

Evaldo Ferezin

MODELAGEM DINÂMICA DE TRANSDUTOR DE  
PRESSÃO PIEZORRESISTIVO PARA SISTEMAS  
HIDRÁULICOS ATRAVÉS DE DADOS EXPERIMENTAIS  
DA RESPOSTA À ENTRADA DEGRAU

Dissertação apresentada à Escola de  
Engenharia da São Carlos da  
Universidade de São Paulo, como parte  
dos requisitos para a obtenção do Título  
de Mestre em Engenharia Mecânica.



Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Felício

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço... 25 / 04 / 2006

Ass.: ..... *J. Felício* .....

São Carlos

2006

DEDALUS - Acervo - EESC

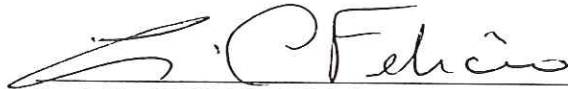


31100053740

**FOLHA DE JULGAMENTO**

Candidato: Engenheiro **EVALDO FERREZIN**

Dissertação defendida e julgada em 10-03-2006 perante a Comissão Julgadora:



Prof. Dr. **LUIZ CARLOS FELICIO (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado



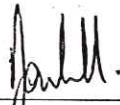
Prof. Dr. **MARCELO AREIAS TRINDADE**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO



Prof. Dr. **CELSO LUIZ FRANZOTTI**  
(Faculdades COC)

Aprovado



Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica



Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALJURI**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Aos meus pais que sempre me apoiaram.

À minha namorada Glória, que  
me deu inspiração para esta jornada.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me incentivaram e me apoiaram e que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho, entre eles

Ao Prof. Dr. Luiz Carlos Felício pela orientação, discussão e apoio fornecido durante a elaboração deste trabalho;

Aos colegas de pós-graduação Rodrigo, Marcelo, Luis Mauro, Édson, Gustavo, Marco, José Cláudio, Thiago, Vinicius, Israel, Ernesto, Renato, Pedro, Analice, Fernanda, Jen e tantos outros que estão fora desta lista;

Aos meus amigos Douglas, Paulo Alberto, Francisco, Walter Luis, Carlos Eduardo, Rodrigo e Mariela;

Aos funcionários da Dinâmica da Escola de Engenharia de São Carlos Xina, Sérgio, Diego e Cristina;

Aos funcionários da Oficina Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos Sr. Adão, Luis Carlos e Penazi;

Aos funcionários da Termodinâmica da Escola de Engenharia de São Carlos Jorge e Roberto;

Aos professores Glauco Caurin, Antônio Moreira, Paulo Seleglim Jr e Renato;

À secretaria de pós-graduação Ana Paula e Denise;

À Deus por ter guiado os meus passos durante esta caminhada.

“...donde se vê que a força necessária para impedir a água de escoar por uma abertura é proporcional à altura da coluna de água, e não à sua largura...Sendo que onde se diz “água” se entenda fluido.”

BLAISE PASCAL

## RESUMO

Ferezin, Evaldo (2006) Modelagem dinâmica de transdutor de pressão piezorresistivo para sistemas hidráulicos através de dados experimentais da resposta à entrada degrau. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

Este trabalho apresenta a modelagem da parte dinâmica de dois transdutores de pressão tipo piezorresistivo. Geralmente processos de calibração dinâmica usam bancadas sofisticadas, mas neste trabalho procurou-se um processo simples e de baixo custo. A metodologia baseou-se em aumentar lentamente a pressão, fornecida por um sistema hidráulico básico, até que ocorresse a explosão de um diafragma e, com isso, obteve-se um degrau de pressão, supostamente ideal. Considerado como sistemas lineares, com a resposta obtida verificou-se qual a ordem e o tipo de sistema correspondente à resposta do transdutor. Através dos dados experimentais determinou-se os parâmetros dinâmicos do modelo matemático. Foram obtidos modelos matemáticos lineares de 2ª ordem de cada transdutor. As respostas dos modelos mostram ter uma concordância satisfatória quando comparadas aos dados experimentais.

Palavras-chave: modelagem dinâmica experimental; dinâmica transdutor pressão.

## ABSTRACT

Ferezin, Evaldo (2006) Dynamic modeling for hydraulic piezoresistive pressure transducer using experimental responses due to step inputs. Dissertation (Masters) – Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2006.

This work presents a dynamic modeling method for two hydraulic piezoresistive pressure transducers. Usually the dynamic calibration processes apply sophisticated devices, but in this work a simple and low cost process was searched. The methodology was based on increasing the pressure slowly, supplied by a basic hydraulic system, up to a diaphragm explosion, assumed as an ideal step pressure variation. Considered as linear systems, the responses obtained were verified and compared with a second order linear system. Using the experimental data, the dynamic parameters of the mathematical model were determined for each of the two transducers. The theoretical responses of the models showed to have a satisfactory agreement when compared with the experimental data.

Keywords: experimental dynamic modeling; dynamic pressure transducer.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 – Exemplo de formatos de tubo Bourdon.....	19
FIGURA 2.2 – Exemplos de configurações de sensores tipo diafragma.....	20
FIGURA 2.3 – Configurações dos sensores tipo fole.....	20
FIGURA 2.4 – Manômetros de elemento elástico .....	21
FIGURA 2.5 – Manômetros de coluna de líquido .....	22
FIGURA 2.6 – Transdutor potenciométrico .....	23
FIGURA 2.7 – Transdutor magnético com sensor LVDT em um tubo de Bourdon.....	24
FIGURA 2.8 – Transdutor óptico .....	24
FIGURA 2.9 – Esquema de transdutor capacitivo.....	25
FIGURA 2.10 – Esquema de transdutor de <i>strain gages</i> .....	27
FIGURA 2.11 – Curva típica mostrando a forma da resposta em frequência de um cristal (sem amplificador de carga) .....	29
FIGURA 2.12 – Esquema de um transdutor piezoelétrico .....	29
FIGURA 2.13 – Esquema de um calibrador de peso morto .....	30
FIGURA 2.14 – Esquema mostrando o calibrador tipo sirene .....	32
FIGURA 2.15 – Volume variável gerado por pistão-biela-manivela .....	32
FIGURA 2.16 – Gerador tipo alto-falante utilizado por Zakrzewski e Wróbel.....	33
FIGURA 2.17 – Dispositivo tipo válvula rotativa .....	33
FIGURA 2.18 – Esquema do dispositivo tipo vibração de coluna de líquido .....	34
FIGURA 2.19 – Esquema do dispositivo de coluna de líquido .....	35
FIGURA 2.20 – Esquema do calibrador tipo tubo de choque .....	36
FIGURA 2.21 – Esquema do dispositivo tipo abertura rápida .....	37
FIGURA 2.22 – Gerador tipo explosão utilizado por Zakrzewski e Wróbel.....	38
FIGURA 2.23 – Geradores tipo explosão utilizados por Paniagua e Dénos .....	38
FIGURA 2.24 – Dispositivo tipo bomba fechada.....	39
FIGURA 2.25 – Dispositivo tipo queda de peso .....	40
FIGURA 2.26 – Gerador de transiente tipo disco de ruptura .....	40
FIGURA 2.27 – Função degrau unitário.....	45
FIGURA 2.28 – Curva de resposta a degrau unitário com especificação de parâmetros .....	47
FIGURA 2.29 – Curva de $M_p$ percentual em função de $\zeta$ .....	48
FIGURA 2.30 – Sistema de 2ª ordem super-amortecido na forma de diagrama .....	49



FIGURA 2.31 – Representação de uma curva de resposta ao degrau $q_i(t)$ de um sistema de 1ª ordem obtida experimentalmente .....	51
FIGURA 2.32 – Curva de resposta de um sistema de 1ª ordem em escala logarítmica.....	52
FIGURA 2.33 – Representação de uma curva de resposta ao degrau $q_i(t)$ de um sistema de 2ª ordem super-amortecido obtida experimentalmente .....	52
FIGURA 2.34 – Curva de resposta de um sistema de 2ª ordem super- amortecido em escala logarítmica .....	53
FIGURA 4.1 – Esquema do sistema de calibração .....	56
FIGURA 4.2 – Gerador de transiente de pressão tipo degrau.....	58
FIGURA 4.3 – Foto do gerador de transiente de pressão .....	59
FIGURA 4.4 – Discos de ruptura.....	61
FIGURA 4.5 – Sistema hidráulico – unidade hidráulica fornecedora de pressão .....	62
FIGURA 4.6 – Transdutor de pressão piezorresistivo .....	63
FIGURA 4.7 – Tela principal do sistema de aquisição mostrando os parâmetros de aquisição .....	64
FIGURA 4.8 – Função pulso retangular .....	67
FIGURA 4.9 – Espectro do transiente para a função pulso retangular .....	68
FIGURA 4.10 – Função meia onda senoidal .....	68
FIGURA 4.11 – Espectro do transiente para a função meia onda senoidal .....	69
FIGURA 4.12 – Sistema de descarga utilizado para simular um degrau negativo de pressão.....	71
FIGURA 4.13 – Sistema de descarga para simular transiente de pressão .....	72
FIGURA 4.14 – Dados adquiridos do “degrau” de pressão que foi gerado pelo sistema de descarga .....	72
FIGURA 4.15 – Ruído detectado no teste de ruído do transdutor modelo PLN-2 / PSI-420.....	73
FIGURA 4.16 – Gráfico da relação de amplitude do filtro passa baixa .....	75
FIGURA 4.17 – Gráfico do ângulo de fase do filtro passa baixa .....	76
FIGURA 4.18 – Diagrama do programa Simulink para gerar o gráfico da resposta à uma onda quadrada.....	76
FIGURA 4.19 – Resposta teórica à onda quadrada do filtro passa baixa .....	76
FIGURA 4.20 – Representação esquemática do filtro passa baixa .....	77

FIGURA 4.21 – Ruído detectado no teste do ruído com o filtro passa baixa montado, para o transdutor modelo PLN-2 / PSI-420.....	77
FIGURA 4.22 – Resposta real do filtro passa baixa à entrada onda quadrada de frequência 2kHz.....	78
FIGURA 4.23 – Ruído detectado no teste do ruído do transdutor modelo AKS 33.....	79
FIGURA 4.24 – Esquema de montagem completo do sistema de calibração para o transdutor piezorresistivo modelo PLN-2 / PSI-420 .....	80
FIGURA 4.25 – Foto da montagem do sistema de calibração para o transdutor piezorresistivo modelo PLN-2 / PSI-420.....	81
FIGURA 4.26 – Esquema de montagem do sistema de calibração para o transdutor piezorresistivo modelo AKS 33 .....	82
FIGURA 4.27 – Foto da montagem do sistema de calibração para o transdutor piezorresistivo modelo AKS 33 .....	82
FIGURA 4.28 – Sistema hidráulico para gerar o transiente de pressão.....	83
FIGURA 4.29 – Diagrama de blocos da função de transferência dada pela equação 4.21.....	85
FIGURA 4.30 – Diagramas de sistemas de 2ª ordem super-amortecido e sub-amortecido.....	85
FIGURA 4.31 – Relação entre V e P para obter o ganho da função de transferência .....	86
FIGURA 5.1 – Transiente de pressão medido pelo transdutor PLN-2 / PSI-420, com indicador digital, ambos fabricados pela empresa Zürich .....	88
FIGURA 5.2 – Transiente de pressão medido pelo transdutor PLN-2 / PSI-420, com indicador digital, ambos fabricados pela empresa Zürich.....	89
FIGURA 5.3 – Teste do ruído com o transdutor Zürich sem indicador digital e sem filtro .....	90
FIGURA 5.4 – Teste do ruído com o transdutor Zürich sem indicador digital e com filtro .....	90
FIGURA 5.5 – Transiente de pressão medido pelo transdutor Zürich com filtro e sem indicador digital .....	91
FIGURA 5.6 – Ampliação na escala do tempo para mostrar o transiente de pressão medido pelo transdutor Zürich com filtro e sem indicador digital.....	91
FIGURA 5.7 – Transiente de pressão medido pelo transdutor Zürich com filtro e sem indicador digital .....	92

FIGURA 5.8 – Ampliação na escala do tempo para mostrar o transiente de pressão medido pelo transdutor Zürich com filtro e sem indicador digital.....	92
FIGURA 5.9 – Transiente de pressão medido pelo transdutor Danfoss sem filtro e sem indicador digital .....	93
FIGURA 5.10 – Ampliação na escala do tempo para observação do transiente de pressão medido pelo transdutor Danfoss sem filtro e sem indicador digital .....	94
FIGURA 5.11 – Transiente de pressão medido pelo transdutor Danfoss sem filtro e sem indicador digital .....	94
FIGURA 5.12 – Ampliação na escala do tempo para observação do transiente de pressão medido pelo transdutor Danfoss sem filtro e sem indicador digital .....	95
FIGURA 5.13 – Pontos obtidos através da média de trechos para representação da curva de resposta utilizada na modelagem.....	96
FIGURA 5.14 – Pontos de curva de resposta ao degrau, utilizados na modelagem.....	97
FIGURA 5.15 – Degrau positivo gerado pela inversão dos pontos obtidos .....	98
FIGURA 5.16 – Função normalizada .....	99
FIGURA 5.17 – Gráfico de $\ln[1 - fn(t)]$ em função de $t$ .....	99
FIGURA 5.18 – Comparação entre a curva do modelo teórico e os dados experimentais para transdutor Zürich.....	101
FIGURA 5.19 – Curva de resposta experimental, invertida e normalizada, do transdutor danfoss .....	102
FIGURA 5.20 – Comparação entre a curva gerada através da função modelo e a curva dos dados experimentais.....	104
FIGURA B.1 – Diagrama do programa de aquisição de dados desenvolvido em software LabView da National Instruments.....	115

## LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 - Tabela da resposta em frequência do filtro passa baixa.....	75
TABELA C.1 - Características principais do transdutor de pressão modelo AKS 33.....	116
TABELA C.2 - Características principais do transdutor de pressão modelo PLN-2 / PSI-420.....	116

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	18
2.2 MEDIÇÕES “QUASE-ESTÁTICAS” DE PRESSÃO.....	18
2.2.1 Sensores de pressão .....	19
2.2.2 Manômetros.....	20
2.2.2.1 Manômetros com indicadores.....	21
2.2.2.2 Manômetros de coluna de líquido.....	21
2.3 MEDIÇÕES DINÂMICAS DE PRESSÃO.....	22
2.3.1 Sistemas com média velocidade de resposta.....	22
2.3.1.1 Transdutor potenciométrico.....	23
2.3.1.2 Transdutor magnético .....	23
2.3.1.3 Transdutor óptico.....	24
2.3.1.4 Transdutor capacitivo .....	25
2.3.2 Sistemas com alta velocidade de resposta.....	25
2.3.2.1 Transdutor “ <i>strain gage</i> ” e piezorresistivo.....	26
2.3.2.2 Transdutor piezoelétrico .....	27
2.4 CALIBRAÇÃO DE TRANSDUTORES DE PRESSÃO .....	29
2.4.1 Introdução.....	29
2.4.2 Calibração estática.....	30
2.4.3 Calibração dinâmica .....	31
2.4.3.1 Geradores de pressão periódicos .....	31
2.4.3.2 Geradores de pressão aperiódicos.....	35
2.5 MODELAGEM DINÂMICA DE TRANSDUTOR .....	41
2.5.1 Procedimento para sistemas sub-amortecidos.....	42
2.5.2 Procedimento para sistemas super-amortecidos.....	49
<b>3 OBJETIVO</b> .....	<b>54</b>

<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>56</b>
4.1 COMPONENTES EXPERIMENTAIS .....	56
4.1.1 Gerador de pressão .....	57
4.1.2 Sistema hidráulico .....	62
4.1.3 Transdutores de pressão .....	63
4.1.4 Conjunto de aquisição de dados .....	64
4.2 AMOSTRAGEM .....	64
4.2.1 Determinação da frequência da variação da pressão.....	64
4.2.2 Determinação da frequência de corte do filtro analógico.....	65
4.2.3 Determinação da taxa de aquisição .....	66
4.3 TESTES EXPLORATÓRIOS.....	70
4.3.1 Teste de simulação do transiente de pressão .....	70
4.3.2 Teste de ruído .....	73
4.3.2.1 Teste de ruído para o transdutor de pressão piezorresistivo modelo PLN-2 / P54SI 420 .....	73
4.3.2.2 Teste de ruído para o transdutor de pressão piezorresistivo modelo AKS 33 .....	78
4.4 MONTAGEM .....	79
4.4.1 Montagem do sistema elétrico para o transdutor de pressão piezorresistivo modelo PLN-2 / PSI-420.....	80
4.4.2 Montagem do sistema elétrico para o transdutor de pressão piezorresistivo modelo AKS 33.....	81
4.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	83
4.6 ANÁLISE DINÂMICA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO .....	84
<b>5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>88</b>
5.1 RESULTADOS OBTIDOS .....	88
5.1.1 Resultados do transdutor modelo PLN-2 / PSI-420 fabricado pela Zürich.....	88
5.1.2 Resultados do transdutor modelo AKS 33 fabricado pela Danfoss .....	93
5.2 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	95
5.2.1 Modelagem matemática do transdutor piezorresistivo modelo PLN-2 / PSI-420.....	95
5.2.2 Modelagem matemática do transdutor piezorresistivo modelo AKS 33.....	102

<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>105</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE A – Gerador de Pressão Transiente tipo Degrau .....</b>	<b>111</b>
<b>APÊNDICE B – Programa para Aquisição de Dados .....</b>	<b>115</b>
<b>ANEXO A – Características Principais dos Transdutores .....</b>	<b>116</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Medidas de pressão são amplamente utilizadas em várias áreas como em pesquisa e desenvolvimento, monitoração de variável e controle de processo. O campo de aplicação é incomensurável como, por exemplo, no estudo do comportamento de turbinas a gás, motores de combustão interna, aeronáutica, processos de produção, robótica, medicina, indústrias de armamento, condições atmosféricas, etc.

Em muitos processos industriais, a forma com que ocorrem as variações de pressão são de extrema importância, pois podem comprometer uma produção inteira e até mesmo a segurança de pessoas. A história temporal da variação de pressão é muito importante para os sistemas automatizados e de monitoração de grandezas físicas, exigindo cada vez mais equipamentos que forneçam informações confiáveis. As medições de pressões que são usadas em pesquisa e desenvolvimento, onde se procura muitas vezes a determinação de um fenômeno ou correlação entre grandeza física, se faz necessário conhecer as pressões envolvidas de forma precisa e também como as mesmas variam no tempo. Esses são alguns motivos que justificam a necessidade de se verificar as variações de pressão, que são feitas através de “medições dinâmicas de pressão”.

Com o aumento da utilização da medição dinâmica de pressão, torna-se necessário o uso de equipamentos cada vez mais fidedignos, o que demonstra a importância do uso da calibração dinâmica do sistema de medição. Na prática, muitos sensores e transdutores passam por somente um processo de calibração estática durante a sua fabricação, a qual possui procedimentos padrões e devido à este fato, tem-se apenas as características estáticas do equipamento e do sistema.

Em aplicações onde transientes de pressão ocorrem quando abre-se ou fecha-se uma válvula, estes transientes só podem ser medidos com confiabilidade se as características dinâmicas do sistema de medição forem conhecidas. Em outras palavras, antes do uso, deve-se fazer uma calibração dinâmica dos equipamentos.



A completa caracterização do comportamento dinâmico de um sistema de medição é obtida ao descrevê-lo matematicamente. Neste trabalho isso é feito através de uma modelagem matemática, obtendo-se a função de transferência do sistema.

Para isso é necessário usar geradores de pressão dinâmica que produzem, durante a calibração, um sinal de entrada com características dinâmicas conhecidas. Esses geradores podem ser classificados como periódicos, que fornecem geralmente sinais senoidais, ou, aperiódicos. Dentre os aperiódicos tem-se os que fornecem sinais transientes sendo, na maioria das vezes, um degrau.

Para a realização de uma calibração dinâmica precisa, que represente bem a realidade do processo em que é solicitado o uso do transdutor, geralmente utilizam-se geradores de pressão sofisticados e caros. O custo de calibração constitui uma parte do valor total do transdutor. Além disto, para se realizar a calibração de um instrumento, geralmente faz-se necessário o uso de um sistema melhor ainda, adotado como padrão, que representa um alto custo adicional. Um outro aspecto agravante é que calibrações sofisticadas são difíceis de serem executadas.

É dentro deste contexto que encontra-se o objetivo deste trabalho, fazer o levantamento de características dinâmicas de transdutores de pressão, utilizando um dispositivo simples e de baixo custo construtivo e operacional, obtendo o modelo matemático do transdutor através de dados experimentais.

Dois transdutores piezorresistivos foram utilizados, nos experimentos, um foi o modelo PLN-2 / PSI-420 de fabricação Zürich e o outro foi o modelo AKS 33 de fabricação Danfoss.

A metodologia baseou-se em aumentar lentamente a pressão, fornecida por um sistema hidráulico básico, até que ocorresse a explosão de um diafragma e, com isso, obteve-se um degrau de pressão, supostamente ideal. Considerando como sistemas lineares, com a resposta obtida verificou-se qual a ordem e o tipo de sistema correspondente à resposta do transdutor.

Através da resposta devido à entrada tipo degrau, os parâmetros dos seus modelos matemáticos lineares de 2ª ordem foram obtidos.

As respostas dos modelos mostram ter uma concordância satisfatória quando comparadas com os dados experimentais.

Desta forma, pode-se considerar que os objetivos propostos para este trabalho foram alcançados.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

A pressão é uma das variáveis importantes que devem ser monitoradas por si só ou devido ao fato de, através de sua medição, ser possível determinar outras variáveis como vazão, nível e densidade.

A pressão é uma grandeza que tem sido observada há muito tempo e é cientificamente estudada desde a época de Blaise Pascal (1623-1662). Estaticamente ela pode ser interpretada como sendo uma força atuando sobre uma área, que matematicamente é expressa pela relação força sobre área. É pelo fato de Pascal ter explicado tal relação e desenvolvido outras teorias que seu nome é utilizado como unidade de pressão no sistema internacional (SI).

Durante séculos foram utilizados vários métodos para medir tal relação, os quais deram origem aos elementos sensitivos primários ou sensores de pressão.

A revisão bibliográfica aqui apresentada visa a metodologia de medição e está dividida em quatro partes, sendo:

- 1) Medições “quase-estática” de pressão;
- 2) Medições dinâmicas de pressão;
- 3) Calibração de transdutores de pressão;
- 4) Modelagem dinâmica de transdutor.

### **2.2 MEDIÇÕES “QUASE-ESTÁTICAS” DE PRESSÃO**

Para estas medições são utilizados instrumentos que devido à sua concepção ou construção, possuem respostas lentas. Assim, suas aplicações são adequadas quando a pressão não tem variações rápidas ou quando se deseja somente o valor médio.

### 2.2.1 Sensores de pressão

Os sensores de pressão são elementos que transformam a grandeza pressão em outra grandeza. Entre os principais tipos de sensores de pressão destacam-se o tubo de Bourdon, os do tipo diafragma e os foles que são classificados como elementos sensitivos elásticos.

O tubo de Bourdon é um dos elementos mais comumente utilizados para indicação de pressão “quase-estática”. É formado por um tubo com seção transversal não circular e quando ocorre uma variação de pressão, tornando a pressão do interior maior que a do exterior, o tubo tende a ter uma seção circular. Geralmente esta deformação é utilizada para provocar um movimento na extremidade livre do tubo. Esses movimentos característicos, dependentes do formato do tubo, são os sinais de saída do sensor. Os tubos de Bourdon possuem os formatos tipo C, espiral, helicoidal e torcido. Na figura 2.1 estão ilustrados os formatos de tubos de Bourdon. (DOEBELIN, 1990).

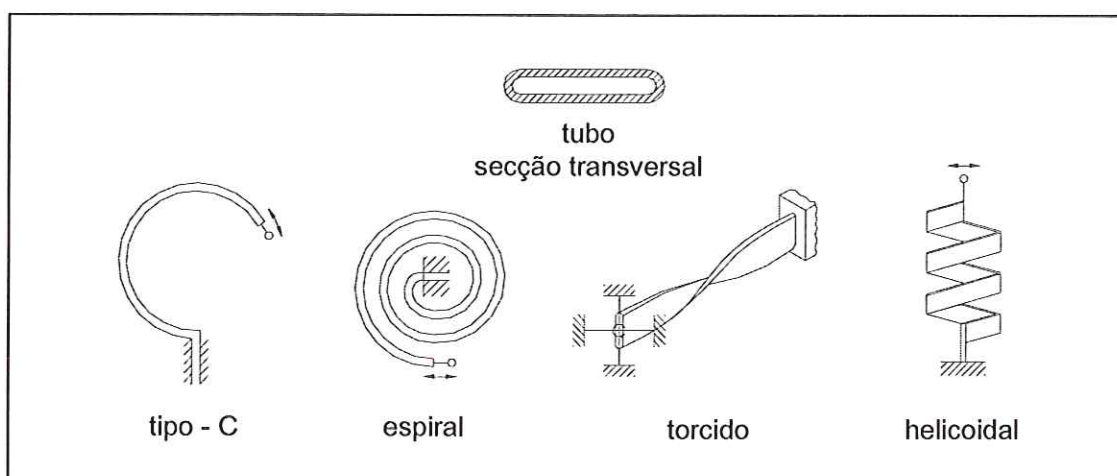


Figura 2.1 – Exemplo de formatos de tubo Bourdon.

Os sensores tipo diafragmas são geralmente formados por discos metálicos flexíveis que podem ser planos ou corrugados. A sensibilização é feita através da deformação causada pela pressão. Encontram-se também outras configurações deste tipo de sensor, com o agrupamento de diafragmas formando cápsulas. Esses sensores são geralmente utilizados para medir baixas pressões. A figura 2.2 mostra configurações de sensores tipo diafragma. (ISMAIL; GONÇALVES; BENEVENUTO, 1998).

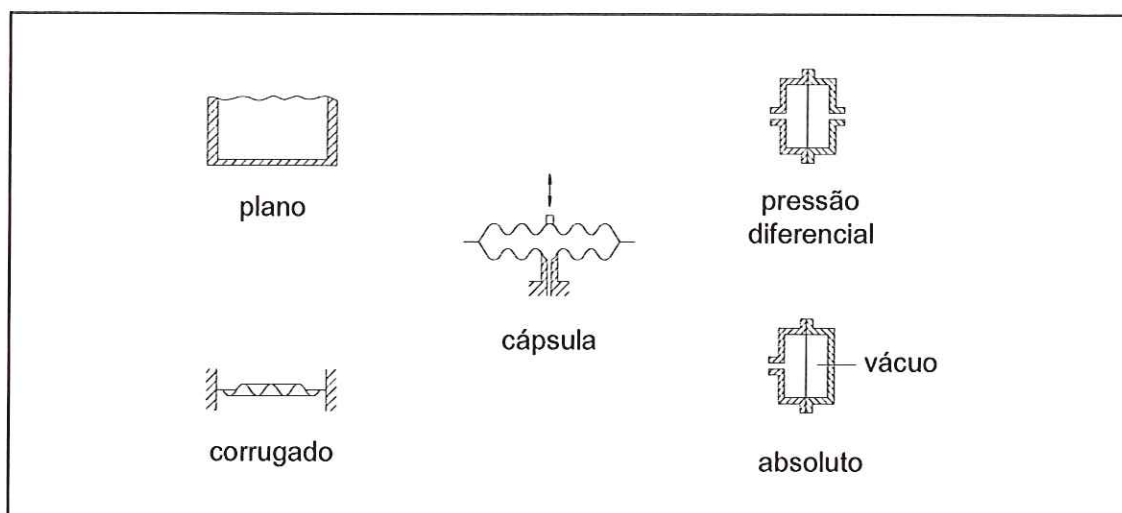


Figura 2.2 – Exemplos de configurações de sensores tipo diafragma.

Uma outra configuração de sensores são os do tipo fole metálico, constituídos por um tubo sem costura e de parede muito pequeno e ele aumenta ou diminui o tamanho dependendo da pressão aplicada. Estes sensores são geralmente fabricados com os seguintes materiais: aço inox, cobre, bronze e monel. A figura 2.3 apresenta as configurações dos sensores tipo fole. (ISMAIL; GONÇALVES; BENEVENUTO, 1998).

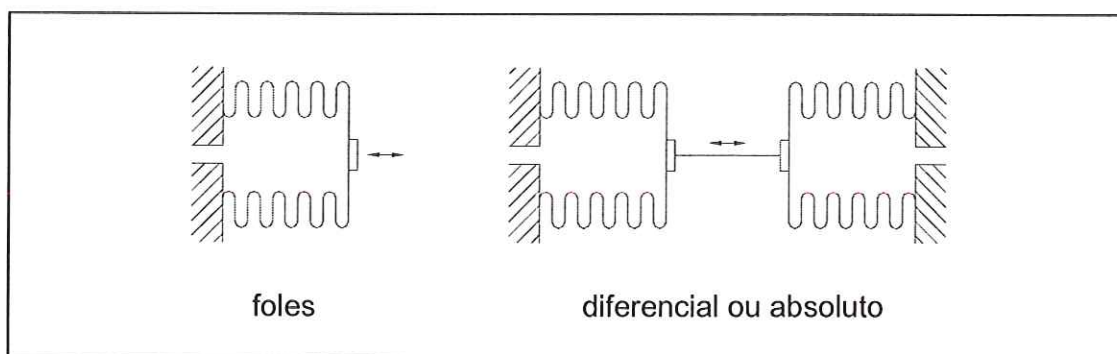


Figura 2.3 – Configurações dos sensores tipo fole.

### 2.2.2 Manômetros

Os manômetros são equipamentos simples, de baixo custo e com alta precisão, porém possuem a desvantagem de baixa velocidade de resposta, o que limita o uso à variações lentas de pressão e não podem ser utilizados em pressões flutuantes.

Os sensores podem ser instalados em um sistema que ao detectar o movimento do mesmo converte-o em um giro de ponteiro ou em um sinal elétrico para

indicar o valor da pressão. Esses conjuntos recebem nomes apropriados como manômetros ou transdutores eletromecânicos de pressão.

### 2.2.2.1 Manômetros com indicadores

Os manômetros são equipamentos que convertem o movimento do sensor de pressão em um sinal de saída que é observado, geralmente em leituras visuais, através de um giro de um ponteiro ou de uma indicação em um display correspondente à pressão medida pelo sensor.

Alguns tipos de manômetros utilizam elemento elástico como sensor e os principais tipos são: tubo de Bourdon, diafragma e fole. Podem existir erros estáticos nas leituras dos sensores devido às mudanças na pressão atmosférica, temperatura, vazamentos, deslocamentos de calibração e aos efeitos térmicos. (ISMAIL; GONÇALVES; BENEVENUTO, 1998). Alguns tipos desses manômetros estão ilustrados na figura 2.4.

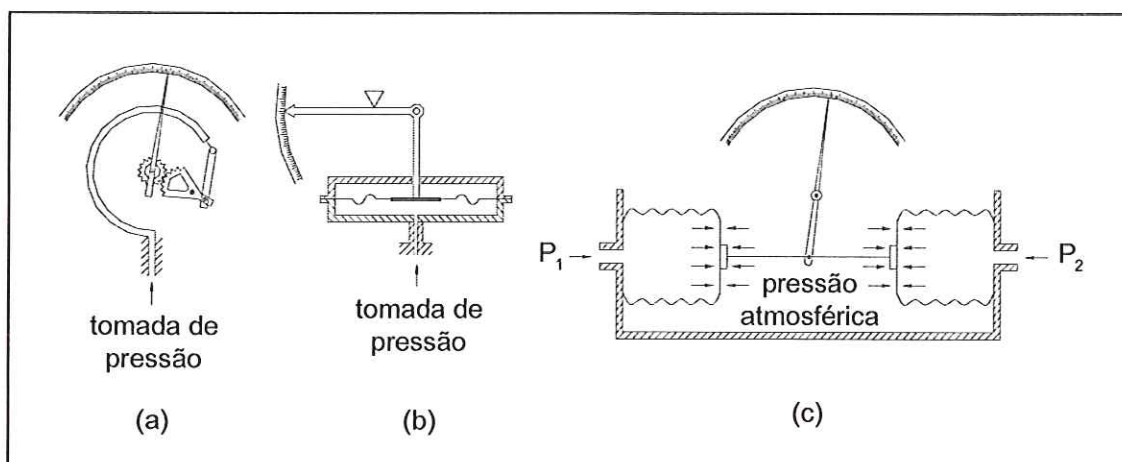


Figura 2.4 – Manômetros de elemento elástico: (a) Bourdon; (b) diafragma; (c) foles.

### 2.2.2.2 Manômetros de coluna de líquido

Existem configurações de manômetros que fazem uso de tubos com líquidos de densidade conhecida. Com a aplicação de uma pressão, o líquido desloca-se até ficar equilibrado com pressão, e a leitura é feita através da medição desta variação de nível. Os líquidos manométricos mais usados são a água e o mercúrio. (DOEBELIN, 1990).

Esses manômetros são usados para medir pressões baixas. Não permitem

vibrações e seu comportamento é afetado pela variação de temperatura. Entre eles destacam-se o tubo em U, tubo inclinado e tubo vertical, que estão ilustrados na figura 2.5.

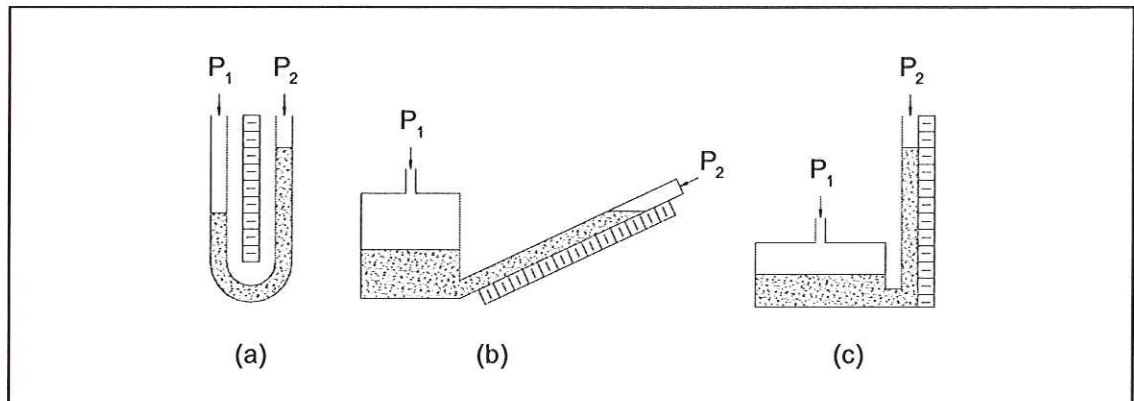


Figura 2.5 - Manômetros de coluna de líquido: (a) tubo em U; (b) tubo inclinado ; (c) tubo vertical.

## 2.3 MEDIÇÕES DINÂMICAS DE PRESSÃO

Os instrumentos que fazem medição dinâmica de pressão geralmente transformam pressão em um sinal elétrico. Este sinal pode ser analógico ou digital, e quando analógico são do tipo tensão, amperagem, amplitude modulada ou frequência modulada.

Esses transdutores podem transmitir os dados à longa distância, permitir gravação para posterior análise e ter o registro contínuo de pressão. (ISMAIL; GONÇALVES; BENEVENUTO, 1998). Tais transdutores podem ser de vários tipos, entre eles: o potenciométrico, *strain gage*, piezorresistivo, capacitivo, magnético, óptico e piezoelétrico.

A construção destes instrumentos, sob o ponto de vista de concepção de projeto, resultam em sistema de média velocidade de resposta e de alta velocidade de resposta.

### 2.3.1 Sistemas com média velocidade de resposta

Estes instrumentos, devido à movimentação de massas, não conseguem ter altas velocidades de respostas. Dentre estes, pode-se citar: transdutor potenciométrico, magnético, óptico e capacitivo.

### 2.3.1.1 Transdutor potenciométrico

O transdutor potenciométrico é formado por uma resistência e um contato móvel, que executa um movimento de translação, rotação ou a combinação dos dois, e converte esse deslocamento linear ou angular em um sinal de saída elétrico. (DOEBELIN, 1990). Alguns erros podem ser introduzidos na medida devido a forma construtiva do transdutor, ao desgaste mecânico dos componentes ou por efeitos da temperatura. Esses transdutores possuem três faixas de medição de pressão que variam conforme o tipo do sensor utilizado, e são classificadas como baixas (até 100 psi ou 7 bar), média (de 100 a 350 psi ou de 7 a 24 bar) e alta (acima de 350 psi ou 24 bar). (ISMAIL; GONÇALVES; BENEVENUTO, 1998). A figura 2.6 mostra um modelo de transdutor potenciométrico.

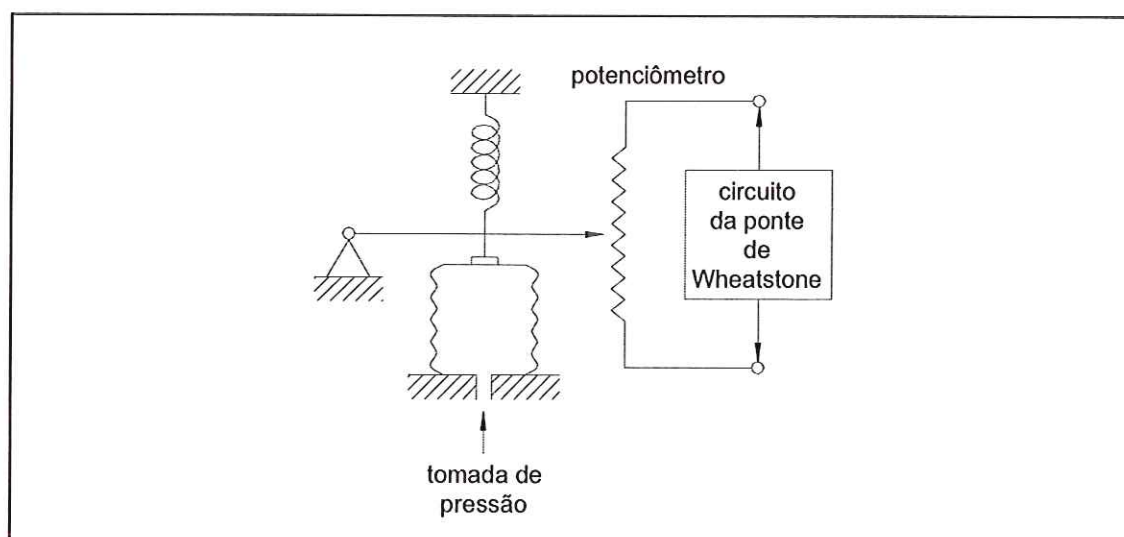


Figura 2.6 – Transdutor potenciométrico.

### 2.3.1.2 Transdutor magnético

Os transdutores magnéticos são baseados em fenômenos magnéticos e podem ser divididos em duas classes, os indutivos e os relativos. Esses transdutores funcionam através de alterações da indutância ou relutância de parte do circuito magnético. O tipo mais comum de transdutores de indutância variável é o transformador diferencial linear variável (LVDT) que detecta a pressão medindo o deslocamento do sensor elástico como é observado na figura 2.7. Esses tipos de transdutores possuem resposta à frequência limitada pelas características de inércia do aparelho. (ISMAIL;

GONÇALVES; BENEVENUTO, 1998). Segue na figura 2.7 ilustração de um transdutor magnético de indução variável.

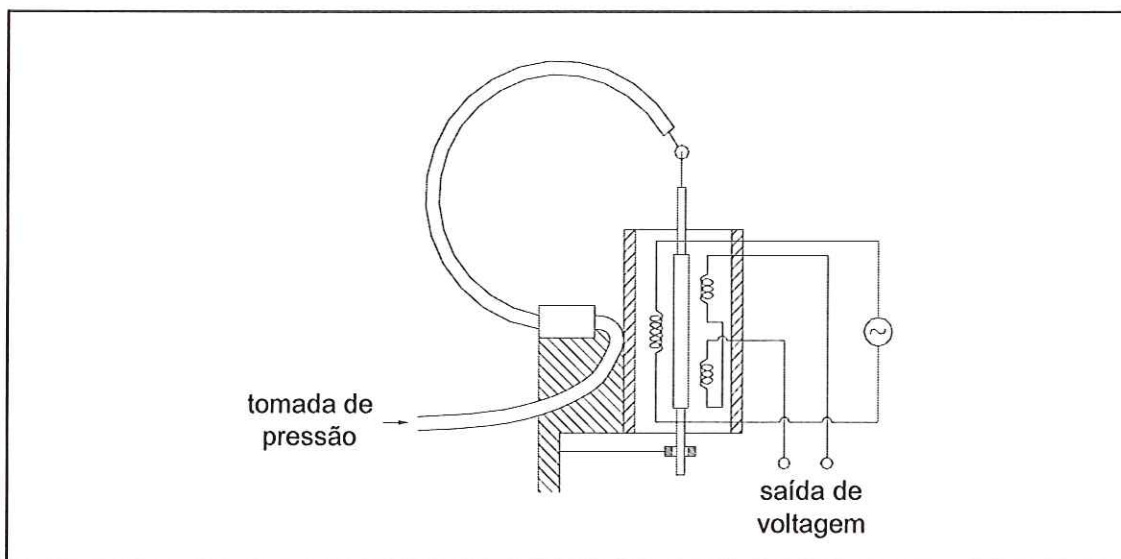


Figura 2.7 – Transdutor magnético com sensor LVDT em um tubo de Bourdon.

### 2.3.1.3 Transdutor óptico

O transdutor óptico é constituído por um “led” que emite uma luz, a qual pode ser bloqueada por uma lâmina. Esse transdutor gera um sinal de saída elétrico correspondente à variação de pressão. Os transdutores ópticos têm as seguintes propriedades: (i) são imunes aos efeitos de temperatura, (ii) a histerese e os erros de repetibilidade são quase zero, (iii) tem excelente estabilidade e (iv) são projetados para realizar medições de longa duração. (OMEGA, 1998). A figura 2.8 representa um transdutor óptico.

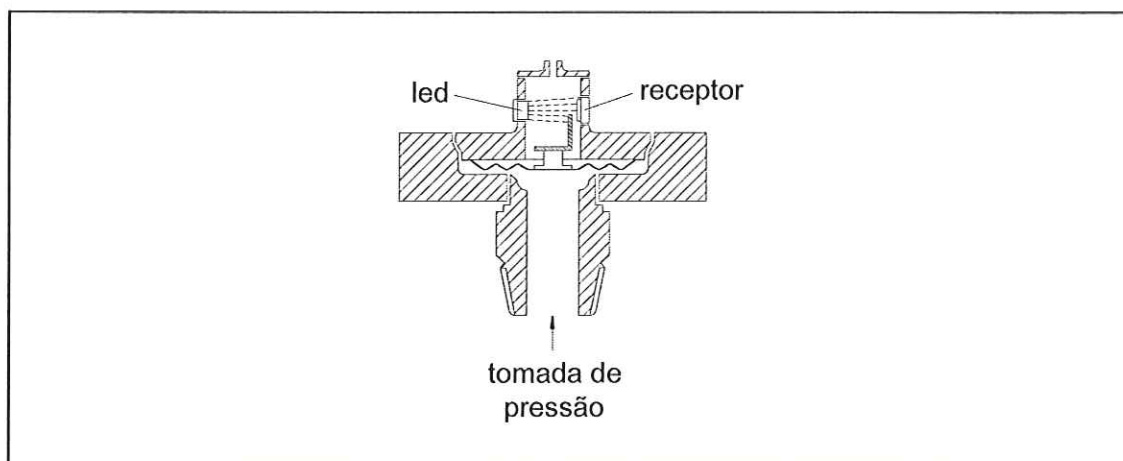


Figura 2.8 – Transdutor óptico.



### 2.3.1.4 Transdutor capacitivo

Os transdutores capacitivos podem se colocar em uma faixa intermediária entre os de velocidade média de resposta e os de alta velocidade.

Geralmente ele é constituído por de um diafragma metálico, que separa dois volumes e tem uma placa metálica de cada lado do diafragma. Um lado desse diafragma é submetido à pressão do processo e o outro a uma pressão conhecida. O diferencial de pressão causa um movimento relativo entre o diafragma e as duas placas, e esta variação geométrica muda a capacitância entre eles. A diferença de capacitância é detectada por um sinal elétrico através das placas.

Esse tipo de transdutor capacitivo pode ter um tamanho bastante pequeno (baixa inércia) quando comparado com outros tipos de transdutores, mas a sua maior desvantagem é a necessidade de equipamentos eletrônicos relativamente complexos. (ISMAIL; GONÇALVES; BENEVENUTO, 1998). Segue na figura 2.9 um esquema para um transdutor capacitivo.

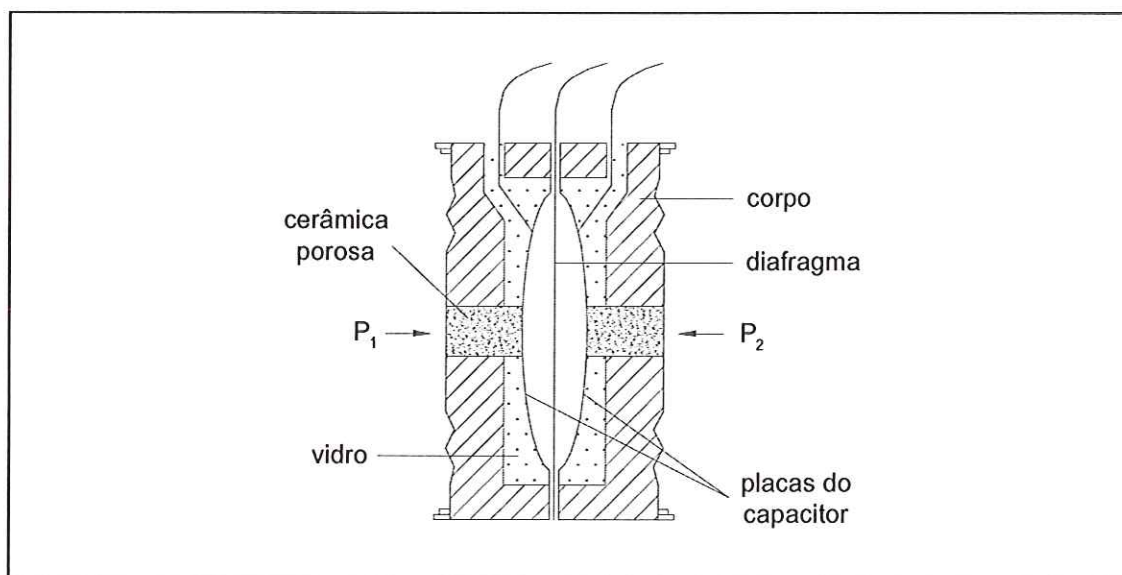


Figura 2.9 – Esquema de transdutor capacitivo.

### 2.3.2 Sistemas com alta velocidade de resposta

Estes podem ser: transdutor *strain gage* e piezorresistivo, piezoelétrico.

### 2.3.2.1 Transdutor *strain gage* e piezorresistivo

Os *strain gages* são fabricados com materiais que possuem resistência significativa que, ao serem tensionados, exibem três efeitos. O primeiro é a alteração da resistência proporcionalmente à alteração do comprimento. O segundo segue a relação de Poisson, que com a alteração do comprimento ocorre uma alteração proporcional na direção transversal da resistência. O terceiro é o efeito piezorresistivo característico do material, que é uma alteração na resistividade, sendo nos metais, proporcional à mudança de volume, quando sofre uma tensão. Todos os materiais de *strain gage* exibem essas três propriedades, mas o efeito piezorresistivo varia muito para materiais diferentes. (WILSON, 2003).

Os transdutores que utilizam essa propriedade recebem o nome de transdutores piezorresistivos.

Estes transdutores podem ter alta velocidade de resposta se forem construídos atendendo dois requisitos:

- 1) Deslocamentos de massas praticamente inexistentes;
- 2) Pacote eletrônico (fonte e condicionador de sinal) com características para alta velocidade de resposta.

Para esclarecer o segundo item, se a parte de extensômetros trabalha sob a condição de amplitude modulada, e a fonte (carrier) tem frequência de 1kHz, fica impraticável medir transientes de pressão com variações da ordem de milisegundos. Analogamente, se o condicionador possuir, intrinsecamente, filtro com capacitores que resultem em alta constante de tempo, pulsos de pressão serão ignorados. O sistema fica insensível às rápidas variações da pressão.

O transdutor de pressão tipo *strain gage* é formado por um diafragma plano circular ou cilindro oco (elemento elástico) e *strain gages* (sensores). Quando o elemento elástico é submetido à uma pressão, sofre uma deformação uniforme e conseqüentemente é detectada pelos *strain gages*, convertendo a sua deformação em um sinal elétrico. Os transdutores que utilizam diafragma trabalham com baixa e média pressão (0 à 30000 psi ou 0 à 2068 bar) e os cilindros para altas e muito alta pressões (30000 à 100000 psi ou 2068 à 6895 bar). (ISMAIL; GONÇALVES; BENEVENUTO, 1998).

Segue na figura 2.10 um transdutor com *strain gages*.

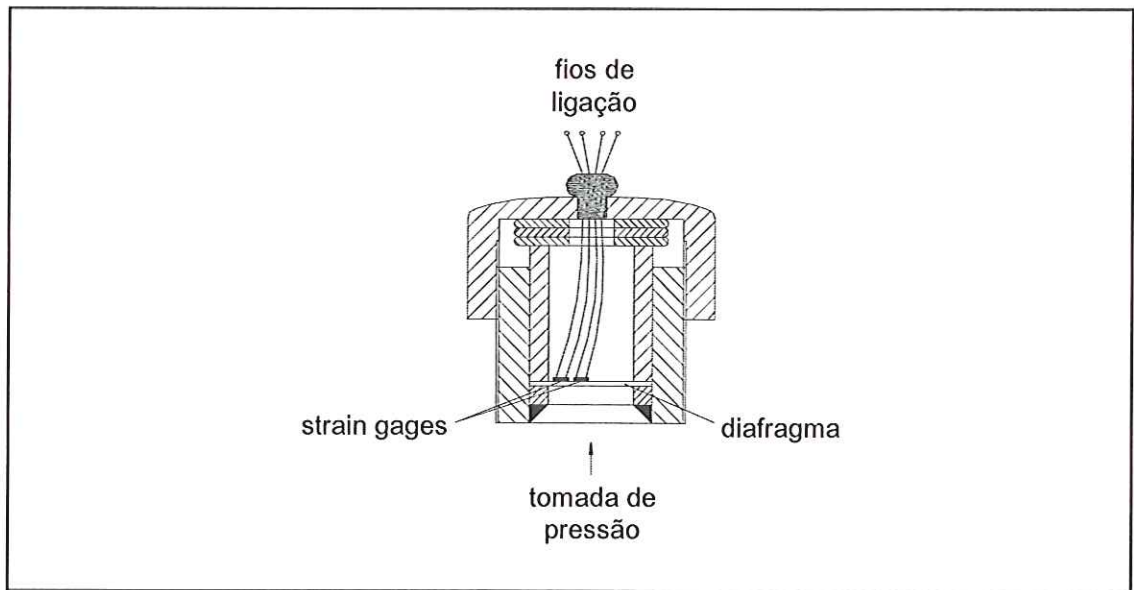


Figura 2.10 – Esquema de transdutor de *strain gages*.

### 2.3.2.2 Transdutor piezoelétrico

Esses transdutores são mais usados para a medição de transientes de pressão, em que os eventos podem durar até micro segundos. (ISMAIL; GONÇALVES; BENEVENUTO, 1998).

O efeito piezoelétrico, descoberto por Pierre e Jacques Curie em 1880, permaneceu sem utilização até a década de 1940. Esse efeito é característico de alguns cristais que produzem uma carga elétrica ao sofrer uma deformação, devido a um carregamento mecânico. Somente nos anos cinquenta, com os amplificadores de alta impedância, é que esses cristais começaram a ser utilizados comercialmente. (KISTLER, [200-?]).

Entre 1950 e 1960, com a era espacial e o desenvolvimento de armamentos, surgiu a necessidade de sensores de pressão para altas frequências. Como os sensores disponíveis na época tinham resposta em frequência limitada, iniciaram-se várias pesquisas para o desenvolvimento de novos sensores. Assim, desenvolveram-se vários tipos de materiais piezoelétricos, e entre eles, o quartzo miniatura que compensava a aceleração, com um tempo de resposta em micro segundos. (LALLY; CUMMISKEY, 2003).

Os materiais que exibem um efeito piezoelétrico significativo e vantajoso são divididos em três grupos: natural (quartzo, sal de rochelle), cristais sintéticos (sulfato de

lítium, amônia dihidrogenada de fosfato), cerâmica ferroelétrica polarizada (titanato de bário, etc), e certos filmes de polímeros. (DOEBELIN, 1990).

A deformação mecânica do material piezoelétrico gera uma carga que resulta no aparecimento de uma tensão elétrica, sendo assim, esse material pode ser pensado como um gerador de carga e um capacitor. (DOEBELIN, 1990).

A função transferência do cristal (sem o amplificador de carga) é:

$$\frac{e_o}{x_i}(D) = \frac{K\tau D}{\tau D + 1} \quad (2.1)$$

onde:

$e_o$   $\triangleq$  tensão de saída do sistema, função do tempo;

$x_i$   $\triangleq$  deformação do cristal, entrada do sistema, função do tempo;

$K$   $\triangleq$  ganho da função transferência  $\left(\frac{V}{m} \cdot s\right)$ ;

$D$   $\triangleq$  operador derivador;

$\tau$   $\triangleq$  constante de tempo (s).

Conforme pode-se observar na sua função transferência, existe “dinâmica” no numerador e isto significa que o cristal por si só não responde à baixas frequências ou à pressões estáticas. A figura 2.11 ilustra a sua curva da Resposta em Frequência.

Desta forma, sem o amplificador de carga para efetuar a compensação dinâmica e amplificação do sinal, os transdutores piezoelétricos são adequados para medidas de pressão dinâmicas, já que possuem uma grande faixa dinâmica linear, resposta em frequência até frequências altas, respostas rápidas e operam em uma grande faixa de temperatura. Além disso, são pequenos e produzem uma saída limpa de alta voltagem. (LALLY; CUMMISKEY, 2003).

Com a aplicação de amplificador de carga é possível medir pressões desde estáticas até altíssimas frequências.

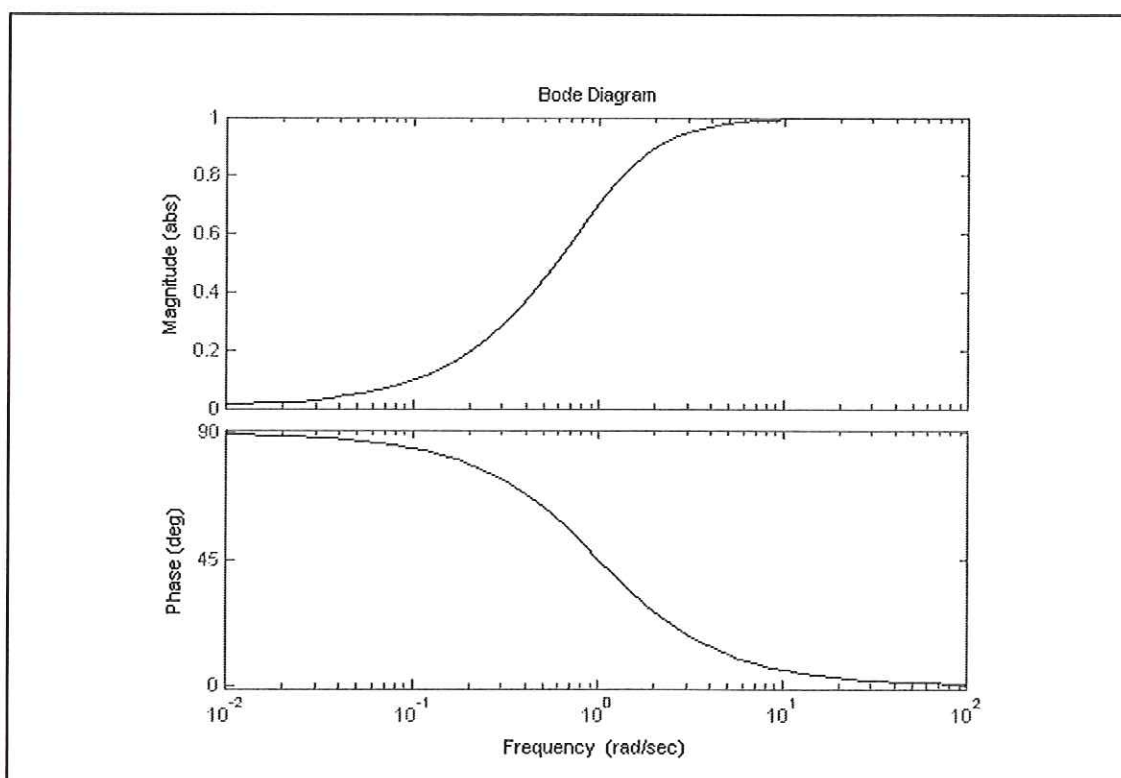


Figura 2.11 – Curva típica mostrando a forma da resposta em frequência de um cristal (sem amplificador de carga).

A figura 2.12 mostra um transdutor piezoelétrico.

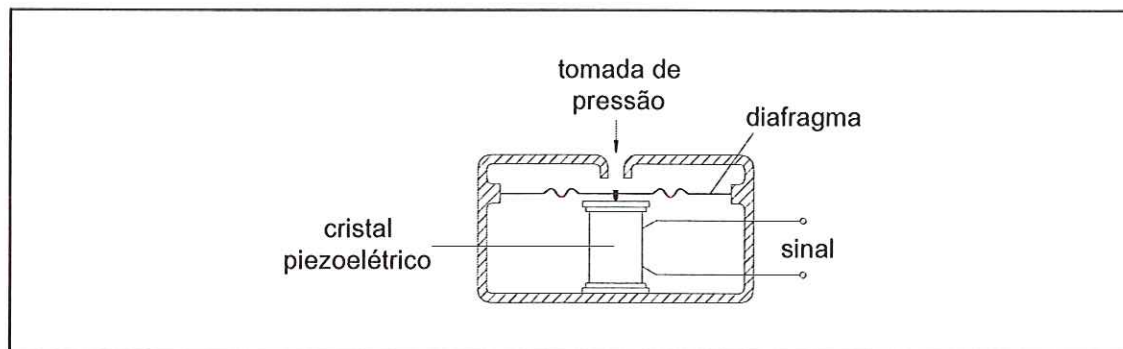


Figura 2.12 – Esquema de um transdutor piezoelétrico.

## 2.4 CALIBRAÇÃO DE TRANSDUTORES DE PRESSÃO

### 2.4.1 Introdução

Os transdutores de pressão são equipamentos que precisam reproduzir medidas confiáveis e por isso faz-se necessário o conhecimento de suas características e comportamento.

Na grande maioria das vezes as características e o comportamento dos transdutores são obtidos por meio de calibração feita com a utilização de um transdutor de referência, através de calibrações em laboratório ou, excepcionalmente, no próprio processo.

As calibrações em laboratório podem ser estática ou dinâmica. A escolha pelo melhor tipo de calibração está diretamente relacionada à aplicação do transdutor de pressão.

### 2.4.2 Calibração estática

A calibração estática fornece informações do comportamento estático do transdutor, com o uso de sinais de entrada fixos e conhecidos, e com apenas uma entrada variável. Esse tipo de calibração, que possui métodos padrões, normalmente é realizada com calibrador de peso morto e não leva em consideração o tempo de resposta necessário para indicar a medida correta do processo. Esse é o tipo mais usado para calibrar os transdutores de pressão, talvez devido à simplicidade da metodologia e instalações.

A figura 2.13 ilustra o esquema de um calibrador de peso morto.

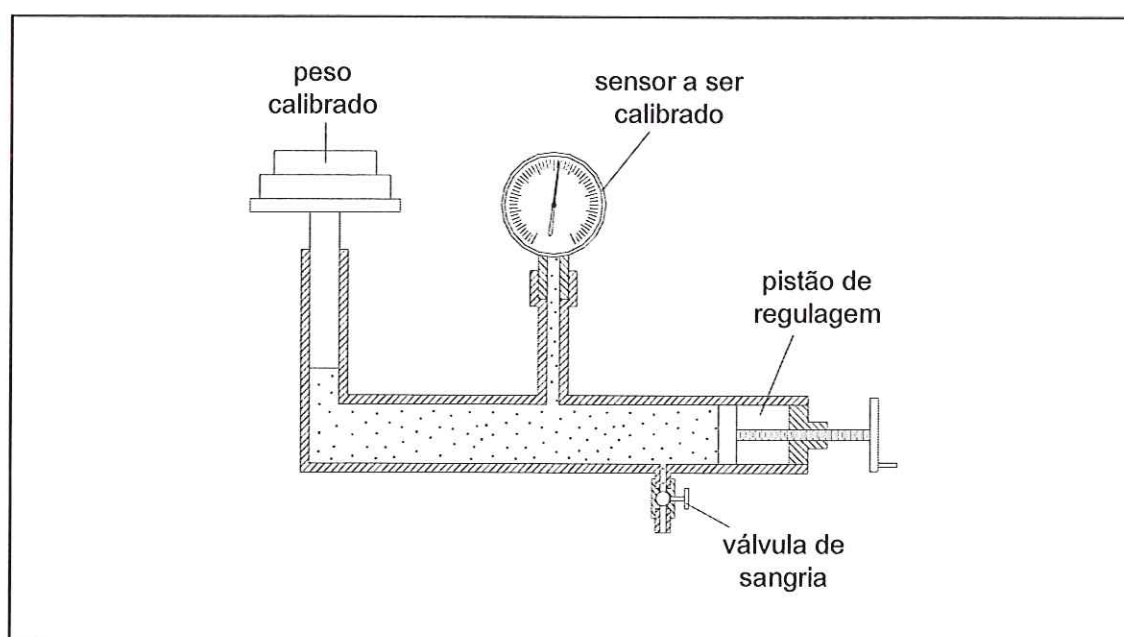


Figura 2.13 – Esquema de um calibrador de peso morto.

### 2.4.3 Calibração dinâmica

A calibração dinâmica, ao contrário da estática, é mais trabalhosa por precisar da ajuda de um gerador de pressão dinâmica, que é responsável por gerar um sinal de entrada conhecido e com características dinâmicas. Esses geradores são classificados como periódicos ou aperiódicos (sinais transientes, aleatórios ou outras funções como degrau). Serão descritos a seguir alguns tipos de geradores e métodos utilizados para obter as características dinâmicas do sistema de medição.

#### 2.4.3.1 Geradores de pressão periódicos

Os geradores de pressão periódicos geralmente fornecem sinais senoidais ou outra função periódica, sendo usados nos processos de calibração no domínio da frequência. São apropriados para calibração de sensores ou transdutores projetados para responder a pressões que variem com pequenas amplitudes e baixas frequências. (DINIZ; VIANNA; NEVES, 2003).

Existem muitos tipos de geradores periódicos e são constituídos normalmente por uma cavidade, onde é instalado o transdutor a ser calibrado, um modulador de pressão e um motor de modulação com controle direto ou indireto de frequência. (DAMION, 1993). Os geradores periódicos de cavidade são classificados como ressonantes e não ressonantes. (DINIZ; VIANNA; NEVES, 2003). Sirene, volume variável, alto-falante, válvula rotativa e vibração de coluna de líquido, são alguns exemplos de geradores de pressão periódicos.

O gerador de pressão tipo sirene é formado por uma câmara na qual é instalado o sensor a ser calibrado, figura 2.14. Esta possui uma entrada de gás com vazão constante e uma saída onde é instalado um disco com vários furos. Com a rotação do disco, a vazão do fluido é intermitente gerando assim um sinal de pressão periódico devido à perda de carga controlada pelo disco. Esse tipo de gerador é utilizado para calibração de microfones e transdutores de baixa e média frequência. (HJELMGREN, 2002).

Com o aumento da frequência do disco, ocorre uma diminuição dos pulsos de pressão para o mesmo nível de vazão do gás. (DINIZ; VIANNA; NEVES, 2003).

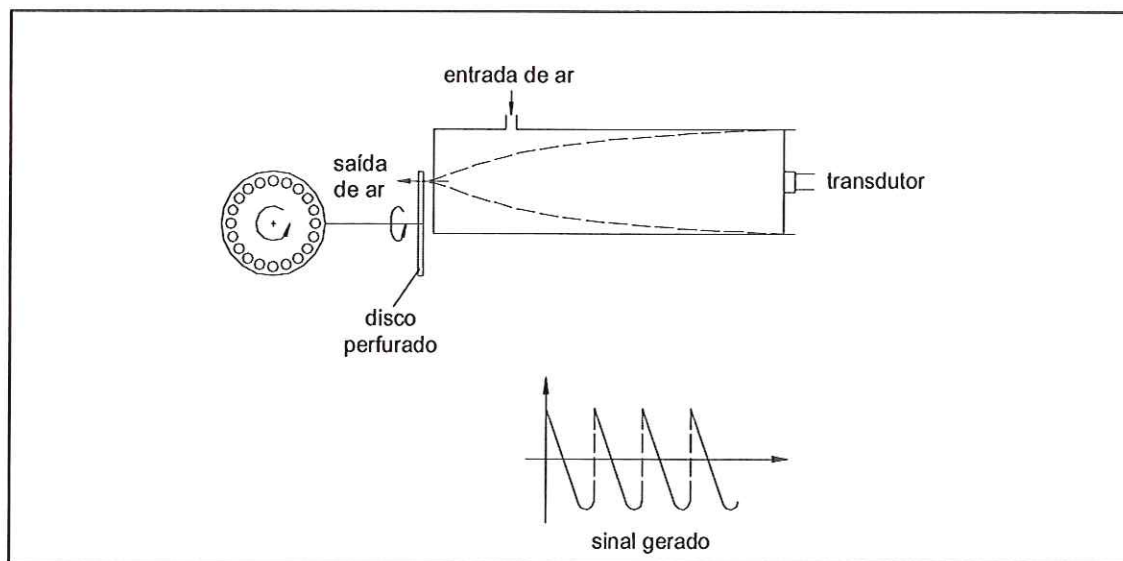


Figura 2.14 – Esquema mostrando o calibrador tipo sirene.

Um outro tipo é o de volume variável. O gerador não ressoante com modulação de volume é constituído por uma câmara, onde é instalado o transdutor a ser calibrado e de um cilindro-biela-manivela acionado por um motor. A rotação do motor é transformada em um movimento alternado do pistão que altera o volume da câmara de forma repetitiva, gerando um sinal de pressão. (DINIZ; VIANNA; NEVES, 2003). Esses geradores de volume variável, figura 2.15 podem ter também diafragma no lugar do cilindro. (BEAN, 1993).

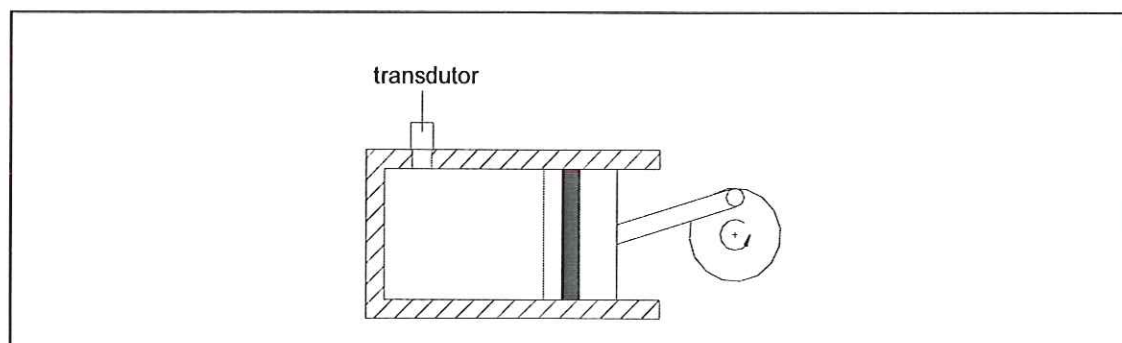


Figura 2.15 - Volume variável gerado por pistão-biela-manivela.

Uma outra metodologia refere-se ao alto-falante, que são geradores de pressão para baixas amplitudes e baixas frequências. (HJELMGREN, 2002).

Zakrzewski e Wróbel (2001) usaram um gerador de pressão tipo alto-falante constituído por um tubo com um alto-falante (com diâmetros iguais) em uma das extremidades e um cilindro na outra extremidade que movimenta-se ao longo do tubo, figura 2.16. Na face do cilindro, são instalados o sensor de referência e o sensor a ser calibrado.



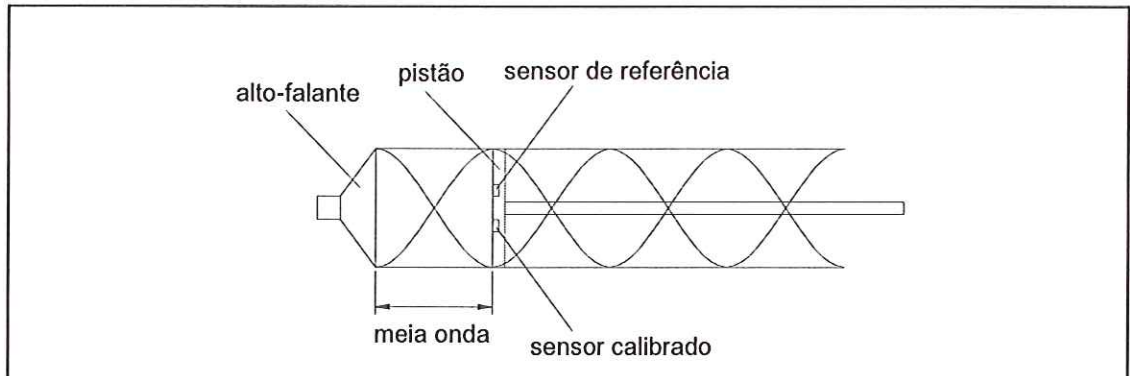


Figura 2.16 - Gerador tipo alto-falante utilizado por Zakrzewski e Wróbel.

No dispositivo chamado de válvula rotativa, o transdutor é montado na carcaça de uma válvula que possui duas tomadas de pressão a  $180^\circ$ , uma de entrada e outra de exaustão, figura 2.17. Com o movimento de rotação da válvula, pelo auxílio de um motor, ocorre uma variação de pressão conforme a mudança de conexão do transdutor, gerando assim o sinal de pressão aproximadamente retangular.

Segundo Schweppe et al, esse dispositivo é limitado para baixas frequências, onde é observada uma distorção dos pulsos de pressão devido à inércia da coluna de gás no sistema de válvula.

Weyer e Schodl (1971) apresentaram um tipo improvisado para frequências acima de 5kHz, e constataram que ressonâncias acústicas eram excitadas nas altas revoluções da válvula.

Kobota e Ooiwa (1999) apresentaram um tipo de válvula rotativa para pequenas e médias pressões, com uma cavidade acústica relativamente pequena em comparação com as válvulas anteriores.

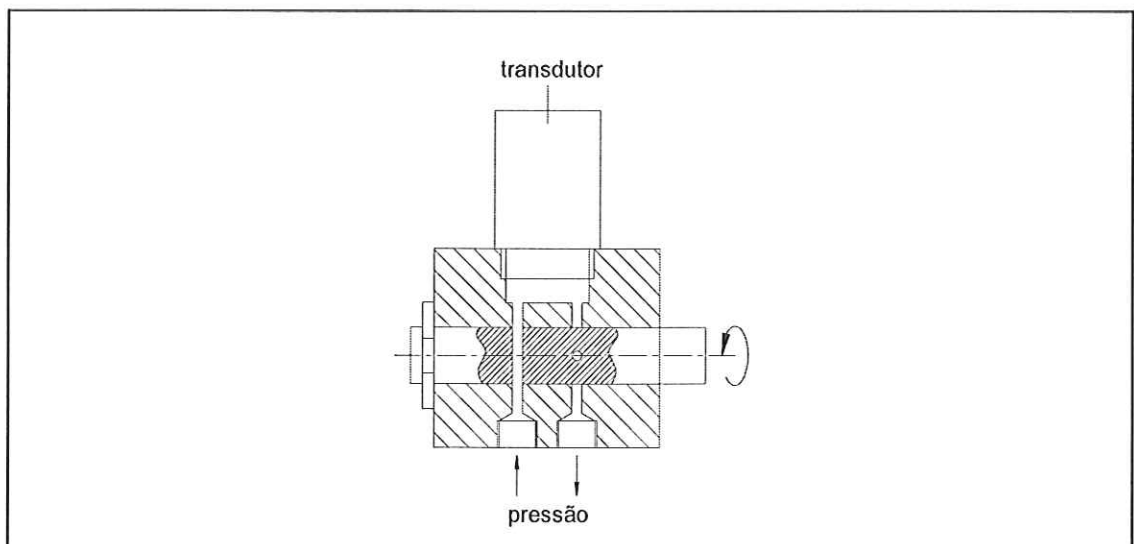


Figura 2.17 – Dispositivo tipo válvula rotativa.

Um outro tipo é o de vibração de coluna de líquido. Este dispositivo é constituído por um tubo cheio de líquido na posição vertical, estando o sensor montado na parede do tubo, figura 2.18.

Na extremidade superior é montada uma massa sísmica que tem liberdade de movimento na vertical. Na extremidade inferior é montado um shaker responsável pela vibração do dispositivo, podendo assim gerar uma pressão senoidal.

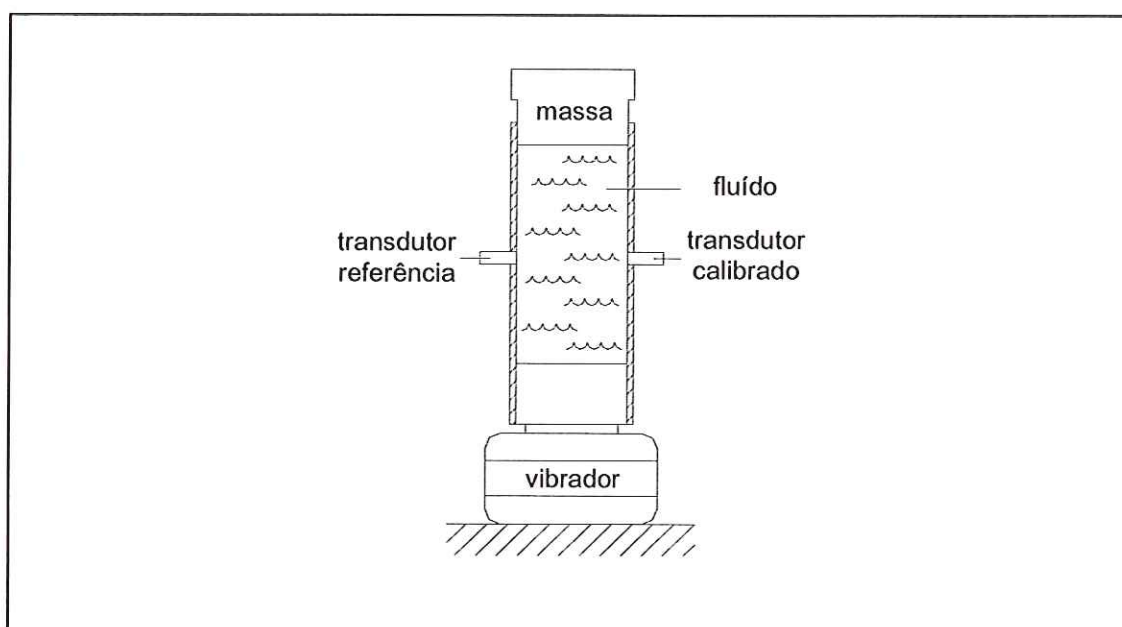


Figura 2.18 – Esquema do dispositivo tipo vibração de coluna de líquido.

Segundo Lally (apud BEAN, 1993, p. 740) o dispositivo gera uma pressão de pico de 7 Mpa e tem frequência máxima de 1 kHz.

Diniz (1994) desenvolveu um gerador de coluna de líquido que possui uma coluna cônica com uma cavidade preenchida com o fluido, um excitador mecânico na base e um acelerômetro na parte superior da coluna, como referência, figura 2.19. Nesta bancada o transdutor de pressão foi instalado na lateral da coluna, o excitador acelerou a coluna com um sinal senoidal e o sinal medido pelo transdutor de pressão foi comparado com o medido pelo acelerômetro. Observou-se que os níveis de amplitude eram influenciados pelas propriedades do líquido utilizado. Esse dispositivo limitou-se a pressões inferiores a 35 milibar e a uma faixa de frequência de 40 a 1900 Hz.

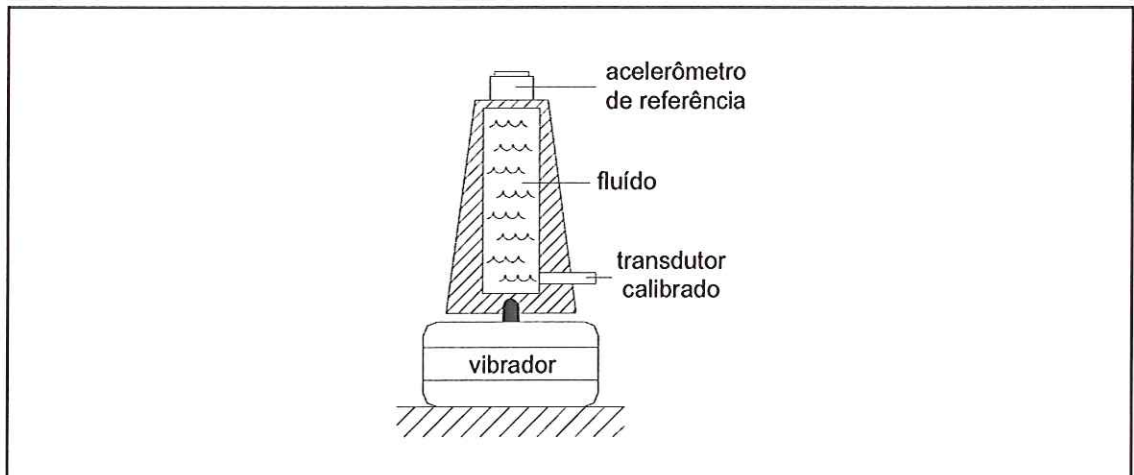


Figura 2.19 – Esquema do dispositivo de coluna de líquido.  
Fonte: Diniz (1994).

Segundo Damion (1993, p. 744), para os geradores de pressão periódicos é sempre necessário utilizar um transdutor de referência. Com isso, o custo de calibração dos sensores torna-se relativamente alto, porque o transdutor de referência tem que apresentar qualidades superiores.

#### 2.4.3.2 Geradores de pressão aperiódicos

Nos geradores de pressão aperiódicos, o sinal preferido é geralmente a função degrau e são utilizados procedimentos de calibração no domínio do tempo. Esses geradores são apropriados para calibração de sensores ou transdutores de resposta rápida, projetados para medir transientes de pressão. Quando se aplica um degrau de pressão em um transdutor, geralmente esse está sendo solicitado em condições mais severas do que as de trabalho. (DINIZ; VIANNA; NEVES, 2003). Tubo de choque, dispositivo de abertura rápida, explosões, queda de peso e disco de ruptura são alguns exemplos de geradores de pressão aperiódicos.

Segundo Damion (1993, p. 744) os dois principais geradores de pressão aperiódico são o tubo de choque e o dispositivo de abertura rápida.

O tubo de choque é formado por duas câmaras, uma de alta e outra de baixa pressão, que são separadas por um diafragma fino, figura 2.20. Na câmara de baixa pressão, na parede do fundo ou lateral, é instalado o transdutor a ser calibrado. Com o rompimento do diafragma, ocorre a propagação de uma onda de choque que viaja rapidamente através da câmara de baixa pressão, até atingir o transdutor a ser calibrado,

gerando assim degraus de pressão com diferentes amplitudes. Este tipo de gerador é empregado para calibrações de transdutores de alta frequência e de amplitudes variadas.

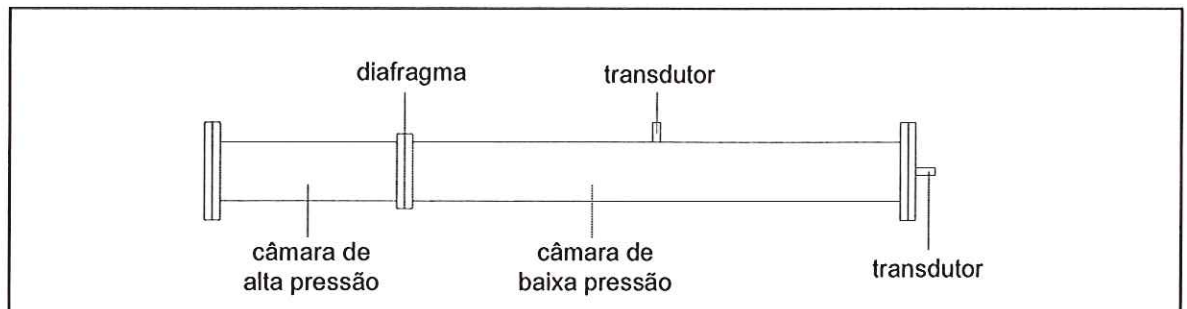


Figura 2.20 – Esquema do calibrador tipo tubo de choque.

No tubo de choque, o material do diafragma e a forma que ele se rompe, influenciam na formação da onda de choque, afetando o ganho no sinal de *output* para diferentes faixas de frequências. Esse problema resolve-se com a utilização de um transdutor de referência. (VIANNA; OLIVEIRA; DAMION, 1999). Por esse motivo, apesar da simples forma de fabricação do dispositivo (BEAN, 1993), o custo da calibração aumenta, e em casos em que não se tem disponível um transdutor de referência, este método de calibração não é totalmente confiável.

Um outro dispositivo refere-se ao de abertura rápida.

O dispositivo de abertura rápida pode ser considerado uma extensão do tubo de choque para baixas frequências (BEAN, 1993); (DAMION, 1993). Este é constituído por uma câmara pequena com pressão  $P_1$  em que é instalado o transdutor a ser calibrado e uma câmara com volume bem maior com pressão  $P_2$ , figura 2.21. As duas câmaras são separadas por uma válvula de abertura rápida e, quando atuada, o sensor recebe um rápido degrau de pressão ( $P_2 - P_1$ ). O degrau de pressão pode ser positivo ou negativo, fazendo  $P_1$  assumir valores maiores ou menores que  $P_2$ .

Esses dispositivos tem sido projetados utilizando fluido hidráulico ou gás para calibração (BEAN, 1993) que é realizada utilizando ou não um transdutor de referência. (DAMION, 1993).

Esse tipo de dispositivo pode ser utilizado para grandes faixas de frequência e apresenta boa repetibilidade (DINIZ; VIANNA; NEVES, 2003). Tal dispositivo parece ser de fácil operação, mas pela forma construtiva e pelo uso de uma válvula de abertura rápida, aparentemente o custo de fabricação é relativamente alto.

Smith (1964) desenvolveu esse tipo de gerador usando óleo como fluido e obteve o degrau de pressão com o tempo de aproximadamente 10ms.

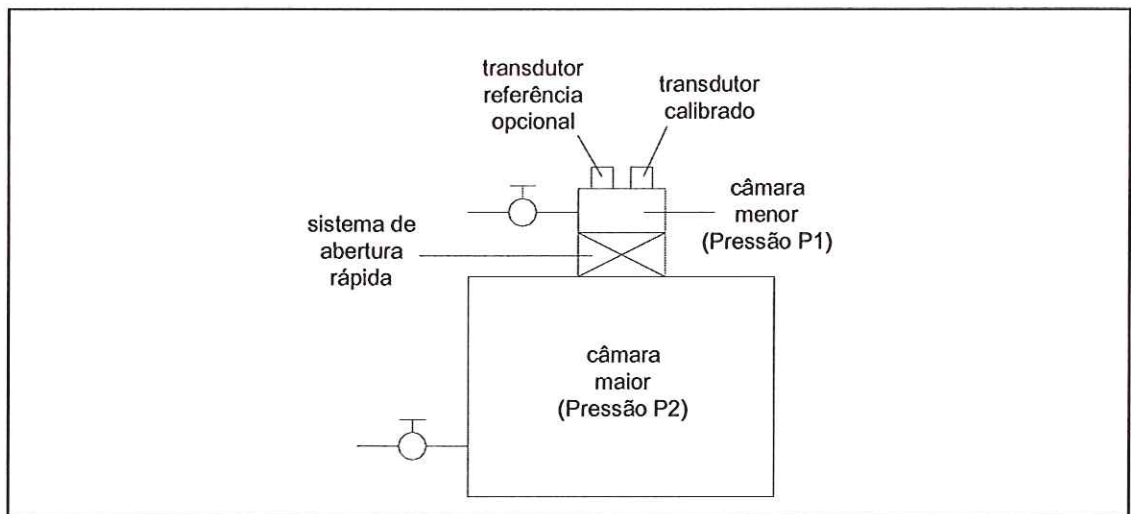


Figura 2.21 – Esquema do dispositivo tipo abertura rápida.

Uma outra metodologia que é considerada muito importante utiliza explosões.

Algumas pesquisas sugerem o uso de explosões controladas para serem geradores de transientes de pressão, para calibrar sensores que são empregados em medições de cargas impulsivas originárias ou não por explosões. (HJELMGREN, 2002).

Zakrzewsk e Wróbel (2001, p. 495) fizeram uso de um balão de borracha conectado ao sensor por um longo tubo, conforme ilustra a figura 2.22. O degraú negativo de pressão é gerado através de um furo no balão. Os autores estavam interessados apenas nas frequências naturais e por isso não foi usado um sensor de referência.

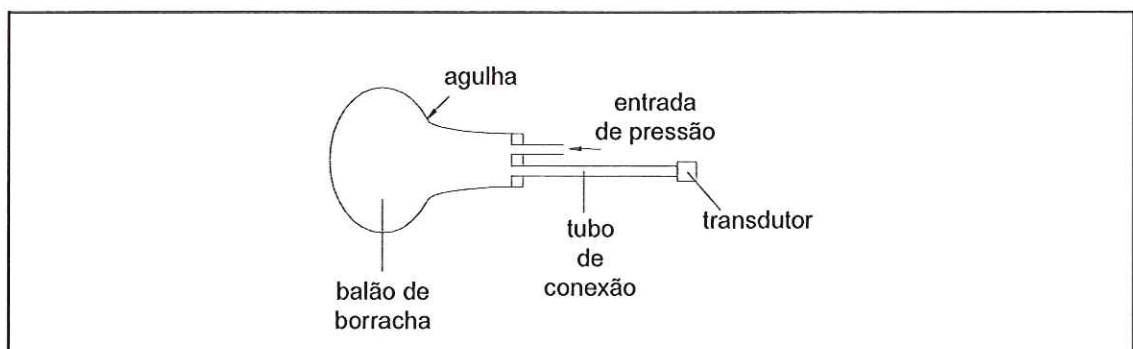


Figura 2.22 – Gerador tipo explosão utilizado por Zakrzewsk e Wróbel.

Paniagua e Dénos (2002) fizeram dois tipos de experimentos para calibrar sensores de pressão com resposta lenta, usando um método de compensação digital,

através de balões plásticos e uma linha de ar pressurizada acima da pressão atmosférica. No primeiro projeto a linha de ar e os transdutores foram colocados em uma câmara cilíndrica, a qual foi conectada ao balão, figura 2.23a. No segundo projeto, a linha de ar e os transdutores foram inseridos diretamente no balão e o degrau de pressão foi gerado pela explosão do balão por uma agulha, figura 2.23b. Nesses experimentos foram utilizados sensores de referência.

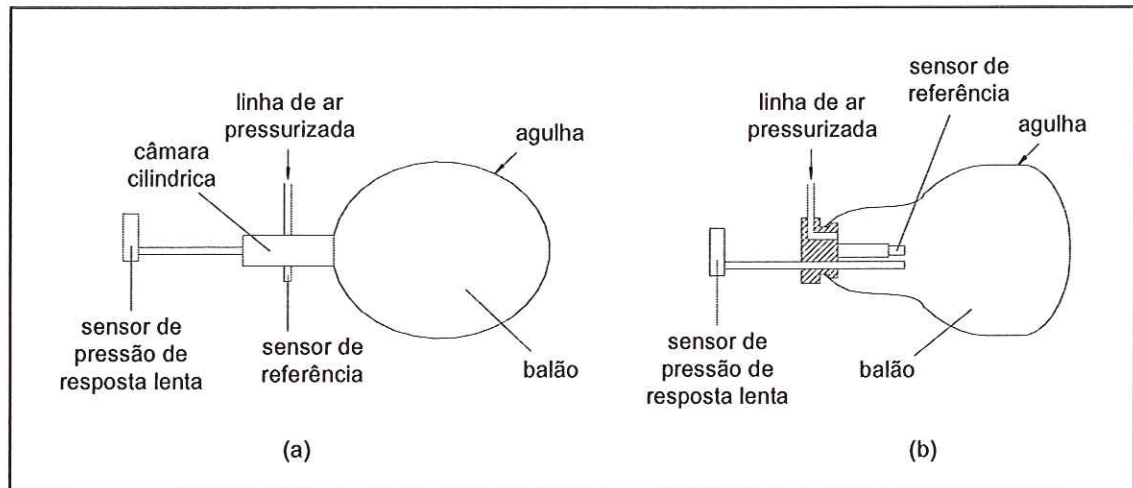


Figura 2.23 – Geradores tipo explosão utilizados por Paniagua e Dénos.

Conforme Hjelmgren (2002, p. 57) esses tipos de geradores não são calculados facilmente e precisam de um transdutor de referência.

Segundo Bean (1993, p. 739) esses geradores tem sido revisados por Damion e por Schweppe et al, eles reconhecem que os geradores de pressão por explosões necessitam sempre de um transdutor de referência, e menciona também que esses dispositivos provavelmente tenham sido mais usados em laboratório militar do que em laboratório de metrologia.

No dispositivo bomba fechada, geram-se degraus de pressão com grande amplitude em milisegundos, através da detonação de uma carga explosiva em uma câmara.

Um tipo desses dispositivos é constituído por uma câmara de expansão separada do ambiente por meio de um diafragma, figura 2.24. Na câmara é montado o transdutor a ser calibrado e no interior da mesma é colocada uma carga explosiva. Com a detonação da carga, se o diafragma for projetado para suportar a explosão, é gerado um degrau teoricamente infinito e se for projetado para romper com a explosão, é gerado um pulso de pressão com amplitude definida (DINIZ; VIANNA; NEVES, 2003).

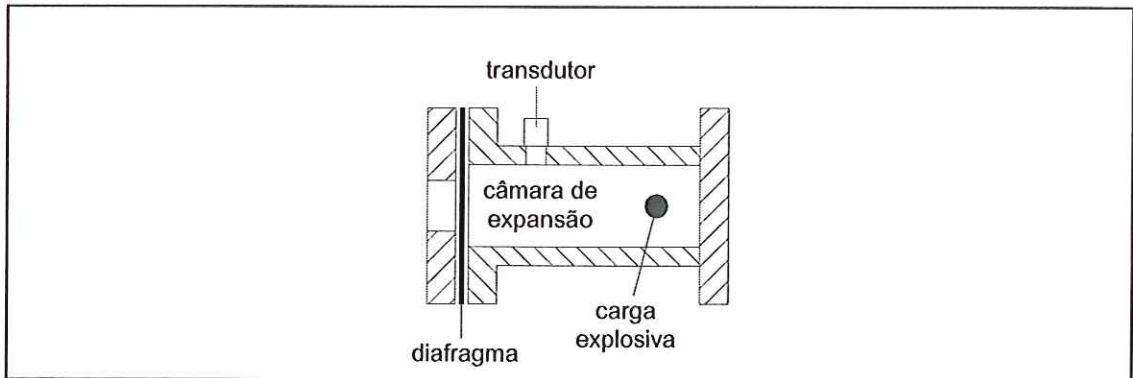


Figura 2.24 – Dispositivo tipo bomba fechada.

O uso de explosivos para gerar o degrau de pressão não fornece garantias de repetitividade, e este fato exige o uso de um sensor de referência para que se tenha o valor exato da pressão que está sendo aplicada durante a calibração. O posicionamento relativo dos sensores e as dimensões da câmara são de grande importância para assegurar que o degrau de pressão gerado seja o mesmo para os dois sensores. (DINIZ; VIANNA; NEVES, 2003). Aparentemente, o posicionamento da carga explosiva também é de fundamental importância, e a sua localização na posição desejada parece não ser simples.

Um outro tipo refere-se ao chamado de queda de peso.

O dispositivo por queda de peso possui uma carcaça com três canais interligados, figura 2.25. Nas extremidades de dois canais são instalados o sensor de referência e o sensor a ser calibrado e no terceiro canal é solto um peso para gerar uma pressão no fluido presente nos canais de ligação, gerando um pulso de pressão parecido com meia senóide.

Shipunov (1999) utilizou a técnica da queda de uma bola de aço de uma certa altura sobre o transdutor.

Voitenko e Kuznetsov (1992) usaram uma bola de aço em um fio, formando um pêndulo e um dispositivo piezoelétrico, para medir a energia potencial com o impacto da bola de aço no dispositivo.

Apesar desses dispositivos serem aparentemente simples, muitas pesquisas tem reconhecido que a pressão realizada não pode ser determinada precisamente e por isso é necessário um transdutor de referência. (HJELMGREN, 2002).

Kong et al (apud HJELMGREN, 2002, p. 57) sugeriu um transdutor de força com alta precisão, para substituir o transdutor de pressão utilizado como referência.

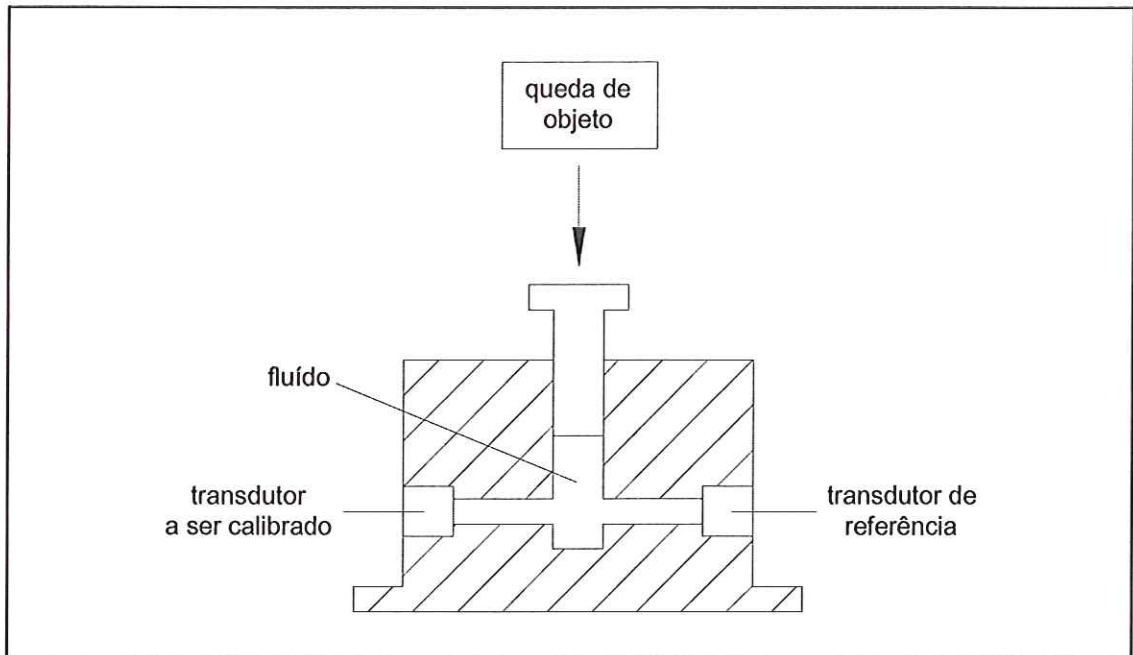


Figura 2.25 – Dispositivo tipo queda de peso.

Um outro dispositivo muito importante é o de disco de ruptura.

O gerador de pressão que usa disco de ruptura é constituído por uma câmara, na qual é instalado o transdutor a ser calibrado, com um fluido que é isolado da atmosfera ou de uma outra câmara separadas pelo disco de ruptura, figura 2.26. Ao aumentar a pressão na câmara, ocorre a ruptura do disco, liberando o fluido da câmara para a atmosfera ou para uma outra câmara, sendo então gerado um degrau de pressão com amplitude calculada.

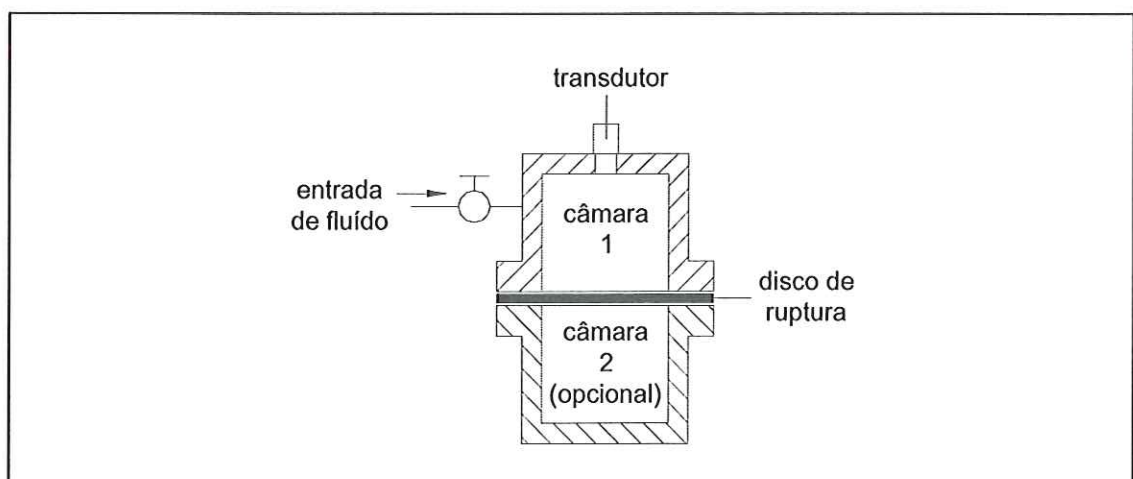


Figura 2.26 – Gerador de transiente tipo disco de ruptura.

Liu, Miller e Talnagi (2002) utilizaram duas câmaras, uma de alta pressão e uma de baixa pressão, separadas por um disco de ruptura de grafite e empregaram ar



como fluido. Fizeram uso de um sensor piezoelétrico como referência e um sensor de fibra óptica para ser calibrado. Concluíram que esse método pode ser aplicado para testar outros tipos sensores de pressão, com resposta dinâmica rápida e constante de tempo da ordem de milisegundos ou maior.

Neste trabalho, a metodologia escolhida é esta, isto é, um dispositivo foi construído e um disco (ou diafragma) é rompido para gerar a função tipo degrau.

## 2.5 MODELAGEM DINÂMICA DE TRANSDUTOR

A literatura indica que transdutores ou sistemas de medidas são geralmente projetados para terem uma calibração estática linear. No caso de transdutores de pressão, a determinação da sensibilidade (ganho K da função de transferência) é feita através de procedimento padrão amplamente divulgado e utilizado. Por ser este corriqueiro e comum, o enfoque deste trabalho recaiu somente na determinação das propriedades dinâmicas.

As características dinâmicas de um transdutor de pressão vão influir no comportamento de sua resposta em função do tempo, quando o mesmo é submetido à variações rápidas de pressão.

Para que seja feita uma especificação completa do seu comportamento dinâmico, é necessário que o transdutor de pressão seja descrito matematicamente como um sistema dinâmico.

Nos sistemas de medição, as propriedades de interesse geralmente resumem-se na relação saída/entrada, que ao receber um sinal de entrada (input), responde com uma saída (output). O sistema é então caracterizado através de uma função que relaciona o sinal de saída com a entrada do sistema.

Conforme o degrau de pressão teórico para a calibração de sensores (DINIZ; VIANNA; NEVES, 2003), os transdutores de pressão comportam-se, aparentemente, como sistemas de 2ª ordem, onde a função de transferência geral tem a forma:

$$\frac{Q_o}{Q_i}(s) = \frac{K}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n}s + 1} \quad (2.2)$$

onde:

$s$   $\triangleq$  variável de Laplace;

$Q_o(s)$   $\triangleq$  transformada de Laplace da saída;

$Q_i(s)$   $\triangleq$  transformada de Laplace da entrada;

$K$   $\triangleq$  ganho da função de transferência;

$\omega_n$   $\triangleq$  frequência natural não amortecida;

$\zeta$   $\triangleq$  fator de amortecimento.

Se pretende-se obter o modelo através de experimentos, vários tipos de testes podem ser realizados (DOEBELIN, 1980) como:

- Teste do Impulso;
- Teste da Entrada Degrau;
- Resposta em Frequência;
- Testes com Sinais Aleatórios.

Cada um dos métodos tem suas particularidades. O método adotado neste trabalho foi o da obtenção de um modelo matemático linear de 2ª ordem através de dados experimentais do Teste da Entrada Degrau.

A aplicação deste método baseia-se em dois procedimentos, um para sistema sub-amortecido e outro para sistema super-amortecido. Dependendo da resposta, se tem ou não “sobre-sinal” (overshoot), adota-se um ou outro encaminhamento.

### 2.5.1 Procedimento para sistemas sub-amortecidos

A função de transferência geral de um sistema de 2ª ordem pode também ser escrita como sendo:

$$\frac{q_o}{q_i}(D) = \frac{K}{\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} D + 1} \quad (2.3)$$

onde:

$D \triangleq$  operador derivador ( $D \triangleq d/dt$ );

$q_o(t) \triangleq$  saída do sistema, função do tempo;

$q_i(t) \triangleq$  entrada do sistema, função do tempo;

$K \triangleq$  ganho da função de transferência;

$\omega_n \triangleq$  frequência natural não amortecida;

$\zeta \triangleq$  fator de amortecimento.

Da função de transferência (2.3) pode-se obter a equação diferencial:

$$\frac{1}{\omega_n^2} D^2 q_o + \frac{2\zeta}{\omega_n} D q_o + q_o = K q_i \quad (2.4)$$

ou

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 q_o}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} \frac{dq_o}{dt} + q_o = K q_i \quad (2.5)$$

cuja solução é:

$$q_o = q_{oh} + q_{op} \quad (2.6)$$

onde:

$q_{oh} \triangleq$  solução da equação diferencial da homogênea;

$q_{op} \triangleq$  solução particular.

A equação diferencial homogênea é:

$$\left( \frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} D + 1 \right) q_o = 0 \quad (2.7)$$

que tem a equação característica :

$$\frac{D^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} D + 1 = 0 \quad (2.8)$$

cujas raízes  $s_1$  e  $s_2$  são:

$$s_1, s_2 = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (2.9)$$

Para o sistema sub-amortecido, isto é  $\zeta < 1$ , as raízes  $s_1$  e  $s_2$  são raízes complexas conjugadas.

Assim, determinando  $q_{oh}$  para este caso ( $\zeta < 1$ ), tem-se:

$$s_1, s_2 = -\zeta\omega_n \pm i\sqrt{1 - \zeta^2}\omega_n \quad (2.10)$$

que resulta em:

$$q_{oh} = e^{-\zeta\omega_n t} \left[ C_1 \operatorname{sen}(\sqrt{1 - \zeta^2}\omega_n t) + C_2 \cos(\sqrt{1 - \zeta^2}\omega_n t) \right] \quad (2.11)$$

ou

$$q_{oh} = A e^{-\zeta\omega_n t} \operatorname{sen}(\sqrt{1 - \zeta^2}\omega_n t + \phi) \quad (2.12)$$

onde:

$C_1, C_2, A$  e  $\phi$  são constantes.

Agora, para  $q_{op}$ , resposta à função degrau, faz-se a entrada  $q_i$  ser:

$$q_i = q_{is} u(t) \quad (2.13)$$

onde:

$$u(t) \triangleq \text{função degrau unitário} \Rightarrow \begin{cases} u(t)=0 \text{ para } t < 0 \\ u(t)=1 \text{ para } t > 0 \\ \text{não é definida para } t=0 \end{cases}$$

A figura 2.27 ilustra a função degrau unitário.

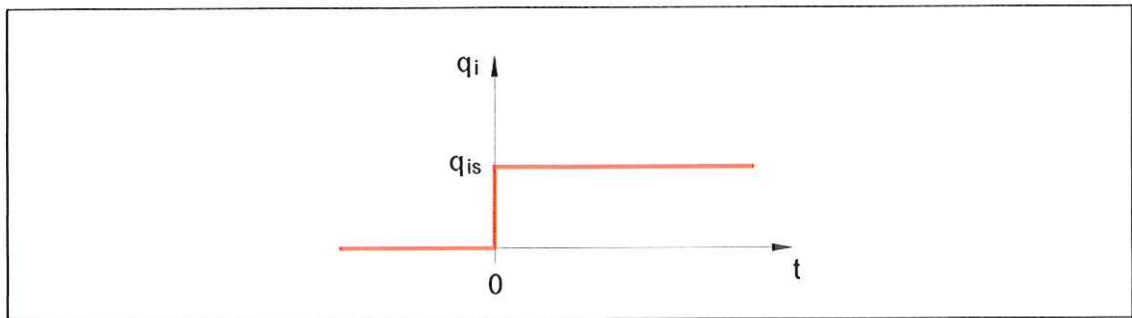


Figura 2.27 – Função degrau unitário.

Substituindo (2.13) em (2.5) obtém-se:

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 q_o}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} \frac{dq_o}{dt} + q_o = Kq_{is} \quad (2.14)$$

Da teoria de equação diferencial,  $q_{op}$  é uma constante, então:

$$q_{op} = a \quad (2.15)$$

Substituindo a equação (2.15) na (2.14), tem-se:

$$a = Kq_{is} \quad (2.16)$$

portanto:

$$q_{op} = Kq_{is} \quad (2.17)$$

Para obter-se  $q_o$ , combina-se (2.6), (2.12) e (2.17), como segue:

$$q_o = Ae^{-\zeta\omega_n t} \text{sen}\left(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t + \phi\right) + Kq_{is} \quad (2.18)$$

e, a derivada de  $q_o$  fica:

$$\dot{q}_o = -A\zeta\omega_n e^{-\zeta\omega_n t} \text{sen}\left(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t + \phi\right) + Ae^{-\zeta\omega_n t} \sqrt{1-\zeta^2}\omega_n \cos\left(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t + \phi\right) \quad (2.19)$$

Para as condições iniciais  $q(0^+) = 0$  e  $\dot{q}(0^+) = 0$ , então:

$$0 = A \text{sen } \phi + Kq_{is} \quad (2.20)$$

e

$$0 = -A\zeta\omega_n \text{sen } \phi + A\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n \cos \phi \quad (2.21)$$

Da equação (2.21), tem-se:

$$\frac{\text{sen } \phi}{\cos \phi} = \text{tg } \phi = \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \quad (2.22)$$

Definindo  $h$  como sendo a hipotenusa de um triângulo de lados  $\sqrt{1-\zeta^2}$  e  $\zeta$ , então:

$$h = \sqrt{\left(\sqrt{1-\zeta^2}\right)^2 + \zeta^2} = \sqrt{1-\zeta^2 + \zeta^2} = 1 \quad (2.23)$$

portanto:

$$\text{sen } \phi = \sqrt{1-\zeta^2} \quad (2.24)$$

então:

$$\phi = \arcsen(\sqrt{1-\zeta^2}) \quad (2.25)$$

Substituindo (2.24) em (2.20), obtem-se:

$$A = \frac{-Kq_{is}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.26)$$

Agora, substituindo (2.25) e (2.26) na equação (2.18), resulta:

$$q_o = Kq_{is} \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sen(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t + \arcsen\sqrt{1-\zeta^2}) \right] \quad (2.27)$$

Os valores de  $\zeta$  e  $\omega_n$ , são obtidos através da resposta transitória do sistema de 2ª ordem.

Na prática, quando se observa a resposta transitória de um sistema de controle, esta apresenta-se com oscilações amortecidas antes de alcançar o regime estacionário, conforme mostra a curva de resposta ao degrau unitário da figura 2.28, onde tem-se alguns parâmetros definidos.

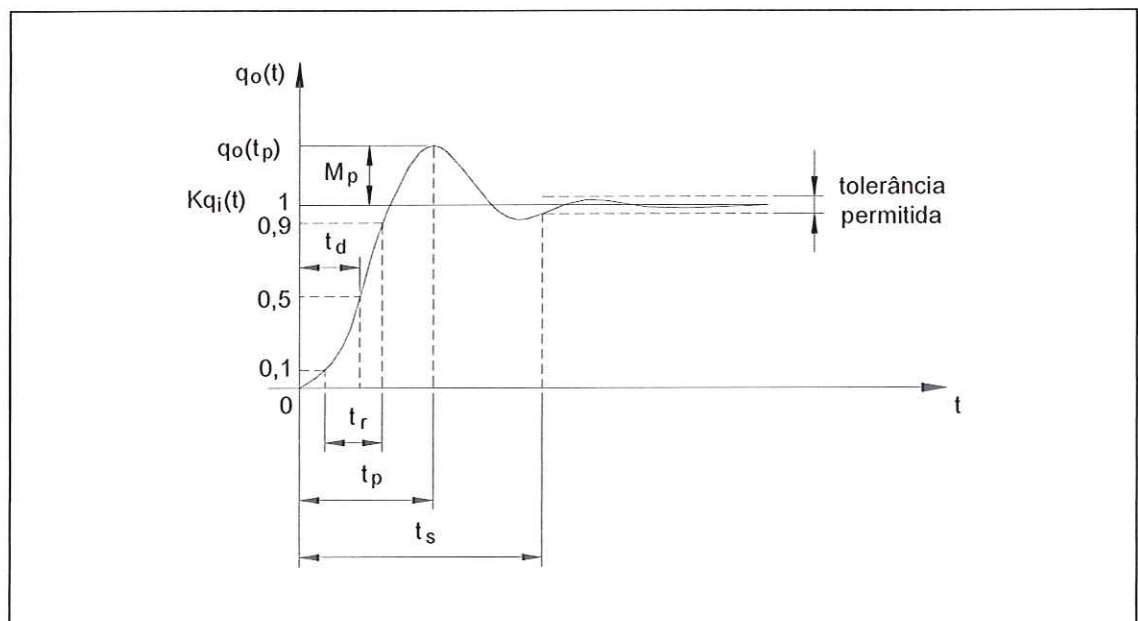


Figura 2.28- Curva de resposta a degrau unitário com especificação de parâmetros.

onde:

$M_p$  = sobre-sinal máximo;

$t_d$  = tempo de atraso;

$t_r$  = tempo de subida;

$t_p$  = instante de pico;

$t_s$  = tempo de acomodação.

Através da resposta obtida experimentalmente é possível determinar o máximo sobre-sinal percentual que é dado por:

$$M_p(\%) = \frac{q_o(t_p) - Kq_i(t)}{Kq_i(t)} \cdot 100 \quad (2.28)$$

Através do valor de  $M_p$  pode-se determinar o valor de  $\zeta$ , utilizando o gráfico (OGATA, 1982) da figura 2.29.

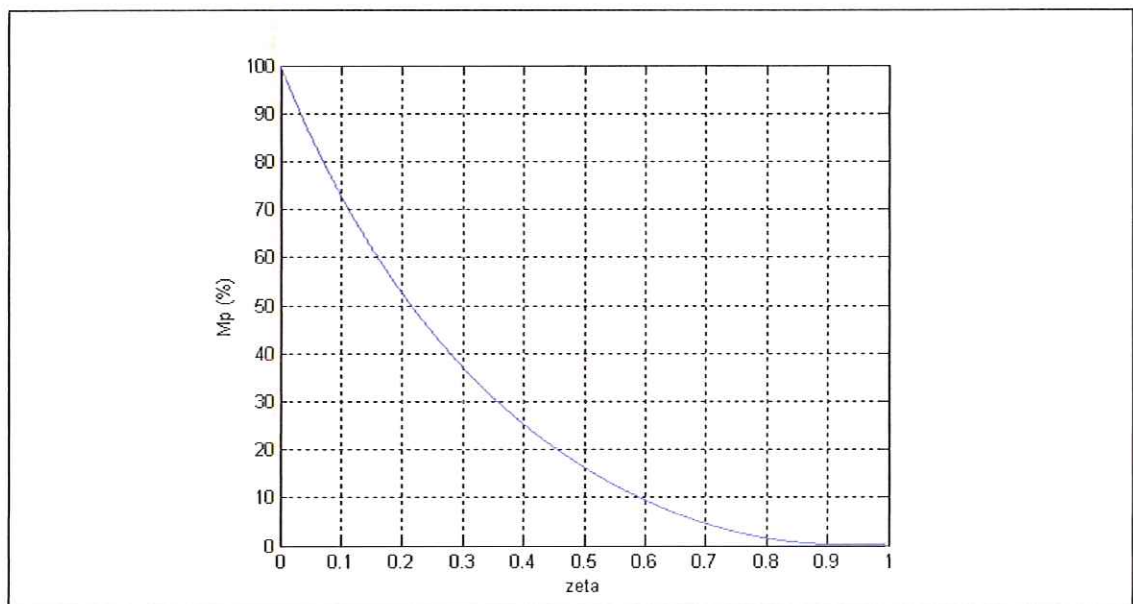


Figura 2.29 – Curva de  $M_p$  percentual em função de  $\zeta$ .

Como o instante do pico  $t_p$  corresponde ao primeiro pico do sobre-sinal, pode-se determinar o valor de  $\omega_n$  através de:

$$\omega_n = \frac{\pi}{t_p \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.29)$$



### 2.5.2 Procedimento para sistemas super-amortecidos

Nos sistemas super-amortecidos a resposta transitória não apresenta oscilações. Este sistema pode ser dividido (fatorado) em dois sistemas de 1ª ordem cuja função de transferência tem a forma:

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.30)$$

onde:

$Q_o(s)$   $\hat{=}$  transformada de Laplace da saída;

$Q_i(s)$   $\hat{=}$  transformada de Laplace da entrada;

$s$   $\hat{=}$  variável de Laplace;

$K$   $\hat{=}$  ganho da função de transferência;

$\tau$   $\hat{=}$  constante de tempo.

Assim, combinando dois sistemas de 1ª ordem, o sistema de 2ª ordem super-amortecido pode ser representado na forma de diagrama de blocos, figura 2.30.

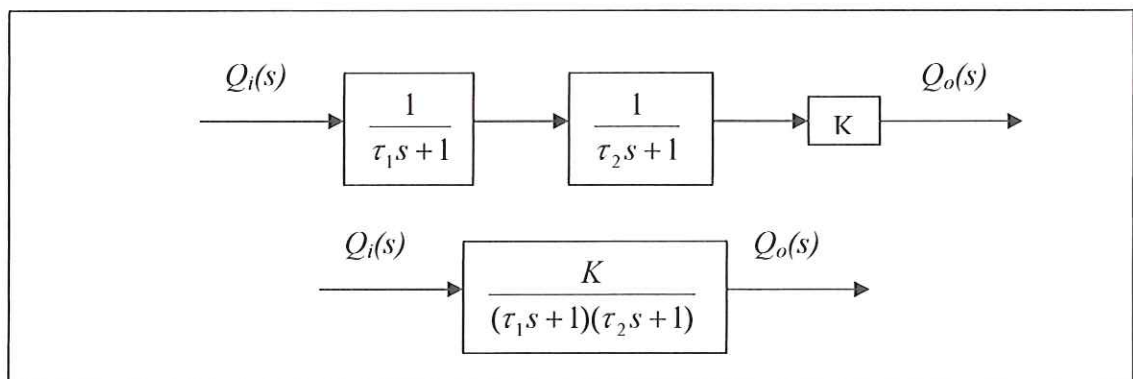


Figura 2.30 – Sistema de 2ª ordem super-amortecido na forma de diagrama.

Do diagrama de blocos pode-se escrever que:

$$Q_o(s) = FT \cdot Q_i(s) \quad (2.31)$$

onde:

$$FT \triangleq \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}; \text{ função de transferência.}$$

Para uma entrada degrau, a saída  $Q_o(s)$  fica:

$$Q_o(s) = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \cdot \frac{1}{s} \quad (2.32)$$

ou

$$Q_o(s) = \frac{k}{s(s+a)(s+b)} \quad (2.33)$$

onde:

$$a \triangleq \frac{1}{\tau_1};$$

$$b \triangleq \frac{1}{\tau_2};$$

$$k \triangleq \frac{K}{\tau_1 \tau_2} = Kab.$$

Agora, aplicando a transformada inversa de Laplace em (2.33), obtem-se:

$$q_o(t) = k \frac{1}{ab} \left[ 1 + \frac{1}{a-b} (be^{-at} - ae^{-bt}) \right] \quad (2.34)$$

Adotando  $k \frac{1}{ab} = Vf$ , que é o valor final da resposta  $q_o(t)$  devido à entrada

degrau, tem-se:

$$q_o(t) = Vf \left[ 1 + \frac{b}{a-b} e^{-at} - \frac{a}{a-b} e^{-bt} \right] \quad (2.35)$$

Definindo:

$$\frac{a}{a-b} \triangleq C \quad (2.36)$$

Então, observa-se que  $1-C$  pode ser escrito como sendo:

$$1-C = 1 - \frac{a}{a-b} = \frac{a-b-a}{a-b} = -\frac{b}{a-b} \quad (2.37)$$

$$\therefore -(1-C) = \frac{b}{a-b} \quad (2.38)$$

Assim, substituindo (2.36) e (2.38) em (2.35), obtém-se:

$$q_o(t) = Vf - Vf(1-C)e^{-at} - VfCe^{-bt} \quad (2.39)$$

E, finalmente, chega-se em:

$$q_o(t) = Vf - Vf(1-C)e^{-\left(\frac{1}{\tau_1}\right)t} - VfCe^{-\left(\frac{1}{\tau_2}\right)t} \quad (2.40)$$

Os valores das constantes da função resposta teórica (2.40), podem ser obtidos de forma semelhante ao método da resposta transitória para sistemas de 1ª ordem. A figura 2.31 mostra a representação de uma curva de resposta obtida experimentalmente de um sistema de 1ª ordem, à uma entrada degrau  $q_i(t)$ .

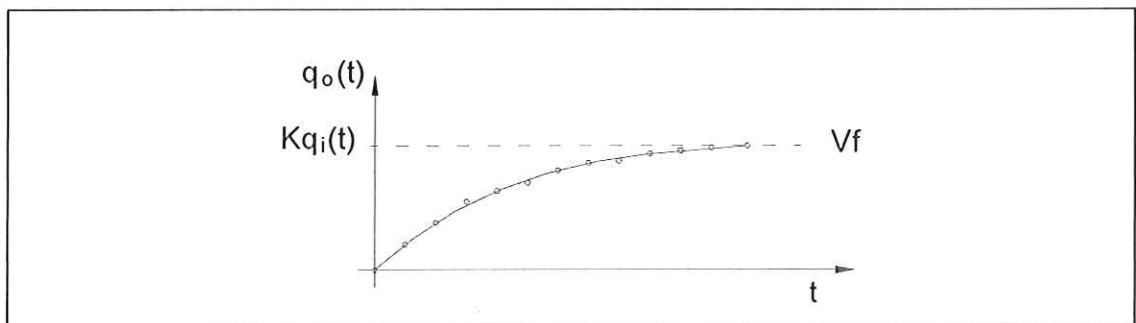


Figura 2.31 – Representação de uma curva de resposta ao degrau  $q_i(t)$  de um sistema de 1ª ordem obtida experimentalmente.

Através do gráfico da curva de resposta de um sistema de 1ª ordem em escala logarítmica encontra-se o valor de  $\tau$ , como pode ser observado na figura 2.32.

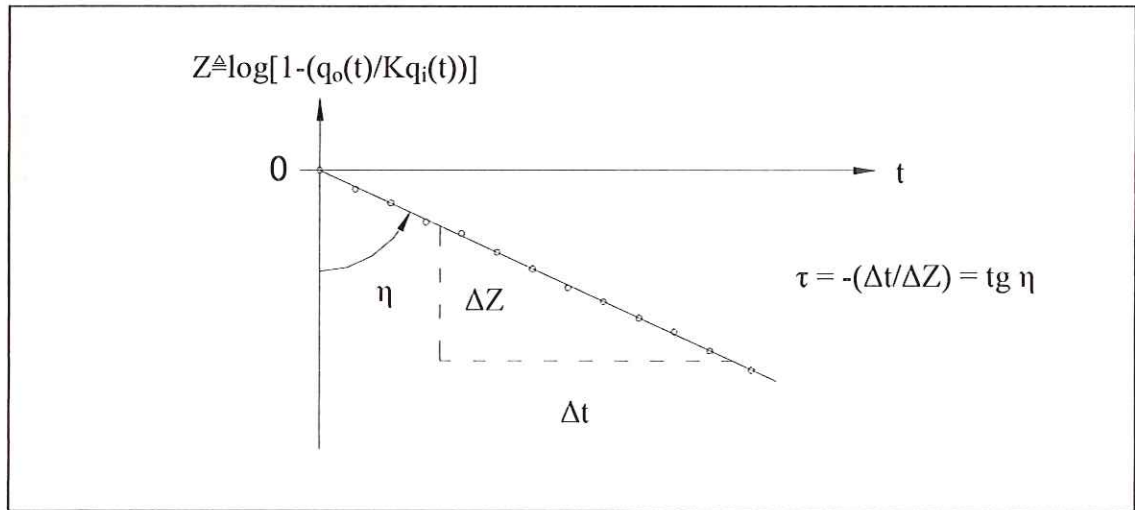


Figura 2.32 – Curva de resposta de um sistema de 1ª ordem em escala logarítmica.

Então, para a curva do sistema de 2ª ordem super-amortecido, aplica-se duas vezes este procedimento.

A figura 2.33 mostra a representação de uma curva de resposta obtida experimentalmente de um sistema de 2ª ordem super-amortecido, à uma entrada degrau  $q_i(t)$ .

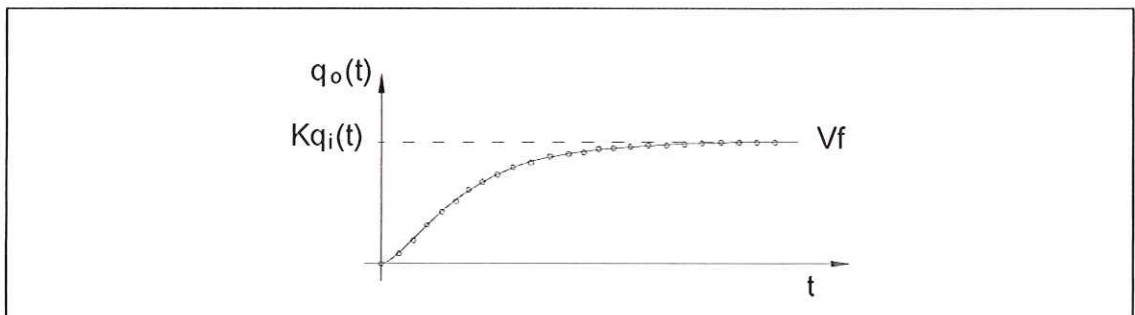


Figura 2.33 – Representação de uma curva de resposta ao degrau  $q_i(t)$  de um sistema de 2ª ordem super-amortecido obtida experimentalmente.

A equação característica dos sistemas de 2ª ordem super-amortecidos possui duas raízes reais negativas  $r_1$  e  $r_2$ , implicando em exponenciais decrescentes.

A raiz  $r_1$  possui bastante influência no início da resposta e decai rapidamente com o aumento do tempo  $t$  e então predomina apenas a raiz  $r_2$  que no início contribui pouco.

Sabendo que  $Vf = Kq_i(t)$ , para obter os valores de  $\tau_1, \tau_2 \in C$ , traça-se o

gráfico da figura 2.33 em escala logarítmica e passa-se uma reta entre os pontos do início do gráfico e outra nos pontos finais do gráfico, regiões onde predominam respectivamente as raízes, figura 2.34.

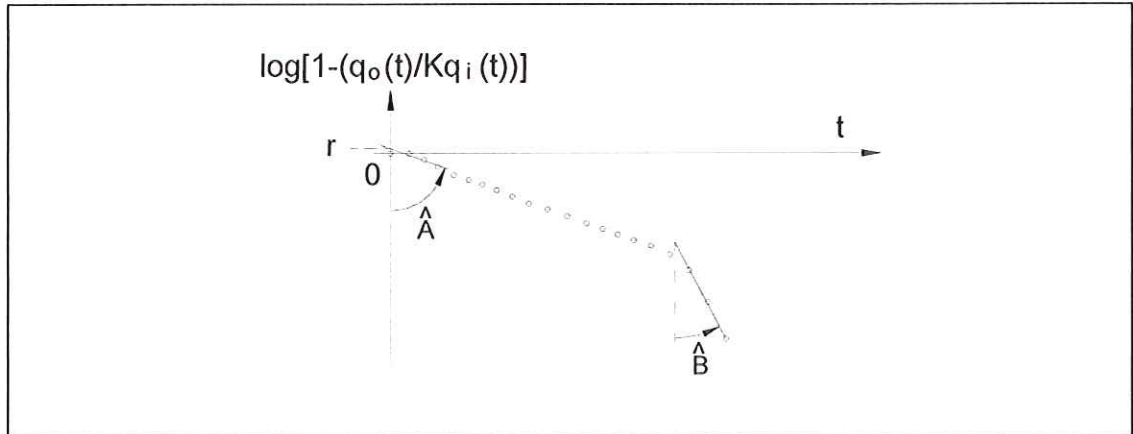


Figura 2.34 – Curva de resposta de um sistema de 2ª ordem super-amortecido em escala logarítmica.

O valor de  $\tau_1$  é a tangente do ângulo  $\hat{A}$ , ou seja:

$$\operatorname{tg}\hat{A} = \tau_1 \quad (2.41)$$

O valor de  $\tau_2$  é a tangente do ângulo  $\hat{B}$ , isto é:

$$\operatorname{tg}\hat{B} = \tau_2 \quad (2.42)$$

Prolongando a reta que forma o ângulo  $\hat{A}$ , esta cruzará o eixo das ordenadas em um ponto cujo valor é:

$$r = \ln(Vf - C) \quad (2.43)$$

Da equação 2.43 é possível encontrar o valor de  $C$ , ou seja:

$$C = Vf - e^r \quad (2.44)$$

### 3 OBJETIVO

Para que as medições realizadas com transdutores de pressão sejam sempre confiáveis, é necessário verificar periodicamente as suas características através de calibrações dos instrumentos.

O processo de calibração deve ser feito em um sistema que reproduza as mesmas condições ou mais severas que as que o transdutor irá ser solicitado, para se saber se ocorreram alterações em suas características tanto devido a distúrbios como pelo mau uso.

Se o processo de calibração for sofisticado e de alto custo, este significará um fator desencorajador para as suas realizações freqüentes.

Assim, dois principais motivos influenciaram na determinação do direcionamento desta pesquisa. O primeiro deve-se ao fato da grande maioria dos métodos de calibração exigir um sistema de medição adicional contendo um transdutor de referência. O segundo é que pode-se constatar que existem poucos trabalhos nesta área que possuam um procedimento experimental simples e de baixo custo econômico.

Portanto, este trabalho tem como objetivo desenvolver um gerador de pressão transiente, com baixo custo de fabricação e de fácil operação, capaz de produzir um sinal do tipo degrau para que seja determinado, através de uma modelagem matemática, as principais características dinâmicas de transdutores de pressão.

Especificamente, propôs-se ensaiar dois transdutores do tipo piezorresistivo.

O sistema de calibração usado neste trabalho é constituído basicamente por um gerador de pressão do tipo degrau, obtido através da ruptura de um diafragma, e, por componentes hidráulicos comuns, que estão disponíveis no Laboratório de Dinâmica do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos.

O gerador de pressão tipo degrau deverá fornecer um sinal que seja confiável, para que possa ser utilizado em procedimentos de modelagem dinâmica.

Com a realização dos ensaios e a obtenção de dados da resposta do transdutor de pressão, devido à entrada degrau, a modelagem matemática será realizada através dos dados experimentais. A finalidade desta é encontrar a parte dinâmica de uma função de transferência linear do sistema de medição. Após a obtenção da função de transferência, as respostas teóricas dos modelos serão comparadas com as respostas experimentais para a validação do modelo matemático.

Como último objetivo, pretende-se discutir os resultados fazendo uma avaliação do processo de calibração proposto, juntamente com os procedimentos de modelagem adotados.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 COMPONENTES EXPERIMENTAIS

O sistema de calibração é composto basicamente pelo gerador de pressão, por um sistema hidráulico comum e pelo transdutor a ser calibrado.

O transdutor a ser calibrado é montado na câmara de pressão do gerador com seu elemento sensível faceando a superfície lateral interna da cavidade da câmara, ficando o mesmo em contato com o fluido de calibração. O controle da pressão da entrada é feito através do sistema hidráulico.

Além desses equipamentos, o sistema de calibração utiliza um conjunto de aquisição de dados constituído por um micro-computador com uma placa de aquisição de dados, que é responsável pela coleta.

O sistema de calibração está representado esquematicamente na figura 4.1.

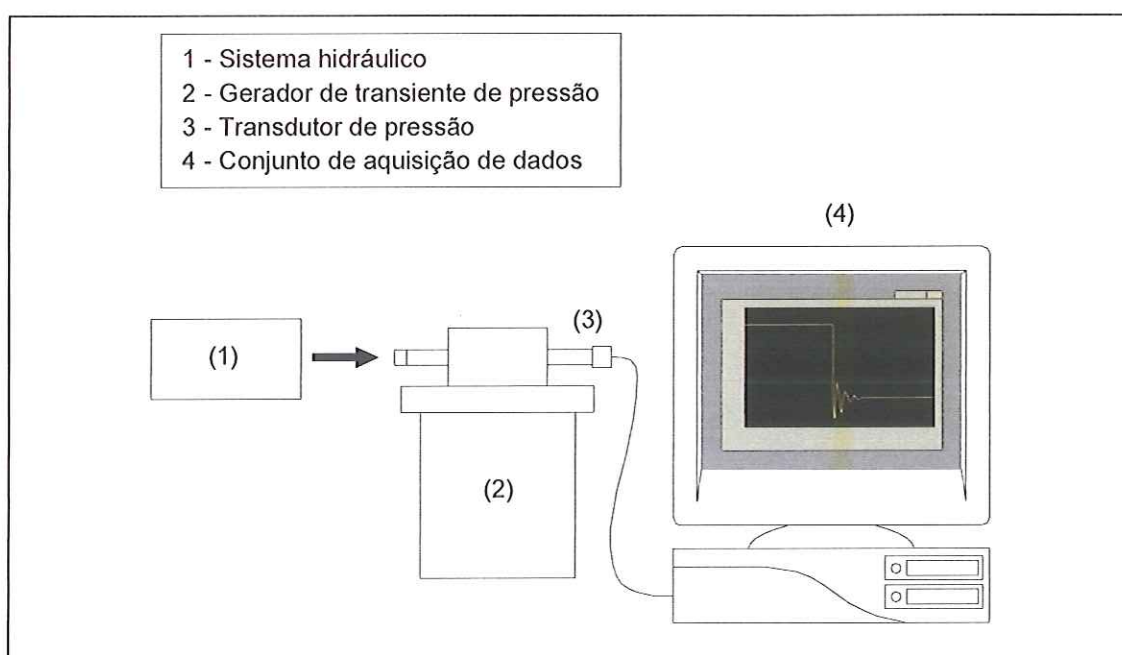


Figura 4.1 - Esquema do sistema de calibração.



#### 4.1.1 Gerador de pressão

O gerador de pressão desenvolvido é do tipo aperiódico e será utilizado em ensaios de calibração de transdutores de pressão no domínio do tempo. O seu projeto tem como base os geradores que utilizam disco de ruptura, dispositivo de abertura rápida e bomba fechada. O gerador será o responsável por fornecer o degrau negativo de pressão, necessário para a realização dos experimentos.

O gerador aperiódico é constituído por um dispositivo de construção simples, com baixo custo de fabricação e de operação, que foi fabricado nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC.

O dispositivo é totalmente fabricado em aço carbono SAE 1020 com altura de 308mm e diâmetro de 256mm, o qual é formado basicamente por duas partes: a câmara de pressão e a câmara de retorno de fluido.

A câmara de pressão foi projetada para suportar pressões superiores a 1000psi (apêndice A) e é composta por uma barra com uma cavidade interna, que é preenchida por um fluido hidráulico, e por duas conexões, que conduzem à esta cavidade. Uma conexão é utilizada para instalação do transdutor a ser calibrado e a outra para a entrada de fluido. O fluido é isolado da pressão atmosférica através de um disco de ruptura que é fixado por um flange e parafusos, figura 4.2.

A câmara de retorno é composta por um tubo que é fixado à um fundo através de solda. No fundo há um cone metálico com a função de desviar as ondas de eco para a lateral do tubo. Na parte superior, há um suporte para conexão do tubo à câmara de pressão. Um furo com tampão na lateral do tubo é usado para escoar o óleo e fazer o seu retorno ao sistema. Este tubo é revestido internamente com uma espuma para prevenir contra ecos. As faces do suporte possuem borrachas para amortecer o impacto gerado pela ruptura do disco.

A conexão entre as duas câmaras é feita através do flange de fixação do disco de ruptura, o qual contém vários furos com o intuito de manter a pressão atmosférica na câmara de retorno. Este flange é fixado no suporte da câmara de retorno.

O desenho do gerador de transiente de pressão (figura 4.2) mostra em corte, as suas dimensões principais, as indicações do ponto de entrada de fluido, a montagem do transdutor a ser calibrado e também as câmaras de pressão e retorno de fluido.

A figura 4.3 mostra uma foto do gerador de pressão.

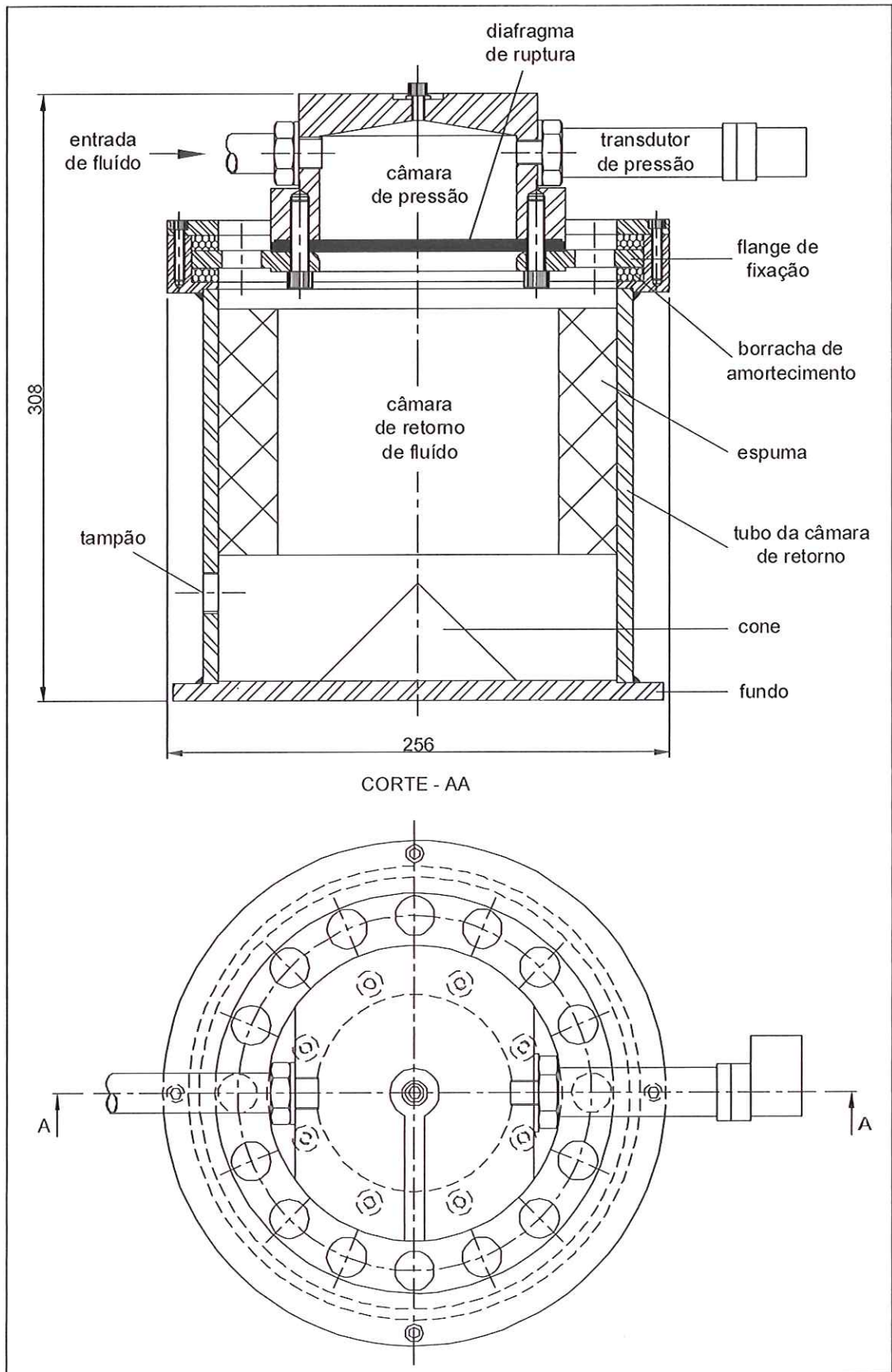


Figura 4.2 - Gerador de transiente de pressão tipo degrau.



Figura 4.3 – Foto do gerador de transiente de pressão.

O dimensionamento do disco de ruptura deve ser feito verificando as tensões radial e tangencial.

A tensão radial é calculada através de:

$$\sigma_r = \left(\frac{3}{8}\right)\left(\frac{a}{t}\right)^2 P \left[ (3 + \mu)\left(\frac{r}{a}\right)^2 - (1 + \mu) \right] \quad (4.1)$$

A máxima tensão radial ocorre quando  $r = a$  (BECKWITH; BUCK, 1965), então:

$$\sigma_r = \sigma_{r\max} = \left(\frac{3}{4}\right)\left(\frac{a}{t}\right)^2 P \quad (4.2)$$

Para a tensão tangencial, esta é calculada através de:

$$\sigma_t = \left(\frac{3}{8}\right)\left(\frac{a}{t}\right)^2 P \left[ (1 + \mu) - (1 + 3\mu)\left(\frac{r}{a}\right)^2 \right] \quad (4.3)$$

A máxima tensão tangencial ocorre quando  $r = 0$  (BECKWITH; BUCK, 1965), assim obtem-se:

$$\sigma_r = \sigma_{r_{\max}} = \left(\frac{3}{8}\right)\left(\frac{a}{t}\right)^2 P(1 + \mu) \quad (4.4)$$

onde:

$\sigma_r$   $\triangleq$  tensão radial no diafragma;

$\sigma_t$   $\triangleq$  tensão tangencial no diafragma;

$\sigma_{rp}$   $\triangleq$  tensão de ruptura do material;

$\mu$   $\triangleq$  coeficiente de Poisson;

$a$   $\triangleq$  raio do diafragma;

$r$   $\triangleq$  raio de cálculo da tensão;

$P$   $\triangleq$  pressão;

$t$   $\triangleq$  espessura do diafragma.

Nesse trabalho foram calculados discos de ruptura em aço SAE 1020 para romper com 900, 650 e 400psi. A seguir estão resultados dos cálculos para encontrar a espessura dos respectivos discos:

Dados:

$$\sigma_{rp} \triangleq 58015 \text{ psi}$$

$$\mu \triangleq 0,3$$

$$a \triangleq 1,97''$$

(1) Diafragma para pressão de 900psi:

Para tensão radial  $\Rightarrow t = 0,212''$

Para tensão tangencial  $\Rightarrow t = 0,171''$

Portanto, foi adotado  $t = 5,38 \text{ mm}$  (tensão radial)

(2) Diafragma para pressão de 650psi:

Para tensão radial  $\Rightarrow t = 0,181''$

Para tensão tangencial  $\Rightarrow t = 0,146''$

Portanto, foi adotado  $t = 4,6$  mm (tensão radial)

(3) Diafragma para pressão de 400psi:

Para tensão radial  $\Rightarrow t = 0,142''$

Para tensão tangencial  $\Rightarrow t = 0,114''$

Portanto, foi adotado  $t = 3,6$  mm (tensão radial)

Nos ensaios exploratórios notou-se que os discos de aço SAE 1020 proporcionavam rupturas lentas, fazendo o óleo escoar através de pequenas rachaduras. Isto mostrou a necessidade de mudar o material para material frágil e não dúctil.

Por dificuldade de encontrar material metálico de alta fragilidade e optar por explosões mais baixas e com ar, o disco de ruptura utilizado nos testes foram discos de acrílico com 3mm de espessura e oito furos equidistantes para fixação. A figura 4.4 mostra o disco de bronze e o de acrílico.

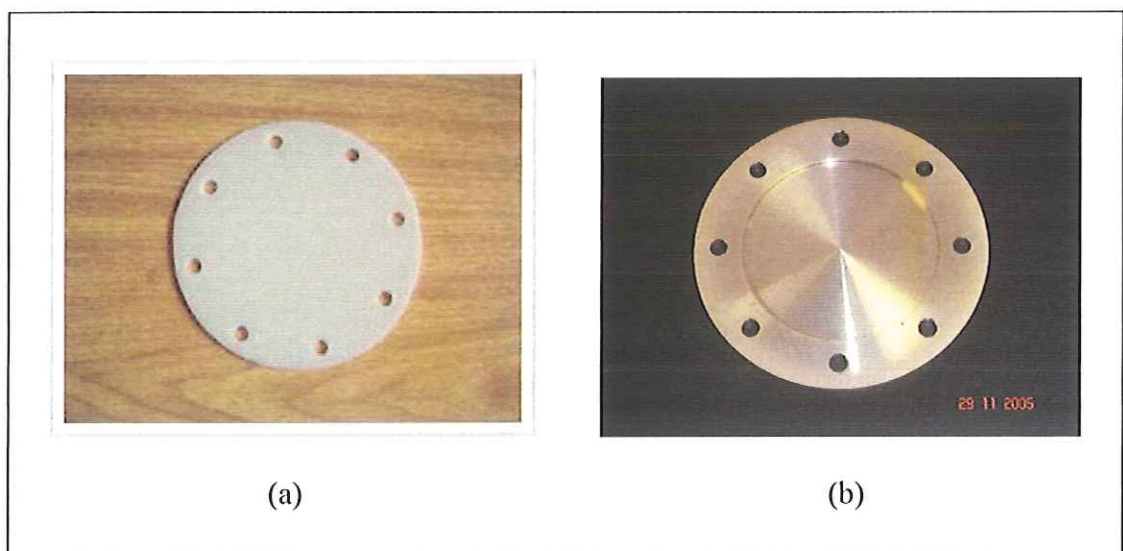


Figura 4.4 – Discos de ruptura: a) disco de acrílico; b) disco de bronze.

#### 4.1.2 Sistema hidráulico

O sistema hidráulico usado está representado na figura 4.5.

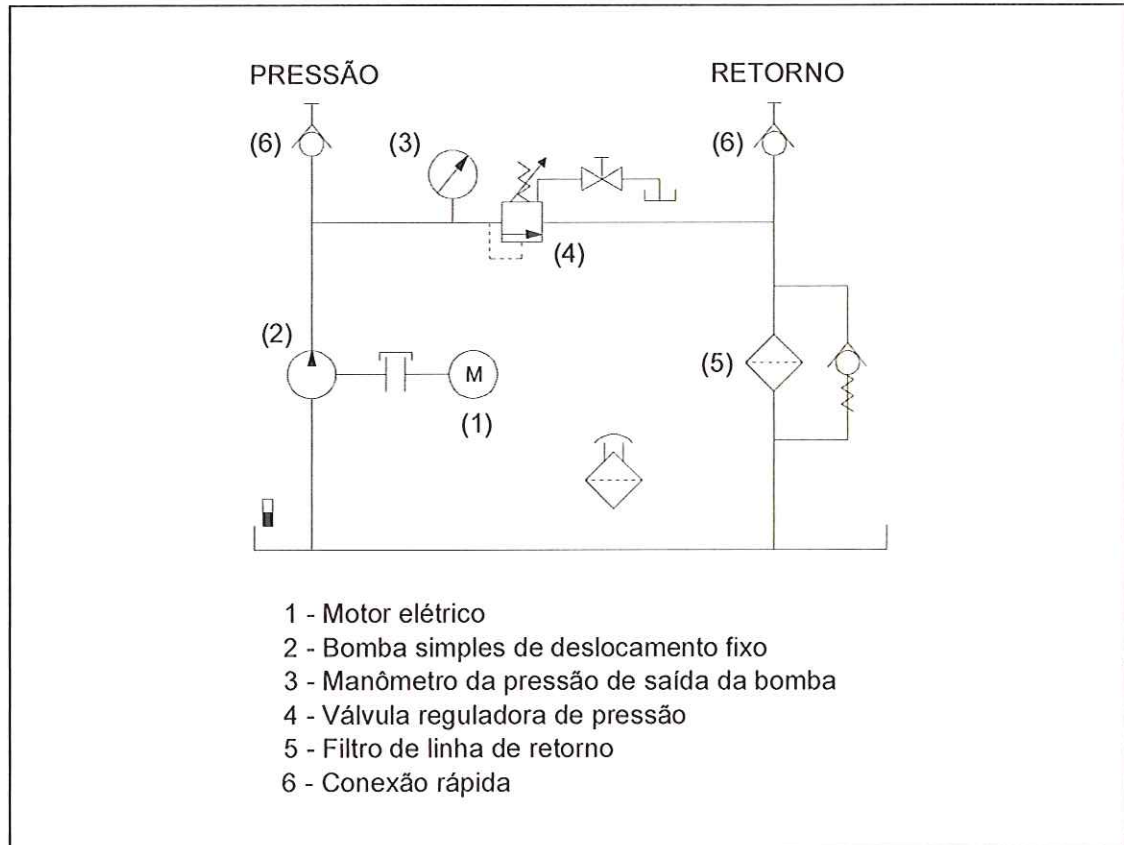


Figura 4.5 - Sistema hidráulico – unidade hidráulica fornecedora de pressão.

Com o acionamento do motor elétrico (1), o óleo é bombeado do tanque para o circuito através da bomba (2). A regulação da pressão é feita pela válvula (4) e o seu valor pode ser observado no manômetro (3). Quando a pressão do circuito excede a de regulação, a válvula (4) direciona o óleo para o tanque. O circuito possui uma linha de pressão, com a pressão máxima regulada pela válvula (4) e a linha de retorno de óleo com um filtro externo.

Esse sistema hidráulico é o responsável pelo fornecimento da pressão de entrada do sistema de calibração.

O fluido utilizado no sistema hidráulico é o óleo hidráulico IPITUR AW 32 da Ipiranga.

### 4.1.3 Transdutores de pressão

Os transdutores de pressão utilizados neste trabalho são do tipo piezorresistivos e são apresentados na figura 4.6. Um deles é modelo PLN-2 / PSI-420 de fabricação Zürich e o outro é o modelo AKS 33 de fabricação Danfoss.

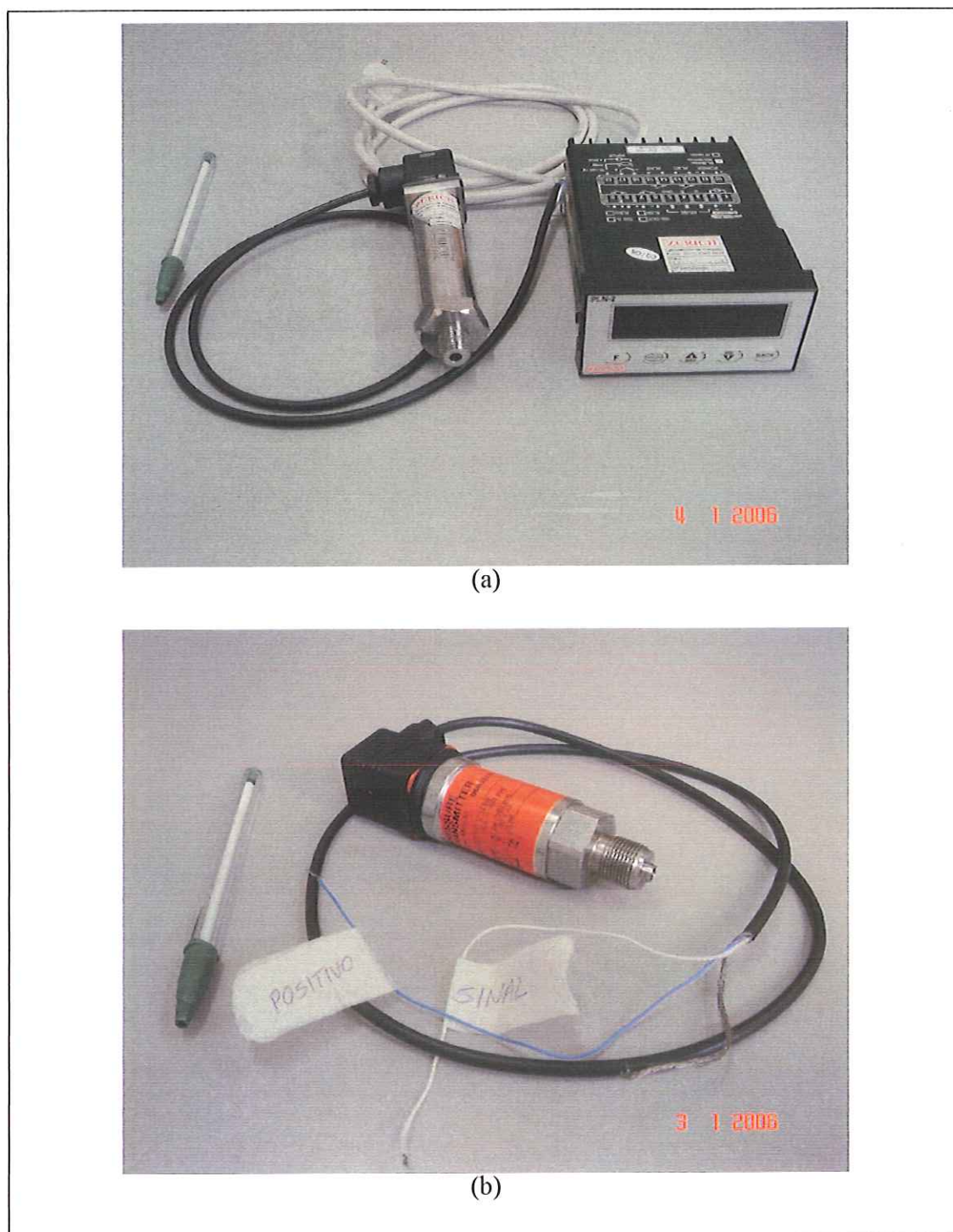


Figura 4.6 – a) Transdutor de pressão piezorresistivo modelo PLN-2 / PSI-420;  
b) Transdutor de pressão piezorresistivo modo AKS 33.

#### 4.1.4 - Conjunto de aquisição de dados

O micro-computador utilizado possui um processador AMD Athlon (tm) XP 1800 de 1,53GHz, 256MB de memória RAM e HD de 40GB.

O software utilizado é o LabView 7.1 da National Instruments, com um programa feito especialmente para este trabalho (apêndice B).

A placa de aquisição de dados é o modelo NI-DAQmx – NI PCI-6024E da National Instruments.

A figura 4.7 mostra a tela principal do programa desenvolvido para a aquisição de dados, mostrando os parâmetros de aquisição.

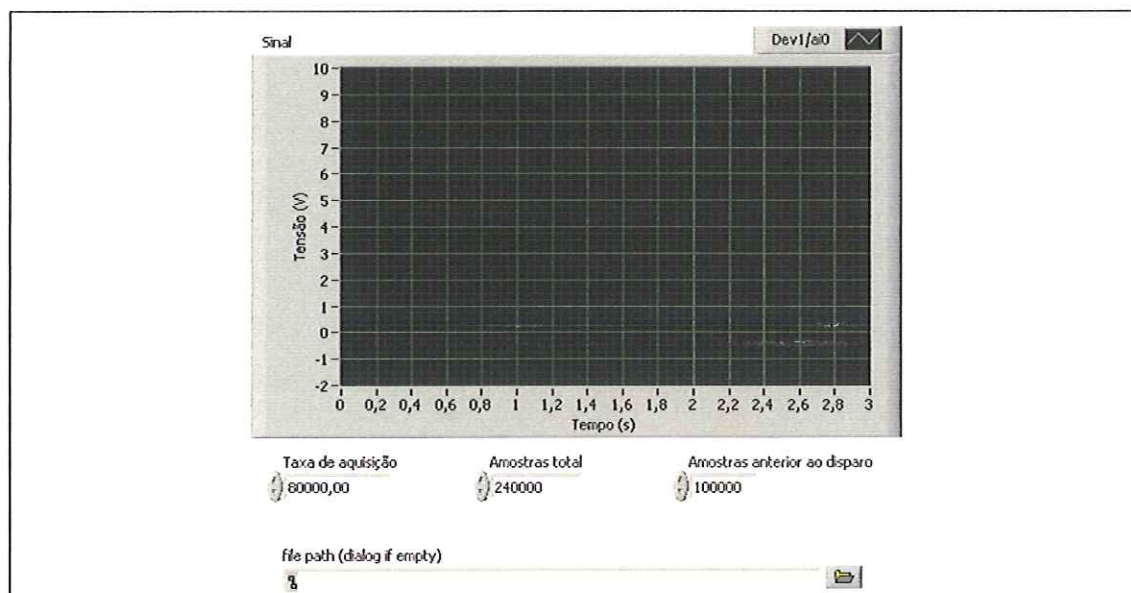


Figura 4.7 – Tela principal do sistema de aquisição mostrando os parâmetros de aquisição.

## 4.2 AMOSTRAGEM

O processo de amostragem é utilizado para gerar um sinal discreto em função do tempo, para ser manipulado em computador, a partir de um sinal contínuo.

Para a análise do sinal é necessário determinar as frequências de trabalho, de corte e de aquisição de dados.

### 4.2.1 Determinação da frequência da variação da pressão

A frequência da variação da pressão (frequência de trabalho) pode ser determinada a partir do tempo de duração do transiente de pressão e do número de



ciclos que ocorrem neste período.

Com base no trabalho de Smith (1964), que utilizou um dispositivo de abertura rápida, usando óleo como fluido para gerar um degrau de pressão, e também nos trabalhos da revisão bibliográfica, adotou-se que o transiente de pressão para uma entrada degrau dura aproximadamente  $t = 2\text{ms}$  (milissegundos).

A resposta típica de um transdutor de pressão para uma entrada degrau é um sistema de segunda ordem e possui aproximadamente dois ciclos até estabilizar a pressão (BEAN, 1993) e (DINIZ; VIANNA; NEVES; 2003), então adotou-se um amortecimento de  $\zeta=0,3$  na curva de resposta a degrau unitário para sistemas de segunda ordem, o qual atinge o valor final de estabilidade próximo de  $\omega_n t = 11$  (rad/s)·s. Pela curva do módulo, para  $\zeta=0,3$ , o sinal praticamente termina em  $\omega/\omega_n=3$ .

Em função dos parâmetros acima, pode-se estimar a frequência de trabalho:

$$\omega_n = \frac{\omega_n t}{t} \quad (4.5)$$

Agora, substituindo os dados em (4.5), tem-se:

$$\omega_n = \frac{11}{2 \times 10^{-3}} \Rightarrow \omega_n = 5500 \text{ rad/s}$$

como:

$$\frac{\omega}{\omega_n} = 3 \quad (4.6)$$

Então, substituindo os dados em (4.6), obtém-se:

$$\omega = 16500 \text{ rad/s} = 2626,057\text{Hz}$$

Logo, a frequência adotada é de: 2,5kHz.

#### 4.2.2 Determinação da frequência de corte do filtro analógico

É sempre recomendável ter-se um filtro analógico antes da placa de

aquisição digital.

A frequência de corte deste filtro é calculada em função da frequência de trabalho, de tal forma que o sinal não perca o seu conteúdo.

Neste trabalho adotou-se uma frequência de corte de 5kHz, que é duas vezes maior que a frequência de trabalho, para obter uma resposta plana do filtro até o fim da faixa da frequência de trabalho.

#### 4.2.3 Determinação da taxa de aquisição

A taxa de aquisição é a quantidade de amostras do sinal por segundo. Para atender o critério de NYQUIST e não ocorrer dobra espectral “aliasing”, que ocasiona erro no sinal medido, é necessário que a taxa de aquisição seja, no mínimo, duas vezes maior que a frequência de corte do sinal.

No cálculo da taxa de aquisição utilizou-se a frequência de trabalho de 2,5kHz, o número de ciclos do transiente até estabilizar na pressão final, neste caso 2 ciclos, e a frequência de corte de 5kHz.

Adotou-se a taxa de aquisição de 80kHz, a qual é dezesseis vezes maior que a frequência de corte, respeitando assim o critério de NYQUIST para que não ocorra “aliasing”. Como supôs-se que o tempo de duração do transiente é de 2ms, então:

$$x = f_a \cdot t \quad (4.7)$$

onde:

$x$  ≙ número previsto de amostras do transiente;

$f_a$  ≙ frequência de aquisição ( $f_a=80\text{kHz}$ );

$t$  ≙ tempo de duração do transiente de pressão ( $t=2 \times 10^{-3}\text{s}$ ).

Agora, substituindo os dados em (4.7), tem-se:

$$x = 80000 \cdot 0,002 \Rightarrow x = 160 \text{ amostras}$$

Como espera-se que o transiente tenha aproximadamente 2 ciclos, tem-se a

previsão:

$$x_c = \frac{x}{2} \quad (4.8)$$

onde:

$x_c \triangleq$  número de amostras por ciclo do transiente.

Então, substituindo os dados em (4.8), obtem-se:

$$x_c = \frac{160}{2} \Rightarrow x_c = 80 \text{ amostras/ciclo}$$

Como foi visto anteriormente, neste trabalho será gerado um transiente de pressão para a modelagem do transdutor. Para isso, é necessário verificar a capacidade de resposta a um transiente, isto é, a quantidade de sinal contido na faixa da frequência de trabalho, que pode ser observado através de uma modelagem matemática.

Com esse objetivo foi feita uma modelagem matemática para um pulso retangular (figura 4.8) e para meia onda senoidal (figura 4.10).

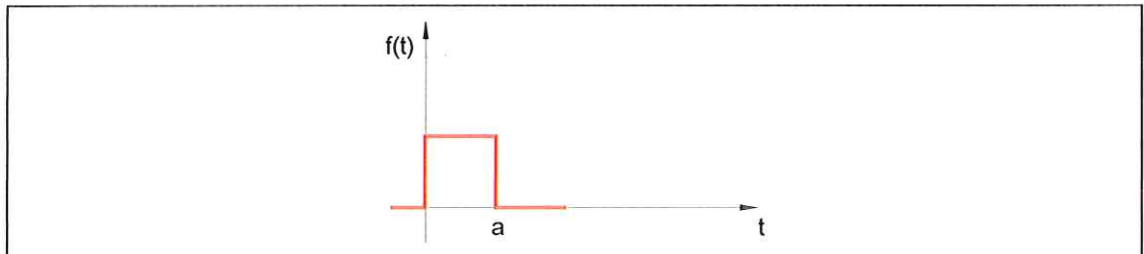


Figura 4.8 - Função pulso retangular.

O pulso retangular da figura 4.8 pode ser escrito como sendo:

$$f(t) = u(t) - u(t - a) \quad (4.9)$$

Aplicando a transformada de Laplace, como  $\mathcal{L}[u(t)] = 1/s$  e  $\mathcal{L}[u(t-a)] = e^{-as}/s$ ,

então:

$$F(s) = \frac{(1 - e^{-as})}{s} \quad (4.10)$$

Passando do domínio de Laplace para o domínio da frequência, obtém-se:

$$F(i\omega) = \frac{(1 - e^{-ai\omega})}{i\omega} \quad (4.11)$$

Finalmente, tem-se:

$$|F(i\omega)| = \frac{\sqrt{2}}{\omega} \cdot \sqrt{1 - \cos \omega a} \quad (4.12)$$

Assim, pode-se encontrar os espectros do transiente para os períodos de tempo 0,5ms, 1ms e 1,5ms, que são mostrados na figura 4.9.

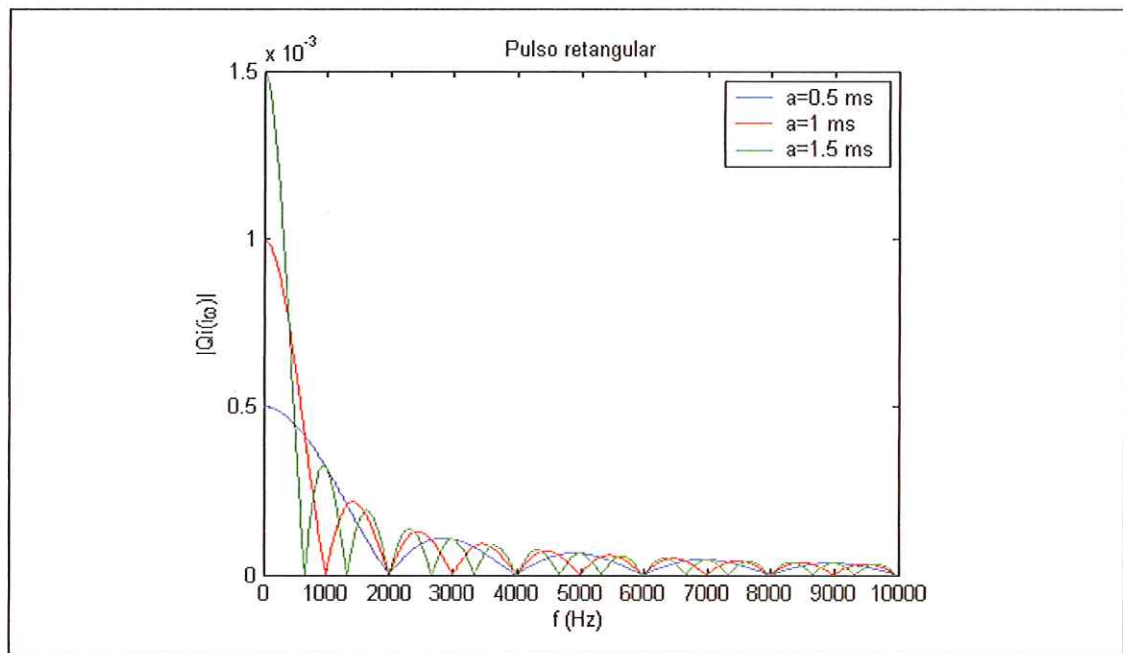


Figura 4.9 – Espectro do transiente para a função pulso retangular.

De maneira semelhante pode-se verificar o conteúdo de sinal em função da frequência para a função meia onda senoidal, figura 4.10.

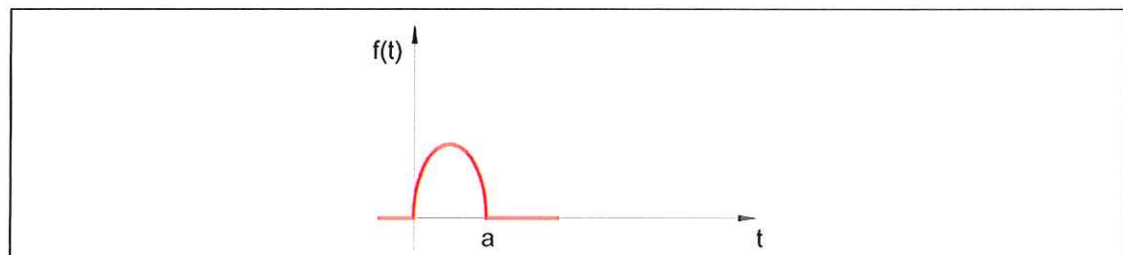


Figura 4.10 - Função meia onda senoidal.

A meia onda senoidal da figura 4.10 pode ser escrita como sendo:

$$f(t) = u(t) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi t}{a}\right) + u(t-a) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi(t-a)}{a}\right) \quad (4.13)$$

Aplicando a transformada de Laplace, tem-se:

$$F(s) = \frac{\pi a(1 + e^{-as})}{a^2 s^2 + \pi^2} \quad (4.14)$$

Passando do domínio de Laplace para o domínio da frequência, obtém-se:

$$F(i\omega) = \frac{\pi a(1 + e^{-ai\omega})}{a^2(i\omega)^2 + \pi^2} \quad (4.15)$$

Finalmente, tem-se:

$$|F(i\omega)| = \sqrt{2 \cdot \left(\frac{\pi a}{\pi^2 - a^2 \omega^2}\right)^2 \cdot \sqrt{1 + \cos \omega a}} \quad (4.16)$$

Assim, pode-se encontrar os espectros do transiente para os períodos de tempo 0,5ms, 1ms e 1,5ms que são mostrados na figura 4.11.

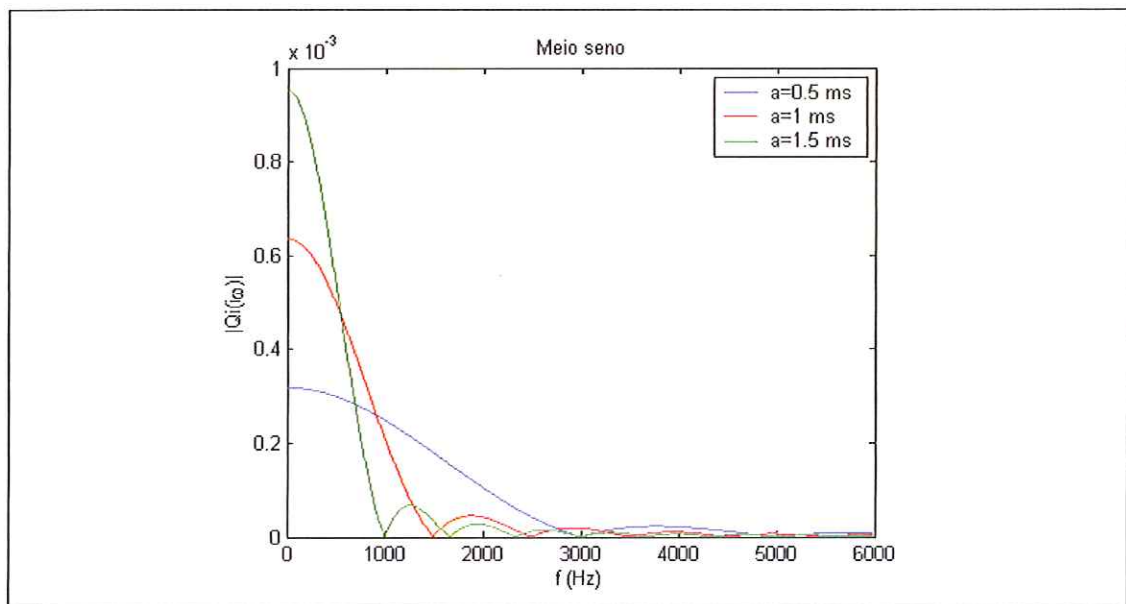


Figura 4.11 – Espectro do transiente para a função meia onda senoidal.

Com essas modelagens pode-se verificar através das figuras 4.9 e 4.11 que o sinal está quase todo contido até a frequência de 3000 Hz e que, quanto maior o valor de  $\alpha$ , menor é a frequência necessária para análise do sinal. Acredita-se que esses intervalos de tempo escolhidos na modelagem sejam menores do que o tempo de resposta do transdutor e como os transientes utilizados na modelagem possuem formas bastante exigentes, considerou-se que a taxa de aquisição e a frequência de corte escolhidas estão satisfatórias.

### 4.3 TESTES EXPLORATÓRIOS

Os testes exploratórios são experimentos realizados preliminarmente para verificar o comportamento e a eficiência dos equipamentos usados para a coleta de dados. Os testes realizados nesta pesquisa foram:

- a) teste de simulação de um transiente de pressão para análise do comportamento do sistema de aquisição de dados;
- b) teste de ruído.

#### 4.3.1 Teste de simulação do transiente de pressão

Esse teste tem como objetivo analisar o comportamento do sistema de aquisição durante a coleta de dados do transiente. Para essa simulação do transiente de pressão montou-se um sistema de descarga com sistema hidráulico (figura 4.12).

Para este teste, a pressão do sistema hidráulico foi limitada em 700psi através de uma válvula reguladora de pressão instalada na saída da bomba.

A válvula reguladora de vazão (2), conectada na linha pressão após a saída da bomba, é mantida completamente fechada e a válvula reguladora de vazão (3), conectada em seguida e ligada ao tanque, é mantida com uma certa regulagem. Com estas válvulas nessa situação, não há pressão chegando ao gerador.

Após essa regulagem, inicia-se a aquisição de dados.

A válvula (2) é aberta até o ponteiro do manômetro começar a se movimentar e mantém-se essa abertura até o final do processo. Em seguida, vai fechando-se a válvula (3) até que a pressão do manômetro (4) atinja o valor de

aproximadamente 130psi.

Após atingir esta pressão o sistema de aquisição de dados é iniciado. Então aciona-se a alavanca da válvula direcional (6) que direciona o óleo para o retorno do circuito. Com isso simulou-se um degrau negativo de pressão para representar o trabalho do gerador de transiente de pressão. O arquivo eletrônico gerado é gravado no HD do micro-computador.

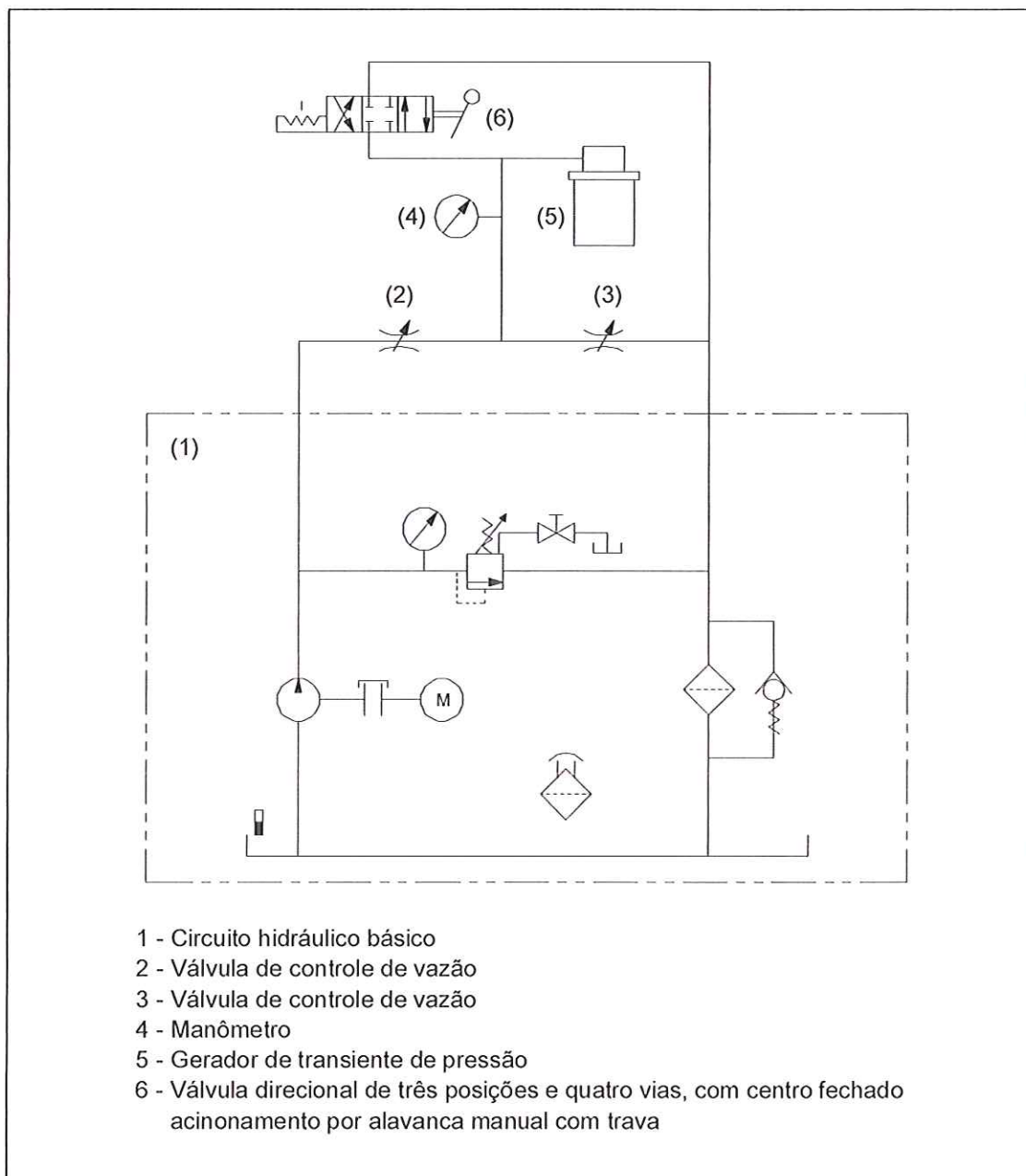


Figura 4.12 - Sistema de descarga utilizado para simular um degrau negativo de pressão.

A figura 4.13 apresenta uma foto do sistema de descarga montado para simular o transiente de pressão.

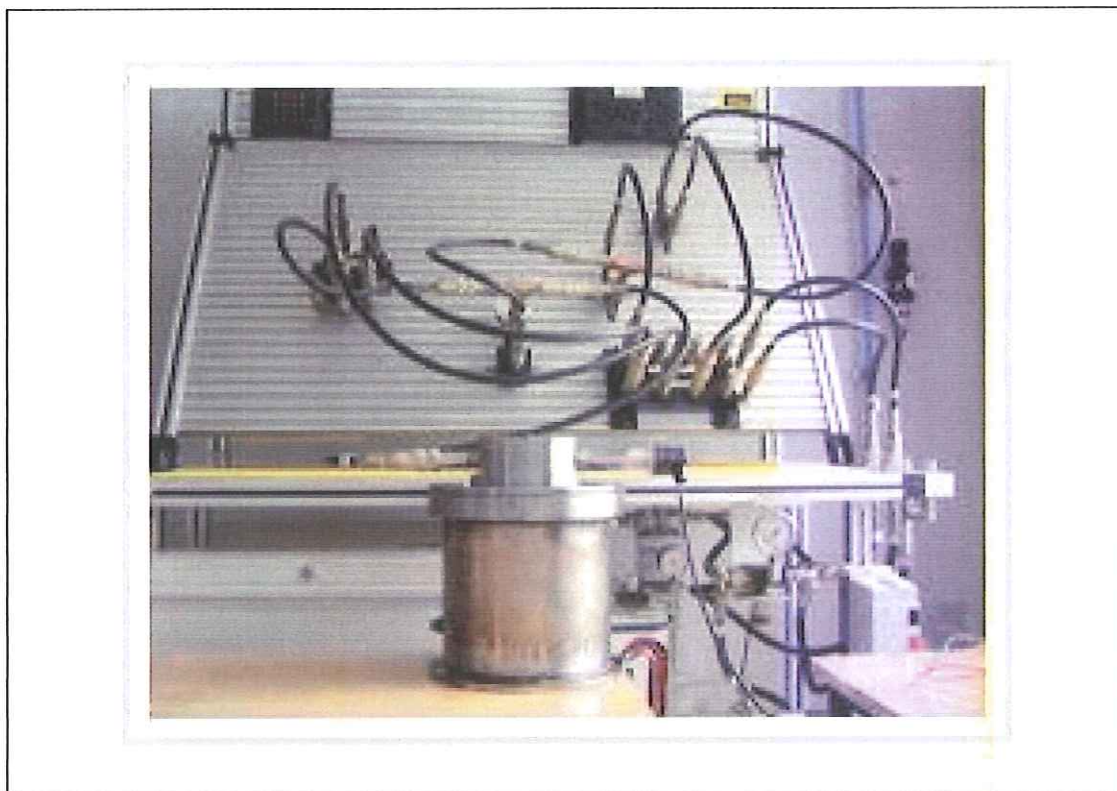


Figura 4.13 – Sistema de descarga para simular transiente de pressão.

A figura 4.14 mostra o sinal adquirido e armazenado no computador do “degrau” de pressão gerado pelo sistema de descarga.

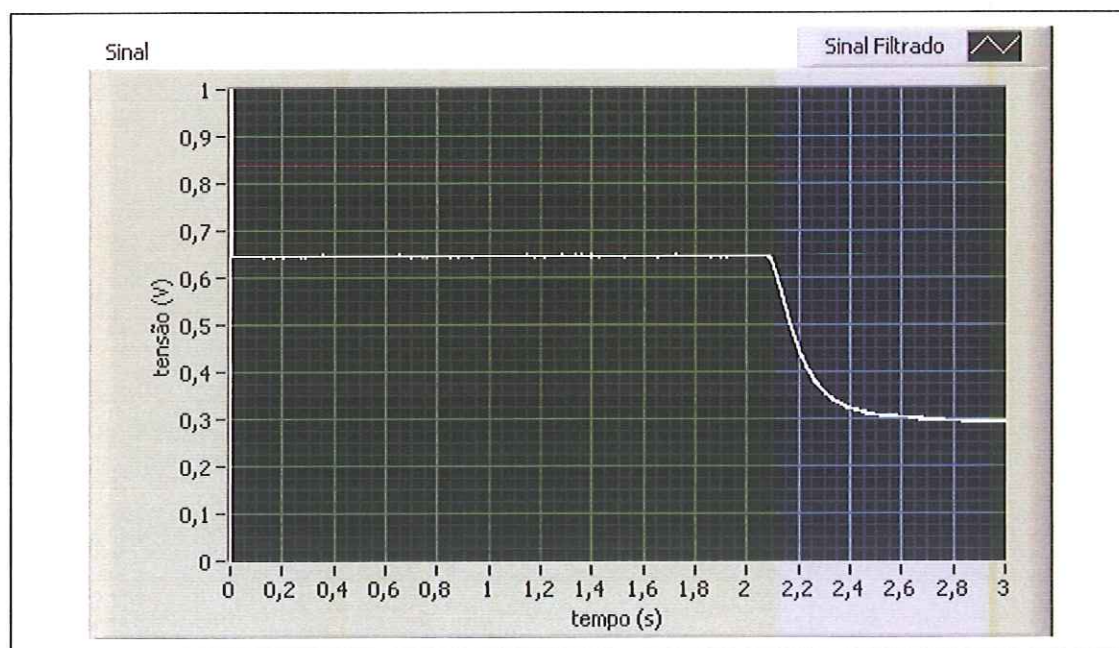


Figura 4.14 – Dados adquiridos do “degrau” de pressão que foi gerado pelo sistema de descarga.

Com esse teste, pode-se concluir que o sistema e a taxa de aquisição estão



adequados para a realização do experimento, pois foi possível capturar todo o transiente de pressão que foi gerado na simulação.

### 4.3.2 Teste de ruído

No teste do ruído é feita uma aquisição de dados com todos os equipamentos em repouso, para verificar a existência de ruído.

#### 4.3.2.1 Teste de ruído para o transdutor de pressão piezorresistivo modelo PLN-2 / PSI-420

Com o auxílio de um osciloscópio foi possível detectar um ruído de aproximadamente 30mV (figura 4.15), contendo uma frequência de 1,2MHz.

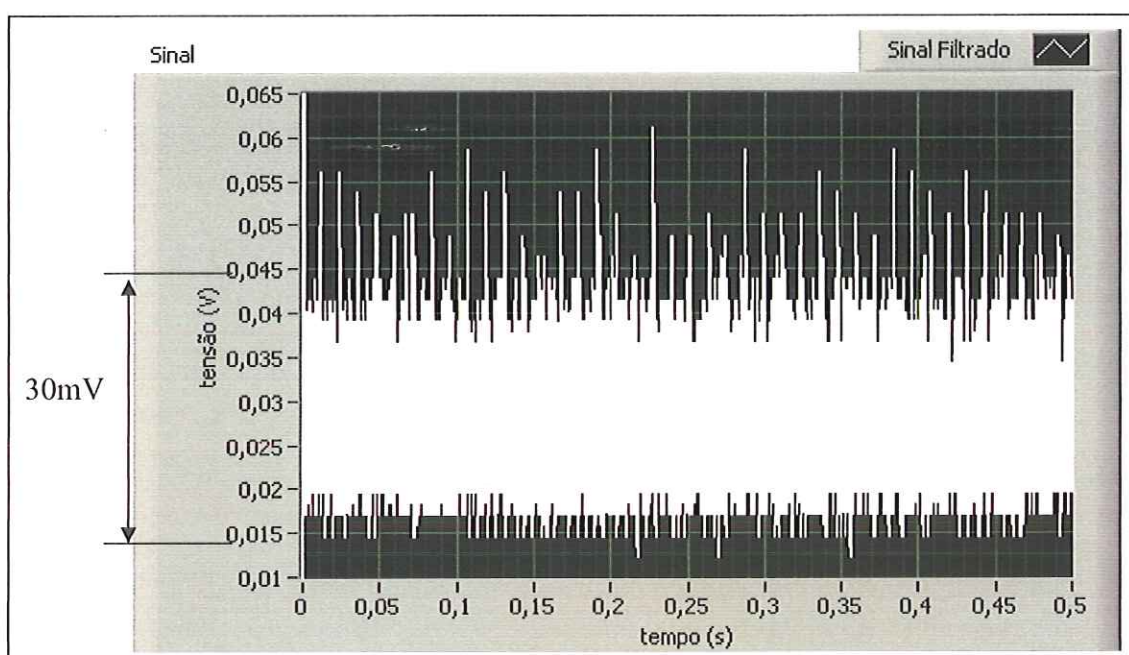


Figura 4.15 - Ruído detectado no teste de ruído do transdutor modelo PLN-2 / PSI-420.

Para eliminar da aquisição este ruído, foi montado um filtro passa baixa analógico de primeira ordem (circuito tradicionalmente chamado de RC) com uma frequência de corte de  $\omega_c = 1 \times 10^5$  rad/s antes da placa de aquisição. Esse filtro possui a função de diminuir o ruído e proporcionar uma faixa plana na frequência de trabalho para não perder o conteúdo do sinal analisado.

Para uma melhor análise da faixa plana, efetuou-se o cálculo da resposta em

frequência do filtro passa baixa. Na sua construção utilizou-se uma resistência  $R = 100\ \Omega$  e um capacitor  $C = 100 \times 10^{-9}$  F. Assim, calculando a frequência de corte e a constante de tempo vem:

$$\omega_c = \frac{1}{R \cdot C} \quad (4.17)$$

Agora, substituindo os dados em (4.17), tem-se:

$$\omega_c = \frac{1}{100 \cdot (100 \times 10^{-9})} \Rightarrow \omega_c = 1 \times 10^5 \text{ rad/s}$$

A constante de tempo é dada por:

$$\tau = \frac{1}{\omega_c} \quad (4.18)$$

Então, substituindo os valores em (4.18), obtem-se:

$$\tau = \frac{1}{1 \times 10^5} \Rightarrow \tau = 1 \times 10^{-5} \text{ s}$$

Logo, pode-se determinar a relação de amplitudes  $\left(\frac{A_o}{A_i}\right)$  e a fase  $\phi$ , isto é:

$$\frac{A_o}{A_i} = \frac{1}{\sqrt{(\omega \cdot \tau)^2 + 1^2}} \quad (4.19)$$

$$\phi = -\arctan(\omega \cdot \tau) \quad (4.20)$$

Com estes cálculos, foi possível levantar uma tabela de resposta em frequência (tabela 4.1), os gráficos da relação de amplitude (figura 4.16) e do ângulo de fase (figura 4.17) para verificar a eficiência do filtro passa baixa.

TABELA 4.1					
Tabela da Resposta em Frequência do Filtro Passa Baixa					
Frequência (Hz)	Ao/Ai	Fase (°)	Frequência (rad/s)	Ao/Ai (db)	Fase (rad)
1000	0,998031905	-3,59527378	6283,185307	-0,017111504	-0,062749365
2000	0,992196615	-7,162455807	12566,37061	-0,068045175	-0,125008436
3000	0,982694525	-10,67474941	18849,55592	-0,151629267	-0,186309524
4000	0,969838832	-14,10780237	25132,74123	-0,266008622	-0,246227602
5000	0,954028216	-17,44059449	31415,92654	-0,408775608	-0,304395797
6000	0,93571522	-20,65599738	37699,11184	-0,577126125	-0,360515165
7000	0,915374758	-23,74099613	43982,29715	-0,76802135	-0,41435855
8000	0,893476369	-26,6866101	50265,48246	-0,97833859	-0,465769212
9000	0,87046241	-29,48758096	56548,66776	-1,204999575	-0,514655376
10000	0,846733016	-32,14190764	62831,85307	-1,445070116	-0,560982116
20000	0,622676992	-51,48811275	125663,7061	-4,11474362	-0,898637093
30000	0,468649792	-62,05331275	188495,5592	-6,58303143	-1,083034619
40000	0,369697848	-68,30301603	251327,4123	-8,643061559	-1,192112519
50000	0,303314471	-72,34321285	314159,2654	-10,36213738	-1,262627256
60000	0,256391459	-75,14394872	376991,1184	-11,82192893	-1,311509318
70000	0,221705922	-77,19075021	439822,9715	-13,08445412	-1,347232743
80000	0,195119863	-78,74827428	502654,8246	-14,19397036	-1,374416666
90000	0,174136983	-79,97156024	565486,6776	-15,18217969	-1,395767034
100000	0,157176725	-80,95693892	628318,5307	-16,07223527	-1,412965137
200000	0,079326697	-85,45013469	1256637,061	-22,01161259	-1,491386197
300000	0,052977149	-86,96321135	1884955,592	-25,51822841	-1,517794366
400000	0,039757277	-87,72147527	2513274,123	-28,01166726	-1,531028568
500000	0,031814875	-88,17683428	3141592,654	-29,94739555	-1,538976082
600000	0,026516497	-88,48053855	3769911,184	-31,52967708	-1,544276722
700000	0,022730546	-88,69752347	4398229,715	-32,86780265	-1,548063823
800000	0,019890432	-88,86028703	5026548,246	-34,02711564	-1,550904583
900000	0,017681118	-88,98689376	5654866,776	-35,04980547	-1,553114287
1000000	0,015913479	-89,08818633	6283185,307	-35,96469731	-1,554882176
1200000	0,013261746	-89,24013568	7539822,369	-37,54798617	-1,557534192

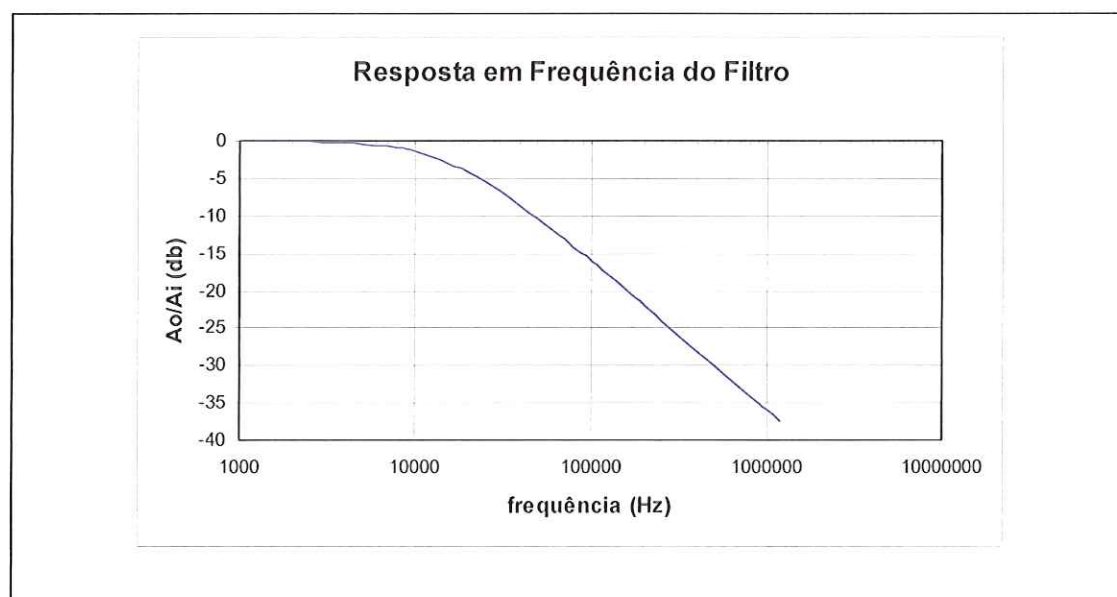


Figura 4.16 - Gráfico da relação de amplitude do filtro passa baixa.

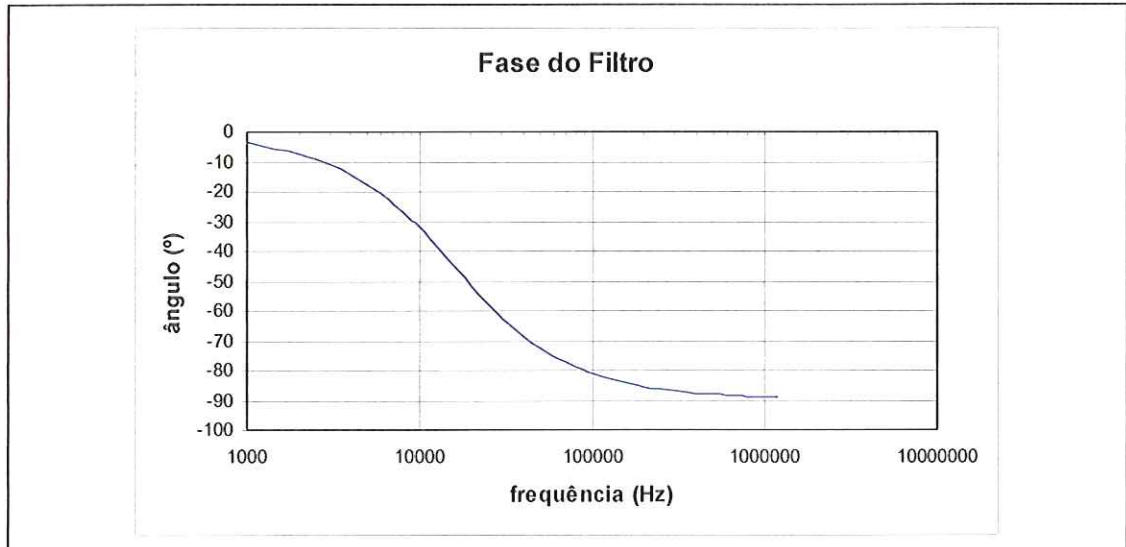


Figura 4.17 - Gráfico do ângulo de fase do filtro passa baixa.

Para verificar teoricamente o efeito do filtro, foi feito também o gráfico teórico da resposta do sistema de primeira ordem devido à entrada onda quadrada com frequência de 2kHz (frequência de trabalho). Esse gráfico (figura 4.19) foi gerado através do programa Simulink, cujo esquema é mostrado na figura 4.18.

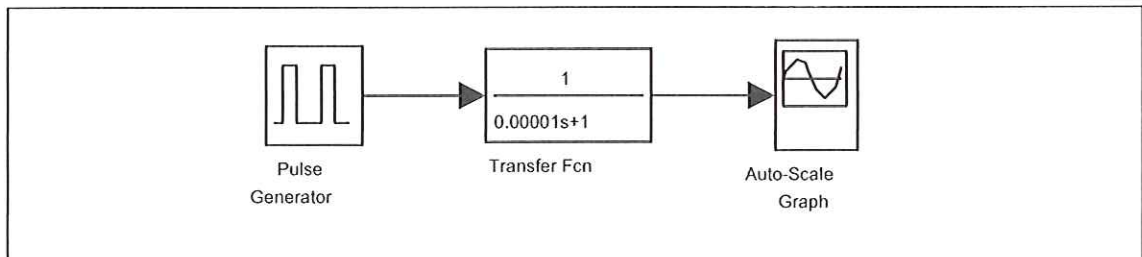


Figura 4.18 – Diagrama do programa Simulink para gerar o gráfico da resposta à uma onda quadrada.

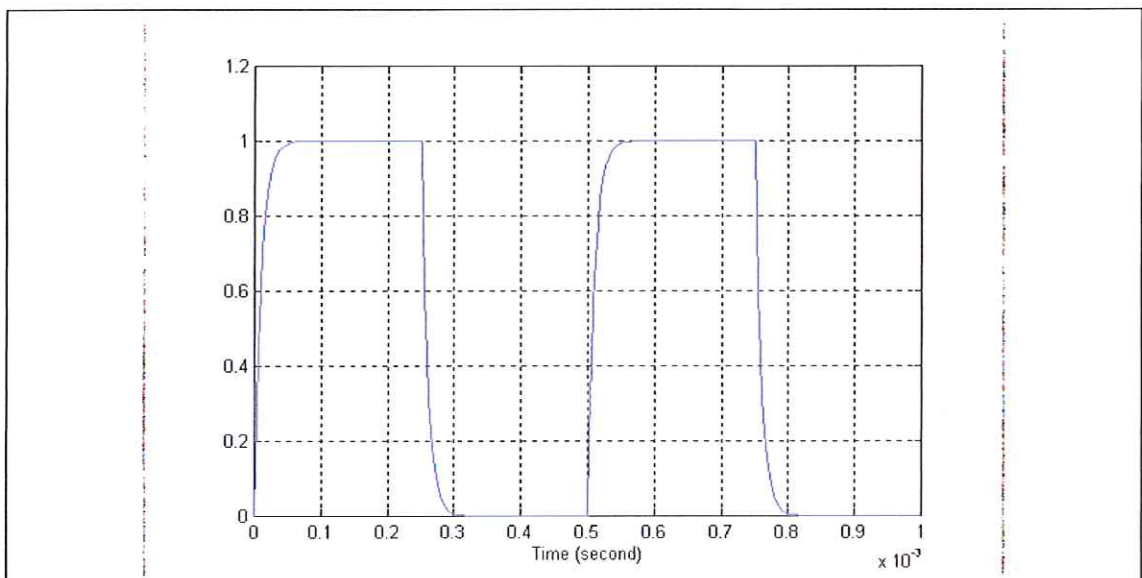


Figura 4.19 – Resposta teórica à onda quadrada do filtro passa baixa.

Lembrando que circuitos RC podem causar efeito de carga, antes do filtro passa baixa foi então colocado um amplificador operacional com ganho 1. A figura 4.20 mostra o esquema completo do filtro passa baixa.

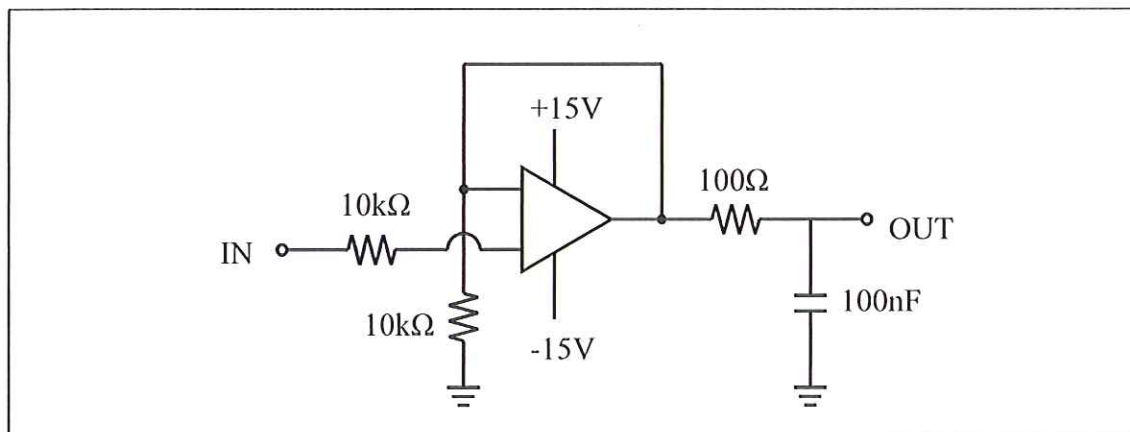


Figura 4.20 – Representação esquemática do filtro passa baixa.

Para verificar a eficiência do filtro passa baixa montou-se o filtro ao sistema e realizou-se novamente o teste de ruído, cujo resultado está ilustrado na figura 4.21.

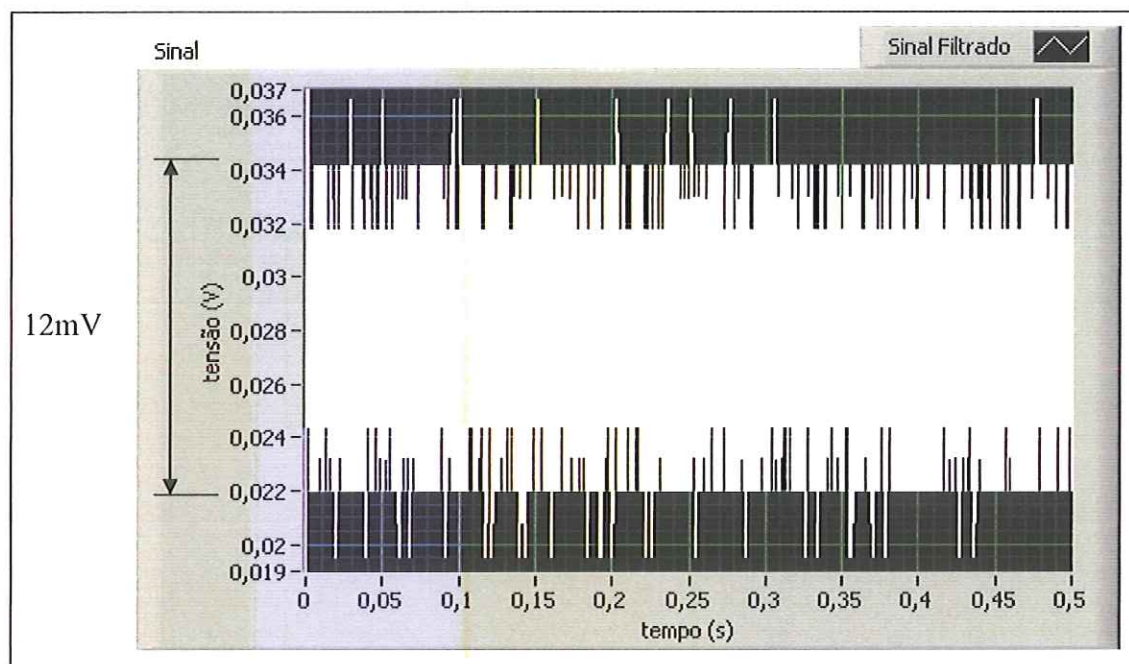


Figura 4.21 – Ruído detectado no teste de ruído com o filtro passa baixa montado, para o transdutor modelo PLN-2 / PSI-420.

Com este novo teste pode-se notar que a amplitude do ruído diminuiu para aproximadamente 12mV.

Com o objetivo de realizar mais um teste utilizou-se um gerador de função para gerar uma onda quadrada na frequência de 2kHz (frequência de trabalho) e pode-se

verificar, através da coleta de dados do sistema de aquisição (dados reais), o efeito de atenuação do sinal exercido pelo filtro passa baixa. O resultado desse teste é apresentado na figura 4.22.

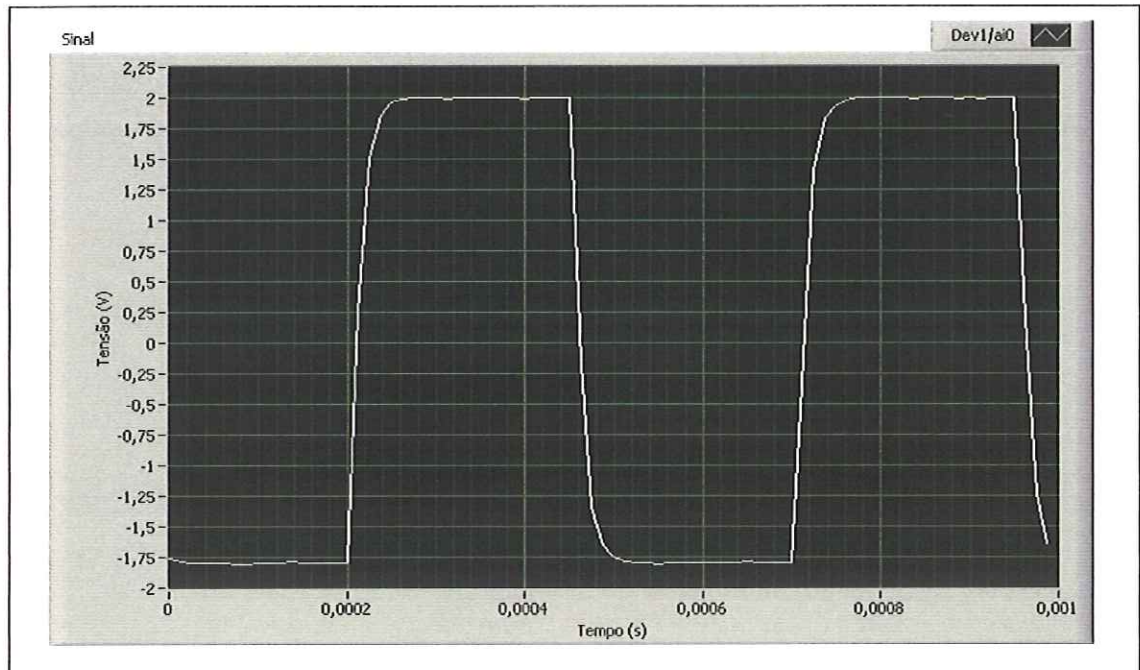


Figura 4.22 - Resposta real do filtro passa baixa à entrada onda quadrada de frequência 2kHz.

Com essas análises pode-se concluir que, pela resposta em frequência, o filtro passa baixa não é muito eficiente, no que se refere à eliminação dos ruídos. Poderia ser colocado um filtro de 2ª ordem, porém isto poderia ter efeito de atenuação da amplitude e principalmente distorções devido ao aumento da fase. Desta forma, decidiu-se utilizar somente um filtro de 1ª ordem, representando um balanço entre ônus e bônus.

#### 4.3.2.2 Teste de ruído para o transdutor de pressão piezorresistivo modelo AKS 33

A figura 4.23 mostra o teste de ruído para esse transdutor sem a utilização do filtro passa baixa analógico.

Com esse teste, foi possível detectar um ruído de aproximadamente 10mV pico a pico, que foi considerado satisfatório para a seqüência do trabalho. Por esta razão o filtro analógico não foi usado nos testes com este transdutor.

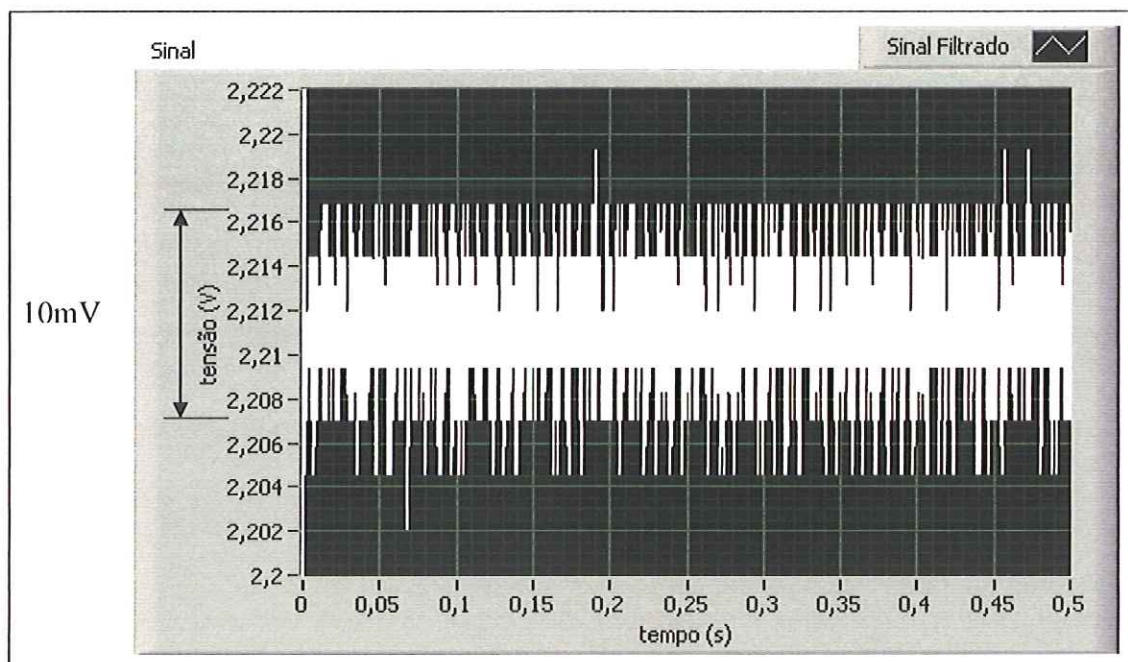


Figura 4.23 - Ruído detectado no teste do ruído do transdutor modelo AKS 33.

#### 4.4 MONTAGEM

O sistema de calibração é formado por componentes mecânicos simples e hidráulicos de fácil acesso, comumente utilizados em universidades e indústrias, proporcionando uma montagem rápida.

A câmara de retorno de óleo do gerador de pressão é fixada em uma mesa através de um grampo.

Na câmara de pressão, monta-se o transdutor em uma das laterais e em seguida coloca-se o diafragma de forma que tampe a câmara de pressão.

A câmara de pressão é montada na câmara de retorno com o diafragma para baixo e em seguida é fixada por um flange e parafusos.

O sistema hidráulico fornece pressão ao gerador através de uma mangueira que é conectada na lateral da câmara de pressão, no lado oposto do transdutor.

O transdutor de pressão é conectado a um sistema elétrico. A configuração do sistema elétrico é modificada conforme o modelo do transdutor utilizado no experimento, e está descrita a seguir.

O sistema elétrico é conectado à placa de conexão que está ligada, através de cabo, ao sistema de aquisição de dados do micro-computador.

Com a realização dos experimentos a placa de aquisição recebe os dados do transdutor, digitaliza o sinal de pressão e em seguida apresenta os dados coletados em

um gráfico no monitor, gravando-os em um pasta criada no HD do micro-computador.

#### 4.4.1 Montagem do sistema elétrico para o transdutor de pressão piezorresistivo modelo PLN-2 / PSI-420

Quando este transdutor foi adquirido, o fabricante fornecer uma “caixa” eletrônica que tem basicamente três funções: (1) Alimentar eletricamente o transdutor; (2) Indicador digital da pressão medida, e, (3) Pinos de saída para enviar sinal (corrente) para outros instrumentos.

Assim, na montagem elétrica, os fios do transdutor são conectados nesta “caixa”. Na saída da caixa é instalada uma resistência de  $499\Omega$  que converte a corrente em tensão. A resistência é ligada ao filtro passa baixa por meio de fios.

O filtro é alimentado com uma fonte e a sua saída é conectada nos bornes da placa de conexão que está ligada ao sistema de aquisição.

A figura 4.24 representa o esquema de montagem do sistema de calibração para o transdutor piezorresistivo modelo PLN-2 / PSI-420. Uma foto deste sistema é apresentada na figura 4.25.

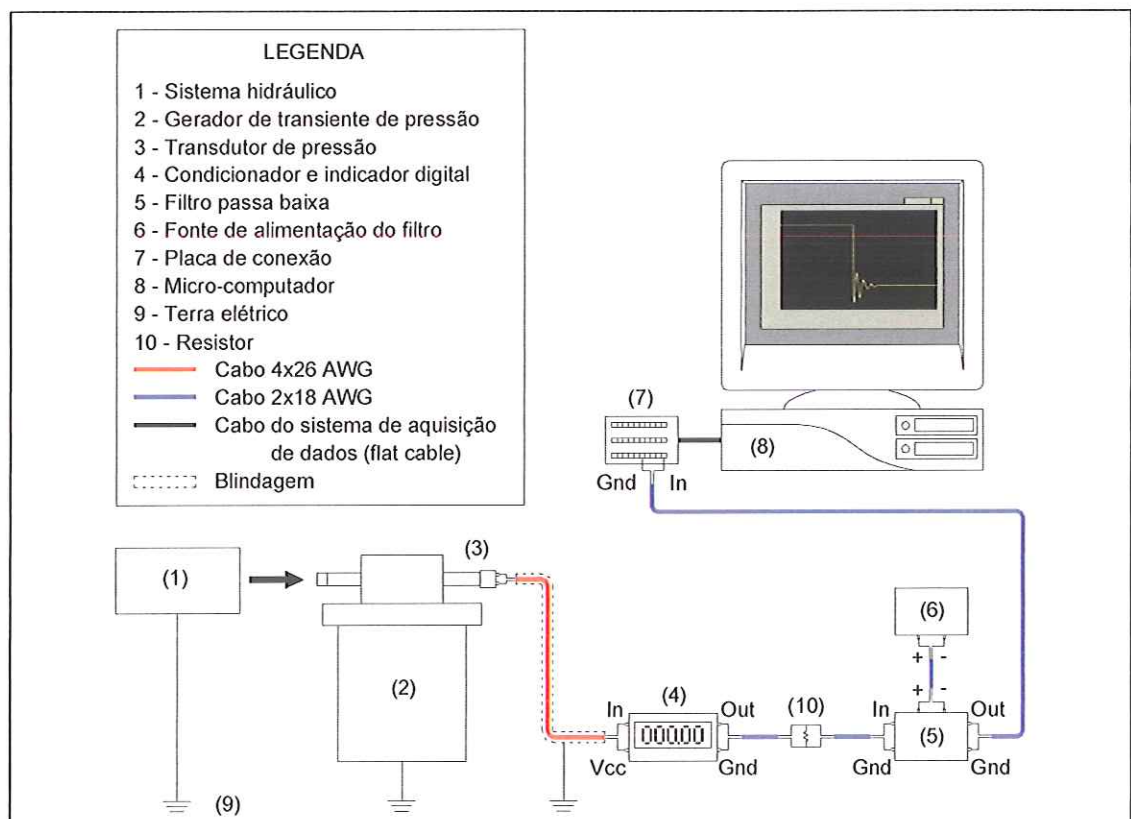


Figura 4.24 – Esquema de montagem completo do sistema de calibração para o transdutor piezorresistivo modelo PLN-2 / PSI-420.



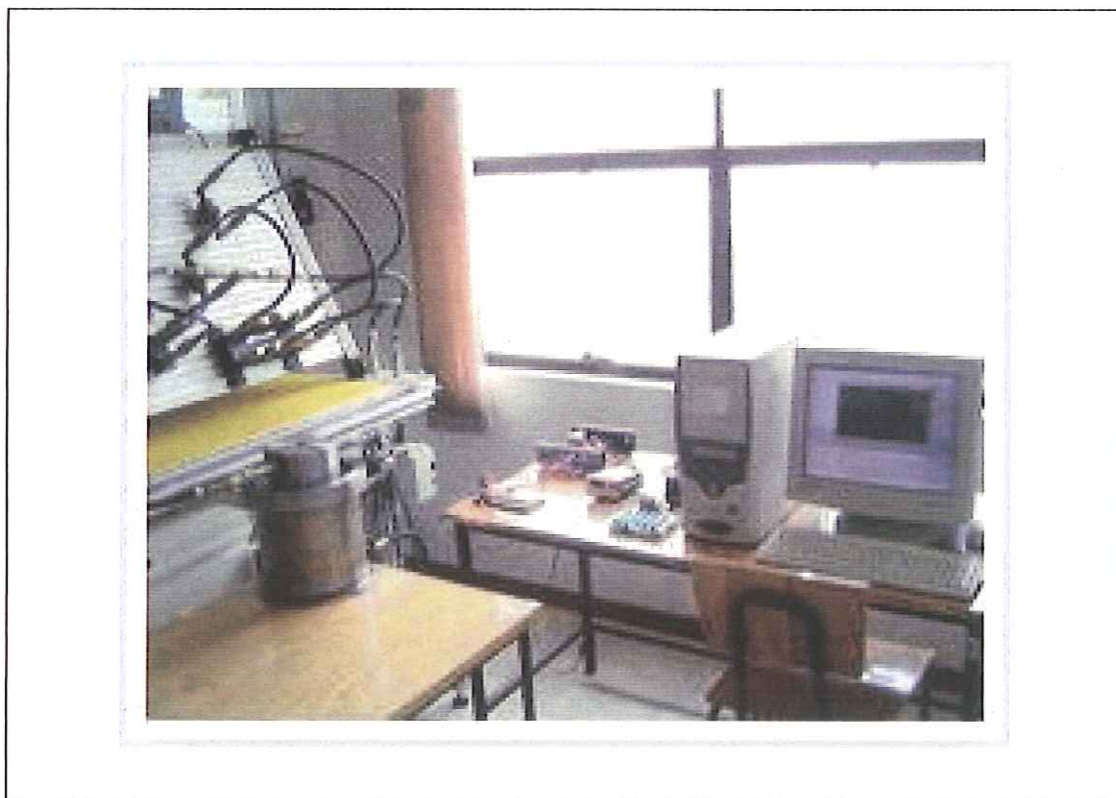


Figura 4.25 – Foto da montagem do sistema de calibração para o transdutor piezorresistivo modelo PLN-2 / PSI-420.

#### 4.4.2 Montagem do sistema elétrico para o transdutor de pressão piezorresistivo modelo AKS 33

Nessa montagem elétrica o fio de alimentação do transdutor é ligado em uma fonte e o fio de sinal é conectado a uma resistência de  $499\Omega$  que converte a corrente em tensão.

A saída negativa da fonte é ligada na outra extremidade dessa resistência que é conectada aos bornes da placa de conexão. Esta placa está ligada ao sistema de aquisição através de cabo.

A figura 4.26 mostra o esquema de montagem completo do sistema de calibração para o transdutor piezorresistivo modelo AKS 33. Uma foto deste sistema é apresentada na figura 4.27.

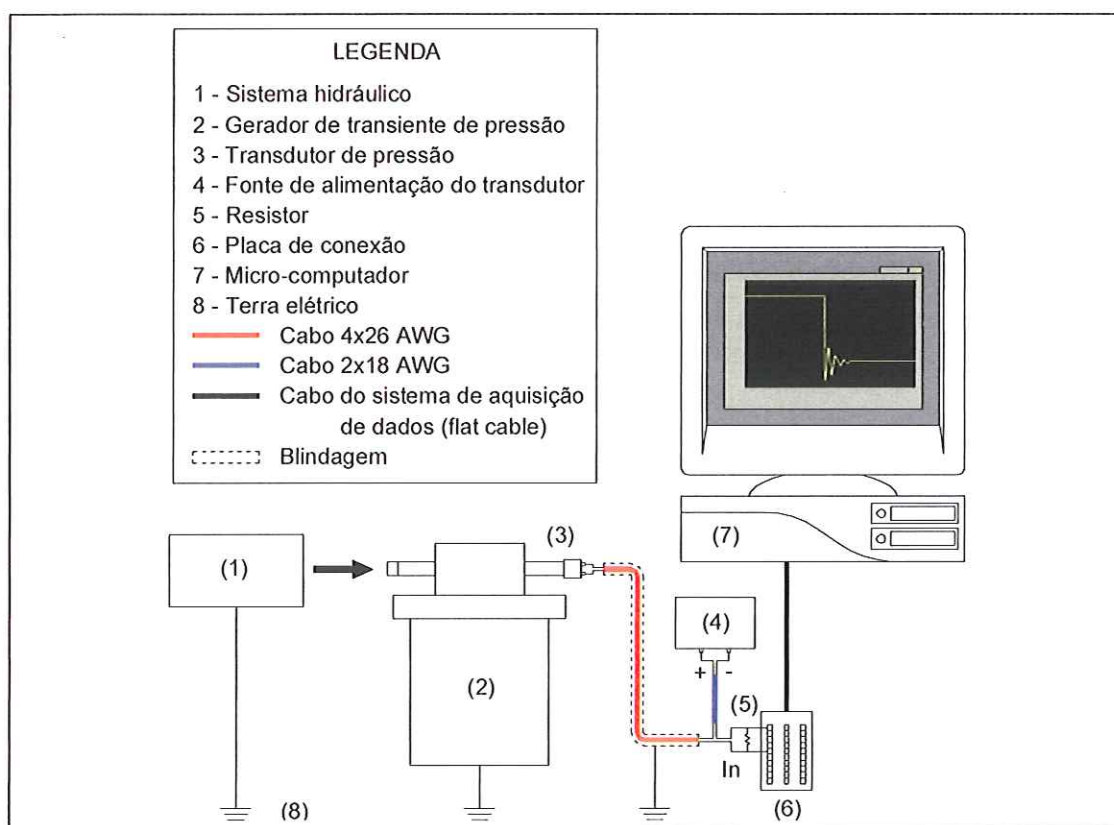


Figura 4.26 – Esquema de montagem do sistema de calibração para o transdutor piezorresistivo modelo AKS 33.

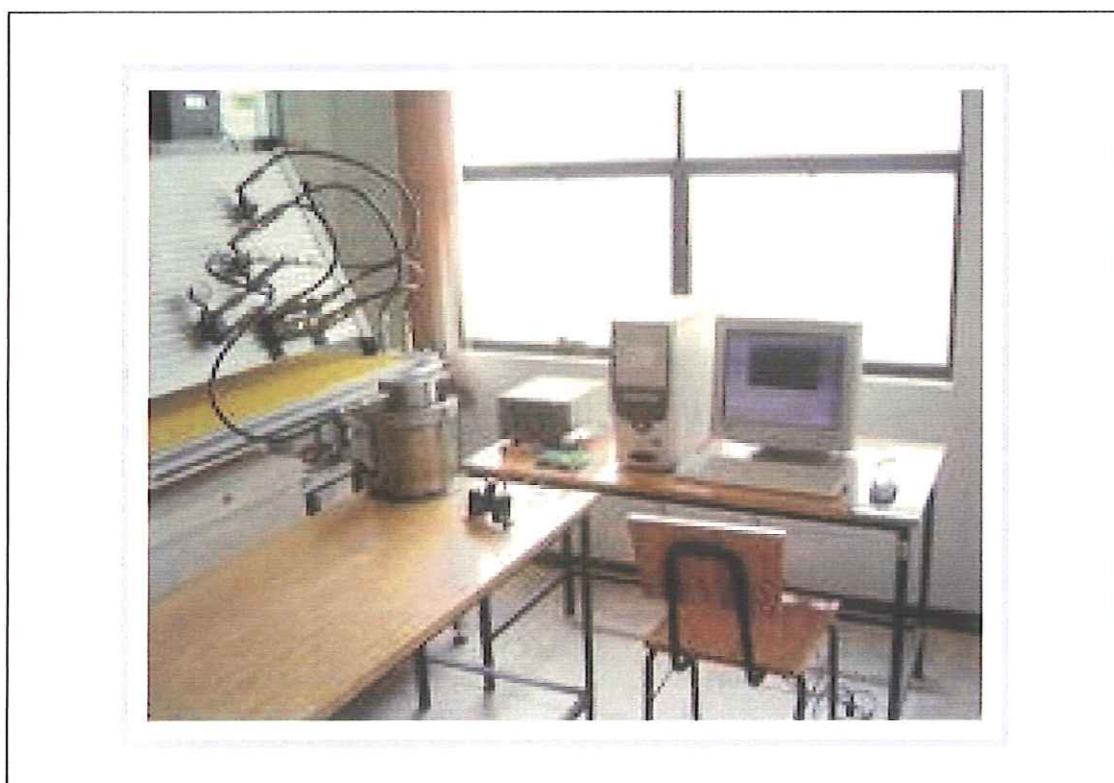


Figura 4.27 – Foto da montagem do sistema de calibração para o transdutor piezorresistivo modelo AKS 33.

#### 4.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Na realização dos experimentos, a pressão do sistema hidráulico é limitada em 700 psi através da válvula reguladora de pressão instalada na saída da bomba.

No sistema hidráulico há duas válvulas reguladoras de vazão e entre elas está o gerador de pressão e um manômetro para indicar a pressão fornecida ao gerador. Essa configuração é mostrada esquematicamente na figura 4.28.

A válvula reguladora de vazão (2), conectada na linha pressão após a saída da bomba, é mantida completamente fechada e a válvula reguladora (3), conectada em seguida e ligada ao tanque, é mantida com certa regulagem. Com as válvulas nessa configuração, não há pressão chegando ao gerador.

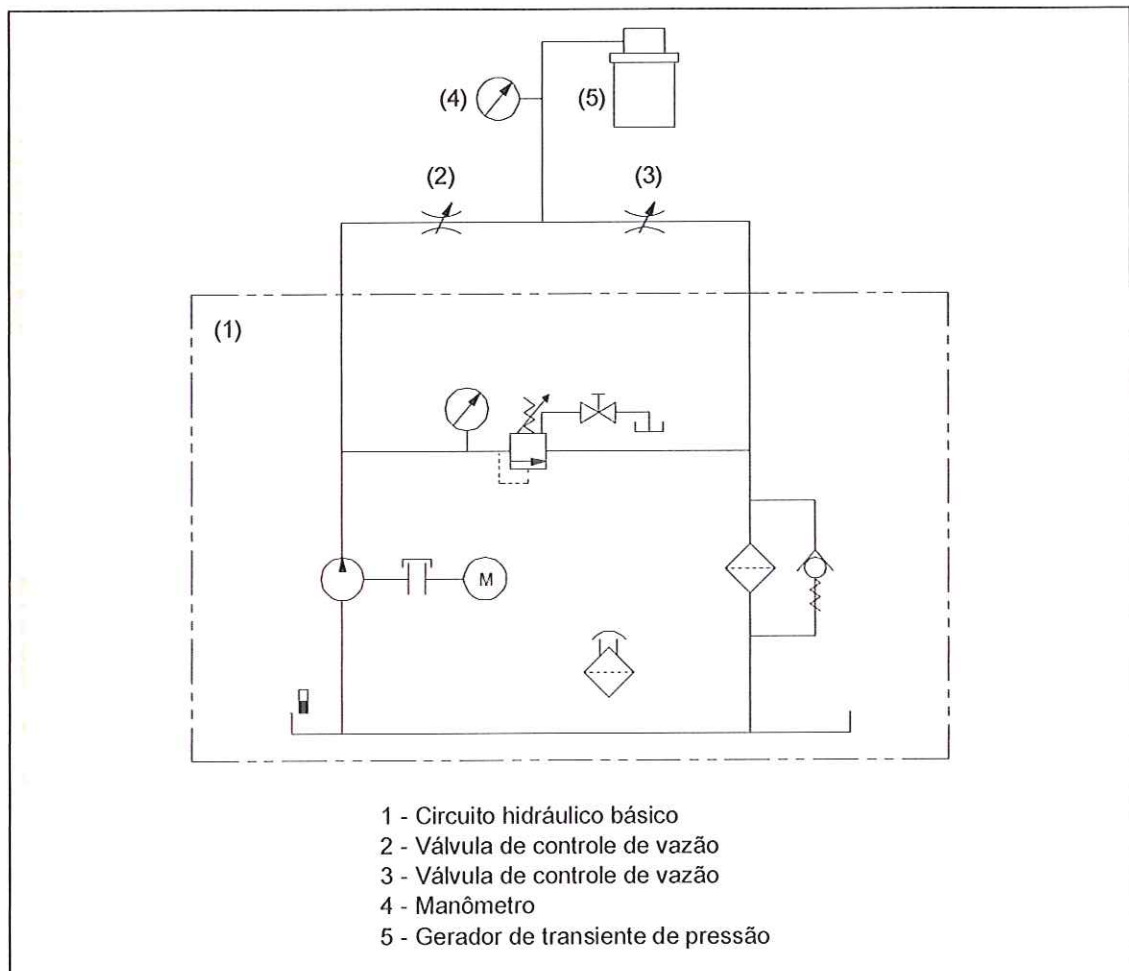


Figura 4.28 – Sistema hidráulico para gerar o transiente de pressão.

Nesta condição de regulagem inicia-se a aquisição de dados.

A válvula (2) é aberta até o ponteiro do manômetro começar a se movimentar e mantém-se essa abertura até o final do processo. Em seguida, a válvula

(3) começa a ser fechada lentamente e com isso consegue-se um controle no aumento da pressão que sobe gradualmente e de forma lenta. A válvula (3) continua sendo fechada até ocorrer o rompimento do diafragma.

Logo após o rompimento do diafragma, o sistema de aquisição de dados é desligado e obtém-se o transiente esperado no monitor. O arquivo eletrônico gerado é gravado no HD do micro-computador.

Depois de realizado o experimento, substitui-se o diafragma rompido e repete-se o experimento quantas vezes for necessário.

#### 4.6 ANÁLISE DINÂMICA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Para analisar dinamicamente um sistema de medição é preciso descreve-lo matematicamente. Essa descrição matemática é denominada modelo matemático.

No caso da análise de uma resposta transitória para uma entrada e uma saída simples, é conveniente utilizar uma Função de Transferência para a representação do modelo matemático.

A Função de Transferência é definida como sendo a relação da transformada de Laplace da saída (output) pela transformada de Laplace da entrada (input) do sistema, considerando todas as condições iniciais nulas. Assim pode-se escrever que:

$$G(s) = \frac{O(s)}{I(s)} \quad (4.21)$$

onde:

$G(s)$  ≙ função de transferência do sistema;

$O(s)$  ≙ sinal de saída (output) do sistema;

$I(s)$  ≙ sinal de entrada (input) do sistema.

Esse sistema pode ser representado por um diagrama de blocos conforme ilustra a figura 4.29.

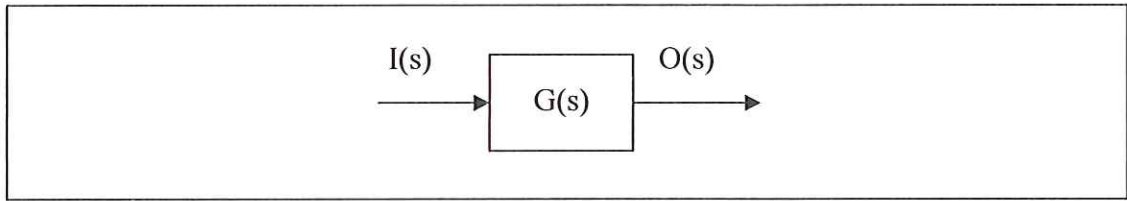


Figura 4.29 – Diagrama de blocos da função de transferência dada pela equação 4.21.

Com esse sistema pode-se classificar três tipos de problemas:

- a) Problema de Análise: procura determinar a saída  $O(s)$  quando a entrada  $I(s)$  e a função transferência  $G(s)$  são conhecidas;
- b) Problema de Síntese: procura determinar a função transferência  $G(s)$  quando a entrada  $I(s)$  e a saída  $O(s)$  são conhecidas;
- c) Problema de Medidas: procura determinar a entrada  $I(s)$  quando a função transferência  $G(s)$  e a saída  $O(s)$  são conhecidas.

Neste trabalho o problema é de síntese, pois a função de transferência será obtida através de dados conhecidos da entrada, (pressão), e da saída, (tensão).

O modelo escolhido para representar a dinâmica do transdutor foi o do sistema de 2ª ordem devido a sua resposta real ter semelhança à deste sistema e ser a sua função de transferência mais simples, figura 4.30.

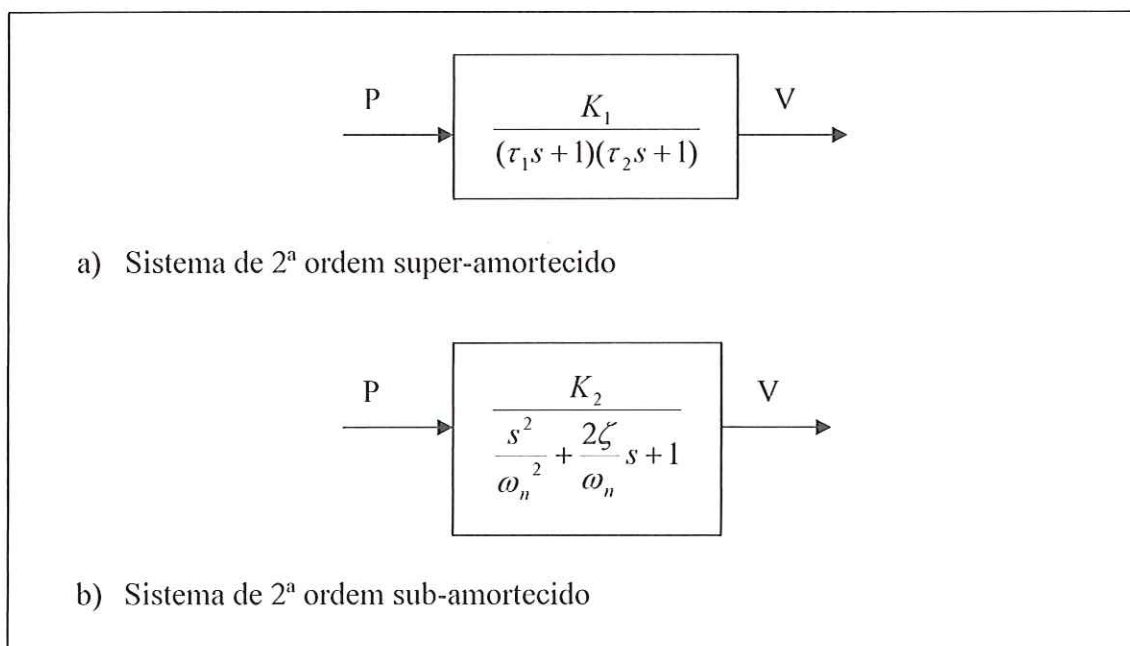


Figura 4.30 – Diagramas de sistemas de 2ª ordem super-amortecido e sub-amortecido.

Na figura 4.30 as grandezas e parâmetros são definidos como sendo:

$s$   $\triangleq$  variável de Laplace;

$P$   $\triangleq$  pressão de entrada;

$V$   $\triangleq$  tensão de saída;

$K_1$  e  $K_2$   $\triangleq$  ganhos das funções de transferência;

$\tau_1$  e  $\tau_2$   $\triangleq$  constante de tempo;

$\omega_n$   $\triangleq$  frequência natural não amortecida;

$\zeta$   $\triangleq$  fator de amortecimento.

Os ganhos  $K_1$  e  $K_2$  são obtidos da calibração estática através da relação entre  $V$  e  $P$  como pode ser observado na figura 4.31.

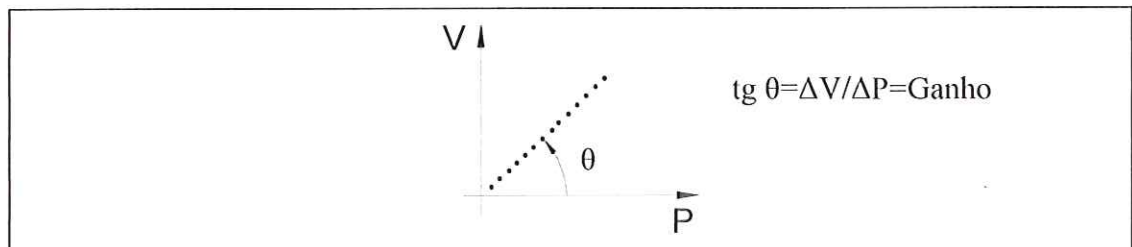


Figura 4.31 – Relação entre  $V$  e  $P$  para obter o ganho da função de transferência.

O objetivo deste trabalho é obter as características dinâmicas, denominador da função transferência, e não as estáticas, numerador da função transferência.

Supondo como sendo um sistema linear, o tamanho do degrau não é importante para o denominador. Assim, as variáveis  $K_1$  e  $K_2$  serão considerados como tendo valor unitário.

Face às hipóteses consideradas, as funções de transferência podem então ser escritas da seguinte forma:

Para o sistema superamortecido:

$$G(s) = \frac{1}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (4.22)$$

e, para o sistema subamortecido:

$$G(s) = \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n}s + 1} \quad (4.23)$$

Com a determinação dos parâmetros das funções transferências tornam-se conhecidas as principais características dinâmicas dos referidos transdutores de pressão.

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 5.1 RESULTADOS OBTIDOS

Através dos experimentos, é possível observar a resposta do transdutor de pressão à entrada tipo degrau decorrente do rompimento do diafragma do gerador de pressão. Com esses ensaios obtém-se a função de transferência de cada transdutor.

Os resultados obtidos foram realizados seguindo o procedimento experimental, descrito no capítulo anterior, para os dois transdutores de pressão piezorresistivos, modelo PLN-2 / PSI-420 e modelo AKS 33.

#### 5.1.1 Resultados do transdutor modelo PLN-2 / PSI-420 fabricado pela Zürich

As figuras 5.1 e 5.2 apresentam os resultados dos primeiros ensaios feitos, mostrando os transientes de pressão (tensão), obtidos com o rompimento do diafragma.

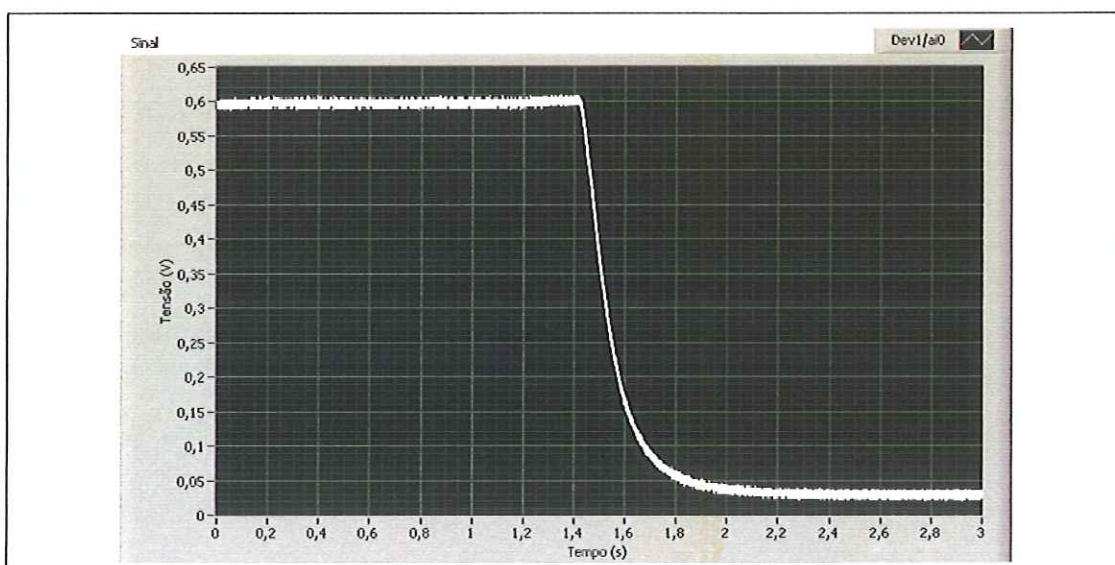


Figura 5.1 – Transiente de pressão medido pelo transdutor PLN-2 / PSI-420, com indicador digital, ambos fabricados pela empresa Zürich.



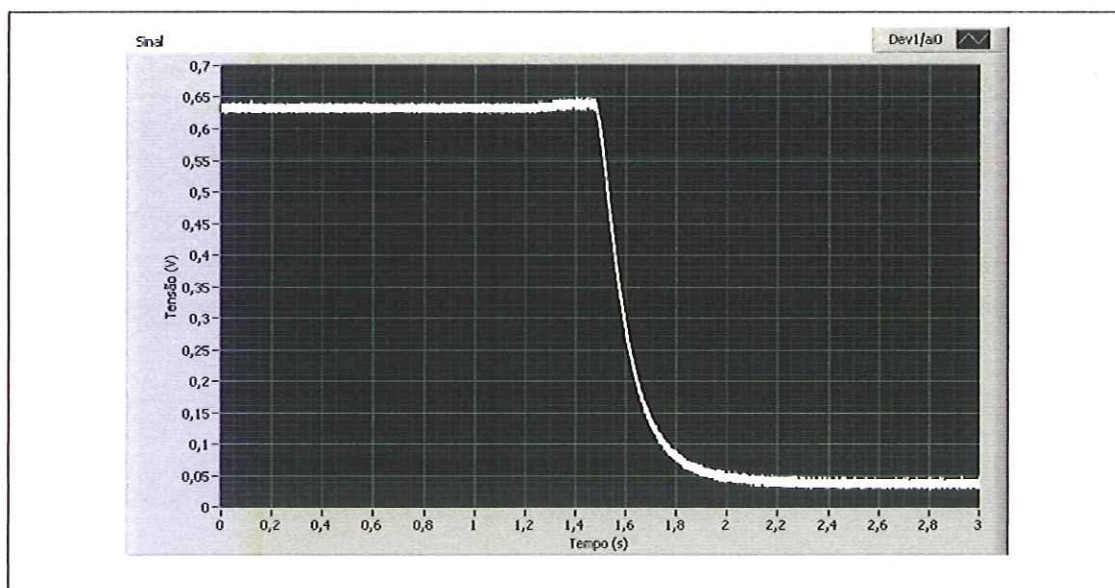


Figura 5.2 – Transiente de pressão medido pelo transdutor PLN-2 / PSI-420, com indicador digital, ambos fabricados pela empresa Zürich.

Nestes dois ensaios pode-se observar que o transdutor respondeu ao transiente como um sistema de 2ª ordem super-amortecido e com tempo de resposta, até a acomodação, de aproximadamente 0,7s.

Após essa análise optou-se por retirar o indicador digital e o filtro analógico do sistema de medição e utilizar somente o transdutor conectado diretamente no sistema de aquisição. Com essa nova configuração foi necessário fazer novamente o teste de ruído para verificar possíveis ruídos no sistema. A figura 5.3 mostra o teste de ruído realizado com o transdutor instalado diretamente no sistema de aquisição.

Com esse teste foi possível verificar que a configuração atual possui um ruído de aproximadamente 250mV de amplitude pico a pico, que é considerado alto para este trabalho. Então acrescentou-se novamente o filtro e feito um outro teste de ruído com o intuito de diminuir o ruído presente no sinal medido pelo sensor. O teste de ruído com a utilização do filtro está ilustrado na figura 5.4.

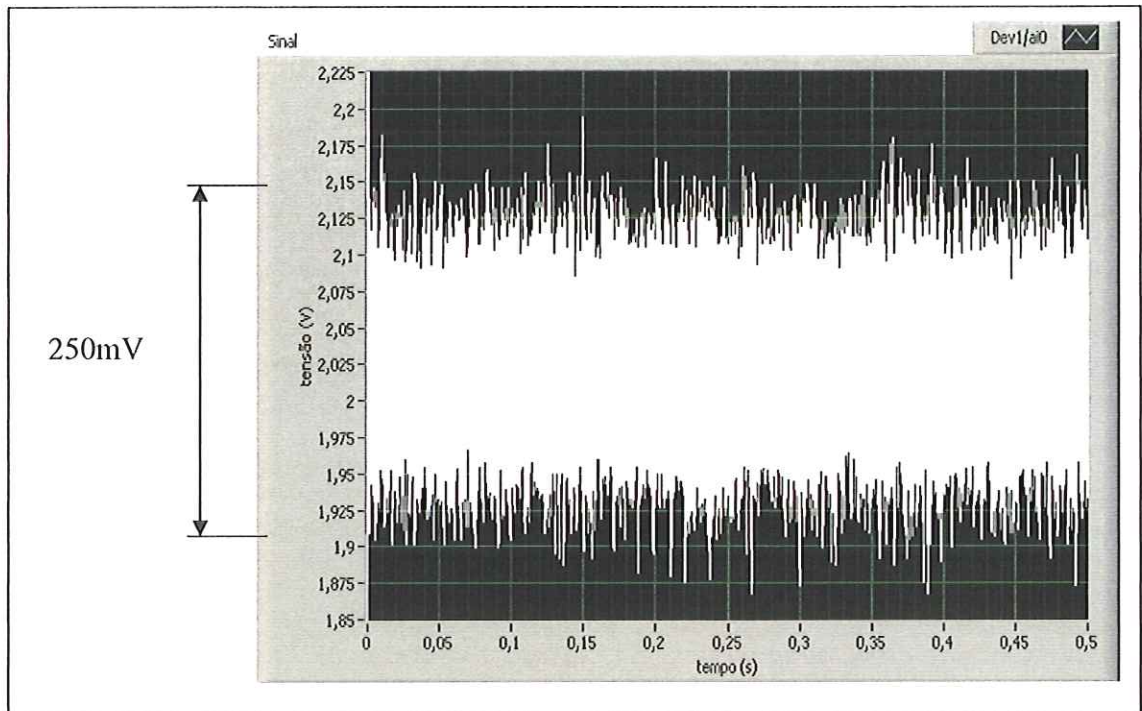


Figura 5.3 – Teste do ruído com o transdutor Zürich sem indicador digital e sem filtro.

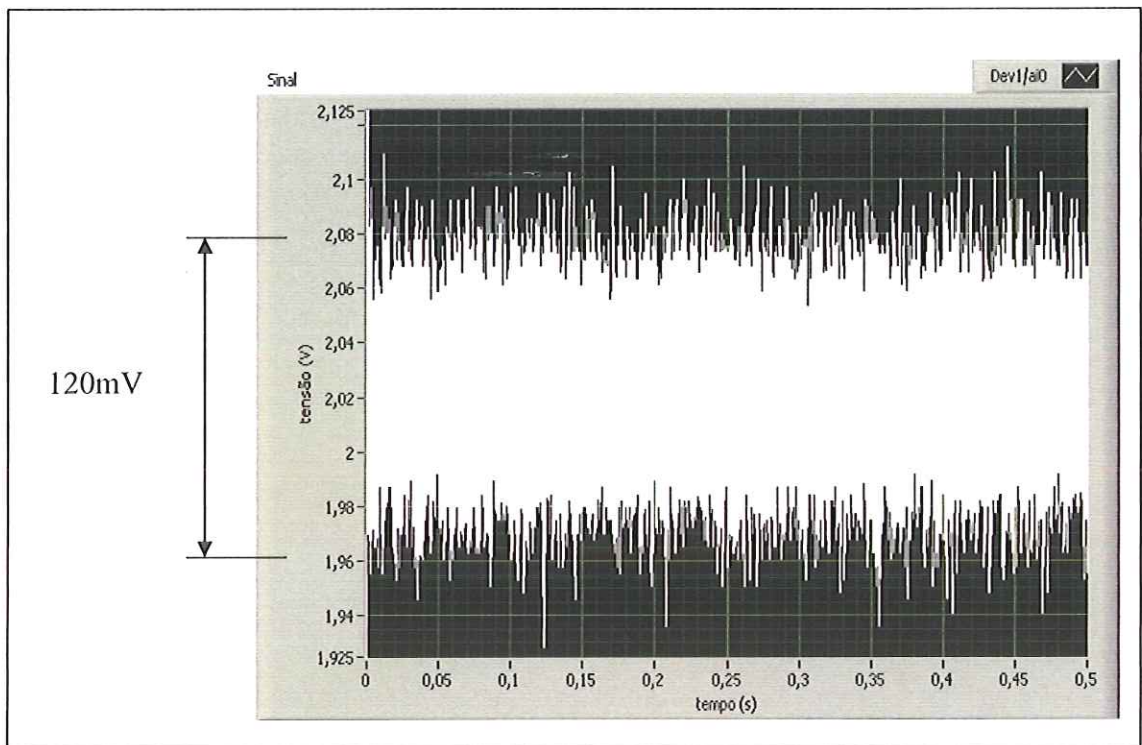


Figura 5.4 – Teste do ruído com o transdutor Zürich sem indicador digital e com filtro.

No teste feito com a utilização do filtro pode-se notar que o ruído diminuiu quase pela metade e sua amplitude passou para aproximadamente 120mV pico a pico. Esse ruído ainda foi considerado alto, por causa do intervalo da tensão de entrada que varia de 2 a 10V.

Como a configuração anterior possuía resposta lenta optou-se por fazer um

ensaio, mesmo com o ruído atual, para verificar se com a retirada do indicador digital, o tempo de resposta do transdutor é menor. Esse ensaio é mostrado na figura 5.5.

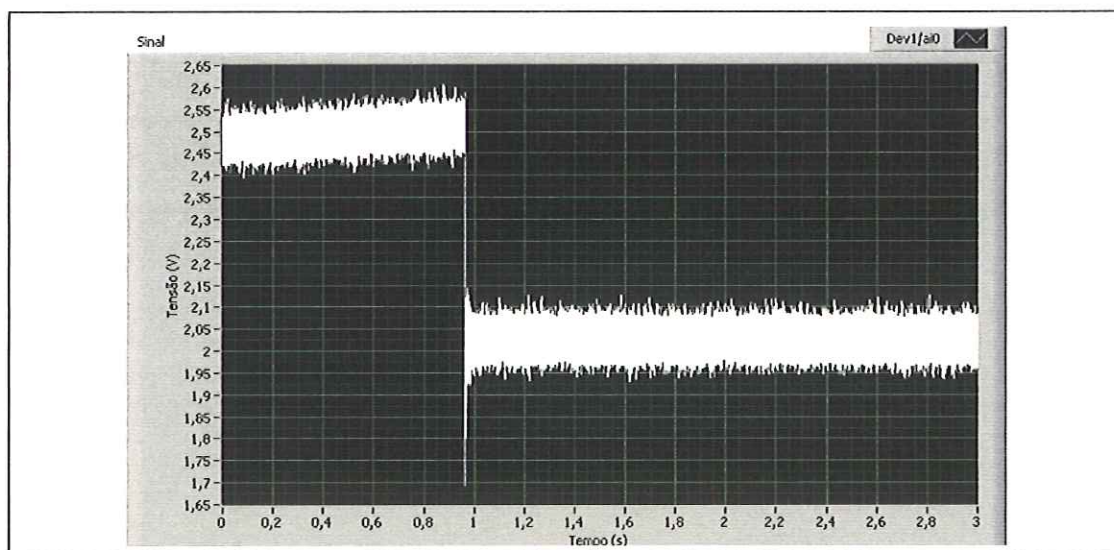


Figura 5.5 – Transiente de pressão medido pelo transdutor Zürich com filtro e sem indicador digital.

O resultado deste ensaio mostrou que o transdutor possui uma resposta bem mais rápida, comparando com o sistema anterior.

Para uma análise melhor, o gráfico foi ampliado na escala do tempo, na região que ocorreu o transiente, para verificar a resposta. Na figura 5.6 está ilustrado o gráfico com ampliação na escala do tempo do gráfico da figura 5.5.

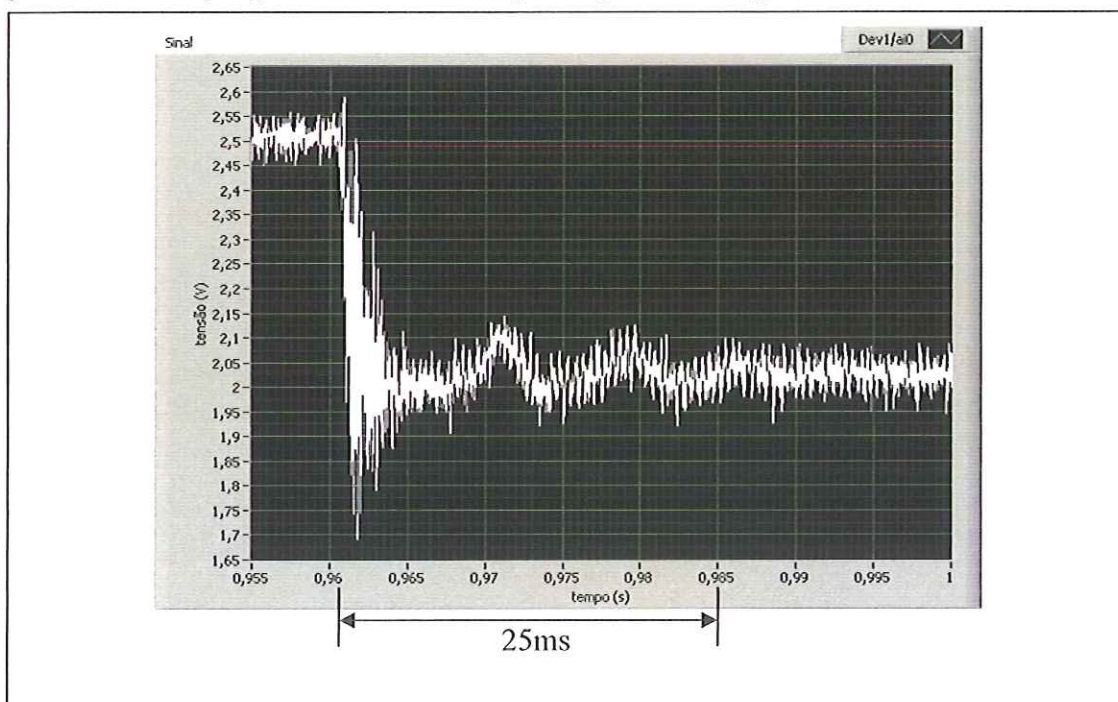


Figura 5.6 – Ampliação na escala do tempo para mostrar o transiente de pressão medido pelo transdutor Zürich com filtro e sem indicador digital.

Pela ampliação pode-se notar que o tempo de resposta é de aproximadamente 25ms, e que responde como um sistema de segunda ordem sub-amortecido. Então foi feito um outro ensaio para comprovar esta informação. A figura 5.7 mostra o novo ensaio realizado.

No gráfico da figura 5.8 a escala do tempo foi ampliada, na região que ocorreu o transiente, para uma melhor observação.

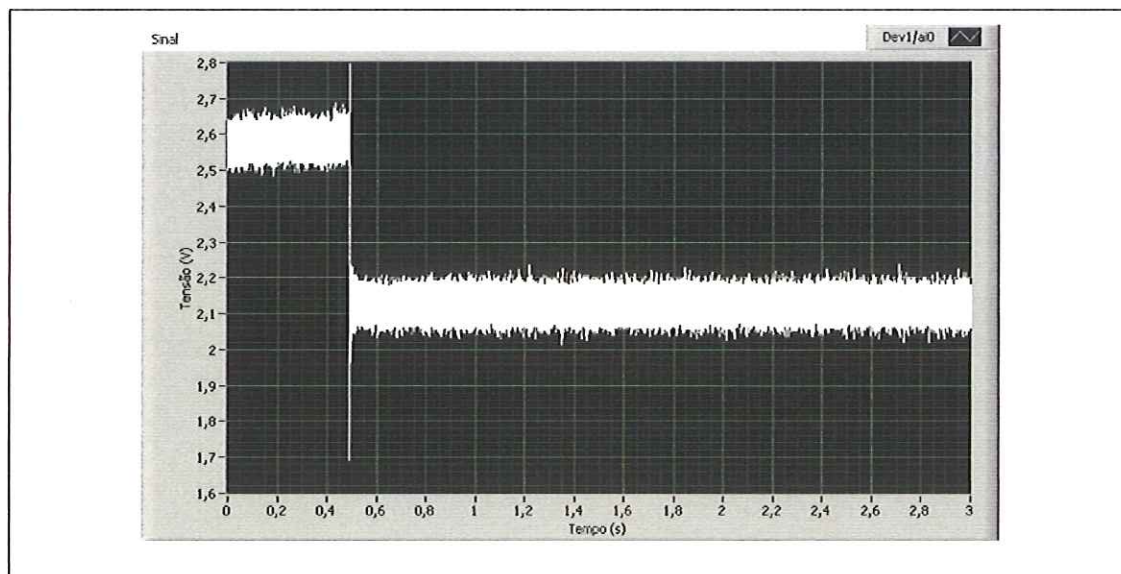


Figura 5.7 – Transiente de pressão medido pelo transdutor Zürich com filtro e sem indicador digital.

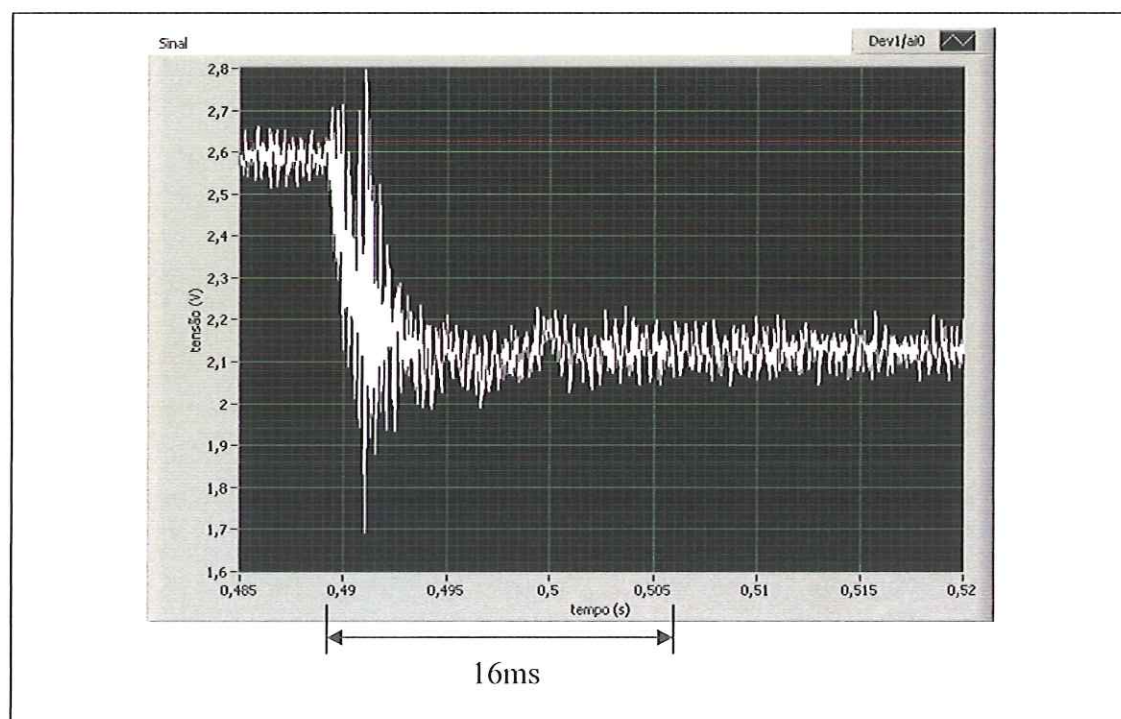


Figura 5.8 – Ampliação na escala do tempo para mostrar o transiente de pressão medido pelo transdutor Zürich com filtro e sem indicador digital.

Com a repetição do ensaio pode-se comprovar a resposta rápida do transdutor de pressão, com o tempo de resposta em um intervalo de aproximadamente 16ms e que o mesmo responde como um sistema de segunda ordem sub-amortecido, mas as oscilações são confundidas com o ruído que é muito alto.

### 5.1.2 Resultados do transdutor modelo AKS 33 fabricado pela Danfoss

Este tipo de transdutor é conectado diretamente ao sistema de aquisição de dados e não possui indicador digital.

O resultado obtido do ensaio experimental é mostrado na figura 5.9.

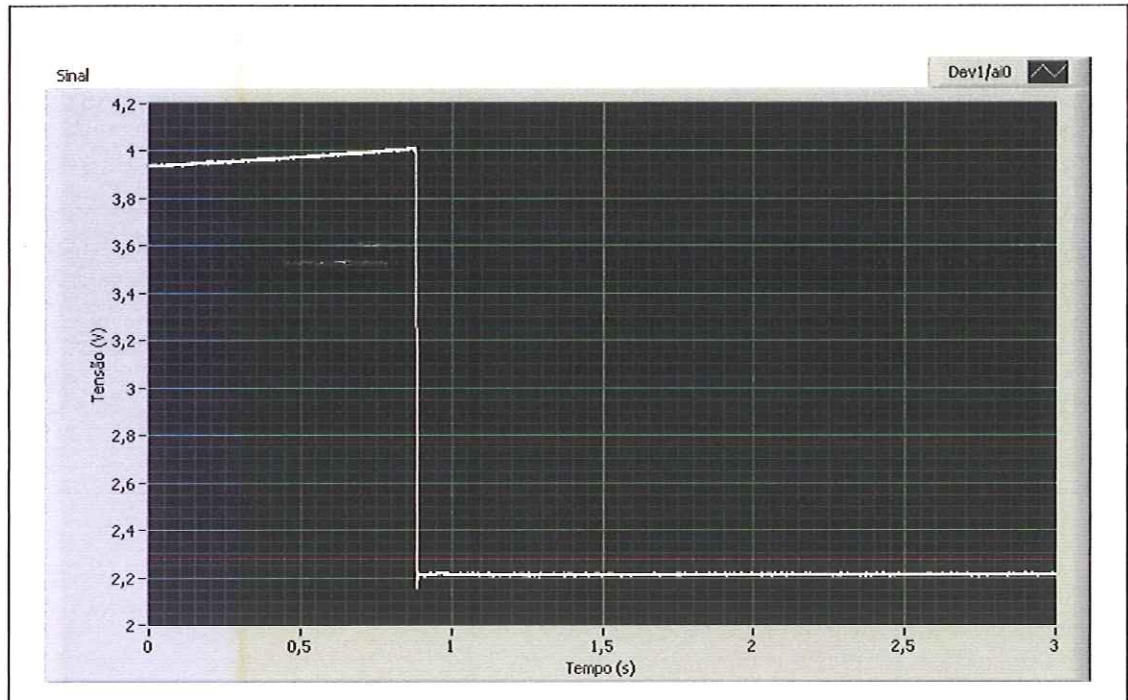


Figura 5.9 – Transiente de pressão medido pelo transdutor Danfoss sem filtro e sem indicador digital.

Nesse ensaio notou-se que o transdutor possui uma resposta aparentemente rápida. Então o gráfico foi ampliado na escala do tempo, na região que ocorreu o transiente, para análise da resposta e verificação das propriedades dinâmicas. A figura 5.10 mostra o gráfico com ampliação da escala do tempo.

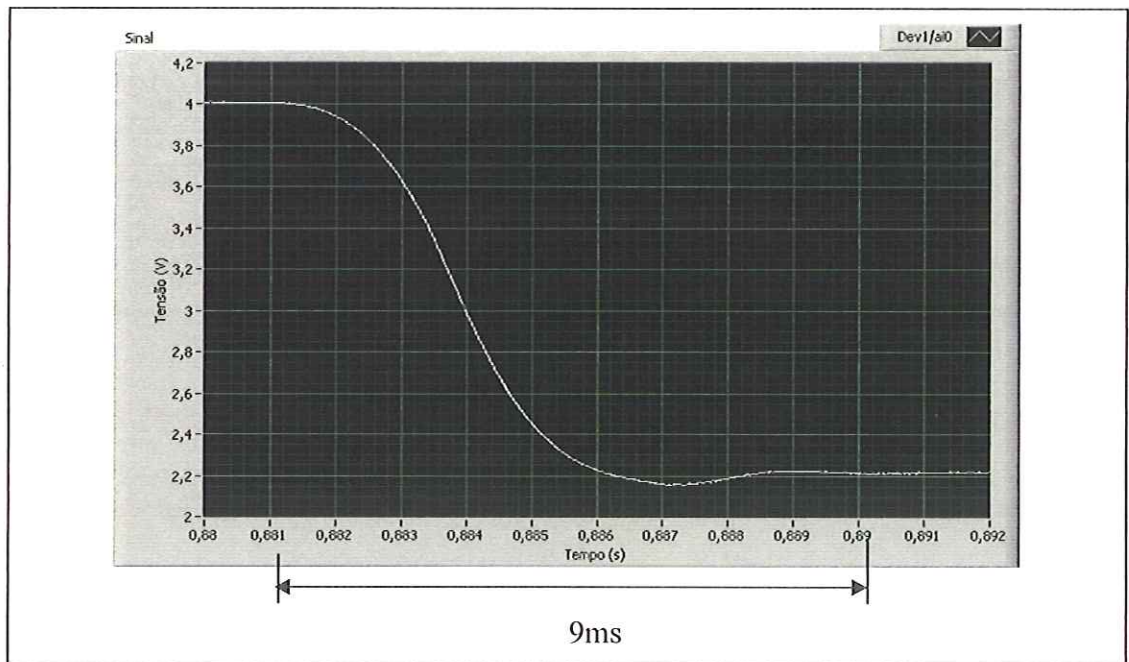


Figura 5.10 – Ampliação na escala do tempo para observação do transiente de pressão medido pelo transdutor Danfoss sem filtro e sem indicador digital.

Com este ensaio pode-se notar o tempo de resposta de aproximadamente 9ms, e que o sistema responde como um sistema de segunda ordem sub-amortecido. Então foi feito um outro ensaio para comprovar esta análise. A figura 5.11 mostra o novo ensaio realizado.

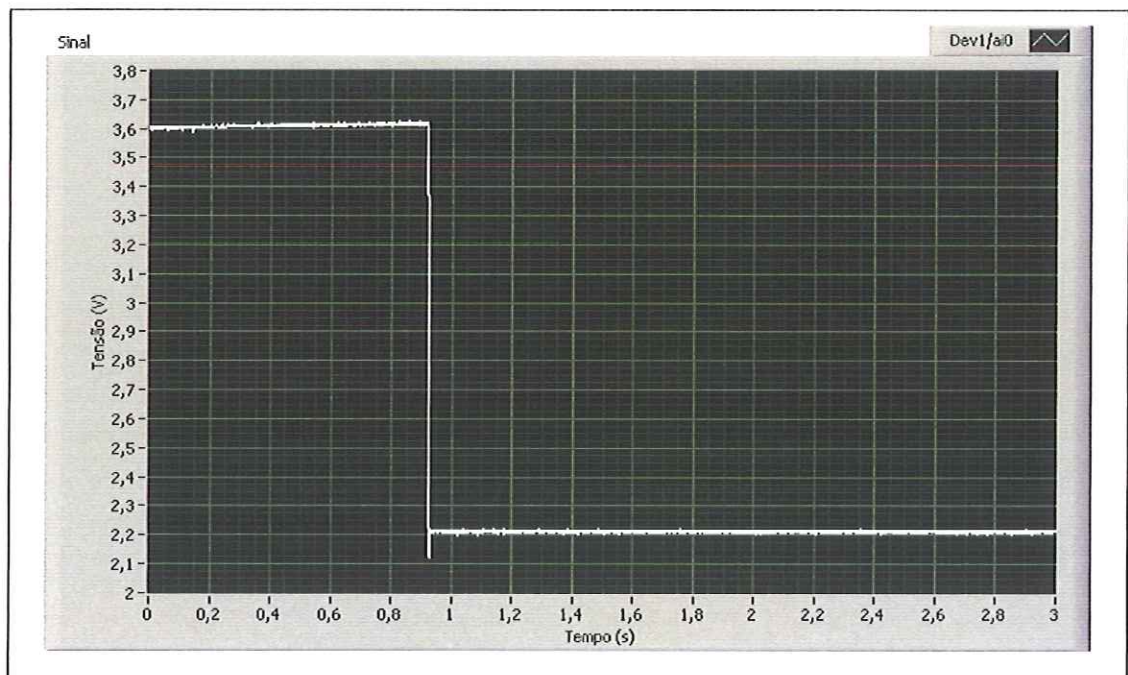


Figura 5.11 – Transiente de pressão medido pelo transdutor Danfoss sem filtro e sem indicador digital.

A figura 5.12 mostra a ampliação do gráfico da figura 5.11, na escala do tempo, na região que ocorreu o transiente de pressão, para análise da resposta.

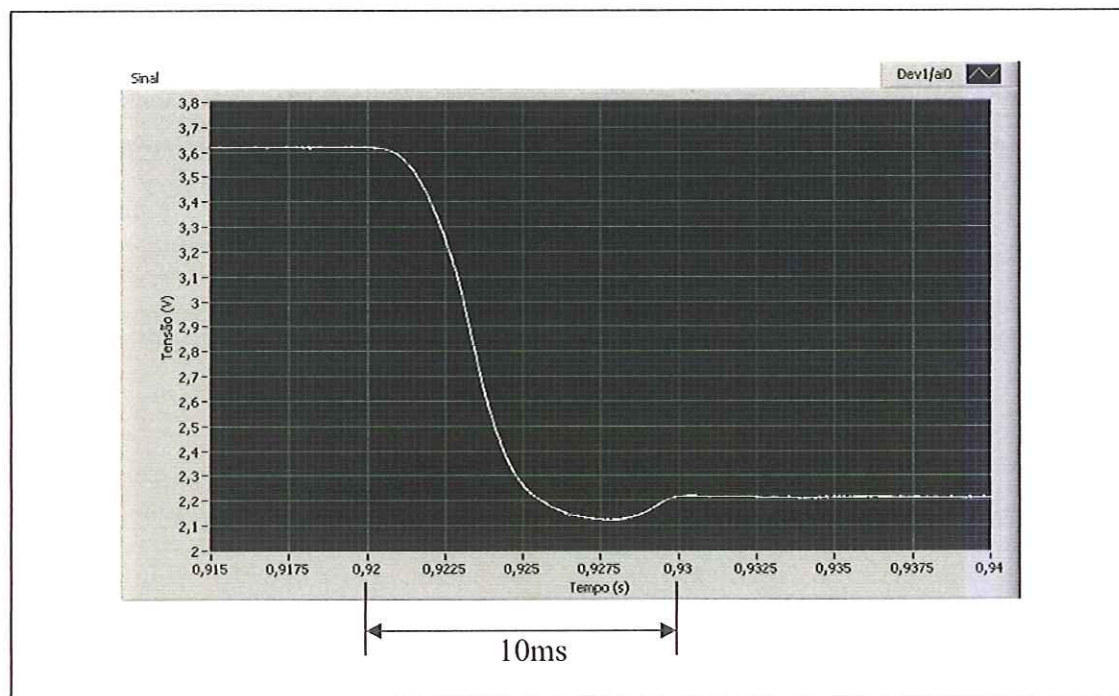


Figura 5.12 – Ampliação na escala do tempo para observação do transiente de pressão medido pelo transdutor Danfoss sem filtro e sem indicador digital.

Com este outro ensaio pode-se comprovar o tempo de resposta pequeno em um intervalo de aproximadamente 10ms, e que o sistema de medição atual responde como um sistema de segunda ordem sub-amortecido.

## 5.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

Através dos resultados obtidos pode-se encontrar um modelo matemático linear para cada transdutor de pressão.

### 5.2.1 Modelagem matemática do transdutor piezorresistivo modelo PLN-2 / PSI-

420

Para este transdutor, o indicador de pressão faz parte do sistema de medição. Portanto, as respostas a serem consideradas neste caso serão aquelas obtidas com o indicador conectado. Com esta configuração observa-se que o comportamento da

resposta desse transdutor é semelhante à de um sistema de 2ª ordem super-amortecido, conforme constatou-se no capítulo anterior. Então, para obter o modelo matemático deve-se utilizar o procedimento visto na revisão bibliográfica descrito no item 2.5.2, que divide o sistema em dois sistemas de 1ª ordem.

A função resposta normalizada ( $V_f=1$ ) para uma entrada do tipo degrau para esse sistema pode ser dada por:

$$q_o(t) = 1 - 1(1 - C)e^{-\frac{t}{\tau_1}} - 1Ce^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (5.1)$$

A resposta desse transdutor possui ruídos, como pode-se notar nos ensaios, então obteve-se alguns pontos através da média de trechos para representar a resposta ao transiente. Esses pontos obtidos podem ser observados na figura 5.13.

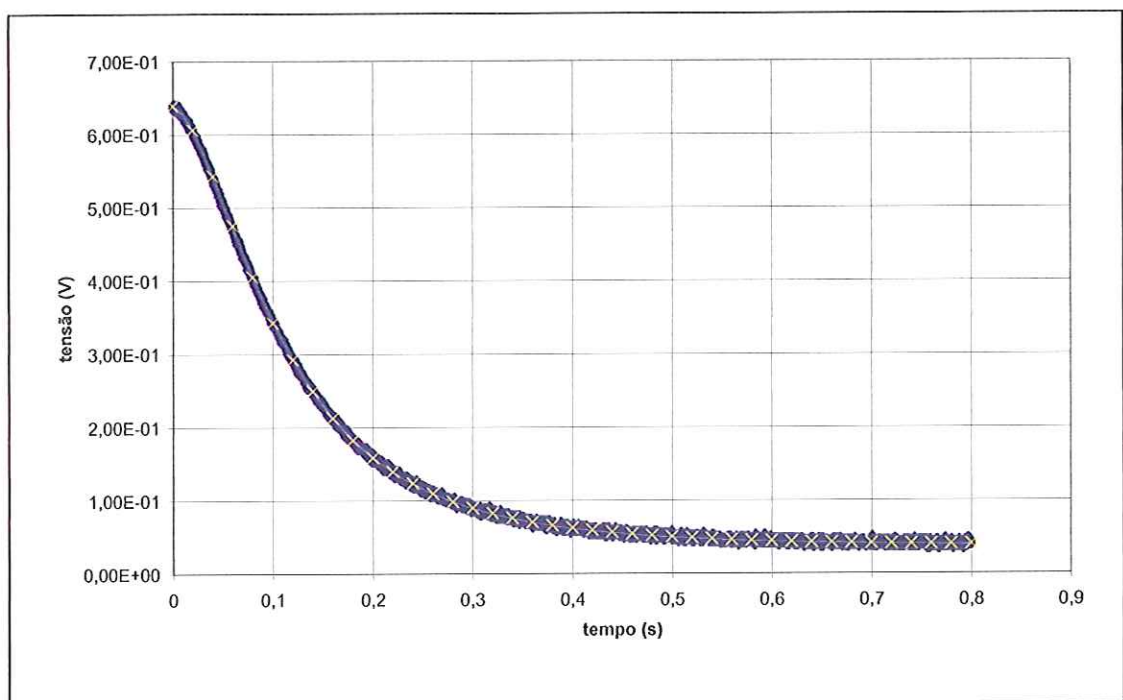


Figura 5.13 – Pontos obtidos através da média de trechos para representação da curva de resposta utilizada na modelagem.

A figura 5.14 mostra apenas os pontos obtidos no gráfico da figura 5.13 que serão utilizados na seqüência da modelagem.



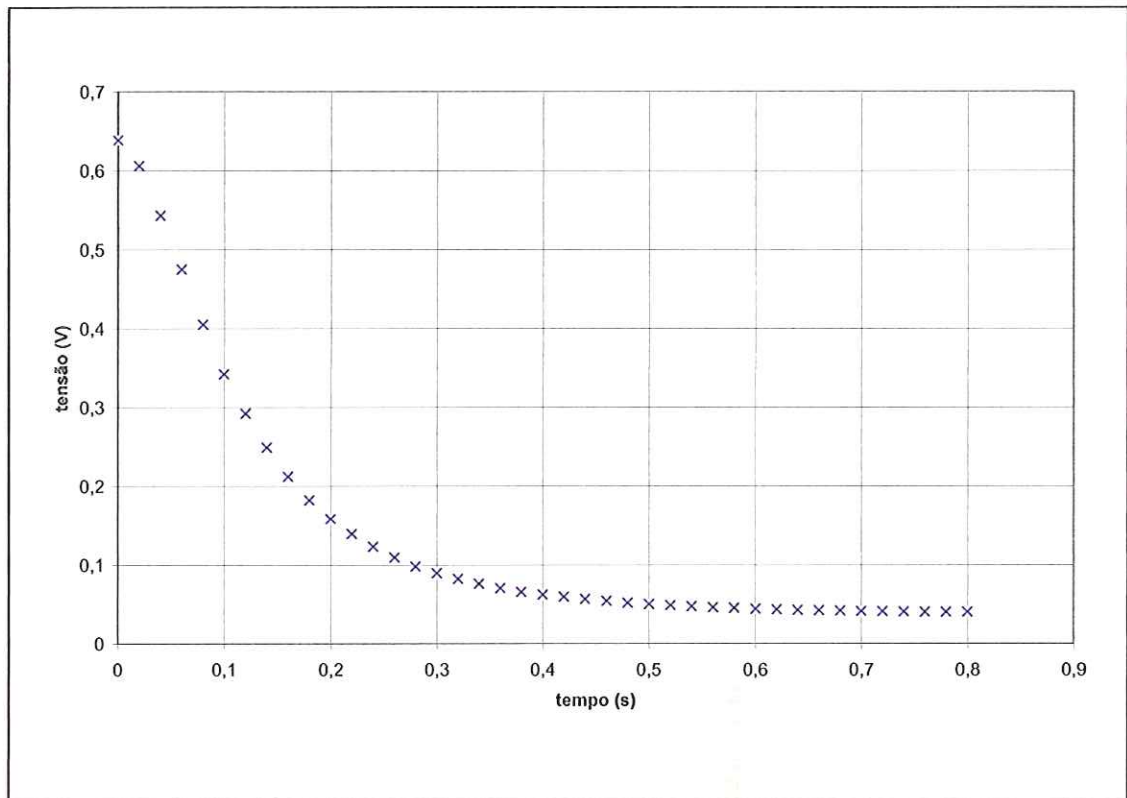


Figura 5.14 – Pontos de curva de resposta ao degrau, utilizados na modelagem.

Agora, inverte-se o gráfico da figura 5.14 para obter um degrau positivo e pode ser obtido por:

$$f(t) = \Delta V - F(t) \quad (5.2)$$

onde:

$f(t)$   $\triangleq$  função com degrau positivo, obtida pela inversão da função experimental;

$\Delta V$   $\triangleq$  diferença entre o maior e o menor valor de tensão da curva da função experimental, isto é, do eixo da ordenadas;

$F(t)$   $\triangleq$  função com degrau negativo, obtida experimentalmente.

A figura 5.15 mostra esta inversão e o deslocamento dos pontos do eixo da tensão, com o menor valor iniciando em zero.

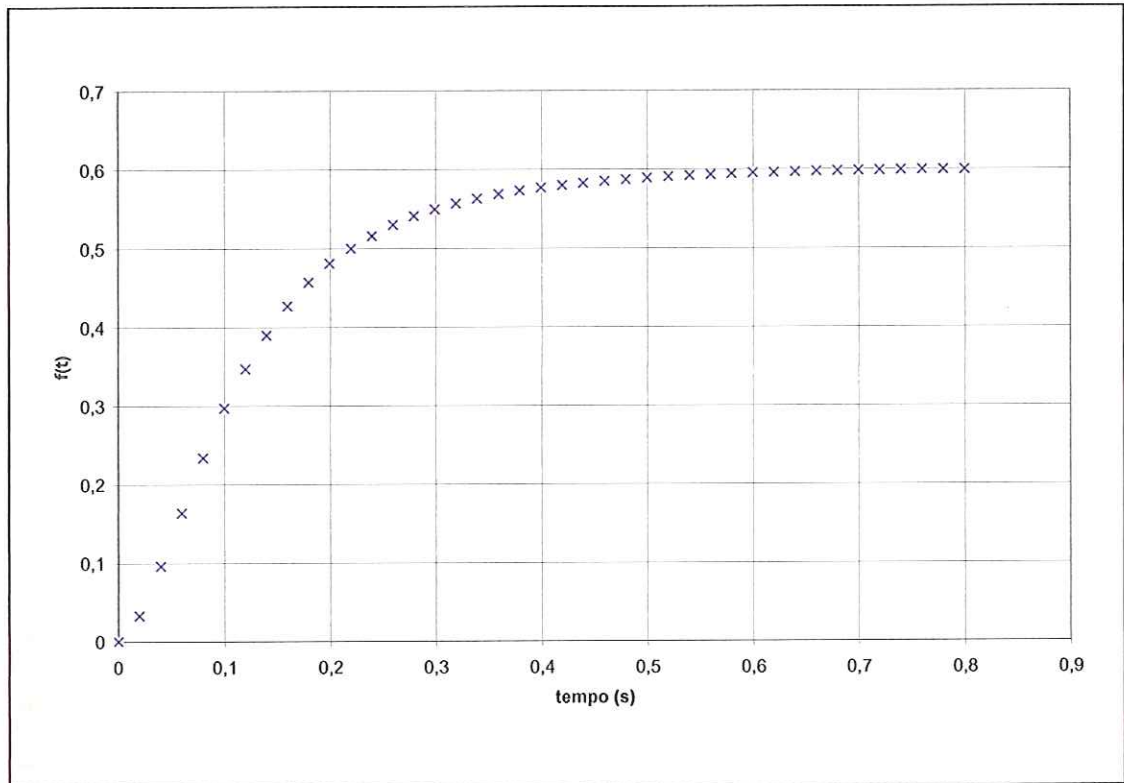


Figura 5.15 – Degrau positivo gerado pela inversão dos pontos obtidos.

Como o objetivo deste trabalho é levantar as características dinâmicas, e supondo que o transdutor tem comportamento linear, o tamanho do degrau não tem influência. Então, pode-se fazer uma normalização da função e obter um degrau entre 0 e 1. A normalização é dada por:

$$fn(t) = \frac{f(t)}{\Delta V} \quad (5.3)$$

onde:

$fn(t)$   $\triangleq$  função normalizada.

A função normalizada pode ser observada na figura 5.16.

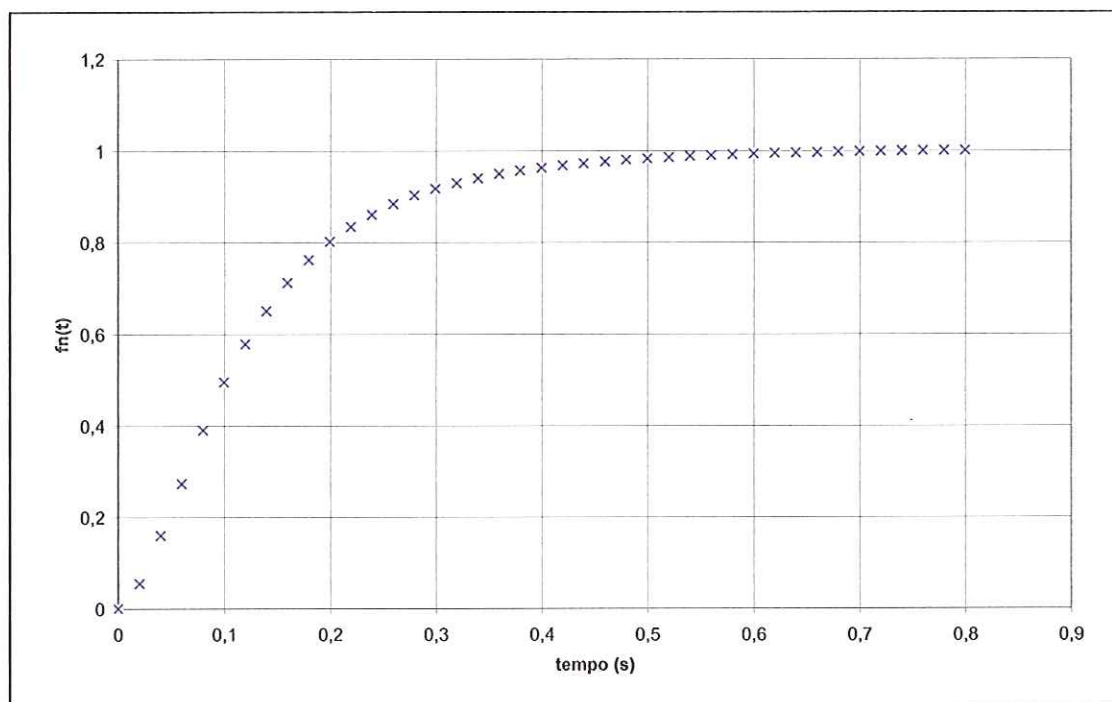


Figura 5.16 – Função normalizada.

Com a normalização e a inversão da curva de resposta, e, com as condições iniciais iguais a zero pode-se utilizar a equação 2.40, onde  $Vf=1$ .

Agora, fazendo o gráfico logarítmico, os parâmetros da função resposta podem ser obtidos através do gráfico de  $\ln[1 - f_n(t)]$  em função de  $t$ , figura 5.17.

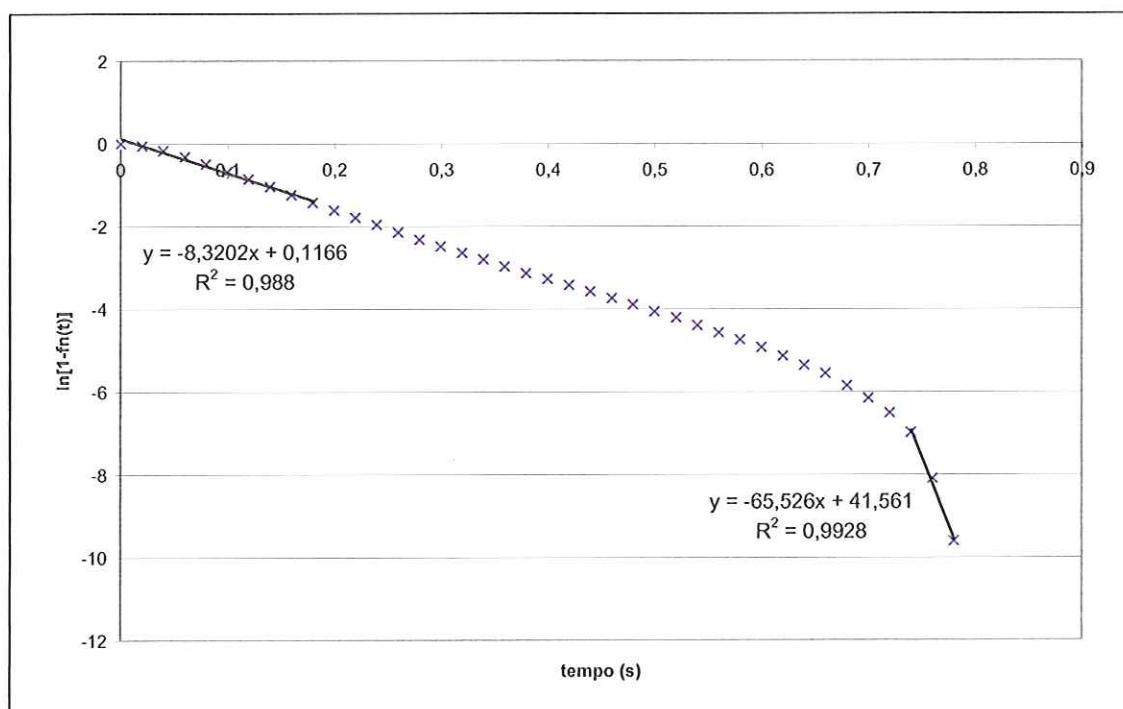


Figura 5.17 - Gráfico de  $\ln[1 - f_n(t)]$  em função de  $t$ .

A função resposta obtida pela modelagem matemática para o sistema de 2ª ordem super-amortecida é a (5.1), isto é:

$$q_o(t) = 1 - (1 - C)e^{-\frac{t}{\tau_1}} - Ce^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (5.4)$$

Os parâmetros  $C$ ,  $\tau_1$  e  $\tau_2$  da função resposta (5.4) são obtidos do gráfico da figura 5.17, conforme explicado na figura 2.34. Através da reta que passa entre os pontos do início do gráfico, nos valores de  $t$  próximos de zero, obtém-se o valor de  $\tau_1$  e  $C$ . Assim, da equação 2.41, vem:

$$\tau_1 = tg\hat{A} \quad (5.5)$$

sendo

$$tg\hat{A} = -\frac{1}{\text{coeficiente angular}} \quad (5.6)$$

então:

$$\tau_1 = -\frac{1}{-8,3202} \Rightarrow \tau_1 = 0,120189 \text{ s}$$

Para determinar o valor de  $C$  usa-se a equação 2.44, isto é:

$$C = Vf - e^r \quad (5.7)$$

então, substituindo os valores:

$$C = 1 - e^{0,1166} \Rightarrow C = -0,123670$$

Por último, para determinar o valor de  $\tau_2$  utiliza-se a reta que passa entre os pontos finais do gráfico, nos valores de  $t$  longe da origem. Assim, da equação 2.42 vem:

$$\tau_2 = tg\hat{B} \quad (5.8)$$



e, sendo

$$tg\hat{B} = -\frac{1}{\text{coeficiente angular}} \quad (5.9)$$

então:

$$\tau_2 = -\frac{1}{-65,526} \Rightarrow \tau_2 = 0,015261 \text{ s}$$

Substituindo esses valores na equação 5.4, encontra-se um modelo para a função resposta deste transdutor, que é dada por:

$$q_o(t) = 1 - (1 - (-0,12367))e^{-\left(\frac{t}{0,120189}\right)} - (-0,12367)e^{-\left(\frac{t}{0,015261}\right)} \quad (5.10)$$

A figura 5.18 mostra a curva gerada através da função modelo e a curva com os dados experimentais.

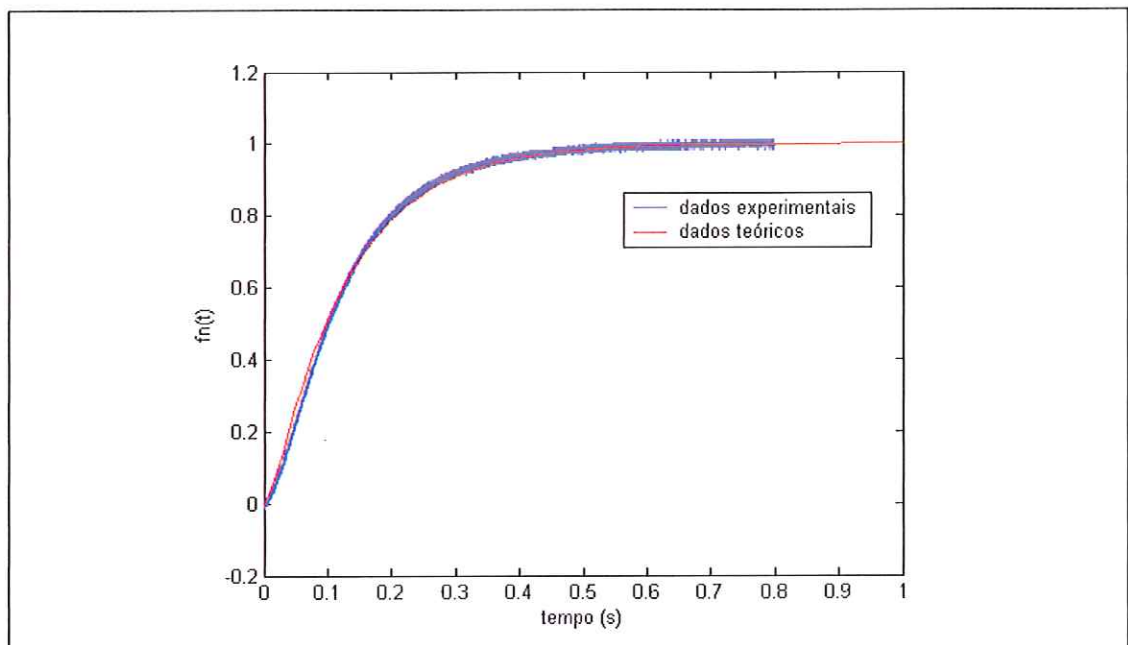


Figura 5.18 – Comparação entre a curva do modelo teórico e os dados experimentais para transdutor Zürich.

Conhecendo-se  $\tau_1$  e  $\tau_2$ , a função de transferência deste transdutor Zürich, para as condições dos ensaios, pode ser escrita como sendo:

$$\frac{V}{P}(s) = \frac{K}{(0,12s + 1)(0,015s + 1)} \quad (5.11)$$

Onde K pode ser determinado através de calibração estática, que não faz parte do escopo deste trabalho.

### 5.2.2 Modelagem matemática do transdutor piezorresistivo modelo AKS 33

O comportamento de resposta à um transiente de pressão (tipo degrau) desse transdutor é o de um sistema de 2ª ordem sub-amortecido, como observado no capítulo anterior. Então, para obter o modelo matemático utiliza-se o procedimento visto na revisão bibliográfica, item 2.5.1.

A função resposta para uma entrada do tipo degrau para esse sistema é dada pela equação 2.27, isto é:

$$q_o = Kq_{is} \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \operatorname{sen}(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t + \arcsen \sqrt{1-\zeta^2}) \right] \quad (5.12)$$

Por outro lado, manuseando os dados experimentais obtém-se a curva da figura 5.19 que é a curva de resposta da figura 5.12 invertida e normalizada.

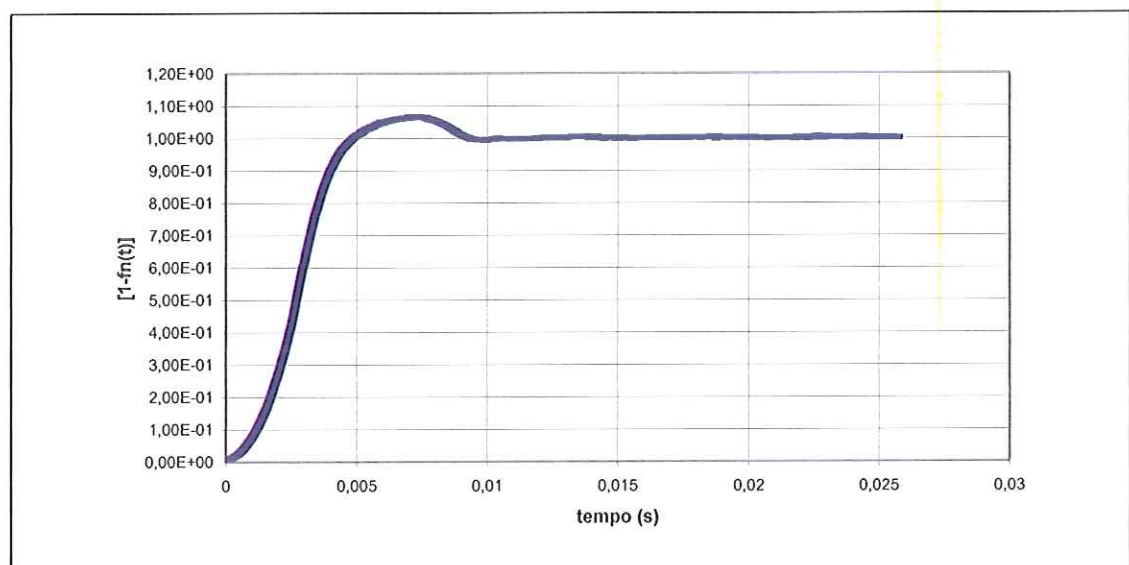


Figura 5.19 – Curva de resposta experimental, invertida e normalizada, do transdutor Danfoss.

Com a normalização e a inversão da curva de resposta, e, com as condições iniciais iguais a zero pode-se utilizar a equação 5.12 onde  $Kq_{is}=1$ .

Através do gráfico da figura 5.19 pode-se encontrar os seguintes valores:

$$M_p = 0,06 = 6\%$$

$$t_p = 0,007s$$

Onde  $M_p$  e  $t_p$  foram definidos no capítulo 2 e estão ilustrados na figura 2.28.

Com valor percentual de  $M_p$  e com o gráfico da figura 2.29 obtém-se o valor de  $\zeta$ , isto é:

$$\zeta = 0,66$$

Agora, aplicando a equação 2.29 obtém-se  $\omega_n$ .

$$\omega_n = \frac{\pi}{t_p \sqrt{1 - \zeta^2}} = 597,4 \text{ rad/s}$$

Logo, substituindo os valores na (5.12), a função modelo da resposta, para esse transdutor resulta:

$$q_o = 1 \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 - (0,66)^2}} e^{-(0,66)(597,4)t} \operatorname{sen} \left( \sqrt{1 - (0,66)^2} 597,4t + \arcsen \sqrt{1 - 0,66^2} \right) \right] \quad (5.13)$$

Com os parâmetros  $\zeta$  e  $\omega_n$  determinados, pode-se escrever a função de transferência para o transdutor Danfoss.

$$\frac{V}{P}(s) = \frac{K}{\frac{s^2}{597,4^2} + \frac{2 \times 0,66}{597,4} s + 1} \quad (5.14)$$

Onde  $K$  pode ser determinado através de calibração estática, que não faz parte do escopo deste trabalho.

A figura 5.20 mostra a comparação entre a curva gerada através da função modelo e a curva dos dados experimentais.

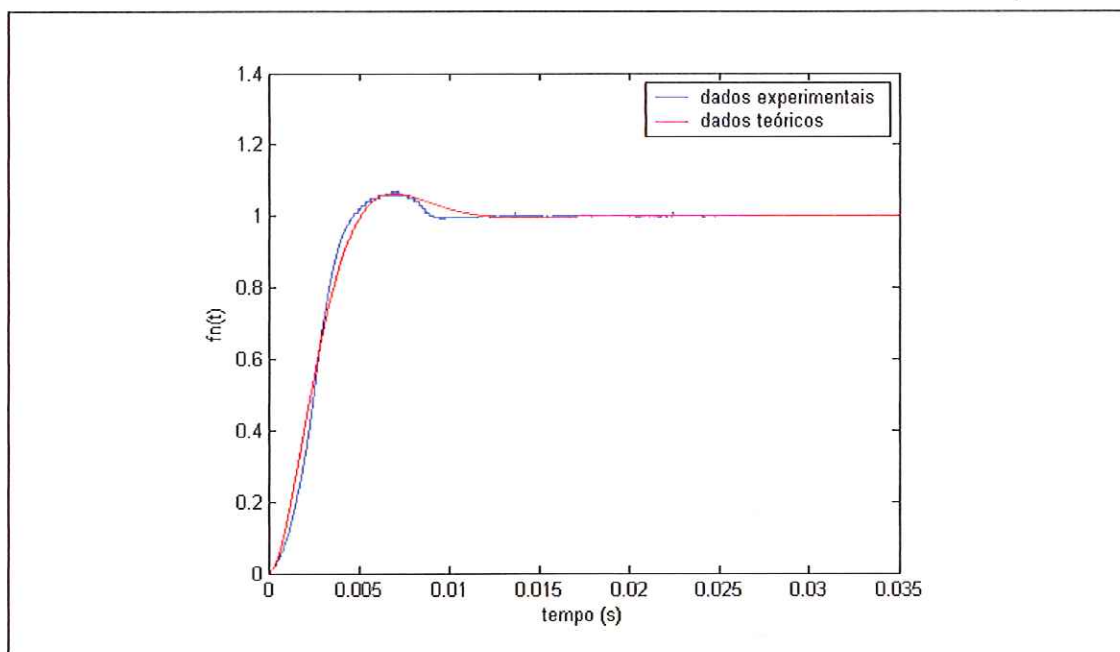


Figura 5.20 – Comparação entre a curva gerada através da função modelo e a curva dos dados experimentais.



## 6 CONCLUSÕES

No capítulo anterior foram apresentados os resultados obtidos experimentalmente e foram realizadas modelagens matemáticas para análise das características dinâmicas de dois transdutores de pressão do tipo piezorresistivo. Foram apresentados também as comparações entre os resultados gerados através dos modelos matemáticos e os experimentais.

Neste capítulo, faz-se as conclusões obtidas durante todo o trabalho, baseados principalmente nos resultados apresentados no capítulo 5, para melhor compreensão do trabalho desenvolvido e permitir definir linhas de ação para trabalhos futuros.

O gerador de pressão transiente desenvolvido mostrou-se capaz de gerar um transiente de pressão bastante rápido, como esperado, que pode operar com baixas e altas pressões (aproximadamente 1000psi).

Comparando o gerador desenvolvido com os geradores do capítulo 2, nota-se que este possui baixo custo de fabricação e é de fácil uso. Além disso, possui uma grande vantagem de não usar um sistema auxiliar como padrão. Com isso conclui-se que o gerador desenvolvido cumpriu satisfatoriamente o objetivo proposto.

Conforme pode ser observado no capítulo 5, as respostas obtidas através dos modelos matemáticos lineares para sistemas de 2ª ordem super-amortecido e sub-amortecido, mostraram ter uma concordância satisfatória quando comparadas com os dados obtidos experimentalmente. Com isso foi possível descrever matematicamente a parte dinâmica dos transdutores de pressão e conseqüentemente, a obtenção das respectivas Funções de Transferência, a menos dos seus ganhos.

Portanto, pode-se considerar que os modelos obtidos podem ser utilizados na determinação das características dinâmicas de transdutores de pressão supondo-os como a um sistema de 2ª ordem super-amortecido ou sub-amortecido. Com isso

conclui-se que os objetivos da modelagem matemática foram alcançados.

Conforme pode ser observado no capítulo 5, a configuração que usa o transdutor de pressão piezorresistivo modelo PLN-2 / PSI-420 com o indicador digital filtra grande parte do ruído, mas deixa a resposta do sistema de medição lenta. Esta característica pode limitar suas aplicações, principalmente em trabalhos de pesquisa onde tem-se a exigência de alta velocidade de resposta.

Os ensaios realizados com o mesmo transdutor e sem o indicador digital mostrou ter uma resposta mais rápida, mas com um nível de ruído muito alto. Nesse caso o sinal medido acaba sendo confundido com o ruído.

Baseando-se nos resultados desses testes pode-se concluir que é inviável a utilização deste transdutor em alguns processos que possuem variação rápida de pressão.

Como pode ser observado no capítulo 5 através dos ensaios realizados, o transdutor de pressão piezorresistivo modelo AKS 33 que não utiliza indicador digital, apresenta um nível de ruído baixo e a resposta ao transiente é mais rápida, e isto amplia a possibilidade de ser empregado em certas medições dinâmicas de pressão.

Através dessas análises conclui-se que em processos de medição de pressão que necessitam respostas relativamente rápidas, o transdutor modelo AKS 33 é melhor recomendado.

Resumindo, pode-se dizer que o trabalho aqui desenvolvido atingiu todos os objetivos propostos. Realizou-se o desenvolvimento de um sistema de calibração dinâmica que não utiliza um sistema de referência, mas um gerador de pressão transiente tipo degrau de baixo custo e de simples operação. Com os modelos matemáticos obtidos e os métodos de obtenção de resposta transitória utilizados, foi possível descrever matematicamente as características dinâmicas dos transdutores de pressão através da determinação do denominador das respectivas funções de transferência.

Fica como proposta para trabalhos posteriores o aperfeiçoamento do gerador de pressão transiente, principalmente no que se refere ao desenvolvimento de diafragmas, tanto quanto à forma como ao material, para que sejam extremamente frágeis e tenham rupturas com grandes fraturas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAO, M. *et al.* A fast and accurate calibration method for high sensitivity pressure transducer. *Sensors and Actuators*, v. 108, p. 218-223, Apr. 2003.

BEAN, V. E. Dynamic pressure metrology. *Metrologia*, v. 30, p. 737-741, 1993.

BEAN, V. E. *et al.* Development of a primary standard for the measurement of dynamic pressure and temperature. *Metrologia*, v. 30, p. 747-750, 1993/94.

BECKWITH, T. G.; BUCK, N.L. *Mechanical measurement*. Massachusetts: Addison-Wesley, 1965.

CHUTOV, Y. I.; PODOL'SKII, V. N.; BRAION, D. A. Electromechanical shock tube. *Instruments and experimental Techniques*, v. 35, n. 4, part II, p. 680-682, Jul-Aug, 1992.

DAMION J. P. Means of dynamic calibration for pressure transducer. *Metrologia*, v. 30, p. 743-746, 1993.

DINIZ, A. C. G. C. Gerador periódico para calibração dinâmica de transdutores de pressão. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília UnB, 1994.

DINIZ, A. C. G. C.; VIANNA, J. N. S.; NEVES, F. J. R. Calibração dinâmica de sensores de pressão: métodos e meios. In: METROLOGIA 2003 – METROLOGIA PARA A VIDA, Recife, 2003.

DINIZ, A. C. G. C.; NEVES, F. J. R. Avaliação metrológica de um gerador de pressão para calibração dinâmica. In: METROLOGIA 2003 – METROLOGIA PARA A VIDA, Recife, 2003.

DOEBELIN, E. O. *Measurement systems: application and design*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1990.

DOEBELIN, E. O. *System modeling and response: theoretical and experimental approaches*. New York: Wiley, 1980.

DOEBELIN, E. O. *System dynamics: modeling, analysis, simulation, design*. New York: Marcel Dekker, 1998.

HAVEY, R. M. *et al.* Research forum – methodology – measurements, part II: instrumentation and apparatus. *Journal of prosthetics & orthotics*, v. 8, n. 2, p. 50-64, 1996. Disponível em: <[www.oandp.org/jpo/library/1996\\_02\\_050.asp](http://www.oandp.org/jpo/library/1996_02_050.asp)>. Acesso em: 25 maio 2005.

HJELMGREN, J. *Dynamic measurement of pressure – a literature survey*. Sweden: SP Swedish National Testing and Research Institute, 2002. Disponível em: <[www.sp.se/metrology/dynamic/dokument/2002\\_34.pdf](http://www.sp.se/metrology/dynamic/dokument/2002_34.pdf)>. Acesso em: 25 maio 2005.

ISMAIL, K. A. R.; GONÇALVES, M. M.; BENEVENUTO, F. J. *Instrumentação básica para engenharia*. Campinas, S.P.: Ed. do autor, 1998.

JONES, R.; BERGQUIST, B.D. Interferometric techniques for fundamental static or dynamic pressure measurements and transducer calibration. *Journal of physics e: scientific instruments*, Great Britain, v. 10, p. 1265-1271, Aug. 1977.

KISTLER INSTRUMENT CORPORATION. *The piezoelectric effect, theory, design and usage*, [200-?]. Disponível em: <[www.globalspec.com/kistler/ref/tech\\_theory\\_text.htm](http://www.globalspec.com/kistler/ref/tech_theory_text.htm)>. Acesso em: 25 maio 2005.

KOBATA, T.; OOIWA, A. Method of evaluating frequency characteristics of pressure transducers using newly developed dynamic pressure generator. *Sensors and actuators*, v.79, p. 97-101, 2000.

KOBATA, T.; OOIWA, A. Square-wave pressure generator using a novel rotating valve. *Metrologia*, v.36, p. 637-640, 1999.

LALLY, J.; CUMMISKEY, D. Dynamic pressure calibration. *Sensor technology and design*, Apr. 2003. Disponível em: <[www.sensorsmag.com/articles/0103/19/main.shtml](http://www.sensorsmag.com/articles/0103/19/main.shtml)>. Acesso em: 25 maio 2005.

LIU, H.; MILLER, D. W.; TALNAGI, J. W. An experimental method to dynamically test pressure sensors using a rupture disk. *Review of scientific instruments*, v. 73, n. 2, p. 459-463, Feb. 2002.

OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 1982.

OMEGA. *Transactions in measurement and control: force-related measurements*. v. 3. Disponível em: <[www.omega.com/literature/transactionsTransactions\\_Vol.III.pdf](http://www.omega.com/literature/transactionsTransactions_Vol.III.pdf)>. Acesso em: 25 maio 2005.

PANIAGUA, G.; DÉNOS, R. Digital compensation of pressure sensors in the time domain. *Experiments in fluids*, v. 32, p. 417-424, 2002.

ROSASCO, G. J.; BEAN, V. E.; HURST, W. S. A proposed dynamic pressure and temperature primary standard. *Journal of research of the national institute of standards and technology*, v. 95, n. 33, p. 33-47, Jan-Feb, 1990.

SCHWEPPE, J. L. *et al.* Methods for the dynamic calibration of pressure transducers. National bureau of standards monograph 67, Dec. 1963.

SHIPUNOV, A. V. Mechanical measurements: determination of the dynamic characteristics of piezoelectric pressure transducers and a comparative analysis of methods. *Measurement techniques*, v. 42, n. 10, p. 959-961, 1999.

SMITH, R. O. A liquid-medium step-function pressure calibrator. *ASME Journal of basic engineering*, p.723-728, Dec. 1964.

SWIFT, G. W. *et al.* Two methods for absolute calibration of dynamic pressure transducer. *Review of scientific instruments*, v. 53, n. 12, p. 1906-1910, Dec. 1982.

SYDENHAM, P. H. *et al.* *Handbook of measurement science: practical fundamentals*. New York: Wiley-Interscience, 1992. v. 2.

VIANNA, J. N. de S.; OLIVEIRA, A. B. de S.; DAMION, J. P. Influence of the diaphragm on the metrological characteristics of a shock tube. *Metrologia*, v. 36, p. 599-603, 1999.

VOITENKO, V. A.; KUZNETSOV, L. I. A pendulum method for calibrating piezoelectric gauges. *Instruments and experimental Techniques*, v. 35, n. 4, part II, p. 709-711, Jul-Aug, 1992.

WEYER, H.; SCHODL, R. Development and testing of techniques for oscillating pressure measurements especially suitable for experimental work in turbomachinery. *ASME Journal of basic engineering*, p. 603-609, Dec. 1971.

WILSON, J. S. Pressure measurement: principles and practice. *Sensor technology and design*, Jan. 2003. Disponível em: [www.sensorsmag.com/articles/0103/19/main.shtml](http://www.sensorsmag.com/articles/0103/19/main.shtml). Acesso em: 25 maio 2005.

ZAKRZEWSKI, J.; WRÓBEL, K. Dynamic calibration of low range silicon pressure sensors. *IEEE instrumentation and measurement technology conference*, Budapest, p. 493-496, May 2001.

## APÊNDICE A – Gerador de Pressão Transiente tipo Degrau

O gerador de pressão transiente tipo degrau projetado para esse trabalho foi dimensionado para suportar pressões acima de 1000psi, como pode ser observado no cálculo da câmara de pressão que está descrito abaixo:

Dados:

$$P = 70 \text{ kgf/cm}^2$$

$$d = 10 \text{ cm}$$

$$\sigma_e = 2200 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (material SAE 1020)}$$

$$F_p = 4720 \text{ kgf (parafuso Allen M8x1,25)}$$

onde:

$P \triangleq$  Pressão na câmara ( $\text{kgf/cm}^2$ );

$d \triangleq$  diâmetro interno da câmara (cm);

$\sigma_e \triangleq$  tensão de escoamento do material ( $\text{kgf/cm}^2$ );

$F_p \triangleq$  resistência do parafuso à tração (kgf).

Adotado coeficiente de segurança  $s=2$ . Então:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_e}{s} \tag{A.1}$$

onde:

$\sigma_a \triangleq$  tensão de admissível do material ( $\text{kgf/cm}^2$ ).

Substituindo os valores em (A.1), obtém-se:

$$\sigma_a = \frac{2200}{2} \Rightarrow \sigma_a = 1100 \text{ kgf/cm}^2$$

Supondo tubo de parede fina, o cálculo da espessura da parede da câmara é dado por:

$$e = \frac{Pd}{2\sigma_a} \quad (\text{A.2})$$

onde:

$e$   $\triangleq$  espessura da parede da câmara (cm).

então, substituindo os dados:

$$e = \frac{70 \cdot 10}{2 \cdot 1100} \Rightarrow e = 0,32 \text{ cm} = 3,2 \text{ mm}$$

Devido a usinagem, fixação de parafusos e a favor da segurança, o material adotado para a fabricação da câmara é a barra de 6" de diâmetro, sendo a menor espessura da parede  $e=11 \text{ mm}$ .

$\therefore$  Considerando ainda parede fina, a tensão real é dada por:

$$\bar{\sigma} = \frac{Pd}{2e} \quad (\text{A.3})$$

onde:

$\bar{\sigma}$   $\triangleq$  tensão real calculada ( $\text{kgf/cm}^2$ ).

Substituindo os valores em (A.3), obtém-se:

$$\bar{\sigma} = \frac{70 \cdot 10}{2 \cdot 1,1} \Rightarrow \bar{\sigma} = 318 \text{ kgf/cm}^2$$



O cálculo do coeficiente de segurança real é dado por:

$$n = \frac{\sigma_c}{\sigma} \quad (\text{A.4})$$

onde:

$n$   $\triangleq$  coeficiente de segurança real utilizado na câmara de pressão.

então, substituindo os dados:

$$n = \frac{2200}{318} \Rightarrow n = 6,9$$

No dispositivo são utilizados parafusos de cabeça cilíndrica com sextavado interno M8x1,25 norma Din 912, e a quantidade utilizada é determinada por:

$$N_p = \frac{F}{F_p} \quad (\text{A.5})$$

onde:

$N_p$   $\triangleq$  quantidade mínima de parafusos;

$F$   $\triangleq$  força gerada pela pressão na câmara (kgf).

A força gerada pela pressão na câmara é dada por:

$$F = PA \quad (\text{A.6})$$

onde:

$A$   $\triangleq$  área interna da câmara (cm<sup>2</sup>).

A área interna da câmara é obtida através de:

$$A = \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \quad (\text{A.7})$$

Substituindo os valores em A.7, obtem-se:

$$A = \left( \frac{\pi \cdot 10^2}{4} \right) \Rightarrow A = 78,54 \text{ cm}^2$$

Agora, substituindo os dados em A.6, tem-se:

$$F = 70 \cdot 78,54 \Rightarrow F = 5498 \text{ kgf}$$

Finalmente, substituindo o valores em A.5, obtem-se

$$N_p = \frac{5498}{4720} \Rightarrow N_p = 1,165$$

∴ Foram adotados 8 parafusos para melhor fixação do diafragma.

## APÊNDICE B – Programa para Aquisição de Dados

O programa para aquisição de dados utilizado nos ensaios foi desenvolvido especialmente para esse trabalho no software LabView da National Instruments e o seu diagrama segue ilustrado na figura B.1.

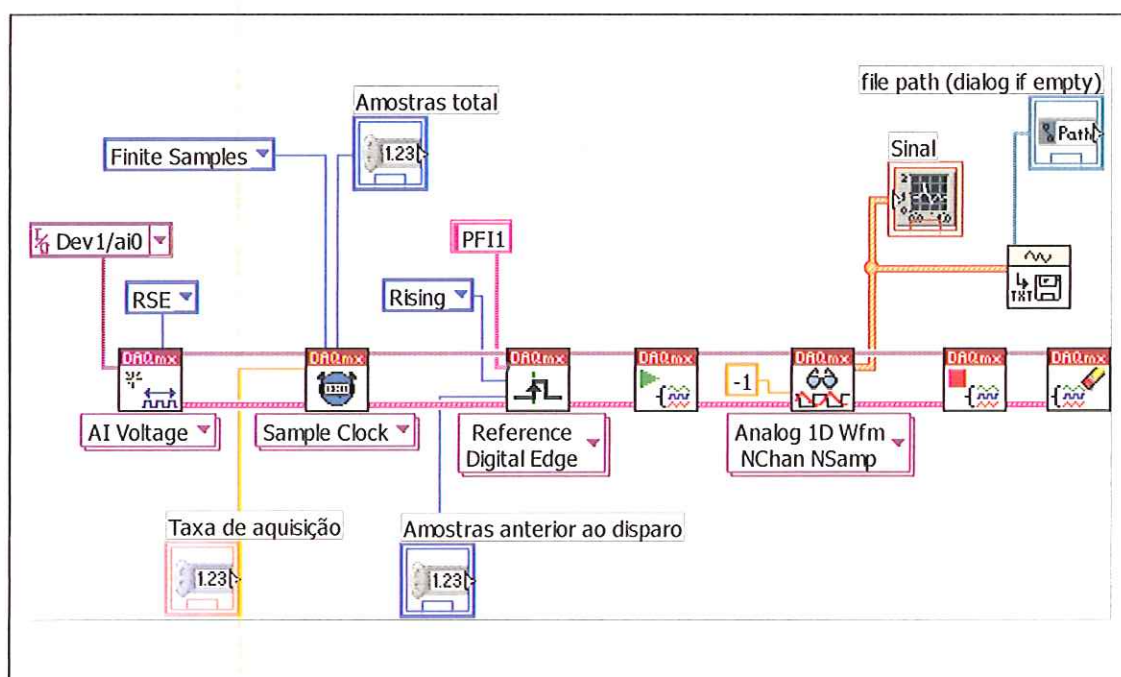


Figura B.1 – Diagrama do programa de aquisição de dados desenvolvido em software LabView da National Instruments.

## ANEXO A – Características Principais dos Transdutores

### C.1 – Características Principais do Transdutor modelo AKS 33

As características principais desse transdutor são observadas na tabela C.1.

TABELA C.1	
Características Principais do Transdutor de Pressão modelo AKS 33	
Exatidão ( $3\sigma$ )	$\pm 0,3\%$ f.s. (típico) / $\pm 0,8\%$ f.s. (máximo)
Não linearidade	$< \pm 0,2\%$ f.s.
Histerese e repetibilidade	$< \pm 0,1\%$ f.s.
Deslocamento térmico do ponto zero	$\leq \pm 0,1\%$ f.s./10K (típico)
Sensibilidade térmica (span) deslocamento	$\leq \pm 0,1\%$ f.s./10K (típico)
Tempo de resposta	$< 4$ ms
Máxima pressão de operação	34 bar
Pressão de ruptura	Mínimo 300 bar

### C.1 – Características Principais do Transdutor modelo PLN-2 / PSI-420

As características principais desse transdutor são observadas na tabela C.2.

TABELA C.2	
Características Principais do Transdutor de Pressão modelo PLN-2 / PSI-420	
Precisão	0,5% f.s. (opcional 0,25% f.s. ou 0,1% f.s.)
Linearidade	0,5% f.s. (opcional 0,25% f.s. ou 0,1% f.s.)
Histerese e repetibilidade	0,5% f.s. (opcional 0,25% f.s. ou 0,1% f.s.)
Zero e Span	Ajustáveis 20% f.s.
Precisão do sinal	$< 0,1\%$
Faixa de indicação	0 – 2000 psi
Sobreprensão	2 x f.s.