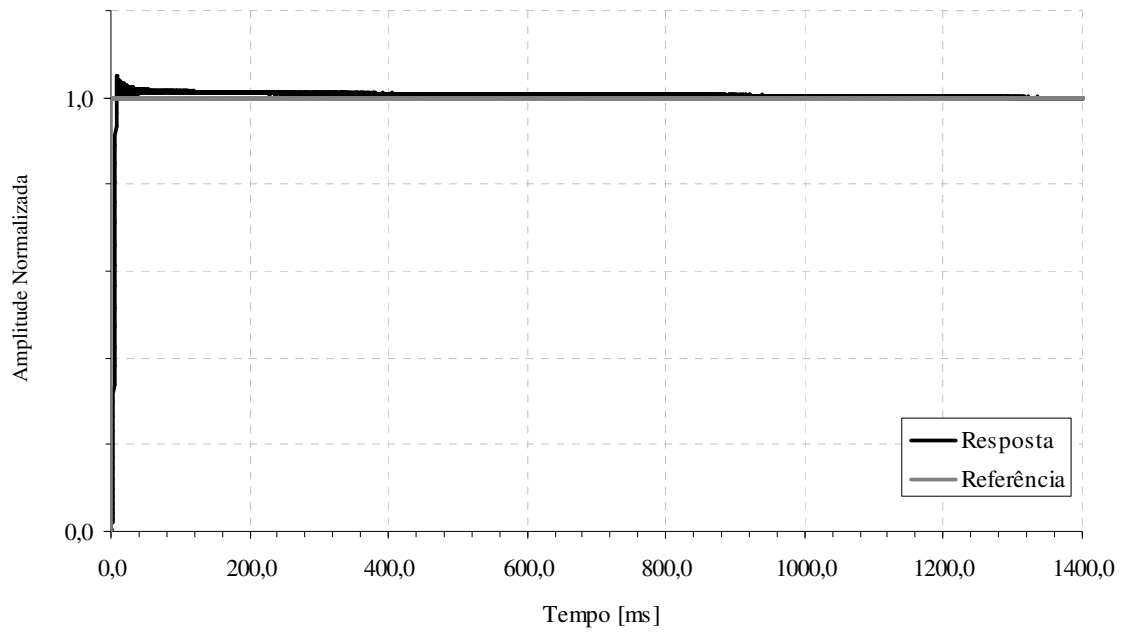


Figura 3.60 – Resposta temporal do DAR manual. Diferença de pressão de 200 kPa.

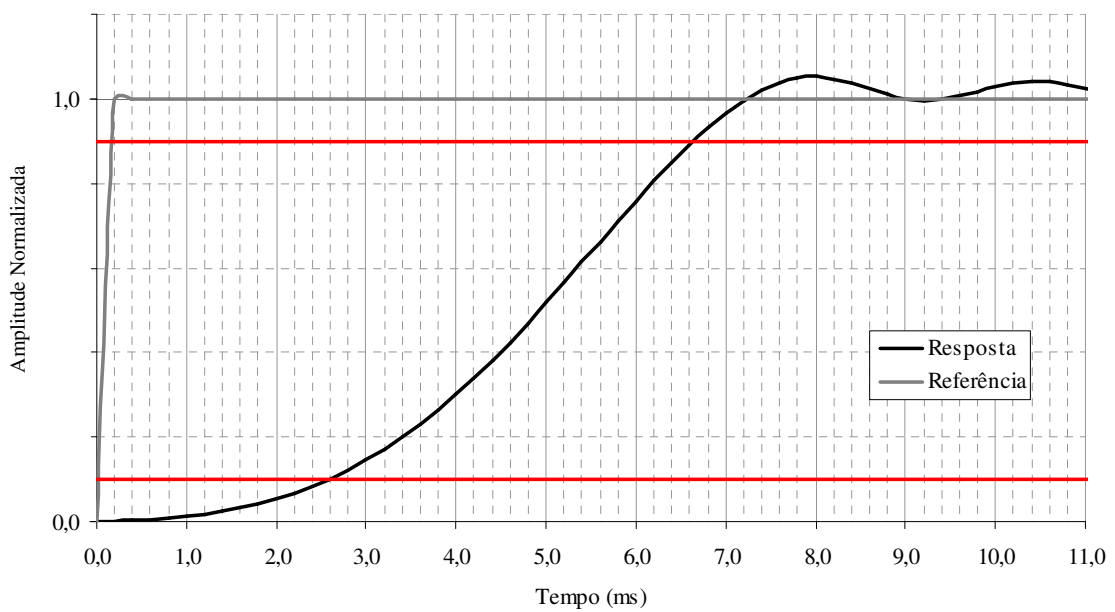


Figura 3.61 – Ampliação da resposta temporal. As linhas horizontais representam os patamares de 10% e 90% que definem o tempo de subida.

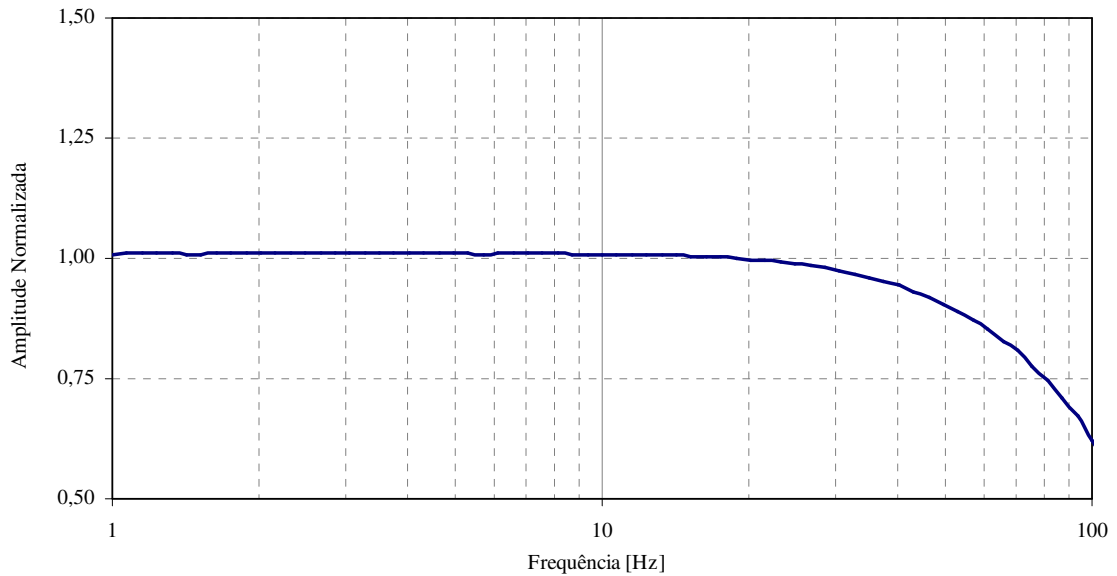


Figura 3.62 – Função de transferência do DAR manual.

Com isso observou-se que do ponto de vista da calibração dinâmica o desempenho do dispositivo não permitiria a intercomparação com as médias frequências. Dessa forma, buscaram-se soluções para reduzir o tempo de subida e conseqüentemente ampliar o limite superior em frequência. Essas soluções envolveram: a troca de conexões e canais para reduzir o volume da câmara menor e utilização de hélio no lugar do ar, uma vez que esse possui uma massa específica menor modificando o perfil de velocidade no DAR. Com esse novo DAR manual e novas configurações os ensaios foram refeitos. Abaixo apresenta-se a resposta temporal (figura 3.63), a ampliação da resposta temporal (figura 3.64) e a função de transferência (2.65).

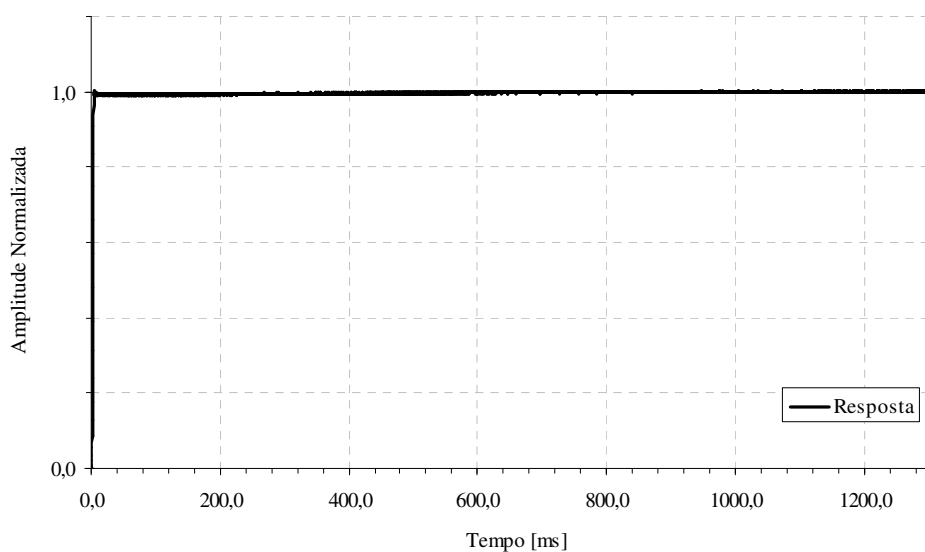


Figura 3.63 – Resposta temporal do DAR manual.

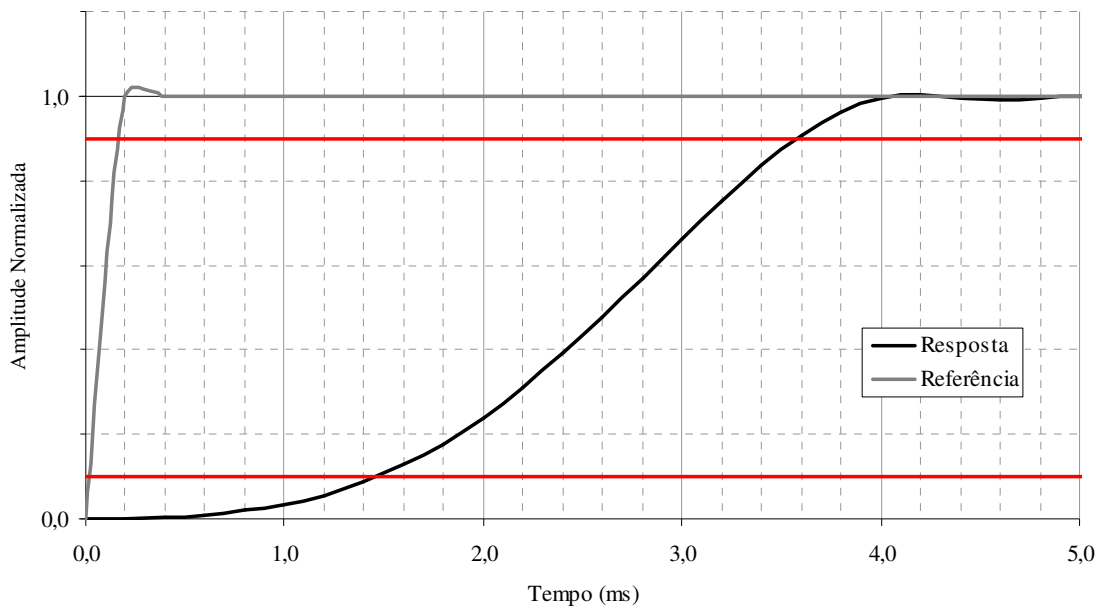


Figura 3.64 – Ampliação da resposta temporal. As linhas horizontais representam os patamares de 10% e 90% que definem o tempo de subida.

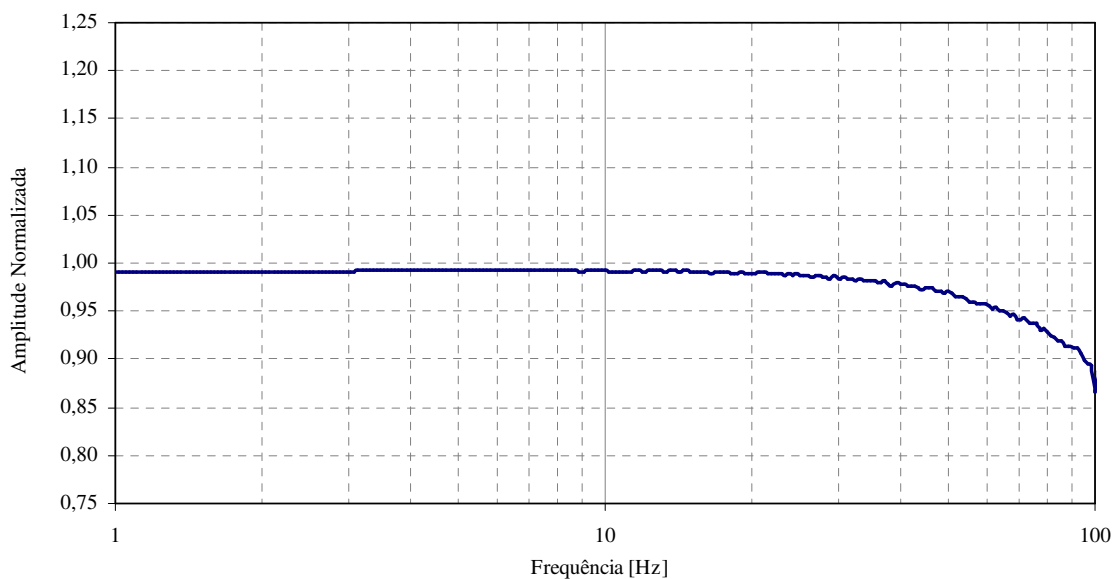


Figura 3.65 – Função de transferência do DAR manual.

O trabalho de Fritsche (2002) mostra a influência do tipo gás no desempenho de um DAR, dessa forma os ensaios foram refeitos utilizando como gás o Hélio que possui uma massa específica menor que a do ar. Com isso, foi possível reduzir o tempo de subida em aproximadamente 50%, isto é 2 ms contra 4 ms do ensaio com ar industrial. Dessa forma, o

limite superior em frequência foi ampliado e com isso possibilitando a intercomparação com os resultados do TCFB (médias frequências). Para comparação entre os tipos de gás, observa-se a frequência de 60 Hz na função de transferência. No ensaio com hélio há uma atenuação é de 5% contra os 20% registrado no ensaio com ar industrial.

4. O MÉTODO DE CÁLCULO DA INCERTEZA

O cálculo da incerteza é, na sua origem, simples, mas sua aplicação aos processos é complexa. O método de cálculo da incerteza associada à calibração dinâmica de transdutores de pressão vem sendo desenvolvido pelo LMD-ENSAM/Paris desde a década de 90. Em 2004, apresentaram-se as ferramentas que permitiram a implementação desse método para calibrações de até 1 MPa . Em Damion (1995) e Oliveira (2004) os autores apresentam, detalhadamente, o método de calibração e de cálculo da incerteza.

Uma das hipóteses desse trabalho é que esse método pode, também, ser utilizado para pressões maiores que 1 MPa . Então, nesse capítulo apresenta-se uma descrição desses métodos e discussões sobre a sua aplicabilidade na calibração em altas pressões.

O método de cálculo da incerteza foi desenvolvido com base no Guia para Expressão da Incerteza de Medição (ISO/GUM, 1995). Nesse guia a incerteza é definida pela equação 4.1.

$$u_c(y) = \sqrt{u_{y1}^2 + u_{y2}^2 + u_{y3}^2 + \dots + u_{yn}^2} \quad \text{Eq. 4.1}$$

sendo u_{yn} : são os valores das fontes de incertezas;

n: é o número de grandezas de entrada.

A incerteza expandida é calculada multiplicando o valor da incerteza combinada (u_c) com o fator de abrangência (k).

$$U = k \cdot u_c(y) \quad \text{Eq. 4.2}$$

A determinação do fator de abrangência é realizada considerando o nível de confiança, a lei de distribuição da incerteza combinada e o conhecimento dos valores usados na avaliação dos efeitos aleatórios. Em geral, o fator de abrangência adotado é $k = 2$, mas quando o valor da incerteza combinada é calculado com base em observações estatísticas a determinação do fator de abrangência é realizada em função do nível de confiança (normalmente 95%) e do número efetivo de graus de liberdade calculados pela equação de Welch-Satterthweite (Ballico, 2000; Turzeniecka, 2000 e Fotowicz, 2004).

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{u_{y_i}}{v_i}} \quad \text{Eq. 4.3}$$

sendo, v_{eff} : número efetivo de graus de liberdade

v_i : número de graus de liberdade das grandezas de entrada.

n : número das grandezas de entrada.

Para uma grandeza obtida pela média aritmética de n observações independentes uma incerteza do tipo A terá o número de graus de liberdade é igual $n - 1$. Quando a incerteza é do tipo B e o valor é conhecido (por exemplo, informação do fabricante) é comum considerar v_i como infinito. Os casos nos quais o valor não é conhecido, o GUM (ISO/GUM, 1995) define o número de graus de liberdade pela equação 4.4.

$$v_i = \frac{1}{2} \cdot \frac{u^2(y_i)}{\sigma^2[u(y_i)]} \approx \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\Delta u(y_i)}{u(y_i)} \right] \quad \text{Eq. 4.4}$$

O desenvolvimento do método de calibração do LMD-ENSAM/Paris foi realizado em quatro etapas Oliveira (2004):

1. Cálculo do resultado da medição: definição do mensurando, análise do processo de medida, levantamento as fontes de incerteza, modelamento do processo e definição de correções, repetições e procedimentos;
2. Cálculo das incertezas-tipo: avaliação das incertezas e aplicação dos métodos do tipo A e tipo B;
3. Cálculo da incerteza combinada;
4. Cálculo da Incerteza expandida.

A definição do mesurando foi realizada baseando-se nas condições de medições e de suas influências na determinação da grandeza. Para isso, foi realizado o levantamento de uma lista exaustiva de informações sobre a grandeza.

A base da análise do processo de medição não está apenas sobre os instrumentos de medição, mas sobre o processo de forma geral (operadores, padrões, método e

procedimentos, ambiente e objeto de medição). Sendo necessária, então, a determinação de uma lista de fontes de erros, que foi obtida a partir da metodologia 5M (Meios, Método, Meio ambiente, Mão-de-obra e Material) desenvolvida por Ishikawa (1993). Oliveira (2004) apresenta o detalhamento completo dos cinco grupos “M”. A figura 4.1 mostra o diagrama de Ishikawa que foi utilizado como base para o desenvolvimento do método.

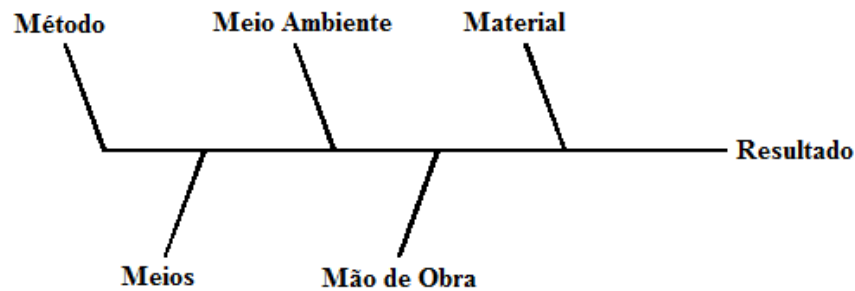


Figura 4.1 – Diagrama de Ishikawa (Oliveira, 2004).

Como já discutido, em pressão dinâmica não há um elemento padrão, dessa forma os desenvolvimentos dos métodos de calibração e do cálculo de incerteza baseiam-se no conceito de padrão coletivo. Dessa forma, a referência em pressão dinâmica é composta: pelos dispositivos de calibração, pelo sistema de aquisição, pelo tratamento dos dados e pelos procedimentos experimentais. Diante disso, a metodologia de calibração dinâmica em pressão de um transdutor de referência foi desenvolvida em quatro processos:

1. Calibração quase-estática tensão (sistema de aquisição);
2. Calibração quase-estática em pressão (transdutor);
3. Calibração dinâmica em tensão (sistema de aquisição);
4. Calibração dinâmica em pressão (transdutor).

A figura 4.2 mostra o fluxograma do método de calibração dinâmica e cálculo da incerteza associada a um transdutor de referência.

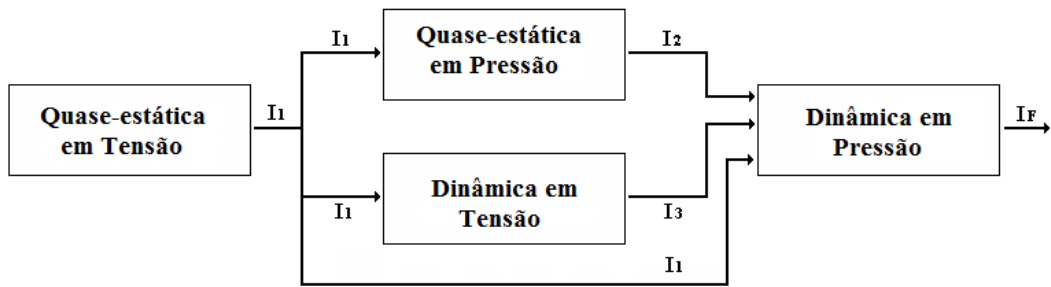


Figura 4.2 – Representação do fluxo da calibração. As indicações I_i representam as incertezas no final de cada processo.

Ao final de cada uma das etapas apresentadas na figura 4.2 tem-se uma característica do transdutor e o valor da incerteza associada. Nas calibrações quase-estáticas em tensão e pressão os resultados finais são, respectivamente, as sensibilidades quase-estáticas do sistema de aquisição e do transdutor e a incerteza associada. Na calibração dinâmica o resultado é a função de transferência e a incerteza, que pode ser apresentada frequência por frequência ou por faixas de frequências.

Um único dispositivo de calibração não abrange o intervalo de frequência que atenda as necessidades, sendo então necessário associar diferentes tipos dispositivos de forma a obter o intervalo de frequência adequado. Para isso, é essencial que as funções de transferência desses dispositivos possuam uma zona de intercomparação em amplitude e frequência. A figura 4.3 apresenta o exemplo de uma zona de intercomparação entre as funções de transferência de dois dispositivos diferentes (Oliveira, 2004).

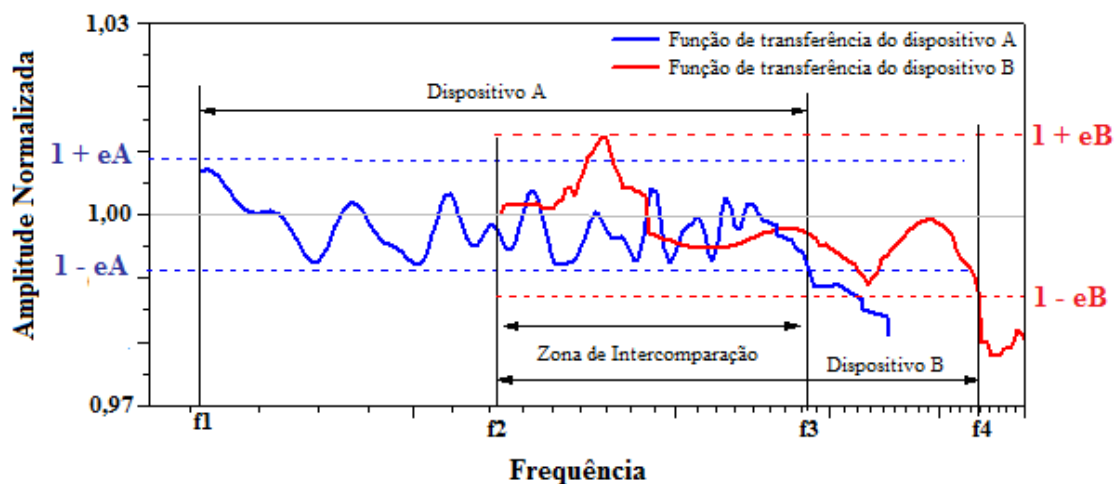


Figura 4.3 – Representação da técnica de intercomparação das funções de transferência.

No caso apresentado na figura 4.3 o transdutor testado no dispositivo A possui uma função de transferência dentro do intervalo $I \pm e_A$ e o dispositivo B dentro do intervalo $I \pm e_B$. Os limites em frequência são f_1 a f_3 para o dispositivo A e f_2 a f_4 para o B. Dessa forma, no resultado final dessa calibração o intervalo em frequência do transdutor é de f_1 a f_4 . Até a frequência f_2 a incerteza seria de $\pm e_A$ e a partir de f_2 até f_4 não importa qual dispositivo seja utilizado a incerteza seria de $\pm e_B$.

No caso da calibração dinâmica em pressão, o limite inferior em frequência é definido pelo dispositivo de abertura rápida (DAR) e o limite superior pelo tubo de choque (TC). Idealmente, deveria haver uma zona de intercomparação entre esses dispositivos. No entanto, o limite inferior do TC e o limite superior do DAR não são extensos o suficiente para permitir a intercomparação.

Dessa forma, é necessário um dispositivo que complete o espaço entre o DAR e o TC. Esse instrumento é um tubo de choque longo cujo comprimento possibilita a geração de um degrau com maior duração e, com isso, ter limites inferior e superior que permitam a intercomparação com o DAR e com o TC, respectivamente.

Na calibração em baixas pressões realizada no LMD-ENSAM/Paris utiliza-se os dispositivos: DOR20 (baixas frequências); TCR (médias frequências) e TC20 (altas frequências). Para melhor visualizar os limites e a zonas de intercomparação a figura 4.4 apresenta um gráfico com toda a família de dispositivos do LMD-ENSAM/Paris.

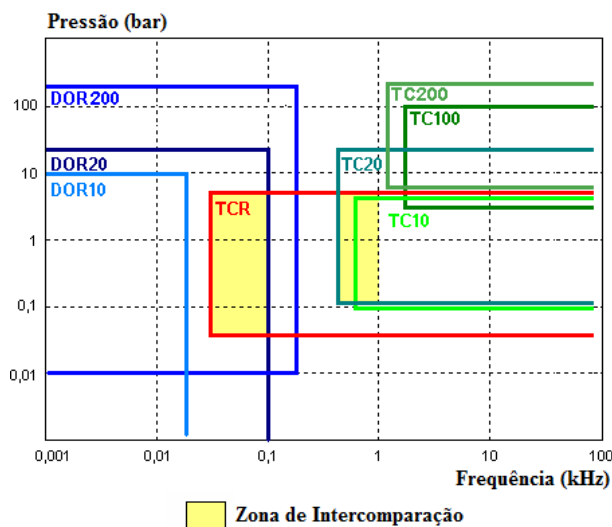


Figura 4.4 – Dispositivos do LMD-ENSAM, com seus limites em pressão e frequência.

Analisando a figura 4.4 observa-se que para baixas pressões (até 1 MPa) os limites em frequência do TCR preenchem esse intervalo entre o DOR20 e o TC20. Já para as altas pressões não há um dispositivo que permita a intercomparação entre as baixas e altas frequências. Como já discutido no capítulo anterior, foi desenvolvido um tubo de choque (TCFB) para preencher essa lacuna das médias frequências em altas pressões. A figura 4.5 apresenta o gráfico com os dispositivos de baixas e altas pressões.

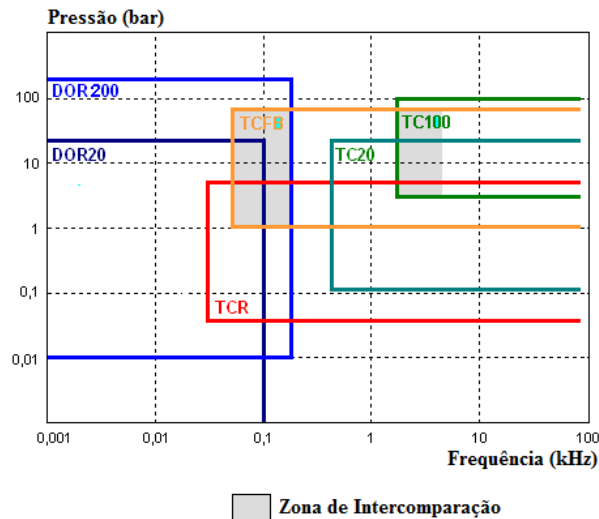
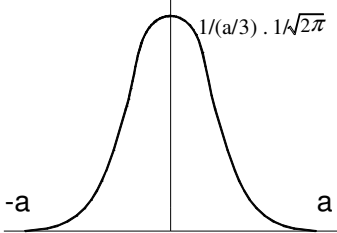
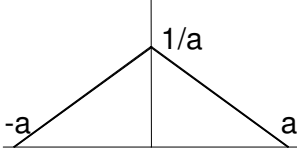
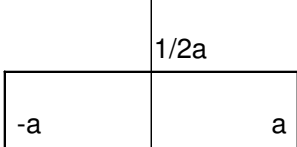
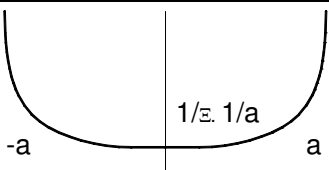
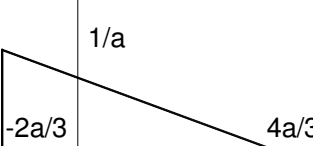


Figura 4.5 – Dispositivos de calibração e zona e intercomparação em altas pressões.

Vale ressaltar que um dos parâmetros de projeto do TCFB era a possibilidade do LMD-UnB utilizá-lo, também, para calibrações em baixas pressões. Com isso, foram realizados ensaios para verificar esse parâmetro. Os resultados mostraram que o TCFB, também, permite a calibração em baixas pressões, mas é preciso realizar ajustes dos equipamentos de controle automatizado de pressão e do sistema de rompimento da membrana.

Para melhor compreensão da formulação que será apresentada segue a tabela 4.1, que apresenta as principais leis de distribuições de probabilidades usadas na modelagem da incerteza.

Tabela 4.2 – Características das leis de distribuição de probabilidades.

Lei	Distribuição intervalo $d = 2 \cdot a$	Variância	Desvio-padrão
Normal 99.73 % $a = 3s$		$\frac{d^2}{36} = \frac{a^2}{9}$	$u(x_i) = \frac{d}{6} = \frac{a}{3}$
Triângulo Isósceles		$\frac{d^2}{24} = \frac{a^2}{6}$	$u(x_i) = \frac{d}{\sqrt{24}} = \frac{a}{\sqrt{6}}$
Uniforme/ Retangular		$\frac{d^2}{12} = \frac{a^2}{3}$	$u(x_i) = \frac{d}{\sqrt{12}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$
Arco seno		$\frac{d^2}{8} = \frac{a^2}{2}$	$u(x_i) = \frac{d}{\sqrt{8}} = \frac{a}{\sqrt{2}}$
Triângulo retângulo		$\frac{d^2}{18} = \frac{a^2}{4,5}$	$u(x_i) = \frac{d}{\sqrt{18}} = \frac{a}{\sqrt{4,5}}$

4.1 CALIBRAÇÃO QUASE-ESTÁTICA EM TENSÃO

O sistema de aquisição é composto por um filtro e um analisador de sinal. O processo de calibração consiste em aplicar, por meio do gerador de tensão, um degrau de tensão a entrada do sistema e à entrada de um multímetro de referência (rastreado ao padrão de tensão). Os resultados dessa calibração são a sensibilidade *volt/volt* do sistema de aquisição e a incerteza associada (I_I na figura 4.2). Em Oliveira (2004) o autor apresenta o diagrama de Ishikawa das fontes de incerteza que são consideradas na calibração quase-estática em tensão, conforme ilustra a figura a figura 4.6, e a figura 4.7 ilustra o esquema da montagem experimental.

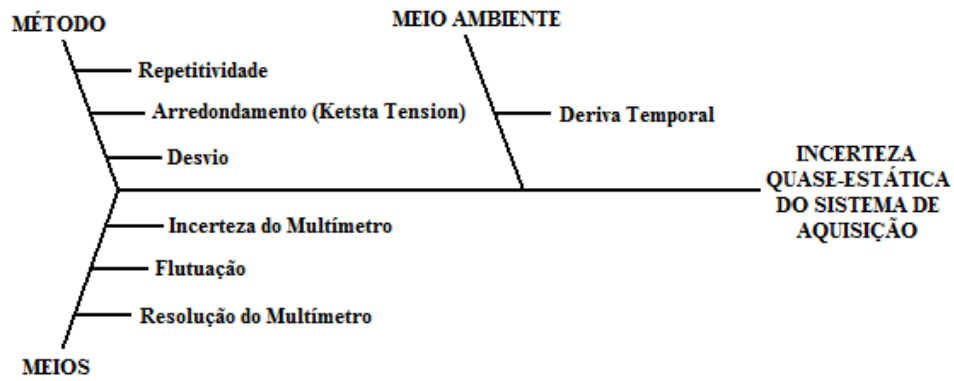


Figura 4.6 – Diagrama de Ishikawa da calibração quase-estática em tensão.

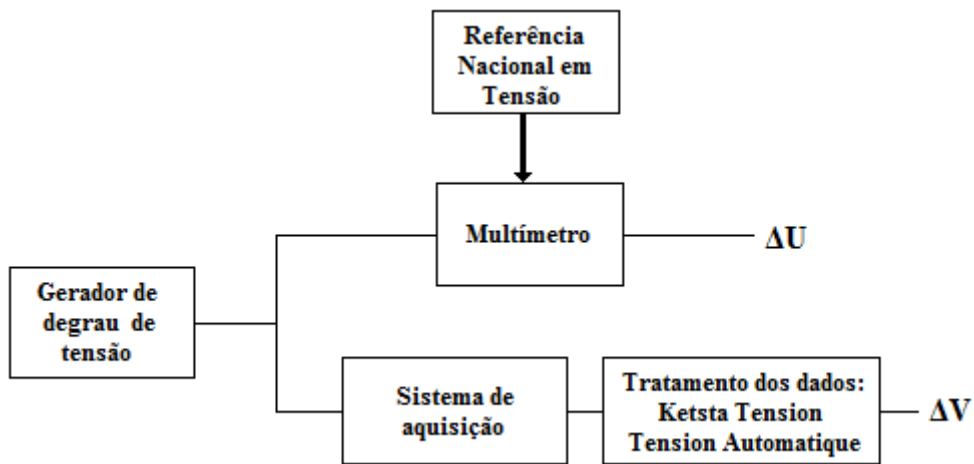


Figura 4.7 – Esquema da montagem experimental da calibração quase-estática em tensão.

Para determinar a sensibilidade (equação 4.5) calculam-se as médias entre dois pontos nos patamares superior e inferior de degrau de pressão. E com isso, chega-se à amplitude do degrau. Esse procedimento é realizado nas respostas do multímetro e do sistema de aquisição, por meio do software KetStaTension. Na figura 4.8 apresenta-se um exemplo desse procedimento (Oliveira, 2004).

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta U} = \frac{V_s - V_l}{U_s - U_l} \quad \text{Eq. 4.5}$$

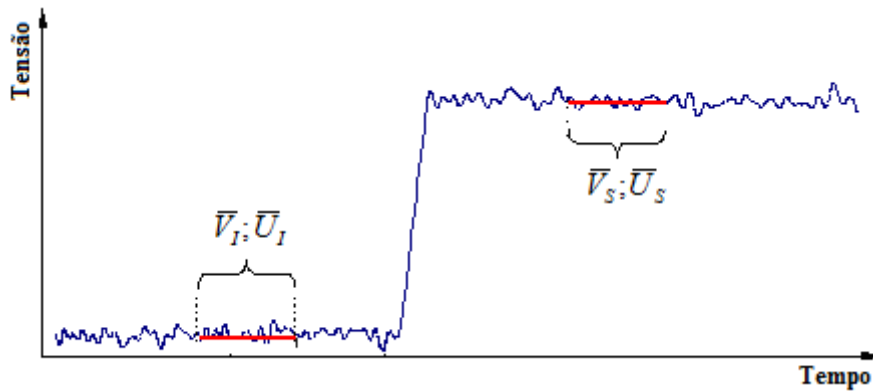


Figura 4.8 – Exemplo de medição dos patamares inferiores e superiores dos degraus registrados pelo multímetro (U_i) e pelo sistema de aquisição (V_i).

Considerando a amplitude de medição do sistema de aquisição a calibração dinâmica é realizada em cinco pontos, onde cada um deles é repetido quatro vezes. Com isso, a sensibilidade final será a média das sensibilidades calculadas para cada uma das repetições dos pontos de calibração. Abaixo segue a descrição e classificação de cada uma das fontes de incerteza apresentadas no diagrama de Ishikawa.

4.1.1 Repetitividade – Tipo A

A calibração é executada em cinco níveis de tensão, que são repetidos quatro vezes. Para cada repetição determina-se a diferença entre o valor de referência e o valor medido. Com isso, calcula-se para cada nível de tensão o desvio-padrão. A repetitividade é determinada como o valor máximo entre esses desvios-padrão. Então, a incerteza devida à repetitividade é dada pela equação 4.6.

$$u_{(rep)} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{Eq. 4.6}$$

sendo s : o desvio-padrão e n é a quantidade de repetições.

4.1.2 Incerteza do Multímetro – Tipo B

Como o multímetro utilizado é calibrado, a sua incerteza com um fator de abrangência $k = 2$, é fornecida pelo certificado de calibração, por meio de uma equação que indica a

incerteza com base na faixa de medição. Para cada repetição a tensão é medida duas vezes (patamar superior e patamar inferior). Logo, a incerteza é multiplicada por $\sqrt{2}$.

4.1.3 Desvio – Tipo B

Segundo Oliveira (2004) o desvio é definido como a diferença entre o valor medido pelo multímetro e o valor medido pelo sistema de aquisição. Esse cálculo é realizado para cada repetição do ensaio. A incerteza é definida como o valor máximo entre esses desvios. Nesse caso, uma série de resultados de ensaios mostrou que a distribuição mais adequada é do tipo triângulo retângulo, conforme a figura 4.9 que apresenta o histograma dos resultados.

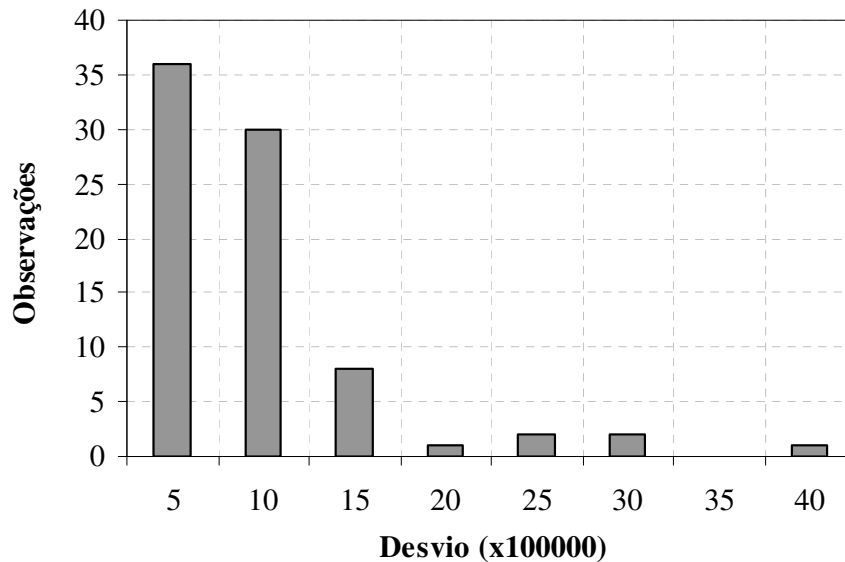


Figura 4.9 – Distribuição do desvio.

A distribuição triângulo retângulo é assimétrica logo o intervalo é definido como $d = 2 \cdot a$. Então, tomando como base a variância, a incerteza devida ao desvio é determinada pela equação 4.7.

$$u_{(desvio)} = \frac{d}{\sqrt{18}} = \frac{2 \cdot a}{\sqrt{2^2 \cdot 4,5}} = \frac{a}{\sqrt{4,5}} \quad \text{Eq. 4.7}$$

4.1.4 Deriva Temporal – TIPO B

A deriva temporal é uma característica intrínseca de cada equipamento ou transdutor e, normalmente, é fornecida pelo fabricante. Mas se houver disponíveis dados de uma série histórica a deriva temporal pode ser calculada. A deriva temporal é dada sob a forma de intervalo e, supostamente, o erro estará dentro desse intervalo. Logo a incerteza é estimada a partir de uma distribuição retangular.

$$u_{(dt)} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad \text{Eq. 4.8}$$

4.1.5 Resolução do Multímetro

Pelo Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO/VIM, 2009) a resolução de um instrumento é a “*menor diferença entre indicações que pode ser significativamente percebidas*”. Normalmente, essa informação é fornecida pelo fabricante. A incerteza é calculada como uma distribuição retangular de intervalo igual à resolução. Como a medição em tensão é realizada duas vezes (patamares superior e inferior) a incerteza é multiplicada por $\sqrt{2}$.

$$u_{(r)} = \frac{d}{\sqrt{12}} \cdot \sqrt{2} \quad \text{Eq. 4.9}$$

4.1.6 Arredondamento (KetStaTension) – Tipo B

O software de análise dos dados (KetStaTension) arredonda os valores de tensão a 0,0001 V. A incerteza devida ao arredondamento é calculada como uma distribuição retangular com intervalo igual ao arredondamento. Para cada repetição do ensaio a tensão é medida duas vezes (patamares superior e inferior). Logo, a incerteza é multiplicada por $\sqrt{2}$.

$$u_{(A)} = \frac{d}{\sqrt{12}} \cdot \sqrt{2} \quad \text{Eq. 4.10}$$

4.1.7 Flutuação

A amplitude do degrau de tensão é calculada como a diferença entre os patamares superior e inferior. A tensão calculada nesses patamares é a média entre dois pontos escolhidos manualmente, entre os quais a tensão flutua. Dessa forma, o software calcula, além da média, o desvio-padrão para cada medição. Nesse caso, a incerteza é estimada como sendo o desvio-padrão máximo e a distribuição é do tipo triangular.

4.1.8 Resultado da Calibração

A ferramenta de cálculo da incerteza desenvolvida pelo LMD-ENSAM/Paris fornece ao final do processo uma tabela que compila os valores de cada uma das incertezas descritas acima. É apresentado também o valor da incerteza combinada, o fator de abrangência (calculado em termos dos graus de liberdade) e a incerteza expandida, além de um gráfico que mostra o peso de cada componente sobre o valor final. A figura 4.10 mostra um exemplo do resultado final.

Amplitude de Medição: 1.2 volts							
Fonte de Incerteza	Valor	Dist. Prob.	Div.	Sens.	Incert.	G. Lib.	Peso
Incerteza do Multimetro (TIPO B1)	1,70E-04	Normal	2,00	1,000	1,20E-04	inf.	1,6
Desvio (TIPO B2)	1,79E-03	Triângulo Retângulo	4,24	1,000	4,22E-04	inf.	19,8
Deriva Temporal (TIPO B3)	3,50E-04	Retângulo	1,73	1,000	2,02E-04	inf.	4,5
Resolução do Multimetro (TIPO B4)	0,0001	Retângulo	3,46	1,000	4,08E-05	inf.	0,2
Arredondamento (TIPO B5)	1,00E-04	Retângulo	3,46	1,000	4,08E-05	inf.	0,2
Flutuação (TIPO B6)	9,00E-04	Normal	2,00	1,000	6,36E-04	inf.	45,0
Repetitividade (TIPO A1)	1,02E-03		2,00	1,000	5,08E-04	3	28,7
Incerteza Combinada		Normal	FA	1,000	2,54E-04	8605	100
Incerteza Expandida		Normal	2,000		5,08E-04		

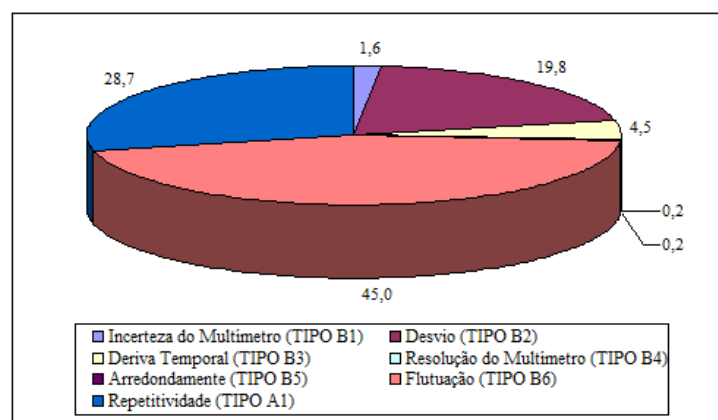


Figura 4.10 – Exemplo de um resultado final de uma calibração quase-estática em tensão.

4.2 CALIBRAÇÃO QUASE-ESTÁTICA EM PRESSÃO

O princípio da calibração quase-estática em pressão é o mesmo da calibração em tensão, ou seja, aplicar um degrau de pressão ao transdutor a calibrar (com ou sem eletrônica associada) e ao transdutor de referência (calibrado estaticamente e rastreado a referência nacional em pressão). O dispositivo usado para gerar o degrau de pressão e o dispositivo de abertura rápida.

Os resultados dessa calibração são a sensibilidade do transdutor (*unidade de pressão/volt*) e a incerteza associada (I_3 na figura 4.2). Em Oliveira (2004) o autor apresenta o diagrama de Ishikawa das fontes de incerteza que são consideradas na calibração quase-estática em pressão, conforme ilustra a figura 4.11, e a figura 4.12 ilustra o esquema da montagem experimental.

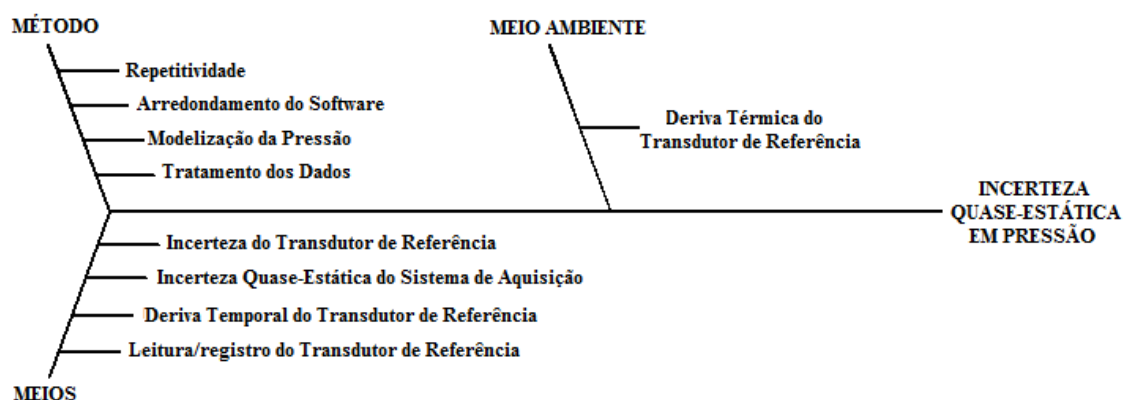


Figura 4.11 – Diagrama de Ishikawa da calibração quase-estática em pressão.

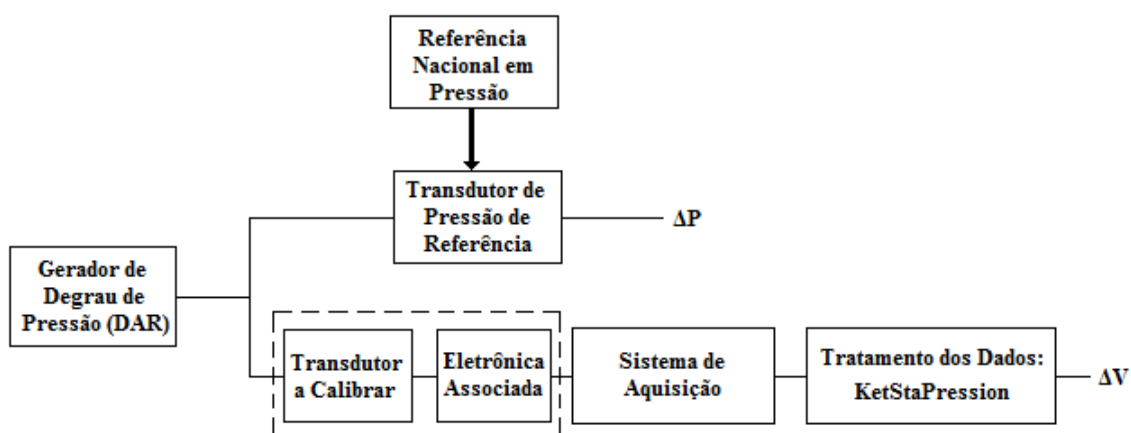


Figura 4.12 – Esquema da montagem experimental da calibração quase-estática em pressão.

O transdutor de pressão de referência e o transdutor a calibrar são submetidos ao mesmo degrau de pressão. A resposta do primeiro (sinal de entrada) é registrada por um software de aquisição e a resposta do segundo (sinal de saída) pelo sistema de aquisição. O ensaio é realizado em cinco valores dentro da amplitude de medição do transdutor, para cada um desses pontos o ensaio é repetido quatro vezes.

O modo de medição dos patamares superior e inferior é o mesmo apresentado na calibração quase-estática em tensão, na qual foi calculada a média entre dois pontos selecionados. Abaixo segue a descrição e classificação de cada uma das fontes de incerteza apresentadas no diagrama de Ishikawa.

4.2.1 Repetitividade – Tipo A

Para cada um dos valores da amplitude de medição o ensaio é repetido quatro vezes. Para cada um desses ensaios é calculada a diferença entre o valor medido e o valor de referência. Então, para cada ponto da amplitude de medição calcula-se o desvio-padrão entre as diferenças calculadas em cada repetição desse ponto. A incerteza devida à repetitividade será o valor máximo entre esses desvios-padrão.

4.2.2 Incerteza do Transdutor de Referência – Tipo B1

O transdutor de referência é calibrado e a sua incerteza com um fator de abrangência $k = 2$ é fornecida pelo certificado. Para cada repetição no tratamento dos dados a pressão é medida duas vezes (patamares superior e inferior), então a incerteza é multiplicada por $\sqrt{2}$.

4.2.3 Calibração Quase-estática do Sistema de Aquisição – Tipo B2

É a incerteza que foi calculada na etapa anterior (calibração quase-estática em tensão), que é fornecida em *volt*. Dessa forma, utiliza-se a sensibilidade do transdutor para converter em unidade de pressão a incerteza quase-estática em tensão. Como se medem os patamares superior e inferior, a incerteza é multiplicada por $\sqrt{2}$.

4.2.4 Deriva Temporal do Transdutor de Referência – Tipo B3

Da mesma forma que foi definida no tópico anterior, a deriva temporal é uma característica intrínseca do transdutor e, normalmente, é fornecida pelo fabricante ou pode ser determinada a partir da série histórica de dados do transdutor. Como a deriva temporal é definida por um intervalo, utiliza-se a distribuição retangular para calcular a incerteza (equação 4.4).

4.2.5 Deriva Térmica do Transdutor de Referência – Tipo B4

O transdutor de referência é sensível à temperatura, logo é importante estabelecer uma compensação. Em muitos equipamentos isso já é realizado automaticamente. Nos casos onde não há compensação, os fabricantes de transdutores informam o valor da incerteza para cada variação de um grau de temperatura do ambiente. Com isso, utiliza-se a distribuição retangular para calcular a incerteza.

4.2.6 Leitura do Transdutor de Referência – Tipo B5

Para calcular essa incerteza é necessário conhecer o arredondamento feito na leitura do valor indicado e registrado pelo transdutor de referência. Normalmente, considera a resolução do instrumento de medição como sendo o arredondamento. A incerteza é calculada considerando uma distribuição retangular.

4.2.7 Tratamento dos Dados – Tipo B6

Essa é o mesmo tipo da incerteza flutuação calculada no tópico anterior. O sinal de saída (resposta do transdutor a calibrar) é medido pelo sistema de aquisição e a média dos patamares superior e inferior é calculada, tomando como base os pontos selecionados, entre os quais a tensão flutua. O software calcula a média o desvio-padrão para cada repetição do ensaio. E nesse caso, a incerteza é estimada como sendo o desvio-padrão máximo e a distribuição é do tipo triangular.

Para integrar o cálculo da incerteza combinada o valor é convertido em unidades de pressão utilizando a sensibilidade do transdutor.

4.2.8 Arredondamento do Software (KetStaPression) – Tipo B7

No cálculo da média dos patamares superior e inferior o software KetStaPression arredonda o resultado em $0,1 \text{ mV}$. Nesse caso, a incerteza é calculada como uma distribuição retangular e como são realizadas duas medições para cada repetição a incerteza é multiplicada por $\sqrt{2}$.

4.2.9 Modelagem da Pressão – Tipo B8

Com os cinco valores da amplitude de medição do transdutor é construída a curva de calibração (*unidade de pressão x tensão*). A partir dessa curva a pressão é modelada (Eq. 4.11) pelo método dos mínimos quadrados, onde é definida a sensibilidade do transdutor.

$$\Delta p = S \cdot \Delta V + p_0 \quad \text{Eq. 4.11}$$

A incerteza da modelada é calculada como a raiz quadrada da variância.

$$u(\Delta p) = \sqrt{V(\Delta p)} = \sqrt{u^2(p_0) + \Delta V^2 \cdot u^2(S) + 2 \cdot \Delta V \cdot u(S, p_0)} \quad \text{Eq. 4.12}$$

onde $u^2(p_0)$ é a variância associada ao cálculo da constante da modelada;

$u^2(S)$ é variância associada ao cálculo sensibilidade;

$u^2(S, p_0)$ é a covariância entre S e p_0 .

A incerteza devido à modelada será o valor máximo das incertezas $u(\Delta p)$ calculadas para cada repetição do ensaio.

4.2.10 Resultado da Calibração Quase-Estática em Pressão

A ferramenta de cálculo da incerteza desenvolvida apresenta uma tabela com os valores de cada uma das incertezas descritas acima. Além da incerteza combinada, do fator de abrangência (calculado em termos dos graus de liberdade) e da incerteza expandida. As figuras 4.13 e 4.14 mostram um exemplo do resultado final.

Modelagem da Pressão

$$\Delta p = p_0 + S \cdot \Delta V$$

$$S = 3,3070 \text{ bar/V}$$

$$p_0 = 0,0223 \text{ bar}$$

$$S = 330696 \text{ Pa/V}$$

$$p_0 = 2233 \text{ Pa}$$

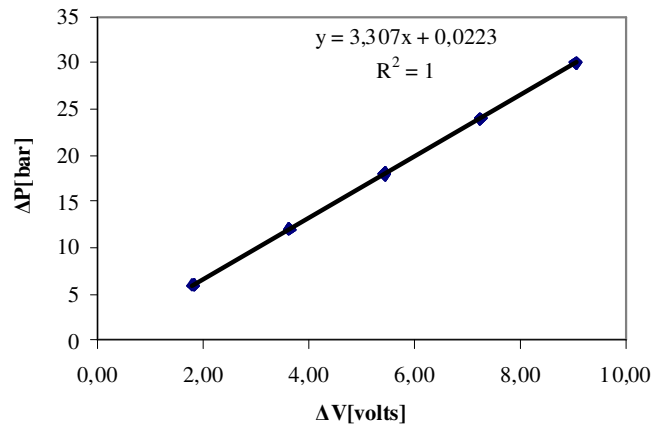


Figura 4.13 – Modelagem da pressão e curva de uma calibração quase-estática em pressão.

Amplitude de Medição: 30 bar

Fonte de Incerteza	Valor (Pa)	Dist. Prob.	Div.	Sens.	Inc. (Pa)	G. Lib.	Peso
Incerteza do Transdutor de Referência (Tipo B1)	1620	Normal	2,00	1,000	1146	inf.	73,6
Calibração Quase-estática em Tensão (Tipo B2)	661	Normal	2,00	1,000	468	inf.	12,3
Deriva Temporal do Transdutor de Referência (Tipo B3)	300	Rectangle	1,73	1,000	173	inf.	1,7
Deriva Térmica do Transdutor de Referência (Tipo B4)	100	Rectangle	1,73	1,000	58	inf.	0,2
Leitura do Transdutor de Referência (Tipo B5)	50	Rectangle	3,46	1,000	20	inf.	0,0
Tratamento dos Dados (Tipo B6)	583	Triangle	2,45	1,000	337	inf.	6,4
Arredondamento do Software (Tipo B7)	33	Rectangle	3,46	1,000	14	inf.	0,0
Modelização da Pressão (Tipo B8)	93		1,00	1,000	93	inf.	0,5
Repetitividade (Tipo A1)	618		2,00	1,000	309	3	5,4
Incerteza Combinada		Normal	FA	1,000	1335	3687	
Incerteza Expandida		Normal	2,000		2670		100

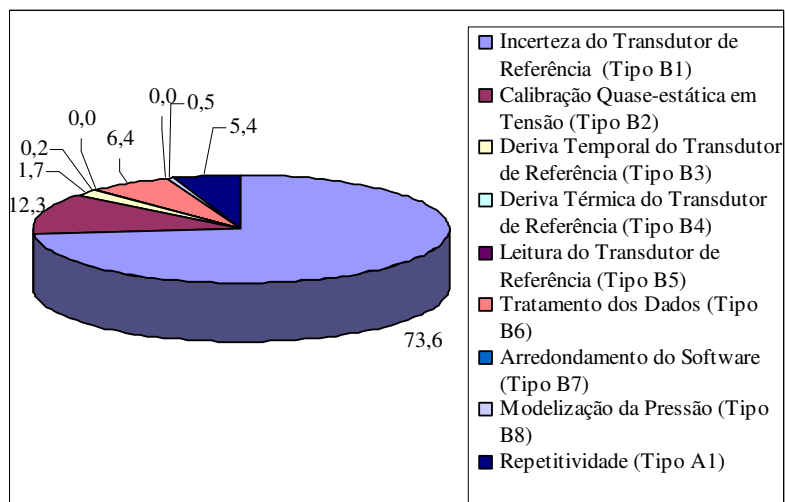


Figura 4.14 – Resultado de uma calibração quase-estática em pressão.

4.3 CALIBRAÇÃO DINÂMICA EM TENSÃO

O procedimento e a montagem experimental da calibração dinâmica em tensão é a mesma da calibração quase-estática, mas nesse caso o multímetro é utilizado apenas para ajustar os níveis do degrau de tensão.

Os dados agora são analisados com o programa EDYCAP (desenvolvido pelo LMD-ENSAM/Paris) e como os ensaios em pressão são realizados em três intervalos de frequência (baixas, médias e altas frequências) a calibração em tensão também é realizada em três etapas. Para isso regulam-se os filtros e o analisador de sinais para as configurações correspondentes. O resultado dessa etapa são as funções de transferência e as incertezas calculadas para cada frequência. Vale ressaltar que a função de transferência é calculada com 400 pontos dentro do intervalo de frequência selecionado. A figura 4.15 mostra o diagrama de Ishikawa das fontes de incerteza que são consideradas nessa calibração e a figura 4.16 mostra um esquema da montagem.

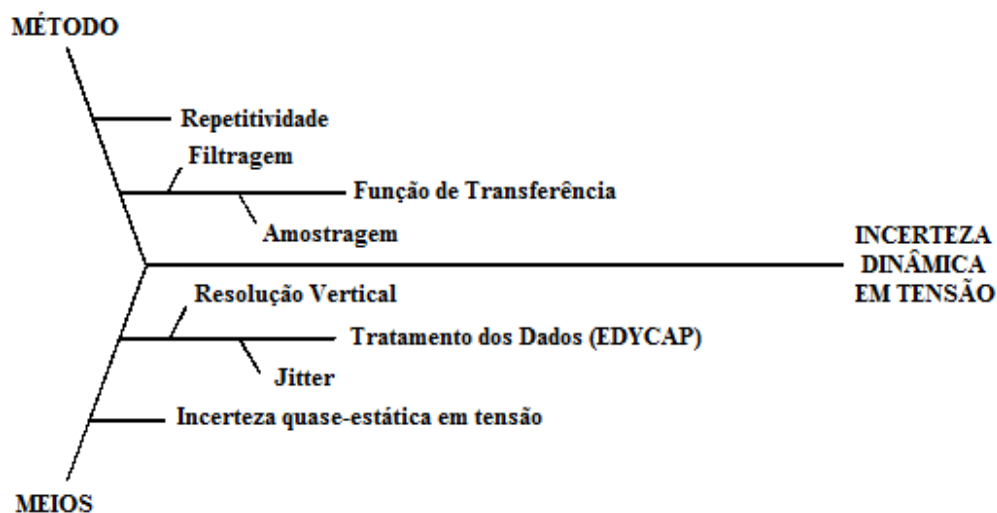


Figura 4.15 – Diagrama de Ishikawa da calibração dinâmica em tensão (Oliveira, 2004).

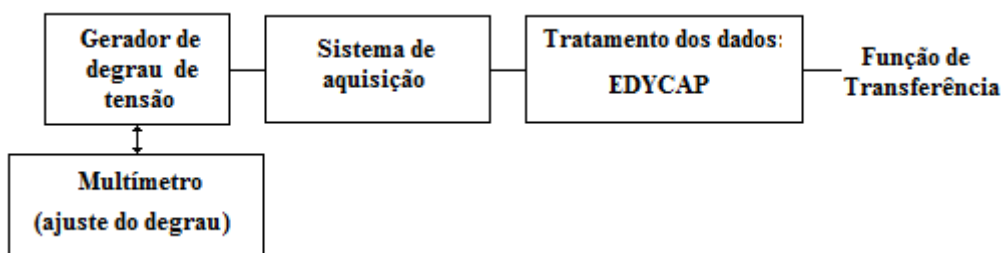


Figura 4.16 – Esquema da montagem experimental da calibração dinâmica em tensão.

4.3.1 Repetitividade – Tipo A

Para cada configuração do sistema de aquisição realizam-se quatro ensaios, dessa forma, a incerteza devida à repetitividade é calculada a partir do desvio-padrão das quatro medições para cada frequência. Para isso utiliza-se a equação 4.13.

$$\frac{u_{(rep)}}{Frequência} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{Eq. 4.13}$$

4.3.2 Função de Transferência – Tipo B1

Na calibração dinâmica a função de transferência pode ser apresentada pelo Ganho x frequência ou pelo ganho normalizado x frequência. No capítulo anterior foi discutido que o ganho ideal de função de transferência seria igual a zero dB, mas quando utiliza-se o ganho normalizado o valor ideal é 1 para todas as frequências dentro do intervalo, o que significa que não há amplificação nem atenuação do resultado da medição. Dessa forma, essa incerteza é estimada como a diferença entre a função de transferência ideal e a real, frequência por frequência. Essa diferença é calculada sobre a média dos quatro ensaios e Vale ressaltar que o cálculo dessa incerteza é realizado considerando uma distribuição retangular.

4.3.3 Tratamento dos Dados (EDYCAP) – Tipo B2

O software EDYCAP (desenvolvido pelo LMD-ENSAM/Paris) utiliza a transformada discreta de Fourier para calcular a função de transferência. O método utilizado para estimar a incerteza devida ao cálculo executado pelo software é o *Black Box* (Caixa Preta), pois a incerteza é estimada com base nas entradas e saídas, para qualquer que seja a metodologia de cálculo da Transformada Discreta de Fourier.

Esse método consiste em, a partir de expressões matemáticas, construir uma resposta e uma função de transferência de referência conhecidas (por exemplo, a resposta de um sistema de segunda ordem). Essa resposta de referência é utilizada como entrada no *software* e a função de transferência calculada (saída do software) é comparada com a função de transferência de referência.

A incerteza é estimada para cada frequência a partir da diferença entre as funções de transferência calculada e de referência. Oliveira (2004) apresenta uma análise completa do EDYCAP para diversas configurações de parâmetros de ensaio, como o software não sofreu nenhuma atualização desde então, considerou-se que os resultados obtidos ainda são válidos. Um valor único de incerteza sobre o intervalo de utilização foi determinado com base na análise estatística sobre a população das diferenças entre o valor de referência e o valor calculado.

Os resultados obtidos foram organizados sobre um histograma junto com lei normal ajustada (figura 4.17 por Oliveira, 2004). Realizaram-se testes estatísticos que mostram que o ajuste da distribuição normal representa 99,73% das amostras. Então, considerando as configurações de calibração e uma distribuição normal, a incerteza do EDYCAP pode ser estimada como o desvio-padrão da lei normal ajustada. No cálculo da incerteza combinada o valor da incerteza do EDYCAP é multiplicado pela amplitude de medição do sistema de aquisição.

$$\text{Incerteza EDYCAP} = 0,00050 \quad \text{Incerteza Expandida} = 0,0010 \quad (k = 2)$$

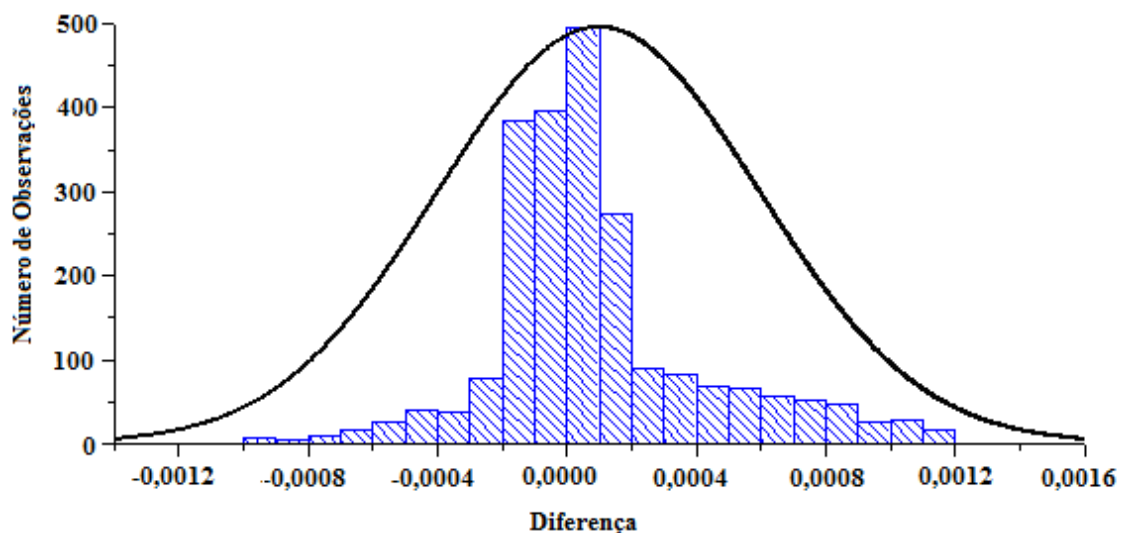


Figura 4.17 – Distribuição das diferenças entre as funções de transferência na avaliação do software EDYCAP.

4.3.4 Incerteza Quase-estática em Tensão – Tipo B3

Essa é a incerteza calculada na calibração quase-estática do sistema em tensão, que é fornecida com um fator de abrangência $k = 2$.

4.3.5 Resultados da Calibração Dinâmica em Tensão

O resultado de calibração dinâmica em tensão apresenta um gráfico com a função de transferência e a incerteza para cada configuração baixa, média e alta frequência, além de uma tabela com o valor da incerteza para cada frequência dentro do intervalo selecionado. Essa tabela é utilizada na calibração dinâmica em pressão. Apresenta-se, também, outra tabela com os valores de cada uma das fontes de incerteza para uma frequência específica. As figuras 4.18 e 4.19 apresenta um exemplo do resultado de uma calibração dinâmica em tensão.

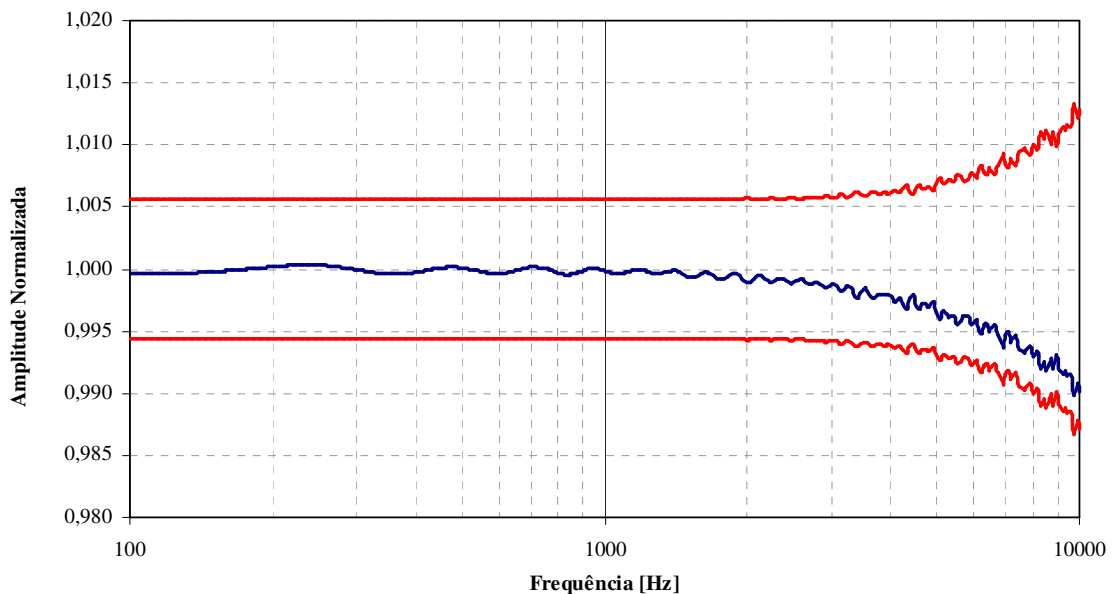


Figura 4.18 – Função de transferência (traço azul) e incerteza (traço vermelho) para uma calibração dinâmica em tensão em altas frequências realizada no sistema de aquisição do LMD-ENSAM/Paris.

Frequência 1000 Hz		Amplitude: 10 V					
Fonte de Incerteza	Valor (V)	Dist. Prob.	Div.	Sens.	Incert. (V)	G. Lib.	Peso
Função de Transferência - Tipo B1	0,0002	Rectang.	1,7	1	0,0001	inf.	0,03
EDYCAP - Tipo B2	0,01	Normal	2	1	0,0050	inf.	94,41
Incerteza Quase-estática em Tensão - Tipo B3	0,0017	Normal	2,0	1	0,0012	inf.	5,52
Repetitividade	0,0002		2,0	1	0,0001	3	0,04
Incerteza Combinada		Normal	FA	1	0,0051	539204	100,00
Incerteza Expandida		Normal	2,0		0,0103		

Figura 4.19 – Tabela com os valores das fontes de incerteza para a frequência de 1 kHz, do ensaio mostrado na figura 4.18.

4.4 CALIBRAÇÃO DINÂMICA EM PRESSÃO

Para cobrir o intervalo de frequência utilizam-se três dispositivos geradores de degraus de pressão. Para as baixas frequências o DAR (DAR manual), para as médias frequências o tubo de choque longo (TCFB) e para as altas frequências o tubo de choque (TC100). Com a intercomparação entre esses dispositivos e os resultados das outras calibrações, a incerteza dinâmica do transdutor de referência pode ser estimada.

O resultado dessa etapa são as funções de transferência e as incertezas calculadas para cada intervalo de frequência. Para o cálculo da função de transferência utiliza-se o mesmo procedimento adotado na calibração dinâmica em tensão. A figura 4.20 mostra o diagrama de Ishikawa das fontes de incerteza que são consideradas nessa calibração e a figura 4.21 mostra um esquema da montagem experimental.

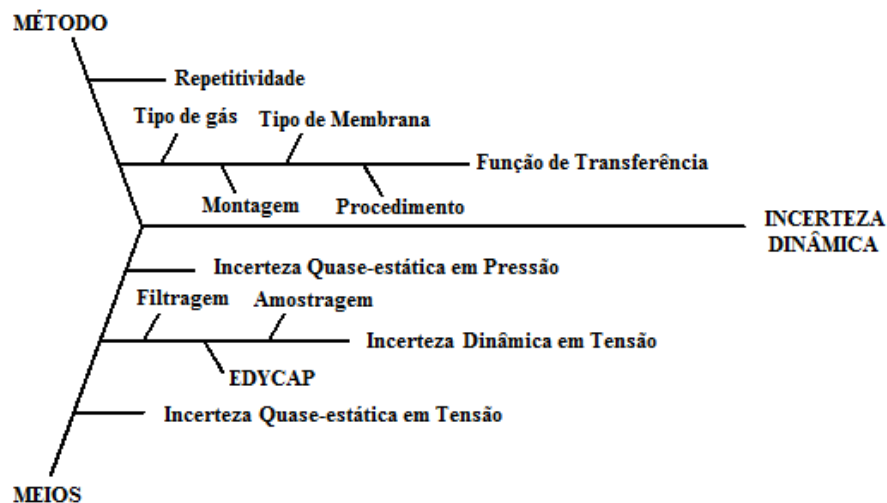


Figura 4.20 – Diagrama de Ishikawa da calibração dinâmica em pressão.

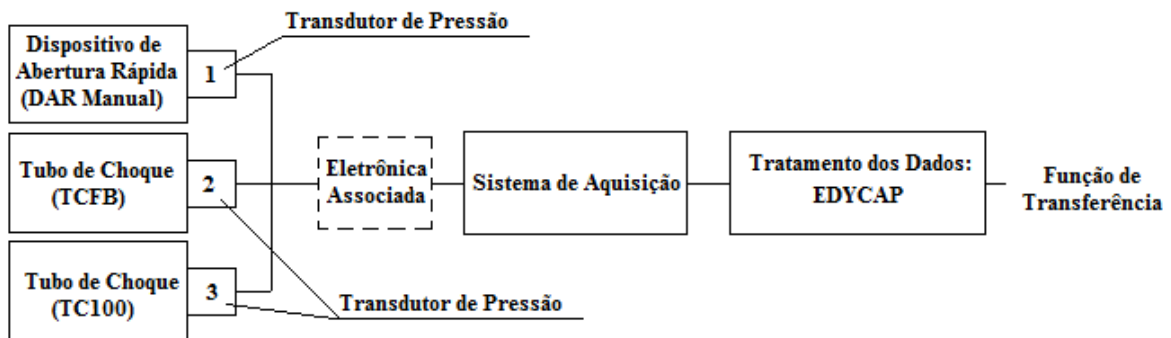


Figura 4.21 – Esquema da montagem experimental da calibração quase-estática em pressão.

O procedimento de calibração consiste em submeter o transdutor de referência a um degrau de pressão, determinar a sua função de transferência e calcular a incerteza. As condições iniciais de ensaio (relação de pressão e nível inferior de pressão) são definidas considerando o intervalo com o qual se deseja realizar a calibração (baixas ou altas pressões).

A análise da figura 4.20 mostra que diversos fatores foram agrupados, por exemplo, no grupo “Função de Transferência” há o tipo de gás, tipo de membrana, montagem e procedimento. A modelagem da influência de cada um desses parâmetros não é simples de ser determinada. Entretanto, trabalhos do LMD-ENSAM/Paris e do LMD-UnB mostram que a influência desses parâmetros, em geral, é sistêmica. Logo, o conjunto dessas influências pode ser determinado, indiretamente, pela incerteza devida ao desvio da função de transferência (Vianna et al. 1999; Barcelos, 2001; Oliveira et al., 1999).

Os resultados apresentados no capítulo 2 mostram que os parâmetros influenciam diretamente na função de transferência, especialmente quando se trabalha com altas pressões. Com isso, para manter as considerações apresentadas no parágrafo anterior foram necessárias as atualizações descritas capítulo 2, e, assim, minimizar a influência desses parâmetros e conseqüentemente reduzir a incerteza associada calibração em altas pressões.

4.4.1 Repetitividade – Tipo A

O cálculo dessa incerteza é realizado da mesma forma que na calibração dinâmica em tensão, ou seja, para cada configuração o ensaio é repetido quatro vezes e a repetitividade é determinada a partir do desvio-padrão máximo calculado, para cada frequência, sobre a média dos quatro ensaios. Dessa forma, a incerteza devida à repetitividade é dada pela equação 4.2. Os valores da incerteza são convertidos em unidades de pressão pela sensibilidade quase-estática do transdutor.

4.4.2 Função de Transferência – Tipo B1

Para cada frequência da função de transferência média, a incerteza é estimada a partir do desvio (diferença) entre essa função e a ideal (ganho normalizado igual a 1). Nesse caso considera-se a distribuição retangular.

4.4.3 Incerteza Quase-estática em Tensão – Tipo B2

Essa é a incerteza calculada na calibração quase-estática do sistema de aquisição, que é fornecida com um fator de abrangência $k = 2$.

4.4.4 Incerteza Quase-estática em Pressão – Tipo B3

Essa é a incerteza calculada na calibração quase-estática do transdutor, que é fornecida com um fator de abrangência $k = 2$.

4.4.5 Incerteza Dinâmica em Tensão – Tipo B4

Essa incerteza foi calculada na calibração dinâmica do sistema de aquisição para cada configuração de ensaio. Os valores são apresentados frequência por frequência com um fator de abrangência $k = 2$.

4.4.6 Resultado da Calibração

Para cada configuração de ensaio (baixas, médias e altas frequências) apresenta-se a função de transferência e a incerteza por banda de frequências. Apresenta-se também uma tabela com os valores de cada uma das fontes de incerteza para uma frequência específica. As figuras 4.22 e 4.23 apresentam um exemplo do resultado de uma calibração dinâmica em pressão.

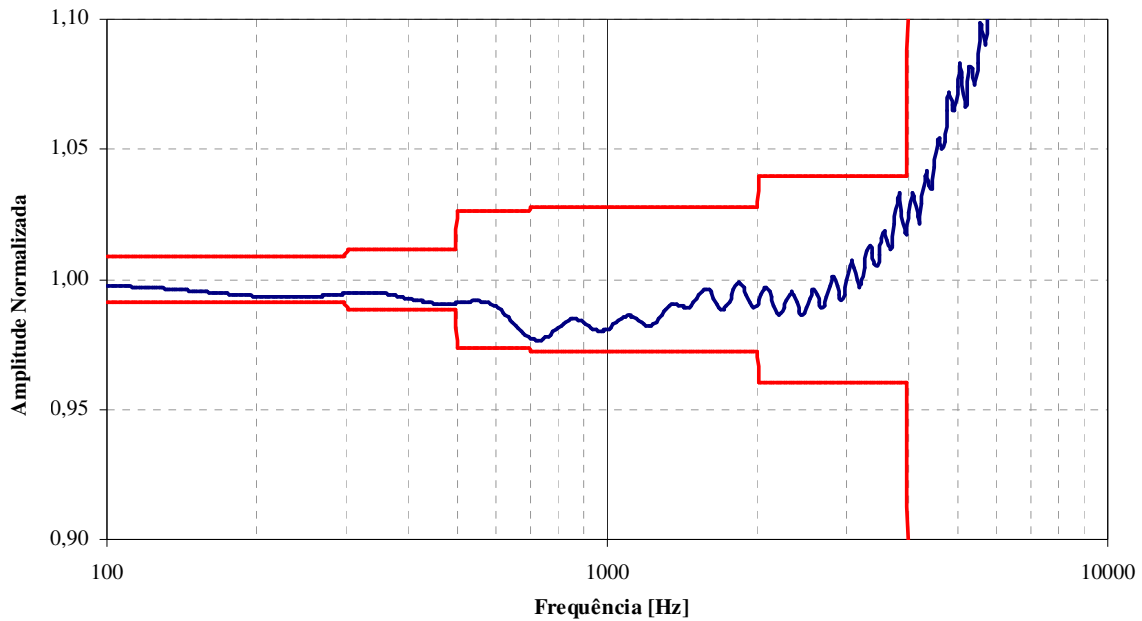


Figura 4.22 – Função de Transferência (traço azul) e incerteza (traço vermelho) para uma calibração dinâmica em pressão em altas pressões realizada no TC100.

Frequência 1000 Hz		Amplitude: 30 bar					
Fonte de Incerteza	Valor (Pa)	Dist. Prob.	Div.	Sens.	Incert. (Pa)	G. Lib.	Peso
Função de Transferência - Tipo B1	57153	Rectang.	1,7	1	32997	inf.	97,61
Incerteza Quase-estática em Tensão - Tipo B2	565	Normal	2	1	283	inf.	0,01
Incerteza Quase-estática em Pressão- Tipo B3	3661	Normal	2,0	1	1830	inf.	0,30
Incerteza Dinâmica em Tensão - Tipo B4	4072	Normal	2,0	1	2036	inf.	0,37
Repetitividade - Tipo A1	8737		2,0	1	4369	3	1,71
Incerteza Combinada		Normal	FA	1	33399	10247	100,00
Incerteza Expandida		Normal	2,0		66798		

Figura 4.23 – Tabela com os valores das fontes de incerteza para a frequência de 1 kHz, do ensaio mostrado na figura 4.22.

O resultado final da calibração dinâmica do transdutor de referência é a sua função de transferência em um intervalo de baixa até as altas frequências. A figura 4.24 apresenta um exemplo desse resultado com as incertezas e as zonas de intercomparação para uma calibração em baixas pressões.

A tabela 2.1 apresentada no capítulo 2 mostra os valores das incertezas por intervalos de frequências associadas à função de transferência da figura 4.24.

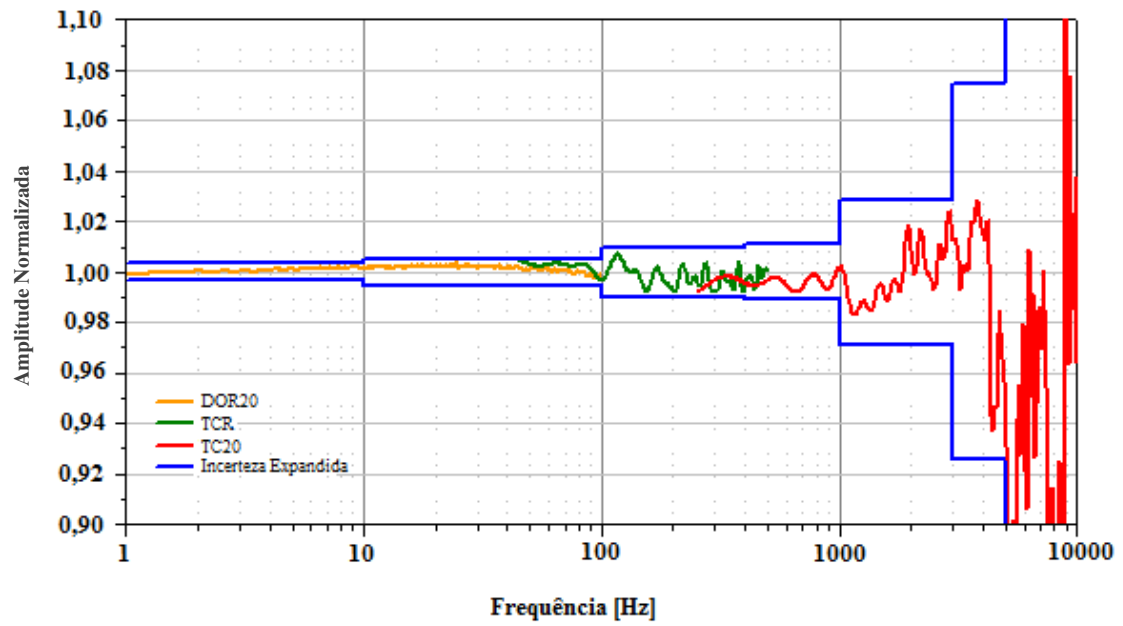


Figura 4.24 – Função de Transferência de um transdutor de referência após as etapas de calibração. O resultado para a calibração dinâmica em pressão em baixas pressões (Oliveira, 2004).

5. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DINÂMICA EM ALTAS PRESSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados da calibração dinâmica de um transdutor de referência em altas pressões, realizada com os dispositivos e métodos descritos nos capítulos anteriores.

5.1 ESTUDOS DOS SISTEMAS DE AQUISIÇÃO

Os ensaios foram divididos entre os laboratórios LMD-ENSAM/Paris e LMD-UnB, no primeiro realizou-se a calibração em altas e baixas frequências e no segundo os ensaios em médias frequências.

As maiores dificuldades em dividir os ensaios de pressão em dois laboratórios são, o duplo sistema de aquisição e a logística de movimentação dos transdutores e de suas eletrônicas associadas. Apesar dos sistemas de aquisição do LMD-ENSAM/Paris e do LMD-UnB serem equivalentes, se faz necessária a calibração quase-estática e dinâmica de ambos, e, com isso, realizar a comparação dos dispositivos.

A calibração do sistema de aquisição contempla duas fases: a quase-estática e a dinâmica. Para realizar essas calibrações duas abordagens podem ser empregadas. A primeira consiste em executar as calibrações com as mesmas configurações que serão utilizadas nos ensaios em pressão. A segunda realiza uma calibração completa do sistema de aquisição (filtro e analisador de sinal), ou seja, estuda-se a variação da incerteza em relação a modificações nos ajustes dos parâmetros dos equipamentos.

A vantagem da primeira abordagem é a curta duração do processo de calibração, entretanto nada se pode afirmar sobre a incerteza quando um dos parâmetros do sistema de aquisição é alterado. A vantagem da segunda abordagem é a possibilidade de, durante os ensaios, alterar os parâmetros dos componentes do sistema sem que seja necessário refazer as calibrações, uma vez que após a análise dos dados apresenta-se um valor único para a incerteza. A desvantagem é a quantidade de ensaios a serem realizados e, conseqüentemente, a duração do processo.

Então, para avaliar o impacto de cada parâmetro do sistema de aquisição no valor da incerteza realizou-se a calibração completa de três sistemas de aquisição (dois do LMD-ENSAM/Paris e um do LMD-UnB). Entretanto, no valor da incerteza final apresentado nesse trabalho utilizou-se a primeira abordagem, uma vez que para um transdutor de referência deve-se sempre buscar as melhores condições de ensaio, de forma a obter a menor incerteza possível.

Os sistemas de aquisição são compostos pelos filtros analógicos e pelo analisador de sinal. O procedimento de calibração completo é realizado em duas etapas: estudo do filtro e estudo do analisador de sinal. Na Tabela 5.1 apresentam-se as composições dos sistemas de aquisição.

Tabela 5.1 – Componentes do sistema de aquisição.

Sistema	Laboratório	Filtro	Analisador de Sinal
1	LMD-ENSAM	Fabricante: KEMO Modelo: VBF8 mk4	Fabricante: Nicolet Modelo: PRO44
2	LMD-ENSAM	Fabricante: KEMO Modelo: Benchmaster 8	Fabricante: LDS-Nicolet Modelo: Genesis 7t
3	LMD-UnB	Fabricante: DL Instruments Modelo: 4213	Fabricante: LDS-Nicolet Modelo: Accura 100

A estratégia de ensaio da segunda abordagem consiste em fazer um parâmetro variar enquanto os outros estão fixos. Para cada tipo de montagem os dados foram analisados sob dois regimes diferentes, o primeiro é a análise quase-estática (sensibilidade e incerteza) e o segundo é a análise dinâmica (função de transferência e incerteza).

Inicialmente fez-se a análise do sistema 1, que foi utilizado nos ensaios preliminares, na avaliação dos sistemas de rompimento da membrana e nos testes das atualizações do TC100. O estudo desse sistema foi mais completo que as dos outros, uma vez que se desejava conhecer detalhadamente os efeitos da configuração dos equipamentos sobre a incerteza. Para os outros sistemas os estudos se concentraram nas configurações mais críticas observadas nos resultados com o sistema 1. A tabela 5.2 apresenta os parâmetros que foram analisados para o sistema de aquisição 1.

Tabela 5.2 – Parâmetros de análise do sistema de aquisição 1.

Elemento	Parâmetro em Teste	Parâmetros Fixos		Regime
Filtro	Frequência de Corte: <i>de 20 Hz a 80 kHz</i> (12 pontos)	Tipo de Filtro:	Bessel	Quase-estático
		Ganho:	<i>0 dB</i>	
		Nº de Pontos:	<i>6001</i>	
		Amplitude:	<i>6 V</i>	
		Amostragem:	<i>200 µs/ponto</i>	
Filtro	Frequência de Corte: <i>de 20 Hz a 80 kHz</i> (12 pontos)	Tipo de Filtro:	Bessel	Quase-estático
		Ganho:	<i>10 dB</i>	
		Nº de Pontos:	<i>6001</i>	
		Amplitude:	<i>6 V</i>	
		Amostragem:	<i>200 µs/ponto</i>	
Filtro	Frequência de Corte: <i>de 20 Hz a 80 kHz</i> (12 pontos)	Tipo de Filtro:	Butterworth	Quase-estático
		Ganho:	<i>0 dB</i>	
		Nº de Pontos:	<i>6001</i>	
		Amplitude:	<i>6 V</i>	
		Amostragem:	<i>200 µs/ponto</i>	
Filtro	Frequência de Corte: <i>de 20 Hz a 80 kHz</i> (12 pontos)	Tipo de Filtro:	Butterworth	Quase-estático
		Ganho:	<i>10 dB</i>	
		Nº de Pontos:	<i>6001</i>	
		Amplitude:	<i>6 V</i>	
		Amostragem:	<i>200 µs/ponto</i>	
Analisador de Sinal	Número de Pontos: <i>de 2001 a 40001</i> (16 pontos)	Tipo de Filtro:	Bessel	Quase-estático
		Ganho:	<i>0 dB</i>	
		Frequência de Corte:	<i>3 kHz</i>	
		Amplitude:	<i>6 V</i>	
		Amostragem:	<i>200 µs/ponto</i>	
Analisador de Sinal	Amostragem: <i>de 500 ns a 2 ms</i> (12 pontos)	Tipo de Filtro:	Bessel	Quase-estático
		Ganho:	<i>0 dB</i>	
		Frequência de Corte:	<i>3 kHz</i>	
		Amplitude:	<i>6 V</i>	
		Nº de Pontos:	<i>12001</i>	
Analisador de Sinal	Amplitude de Medição: <i>de 300 mV a 12 V</i> (6 amplitudes)	Tipo de Filtro:	Bessel	Quase-estático
		Ganho:	<i>0 dB</i>	
		Frequência de Corte:	<i>3 kHz</i>	
		Nº de Pontos:	<i>6001</i>	
		Amostragem:	<i>200 µs/ponto</i>	
Filtro	Frequência de Corte: <i>de 10 kHz a 80 kHz</i> (8 pontos)	Tipo de Filtro:	Butterworth	Dinâmico
		Ganho:	<i>0 dB</i>	
		Nº de Pontos:	<i>6001</i>	
		Amplitude:	<i>6 V</i>	
		Amostragem:	<i>1 µs/ponto</i>	
Filtro	Frequência de Corte: <i>de 10 kHz a 80 kHz</i> (8 pontos)	Tipo de Filtro:	Butterworth	Dinâmico
		Ganho:	<i>10 dB</i>	
		Nº de Pontos:	<i>6001</i>	
		Amplitude:	<i>6 V</i>	
		Amostragem:	<i>1 µs/ponto</i>	

Tabela 5.2 – Parâmetros de análise do sistema de aquisição 1.

Elemento	Parâmetro em Teste	Parâmetros Fixos		Regime
Analisador de Sinal	Número de Pontos: de 2001 a 12001 (8 pontos)	Tipo de Filtro:	Butterworth	Dinâmico
		Ganho:	0 dB	
		Frequência de Corte:	60 kHz	
		Amplitude:	6 V	
		Amostragem:	1 μ s/ponto	
Analisador de Sinal	Amostragem: de 200 ns a 50 μ s (9 pontos)	Tipo de Filtro:	Butterworth	Dinâmico
		Ganho:	0 dB	
		Frequência de Corte:	60 kHz	
		Amplitude:	6 V	
		Número de Pontos:	6001	
Analisador de Sinal	Amplitude de Medição: de 300 mV a 12 V (6 amplitudes)	Tipo de Filtro:	Butterworth	Dinâmico
		Ganho:	0 dB	
		Frequência de Corte:	60 kHz	
		Amostragem:	1 μ s/ponto	
		Nº de Pontos:	6001	

Para cada configuração (ponto) foram realizadas quatro repetições e no caso da amplitude de medição em regime quase estático seguiu-se o procedimento da calibração quase-estática em tensão, ou seja, para cada amplitude de medição deve-se realizar cinco níveis de tensão que devem ser repetidos quatro vezes. Por exemplo, para a amplitude de 6 V os níveis foram 1 V, 2 V, 3 V, 4 V e 5 V.

As figuras 5.1 e 5.2 apresentam os resultados das análises em regime quase-estático para esse estudo do sistema de aquisição 1 (filtro e analisador de sinal). Os valores de incerteza apresentados nas figuras 5.1, 5.2a, 5.2b e 5.2c são absolutos e na figura 5.2d é o valor em relação a amplitude de medição.

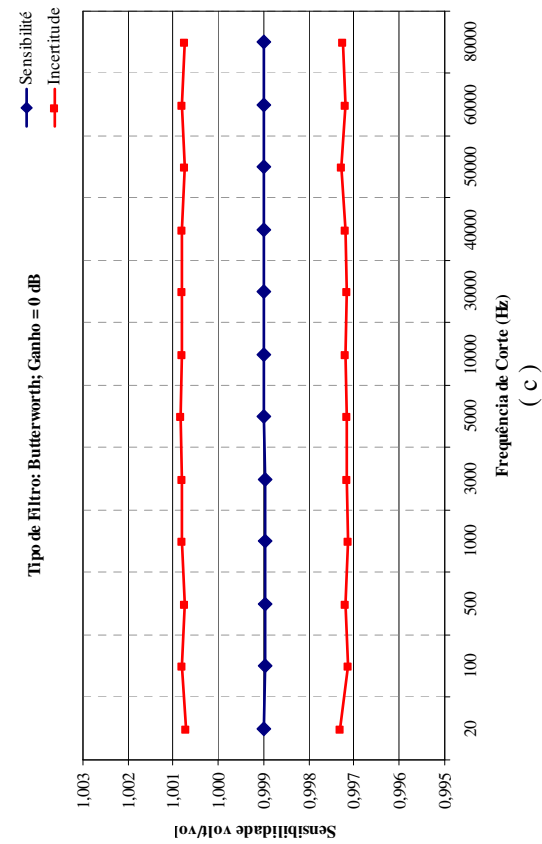
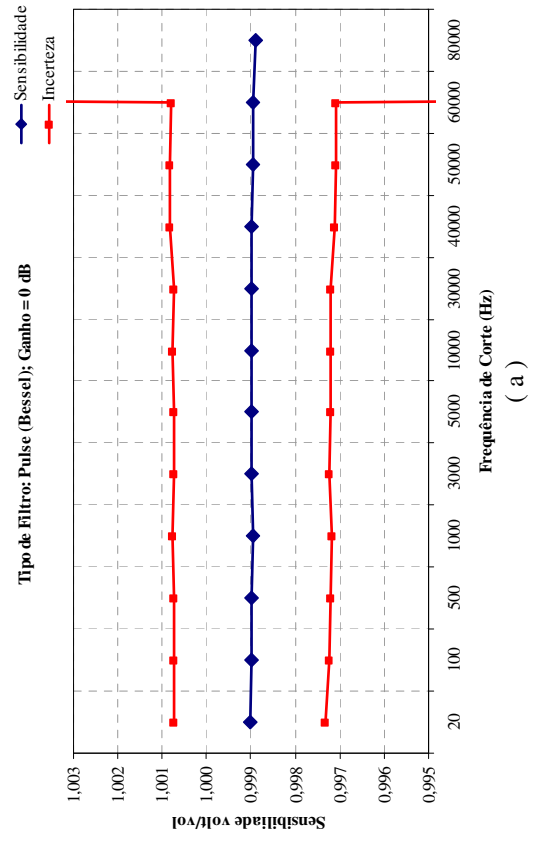
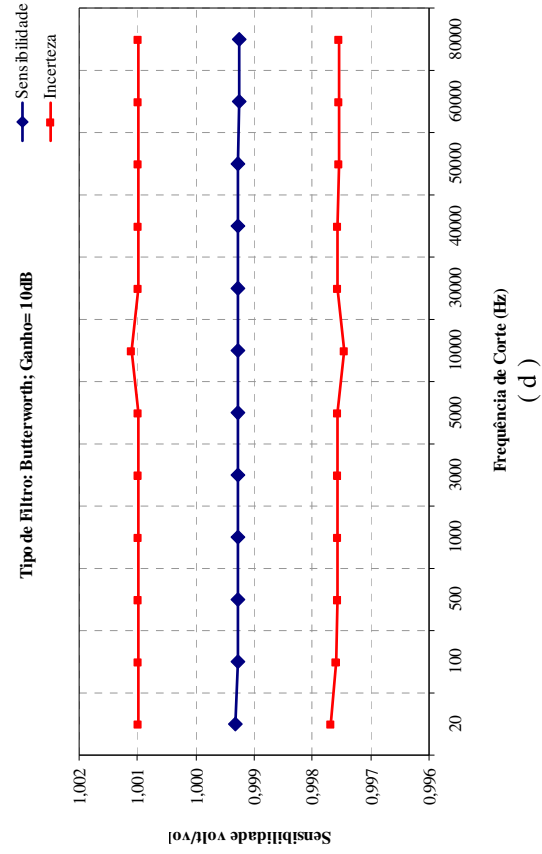
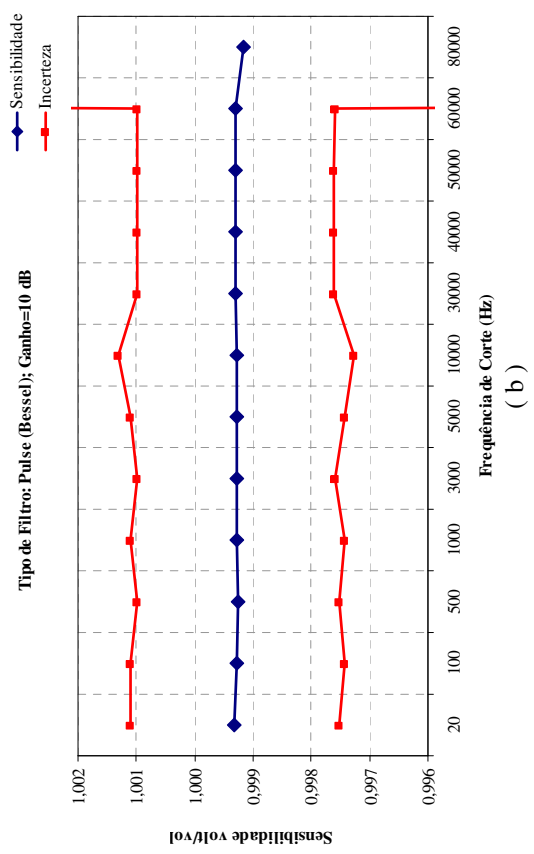


Figura 5.1 – Resultados da análise do sistema de aquisição 1 em regime quase-estático.

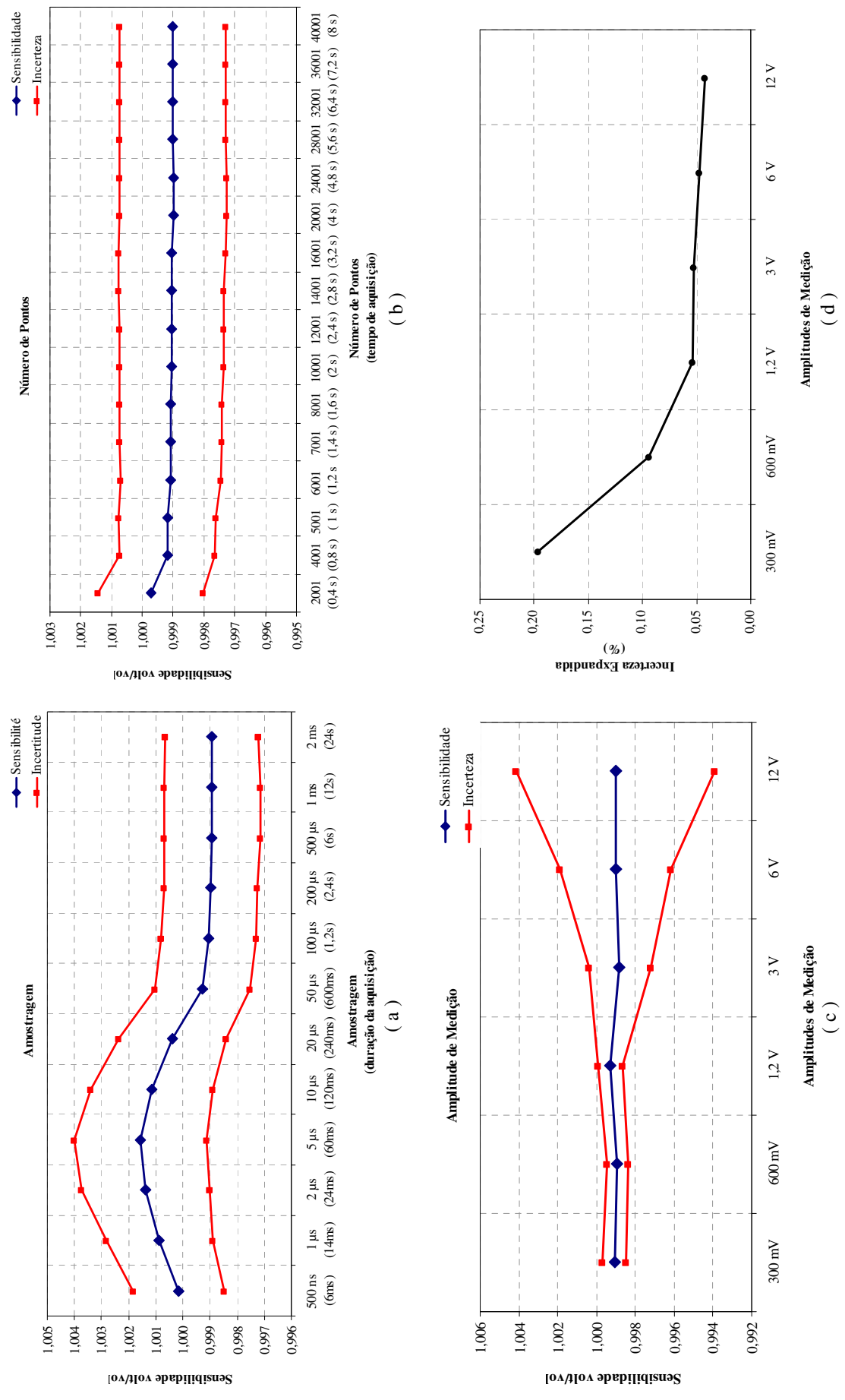


Figura 5.2 – Resultados da análise do sistema de aquisição 1 em regime quase-estático.

A análise das figuras 5.1a, 5.1b, 5.1c e 5.1d mostra que para a calibração quase-estática a frequência de corte e o tipo de filtro não interferem significativamente na incerteza até a frequência de 60 kHz . Entretanto, há pequenas variações com o aumento do ganho. As figuras 5.2a e 5.2b devem ser analisadas em conjunto uma vez que o número de pontos e amostragem definem, a duração da aquisição. Assim observa-se que para uma duração de aquisição entre 14 ms e 600 ms ocorre uma alteração significativa da sensibilidade e da incerteza. Isso mostra que para a calibração quase-estática, intervalos curtos de aquisição trazem menos informação a respeito da tensão nos patamares superiores e inferiores do degrau de pressão e, conseqüentemente, aumentam a incerteza. Uma vez que as tensões medidas nesses patamares são à base do cálculo da incerteza e da sensibilidade.

A figura 5.2c mostra a variação em valores absolutos da incerteza expandida e a figura 5.2d apresenta a incerteza expandida em porcentagem da amplitude de medição. Observa-se que apesar da incerteza ser menor para pequenas amplitudes de medição esse valor é mais significativo quando se analisa a incerteza em porcentagem, já no outro extremo do gráfico a incerteza é maior em valor absoluto, mas em relação à amplitude de medição a influência é menor. Esse comportamento é normal, uma vez que as flutuações de tensão em pequenas amplitudes de medição são mais importantes. Essas flutuações ocorrem devido a ruídos e interferências externas como alterações ambientais.

A análise das figuras 5.1 e 5.2 mostra que em geral não há grandes variações do valor da incerteza quando se modificam os parâmetros do sistema de aquisição. Entretanto, deve-se dar atenção na seleção da duração da aquisição (número de pontos e amostragem) do analisador de sinal e no ganho do filtro. Todos os ensaios, exceto o da amplitude de medição, foram realizados com a amplitude de 6 V e o máximo valor da incerteza foi de $1,87 \cdot 10^{-3}\text{ V}$ e no ensaio de amplitudes de medição foi de $2,86 \cdot 10^{-3}\text{ V}$ essa diferença decorre da combinação de incertezas entre os cinco níveis de tensão realizados no ensaio da amplitude. Com isso pode-se afirmar que, tomando como valor de incerteza o valor máximo encontrado nos ensaios, modificações dos parâmetros não alteram significativamente o valor da incerteza em regime quase-estático.

As figuras 5.3, 5.4 e 5.5 apresentam os resultados das análises em regime dinâmico para o estudo do sistema de aquisição 1. Para cálculo da incerteza utilizou-se o valor da calibração quase-estática igual a $2,86 \cdot 10^{-3}\text{ V}$. Os valores da incerteza apresentados representam o valor máximo dentro do intervalo indicado.

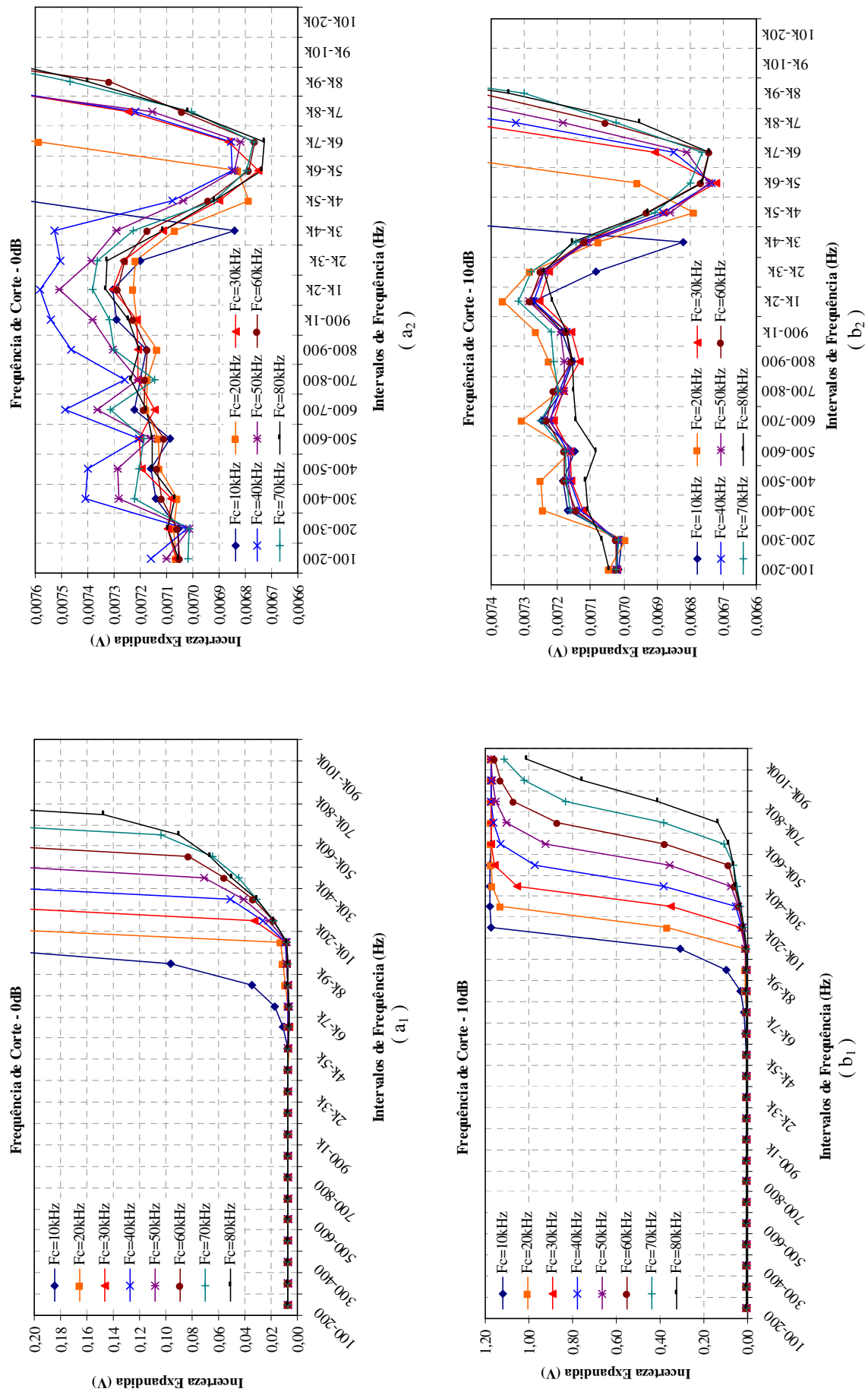


Figura 5.3 – Resultados para o sistema de aquisição 1 em regime dinâmico. Os gráficos a direita são a ampliação dos gráficos à esquerda.

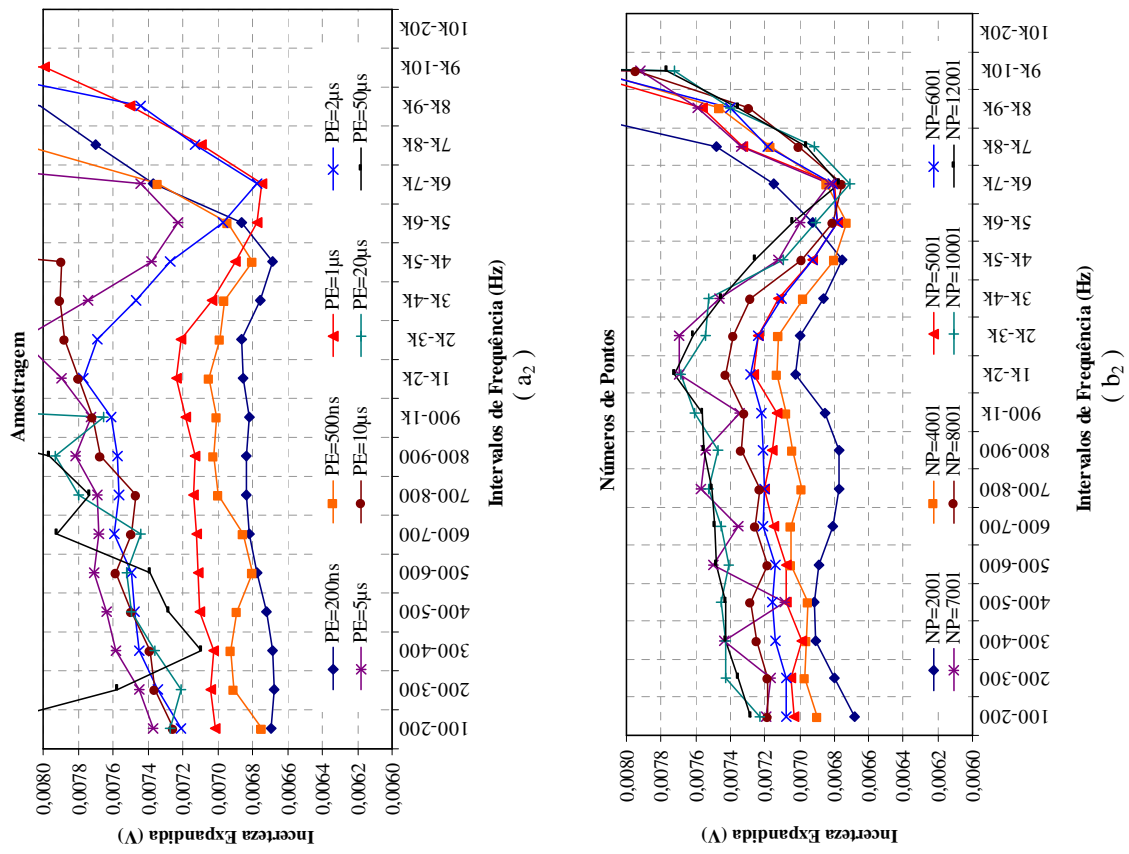
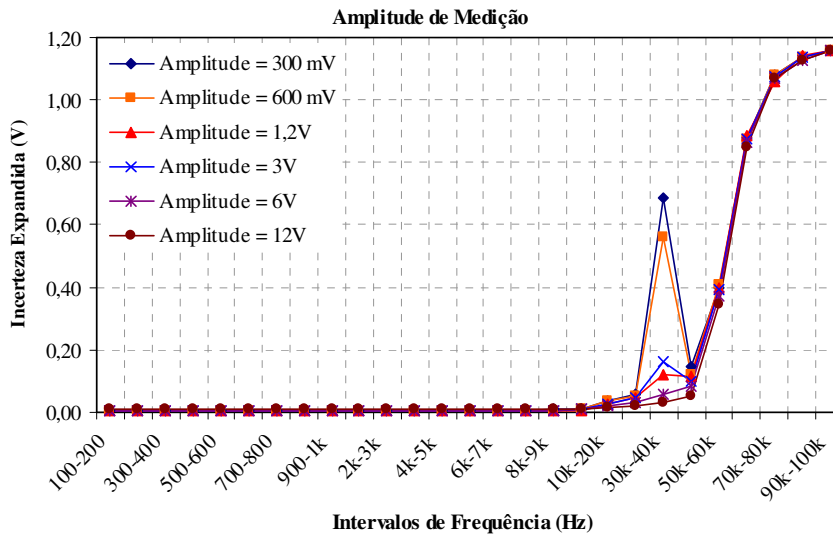
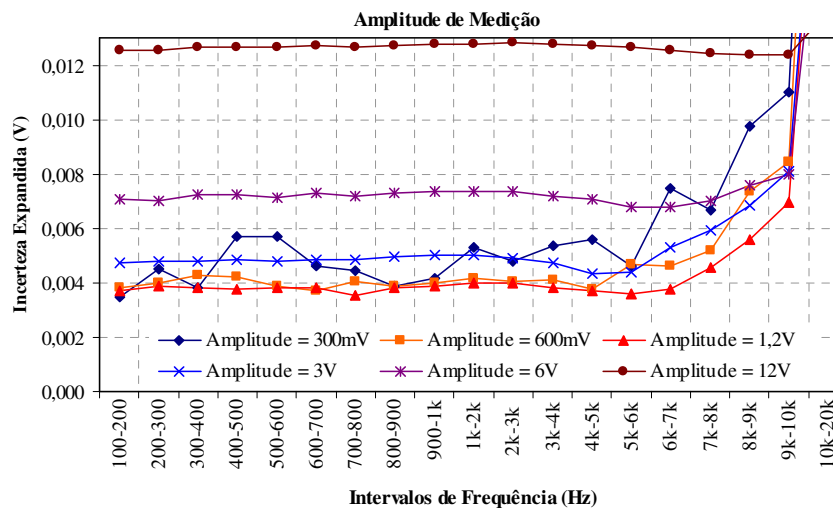


Figura 5.4 – Resultados para o sistema de aquisição 1 em regime dinâmico. Os gráficos a direita são a ampliação dos gráficos à esquerda.



(a₁)



(a₂)

Figura 5.5 – Resultados para o sistema de aquisição 1 em regime dinâmico. Os gráficos a direita são a ampliação dos gráficos à esquerda.

A análise das figuras 5.3, 5.4 e 5.5 mostra que a frequência de corte e duração da aquisição não interferem significativamente na incerteza, já a amplitude de medição é o parâmetro que quando variado apresenta uma variação significativa no valor da incerteza.

Para o estudo do sistema de aquisição 2, que é o sistema utilizado nas calibrações quase-estática e dinâmicas em altas e baixas pressões, utilizou-se as regulagens apresentadas na tabela 5.3. Observa-se que a quantidade de ensaios foi reduzida, pois, com base nos resultados do sistema 1, decidiu-se avaliar os pontos onde houve maiores variações da incerteza.

Tabela 5.3 – Parâmetros de análise do sistema de aquisição 2.

Elemento	Parâmetro em Teste	Parâmetros Fixos		Regime
Filtro	Frequência de Corte: <i>de 500 Hz a 60 kHz</i> (4 pontos)	Tipo de Filtro:	Bessel	Quase-estático
		Ganho:	<i>0 dB</i>	
		Nº de Pontos:	<i>12001</i>	
		Amplitude:	<i>4 V</i>	
		Amostragem:	<i>200 µs/ponto</i>	
Filtro	Frequência de Corte: <i>de 500 Hz a 60 kHz</i> (4 pontos)	Tipo de Filtro:	Bessel	Quase-estático
		Ganho:	<i>10 dB</i>	
		Nº de Pontos:	<i>12001</i>	
		Amplitude:	<i>4 V</i>	
		Amostragem:	<i>200 µs/ponto</i>	
Filtro	Frequência de Corte: <i>de 500 Hz a 60 kHz</i> (4 pontos)	Tipo de Filtro:	Butterworth	Quase-estático
		Ganho:	<i>0 dB</i>	
		Nº de Pontos:	<i>12001</i>	
		Amplitude:	<i>4 V</i>	
		Amostragem:	<i>200 µs/ponto</i>	
Filtro	Frequência de Corte: <i>de 500 Hz a 60 kHz</i> (4 pontos)	Tipo de Filtro:	Butterworth	Quase-estático
		Ganho:	<i>10 dB</i>	
		Nº de Pontos:	<i>12001</i>	
		Amplitude:	<i>4 V</i>	
		Amostragem:	<i>200 µs/ponto</i>	
Analisador de Sinal	Número de Pontos: <i>de 2001 a 24001</i> (5 pontos)	Tipo de Filtro:	Bessel	Quase-estático
		Ganho:	<i>0 dB</i>	
		Frequência de Corte:	<i>3 kHz</i>	
		Amplitude:	<i>4 V</i>	
		Amostragem:	<i>200 µs/ponto</i>	
Analisador de Sinal	Amostragem: <i>de 1 µs a 1 ms</i> (5 pontos)	Tipo de Filtro:	Bessel	Quase-estático
		Ganho:	<i>0 dB</i>	
		Frequência de Corte:	<i>3 kHz</i>	
		Amplitude:	<i>4 V</i>	
		Nº de Pontos:	<i>12001</i>	
Analisador de Sinal	Amplitude de Medição: <i>de 400 mV a 10V</i> (4 amplitudes)	Tipo de Filtro:	Bessel	Quase-estático
		Ganho:	<i>0 dB</i>	
		Frequência de Corte:	<i>3 kHz</i>	
		Nº de Pontos:	<i>6001</i>	
		Amostragem:	<i>200 µs/ponto</i>	
Filtro	Frequência de Corte: <i>de 10 kHz a 80 kHz</i> (4 pontos)	Tipo de Filtro:	Butterworth	Dinâmico
		Ganho:	<i>0 dB</i>	
		Nº de Pontos:	<i>6001</i>	
		Amplitude:	<i>4 V</i>	
		Amostragem:	<i>1 µs/ponto</i>	
Filtro	Frequência de Corte: <i>de 10 kHz a 80 kHz</i> (4 pontos)	Tipo de Filtro:	Butterworth	Dinâmico
		Ganho:	<i>10 dB</i>	
		Nº de Pontos:	<i>6001</i>	
		Amplitude:	<i>4 V</i>	
		Amostragem:	<i>1 µs/ponto</i>	

Tabela 5.3 – Parâmetros de análise do sistema de aquisição 2.

Elemento	Parâmetro em Teste	Parâmetros Fixos		Regime
Analisador de Sinal	Número de Pontos: de 2001 a 12001 (4 pontos)	Tipo de Filtro:	Butterworth	Dinâmico
		Ganho:	0 dB	
		Frequência de Corte:	60 kHz	
		Amplitude:	4 V	
		Amostragem:	1 μ s/ponto	
Analisador de Sinal	Amostragem: de 1 μ s a 100 μ s (4 pontos)	Tipo de Filtro:	Butterworth	Dinâmico
		Ganho:	0 dB	
		Frequência de Corte:	60 kHz	
		Amplitude:	4 V	
		Número de Pontos:	6001	
Analisador de Sinal	Amplitude de Medição: de 400 mV a 10V (4 amplitudes)	Tipo de Filtro:	Butterworth	Dinâmico
		Ganho:	0 dB	
		Frequência de Corte:	60 kHz	
		Amostragem:	1 μ s/ponto	
		Nº de Pontos:	6001	

As figuras 5.6 e 5.7 apresentam os resultados para os regimes quase-estático e dinâmico, respectivamente. Os valores de incerteza apresentados nas figuras 5.6, 5.7a, 5.7b e 5.7c são absolutos e na figura 5.7d é o valor em relação a amplitude de medição.

As figura 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam os resultados das análises em regime dinâmico para o estudo do sistema de aquisição 2. Para cálculo da incerteza utilizou-se a incerteza calculada na calibração quase-estática, que foi igual a $2,0 \cdot 10^{-3}$ V. Os valores da incerteza apresentados representam o valor máximo dentro do intervalo indicado.

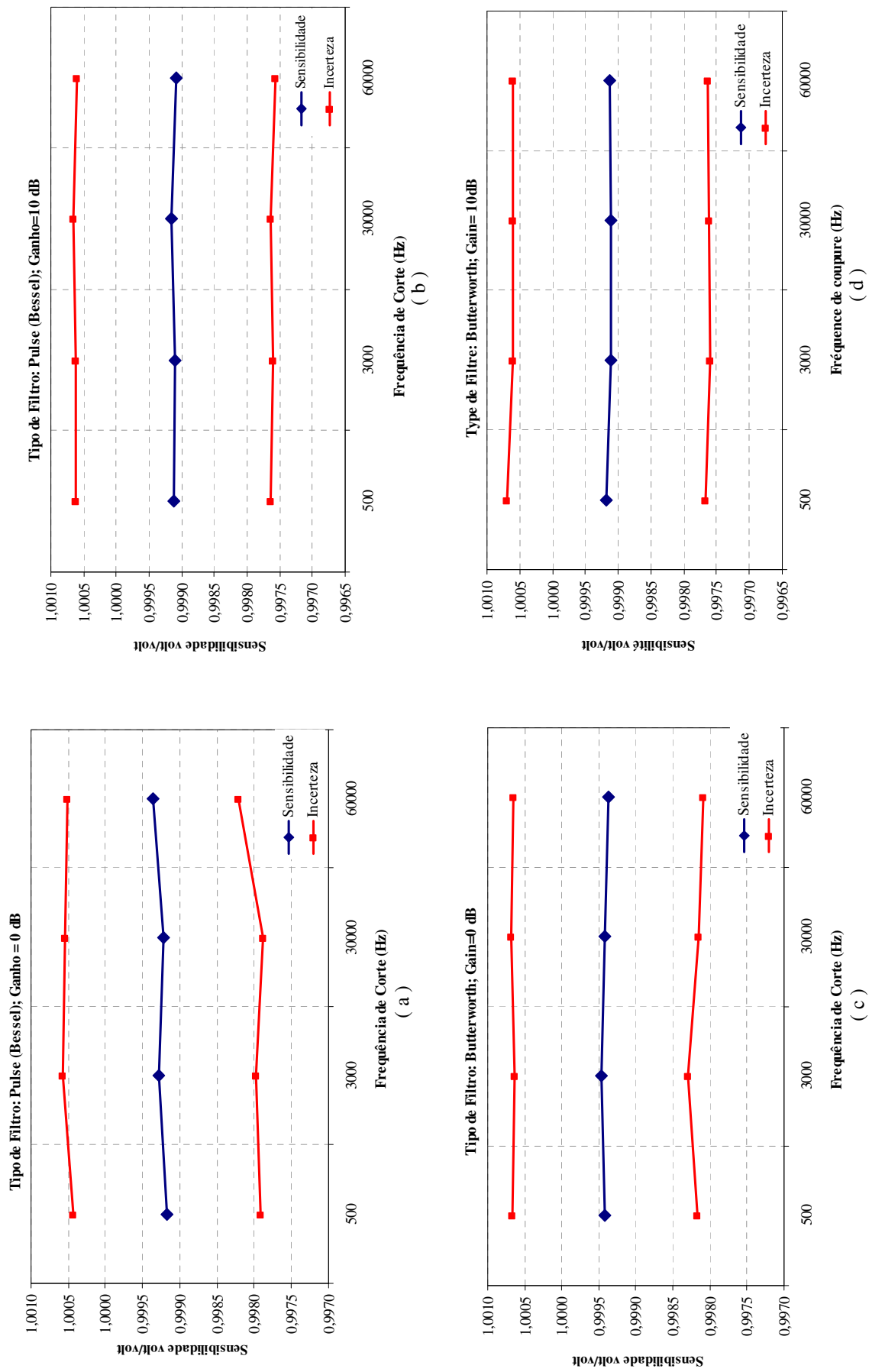


Figura 5.6 – Resultados da análise do sistema de aquisição 2 em regime quase-estático.

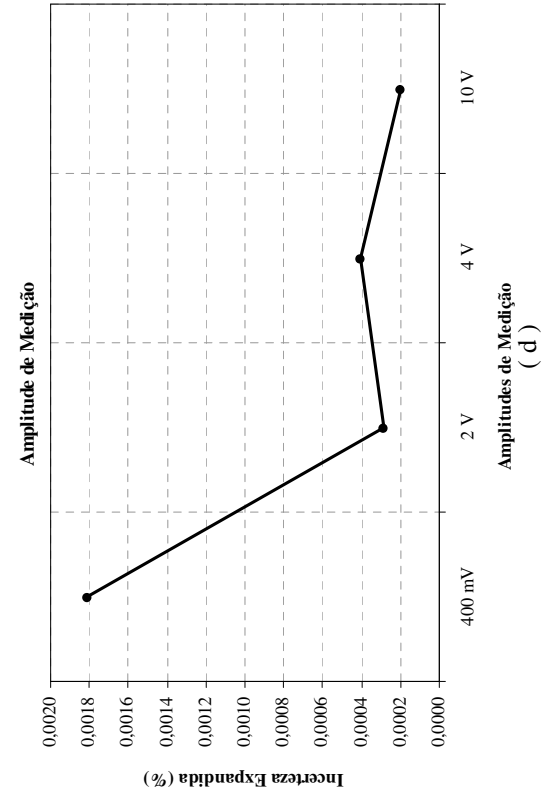
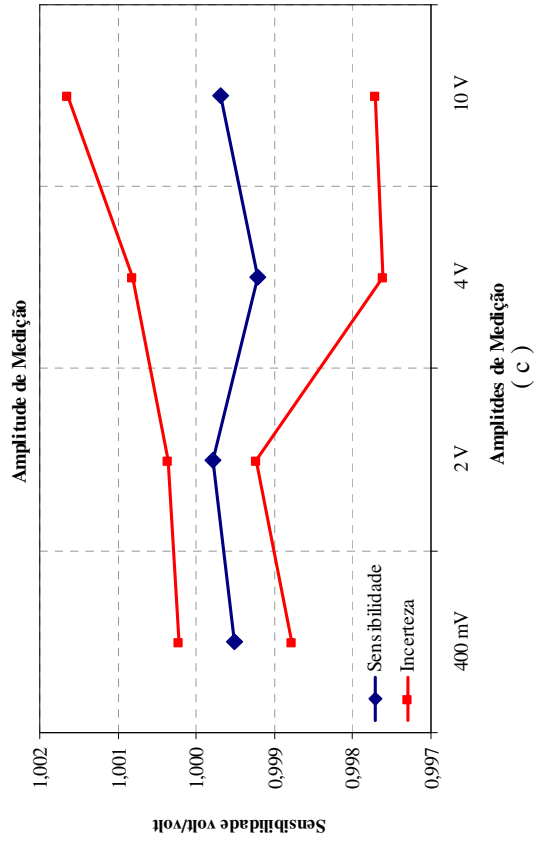
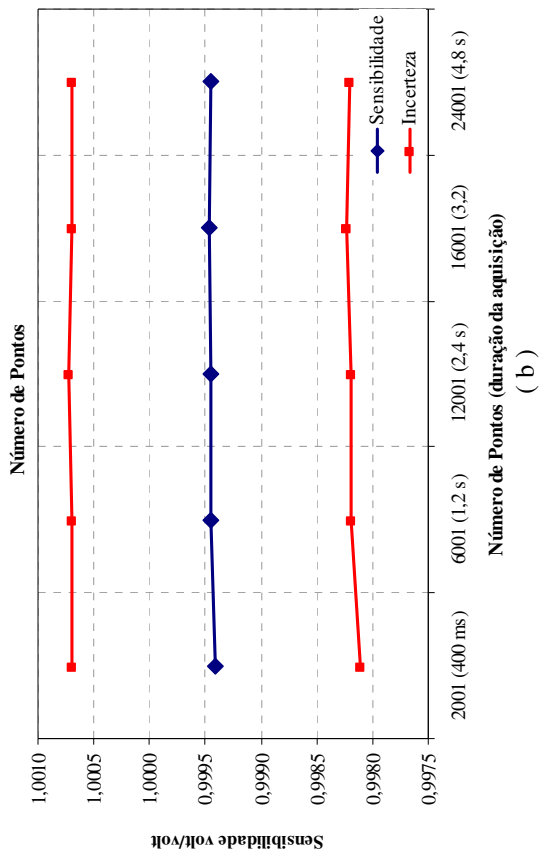


Figura 5.7 – Resultados da análise do sistema de aquisição 2 em regime quase-estático.

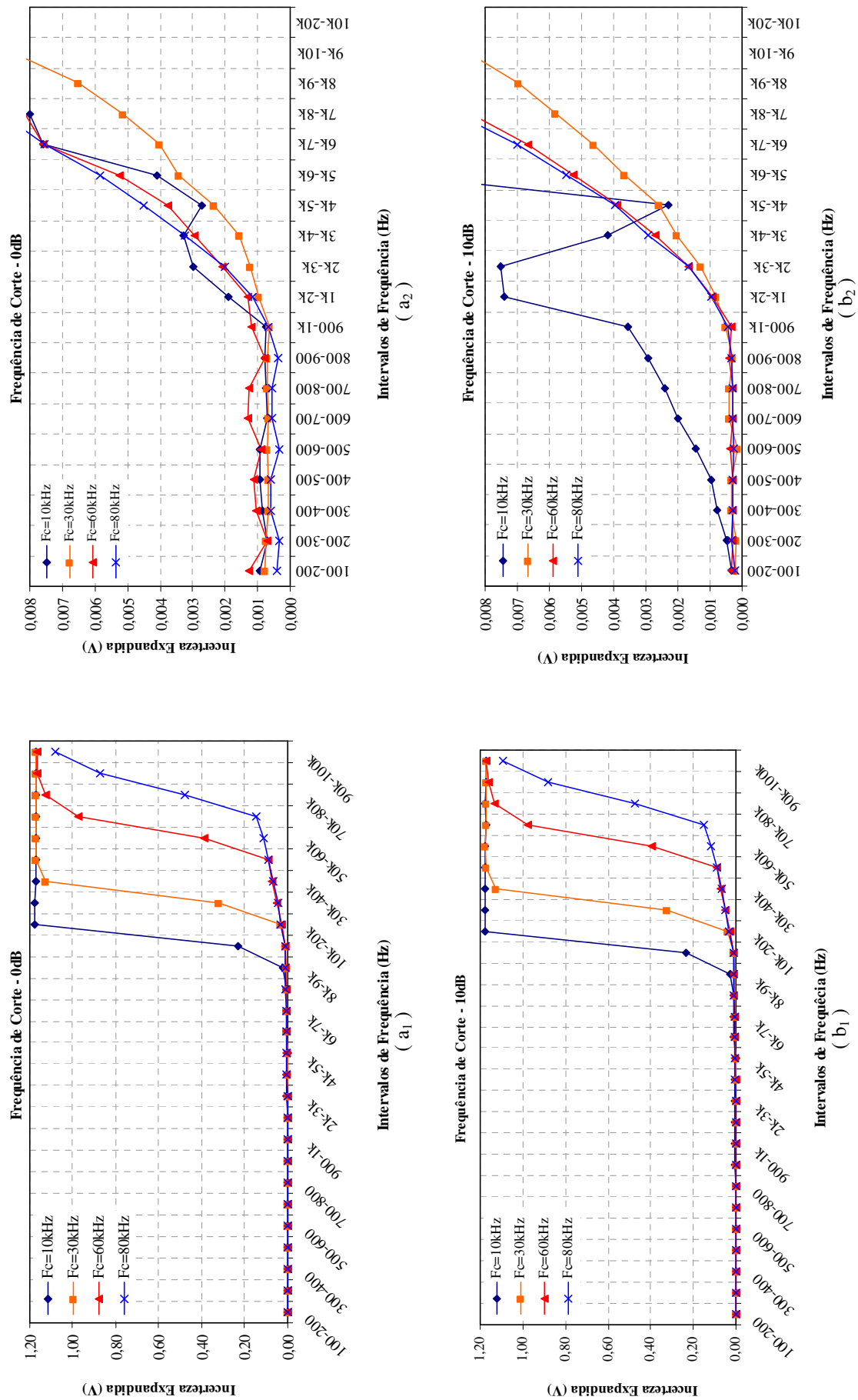


Figura 5.8 – Resultados para o sistema de aquisição 2 em regime dinâmico. Os gráficos a direita são a ampliação dos gráficos à esquerda.

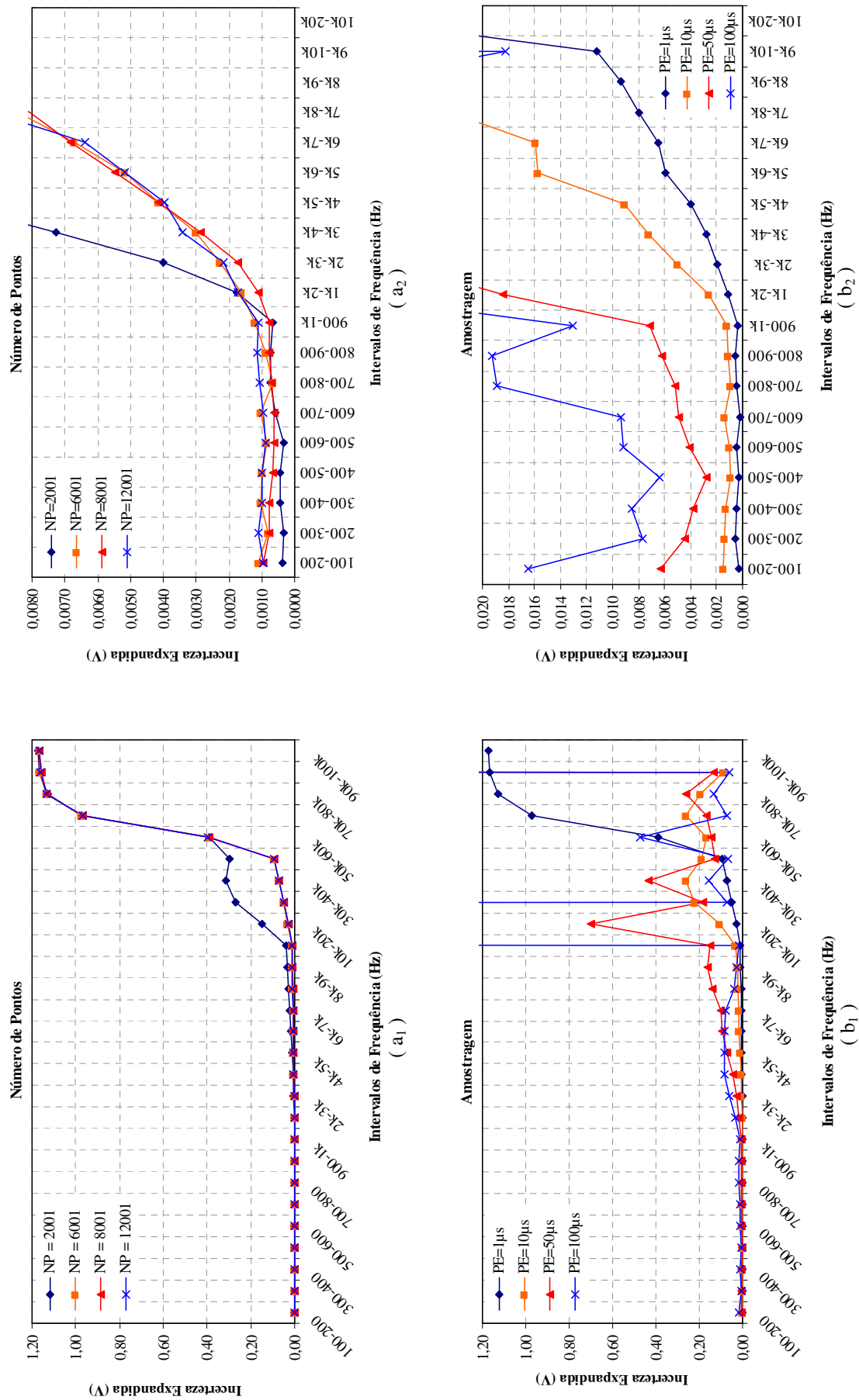
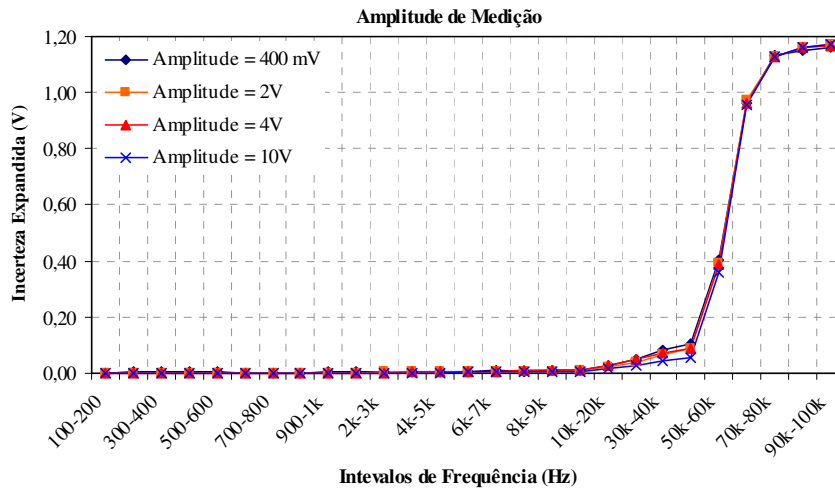
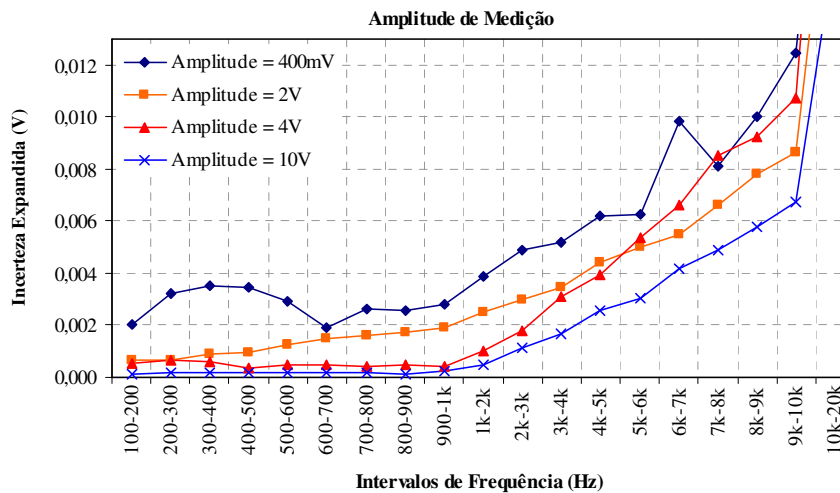


Figura 5.9 – Resultados para o sistema de aquisição 2 em regime dinâmico. Os gráficos a direita são a ampliação dos gráficos à esquerda.



(a₁)



(a₂)

Figura 5.10 – Resultados para o sistema de aquisição 2 em regime dinâmico. Os gráficos a direita são a ampliação dos gráficos a esquerda.

A análise do estudo do sistema 2 mostra um comportamento semelhante ao do sistema 1. Entretanto, no regime quase-estático, em geral, a incerteza, em valores absolutos, é menor que no sistema 1 ($2,0 \cdot 10^{-3} V$ para no ensaio da amplitude medição e $1,5 \cdot 10^{-3} V$ para os outros parâmetros). A análise do número de pontos e da amostragem, que definem a duração do degrau, mostra que o sistema 2 é menos sensível às variações desses parâmetros.

Em regime dinâmico, o sistema 2 tem um comportamento mais uniforme quando se varia a frequência de corte. Com relação ao número de pontos e a amostragem observa-se que há uma dispersão maior quando a duração do degrau cresce. Em relação à amplitude de medição observam-se os mesmos efeitos já discutidos na análise do sistema 1.

Os mesmos testes realizados com o sistema de aquisição 1 (parâmetros e pontos de medição) foram realizados com o sistema de aquisição 3. Entretanto, o filtro teve que ser substituído e os estudos refeitos, mas o filtro substituído apresentou falhas impossibilitando, assim, o seu uso. Dessa forma, optou-se por realizar os ensaios, em tensão e em pressão, sem filtragem. Com isso, não realizou-se o estudo completo do sistema 3, com isso, utilizou-se a calibração quase-estática e dinâmica, foram realizadas com as mesmas configurações dos ensaios em pressão, ou seja a primeira abordagem.

Com os estudos dos sistemas de aquisição conclui-se que, em geral, a variação da incerteza é pequena, entretanto em algumas configurações essa variação é mais significativa. Do ponto de vista das duas abordagens discutidas no início do tópico, observa-se que após o estudo dos sistemas é possível estabelecer uma incerteza quase-estática e uma dinâmica que poderão ser utilizadas em processos de calibrações dinâmicas em pressão sem que seja necessário refazer a calibração do sistema de aquisição, quando se altera os parâmetros de ensaio.

5.2 CALIBRAÇÃO QUASE-ESTÁTICA EM TENSÃO

O objetivo desse trabalho é a calibração de um transdutor de referência. Dessa forma, tomando como base os resultados apresentados no tópico anterior e considerando que para a calibração de um transdutor de transferência deve-se buscar a melhor montagem que possibilite uma redução das fontes de incerteza.

Baseando-se nos resultados apresentados no tópico 4.1 os sistemas de aquisições utilizados para a calibração dinâmica do transdutor de referência foram o sistema 2 para os ensaios realizados no LMD-ENSAM/Paris e o sistema 3 (sem o filtro) para os ensaios no LMD-UnB. Dessa forma, a calibração quase-estática do sistema de aquisição 2 foi realizada com as configurações:

- Número de pontos: *12001 pontos*;
- Amostragem: *200 μ s*;
- Amplitude de Medição: *10 V*;
- Frequência de Corte: *3 kHz*;
- Tipo de Filtro: Bessel;
- Ganho = *0 dB*.

A calibração quase-estática do sistema de aquisição 3 (LMD-UnB) foi realizada com as configurações:

- Número de pontos: *12001 pontos*;
- Amostragem: *200 μ s*;
- Amplitude de Medição: *8 V*;

As tabelas 5.4 e 5.5 apresentam os resultados da calibração quase-estática em tensão para o sistema de aquisição 2 (LMD-ENSAM). E a figura 5.11 mostra o gráfico com peso de cada fonte de incerteza.

Tabela 5.4 – Resultado da Calibração Quase-estática do sistema de aquisição 2.

Sistema 2		
Sensibilidade Quase-estática:		
<i>S = 0,9997 V/V</i>		
Características Metrológicas:		
Desvio-Padrão Máximo:	0,0010	V
Desvio Máximo:	0,0018	V
Incerteza Expandida:	0,0017	V
Incerteza Expandida:	0,02	%
Fator de Abrangência:	2,16	
Amplitude de Calibração:	10	V

Tabela 5.5 – Tabela de Fontes de Incertezas da calibração quase-estática do sistema de aquisição 2 (LMD-ENSAM).

Amplitude de Medição: 10 V

Fonte de Incerteza	Valor	Dist. Prob.	Div.	Sens.	Incrt.	G. Lib.	Peso
Incerteza do Multímetro (TIPO B1)	1,70E-04	Normal	2,00	1,000	1,20E-04	inf.	1,61
Desvio (TIPO B2)	1,79E-03	Triângulo Retângulo	4,24	1,000	4,22E-04	inf.	19,82
Deriva Temporal (TIPO B3)	3,50E-04	Retângulo	1,73	1,000	2,02E-04	inf.	4,54
Resolução do Multímetro (TIPO B4)	0,0001	Retângulo	3,46	1,000	4,08E-05	inf.	0,19
Arredondamento (TIPO B5)	1,00E-04	Retângulo	3,46	1,000	4,08E-05	inf.	0,19
Flutuação (TIPO B6)	9,00E-04	Normal	2,00	1,000	6,36E-04	inf.	44,98
Repetitividade (TIPO A1)	1,02E-03		2,00	1,000	5,08E-04	3	28,69
Incerteza Combinada		Normal	FA	1,000	7,92E-04	17	
Incerteza Expandida		Normal	2,000		1,71E-03		100

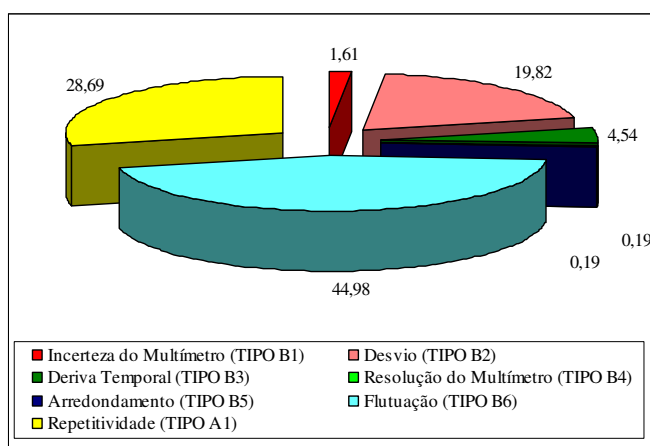


Figura 5.11 – Resultado com os pesos de cada fonte de incerteza da calibração quase-estática em tensão do sistema de aquisição 2 (LMD-ENSAM).

As Tabelas 5.6 e 5.7 mostram os resultados da calibração quase-estática em tensão para o sistema de aquisição 3 (LMD-UnB). E a figura 5.12 mostra o gráfico com peso de cada fonte de incerteza.

Tabela 5.6 – Resultado da Calibração Quase-estática do sistema de aquisição 3.

Sistema 3		
Sensibilidade Quase-estática:		
$S = 0,9985 V/V$		
Características Metrológicas:		
Desvio-Padrão Máximo:	0,0008	V
Desvio Máximo:	0,0093	V
Incerteza Expandida:	0,0044	V
Incerteza Expandida:	0,06	%
Fator de Abrangência:	2,00	
Amplitude de Calibração:	8	V

Tabela 5.7 – Tabela de Fontes de Incertezas da calibração quase-estática do sistema de aquisição 3 (LMD-UnB).

Amplitude de Medição: 8 V

Fonte de Incerteza	Valor	Dist. Prob.	Div.	Sens.	Incert.	G. Lib.	Peso
Incerteza do Multímetro (TIPO B1)	3,80E-04	Normal	2,00	1,000	2,69E-04	inf.	1,41
Desvio (TIPO B2)	9,31E-03	Triângulo Retângulo	4,24	1,000	2,19E-03	inf.	94,18
Deriva Temporal (TIPO B3)	3,50E-04	Retângulo	1,73	1,000	2,02E-04	inf.	0,80
Resolução do Multímetro (TIPO B4)	0,0001	Retângulo	3,46	1,000	4,08E-05	inf.	0,03
Arredondamento (TIPO B5)	1,00E-04	Retângulo	3,46	1,000	4,08E-05	inf.	0,03
Flutuação (TIPO B6)	2,00E-04	Normal	2,00	1,000	1,41E-04	inf.	0,39
Repetitividade (TIPO A1)	8,04E-04		2,00	1,000	4,02E-04	3	3,16
Incerteza Combinada		Normal	FA	1,000	2,21E-03	2742	100
Incerteza Expandida		Normal	2,000		4,42E-03		

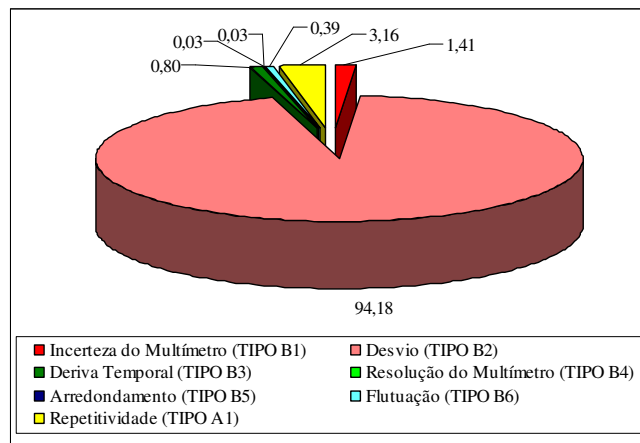


Figura 5.12 – Resultado com os pesos de cada fonte de incerteza da calibração quase-estática em tensão do sistema de aquisição 3 (LMD-UnB).

A análise dos resultados apresentados acima mostram as diferenças de desempenho entre os sistemas de aquisição. Em termos do valor da incerteza o sistema 2 tem um valor menor que o sistema 3 e observa-se que no primeiro as contribuições à incerteza estão distribuídos de forma mais uniforme entre as fontes de incerteza, já no sistema 3 há uma contribuição predominante do desvio, que a diferença entre o valor medido e o valor de referência. Essa concentração no sistema 3 acontece devido à ausência do filtro e perturbações da rede elétrica que afetam o desempenho dos equipamentos de medição.

5.3 CALIBRAÇÃO DINÂMICA EM TENSÃO

Conforme a descrição do capítulo anterior, a calibração dinâmica em tensão é dividida em três etapas: baixas, médias e altas frequências. Devido aos dispositivos disponíveis em cada um dos laboratórios, no LMD-ENSAM/Paris foram realizadas as calibrações em baixas e altas frequências e no LMD-UnB a calibração em médias frequências. Abaixo se apresentam as configurações de calibração para cada uma das etapas.

1. Baixas Frequências

- Número de pontos: *10001 pontos*;
- Amostragem: *200 μ s*;
- Amplitude de Medição: *10 V*;
- Frequência de Corte: *3 kHz*; Tipo de Filtro: Butterworth; Ganho = *0 dB*.

2. Médias Frequências

- Número de pontos: *12001 pontos*;
- Amostragem: *5 μ s*;
- Amplitude de Medição: *8 V*.

3. Altas Frequências

- Número de pontos: *6001 pontos*;
- Amostragem: *1 μ s*;
- Amplitude de Medição: *8V*;
- Frequência de Corte: *60 kHz*; Tipo de Filtro: Butterworth; Ganho = *0 dB*.

A figura 5.13 mostra a função de transferência para a calibração dinâmica em tensão em baixas frequências e a tabela 5.8 apresenta o exemplo de uma tabela de fontes de incerteza.

Tabela 5.8 – Tabela de Fontes de Incertezas da calibração dinâmica em baixas frequências do sistema de aquisição 2 (LMD-ENSAM).

Frequência 50 Hz		Amplitude: 10 V					
Fonte de Incerteza	Valor (V)	Dist. Prob.	Div.	Sens.	Incert. (V)	G. Lib.	Peso
Função de Transferência - Tipo B1	1,15E-07	Rectang.	1,7	1	6,65E-08	inf.	5,52
EDYCAP - Tipo B2	0,01	Normal	2	1	0,0050	inf.	0,00
Incerteza Quase-estática em Tension - Tipo B3	0,0017	Normal	2,0	1	0,0012	inf.	94,47
Repetitividade	0,0001		2,0	1	0,0001	3	0,01
Incerteza Combinada		Normal	FA	1	0,0051	16228	100,00
Incerteza Expandida		Normal	2,0		0,0103		

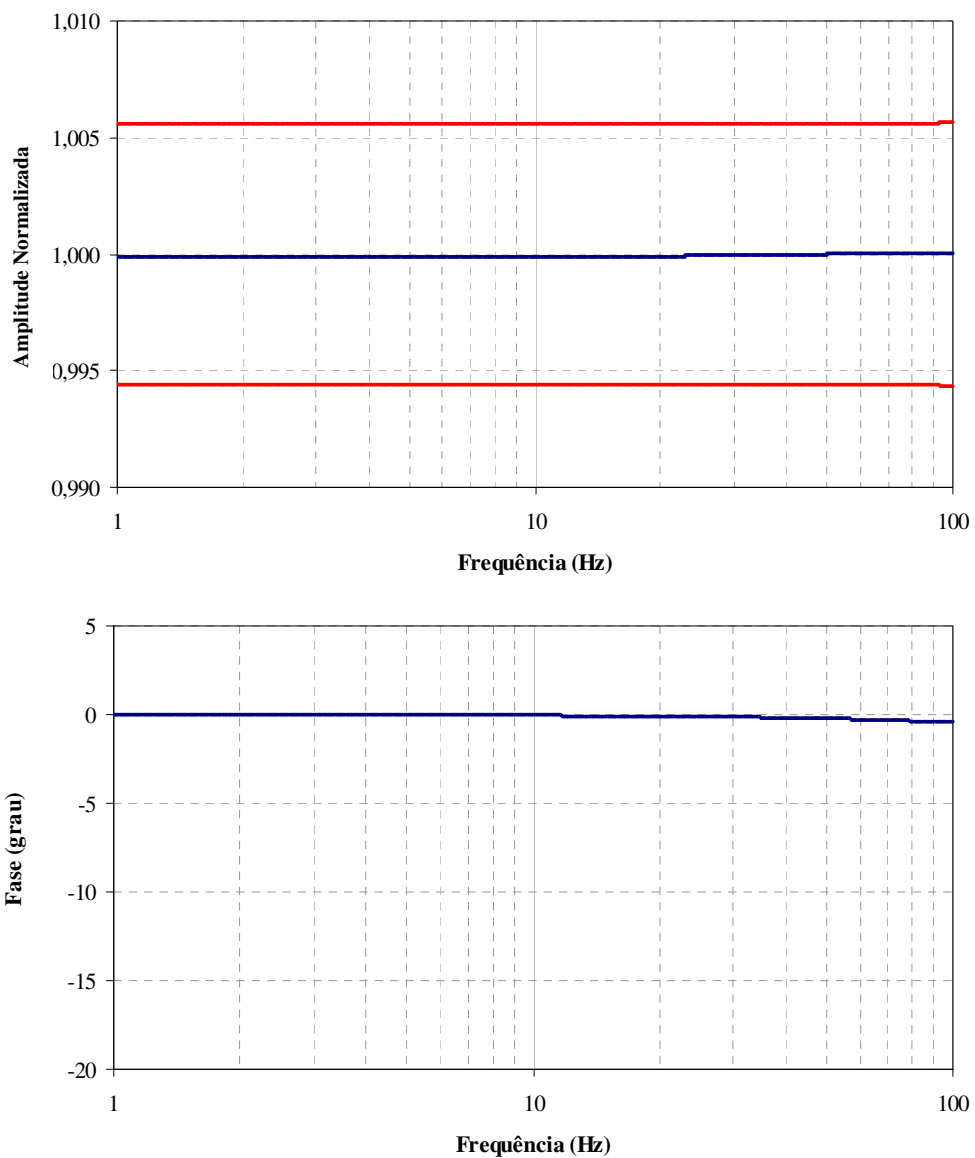


Figura 5.13 – Função de transferência do sistema de aquisição 2 (baixas frequências).

A figura 5.14 mostra a função de transferência para a calibração dinâmica em tensão em médias frequências e a tabela 5.9 apresenta o exemplo de uma tabela de fontes de incerteza.

Tabela 5.9 – Tabela de Fontes de Incertezas da calibração dinâmica em médias frequências do sistema de aquisição 3 (LMD-UnB).

Frequência 100 Hz		Amplitude: 8 V					
Fonte de Incerteza	Valor (V)	Dist. Prob.	Div.	Sens.	Incert. (V)	G. Lib.	Peso
Função de Transferência - Tipo B1	0,0011	Rectang.	1,7	1	0,0007	inf.	1,65
EDYCAP - Tipo B2	0,0080	Normal	2	1	0,0040	inf.	61,04
Incerteza Quase-estática em Tension - Tipo B3	0,0044	Normal	2,0	1	0,0031	inf.	37,25
Repetitividade	0,0002		2,0	1	0,0001	3	0,05
Incerteza Combinada		Normal	FA	1	0,0051	1E+09	100,00
Incerteza Expandida		Normal	2,0		0,0102		

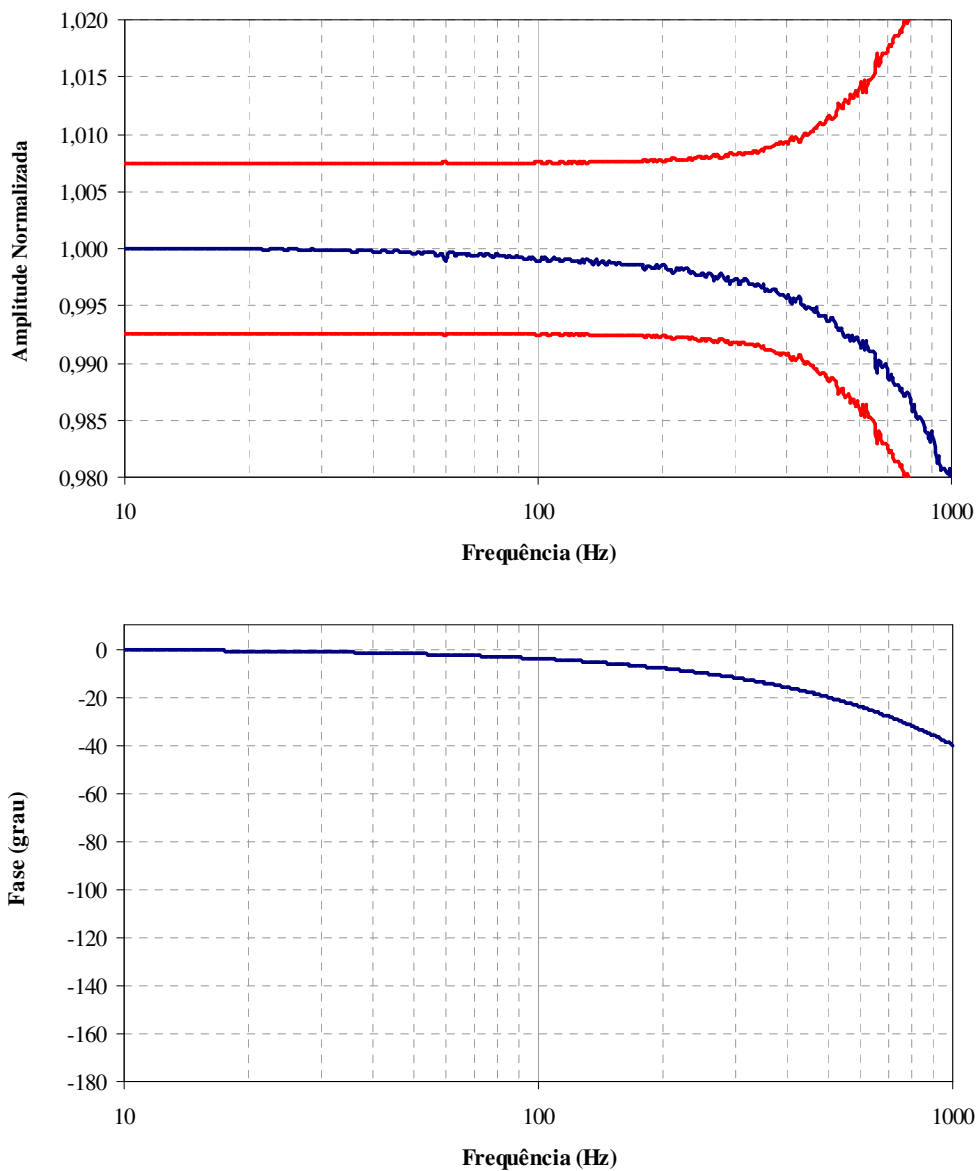


Figura 5.14 – Função de transferência do sistema de aquisição 3 (em médias frequências).

A figura 5.15 mostra a função de transferência para a calibração dinâmica em tensão em altas frequências e a tabela 5.10 apresenta o exemplo de uma tabela de fontes de incerteza.

Tabela 5.10 – Tabela de Fonte de Incertezas da calibração dinâmica em altas frequências do sistema de aquisição 2 (LMD-ENSAM).

Frequência 1000 Hz		Amplitude: 10 V					
Fonte de Incerteza	Valor (V)	Dist. Prob.	Div.	Sens.	Incert. (V)	G. Lib.	Peso
Função de Transferência - Tipo B1	0,0002	Rectang.	1,7	1	0,0001	inf.	0,03
EDYCAP - Tipo B2	0,0100	Normal	2	1	0,0050	inf.	94,41
Incerteza Quase-estática em Tension - Tipo B3	0,0017	Normal	2,0	1	0,0012	inf.	5,52
Repetitividade	0,0002		2,0	1	0,0001	3	0,04
Incerteza Combinada		Normal	FA	1	0,0051	539204	100,00
Incerteza Expandida		Normal	2,0		0,0103		

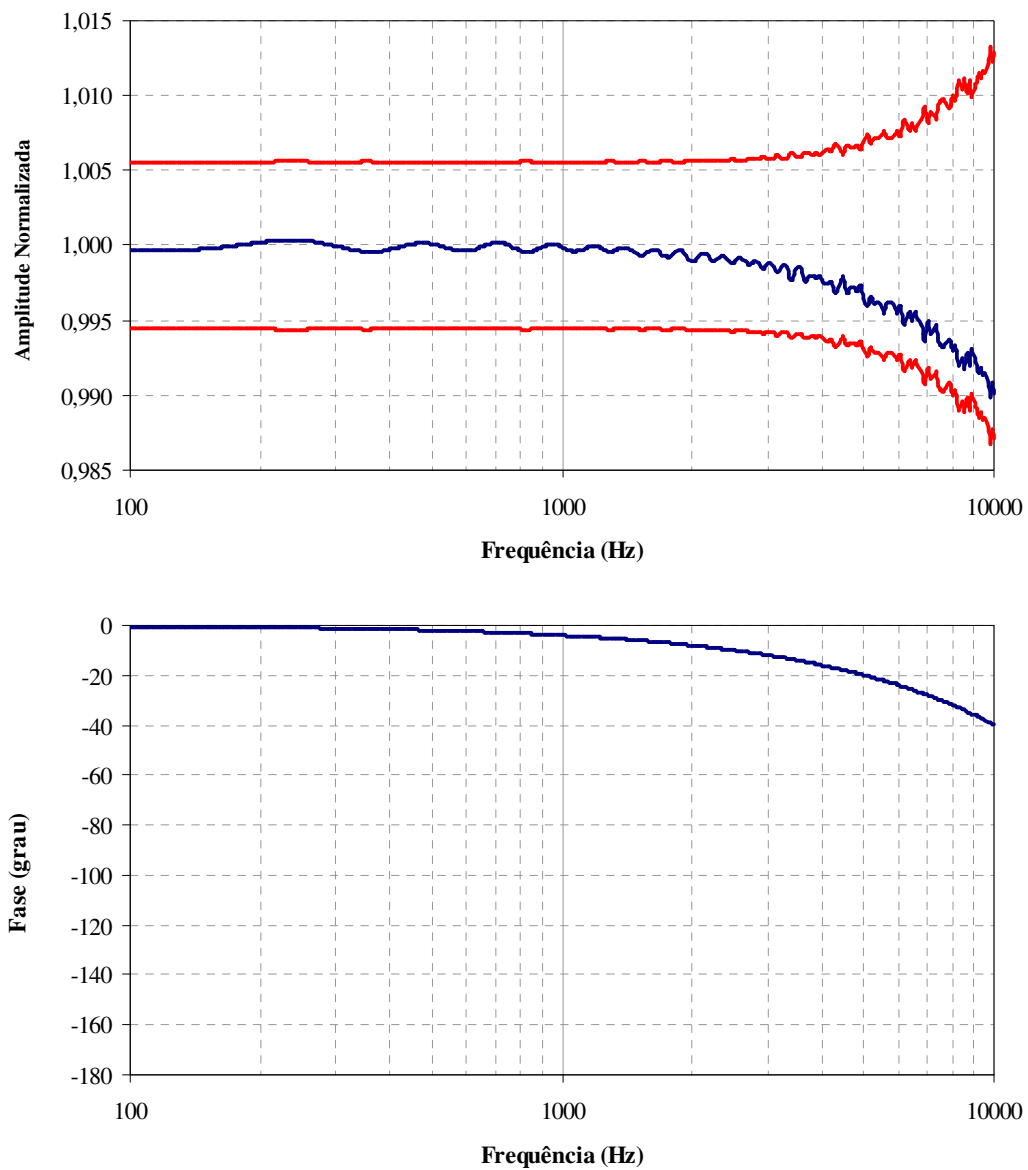


Figura 5.15 – Função de transferência do sistema de aquisição 2 (altas frequências).

5.4 CALIBRAÇÃO QUASE-ESTÁTICA EM PRESSÃO

Para avaliar a evolução da incerteza com o aumento da amplitude de medição realizou-se a calibração quase-estática para diversas amplitudes (0,1 MPa a 5 MPa - 1 a 50 bar). Dessa forma, para melhor avaliar o comportamento da incerteza foram realizados ensaios com quatro transdutores diferentes. As figuras 5.16 e 5.17 apresentam os resultados dessa avaliação.

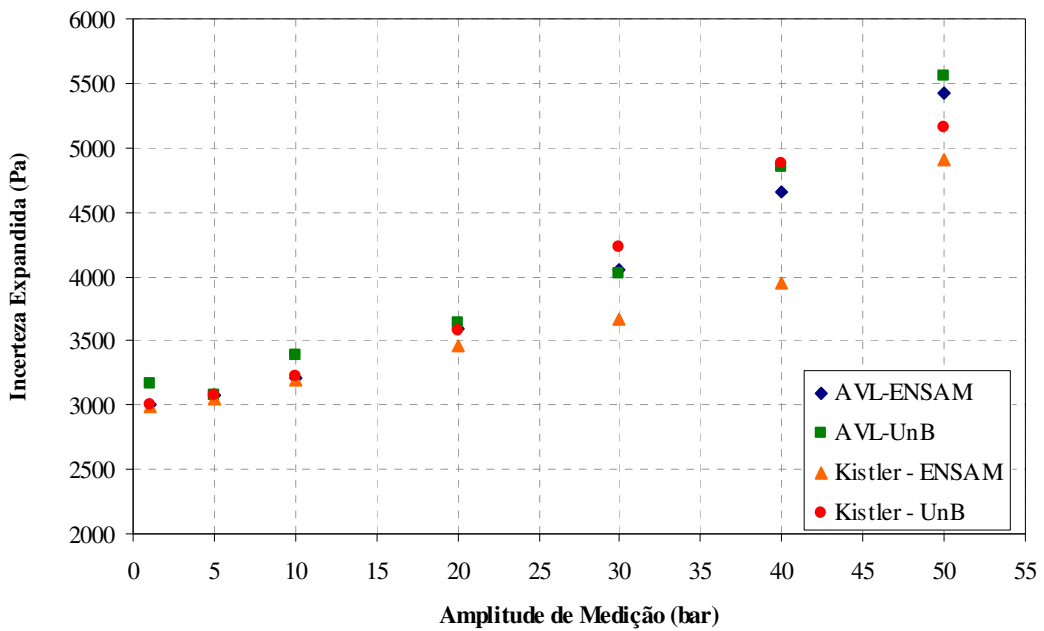


Figura 5.16 – Evolução do valor da incerteza na calibração quase estática em pressão.

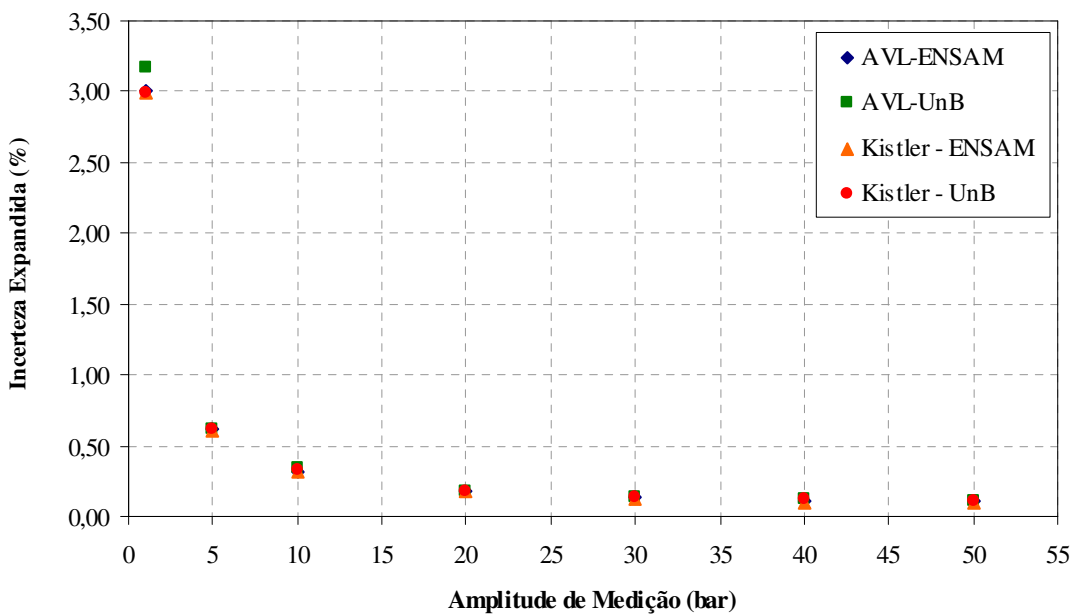


Figura 5.17 – Evolução da incerteza na calibração quase estática em pressão.

A figura 5.16 mostra que o comportamento do valor da incerteza se aproxima do linear. A figura 5.17 apresenta a evolução da incerteza quando analisada em porcentagem da amplitude, onde se observa valores decrescentes até uma estabilização em um valor constante. Nos ensaios apresentados, utilizou-se o mesmo transdutor de referência, dessa forma, em baixas amplitudes o valor da incerteza apresentada no certificado é mais significativo. Os resultados dessa análise mostram que o método de calibração quase-estática em pressão é adequado para calibrações em altas e baixas pressões. Entretanto, vale ressaltar que se deve usar o transdutor de referência (rastreado a referência nacional) mais adequado ao nível de pressão de trabalho.

Após essa primeira análise, realizou-se a calibração quase-estática do transdutor de pressão a calibrar. A Tabela 5.11 apresenta uma compilação dos resultados desse transdutor para as amplitudes de medição. A figura 5.18 apresenta a evolução da sua incerteza.

Tabela 5.11 – Resultados da calibração quase-estática em pressão.

Amplitude de Pressão (bar)	Sensibilidade (Pa/V)	Incerteza Expandida (Pa)	Incerteza Expandida (%)
1	10984	2989	2,99
5	54667	3053	0,61
10	110468	3196	0,32
20	220560	3468	0,17
30	330696	3661	0,12
40	440062	3950	0,10
50	550073	4906	0,10

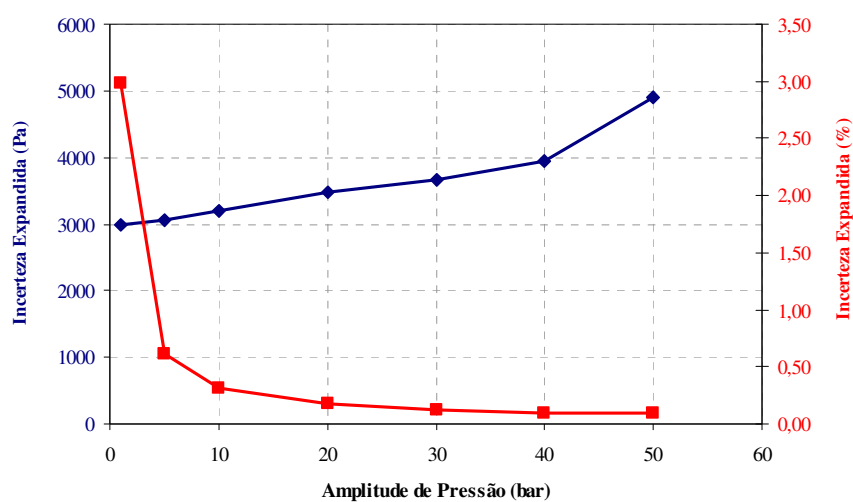


Figura 5.18 – Evolução da incerteza na calibração quase estática em pressão.

5.5 CALIBRAÇÃO DINÂMICA EM PRESSÃO

A evolução da incerteza em função da amplitude de medição também foi avaliada em regime dinâmico, mas nesse caso os ensaios foram realizados com apenas um transdutor e devido aos limites de trabalho dos dispositivos realizou-se a avaliação da evolução da incerteza para amplitudes de 1 a 30 bar.

5.5.1 DAR – Baixas Frequências

Inicialmente, os ensaios em baixas frequências foram realizados utilizando o ar industrial comprimido. Mas os resultados apresentados mostraram que os limites superiores em frequência não permitiam uma comparação adequada com as médias frequências. Isso ocorreu devido à velocidade abertura do sistema de comunicação entre as câmaras. Com isso, repetiram-se os ensaios utilizando o hélio, pois devido a sua massa específica ser bem menor que a do ar, há uma redução do tempo de subida e, conseqüentemente, a influência da velocidade de acionamento do sistema de comunicação torna-se menos significativa. As figuras 5.19 e 5.20 apresentam a comparação entre as funções de transferência dos ensaios com ar e com hélio para a pressão para as amplitudes de 1 a 30 bar. Os ensaios foram realizados com degraus positivos de amplitude igual à diferença entre a amplitude de medição do transdutor e a pressão atmosférica.

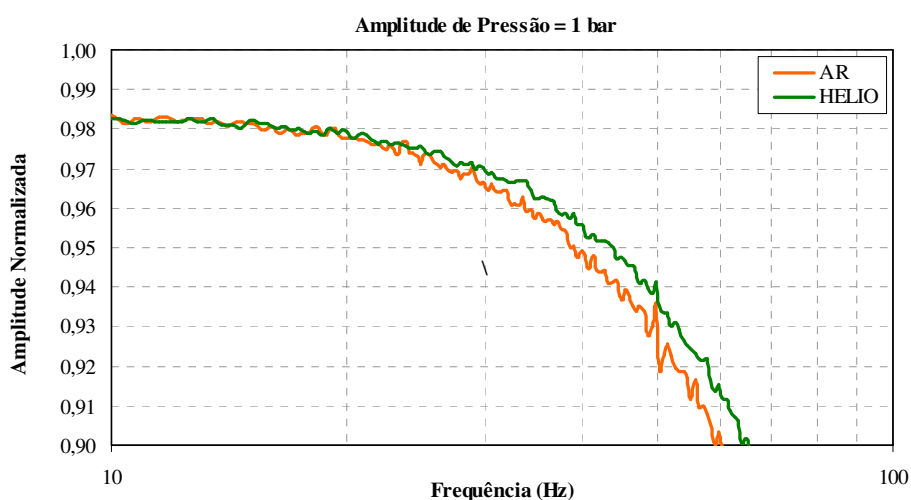


Figura 5.19 – Comparação entre os ensaios com e Ar Industrial e com Hélio.

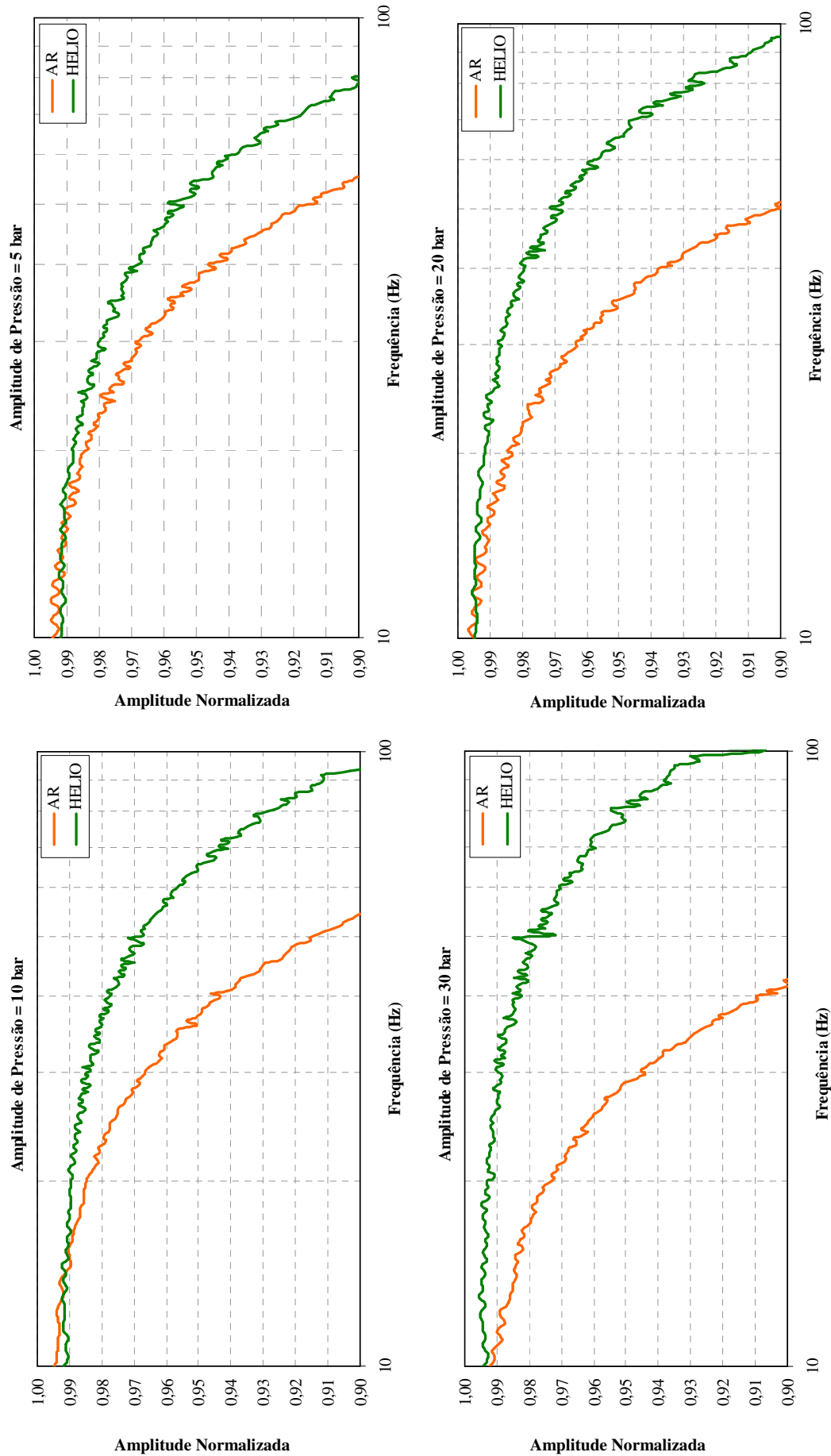


Figura 5.20 – Comparação entre os ensaios com e Ar Industrial e com Hélio.

Analisando as figuras 5.19 e 5.20 observa-se que a influência do tipo de gás fica mais significativa com o aumento da amplitude de medição e que os ensaios com hélio apresentam um limite superior em frequência maior. As figuras 5.21, 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25 apresentam a função de transferência e a incerteza para as amplitudes de pressão: 1, 5, 10, 20 e 30 bar.

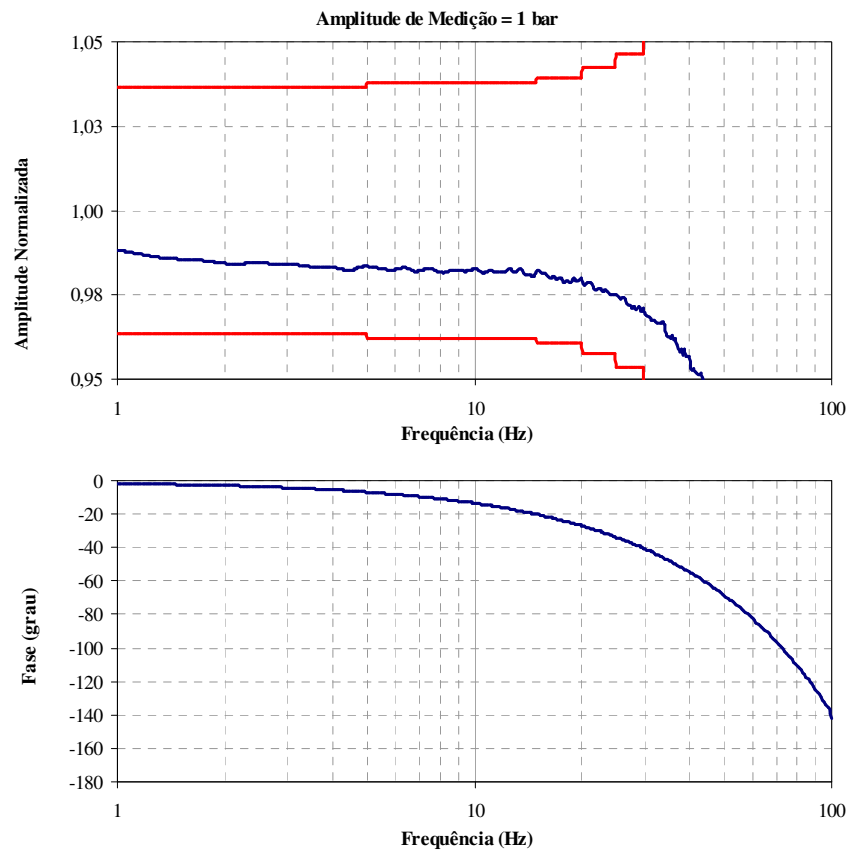


Figura 5.21 – Funções de transferência em baixas frequências (amplitude de 1 bar).

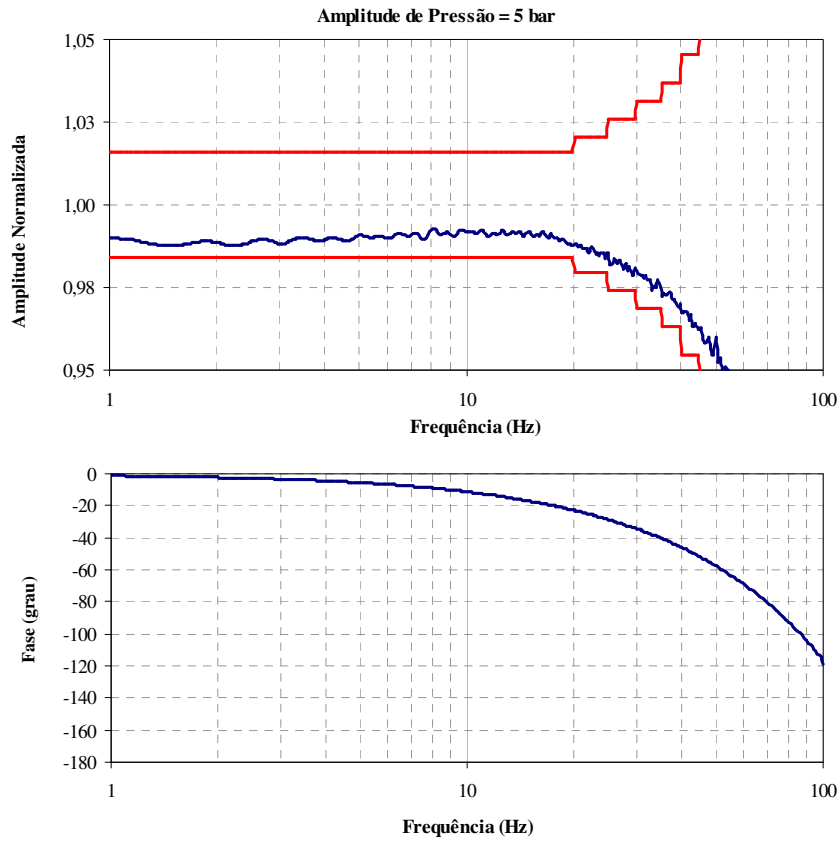


Figura 5.22 – Funções de transferência em baixas frequências (amplitude de 5 bar).

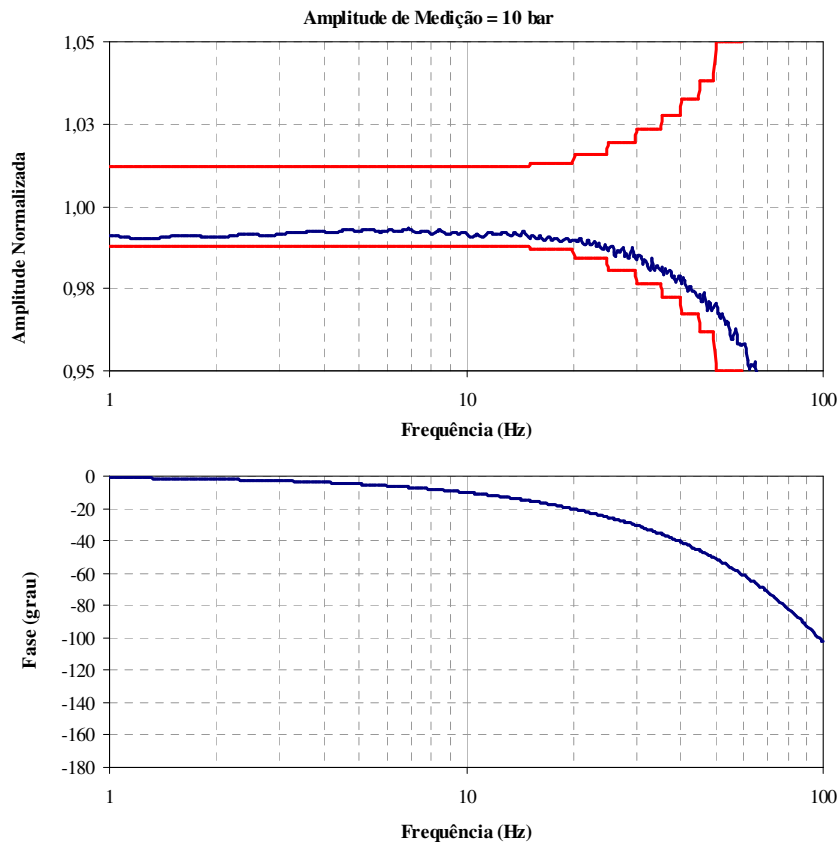


Figura 5.23 – Funções de transferência em baixas frequências (amplitude de 10 bar).

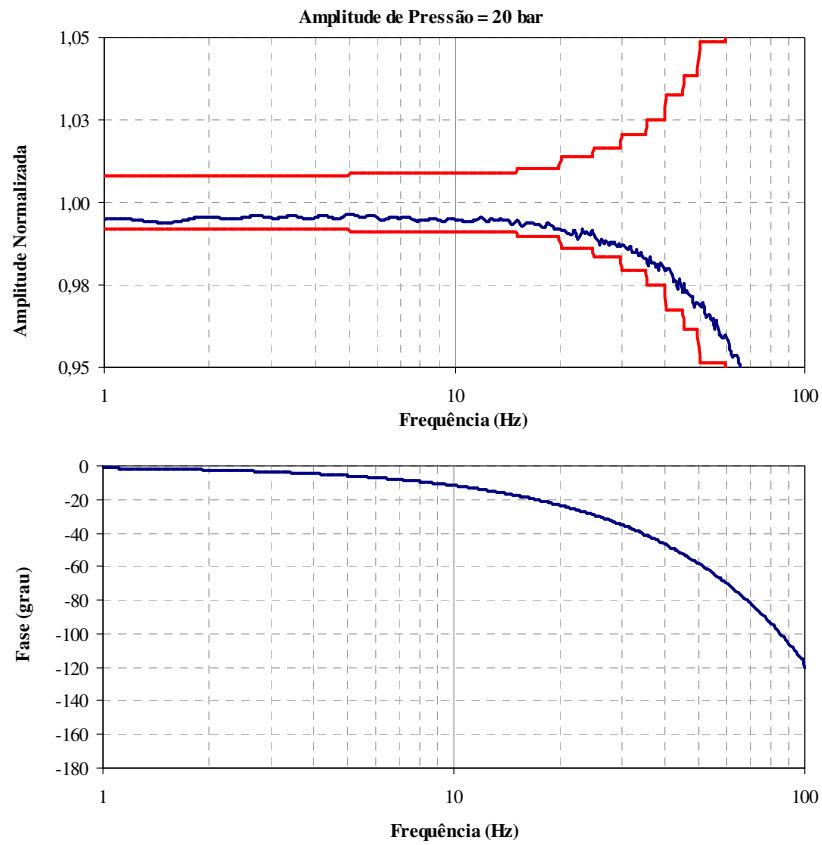


Figura 5.24 – Funções de transferência em baixas frequências (amplitude de 20 bar).

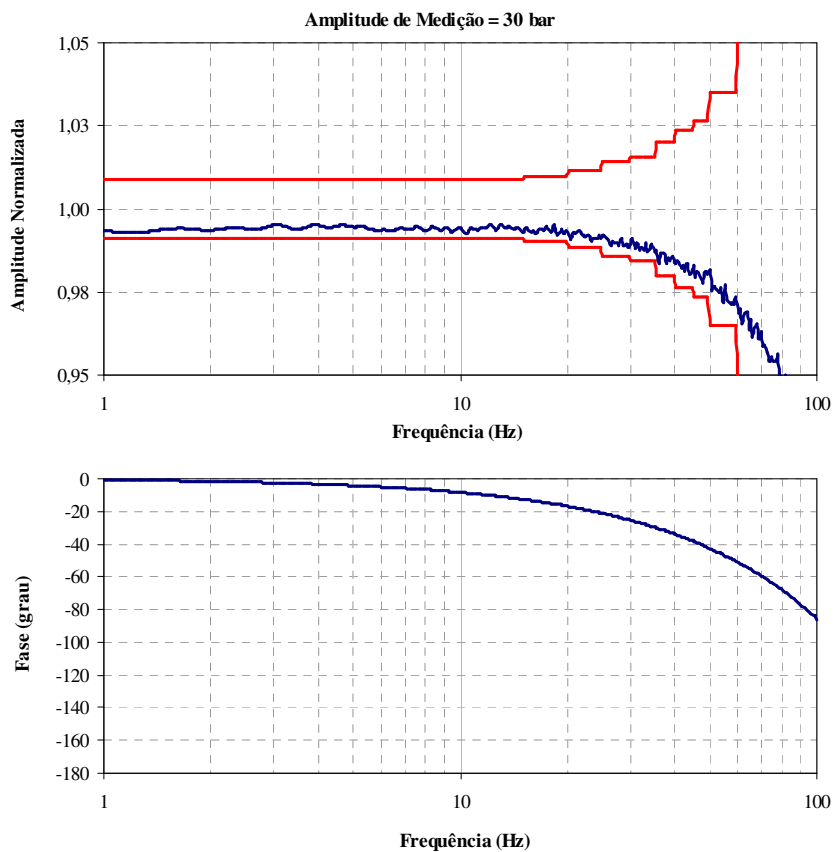


Figura 5.25 – Funções de transferência em baixas frequências (amplitude de 30 bar).

5.5.3 TCFB – Médias Freqüências

Os ensaios em Médias frequências foram realizados no TCFB utilizando o sistema de aquisição 3 (sem filtro). As figuras 5.26, 5.27, 5.28, 5.29 e 5. 30 apresentam a função de transferência e a incerteza para as amplitudes de pressão: 1, 5, 10, 20 e 30 bar em médias frequências.

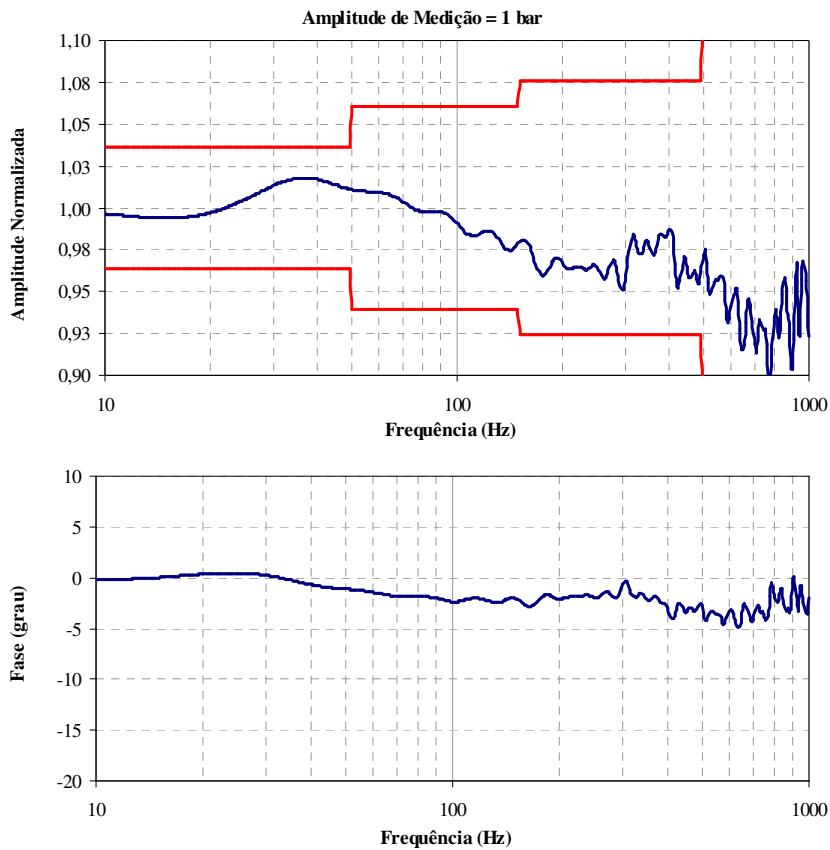


Figura 5.26 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 1 bar).

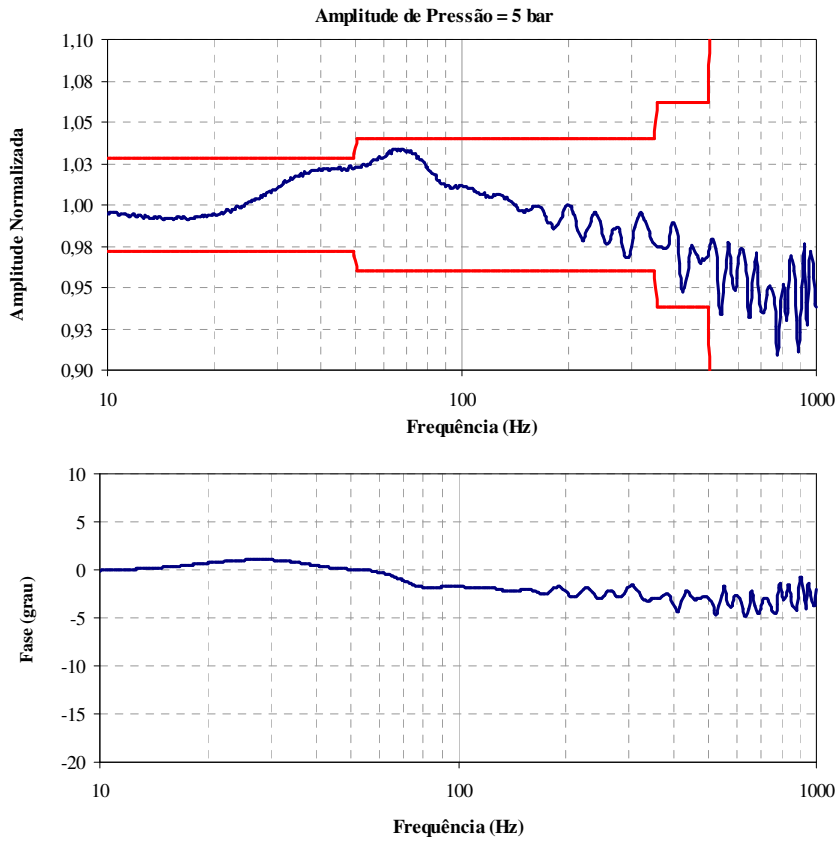


Figura 5.27 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 5 bar).

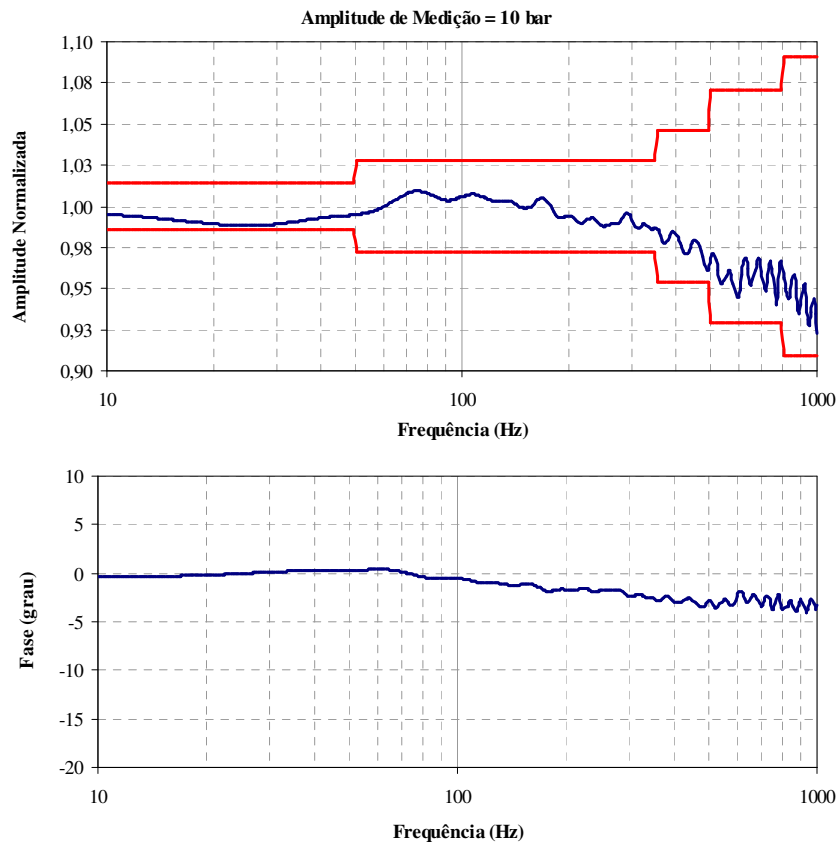


Figura 5.28 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 10 bar).

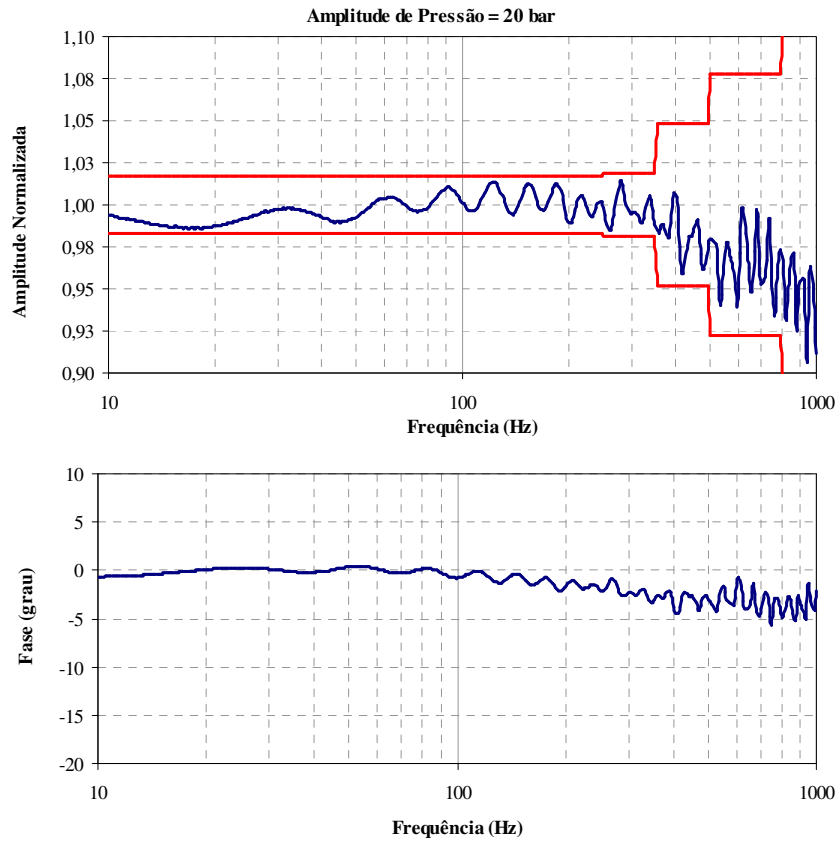


Figura 5.29 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 20 bar).

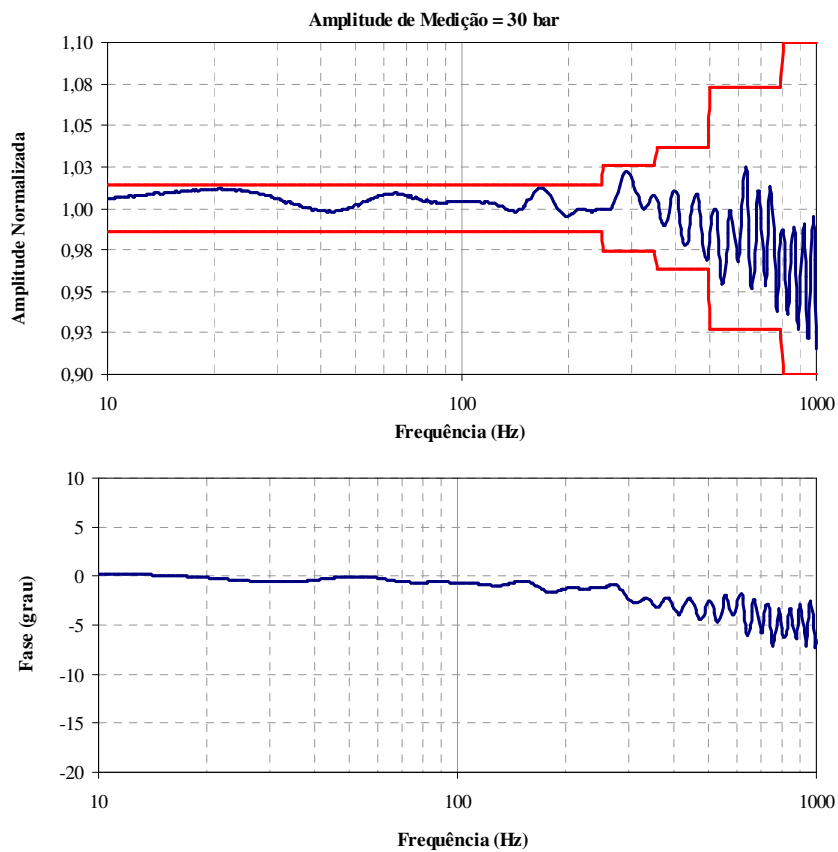


Figura 5.30 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 30 bar).

A análise das figuras mostra que para pequenas amplitudes de medição o valor da incerteza é maior, devido aos ruídos e variações de pressão que são mais significativas para esses níveis de pressão.

5.5.4 TC100 – Altas Frequências

Os ensaios em altas frequências foram realizados no TC100 utilizando o sistema de aquisição 2. As figuras 5.31, 5.32, 5.33, 5.34 e 5.35 apresentam a função de transferência e a incerteza para as amplitudes de pressão: 1, 5, 10, 20 e 30 bar em altas frequências.

A análise das figuras mostra que para pequenas amplitudes de medição o valor da incerteza é maior, devido aos ruídos e variações de pressão que são mais significativas para esses níveis de pressão.

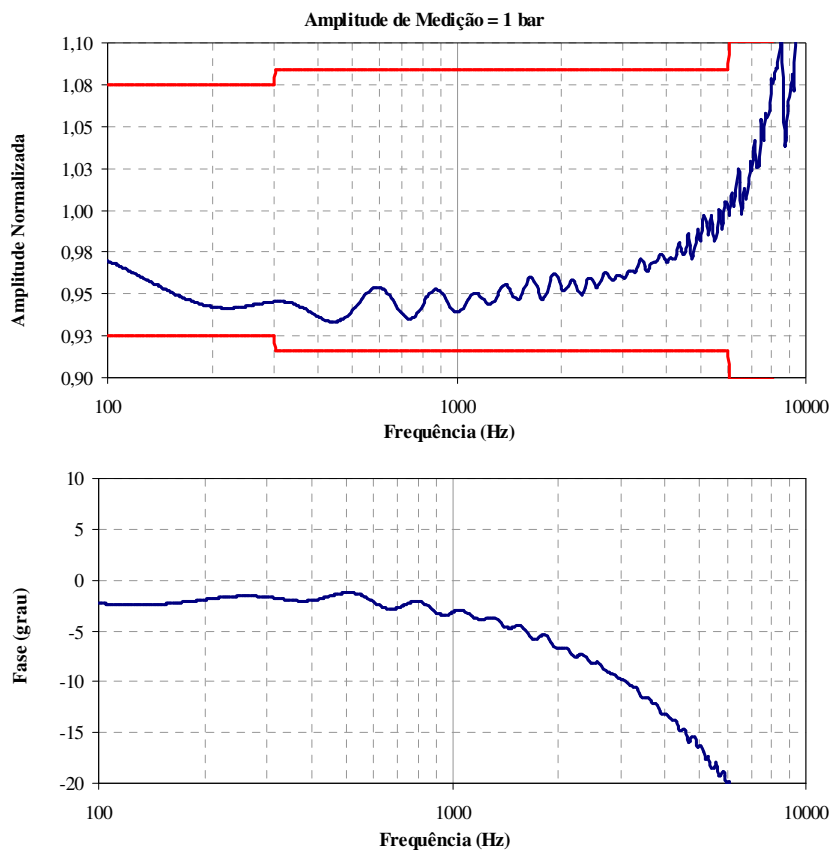


Figura 5.31 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 1 bar).

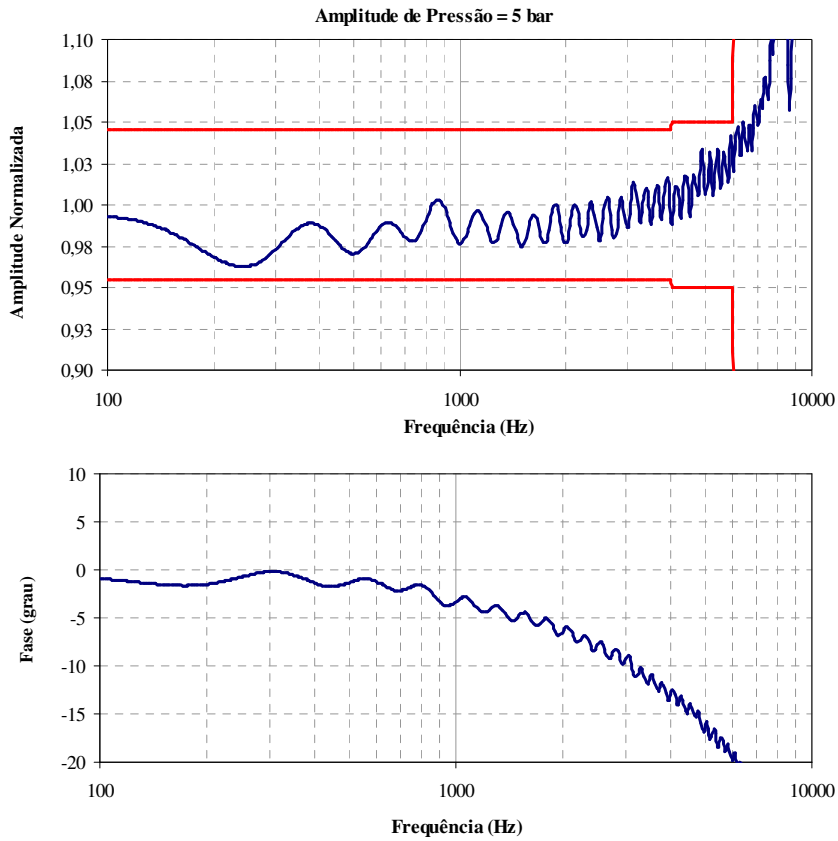


Figura 5.32 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 5 bar).

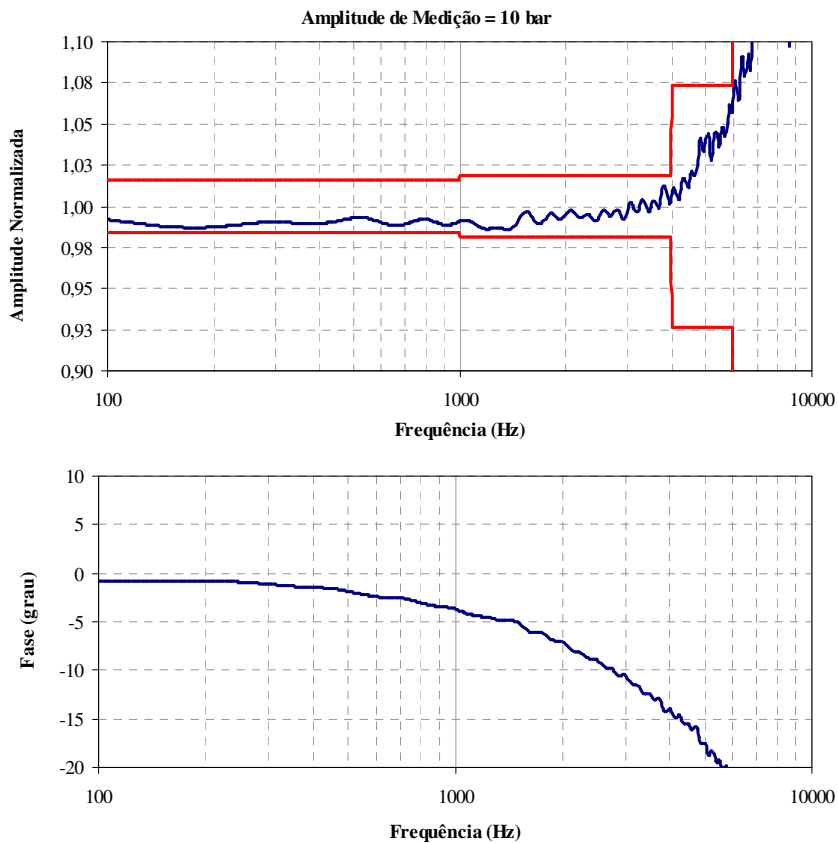


Figura 5.33 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 10 bar).

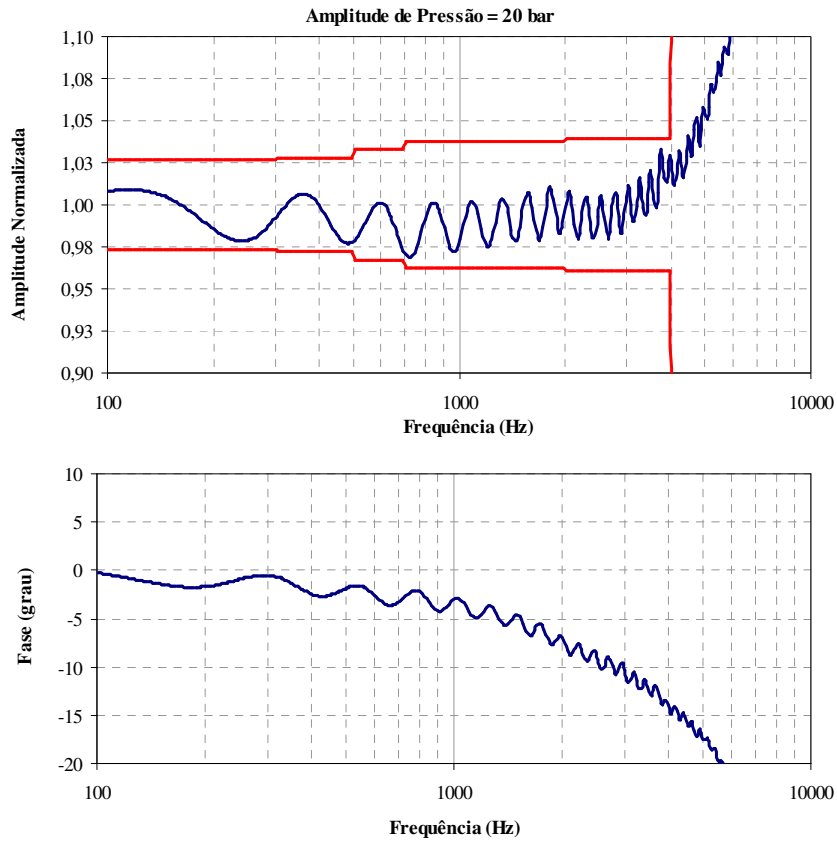


Figura 5.34 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 20 bar).

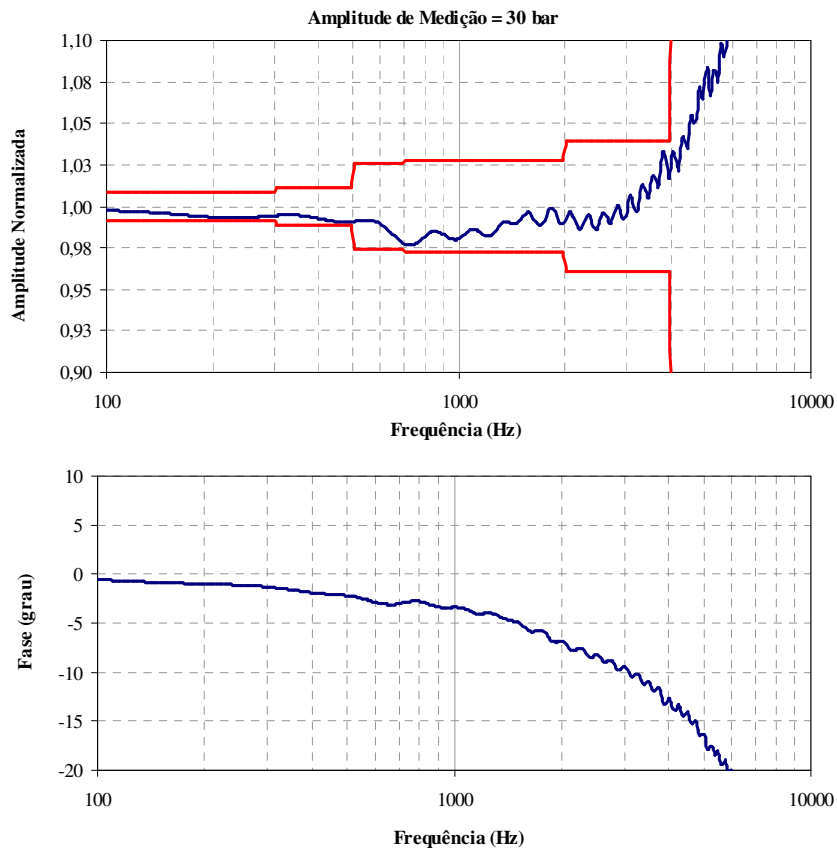


Figura 5.35 – Funções de transferência em médias frequências (amplitude de 30 bar).

5.6 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DE UM TRANSDUTOR DE REFERÊNCIA

Com base nas figuras apresentadas no tópico anterior podem-se construir as funções de transferência do transdutor para cada amplitude de pressão. As figuras 5.36, 5.37, 5.38, 5.39 e 5.40 apresentam o ganho normalizado dessas funções de transferência.

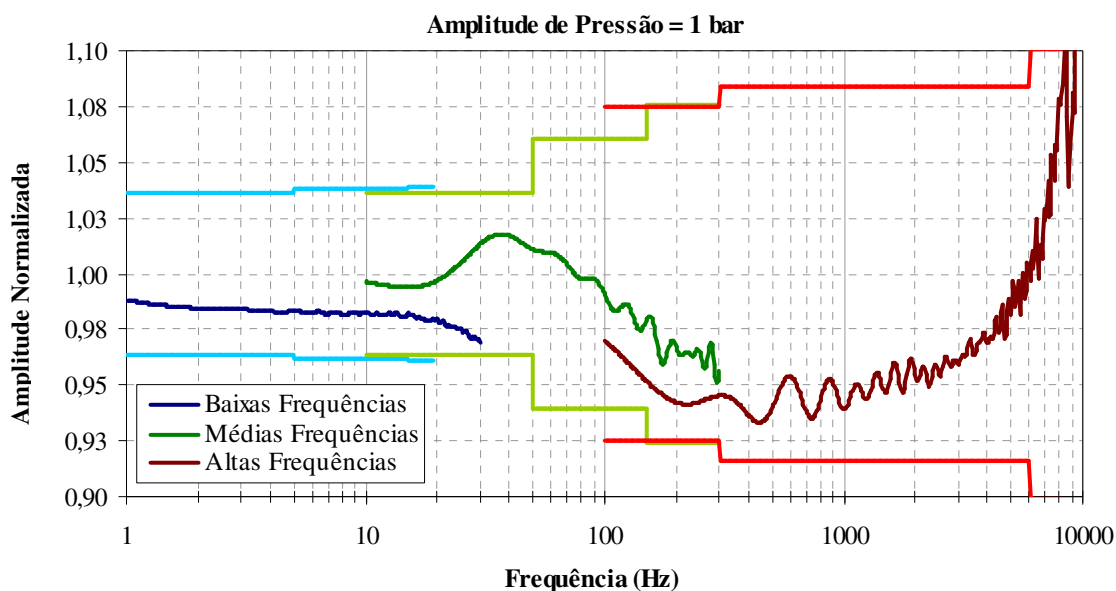


Figura 5.36 – Funções de transferência do transdutor (amplitude de 1 bar).

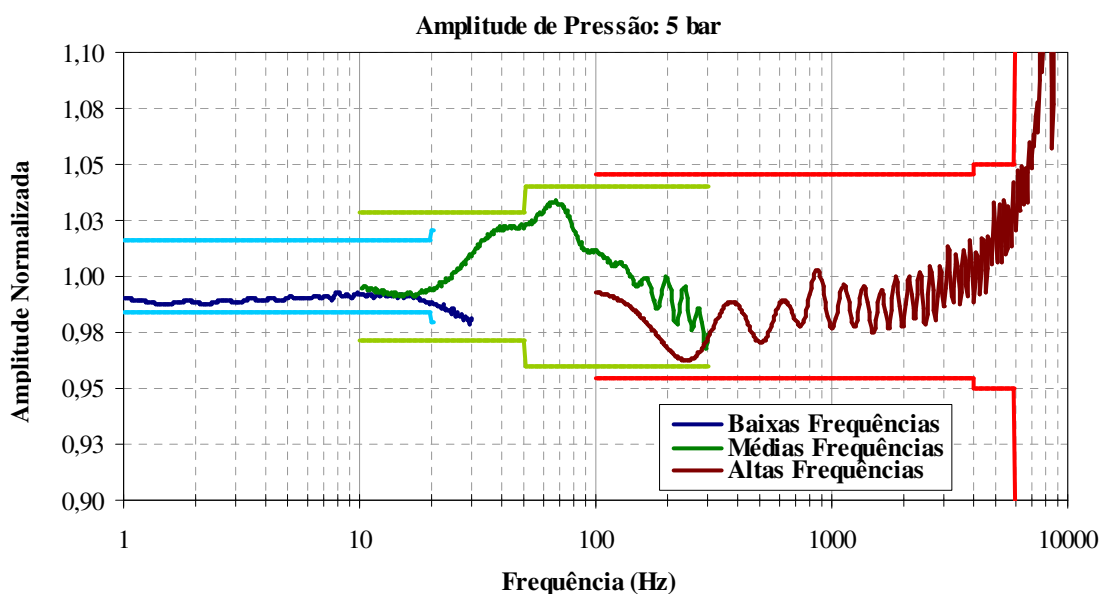


Figura 5.37 – Funções de transferência do transdutor (amplitude de 5 bar).

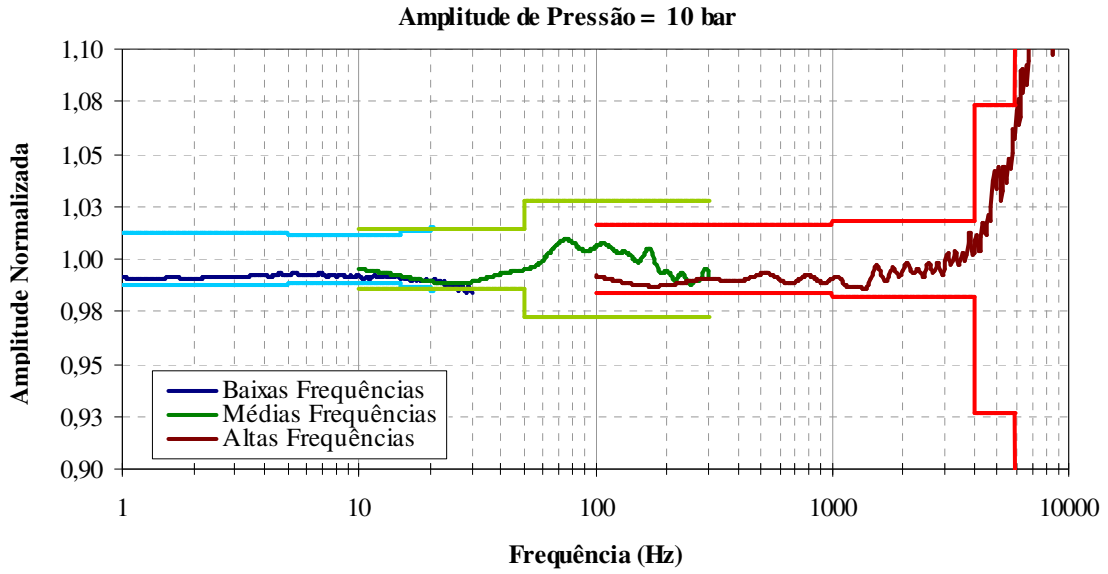


Figura 5.38 – Funções de transferência do transdutor (amplitude de 10 bar).

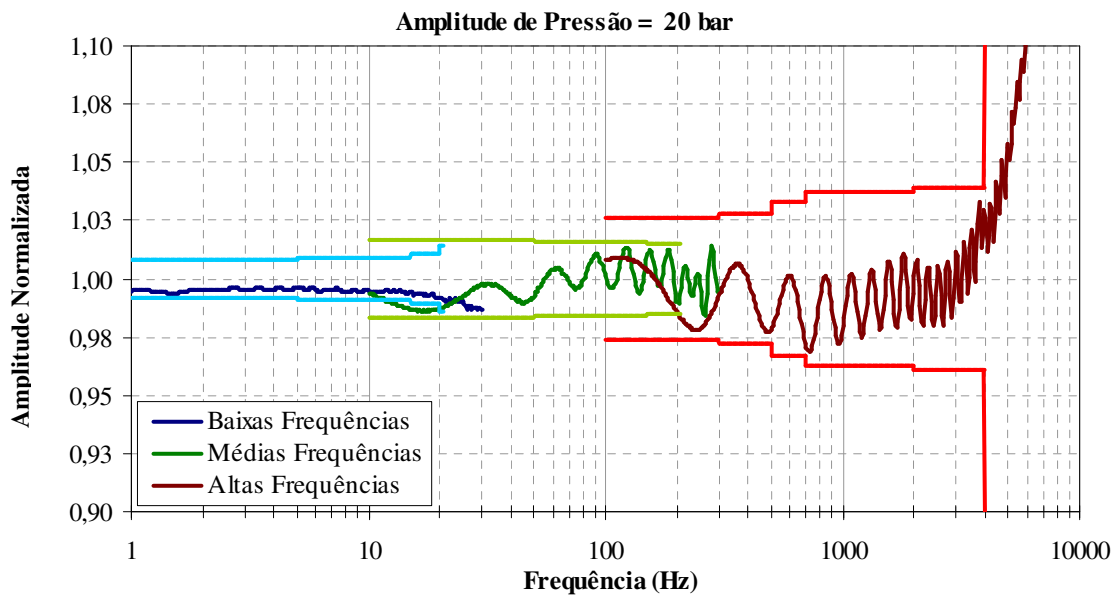


Figura 5.39 – Funções de transferência do transdutor (amplitude de 20 bar).

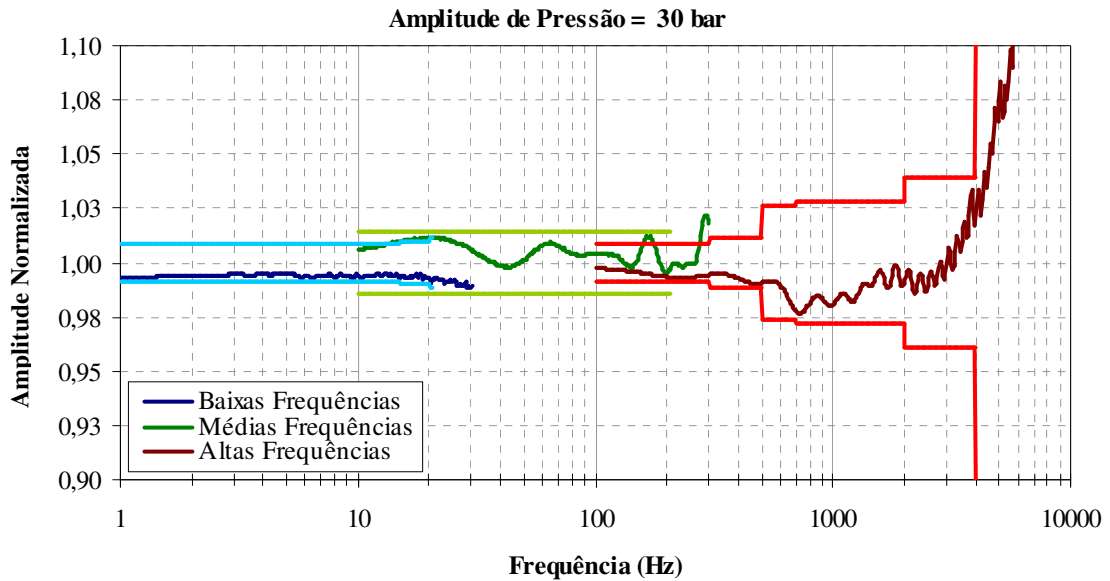


Figura 5.40 – Funções de transferência do transdutor (amplitude de 30 bar).

As figuras acima mostram a evolução da incerteza em função da amplitude de medição. Observa-se que para amplitudes menores 10 bar (1 MPa) o comportamento da incerteza não permite estabelecer uma relação de comparação adequada entre os intervalos de frequência. Além de apresentar um valor da ordem de 10%. Já nas calibrações com amplitudes mais elevadas, que é um dos objetivos desse trabalho, os valores da incerteza já permitem realizar a intercomparação entre os intervalos, além de apresentar valores não superiores a 5%. Essa diferença de comportamento mostra que a montagem experimental utilizada é adequada para calibrações em altas pressões (> 1 MPa) e que para amplitudes em baixas pressões deve-se usar a montagem proposta por Oliveira (2004).

Outro fator importante que pode ser observado é o limite superior em frequência. Nas calibrações em baixas pressões o valor máximo era de 1 kHz para incerteza menor que 2%. Já na calibração em alta frequência conseguiu-se expandir esse valor até 3 kHz com uma incerteza menor que 2%. Isso mostra o sucesso das atualizações executadas no TC100. E considerando uma incerteza menor que 5 % pode-se estender o limite superior em frequência até 4 kHz.

A Tabela 5.12 mostra os valores da incerteza expandida por intervalos de frequência e por amplitudes de medição. Essa tabela pode ser comparada a Tabela 2.1 (resultados para baixas pressões) mostrando a evolução da incerteza. Dessa forma, combinando os dois

processos de calibração pode-se obter um transdutor de referência que terá uma faixa de medição de 0,1 a 3 MPa (1 bar a 30 bar) dentro do intervalo de frequência de 1 a 3 kHz, com uma incerteza menor que 2% da amplitude de medição.

Tabela 5.12 – Valores máximos de incerteza em função das amplitudes de pressão e dos intervalos de frequência.

1 MPa (10 bar)		
Bande de Frequência:	Incerteza Expandida [%]	Incerteza Expandida [kPa]
1 Hz a 10 Hz	1,010	2,10
10 Hz a 49 Hz	1,014	2,11
49 Hz a 100 Hz	1,015	2,11
100 Hz a 500 Hz	1,016	2,12
500 Hz a 1 kHz	1,016	2,12
1 kHz a 3 kHz	1,018	2,13
2 MPa (20 bar)		
Bande de Frequência:	Incerteza Expandida [%]	Incerteza Expandida [kPa]
1 Hz a 10 Hz	0,820	3,67
10 Hz a 49 Hz	1,017	4,10
49 Hz a 100 Hz	1,016	4,10
100 Hz a 500 Hz	1,028	4,13
500 Hz a 1 kHz	1,037	4,15
1 kHz a 3 kHz	1,040	4,15
3 MPa (30 bar)		
Bande de Frequência:	Incerteza Expandida [%]	Incerteza Expandida [kPa]
1 Hz a 10 Hz	0,877	5,14
10 Hz a 49 Hz	1,010	5,55
49 Hz a 100 Hz	1,011	5,58
100 Hz a 500 Hz	1,012	5,58
500 Hz a 1 kHz	1,028	5,63
1 kHz a 3 kHz	1,039	5,67

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

Para que um transdutor seja completamente caracterizado é necessário submetê-lo a um processo de calibração estática ou dinâmica. A escolha entre esses processos depende do princípio de funcionamento do transdutor, do elemento sensor e do mensurando. Cada processo fornecerá as informações que caracterizam o comportamento do transdutor. No caso da calibração dinâmica de transdutores de pressão busca-se determinar a função de transferência experimental e as características dinâmicas que descrevam o seu comportamento. Desde o início dos anos 60 até a década de 90 esses estudos permitiram o desenvolvimento de um método de calibração dinâmica e de cálculo da incerteza de um transdutor de pressão, entretanto, esse era limitado a pressões de até 1 MPa (10 bar). Partindo deste contexto esse trabalho buscou contribuir na ampliação desse método para altas pressões ($> 1 \text{ MPa}$).

Dessa forma, o objetivo dessa tese foi aprimorar e/ou desenvolver meios e procedimentos que possibilitem a aplicação do mesmo método em altas pressões, mantendo a mesma ordem de grandeza do valor da incerteza. Assim, a partir das discussões e das análises dos resultados apresentados nos capítulos, pode-se concluir que:

1. A avaliação dos dispositivos de calibração já disponíveis levou ao desenvolvimento de novos componentes (como o dispositivo de rompimento da membrana) e a atualizações tecnológicas que, pelos resultados apresentados, permitiram reduzir as fontes de incerteza e com isso ampliar o limite superior em frequência, passando de 1 kHz para 3 kHz com mesma ordem de grandeza dos valores das incertezas.
2. O tubo de choque franco brasileiro após o processo de montagem e validação atendeu as expectativas e permitiu realizar a calibração em médias frequências e, com isso, as comparações com as baixas e altas frequências.
3. Executar um processo de calibração que é dividido em três etapas que utilizam dispositivos, procedimentos e sistemas de medição diferentes e que estão divididos em laboratórios localizados em dois países diferentes, é um desafio que foi superado. Ou seja, ao final do trabalho conseguiu-se realizar a

integração dos dados obtidos nos dois laboratórios e pode-se determinar a função de transferência e as características dinâmicas do transdutor.

4. Para a execução do método de cálculo da incerteza utilizam-se ferramentas que precisaram ser atualizadas de forma a integrar os dados, uma vez que se utilizaram dispositivos e sistemas de medição diferentes. Com relação aos sistemas de aquisição, devido à quantidade de ensaios necessários ao seu estudo, desenvolveram-se ferramentas que possibilitaram analisar e integrar os dados.

Analisando os resultados da calibração dinâmica em altas pressões observa-se que foi possível executar o processo sem alterar a metodologia de cálculo da incerteza que já tinha sido usado em baixas pressões, o que comprova a hipótese 1 dessa tese. Para isso, foi necessário trabalhar sobre os dispositivos de calibração para reduzir as fontes de incerteza.

Os resultados obtidos com o tubo de choque franco-brasileiro mostraram que a duração do degrau de pressão é suficiente para permitir a comparação entre as baixas e altas frequências, o que confirma a hipótese 2 dessa tese.

O método de cálculo da incerteza foi desenvolvido com base nos trabalhos realizados por mais de 30 anos no LMD-ENSAM/Paris e para baixas pressões apresenta confiabilidade metrológica, uma vez que já foi apresentada a comunidade científica e é rastreado as referências nacionais de pressão e tensão. Como nesse trabalho o método não foi alterado, mantendo intacta a metodologia, pode-se concluir que os resultados aqui obtidos mantêm essa confiabilidade metrológica, o que comprova a hipótese 3 dessa tese.

6.2 RECOMENDAÇÕES

Com relação à de trabalhos futuros, sugere-se pontos que foram destacados no texto são listados abaixo:

- Continuação do desenvolvimento de novos métodos de rompimento da membrana, por laser ou fio quente, e assim reduzir ainda mais as fontes de incerteza;

- Desenvolver simulações numéricas dos processos no interior do DAR e da interação desses processos com a estrutura, de forma a contribuir no projeto de novos sistemas de comunicação entre as câmaras;
- Desenvolver simulações do tubo de choque que contemplem os efeitos da deformação e rompimento da membrana, além dos efeitos da camada limite e da relação de pressão, e assim contribuir para o aprimoramento desse dispositivo;
- Projeto e construção de um tubo de choque de alta frequência que seria usado para estender o limite superior em frequência até 10 kHz , mantendo a ordem de grandeza do valor da incerteza;
- Desenvolver um novo sistema de abertura e fechamento do tubo de choque franco-brasileiro que permita ampliar a pressão máxima de trabalho;
- Aumentar a rigidez da base sobre a qual o tubo de choque franco-brasileiro foi montado e assim reduzir os efeitos de vibrações externas;
- Desenvolver um novo sistema de perfurador de membrana para o tubo de choque franco-brasileiro e TC100.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSI B88.1-1972 (1972). “*A Guide for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers*” Norma, American Society of Mechanical Engineers - ASME.
- ARTEC (1976). “*Dynamic Calibrator for Airblast Pressure gages to 10,000 psi*” Relatório Final, Agência de Defesa Nuclear, Washington, D.C., EUA.
- BALLICO, M., (2000). “*Limitations of the Welch-Satterthwaite approximation for measurement uncertainty calculations*”, Metrologia, Vol 37, p.61-64.
- BARCELOS, M.; OLIVEIRA, A.B.S; VIANNA, J.N.S; DAMION, J.P; e DARU,V. (2001). “*Análise dos efeitos da curvatura do diafragma sobre o escoamento dentro de um tubo de choque*”, In: 16 th Brazilian congress of mechanical engineering, COBEM2001, Uberlândia, Brasil.
- BARCELOS, M.. (2002) “*Análise dos efeitos da curvatura do diafragma sobre o escoamento dentro de um tubo de choque*” Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- BEAN, V. E. e ROSASCO, G. J. (1991). “*Workshop on the measurements of transient pressure and temperature*” NIST- National Institute of standards and technology, USA.
- BEAN, V. E.; BOWERS, W. J. Jr.; HURST, W. S. e ROSASCO, G. J. (1993). “*Development of a Primary Standard for the Measurement of Dynamic Pressure and Temperature*” In: Metrologia, vol. 30, p. 747-750, 1993.
- BECKER, E. (1968). “*Gas Dynamics*” Academy Press.
- BENTLEY, J.P. (1988). “*Principles of Measurement*” Pearson Prentice Hall.
- BROWN, J.P. (2000). “*Shock Tube Experiments for the Determination of Petrophysical Parameters*” Colorado School of Mines, Colorado – EUA.
- CARVALHO, M.A.M. de (1993). “*Calibração Dinâmica: Estudo e Desenvolvimento de um Tubo Gerador de Onda de Choque*” Relatório de Estágio Supervisionado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- CARVALHO, M. A. M. de (1995) “*Estudo e Aplicação Metrológica do Tubo de Choque para Calibração Dinâmica de Sensores de Pressão*” Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- COURBON, J, (1971). “*Résistance des Matériaux Tome II*”, Dunod, Paris.

- CRUZ, P. T. de A. (2005). “*Avaliação da Intensidade de Turbulência em Motores do Ciclo Otto*” Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- DAMION, J.P. (1975). “*Concepts de l'étalonnage dynamique des capteurs de pression linéaires et non-linéaires, générateurs périodiques et apériodiques*”, Rapport scientifique CR BNM 290-938, Bureau National de Métrologie France.
- DAMION, J.P. (1977a) “*Moyens d'étalonnage dynamique des capteurs de pression*”, Bulletin d'information du Bureau National de Métrologie, vol.8, N°30, France.
- DAMION, J.P. (1977b). “*Algorithmes de calcul de la fonction de transfert ; erreur sur la réponse et sensibilité*”, Rapport scientifique CR BNM 292-233, Bureau National de Métrologie France.
- DAMION, J.P. (1979). “*Intercomparaison CERT-LMD/ENSAM Paris*”, Rapport scientifique CR BNM 79-2-46-0034, Bureau National de Métrologie France.
- DAMION, J.P. (1982). “*Intercomparaison des tubes à choc ETCA-ENSAM et CERT-ENSAM*”, Bulletin d'information du Bureau National de Métrologie, N°49, France.
- DAMION, J.P. (1983). “*Tube à choc de référence*”, Rapport scientifique CR BNM 83-2-46-0030, Bureau National de Métrologie France.
- DAMION, J.P. (1993a) “*Etalonnage en dynamique des capteurs dans le domaine des basses pressions*”, In: Congrès International de Métrologie, p.64-69, Lille, France.
- DAMION, J.P. (1993b). “*Means of dynamic calibration for pressure transducers*”, Metrologia, vol. 30, p 743-746.
- DAMION, J.P. (1995a). “*Nouveaux moyens d'étalonnage dynamique des capteurs de pression*”, In: Congrès International de Métrologie, Aquitaine, France.
- DAMION, J.P. (1995b). “*Capteur de pression de référence pour l'étalonnage dynamique*” In: Congrès International de Métrologie, p. 308–313, Nîmes, France.
- DAMION, J.P. e OLIVEIRA, A.B.S, (2003). “*Incertitude de mesure dans la détermination de sensibilité en quise-statique d'un capteur de pression*” In: 11° Congress International de Metrologie, Toulon, France.
- DARU, V. e DAMION, J.P. (1993). “*Analysis of the Flow Perturbations in a Shock Tube Due to the Curvature of the Diaphragm*” In: 19th International Symposium on Shock Waves, Spring, Verlag, Marseille, France.
- DARU, V. e DAMION, J.P. (1995). “*Influence of the curvature of the diaphragm on flow quality in shock tubes*” In: Proceedings of 20th International Symposium on Shock Waves, vol. II, p. 1527-1532, Pasadena, Califórnia, USA.

- DINIZ, A. C. G. C. (1994). “*Gerador Periódico para Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão*” Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- DINIZ, A. C. G. C., NEVES, F. J. R., BARTOLI, F. P. (1995). “*Caracterização e Análise de um Gerador Periódico para Calibração Dinâmica de Sensores de Pressão*” In: II Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica e XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1995, Belo Horizonte. Anais do II CIDIM - XIII COBEM. ABCM, CD-ROM.
- DINIZ, A.C.G.C., NEVES, F. J.R. e SANTOS, D. J. (1997). “*Delimitação do Campo de Utilização de um Gerador Periódico de Pressão*” In: XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM 97, Bauru, 1997. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM 97, ABCM, CD-ROM.
- DOEBELIN, E.O. (1983). “*Measurement System : Application and Design*” – Fourth Edition, Mc Graw-Hill.
- ELSTER, C., LINK, A. e BRUNS, T. (2007). “*Analysis of dynamic measurements and determination of time-dependent measurement uncertainty using a second-order model errors*” In: Measurement Science and Technology, IOP, vol. 18.
- FOTOWICZ, P. (2004). “**A method of approximation of the coverage factoring calibration**” Measurement, vol. 35, p. 251–256.
- FRITSCHÉ, E.Q. (1999). “*Caracterização Metrológica do Dispositivo de Abertura Rápida*” Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- FRITSCHÉ, E.Q.; OLIVEIRA, A.B.S. e NEVES, F.J. (1999). “*Análise de influência de variação de volume da câmara de calibração em um dispositivo de abertura rápida*”, Relatório PIBIC, CNPq.
- FRITSCHÉ, E. Q. (2002). “*Influência do Gás de Trabalho na Resposta em Frequência do Dispositivo de Abertura Rápida para Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão*” Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- HANSMAN (1999). “*Principles of Measurement – Measurement Instrumentation Transducers Handbook*” CRC Press, Estados Unidos.
- HESS R.W.; DAVIS. W. T. e DAVIS, P.A. (1987). “*Oscillation pressure device for dynamic calibration of pressure transducers*” Patente nº 4.698.997, In: National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., EUA.

- HESSLING, J.P., (2006). “*A novel method of estimating dynamic measurement errors*”
In: Measurement Science and Technology, IOP, vol. 17, 2006.
- HESSLING, J.P. (2008a). “*Dynamic metrology—an approach to dynamic evaluation of linear time-invariant measurement systems*” In: Measurement Science And Technology, IOP, vol. 19.
- HESSLING, J.P., (2008b). “*A novel method of dynamic correction in the time domain*”
In: Measurement Science and Technology, IOP, vol. 19.
- HESSLING, J.P. (2009). “*A novel method of evaluating dynamic measurement uncertainty utilizing digital filters*” In: Measurement Science And Technology, IOP, vol. 20, 2009.
- HJELMGREN, J. (2002). “*Dynamic Measurement of Pressure - A Literature Survey*”
Swedish National Testing and Research Institute, REPORT 2002:34, Suécia.
- INMETRO-VIM (2009). “*Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados*”, INMETRO, Rio de Janeiro, Brasil.
- ISHIWAKA, K. (1993). “*Introduction to quality control*”, 3th edition, Maroon, Bords.
- ISO-GUM (1995). “*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – GUM*”
version française, NF ENV 13005, AFNOR.
- JONES, R. e BEGQUIST, B. D. (1977). “*Interferometric techniques for fundamental static or dynamic pressure measurements and transducer Calibration*” In: Journal of Physics E., Scientific Instruments, Vol. 10, Inglaterra.
- JONES, M. A. e JACOBS, J. W. (1997). “*A Membraneless Experiment for the Study of Richtmyer-Meshkov Instability of a Shock-Accelerated Gas Interface*” In: Physics Fluids, vol. 9, n^o 10, p. 3078-3085.
- KUBLER, J.M. e ROESLI, V. (1987). “*Ballistics Pressure Transducers and Their Applications*” In: 14th Transducers Workshop Colorado Springs , CO ,EUA.
- LEDERER, P.S. (1967). “*Performance-testing pressure transducers*” In: Instruments & controls systems, vol. 40, p93-99.
- LEE, K. M. e POLYCARPOU, A. A. (2006). “*Dynamic microwaviness measurements of super smooth disk media used in magnetic hard disk drives*” In: Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 20, Issue 6, p. 1322 – 1337.
- LEÓDIDO, L.M. (2003). “*Projeto e Construção de um Tubo de Choque Didático*”
Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília.

- LEÓDIDO, L.M. (2006). “*Desenvolvimento de Métodos e Meios para a Calibração Dinâmica de Transdutores de Gases de Efeito Estufa*” Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- MELVILLE A. W. (1959). “*Hydraulic oscillator for the dynamic calibration of pressure recording systems*” In: J. Sci. Instr. 36, 422.
- OLIVEIRA, A.B.S.; SIQUEIRA, M.B.B. e VIANNA, J.N.S. (1999). “*Determinação de Incerteza de Medição em Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão*” In: ENCIT 99 7 TH Brazilian Congress of Engineering and Thernal Sciences, Rio de Janeiro, Brasil.
- OLIVEIRA, A.B.S; BARCELOS, M. e VIANNA, J.N.S. (2000). “*Avaliação da influência da massa molecular na calibração dinâmica de transdutores de pressão em um tubo de choque*” In: I Congresso Nacional Em Engenharia Mecânica - CONEM 2000, Natal, ABCM, CD-ROM.
- OLIVEIRA, A.B.S. de (2004). “*Contribution à l'étalonnage dynamique des capteur de pression Modélisation de l'estimation de l'incertitude associée*” Thèse de Doctorale - Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métier, Paris, France.
- PATON, R. (2008). “*Final report on international key comparison of liquid hydrocarbon flow facilities - CCM-FF-K2*” In: Metrologia, 45, Tech. Suppl., 07019.
- PATRICK L. W. (2004). “*Air-Blast and the Science of Dynamic Pressure Measurements*” In: Sound and Vibration, 10-16.
- PERSICO G.; P GAETANI P. e GUARDONE A. (2005). “*Dynamic calibration of fast-response probes in low-pressure shock tubes*” In: Measurement Science and Technology, Vol. 16, 1751-1759.
- PCB, 901A10 “*Shock tube*” Catalogue PCB Piezotronic, Model 901A10
- PCB, 903B02, “*Low pressure pulse calibrator*” Catalogue PCB Piezotronic, Model 903B02
- PCB, 907A02, “*Aronson step pressure generator*” Catalogue PCB Piezotronic, Model 907A02
- PCB, 913A10, “*High pressure impulse calibrator*” Catalogue PCB Piezotronic, Model 913A10
- PCB, 913B10, “*Hydraulic impulse calibrator*” Catalogue PCB Piezotronic, Model 913B10
- ROE, P. L. (1982). “*Numerical Methods in Aeronautical Fluid Dynamics*” Academic Press, London.

- RUBIO, M.G. (2000). “*Curso de Introdução à Instrumentação em Engenharia-Módulo Básico*” Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT, São Paulo.
- SAGGIN, B.; DEBEL, S. e ZACCARIOTTO, M. (2001). “*Dynamic error correction of a thermometer for atmospheric measurements*” In: Measurement, vol. 30, p223 –230.
- SASOH A., TAKAHASHI T.; WATANABE K. e TORIKAI H., YANG Q. (2006). “*Shock-Tube Operation with Laser-Beam-Induced Diaphragm Rupture*” In: AIAA Journal, Vol. 44, No. 5: Technical Notes.
- SCHWEPPE, J. L.; EICHBERGER, L. C.; MUSTER, D. F.; MICHAELS, E. L. e PASKUSZ, G. F. (1963). “*Methods for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers*” National Bureau of Standards Monograph 67, U.S. Government Printing Office, Washington - D.C, EUA.
- SHAPIRO, A. H. (1953). “*The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow*” Volume I - The Ronald Press Company, New York, EUA.
- SHAPIRO, A. H. (1953). “*The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow*” Volume II - The Ronald Press Company, New York, EUA.
- SHARIFIAN S. A. E BUTTSWORTH, D. R. (2006). “*Evaluation of glued-diaphragm fibre optic pressure sensors in a shock tube*” In: Shock Waves, Vol. 16, N°r 3, p. 189-197.
- SHU, J. (2003) “*Modelling vaporous cavitation on fluid transients*” In: International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 80, p187-195.
- SODRÉ, U. (2003). “*Transformadas de Laplace*” Notas de Aula.
- SPIEGEL, M. R. (2004). “*Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas*” In: Coleção Schaum, Ed. Artmed-Bookman, Brasil.
- SYDENHAM, P.H. (1999). “*Static and Dynamic Characteristics of Instrumentation*” In: Measurement Instrumentation Transducers Handbook, Capítulo 3, CRC Press, Estados Unidos.
- TAKANO, Y. e AKAMATSU, T., (1984). “*A Diaphragmless Shock Tube*” In: Journal of Physics. E: Scientific Instruments, vol. 17, p. 644-646.
- TOMASI, L.; WIESER E.; BARUAH E.; COLLOMB D.; JOLLY F.; KRÖTZ G.; STORM S.; JÄNKER P. e OBERMEIET E. (2003). “*Development of a New Piezoelectric Dynamic Pressure Generator for High Pressure Periodic and Aperiodic Calibration*” In: XVII IMEKO World Congress, Metrology in the 3rd Millennium, Dubrovnik, Croatia

- TURZENIECKA, D., (2000). “**Errors in the evaluation of the coverage factor as a criterion of applications of approximate methods of evaluation of expanded uncertainty**”, *Measurements*, Vol. 27, p. 223-227.
- VIANNA, J.N.S. (1984). “*Etude de la Mesure de Temperature en Regime Dynamique*” Tese de Docteur-Ingenieur, ENSAM, Paris-France.
- VIANNA, J. N. S. e CARVALHO, M. A. M, (1993). “*Estudo Teórico e Experimental da Propagação de Ondas em Tubos Fechados*” In: XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Brasília, Brasil.
- VIANNA, J.N.S.; OLIVEIRA, A.B.S e DAMION, J.P. (1999). “*Influence of the Diaphragm on the Metrological Characteristics of a Shock Tube*” In: *Metrologia*, Vol. 36, pp. 599-603.
- VIEGAS, G. C. (2007). “*Construção de um Tubo de Choque TFB-15 para a Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão*” Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- VILLA, C.V.S. (2000). “*RFreq – Software para Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão*” Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- ZHU MING – WU e WEN XIAO – JIAN. (1994). “*Water Shock Tube for High Pressure Dynamic Calibration*” In: *IMCT*, p. 468-470.