



**Alfredo Jorge Bahia Heine**

**Desenvolvimento de Metodologia de  
Calibração de Transdutor Piezelétrico de  
Pressão utilizado em Balística Interna**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Metrologia junto ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Área de concentração: Metrologia para a Qualidade e Inovação.

Orientador: Prof. Alcir de Faro Orlando

Rio de Janeiro  
Agosto de 2004



**Alfredo Jorge Bahia Heine**

**Desenvolvimento de Metodologia de  
Calibração de Transdutor Piezelétrico de  
Pressão utilizado em Balística Interna**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre junto ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Área de concentração: Metrologia para a Qualidade e Inovação. Aprovada pela Comissão Examinadora, e homologada pela Coordenação Setorial de Pós-Graduação, formalizado pelas respectivas assinaturas.

**Comissão Examinadora:**

**Prof. Alcir de Faro Orlando**

Orientador  
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Maurício Nogueira Frota**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Coordenação Setorial de Pós-Graduação:**

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do  
Centro Técnico Científico – PUC-Rio  
Rio de Janeiro, 13 de agosto de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Alfredo Jorge Bahia Heine**

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidade Federal da Bahia em 15 de fevereiro de 1997. Durante o curso, estagiou na White Martins, como auxiliar do engenheiro de processo dessa empresa. Estagiou, também, na Politen, no Pólo Petroquímico de Camaçari, onde trabalhou com "Total Quality Control" (TQC). Pouco antes de se formar, foi contratado como auxiliar técnico pela empresa VMO Construções LTDA, tornando-se engenheiro da empresa em 17 de fevereiro de 1997. Um ano depois, por ocasião de sua aprovação em terceiro lugar, dentre os engenheiros mecânicos, de todo o Brasil, no concurso do Instituto Militar de Engenharia (IME), desligou-se da VMO para ingressar no Exército. Fez, então, no IME um curso de extensão em Engenharia de Armamento. Trabalhou, em seguida, por 3 anos, na Indústria de Material Bélico do Brasil, filial de Juiz de Fora (IMBEL-FJF). Em 2001 solicitou ao IME autorização para cursar mestrado em Metrologia, cujo objetivo vem a se concretizar com esta dissertação.

#### Ficha Catalográfica

<p>Heine, Alfredo Jorge Bahia</p> <p>Desenvolvimento de metodologia de calibração de transdutor piezelétrico de pressão utilizado em balística interna / Alfredo Jorge Bahia Heine; orientador: Alcir de Faro Orlando. - Rio de Janeiro: PUC, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação, 2004.</p> <p>v., 150 f.: il. ; 29,7 cm</p> <p>1. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação (Pós-MQI).</p> <p>Inclui referências bibliográficas.</p> <p>1. Metrologia – Teses. 2. Balística interna. 3. Controle de qualidade. 4. Indústria de armamento. 5. Incerteza de medição. 6. Calibração. 7. Pressão transiente. 8. Transdutor. 9. Piezelétrico. I. Orlando, Alcir de Faro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação. III. Título</p>
---

CDD: 389.1

Dedico este trabalho ao despertar do empreendedor que jaz adormecido no âmago de muitos e, àqueles poucos em quem esse despertar já aconteceu, que não se acomodem, já que empreender é muito bom, prazeroso, dá gosto à vida!

## Agradecimentos

A Deus, pela oportunidade de existir e por me conceder o privilégio de realizar este curso.

Ao meu orientador Alcir de Faro Orlando, Ph.D., que me fez despertar a tempo para iniciar e concluir os trabalhos experimentais *com o que havia disponível*.

Ao coordenador do Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação (Pós-MQI), Maurício Nogueira Frota, Ph.D., por ter me aceito para matrícula no curso e por ter me alertado para detalhes importantes.

Ao Professor Márcio da Silveira Carvalho, Ph.D., por ter aceito o nosso convite para participar da Banca Examinadora, prestigiando e valorizando a nossa defesa.

À nossa secretária do Pós-MQI, Eliane Albernaz, amiga, prestativa, eficiente e sempre com boa vontade e bom humor.

À PUC-Rio e ao Exército Brasileiro por terem me dado excelentes condições para realizar o curso.

Ao Instituto Militar de Engenharia, que, por intermédio do Major Marcílio, adjunto da Subdivisão de Cursos de Pós-Graduação, cedeu equipamentos imprescindíveis aos trabalhos experimentais; e por intermédio do Cel Diniz, então chefe do Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais, contribuiu decisivamente para a escolha do problema objeto desta dissertação.

Ao chefe e ao vice-chefe do DLog, Gen Curado, e Gen Aurélio, bem como ao Cel Wellington e Cel Corrêa Moraes, por terem compreendido a minha situação de mestrando em tempo parcial de uma universidade de outro estado, tendo cedido algumas horas do expediente para que eu me dedicasse à dissertação.

Aos colegas do Pós-MQI e a todos os meus amigos da PUC-Rio, do Instituto Militar de Engenharia e do Exército Brasileiro, pelas palavras de incentivo e pelo bom companheirismo e amizade com que sempre me distinguiram.

Ao Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento (IPD), que, por intermédio do Cel Schneider e do Cap Eifler, bem como do Cap Luiz e do Cap Rezende, muito me ajudou na fabricação do Calibrador Dinâmico de Piezelétrico e na escolha do problema objeto da dissertação.

Ao Sargento Vilter, ao Sargento Gonçalves, ao Vital e ao Edvaldo, da Seção de Apoio Mecânico (SAM) do IPD, que me ajudaram na fabricação do Calibrador Dinâmico de Piezelétrico.

Aos amigos da IMBEL-FJF, Cel José Souza Ribeiro, engenheiro Gérson, chefe do Setor de Engenharia, Paulo Souza, chefe da Oficina de Tratamento Térmico, Paulo Sérgio, chefe da Oficina de Ferramentaria, que me ajudaram na fabricação do Calibrador Dinâmico de Piezelétrico.

Aos amigos da IMBEL-FI, Cel Alte, Cel Costa Pinto, Ten Violato, Bittencourt, Cláudio Marcelino, Vanderlei, Gérson, Elias, e muitos outros que me ajudaram na fabricação do Calibrador Dinâmico de Piezelétrico.

Ao amigo Cel Brasileiro do Departamento Logístico do Exército Brasileiro (DLog), por ter me dado ajuda decisiva para conclusão da fabricação do Calibrador Dinâmico de Piezelétrico.

À Retífica Vitória, Barbacena-MG, em especial ao engenheiro Mário, à Doralice e ao torneiro Carlos, que me ajudaram na fabricação das bases fixa e móvel do Calibrador Dinâmico de Piezelétrico, como também de suas hastes-guia-de-queda.

Ao 16º BLog de Brasília-DF, em especial ao funcionário civil Marcos, que me ajudou na fabricação do martelo do Calibrador Dinâmico de Piezelétrico.

Ao amigo Betão, Roberto Carvalho, engenheiro da SKF, que me ajudou na escolha do rolamento para deslocamento linear para a base móvel do Calibrador Dinâmico de Piezelétrico.

Ao amigo Luiz José Ferreira Júnior, por ter participado decisivamente, junto comigo, da elaboração do projeto do Calibrador Dinâmico de Piezelétrico, sendo co-autor do mesmo.

Ao técnico em Eletrônica e *amigo* Evêmero Callegario, pelo profissionalismo e competência com que tanto contribuiu para o êxito dos experimentos realizados na PUC-Rio.

À Ana Rosa, engenheira de materiais do ITUC, amiga, prestativa, além de profissional do maior quilate.

À colega e amiga Rosário del Pilar Alva Palomares, que me ajudou decisivamente a preparar a apresentação em Powerpoint.

Ao colega e amigo Alex Sander Assunção, que me ajudou nas melhorias desta dissertação.

Ao colega e amigo Jaime Mamani Ticono, que me ajudou muito na hora de converter este trabalho para o formato de apenas leitura (pdf) sem que houvesse perda de qualidade de imagem.

Aos meus pais Pedro Augusto Bittencourt Heine e Lícia Maria Bahia Heine, meus co-orientadores, ao meu irmão Pedro, sempre amigo e conselheiro, à sua esposa Ângela, minha cunhada querida, às minhas irmãs Palmira Virgínia Bahia Heine e Milena Bahia Heine, a quem tanto quero bem, à minha tia Mara e a todos os outros parentes e amigos!

## Resumo

Heine, Alfredo Jorge Bahia; Orlando, Alcir de Faro. **Desenvolvimento de Metodologia de Calibração de Transdutor Piezelétrico de Pressão utilizado em Balística Interna**. Rio de Janeiro, 2004. 150p. Dissertação de Mestrado— Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para a Qualidade e Inovação. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presente pesquisa de mestrado, de interesse da indústria de armamento, mais especificamente no controle de qualidade de lotes de munição, relaciona-se com o desenvolvimento de metodologia para calibração de transdutor piezelétrico para medição de pressão transiente cuja duração é da ordem de milisegundos. Como sua principal contribuição, o trabalho disponibiliza metodologia própria de calibração ainda não disponível no País, atribuindo confiabilidade a medições realizadas em fenômenos associados ao que se denomina balística interna, que se constitui no estudo científico dos processos que ocorrem no interior de uma arma de fogo a partir do instante de iniciação (ignição) do propelente. Não obstante a faixa de pressão estudada, de 34,7 a 349,8 bar), ser baixa se comparada com as pressões desenvolvidas na balística interna, que podem até superar 6000 bar, a simples substituição do gerador de pressão por outro de maior capacidade é suficiente para a calibração numa faixa mais larga utilizando-se a mesma metodologia.

O complexo processo de balística interna foi simulado em condições laboratoriais pela submissão brusca do sensor piezelétrico, objeto da calibração, originalmente montado em uma câmara diminuta (cerca de dez vezes menor que o volume total de fluido pressurizado) de óleo à pressão atmosférica, a um pico de pressão induzido pela comunicação da câmara a uma linha de óleo pressurizada à pressão de calibração pré-determinada através de uma bomba hidráulica, pressão esta que caracteriza um ponto de calibração.

Complementando o *aparatus experimental* utilizado para simular o fenômeno da balística interna, foi utilizado um sistema de medição com tempo de resposta compatível (“rise time” < 5  $\mu$ s) à ordem de grandeza da duração do fenômeno estudado. O *aparatus experimental* utilizado é tal que permite alterar a duração desses eventos por meio de uma válvula de restrição, o que resultou em eventos com duração de 2 a 2200 ms. O monitoramento do sinal de resposta do transdutor piezelétrico no curso da calibração realizada permite estabelecer o tempo-limite associado ao qual o sinal mantém-se isento de indesejável

atenuação, considerada fonte de erro na medição de pressão.

O processo de calibração desenvolveu-se para 10 pontos distintos, perfazendo um total de 340 experimentos (variando-se o transiente de pressão imposto ao transdutor), monitorando-se o sinal de resposta do transdutor contra o valor da pressão medida por um manômetro calibrado pelo laboratório de pressão da PUC-Rio, credenciado pelo INMETRO e, portanto, assegurando rastreabilidade das medições ao Sistema Internacional de Unidades.

Alterações no *aparatus experimental* permitem que calibrações usualmente realizadas em regime de pressurização sejam também realizadas em regime de despressurização, viabilizando, dentre outras análises possíveis, o estudo de estabilidade e histerese do sinal do transdutor.

O método experimental desenvolvido não apenas mostrou-se tecnicamente viável e adequado às condições laboratoriais da faixa de pressão na qual foi validado (34,7 a 349,8 bar), como também se mostrou viável economicamente. A incerteza associada a esse método, obviamente, é maior que aquela obtida com uma balança de peso morto, que se baseia num método primário. A incerteza associada ao método de calibração desenvolvido no presente trabalho de pesquisa pode ser diminuída se for usado um sistema de medição de tensão com melhor exatidão.

## **Palavras-chave**

Transdutor; piezelétrico; calibração; metrologia; incerteza de medição; pressão transiente; balística interna; controle de qualidade; indústria de armamento.



## Abstract

Heine, Alfredo Jorge Bahia; Orlando, Alcir de Faro. **Development of Methodology for Calibrating Piezoelectric Transducers used in Internal Ballistics for Transient Pressure Measurements.** Rio de Janeiro, 2004. 150p. MSc. Dissertation – Graduate Program in Metrology. Research area: Metrology for Quality and Innovation. MQI. Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Brazil.

The current research, of armaments industry's interest, more specifically in the quality control of ammunition lots, is related to the development of methodology for calibrating piezoelectric transducers for transient pressure measurements associated with events whose duration is of the order of milliseconds. As its main contribution, this work presents proper methodology, not available yet in the Country, to ensure reliability to measurements of pressure in internal ballistics, which is the scientific study of the operating processes within the gun from at the moment when the burning process of the propellant is initiated. In spite of the low transient pressure range studied, 34,7 to 349,8 bar, when compared with the pressures developed in internal ballistics, up to 6000 bar, the simple replacement of the pressure generator for another one of larger capacity is enough to allow for calibration in a wider pressure range using the same methodology.

The complex process associated to internal ballistics was simulated in laboratorial conditions by the abrupt exposure of the piezoelectric sensor, object of the calibration, planned and originally mounted in a small oil chamber (about ten times smaller than the total volume of fluid pressurized) maintained at atmospheric pressure, to a pressure peak introduced by the communication of the small chamber to a line of oil pressurized at a desired calibration pressure level by means of a hydraulical pump used to feed the oil system. Each calibration pressure condition corresponds to what is called a calibration point.

Complementing the *experimental apparatus* used to simulate the phenomenon of the internal ballistics, an adequate measurement system (rise time  $< 5 \mu\text{s}$ , therefore adequate to the time duration of the studied phenomenon) was used. The experimental apparatus employed is such that the time duration of the events could be changed by means of a restriction valve, allowing events with duration from about 2 to 2200 ms. Within the calibration process, the monitoring of the piezoelectric transducer output signal allowed for establishing a specific time-limit to ensure that the signal remained exempt of undesirable attenuation, considered a source of error in the measurement of the

transient pressure. The calibration process was developed for 10 distinct points, totalizing 340 experiments (varying the transient pressure to which the transducer is exposed), monitoring the output signal of the transducer against the value of the pressure measured with a manometer calibrated in the accredited pressure laboratory of PUC-Rio, traceable to the national standard maintained by the Brazilian National Metrology Laboratory (INMETRO) and, therefore, ensuring overall traceability of measurements to the International System of Units (SI).

Modifications introduced in the *experimental apparatus* used allow that calibrations usually carried out under a regime of pressurization may also be carried out under a regime of unpressurization, making possible other studies such as stability and hysteresis of the transducer's output signal.

From the technical point of view the experimental method proved to be feasible and suitable to the laboratorial conditions for the pressure range to which it was validated (34,7 to 349,8 bar). It also revealed economically viable. Although validated, the uncertainty associated with the proposed method, obviously is greater than the uncertainty associated with a dead weight tester, which is based on a primary method. However, the uncertainty associated with the method of calibration herein proposed can be minimized whenever a more accurate voltage measurement system is used.

## **Keywords**

Transducer; piezoelectric; calibration; metrology; uncertainty of measurement; transient pressure; internal ballistics; quality control; armament industry.

## Sumário

1	Introdução	18
1.1	A escolha do problema	18
1.2	Métodos de calibração	19
1.3	Calibração de transdutores piezelétricos de alta pressão no Brasil	20
1.4	A contribuição do presente trabalho	21
2	Fundamentos teóricos	22
2.1	Princípio de funcionamento e histórico dos transdutores pieze- létricos	22
2.2	Balística interna	24
2.3	Adequação do Sistema de Medição utilizado	26
2.4	Métodos estatísticos utilizados	27
2.4.1	O valor que melhor representa o valor verdadeiro	27
2.4.2	A incerteza padrão como medida da dispersão e o intervalo de confiança	28
2.4.3	A distribuição t de “Student”	29
2.4.4	A propagação das incertezas	30
2.4.5	O critério de Chauvenet para rejeição de leituras	30
2.4.6	A distribuição de probabilidade retangular	31
2.4.7	As incertezas tipo A e tipo B	32
2.4.8	O método dos mínimos quadrados e a escolha da melhor curva de ajuste	32
2.4.9	Tipo de ajuste utilizado pelos fabricantes	33
2.4.10	O manual NATO AC/225	34
3	Procedimento experimental	37
3.1	Procedimento experimental utilizado	37
3.2	Testes realizados para obtenção da curva de calibração	41
3.3	Processamento dos dados	42
4	Análise dos resultados experimentais	48
4.1	Tensão média “equivalente” e incerteza expandida $U_{exp}$ dos resultados dos experimentos	48
4.2	Avaliação de histerese	49
4.3	A combinação das incertezas que contribuem para a incerteza total de medição da tensão, com a finalidade de obtenção desta	49
4.4	A curva de calibração: Pressão x Tensão	49
4.5	A influência da pressão no tempo-limite associado ao qual a resposta do transdutor mantém-se isenta de atenuação	50
5	Conclusões	53
6	Referências bibliográficas	58

## Lista de figuras

Figura 1 – Faixa de medição e de calibração dinâmica; faixa de calibração estática.	20
Figura 2 – “B 640 Precision Pressure Calibrator”.	21
Figura 3 – Equipamento de calibração do fabricante Kistler, modelo 6905, de propriedade da Marinha	21
Figura 4 – Transdutor piezométrico de pressão.	23
Figura 5 – “Seqüência de Tiro” da Balística Interna	25
Figura 6 – Curvas típicas da Balística Interna: Pressão x Tempo, Velocidade x Tempo, e Posição x Tempo.	26
Figura 7 – Faixa de medição e de calibração dinâmica.	27
Figura 8 – Recomendação para realização do Teste de Linearidade	36
Figura 9 – Desenho esquemático do dispositivo experimental utilizado	39
Figura 10 – Câmara de teste, com as válvulas e com o transdutor piezométrico de pressão	39
Figura 11 - Amplificador de Carga, Kistler, modelo 5004	39
Figura 12 – Procedimento-padrão para pressurização súbita da derivação múltipla na qual está instalado o piezométrico	40
Figura 13 – Experimento 2 (Tabela 45), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 344,74 bar.	41
Figura 14 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 1000 psi (68,95 bar)	44
Figura 15 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 68,95 bar	45
Figura 16 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e de Chauvenet. Pressão de 68,95 bar	45
Figura 17 – Melhor curva de ajuste: linear do tipo $y=ax$ ,	51
Figura 18 – Ajuste linear do tipo $y=ax+b$	51
Figura 19 – Ajuste com polinômio do 2º grau	52
Figura 20 – Ajuste com polinômio do 3º grau	52
Figura 21 – Tempo-Limite x Pressão	53
Figura 22 – Melhor curva de calibração do manômetro	68
Figura 23 - Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 500 psi (34,47 bar)	79
Figura 24 - Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 34,47 bar	79
Figura 25 - Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e de Chauvenet. Pressão de 34,47 bar	79
Figura 26 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 1000 psi (68,95 bar)	83
Figura 27 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 68,95 bar	83
Figura 28 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após	

descarte de pontos pelos critérios de atenuação e de Chauvenet. Pressão de 68,95 bar	83
Figura 29 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 1500 psi (103,42 bar)	87
Figura 30 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 103,42 bar	87
Figura 31 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e Chauvenet. Pressão de 103,42 bar	87
Figura 32 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 2000 psi (137,90 bar)	91
Figura 33 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 137,90 bar	91
Figura 34 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e Chauvenet. Pressão de 137,90 bar	91
Figura 35 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 2500 psi (172,37 bar)	95
Figura 36 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 172,37 bar	95
Figura 37 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e de Chauvenet. Pressão de 172,37 bar	95
Figura 38 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 3000 psi (206,84 bar)	98
Figura 39 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 206,84 bar	98
Figura 40 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e de Chauvenet. Pressão de 206,84 bar	98
Figura 41 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 3500 psi (241,32 bar)	102
Figura 42 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 241,32 bar	102
Figura 43 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e de Chauvenet. Pressão de 241,32 bar	102
Figura 44 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 4000 psi (275,79 bar)	106
Figura 45 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 275,79 bar	106
Figura 46 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e de Chauvenet. Pressão de 275,79 bar	106
Figura 47 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 4500 psi (310,26 bar)	109
Figura 48 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 310,26 bar	109
Figura 49 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e de Chauvenet.	

Pressão de 310,26 bar	109
Figura 50 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 5000 psi (344,74 bar)	113
Figura 51 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 344,74 bar	113
Figura 52 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e de Chauvenet. Pressão de 344,74 bar	113
Figura 53- Desenho esquemático do dispositivo experimental utilizado	114
Figura 54 – Experimento 41 (Tabela 18), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 34,47 bar.	115
Figura 55 – Experimento 40 (Tabela 18), caracterizado pelo maior delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 34,47 bar.	116
Figura 56 – Experimento 41 (Tabela 21), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 68,95 bar.	117
Figura 57 – Experimento 39 (Tabela 21), caracterizado pelo maior delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 68,95 bar.	118
Figura 58 – Experimento 13 (Tabela 24), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 103,42 bar.	119
Figura 59 – Experimento 33 (Tabela 24), caracterizado pelo maior delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 103,42 bar.	120
Figura 60 – Experimento 8 (Tabela 27), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 137,90 bar.	121
Figura 61 – Experimento 38 (Tabela 27), caracterizado pelo maior delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 137,90 bar.	122
Figura 62 – Experimento 1 (Tabela 30), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 172,37 bar.	123
Figura 63 – Experimento 36 (Tabela 30), caracterizado pelo maior delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 172,37 bar.	124
Figura 64 – Experimento 1 (Tabela 33), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 206,84 bar.	125
Figura 65 – Experimento 22 (Tabela 33), caracterizado pelo maior delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 206,84 bar.	126
Figura 66 – Experimento 1 (Tabela 36), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 241,32 bar.	127
Figura 67 – Experimento 35 (Tabela 36), caracterizado pelo	

maior delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 241,32 bar.	128
Figura 68 – Experimento 2 (Tabela 39), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 275,79 bar.	129
Figura 69 – Experimento 26 (Tabela 39), caracterizado pelo maior delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 275,79 bar.	130
Figura 70 – Experimento 1 (Tabela 42), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 310,26 bar.	131
Figura 71 – Experimento 15 (Tabela 42), caracterizado pelo maior delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 310,26 bar.	132
Figura 72 – Experimento 2 (Tabela 45), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 344,74 bar.	133
Figura 73 – Experimento 31 (Tabela 45), caracterizado pelo maior delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 344,74 bar.	134
Figura 74 – Calibrador Dinâmico de Piezelétrico, em fase de testes no Campo de Provas da Marambaia (CPrM) do Exército	135
Figura 75 - Desenho esquemático para ilustração do funcionamento do Calibrador Dinâmico de Piezelétrico	136
Figura 76 – Procedimento-padrão proposto para calibração de transdutor piezelétrico de pressão, utilizando-se o Calibrador Dinâmico de Piezelétrico	140
Figura 77 – Especificações técnicas de um transdutor piezelétrico de pressão da HPI	141
Figura 78 – Especificações técnicas do amplificador Kistler, modelo 5004, utilizado.	142
Figura 79 – Especificações técnicas do osciloscópio digital utilizado: HP modelo 54501 A	143
Figura 80 – Curva de pressão de um tiro real, com munição 7,62 mm, realizado na Casa Balística do Campo de Provas da Marambaia (CPrM)	148

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores de t-student como função do número de graus de liberdade	29
Tabela 2 – Especificações técnicas de transdutor da AVL	34
Tabela 3 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 1000 psi (68,95 bar)	42
Tabela 4 – Análise do desvio padrão da tensão, à medida que se inclui, no cálculo desse desvio, experimentos cada vez mais lentos, ou seja, caracterizados por maior $\Delta t$ médio até o pico	44
Tabela 5 – Análise estatística dos dados experimentais	48
Tabela 6 – A combinação das incertezas $U_{exp}$ , $U_m$ , e $U_{osc}$ , para a obtenção da incerteza total $U_v$ de medição da tensão	50
Tabela 7 – Pressão (com uma dada incerteza) versus Tensão (com uma dada incerteza)	50
Tabela 8 – Teste de 4 curvas de ajuste diferentes aos dados, para escolha da melhor	50
Tabela 9 – Inferência da pressão, a partir da tensão de saída $T$ do transdutor (corrigida)	53
Tabela 10 - Pressão x Tempo	53
Tabela 11 - Resultado da aplicação do presente programa para a pressão de 68,95 bar	67
Tabela 12 – Dados utilizados para a obtenção da curva de calibração do manômetro contra a balança de peso morto	70
Tabela 13 – Escolha da curva de calibração do manômetro, que se caracteriza pela menor incerteza de ajuste	72
Tabela 14 – Calibração do osciloscópio digital HP 54501A	73
Tabela 15 – Pressões e escalas de tensão correspondentes	73
Tabela 16 - Resultados dos experimentos a 500 psi (34,47 bar). Dados experimentais	75
Tabela 17 - Experimentos a 34,47 bar. Análise estatística dos resultados	76
Tabela 18 - Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 34,47 bar	77
Tabela 19 - Resultados dos experimentos a 1000 psi (68,95 bar). Dados experimentais	80
Tabela 20 – Experimentos a 68,95 bar. Análise estatística dos resultados	81
Tabela 21 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 68,95 bar	82
Tabela 22 – Resultados dos experimentos a 1500 psi (103,42 bar). Dados experimentais	84
Tabela 23 - Experimentos a 103,42 bar. Análise estatística dos resultados	85
Tabela 24 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 103,42 bar	86
Tabela 25 – Resultados dos experimentos a 2000 psi (137,90	



bar). Dados experimentais	88
Tabela 26 – Experimentos a 137,90 bar. Análise estatística dos resultados	89
Tabela 27 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 137,90 bar	90
Tabela 28 – Resultados dos experimentos a 2500 psi (172,37 bar). Dados experimentais	92
Tabela 29 – Experimentos a 172,37 bar. Análise estatística dos resultados	93
Tabela 30 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 172,37 bar	94
Tabela 31 – Resultados dos experimentos a 3000 psi (206,84 bar). Dados experimentais	96
Tabela 32 – Experimentos a 206,84 bar. Análise estatística dos resultados	96
Tabela 33 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 206,84 bar	97
Tabela 34 – Resultados dos experimentos a 3500 psi (241,32 bar). Dados experimentais	99
Tabela 35 – Experimentos a 241,32 bar. Análise estatística dos resultados	100
Tabela 36 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 241,32 bar	101
Tabela 37 – Resultados dos experimentos a 4000 psi (275,79 bar). Dados experimentais	103
Tabela 38 – Experimentos a 275,79 bar. Análise estatística dos resultados	104
Tabela 39 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 275,79 bar	105
Tabela 40 – Resultados dos experimentos a 4500 psi (310,26 bar). Dados experimentais	107
Tabela 41– Experimentos a 310,26 bar. Análise estatística dos resultados	107
Tabela 42 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 310,26 bar	108
Tabela 43 – Resultados dos experimentos a 5000 psi (344,74 bar). Dados experimentais	110
Tabela 44 – Experimentos a 344,74 bar. Análise estatística dos resultados	111
Tabela 45 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 344,74 bar	112
Tabela 46 – Pico de pressão médio e tempo médio até o pico versus massa de queda ( <i>valores fictícios</i> )	136