

6

Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023:** informação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 6027:** informação: referências: sumário: apresentação. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6028:** informação e documentação: resumo, apresentação. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 14724:** informação e documentação: trabalhos acadêmicos apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

ASTM INTERNATIONAL. **Standard practice for static calibration of electronic transducer-based pressure measurement systems for geotechnical purposes.** United States of America: ASTM International, 2002.

AVL. **5 QP 2000/6000 quartz-high pressure transducers:** operating instructions. Austria, 1988.

_____. **B 640 precision pressure calibrator (100-4000 bar):** operating instructions. Austria, 1985.

_____. **B 621 dynamic pressure calibrator:** operating manual. Austria, 1991.

_____. **B 620 dynamic pressure calibrator:** operating manual. Austria, 1988.

_____. **Piezoelectric high pressure transducers.** operating manual. Austria, 199_.

_____. **Ballistic measuring systems and application software:** operating manual. Austria, 2000.

_____. **Static & dynamic calibration of piezoelectric high-pressure transducers:** operating manual. Austria, 199_.

BENEDICT, R. P. **Fundamentals of temperature, pressure, and flow measurements.** 3 nd. United States of America: John Wiley & Sons, 1984.

BULLOCK, C. D.; JUHASZ, A. A. **Calibration of ballistic pressure transducers**. United States of America: Harwood, 1999.

DALLY, J. W.; RILEY, W. F.; MCCONNELL, K. G. **Instrumentation for engineering measurements**. 2 nd. [S. l.]: John Wiley & Sons, 1993.

DOEBELIN, Ernest O. **Measurement systems: application and design**. New york: McGraw-Will, 1975.

EXÉRCITO BRASILEIRO. **Apostila da Escola de Material Bélico do Exército Brasileiro**. Rio de Janeiro, 1999.

FARRAR, C. L.; LEEMING, D. W. **Military ballistics, a basic manual**. [S. l.]: Brassey's Publishers, 1983.

GRASBERGER, R. **Anforderungsdefinition B 651 automatic pressure calibrating system (APCS)**. Graz: AVL, 1989.

GUIA para a expressão da incerteza da medição. 2ª edição. Tradução autorizada pela ISO, desenvolvida em parceria entre INMETRO, ABNT e Sociedade Brasileira de Metrologia. Rio de Janeiro: ISO, 1998.

HOLMAN, J. P. **Experimental methods for engineers**. 7th edition. New York: McGraw-Hill Book, 2001.

HORSTMANN, A.; SANTANA, M. B.; RODRIGUES, R. L. B. **Modernização do sistema de bomba manométrica da fábrica Presidente Vargas**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2000.

KISTLER INSTRUMENT CORPORATION. **High-pressure quartz transducers, operating instructions**. Switzerland, 1985.

_____. **Pressure pulse generator, operating instructions**:. Switzerland, 199_.

_____. **Pressure standard type 5000, operating instructions**. .Switzerland, 1985.

KUBLER, J. M.; ROESLY, U. **Ballistics pressure transducers and their Application**. United States of America: Kistler Instrument, 1985.

LION, K. S. **Instrumentation in scientific research: electric input transducers**. Austria: McGraw-Hill Book Company, 1959.

LUBISCO, Nídia Maria Llienart. **Manual de estilo acadêmico: monografias, dissertações e teses**. 2 ed. rev. ampl. Salvador: EDUFBA, 2003.

MCLEAN, A.; BOX, P. **Calibrating air blast transducers with the PCB dynamic pressure pulse calibrator**. Australia: DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 2000. Disponível em: <<http://www.dsto.defence.gov.au/corporate/reports/home.html>>. Acesso em 06 nov. 2003.

NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION. Piezoelectric pressure transducer, electronic Instrumentation instrumentation requirements AC/225 (Panel III-SP.1) D/200 In: _____. **Manual of proof and inspection procedures for NATO 5,56 mm ammunition**. Brussels, 1983. Annex A.

_____. Piezoelectric pressure transducer, electronic Instrumentation calibration procedures AC/225 (Panel III-SP.1) D/200. In: _____. **Manual of proof and inspection procedures for NATO 5,56 mm ammunition**. Brussels, 1983. Annex B.

_____. Pressure transducer qualification test AC/225 (Panel III-SP.1) D/200. In: _____. **Manual of proof and inspection procedures for NATO 5,56 mm ammunition**. Brussels, 1983. Annex C.

_____. Piezo-electric pressure transducer, electronic Instrumentation requirements AC/225 (Panel III-SP.1) D/200. In: _____. **Manual of proof and inspection procedures for NATO 5,56 mm ammunition**. Brussels, 1983. Annex G.

_____. Piezo-Electric Pressure Transducer, Electronic Instrumentation Calibration Requirements.AC/225 (Panel III-SP.1) D/200. In: _____. **Manual of proof and inspection procedures for NATO 5,56 mm ammunition**. Brussels, 1983. Annex H.

ORLANDO, A. F.; HEINE, A. J. B. **Development of a methodology for calibrating piezoelectric transducers for transient pressure measurements**, Rio de Janeiro, 2004.

ORLANDO, A. F. **Applications of measurement uncertainty in laboratory testing**. 2 nd. Advanced School on the Expression of Uncertainty of Measurements”, Metrologia, 2003, Recife, 2003.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO. **Normas para apresentação de teses e dissertações**. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2004. Disponível em: <http://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/apresentação_ted.htm>. Acesso em: 31 mar. 2004.

RESH, G. **Dynamic conformity and dynamic peak pressure accuracy: two new evaluation criteria for pressure transducers**. TRANSDUCER WORKSHOP, 14, 1987, Colorado. Colorado: Colorado Springs, 1987.

Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia VIM. Tradução autorizada pela ISO, desenvolvida em parceria entre INMETRO, ABNT e Sociedade Brasileira de Metrologia. Rio de Janeiro, 2000.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. Sistema de Bibliotecas. **Gráficos**. Curitiba: Editora da Universidade Federal do Paraná, 2000. (Normas para apresentação de documentos científicos, 10)

_____. **Tabelas**. Curitiba: Editora da Universidade Federal do Paraná, 2000. (Normas para apresentação de documentos científicos, 9)

_____. **Teses, dissertações, monografias e trabalhos acadêmicos**. Curitiba: Editora da Universidade Federal do Paraná, 2000. (Normas para apresentação de documentos científicos, 2)

WARD, F. D. **A fundamental dynamic method of calibrating high-pressure transducers**. Quebec: Defence Research and Development Canada, 1963.

WINKLER, J. **Quality improvement in piezoelectric pressure measurements by applying advanced calibration methods**. In: PROCEEDINGS OF THE FOURTH INTERNATIONAL AVL SYMPOSIUM ON BALLISTIC MEASUREMENT, 14, 1989, Switzerland, p. 21-30.

APÊNDICE A – A pesquisa para escolha do problema objeto desta dissertação

A referida pesquisa foi, sem sombra de dúvidas, uma etapa delicada durante o curso. Após muitas tentativas, finalmente, através do então (2002) chefe da DE/4, Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais do Instituto Militar de Engenharia, Cel Diniz, tomou-se conhecimento que o Grupo de Armamento e Munição (GAM) do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento do Exército (IPD) havia se deparado com um problema de natureza metrológica durante desenvolvimento de armamento destinado às tropas de Infantaria. Diante dessa informação, estabeleceu-se contato com o GAM/IPD, através do engenheiro mecânico e de armamento Capitão Luiz:

----- Original Message -----

From: Luiz Eduardo M Correa da Silva <eluiz@ipd.eb.mil.br>

To: <b.heine@terra.com.br>

Sent: Monday, November 04, 2002 8:18 AM

Subject: Trabalho de Metrologia

- > O problema encontrado no nosso projeto é o seguinte:
- >
- > Na realização do disparo, que é feito em um provete de aço, a
- > curva de pressão é medida em três pontos distintos do provete por meio
- > de transdutores piezelétricos, e o sinal é tratado pelo sistema AVL do
- > CPrM.
- > O primeiro problema, é que o sistema AVL do CPrM já é muito
- > antigo e já não é muito confiável. O Ten Carlos Chagas nos informou que
- > um novo sistema AVL já foi comprado e está para chegar.
- > O segundo problema, é que o aparelho de calibração dos
- > transdutores piezelétricos está quebrado, e como os nossos transdutores
- > são para o limite máximo de trabalho de até 2000 bar, nem o INMETRO faz
- > esta calibração.
- > Nós também não temos idéia de quantos disparos podemos realizar
- > até que a calibração seja necessária, já que a nossa faixa de trabalho é
- > de 50% da pressão máxima de trabalho dos transdutores.
- > Outro problema encontrado, é que o tubo real da arma é feito de
- > fibra de vidro e resina epóxi, o que torna impossível fazer os furos
- > para as tomadas de pressão com os transdutores, pois estes furos se
- > tornam concentradores de tensão e como a pressão envolvida é da ordem de
- > 1000 bar o tubo não resiste.

- > Já pensamos na idéia de usar "strain gages" colados na parte
- > externa do tubo real para medir a deformação durante o disparo e pela
- > deformação, calcular a pressão, mas a idéia ainda não foi levada
- > adiante.
- > Outro fato importante é que com o uso dos transdutores
- > piezelétricos associados a um amplificador de carga piezelétrico (que
- > nós não temos, mas parece que o IME tem) e um computador com placa de
- > aquisição de dados, seria possível fazer a leitura das pressões sem
- > necessidade do uso do sistema AVL, mas a idéia ainda não foi levada
- > adiante. Cabe ressaltar que o amplificador de carga tem que ser
- > piezelétrico e não resistivo como normalmente usado pois os tempos
- > envolvidos são muito pequenos (no máximo 40 ms) e os amplificadores de
- > sinal resistivos não conseguem trabalhar com tempos tão curtos.
- >
- > Um abraço,
- >
- > Cap Luiz .
- >
- >
- > Esta mensagem foi verificada pelo E-mail Protegido Terra.
- > Scan engine: VirusScan / Atualizado em 30/10/2002 / Versão: 1.3.13
- > Proteja o seu e-mail Terra: <http://www.emailprotegido.terra.com.br/>
- >

----- Original Message -----

From: Alfredo Jorge Bahia Heine <b.heine@terra.com.br>
 To: <eluziz@ipd.eb.mil.br> Luiz Eduardo M Correa da Silva
 Sent: Wednesday, November 27, 2002 10:56 AM
 Subject: Re: Trabalho de Metrologia

Caro Capitão Luiz,

Conversei com meu orientador de Dissertação de Mestrado, Professor-Doutor Alcir de Faro Orlando, e acreditamos que podemos dar a nossa contribuição para a solução dos problemas técnicos ora mencionados. Para tanto, precisamos de mais material e informações sobre esses problemas, quais sejam:

- 1) De que maneira era feita a calibração dos transdutores piezoelétricos com este aparelho que, no momento, está quebrado?
- 2) Mesmo após o conserto deste aparelho de calibração (dos transdutores piezoelétricos), o próprio aparelho requer uma calibração para que seja

confiável, certo? Como será feita essa calibração do aparelho e de quanto em quanto "tempo"?

3)Atualmente, a curva de pressão no tubo real (fibra de vidro e resina epóxi) não está sendo monitorada, devido à impossibilidade de fazer os furos para tomada de pressão nos mesmos, correto? Naturalmente, a curva de pressão obtida com o provete é diferente da curva de pressão real, já que o provete é de aço e o tubo real é de fibra de vidro, certo?

4)Com que objetivo são feitas as medições de pressão no interior do provete/tubo real?

5)Os fabricantes dos transdutores não forneceriam a necessidade periódica de calibração dos mesmos, diante do fato de que a faixa de trabalho a que estão submetidos é de apenas 50% da pressão máxima de trabalho dos transdutores?

Um abraço,

Primeiro-Tenente Heine.

Em seguida, foi estabelecido contato com o então chefe da Casa Balística do Campo de Provas da Marambaia (CPrM), engenheiro mecânico e de armamento Tenente Carlos Chagas:

De: Chcb chcb@ctex.eb.mil.br

Para: b.heine@ibest.com.br

Heine,

O CPrM **NÃO** realiza calibração dinâmica de transdutores e nunca realizou.

O equipamento AVL, não se presta a este tipo de serviço.

As calibrações realizadas anteriormente foram estáticas, e de ponto a ponto de acordo com as necessidades impostas pela utilização do transdutor.

A última calibração foi realizada em 1990 pelo hoje Cel R1 Lacerda Machado.

A encomenda dos equipamentos à HPI, foi feita ao final do último ano e o pedido firme apresentado no início deste ano. A chegada dos equipamentos está prevista para agosto/setembro de 2003.

Proponho que vc procure algo mais sobre calibração de transdutores em normas MIL e STANAG (OTAN) e no site da KISTLER (fabricante de transdutores padrão OTAN).Chagas.

Chagas.

APÊNDICE B – Programa em linguagem Matlab para rejeição de leituras segundo o Critério de Chauvenet

%Critério de Chauvenet para Rejeição de Leituras: o critério especifica que uma %leitura pode ser rejeitada se a probabilidade de se obter um dado desvio em %relação a media for menor do que $1/(2*n)$, onde n e o numero de leituras %realizadas.

%Entrada de Dados

n=input('Entre o numero n de leituras: ');

L=input('Entre as leituras realizadas: ');

k=input('Entre o nº. de vezes que o Critério de Chauvenet vai ser aplicado: ');

Linicial=L

%L_desc=[];

for ii=1:k

aux=[];

newL=[];

%Calculos a serem feitos

%Calculos a serem feitos

%A função mean() calcula a media de todos os elementos de L

Lmed=mean(L);

%A função std() calcula o desvio-padrao de todos os elementos de L em

%relação a media

Ldp=std(L);

P=1/(2*n);

%Se a probabilidade de se obter um dado desvio em relação a media for %menor que P, então a leitura pode ser rejeitada. So que esse dado desvio pode %ser para mais ou para menos, além ou aquém da media. Essa probabilidade, %portanto, equivale a soma de duas áreas simétricas sob a Curva Normal. Em %outras palavras, $Pr(L>x)+Pr(L<-x)$, onde $Pr(L>x)=Pr(L<-x)=P/2$. Se chamarmos % $Pr(L>x)=A$ e $Pr(L<x)=B$ e lembrarmos que a área total sob a Curva é igual a 1, %então: $A=1-B$, ou seja, $B=1-A$

A=P/2;

B=1-A;

%A função norminv(área sob a Curva a esquerda de x, media, desvio-padrao) %fornece o x a esquerda do qual a área sob a Curva se encontra. Esta área é B %e é igual a probabilidade da variável aleatória ser menor que x.

x=norminv(B,0,1);

%Se L e uma variavel aleatoria com media Lmed e desvio-padrao Ldp, entao
 %aux=(L-Lmed)/Ldp e tambem uma variavel aleatoria com media zero e
 %variancia 1 (um), ou seja, aux tem distribuicao normal padrao aux~N(0,1)

```
for i=1:n
```

```
    aux(i)=abs((L(i)-Lmed)/Ldp);
```

```
end
```

%A função find(aux<=x)retorna os indices de aux onde aux e menor ou igual a
 %x. Analogamente, para find(aux>x). Neste ultimo caso, os indices em que
 %aux>x correspondem aos indices de L que devem ser descartados. E a
 %quantidade de indices que find(aux<=x) retornar sera igual ao novo numero de
 %elementos de L (os que nao foram descartados)

ind=find(aux<=x);%ind e o vetor dos indices de aux, que sao os mesmos
 %indices de L que "prestam"

med_desc= find(aux>x);%med_desc e o vetor dos indices de aux, que sao os
 %mesmos indices de L que "nao prestam"

%A função length(ind) retorna a quantidade de elementos de ind, que e igual
 %ao novo numero de elementos de L (os que nao foram descartados)

```
    num=length(ind);
```

```
    for j=1:num
```

```
        newL(j)=L(ind(j));
```

```
    % L_desc(ii,:)=L(med_desc);
```

```
    end
```

```
L=newL;
```

```
n=length(L);
```

```
end
```

```
Lmed=mean(L);
```

```
Ldp=std(L);
```

```
media = Lmed
```

```
desvio_padrao_das_observacoes = Ldp
```

```
desvio_padrao_da_media = Ldp/sqrt(n)
```

```
medidas_validas = L
```

```
numero_de_medicadas_validas = n
```

```
medidas_descartadas=setdiff(Linicial,L)
```

```
todas_as_medicadas=Linicial
```

%A função setdiff faz a diferença entre os conjuntos Linicial e

%L, ou seja, o resultado sera os elementos que estao em Linicial, mas nao estao
 %em L. Mas cuidado: um mesmo elemento (um numero) presente varias vezes
 %em Linicial sera computado como um unico elemento!

%Se o resultado contem, por exemplo, a medida 3.2, voce sabe que essa
 %medida foi descartada, mas voce nao sabe quantas vezes ela, a medida 3.2,
 %esta presente no Linicial. Atenção!

%Por ultimo, a função save, abaixo, guarda num arquivo de nome
 %resultados.mat os resultados do programa que foi rodado, para voce nao
 %precisar rodar de novo.

```
save      resultados      media      desvio_padrao_das_observacoes
desvio_padrao_da_media      medidas_validas      numero_de_medidas_validas
medidas_descartadas todas_as_medidas
```

Na página seguinte, encontra-se um exemplo de aplicação do presente programa para a pressão de 68,95 bar (1000 psi):

Tabela 11 - Resultado da aplicação do presente programa para a pressão de 68,95 bar

```

MATLAB Command Window
16 de Maio de 2004
Page 1
08:26:05

To get started, select "MATLAB Help" from the Help menu.

Variables created in current workspace.
Entre o numero n de leituras: 30
Entre as leituras realizadas: [734.3750 723.9583 725.0000 714.5833 733.3333 718.7500 731.2500 739.5833
1.2500 739.5833 733.3333 718.7500 718.7500 725.0000 727.0833 718.7500 725.0000 718.7500
0 725.0000 720.8333 725.0000 712.5000 725.0000 714.5833 718.7500 718.7500 720.8333 725.0000
722.9167 731.2500 712.5000 718.7500]
Entre o numero de vezes que o Critério de Chauvenet vai ser aplicado: 1

Linical =

Columns 1 through 8
734.3750 723.9583 725.0000 714.5833 733.3333 718.7500 731.2500 739.5833

Columns 9 through 16
733.3333 718.7500 718.7500 725.0000 727.0833 718.7500 725.0000 718.7500

Columns 17 through 24
725.0000 720.8333 725.0000 712.5000 725.0000 714.5833 718.7500 718.7500

Columns 25 through 30
720.8333 725.0000 722.9167 731.2500 712.5000 718.7500

media =

722.7011

desvio_padrao_das_observacoes =

6.0891

desvio_padrao_da_media =

1.1307

medidas_validas =

Columns 1 through 8
734.3750 723.9583 725.0000 714.5833 733.3333 718.7500 731.2500 733.3333

Columns 9 through 16
718.7500 718.7500 725.0000 727.0833 718.7500 725.0000 718.7500 725.0000

Columns 17 through 24
720.8333 725.0000 712.5000 725.0000 714.5833 718.7500 718.7500 720.8333

Columns 25 through 29
725.0000 722.9167 731.2500 712.5000 718.7500

MATLAB Command Window
16 de Maio de 2004
Page 2
08:26:05

numero_de_medidas_validas =

29

medidas_descartadas =

739.5833

```

APÊNDICE C – Calibração do manômetro utilizado

Características do manômetro utilizado:

- Tipo: Bourdon
- Faixa de Medição: 0 – 400 kgf/cm² (392,27 bar)
- Menor divisão: 2 kgf/cm² (1,96 bar)
- Classe de Exatidão: 0,5%
- Fabricante: Willy

O manômetro foi calibrado²³ na faixa de 0,3 a 60 MPa (600 bar) usando como padrão uma balança de peso morto do fabricante Xian, modelo YS-600/Óleo, rastreável ao laboratório do INMETRO (Anexo D), com uma incerteza de 0,015% (95,45% de confiança). A calibração foi feita no Laboratório de Pressão e Temperatura da PUC-Rio, em 11 pontos distintos, cujas leituras no manômetro foram feitas com uma interpolação visual da metade de uma divisão, usando três ciclos de carga e descarga. O polinômio do 2º grau $P = -6E-06M^2 + 0,1019M - 0,104$ foi a melhor curva de ajuste obtida pelo método dos mínimos quadrados, como se pode ver no gráfico anexo, onde M é a indicação do manômetro e P a pressão correspondente no padrão, já corrigida para a gravidade local. A interpretação é a seguinte: **Eu medi M com o manômetro; se fosse possível medir com o padrão, quanto eu teria medido? É só fazer as contas.** A máxima incerteza foi de 1,19 bar $\approx$ 0,12 MPa = 17,23 psi (0,30 %). Aplicando-se o critério de Chauvenet, o ponto cujo desvio padrão das 6 medidas foi de 4,4907 kgf/cm² (4,4039bar) foi descartado, como se vê na próxima página.

Nas próximas 2ª e 3ª páginas são apresentadas duas tabelas auto-explicativas que foram utilizadas para a presente calibração.

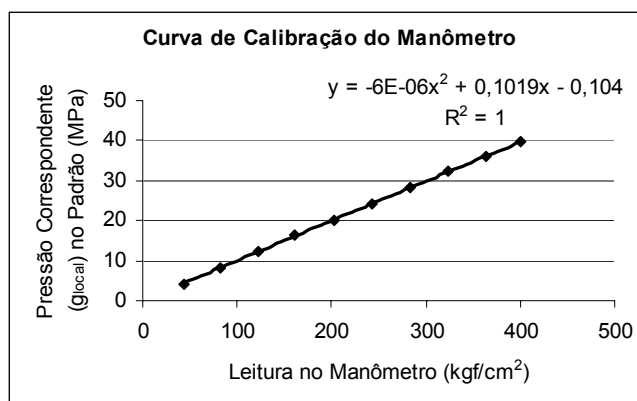


Figura 22 – Melhor curva de calibração do manômetro

²³ Em 25/11/2003

Entre o numero n de leituras: 11

Entre as leituras realizadas: [4.4907 0.8944 0.8944 1.3663 1.2111 1.633 1.633 0.8165 1.0954 0.7528 0.5164]

Entre o numero de vezes que o Criterio de Chauvenet vai ser aplicado: 1

Linical =

Columns 1 through 8

4.4907 0.8944 0.8944 1.3663 1.2111 1.6330 1.6330 0.8165

Columns 9 through 11

1.0954 0.7528 0.5164

media =

1.0813

desvio_padrao_das_observacoes =

0.3762

desvio_padrao_da_media =

0.1190

medidas_validas =

Columns 1 through 8

0.8944 0.8944 1.3663 1.2111 1.6330 1.6330 0.8165 1.0954

Columns 9 through 10

0.7528 0.5164

numero_de_medidas_validas =

10

medidas_descartadas =

4.4907

Nota: Foi possível aplicar o critério de Chauvenet aqui, porque como se trata do mesmo instrumento, e tudo que foi feito para uma pressão de referência foi feito de forma idêntica para as outras pressões de referência, espera-se que os valores de desvio padrão obtidos não sejam muito diferentes entre si. De fato, dos 11 pontos, apenas 1 foi descartado, o que depõe a favor da suposição.

Tabela 12 – Dados utilizados para a obtenção da curva de calibração do manômetro contra a balança de peso morto

Conjunto Montado	Pressão carregada se fosse $g=9,80665 \text{ m/s}^2$ (MPa)	Pressão carregada corrigida para gravidade local $g=9,7878 \text{ m/s}^2$ (MPa)	Primeiro Ciclo (kgf/cm^2)		Segundo Ciclo (kgf/cm^2)		Terceiro Ciclo (kgf/cm^2)		Desvio Padrão (kgf/cm^2)	Média (kgf/cm^2)	Erro médio nos pontos (kgf/cm^2)
			Subida	Descida	Subida	Descida	Subida	Descida			
Pistão	0,3012	0,30062	11,0	22,0	20,0	18,0	18,0	24,0	4,4907	18,83	15,77
Pistão+ +4 x 1Mpa	4,208	4,19996	43,0	44,0	43,0	42,0	42,0	44,0	0,8944	43,00	0,17
Pistão+ +3x1MPa+ +1x5MPa	8,2869	8,27121	82,0	83,0	82,0	81,0	81,0	83,0	0,8944	82,00	-2,34
Pistão+ +2x1MPa+ +2x5Mpa	12,2903	12,26725	121,0	124,0	122,0	122,0	121,0	124,0	1,3663	122,33	-2,76
Pistão+ +1x1MPa+ +3x5Mpa	16,2939	16,26363	161,0	163,0	162,0	161,0	160,0	163,0	1,2111	161,67	-4,18
Pistão+ +4x5Mpa	20,2925	20,25516	201,0	204,0	202,0	203,0	200,0	204,0	1,6330	202,33	-4,21
Pistão+ +4x5Mpa+ +4x1Mpa	24,1993	24,15518	241,0	244,0	242,0	244,0	240,0	243,0	1,6330	242,33	-3,98
Pistão+ +5x5Mpa+ +3x1Mpa	28,2915	28,24043	283,0	284,0	283,0	284,0	282,0	284,0	0,8165	283,33	-4,64

Tabela 12(continuação)– Dados utilizados para a obtenção da curva de calibração do manômetro contra a balança de peso morto

Conjunto Montado	Pressão carregada se fosse $g=9,80665 \text{ m/s}^2$ (MPa)	Pressão carregada corrigida para gravidade local $g=9,7878 \text{ m/s}^2$ (MPa)	Primeiro Ciclo (kgf/cm ²)		Segundo Ciclo (kgf/cm ²)		Terceiro Ciclo (kgf/cm ²)		Desvio Padrão (kgf/cm ²)	Média (kgf/cm ²)	Erro médio nos pontos (kgf/cm ²)
			Subida	Descida	Subida	Descida	Subida	Descida			
Pistão+ +6x5Mpa+ +2x1Mpa	32,2897	32,23198	324,0	325,0	324,0	325,0	322,0	324,0	1,0954	324,00	-4,67
Pistão+ +7x5Mpa+ +1x1Mpa	36,2946	36,23036	364,0	365,0	364,0	365,0	363,0	364,0	0,7528	364,17	-5,28
Pistão+ +7x5Mpa+ 4x1Mpa+ +1x0,5Mpa	39,69351	39,62385	400,0	400,0	400,0	400,0	399,0	399,0	0,5164	399,67	-4,38

Fonte: Experimentos realizados no laboratório de pressão e temperatura da PUC-Rio

Notas: Erro Médio= -1,86 kgf/cm²

Desvio Padrão dos Erros Médios =6,042 kgf/cm²

Erro Máximo (módulo) =15,77 kgf/cm²

Erro Mínimo(módulo) =0,08 kgf/cm²

Tabela 13 - Escolha da curva de calibração do manômetro, que se caracteriza pela menor incerteza de ajuste

Média de leitura no manômetro (kgf/cm ²)	Pressão carregada corrigida para gravidade local g=9,7878 m/s ² (MPa)	Previsto segundo Ajuste Linear (y=ax) (MPa)	Previsto segundo Ajuste linear (Y=ax + b) (MPa)	Previsto segundo Ajuste com Polinômio do 2º grau (MPa)	Previsto segundo Ajuste com Polinômio do 3º grau (MPa)
43	4,199959053	4,280879362	4,3777	4,266606	4,23151014
82	8,271213246	8,163537388	8,2426	8,211456	8,22674736
122,3333333	12,26725107	12,17893586	12,23963333	12,271974	12,31040657
161,6666667	16,26362933	16,094779	16,13756667	16,21301667	16,25308454
202,3333333	20,25515715	20,14336258	20,16763333	20,268134	20,29599003
242,3333333	24,155183	24,12557594	24,13163333	24,237414	24,24721377
283,3333333	28,24043118	28,20734463	28,19473333	28,286	28,27915185
324	32,23198114	32,25592822	32,2248	32,281744	32,26832448
364,1666667	36,23036078	36,25473413	36,20531667	36,20887917	36,20659922
399,6666667	39,62384759	39,78894849	39,72336667	39,66363267	39,69203378
Incerteza Padrão do Ajuste:		0,104001789	0,093508835	0,058705315	0,062071675

Fonte: Processamento dos dados obtidos do manômetro e da balança de peso morto para escolha da melhor curva de ajuste

Notas: O polinômio de 2º grau foi o que melhor se ajustou:

$$u_{\text{ajuste}} = 0,058705315 \text{ MPa}$$

$$u_{\text{padrão}} = 0,009 \text{ MPa} = 0,015\% \cdot 60 \text{ MPa (Anexo D)}$$

$$u_{\text{comb}} = 0,059391195 \text{ MPa é a incerteza padrão combinada da medição de pressão (MPa) com o manômetro, usando a equação de ajuste}$$

$$U_{\text{comb}} = 2 \cdot u_{\text{comb}} = 0,11878239 \text{ MPa} = 17,23 \text{ psi} = 1,19 \text{ bar, ou seja, } (0,11878239/39,62384759) = 0,30\%.$$

APÊNDICE D – Calibração do osciloscópio utilizado

Características do osciloscópio utilizado:

- Osciloscópio digital HP modelo 54501A
- Taxa de amostragem: 10^6 amostras/s
- Máxima sensibilidade vertical: 5 mV/divisão
- Resolução vertical: 8 bits
- “Rise time”: 3,5 ns

O osciloscópio foi calibrado na PUC-Rio contra um multímetro HP34401-A, em paralelo com a fonte de tensão. A tabela abaixo mostra a equação de uma reta, por simplicidade, com coeficiente linear nulo, $V = k \cdot S$, para obtenção da voltagem a partir da indicação do osciloscópio. A tabela mostra também a incerteza expandida correspondente.

Tabela 14 - Calibração do osciloscópio digital HP 54501A

Faixa (mV)	Escala (mV/divisão)	k	Incerteza Expandida (mV)
4000	1000	1,004961319	38,38
2000	500	1,009757193	17,46
1000	200	1,008961264	5,93
500	100	1,008472143	3,11

Tabela 15 – Pressões e escalas de tensão correspondentes

Pressão		Escala de Tensão (mV/div)
(psi)	(bar)	
500	34,47	100
1000	68,95	200
1500	103,42	500
2000	137,90	500
2500	172,37	1000
3000	206,84	1000
3500	241,32	1000
4000	275,79	1000
4500	310,26	1000
5000	344,74	1000

APÊNDICE E – Contato por “e-mail” com engenheiro da empresa “High Pressure Instrumentation” (HPI), fabricante de transdutores piezelétricos de alta pressão

A seguir, está registrado um contato por “e-mail” com o engenheiro Heribert Ortner da HPI. O tema em discussão é histerese.

Globo.com :: GloboMail :: Imprimir Mensagem

```
'>
'>'Dear Mr Heine,
'>
'>'We know that during dynamic testing of Piezoelectric Pressure Transducer
you
'>'will find results with different dynamic behaviour in the rising and
'>'falling pressure slope. Please refer to the paper (send by mail) for
dynamic
'>'conformity of pressure transducer. We have no information's that during
'>'static calibration the response of transducer is different during rising
'>'or
'>'falling pressure step.
'>
'>'Best regards
'>
'>'Heribert Ortner
'>
'>'-----Ursprüngliche Nachricht-----
'>'Von: bahiaheine@globo.com [mailto:bahiaheine@globo.com]
'>'Gesendet: Montag, 22. Dezember 2003 14:22
'>'An: Heribert Ortner
'>'Betreff: Histeresis
'>
'>
'>'Dear Mr. Heribert Ortner,
'>'Is there a difference between a piezoelectric transducer's response
when
'>'the pressure is suddenly applied in the transducer or when the same
pressure
'>'is suddenly relieved? Do you know a bibliographical reference?
'>'Best regards and happy holidays,
'>'Alfredo Heine
'>
```

APÊNDICE F – Processamento dos resultados dos experimentos realizados na PUC-Rio

Esses experimentos foram realizados utilizando-se o dispositivo mostrado esquematicamente na Figura 9 (Capítulo 3 - Procedimento experimental). O processamento dos resultados foi feito de forma criteriosa, como se pode ver:

Tabela 16 - Resultados dos experimentos a 500 psi (34,47 bar). Dados experimentais

Experimento	Pressurização					
	Δt_1 (ms)	Δt_2 (ms)	Δt_3 (ms)	ΔV_1 (mV)	ΔV_2 (mV)	ΔV_3 (mV)
1	24,40	25,20	25,10	340,625	340,625	337,500
2	23,90	27,10	27,00	346,875	346,875	346,875
3	21,20	23,00	23,20	353,125	350,000	350,000
4	30,40	31,20	31,20	346,875	346,875	343,750
5	32,40	32,90	32,40	328,125	325,000	325,000
6	11,20	12,40	12,40	346,875	343,750	343,750
7	34,10	34,80	34,70	337,500	337,500	337,500
8	36,00	35,30	35,00	331,250	331,250	328,125
9	27,10	27,50	26,90	337,500	337,500	334,375
10	30,60	30,30	31,30	337,500	334,375	334,375
11	30,80	31,80	31,60	356,250	356,250	356,250
12	28,40	29,40	29,10	353,125	350,000	350,000
13	30,60	32,60	32,60	346,875	346,875	346,875
14	30,20	31,40	30,20	356,250	356,250	353,125
15	31,00	31,40	31,60	353,125	353,125	353,125
16	31,60	31,80	32,60	346,875	346,875	346,875
17	32,60	33,40	33,60	350,000	350,000	350,000
18	27,00	27,80	28,20	346,875	343,750	343,750
19	36,40	37,80	38,20	350,000	350,000	350,000
20	36,40	36,80	36,80	356,250	353,125	356,250
21	38,80	37,60	37,60	353,125	350,000	350,000
22	36,00	37,00	37,40	350,000	350,000	350,000
23	40,40	39,80	43,60	350,000	350,000	350,000
24	35,80	36,20	35,60	353,125	353,125	353,125
25	44,00	44,80	44,80	353,125	353,125	350,000
26	38,80	39,80	39,20	350,000	350,000	350,000
27	41,20	41,20	41,20	356,250	356,250	356,250
28	56,80	57,60	58,40	353,125	353,125	353,125
29	43,60	44,80	44,80	350,000	350,000	350,000
30	44,40	46,80	45,60	350,000	350,000	350,000
31	56,40	57,20	59,60	340,625	340,625	340,625
32	47,20	49,20	50,00	353,125	353,125	353,125
33	74,00	74,80	74,00	350,000	350,000	350,000
34	68,40	69,60	68,80	343,750	343,750	343,750

Tabela 16 (Continuação) - Resultados dos experimentos a 500 psi (34,47 bar). Dados experimentais

Pressurização						
Experimento	Δt_1 (ms)	Δt_2 (ms)	Δt_3 (ms)	ΔV_1 (mV)	ΔV_2 (mV)	ΔV_3 (mV)
35	88,80	88,00	90,00	340,625	340,625	340,625
36	97,00	103,00	103,00	346,875	346,875	346,875
37	107,00	111,00	108,00	331,250	331,250	331,250
38	130,00	135,00	142,00	343,750	343,750	346,875
39	132,00	133,00	133,00	343,750	343,750	343,750
40	2200,00	2220,00	2230,00	193,750	193,750	193,750
Despressurização						
41	4,80	4,28	4,28	362,500	362,500	359,375
42	9,20	9,92	10,00	350,000	350,000	346,875
43	7,44	8,68	8,76	340,625	343,750	343,750
44	7,88	8,64	8,72	346,875	350,000	346,875

Tabela 17 - Experimentos a 34,47 bar. Análise estatística dos resultados

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (mV)	Desvio Padrão de Δt (ms)	Desvio Padrão de ΔV (mV)
1	24,9	339,58333	0,4359	1,8042
2	26,0	346,87500	1,8193	0,0000
3	22,5	351,04167	1,1015	1,8042
4	30,9	345,83333	0,4619	1,8042
5	32,6	326,04167	0,2887	1,8042
6	12,0	344,79167	0,6928	1,8042
7	34,5	337,50000	0,3786	0,0000
8	35,4	330,20833	0,5132	1,8042
9	27,2	336,45833	0,3055	1,8042
10	30,7	335,41667	0,5132	1,8042
11	31,4	356,25000	0,5292	0,0000
12	29,0	351,04167	0,5132	1,8042
13	31,9	346,87500	1,1547	0,0000
14	30,6	355,20833	0,6928	1,8042
15	31,3	353,12500	0,3055	0,0000
16	32,0	346,87500	0,5292	0,0000
17	33,2	350,00000	0,5292	0,0000
18	27,7	344,79167	0,6110	1,8042
19	37,5	350,00000	0,9452	0,0000
20	36,7	355,20833	0,2309	1,8042
21	38,0	351,04167	0,6928	1,8042
22	36,8	350,00000	0,7211	0,0000
23	41,3	350,00000	2,0429	0,0000
24	35,9	353,12500	0,3055	0,0000
25	44,5	352,08333	0,4619	1,8042
26	39,3	350,00000	0,5033	0,0000

Tabela 17 (Continuação) - Experimentos a 34,47 bar. Análise estatística dos resultados

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (mV)	Desvio Padrão de Δt (ms)	Desvio Padrão de ΔV (mV)
27	41,2	356,25000	0,0000	0,0000
28	57,6	353,12500	0,8000	0,0000
29	44,4	350,00000	0,6928	0,0000
30	45,6	350,00000	1,2000	0,0000
31	57,7	340,62500	1,6653	0,0000
32	48,8	353,12500	1,4422	0,0000
33	74,3	350,00000	0,4619	0,0000
34	68,9	343,75000	0,6110	0,0000
35	88,9	340,62500	1,0066	0,0000
36	101,0	346,87500	3,4641	0,0000
37	108,7	331,25000	2,0817	0,0000
38	135,7	344,79167	6,0277	1,8042
39	132,7	343,75000	0,5774	0,0000
40	2216,7	193,75000	15,2753	0,0000
41	4,5	361,45833	0,3002	1,8042
42	9,7	348,95833	0,4406	1,8042
43	8,3	342,70833	0,7401	1,8042
44	8,4	347,91667	0,4636	1,8042

Tabela 18 - Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 34,47 bar

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (mV)	Descartar pelo critério de atenuação?	E pelo critério de Chauvenet?
41	4,5	361,45833	Não	Não
43	8,3	342,70833	Não	Não
44	8,4	347,91667	Não	Não
42	9,7	348,95833	Não	Não
6	12,0	344,79167	Não	Não
3	22,5	351,04167	Não	Não
1	24,9	339,58333	Não	Não
2	26,0	346,87500	Não	Não
9	27,2	336,45833	Não	Não
18	27,7	344,79167	Não	Não
12	29,0	351,04167	Não	Não
14	30,6	355,20833	Não	Não
10	30,7	335,41667	Não	Não
4	30,9	345,83333	Não	Não
15	31,3	353,12500	Não	Não
11	31,4	356,25000	Não	Não
13	31,9	346,87500	Não	Não

Tabela 18 (Continuação)- Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 34,47 bar

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (mV)	Descartar pelo critério de atenuação?	E pelo critério de Chauvenet?
16	32,0	346,87500	Não	Não
5	32,6	326,04167	Não	Sim
17	33,2	350,00000	Não	Não
7	34,5	337,50000	Não	Não
8	35,4	330,20833	Não	Não
24	35,9	353,12500	Não	Não
20	36,7	355,20833	Não	Não
22	36,8	350,00000	Não	Não
19	37,5	350,00000	Não	Não
21	38,0	351,04167	Não	Não
26	39,3	350,00000	Não	Não
27	41,2	356,25000	Não	Não
23	41,3	350,00000	Não	Não
29	44,4	350,00000	Não	Não
25	44,5	352,08333	Não	Não
30	45,6	350,00000	Não	Não
32	48,8	353,12500	Não	Não
28	57,6	353,12500	Não	Não
31	57,7	340,62500	Não	Não
34	68,9	343,75000	Não	Não
33	74,3	350,00000	Não	Não
35	88,9	340,62500	Não	Não
36	101,0	346,87500	Não	Não
37	108,7	331,25000	Não	Não
39	132,7	343,75000	Não	Não
38	135,7	344,79167	Não	Não
40	2216,7	193,75000	Sim	

Nota: Aqui os experimentos foram colocados em ordem crescente de tempo para facilitar o descarte através do critério de atenuação.

Na próxima página, podem ser examinados três gráficos bem elucidativos que ajudam no entendimento do critério de atenuação.

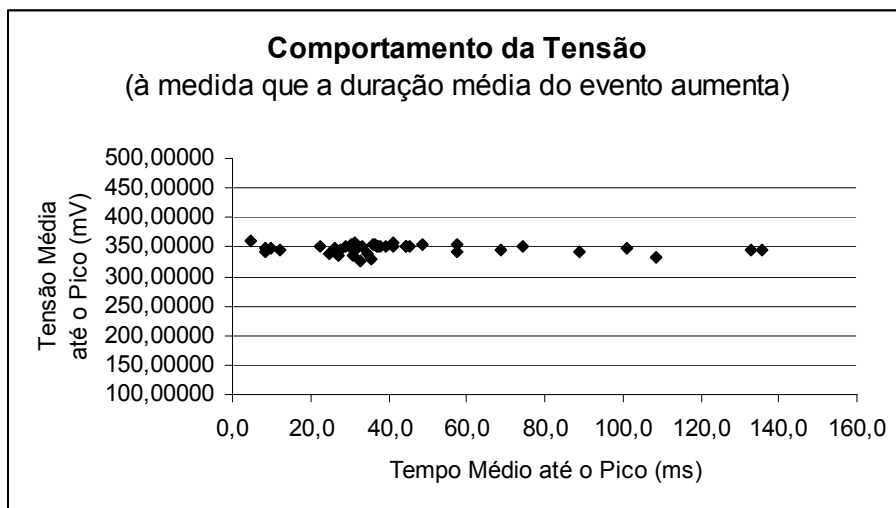


Figura 23 - Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 500 psi (34,47 bar)

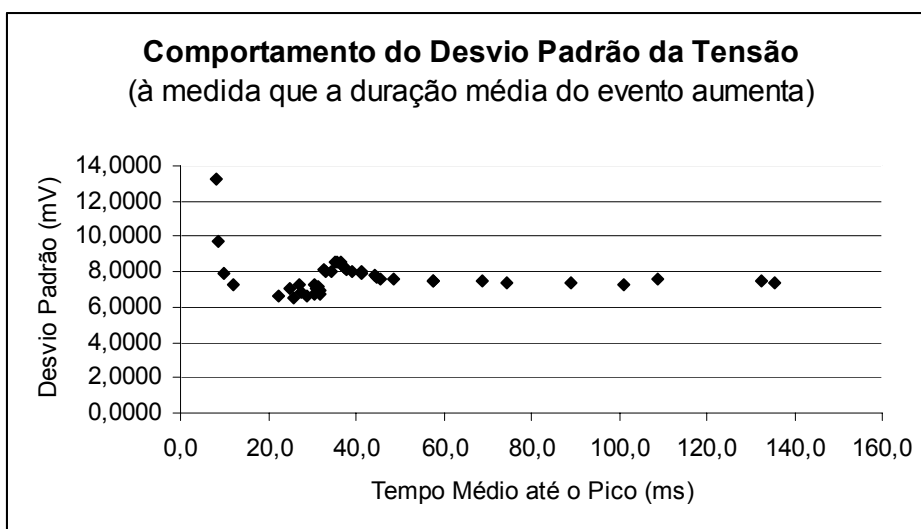


Figura 24 - Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 34,47 bar

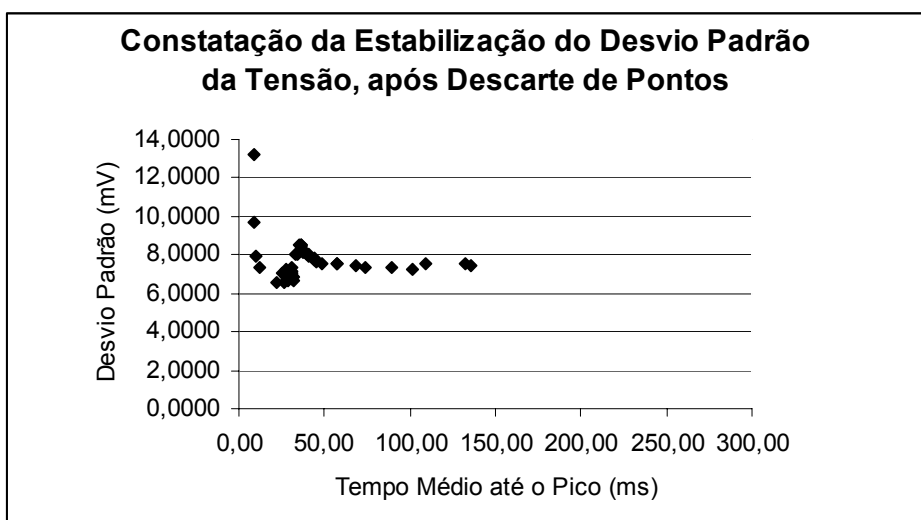


Figura 25 - Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e de Chauvenet. Pressão de 34,47 bar

Tabela 19 - Resultados dos experimentos a 1000 psi (68,95 bar). Dados experimentais

Pressurização						
Experimento	Δt_1 (ms)	Δt_2 (ms)	Δt_3 (ms)	ΔV_1 (mV)	ΔV_2 (mV)	ΔV_3 (mV)
1	5,32	7,52	7,52	706,250	712,500	725,000
2	6,04	8,12	8,12	718,750	718,750	718,750
3	16,28	16,24	16,52	718,750	718,750	718,750
4	20,08	19,48	19,48	718,750	712,500	712,500
5	8,32	11,20	11,00	718,750	718,750	718,750
6	5,92	8,64	8,56	725,000	737,500	731,250
7	6,28	8,44	8,68	743,750	737,500	737,500
8	17,96	17,40	17,52	725,000	718,750	718,750
9	6,00	6,00	6,00	725,000	725,000	725,000
10	6,10	7,50	8,10	725,000	737,500	737,500
11	33,30	33,80	34,00	712,500	712,500	712,500
12	31,60	32,70	32,80	706,250	706,250	706,250
13	7,30	8,30	8,90	731,250	737,500	731,250
14	17,40	18,10	18,00	725,000	725,000	725,000
15	14,00	14,40	14,60	725,000	725,000	725,000
16	20,60	23,70	24,40	718,750	718,750	725,000
17	19,80	20,30	20,30	718,750	718,750	718,750
18	23,10	23,30	23,60	725,000	725,000	725,000
19	14,40	15,50	15,50	725,000	731,250	725,000
20	22,50	27,10	27,40	712,500	712,500	712,500
21	16,50	17,70	17,40	725,000	725,000	725,000
22	22,90	28,30	26,80	718,750	718,750	718,750
23	18,80	18,90	19,20	725,000	725,000	725,000
24	16,70	19,30	18,90	712,500	712,500	712,500
25	14,90	18,00	18,00	725,000	725,000	725,000
26	16,40	17,70	17,20	718,750	718,750	718,750
27	22,40	26,10	26,30	731,250	731,250	731,250
28	23,40	25,30	25,30	725,000	718,750	725,000
29	21,80	22,70	22,80	718,750	718,750	718,750
30	52,00	53,60	52,40	693,750	693,750	693,750
31	47,80	48,40	48,40	700,000	700,000	700,000
32	41,20	43,00	41,40	706,250	706,250	706,250
33	67,80	73,60	74,00	693,750	693,750	693,750
34	61,40	62,20	62,40	700,000	706,250	706,250
35	99,60	103,60	103,60	687,500	693,750	687,500
36	98,40	101,20	102,00	693,750	693,750	693,750
37	236,00	251,00	261,00	631,250	631,250	631,250
38	269,00	269,00	274,00	631,250	631,250	631,250
39	710,00	738,00	746,00	506,250	506,250	506,250
Despressurização						
40	8,12	8,60	8,48	718,750	718,750	718,750
41	3,12	3,24	3,08	734,375	734,375	734,375
42	4,28	4,40	4,36	703,125	734,375	734,375

Tabela 20 – Experimentos a 68,95 bar. Análise estatística dos resultados

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (mV)	Desvio Padrão de Δt (ms)	Desvio Padrão de ΔV (mV)
1	6,8	714,58333	1,2702	9,5470
2	7,4	718,75000	1,2009	0,0000
3	16,3	718,75000	0,1514	0,0000
4	19,7	714,58333	0,3464	3,6084
5	10,2	718,75000	1,6081	0,0000
6	7,7	731,25000	1,5478	6,2500
7	7,8	739,58333	1,3218	3,6084
8	17,6	720,83333	0,2948	3,6084
9	6,0	725,00000	0,0000	0,0000
10	7,2	733,33333	1,0263	7,2169
11	33,7	712,50000	0,3606	0,0000
12	32,4	706,25000	0,6658	0,0000
13	8,2	733,33333	0,8083	3,6084
14	17,8	725,00000	0,3786	0,0000
15	14,3	725,00000	0,3055	0,0000
16	22,9	720,83333	2,0224	3,6084
17	20,1	718,75000	0,2887	0,0000
18	23,3	725,00000	0,2517	0,0000
19	15,1	727,08333	0,6351	3,6084
20	25,7	712,50000	2,7465	0,0000
21	17,2	725,00000	0,6245	0,0000
22	26,0	718,75000	2,7875	0,0000
23	19,0	725,00000	0,2082	0,0000
24	18,3	712,50000	1,4000	0,0000
25	17,0	725,00000	1,7898	0,0000
26	17,1	718,75000	0,6557	0,0000
27	24,9	731,25000	2,1962	0,0000
28	24,7	722,91667	1,0970	3,6084
29	22,4	718,75000	0,5508	0,0000
30	52,7	693,75000	0,8327	0,0000
31	48,2	700,00000	0,3464	0,0000
32	41,9	706,25000	0,9866	0,0000
33	71,8	693,75000	3,4699	0,0000
34	62,0	704,16667	0,5292	3,6084
35	102,3	689,58333	2,3094	3,6084
36	100,5	693,75000	1,8903	0,0000
37	249,3	631,25000	12,5831	0,0000
38	270,7	631,25000	2,8868	0,0000
39	731,3	506,25000	18,9033	0,0000
40	8,4	718,75000	0,2498	0,0000
41	3,1	734,37500	0,0833	0,0000
42	4,3	723,95833	0,0611	18,0422

Tabela 21 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 68,95 bar

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (mV)	Descartar pelo critério de atenuação?	E pelo critério de Chauvenet?
41	3,1	734,37500	Não	Não
42	4,3	723,95833	Não	Não
9	6,0	725,00000	Não	Não
1	6,8	714,58333	Não	Não
10	7,2	733,33333	Não	Não
2	7,4	718,75000	Não	Não
6	7,7	731,25000	Não	Não
7	7,8	739,58333	Não	Sim
13	8,2	733,33333	Não	Não
40	8,4	718,75000	Não	Não
5	10,2	718,75000	Não	Não
15	14,3	725,00000	Não	Não
19	15,1	727,08333	Não	Não
3	16,3	718,75000	Não	Não
25	17,0	725,00000	Não	Não
26	17,1	718,75000	Não	Não
21	17,2	725,00000	Não	Não
8	17,6	720,83333	Não	Não
14	17,8	725,00000	Não	Não
24	18,3	712,50000	Não	Não
23	19,0	725,00000	Não	Não
4	19,7	714,58333	Não	Não
17	20,1	718,75000	Não	Não
29	22,4	718,75000	Não	Não
16	22,9	720,83333	Não	Não
18	23,3	725,00000	Não	Não
28	24,7	722,91667	Não	Não
27	24,9	731,25000	Não	Não
20	25,7	712,50000	Não	Não
22	26,0	718,75000	Não	Não
12	32,4	706,25000	Sim	
11	33,7	712,50000	Sim	
32	41,9	706,25000	Sim	
31	48,2	700,00000	Sim	
30	52,7	693,75000	Sim	
34	62,0	704,16667	Sim	
33	71,8	693,75000	Sim	
36	100,5	693,75000	Sim	
35	102,3	689,58333	Sim	
37	249,3	631,25000	Sim	
38	270,7	631,25000	Sim	
39	731,3	506,25000	Sim	

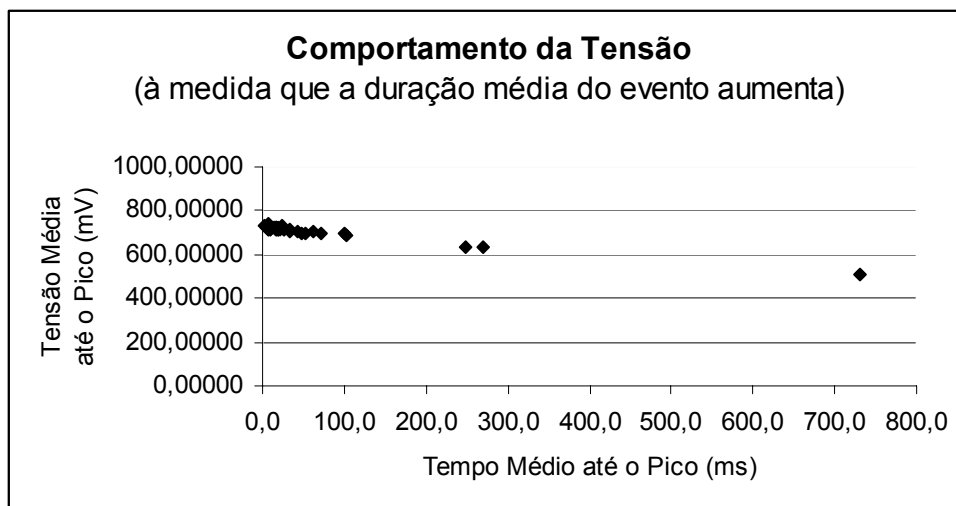


Figura 26 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 1000 psi (68,95 bar)

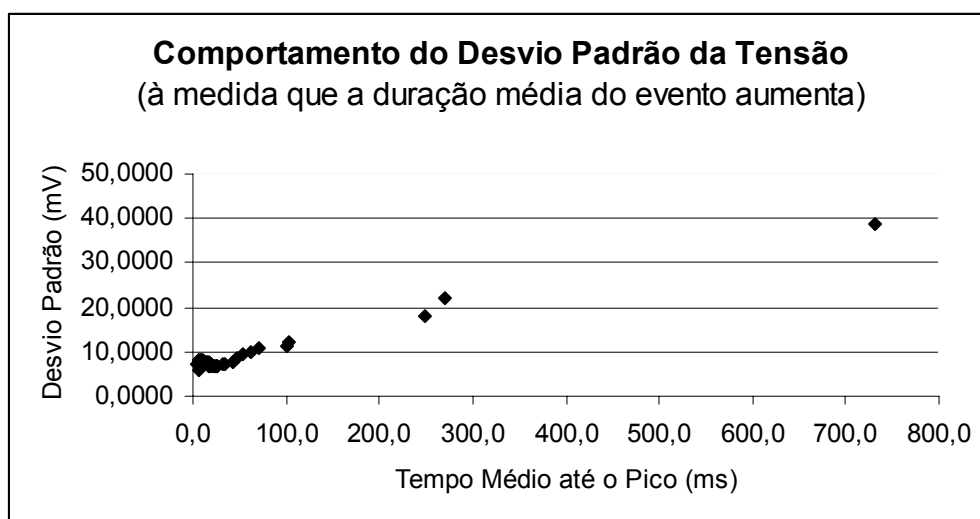


Figura 27 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 68,95 bar

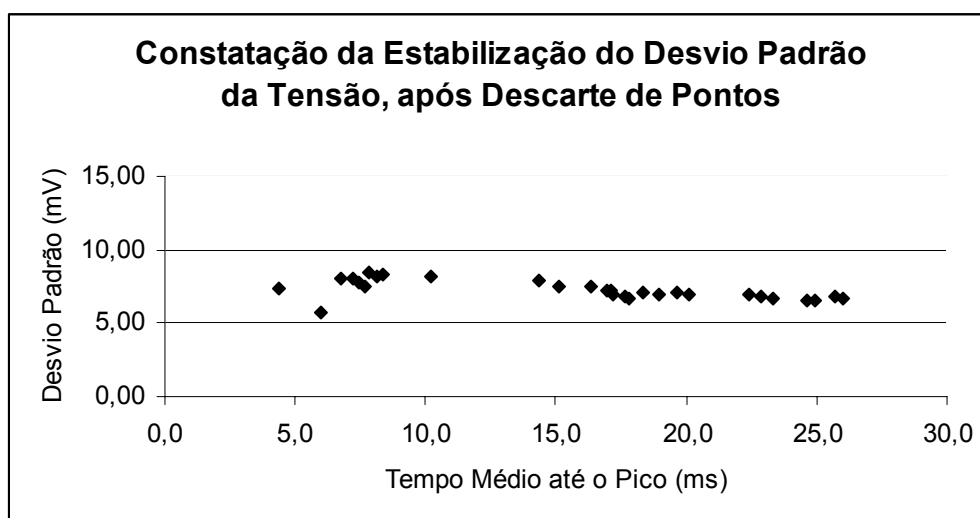


Figura 28 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e de Chauvenet. Pressão de 68,95 bar

Tabela 22 – Resultados dos experimentos a 1500 psi (103,42 bar). Dados experimentais

Pressurização						
Experimento	Δt_1 (ms)	Δt_2 (ms)	Δt_3 (ms)	ΔV_1 (mV)	ΔV_2 (mV)	ΔV_3 (mV)
1	13,50	13,50	13,50	1,03125	1,03125	1,03125
2	16,50	17,10	17,30	1,09375	1,09375	1,09375
3	13,10	13,80	13,70	1,09375	1,09375	1,09375
4	12,30	13,00	13,10	1,09375	1,09375	1,09375
5	13,60	13,80	13,90	1,07813	1,07813	1,07813
6	6,70	6,90	6,90	1,10938	1,10938	1,10938
7	13,20	15,50	15,20	1,09375	1,09375	1,09375
8	14,50	14,60	14,70	1,07813	1,07813	1,07813
9	20,80	21,10	21,00	1,10938	1,10938	1,10938
10	12,00	12,30	12,60	1,07813	1,07813	1,06250
11	11,40	15,00	15,10	1,09375	1,09375	1,09375
12	13,76	16,28	16,24	1,06250	1,06250	1,06250
13	4,90	5,90	6,20	1,12500	1,10938	1,10938
14	6,76	6,76	6,76	1,09375	1,09375	1,09375
15	18,00	18,10	18,40	1,09375	1,09375	1,09375
16	14,60	14,80	14,80	1,10938	1,10938	1,10938
17	16,60	17,00	17,20	1,09375	1,10938	1,09375
18	15,10	16,00	16,60	1,09375	1,07813	1,09375
19	16,70	16,90	17,00	1,09375	1,09375	1,09375
20	17,50	17,80	17,50	1,10938	1,10938	1,09375
21	32,80	35,60	35,60	1,09375	1,09375	1,09375
22	29,20	36,00	36,00	1,09375	1,09375	1,09375
23	39,80	40,80	40,80	1,09375	1,09375	1,09375
24	38,60	38,80	40,00	1,09375	1,07813	1,09375
25	42,60	42,60	42,80	1,09375	1,07813	1,09375
26	41,00	42,60	42,40	1,07813	1,07813	1,07813
27	45,20	58,40	57,60	1,07813	1,07813	1,07813
28	56,80	57,20	61,20	1,07813	1,07813	1,07813
29	65,20	67,60	67,60	1,09375	1,07813	1,09375
30	50,00	51,00	54,00	1,09375	1,09375	1,09375
31	177,00	181,00	181,00	0,95313	0,95313	0,95313
32	130,00	134,00	134,00	0,98438	0,98438	0,98438
33	514,00	520,00	522,00	0,71875	0,71875	0,71875
Despressurização						
34	8,30	8,20	8,40	1,12501	1,12501	1,12501
35	8,00	7,50	8,70	1,10938	1,10938	1,12501
36	16,90	17,00	17,50	1,04688	1,04688	1,04688

Tabela 23 - Experimentos a 103,42 bar. Análise estatística dos resultados

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (V)	Desvio Padrão de Δt (ms)	Desvio Padrão de ΔV (v)
1	13,5	1,03125	0,0000	0,0000
2	17,0	1,09375	0,4163	0,0000
3	13,5	1,09375	0,3786	0,0000
4	12,8	1,09375	0,4359	0,0000
5	13,8	1,07813	0,1528	0,0000
6	6,8	1,10938	0,1155	0,0000
7	14,6	1,09375	1,2503	0,0000
8	14,6	1,07813	0,1000	0,0000
9	21,0	1,10938	0,1528	0,0000
10	12,3	1,07292	0,3000	0,0090
11	13,8	1,09375	2,1079	0,0000
12	15,4	1,06250	1,4435	0,0000
13	5,7	1,11459	0,6807	0,0090
14	6,8	1,09375	0,0000	0,0000
15	18,2	1,09375	0,2082	0,0000
16	14,7	1,10938	0,1155	0,0000
17	16,9	1,09896	0,3055	0,0090
18	15,9	1,08854	0,7550	0,0090
19	16,9	1,09375	0,1528	0,0000
20	17,6	1,10417	0,1732	0,0090
21	34,7	1,09375	1,6166	0,0000
22	33,7	1,09375	3,9260	0,0000
23	40,5	1,09375	0,5774	0,0000
24	39,1	1,08854	0,7572	0,0090
25	42,7	1,08854	0,1155	0,0090
26	42,0	1,07813	0,8718	0,0000
27	53,7	1,07813	7,4009	0,0000
28	58,4	1,07813	2,4331	0,0000
29	66,8	1,08854	1,3856	0,0090
30	51,7	1,09375	2,0817	0,0000
31	179,7	0,95313	2,3094	0,0000
32	132,7	0,98438	2,3094	0,0000
33	518,7	0,71875	4,1633	0,0000
34	8,3	1,12501	0,1000	0,0000
35	8,1	1,11459	0,6028	0,0090
36	17,1	1,04688	0,3215	0,0000

Tabela 24 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 103,42 bar

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (V)	Descartar pelo critério atenuação?	E pelo critério de Chauvenet?
13	5,7	1,11459	Não	Não
14	6,8	1,09375	Não	Não
6	6,8	1,10938	Não	Não
35	8,1	1,11459	Não	Não
34	8,3	1,12501	Não	Não
10	12,3	1,07292	Não	Não
4	12,8	1,09375	Não	Não
1	13,5	1,03125	Não	Sim
3	13,5	1,09375	Não	Não
5	13,8	1,07813	Não	Não
11	13,8	1,09375	Não	Não
8	14,6	1,07813	Não	Não
7	14,6	1,09375	Não	Não
16	14,7	1,10938	Não	Não
12	15,4	1,06250	Não	Não
18	15,9	1,08854	Não	Não
19	16,9	1,09375	Não	Não
17	16,9	1,09896	Não	Não
2	17,0	1,09375	Não	Não
36	17,1	1,04688	Não	Não
20	17,6	1,10417	Não	Não
15	18,2	1,09375	Não	Não
9	21,0	1,10938	Não	Não
22	33,7	1,09375	Não	Não
21	34,7	1,09375	Não	Não
24	39,1	1,08854	Não	Não
23	40,5	1,09375	Não	Não
26	42,0	1,07813	Não	Não
25	42,7	1,08854	Não	Não
30	51,7	1,09375	Não	Não
27	53,7	1,07813	Não	Não
28	58,4	1,07813	Não	Não
29	66,8	1,08854	Não	Não
32	132,7	0,98438	Sim	
31	179,7	0,95313	Sim	
33	518,7	0,71875	Sim	

NOTA: Aqui os experimentos foram colocados em ordem crescente de tempo para facilitar o descarte através do critério de atenuação.

Na próxima página, pode-se ver três gráficos bem elucidativos para a compreensão do critério de atenuação óbvia.

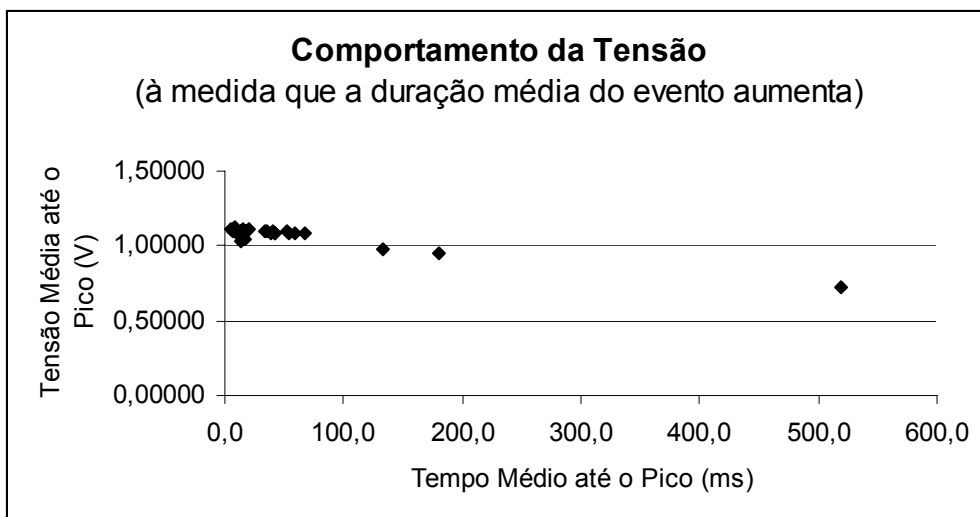


Figura 29 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 1500 psi (103,42 bar)

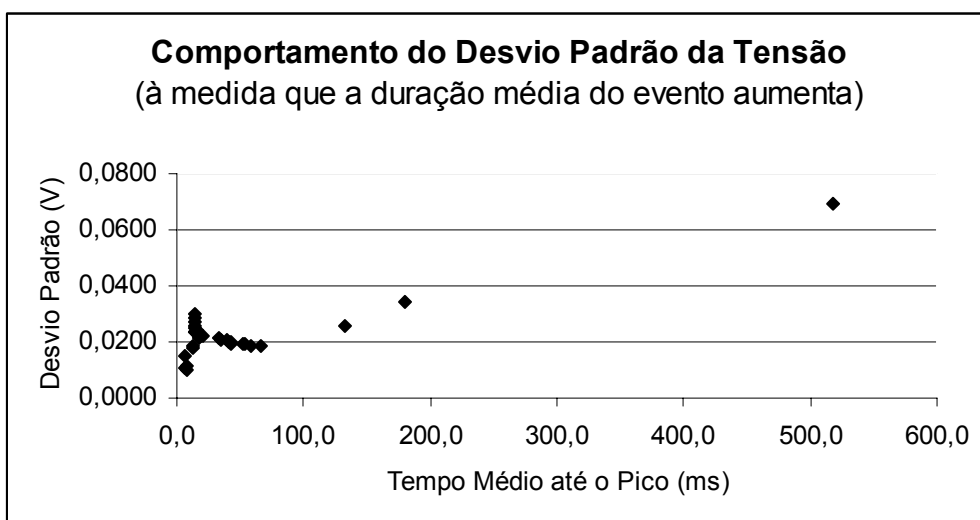


Figura 30 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 103,42 bar

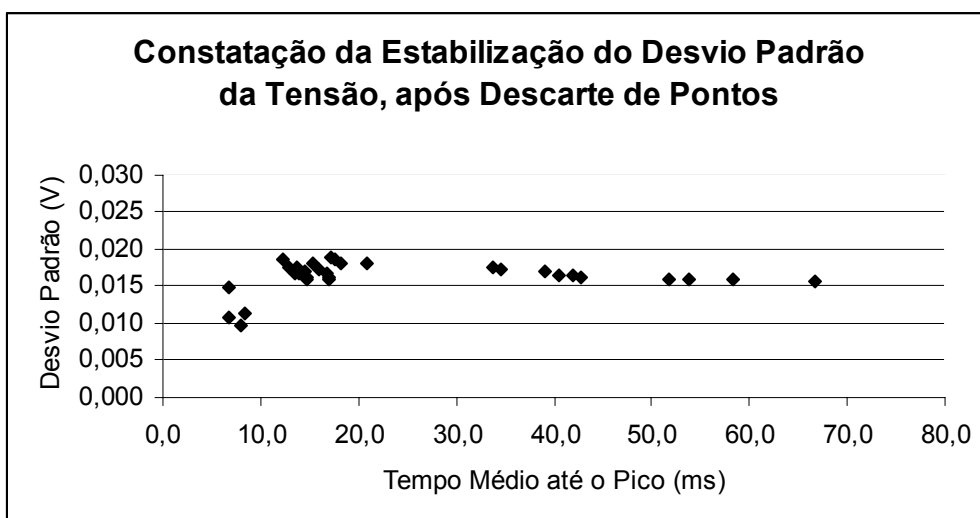


Figura 31 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e Chauvenet. Pressão de 103,42 bar

Tabela 25 – Resultados dos experimentos a 2000 psi (137,90 bar). Dados experimentais

Experimento	Pressurização					
	$\Delta t1$ (ms)	$\Delta t2$ (ms)	$\Delta t3$ (ms)	$\Delta V1$ (mV)	$\Delta V2$ (mV)	$\Delta V3$ (mV)
1	10,44	10,44	11,12	1,46875	1,43751	1,43751
2	3,92	4,32	3,84	1,54688	1,54688	1,53125
3	6,88	6,68	6,76	1,50000	1,50001	1,48438
4	7,72	8,76	8,76	1,46876	1,48438	1,48438
5	7,28	7,36	7,40	1,50000	1,48438	1,46875
6	3,72	3,76	4,40	1,54688	1,51563	1,53126
7	2,68	4,28	4,08	1,46876	1,50001	1,48438
8	3,04	3,24	3,36	1,56251	1,53126	1,51563
9	9,08	9,44	9,80	1,50001	1,48438	1,48438
10	9,44	9,76	9,76	1,50001	1,48438	1,48438
11	7,80	8,00	8,20	1,48438	1,50001	1,48438
12	9,50	9,70	9,50	1,50001	1,46876	1,48438
13	8,20	9,50	9,40	1,48438	1,46876	1,45313
14	8,60	9,00	9,20	1,50001	1,48438	1,50001
15	8,80	9,50	9,20	1,46876	1,46876	1,46876
16	8,60	9,90	10,40	1,48438	1,48438	1,46876
17	15,30	15,30	15,60	1,48438	1,46875	1,46875
18	14,80	14,50	14,70	1,48438	1,45313	1,45313
19	18,60	18,60	18,80	1,48438	1,48438	1,46876
20	10,30	10,10	10,00	1,48438	1,45313	1,48438
21	21,10	21,40	21,30	1,50001	1,50001	1,50001
22	26,00	26,30	26,00	1,50001	1,50001	1,50001
23	20,20	20,00	20,40	1,50001	1,50001	1,50001
24	21,40	21,00	21,40	1,48438	1,48438	1,48438
25	19,80	20,00	20,00	1,50001	1,50001	1,50001
26	24,60	25,00	25,00	1,50001	1,50001	1,50001
27	49,00	41,00	41,20	1,50001	1,50001	1,50001
28	47,40	47,40	47,40	1,48438	1,48438	1,48438
29	50,00	51,60	51,20	1,46876	1,46876	1,46876
30	51,40	51,60	52,00	1,48438	1,48438	1,48438
31	96,40	97,60	98,40	1,46876	1,46876	1,46876
32	100,00	100,80	100,40	1,46876	1,46876	1,46876
33	106,00	106,40	106,00	1,46876	1,46876	1,46876
34	257,00	259,00	261,00	1,43751	1,43751	1,43751
35	330,00	334,00	338,00	1,43751	1,43751	1,43751
36	420,00	348,00	352,00	1,40626	1,40626	1,40626
37	496,00	502,00	502,00	1,40626	1,40626	1,40626
38	588,00	680,00	664,00	1,37501	1,37501	1,35938
Despressurização						
39	4,72	4,76	4,80	1,51563	1,51563	1,51563
40	9,32	9,36	9,44	1,50001	1,50001	1,50001
41	4,20	4,28	4,20	1,50001	1,50001	1,50001

Tabela 26 – Experimentos a 137,90 bar. Análise estatística dos resultados

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (V)	Desvio Padrão de Δt (ms)	Desvio Padrão de ΔV (V)
1	10,7	1,44792	0,3926	0,0180
2	4,0	1,54167	0,2572	0,0090
3	6,8	1,49480	0,1007	0,0090
4	8,4	1,47917	0,6004	0,0090
5	7,3	1,48438	0,0611	0,0156
6	4,0	1,53126	0,3816	0,0156
7	3,7	1,48438	0,8718	0,0156
8	3,2	1,53647	0,1617	0,0239
9	9,4	1,48959	0,3600	0,0090
10	9,8	1,48959	0,0000	0,0090
11	8,0	1,48959	0,2000	0,0090
12	9,6	1,48438	0,1155	0,0156
13	9,0	1,46876	0,7234	0,0156
14	8,9	1,49480	0,3055	0,0090
15	9,2	1,46876	0,3512	0,0000
16	9,6	1,47917	0,9292	0,0090
17	15,4	1,47396	0,1732	0,0090
18	14,7	1,46355	0,1528	0,0180
19	18,7	1,47917	0,1155	0,0090
20	10,1	1,47396	0,1528	0,0180
21	21,3	1,50001	0,1528	0,0000
22	26,1	1,50001	0,1732	0,0000
23	20,2	1,50001	0,2000	0,0000
24	21,3	1,48438	0,2309	0,0000
25	19,9	1,50001	0,1155	0,0000
26	24,9	1,50001	0,2309	0,0000
27	43,7	1,50001	4,5622	0,0000
28	47,4	1,48438	0,0000	0,0000
29	50,9	1,46876	0,8327	0,0000
30	51,7	1,48438	0,3055	0,0000
31	97,5	1,46876	1,0066	0,0000
32	100,4	1,46876	0,4000	0,0000
33	106,1	1,46876	0,2309	0,0000
34	259,0	1,43751	2,0000	0,0000
35	334,0	1,43751	4,0000	0,0000
36	373,3	1,40626	40,4640	0,0000
37	500,0	1,40626	3,4641	0,0000
38	644,0	1,36980	49,1528	0,0090
39	4,8	1,51563	0,0400	0,0000
40	9,4	1,50001	0,0611	0,0000
41	4,2	1,50001	0,0462	0,0000

Tabela 27 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 137,90 bar

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (V)	Descartar pelo critério de atenuação?	E pelo critério de Chauvenet?
8	3,2	1,53647	Não	Não
7	3,7	1,48438	Não	Não
6	4,0	1,53126	Não	Não
2	4,0	1,54167	Não	Sim
41	4,2	1,50001	Não	Não
39	4,76	1,51563	Não	Não
3	6,8	1,49480	Não	Não
5	7,3	1,48438	Não	Não
11	8,0	1,48959	Não	Não
4	8,4	1,47917	Não	Não
14	8,9	1,49480	Não	Não
13	9,0	1,46876	Não	Não
15	9,2	1,46876	Não	Não
40	9,4	1,50001	Não	Não
9	9,4	1,48959	Não	Não
12	9,6	1,48438	Não	Não
16	9,6	1,47917	Não	Não
10	9,8	1,48959	Não	Não
20	10,1	1,47396	Não	Não
1	10,7	1,44792	Não	Não
18	14,7	1,46355	Não	Não
17	15,4	1,47396	Não	Não
19	18,7	1,47917	Não	Não
25	19,9	1,50001	Não	Não
23	20,2	1,50001	Não	Não
21	21,3	1,50001	Não	Não
24	21,3	1,48438	Não	Não
26	24,9	1,50001	Não	Não
22	26,1	1,50001	Não	Não
27	43,7	1,50001	Não	Não
28	47,4	1,48438	Não	Não
29	50,9	1,46876	Não	Não
30	51,7	1,48438	Não	Não
31	97,5	1,46876	Sim	
32	100,4	1,46876	Sim	
33	106,1	1,46876	Sim	
34	259,0	1,43751	Sim	
35	334,0	1,43751	Sim	
36	373,3	1,40626	Sim	
37	500,0	1,40626	Sim	
38	644,0	1,36980	Sim	

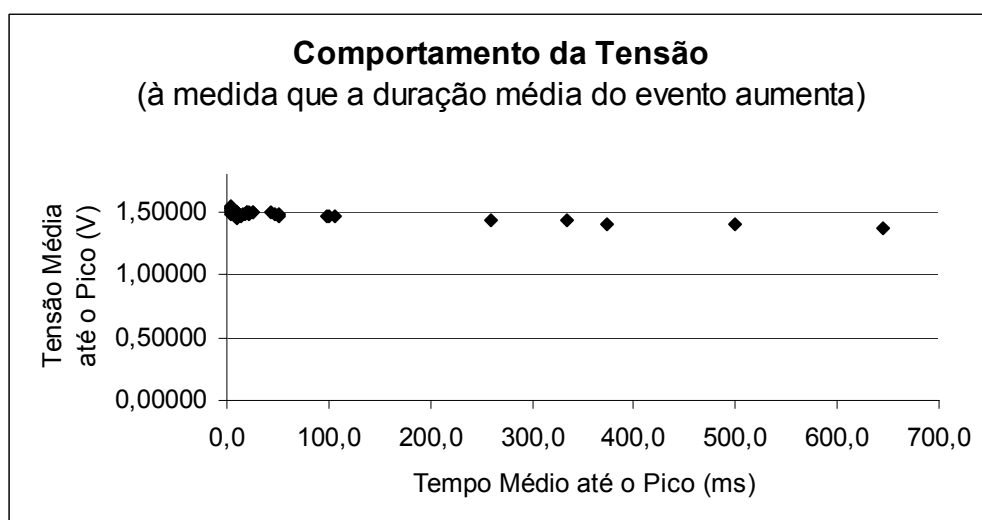


Figura 32 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 2000 psi (137,90 bar)

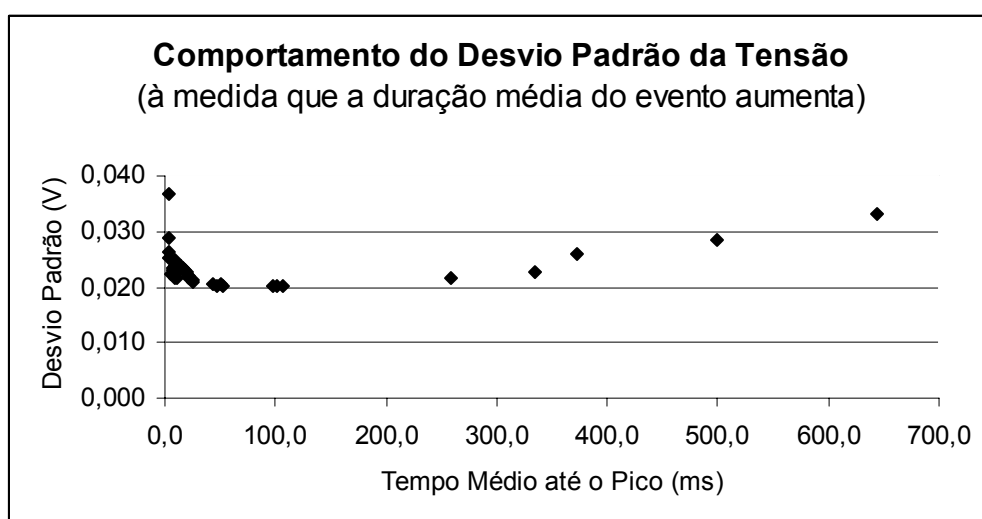


Figura 33 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 137,90 bar

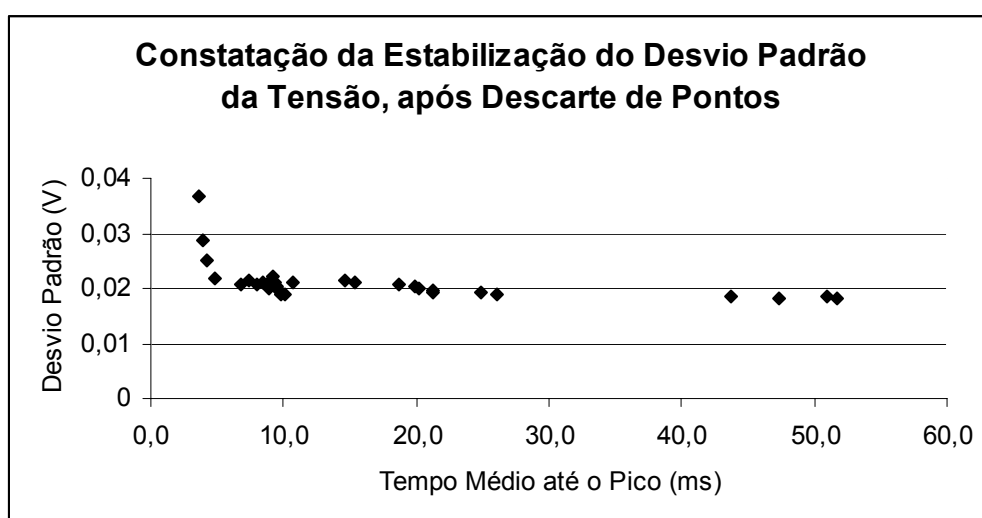


Figura 34 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos

Tabela 28 – Resultados dos experimentos a 2500 psi (172,37 bar). Dados experimentais

Pressurização						
Experimento	Δt_1 (ms)	Δt_2 (ms)	Δt_3 (ms)	ΔV_1 (V)	ΔV_2 (v)	ΔV_3 (v)
1	2,88	2,76	3,00	1,93750	1,90625	1,90625
2	5,60	6,00	5,88	1,84375	1,81250	1,84375
3	4,56	4,96	5,04	1,87500	1,84375	1,87500
4	3,32	3,08	3,44	1,87500	1,84375	1,87500
5	7,84	8,32	8,36	1,90625	1,84375	1,87500
6	8,36	8,12	8,44	1,93750	1,90625	1,87500
7	9,32	9,40	9,44	1,90625	1,87500	1,90625
8	9,08	9,04	9,04	1,81250	1,78125	1,75000
9	11,20	11,08	10,76	1,90625	1,84375	1,84375
10	11,24	11,16	10,92	1,84375	1,81250	1,78125
11	9,48	8,88	8,76	1,81250	1,78125	1,75000
12	9,24	8,96	9,16	1,87500	1,84375	1,81250
13	9,24	8,88	8,88	1,84375	1,78125	1,68750
14	8,48	8,28	8,72	1,96875	1,87500	1,84375
15	9,32	9,80	9,44	1,84375	1,84375	1,81250
16	9,16	8,72	8,60	1,84375	1,81250	1,78125
17	9,12	8,76	8,76	1,87500	1,84375	1,84375
18	8,44	8,32	7,88	1,84375	1,81250	1,78125
19	9,08	8,32	8,92	1,87500	1,78125	1,84375
20	8,56	8,56	8,28	1,81250	1,75000	1,78125
21	5,64	5,52	5,56	1,90625	1,87500	1,87500
22	11,08	11,04	10,88	1,87500	1,81250	1,81250
23	13,24	13,08	11,56	1,84375	1,78125	1,78125
24	10,84	11,96	10,48	1,81250	1,75000	1,68750
25	24,30	22,50	24,00	1,84375	1,75000	1,81250
26	13,70	17,60	18,00	1,84375	1,84375	1,87500
27	21,60	23,10	24,10	1,78125	1,78125	1,84375
28	25,30	27,90	34,00	1,78125	1,81250	1,84375
29	52,60	56,40	54,40	1,84375	1,87500	1,84375
30	104,00	105,60	108,80	1,75000	1,75000	1,75000
31	114,00	130,00	142,00	1,81250	1,81250	1,84375
32	126,00	139,00	140,00	1,78125	1,81250	1,78125
33	220,00	235,00	235,00	1,78125	1,75000	1,78125
34	210,00	252,00	252,00	1,75000	1,75000	1,71875
35	366,00	390,00	384,00	1,68750	1,65625	1,65625
36	440,00	446,00	468,00	1,65625	1,62500	1,62500
Despressurização						
37	6,04	6,08	6,00	1,90625	1,87500	1,87500
38	5,60	5,88	6,04	1,90625	1,87500	1,87500
39	3,36	3,52	3,48	1,90625	1,90625	1,90625

Tabela 29 – Experimentos a 172,37 bar. Análise estatística dos resultados

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (V)	Desvio Padrão de Δt (ms)	Desvio Padrão de ΔV (V)
1	2,9	1,91667	0,1200	0,0180
2	5,8	1,83333	0,2053	0,0180
3	4,9	1,86458	0,2572	0,0180
4	3,3	1,86458	0,1833	0,0180
5	8,2	1,87500	0,2894	0,0313
6	8,3	1,90625	0,1665	0,0313
7	9,4	1,89583	0,0611	0,0180
8	9,1	1,78125	0,0231	0,0313
9	11,0	1,86458	0,2274	0,0361
10	11,1	1,81250	0,1665	0,0313
11	9,0	1,78125	0,3857	0,0313
12	9,1	1,84375	0,1442	0,0313
13	9,0	1,77083	0,2078	0,0786
14	8,5	1,89583	0,2203	0,0651
15	9,5	1,83333	0,2498	0,0180
16	8,8	1,81250	0,2948	0,0313
17	8,9	1,85417	0,2078	0,0180
18	8,2	1,81250	0,2948	0,0313
19	8,8	1,83333	0,4007	0,0477
20	8,5	1,78125	0,1617	0,0313
21	5,6	1,88542	0,0611	0,0180
22	11,0	1,83333	0,1058	0,0361
23	12,6	1,80208	0,9272	0,0361
24	11,1	1,75000	0,7718	0,0625
25	23,6	1,80208	0,9644	0,0477
26	16,4	1,85417	2,3756	0,0180
27	22,9	1,80208	1,2583	0,0361
28	29,1	1,81250	4,4658	0,0313
29	54,5	1,85417	1,9009	0,0180
30	106,1	1,75000	2,4440	0,0000
31	128,7	1,82292	14,0475	0,0180
32	135,0	1,79167	7,8102	0,0180
33	230,0	1,77083	8,6603	0,0180
34	238,0	1,73958	24,2487	0,0180
35	380,0	1,66667	12,4900	0,0180
36	451,3	1,63542	14,7422	0,0180
37	6,0	1,88542	0,0400	0,0180
38	5,8	1,88542	0,2227	0,0180
39	3,5	1,90625	0,0833	0,0000

Tabela 30 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 172,37 bar

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (V)	Descartar pelo critério de atenuação?	E pelo critério de Chauvenet?
1	2,9	1,91667	Não	Não
4	3,3	1,86458	Não	Não
39	3,5	1,90625	Não	Não
3	4,9	1,86458	Não	Não
21	5,6	1,88542	Não	Não
2	5,8	1,83333	Não	Não
38	5,8	1,88542	Não	Não
37	6,0	1,88542	Não	Não
5	8,2	1,87500	Não	Não
18	8,2	1,81250	Não	Não
6	8,3	1,90625	Não	Não
20	8,5	1,78125	Não	Não
14	8,5	1,89583	Não	Não
19	8,8	1,83333	Não	Não
16	8,8	1,81250	Não	Não
17	8,9	1,85417	Não	Não
13	9,0	1,77083	Não	Não
11	9,0	1,78125	Não	Não
8	9,1	1,78125	Não	Não
12	9,1	1,84375	Não	Não
7	9,4	1,89583	Não	Não
15	9,5	1,83333	Não	Não
22	11,0	1,83333	Não	Não
9	11,0	1,86458	Não	Não
24	11,1	1,75000	Não	Não
10	11,1	1,81250	Não	Não
23	12,6	1,80208	Não	Não
26	16,4	1,85417	Não	Não
27	22,9	1,80208	Não	Não
25	23,6	1,80208	Não	Não
28	29,1	1,81250	Não	Não
29	54,5	1,85417	Não	Não
30	106,1	1,75000	Não	Não
31	128,7	1,82292	Não	Não
32	135,0	1,79167	Não	Não
33	230,0	1,77083	Sim	
34	238,0	1,73958	Sim	
35	380,0	1,66667	Sim	
36	451,3	1,63542	Sim	

Na próxima página, pode-se ver três gráficos elucidativos para compreensão do critério de atenuação óbvia.

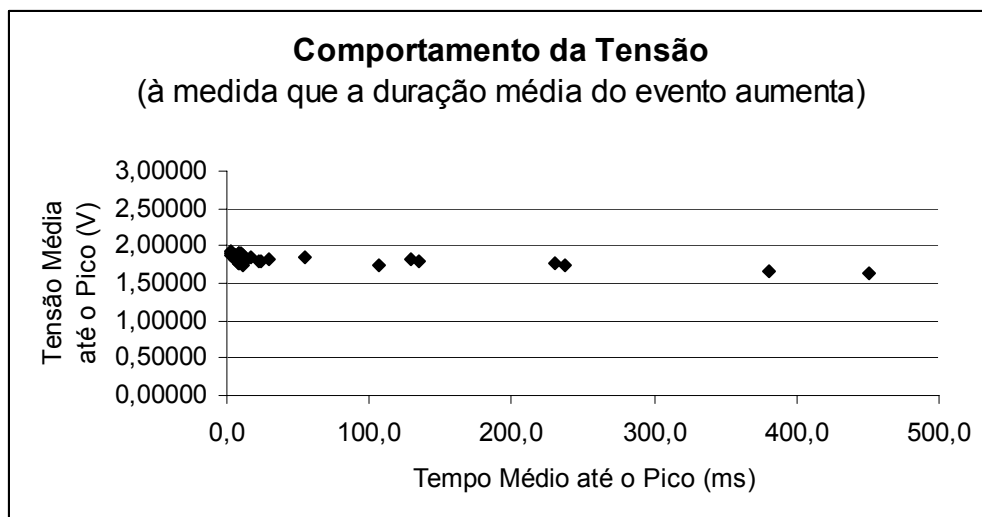


Figura 35 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 2500 psi (172,37 bar)

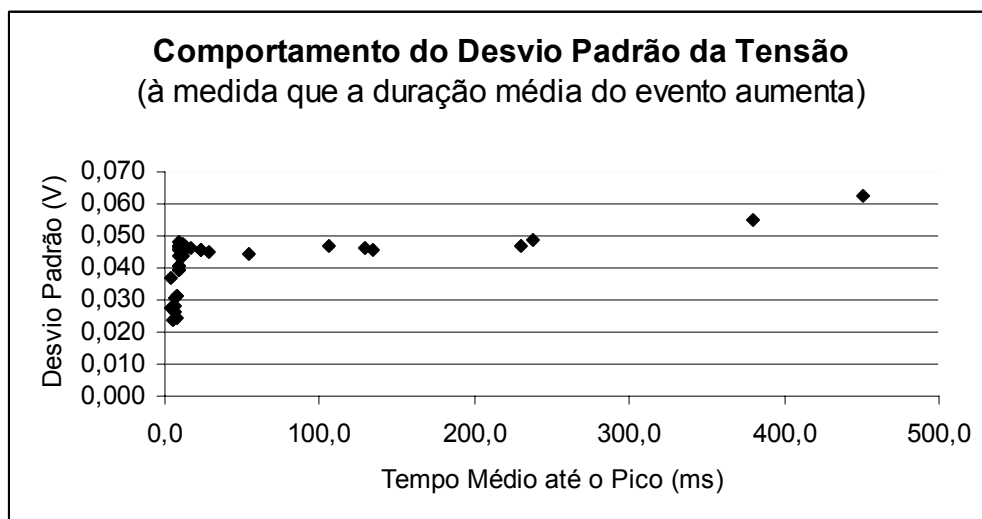


Figura 36 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 172,37 bar

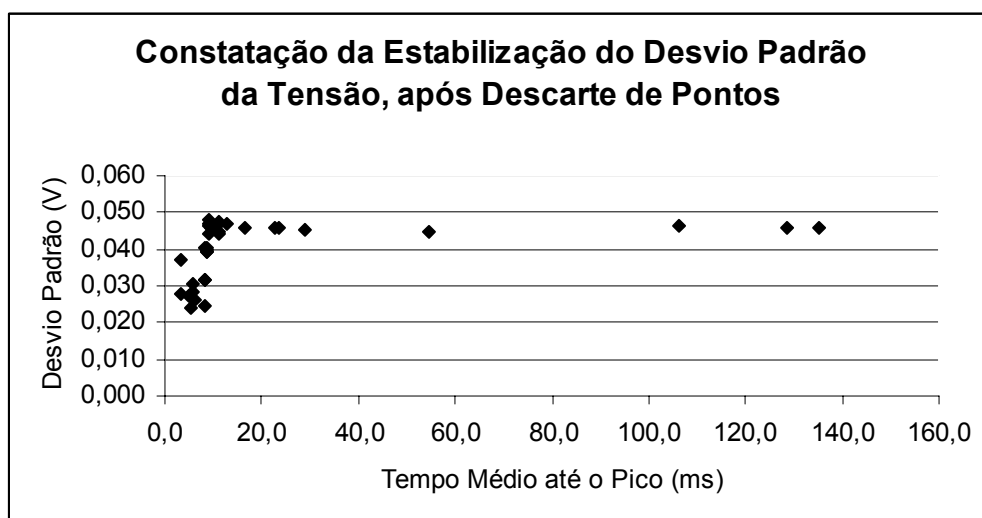


Figura 37 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e de Chauvenet. Pressão de 172,37 bar

Tabela 31 – Resultados dos experimentos a 3000 psi (206,84 bar). Dados experimentais

Pressurização						
Experimento	Δt_1 (ms)	Δt_2 (ms)	Δt_3 (ms)	ΔV_1 (V)	ΔV_2 (V)	ΔV_3 (V)
1	2,48	2,52	2,56	2,15625	2,15625	2,15625
2	5,48	5,56	5,64	2,18750	2,15625	2,18750
3	5,92	5,88	5,92	2,31250	2,28125	2,31250
4	17,76	17,44	17,52	2,09375	2,06250	2,06250
5	7,16	7,24	7,04	2,15625	2,09375	2,09375
6	26,40	26,60	27,20	2,21875	2,12500	2,12500
7	23,10	23,50	23,10	2,25000	2,18750	2,18750
8	10,80	10,80	11,00	2,18750	2,12500	2,12500
9	11,40	12,00	12,70	2,15625	2,09375	2,18750
10	19,90	19,90	21,30	2,12500	2,06250	2,09375
11	12,70	13,10	13,00	2,25000	2,25000	2,25000
12	13,40	14,20	14,10	2,25000	2,25000	2,21875
13	15,20	15,40	15,70	2,25000	2,25000	2,25000
14	12,70	13,40	13,90	2,21875	2,25000	2,25000
15	10,60	10,80	10,70	2,28125	2,28125	2,28125
16	14,50	14,90	15,40	2,25000	2,28125	2,25000
17	39,20	38,40	38,00	2,21875	2,15625	2,15625
18	51,60	51,20	52,00	2,21875	2,18750	2,18750
19	107,20	103,60	102,00	2,18750	2,18750	2,12500
20	112,00	127,00	128,00	2,15625	2,15625	2,15625
21	226,00	220,00	223,00	2,12500	2,09375	2,09375
22	308,00	308,00	306,00	2,06250	2,06250	2,03125

Tabela 32 – Experimentos a 206,84 bar. Análise estatística dos resultados

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (V)	Desvio Padrão de Δt (ms)	Desvio Padrão de ΔV (V)
1	2,5	2,15625	0,0400	0,0000
2	5,6	2,17708	0,0800	0,0180
3	5,9	2,30208	0,0231	0,0180
4	17,6	2,07292	0,1665	0,0180
5	7,1	2,11458	0,1007	0,0361
6	26,7	2,15625	0,4163	0,0541
7	23,2	2,20833	0,2309	0,0361
8	10,9	2,14583	0,1155	0,0361
9	12,0	2,14583	0,6506	0,0477
10	20,4	2,09375	0,8083	0,0313
11	12,9	2,25000	0,2082	0,0000
12	13,9	2,23958	0,4359	0,0180
13	15,4	2,25000	0,2517	0,0000
14	13,3	2,23958	0,6028	0,0180

Tabela 32 (Continuação) – Experimentos a 206,84 bar. Análise estatística dos resultados

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (V)	Desvio Padrão de Δt (ms)	Desvio Padrão de ΔV (V)
15	10,7	2,28125	0,1000	0,0000
16	14,9	2,26042	0,4509	0,0180
17	38,5	2,17708	0,6110	0,0361
18	51,6	2,19792	0,4000	0,0180
19	104,3	2,16667	2,6633	0,0361
20	122,3	2,15625	8,9629	0,0000
21	223,0	2,10417	3,0000	0,0180
22	307,3	2,05208	1,1547	0,0180

Tabela 33 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 206,84 bar

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (V)	Descartar pelo critério de atenuação?	E pelo critério de Chauvenet?
1	2,5	2,15625	Não	Não
2	5,6	2,17708	Não	Não
3	5,9	2,30208	Não	Não
5	7,1	2,11458	Não	Não
15	10,7	2,28125	Não	Não
8	10,9	2,14583	Não	Não
9	12,0	2,14583	Não	Não
11	12,9	2,25000	Não	Não
14	13,3	2,23958	Não	Não
12	13,9	2,23958	Não	Não
16	14,9	2,26042	Não	Não
13	15,4	2,25000	Não	Não
4	17,6	2,07292	Não	Não
10	20,4	2,09375	Não	Não
7	23,2	2,20833	Não	Não
6	26,7	2,15625	Não	Não
17	38,5	2,17708	Não	Não
18	51,6	2,19792	Não	Não
19	104,3	2,16667	Não	Não
20	122,3	2,15625	Não	Não
21	223,0	2,10417	Sim	
22	307,3	2,05208	Sim	

Nota: Aqui os experimentos foram colocados em ordem crescente de tempo para facilitar o descarte através do critério de atenuação óbvia, que pode ser melhor entendido com a ajuda dos gráficos a seguir:

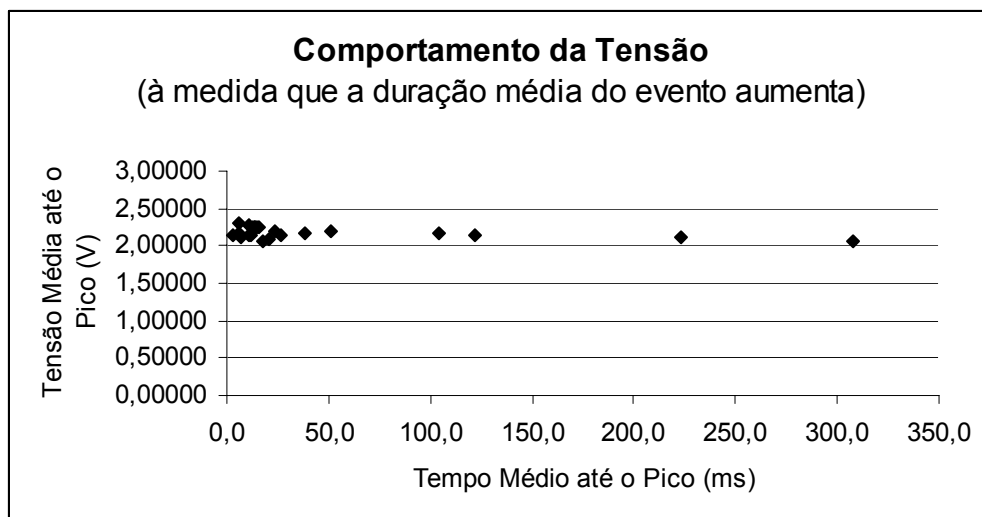


Figura 38 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 3000 psi (206,84 bar)

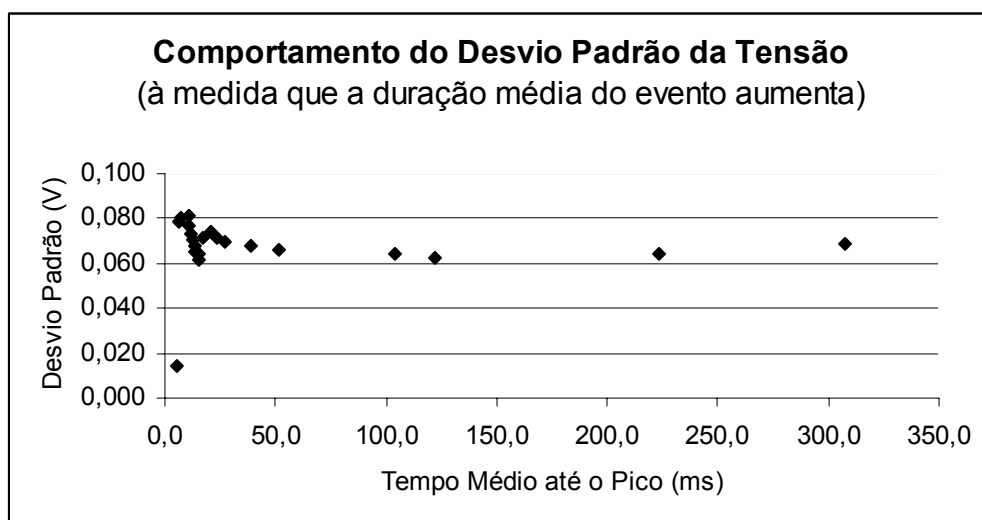


Figura 39 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 206,84 bar

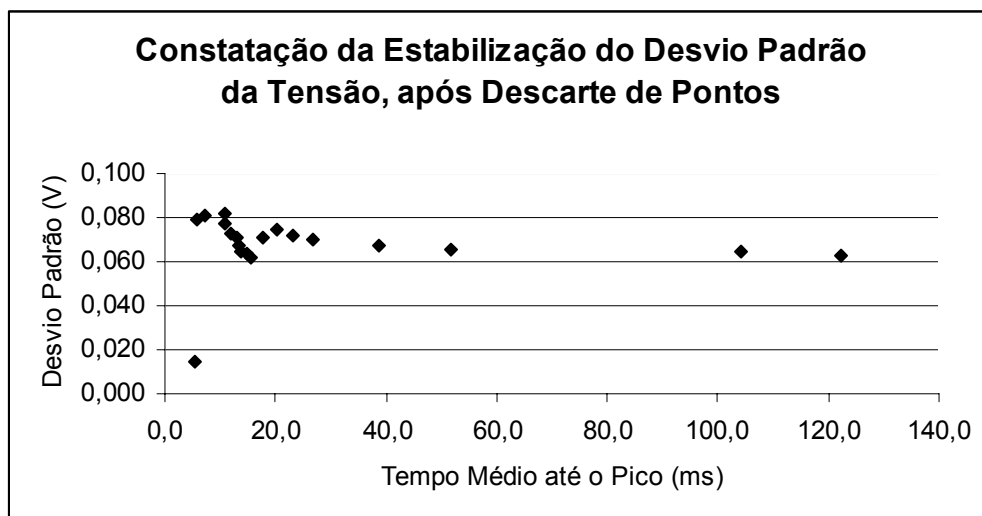


Figura 40 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e de Chauvenet. Pressão de 206,84 bar

Tabela 34 – Resultados dos experimentos a 3500 psi (241,32 bar). Dados experimentais

Pressurização						
Experimento	Δt_1 (ms)	Δt_2 (ms)	Δt_3 (ms)	ΔV_1 (V)	ΔV_2 (V)	ΔV_3 (V)
1	2,72	3,08	3,00	2,50000	2,46875	2,46875
2	3,08	3,16	3,12	2,50000	2,50000	2,43750
3	9,16	9,28	9,36	2,46875	2,43750	2,43750
4	3,68	3,88	4,00	2,40625	2,31250	2,34375
5	6,28	6,36	6,28	2,56250	2,56250	2,56250
6	4,52	4,44	4,60	2,56250	2,53125	2,53125
7	5,16	5,08	5,16	2,56250	2,53125	2,59375
8	4,92	4,96	4,96	2,53125	2,53125	2,53125
9	7,12	7,00	7,12	2,53125	2,46875	2,46875
10	10,36	10,44	9,68	2,40625	2,40625	2,34375
11	6,88	6,68	6,72	2,53125	2,50000	2,50000
12	7,80	8,00	7,92	2,53125	2,53125	2,53125
13	22,50	22,00	21,70	2,50000	2,46875	2,50000
14	38,70	38,50	38,90	2,43750	2,40625	2,43750
15	32,70	32,40	31,90	2,40625	2,37500	2,37500
16	41,60	41,00	40,80	2,40625	2,40625	2,37500
17	53,20	52,40	52,40	2,50000	2,46875	2,43750
18	50,80	50,60	52,20	2,46875	2,46875	2,43750
19	48,60	48,60	47,00	2,50000	2,46875	2,46875
20	51,20	52,00	54,40	2,46875	2,46875	2,50000
21	102,80	95,20	96,40	2,40625	2,40625	2,37500
22	40,00	40,40	42,00	2,50000	2,50000	2,46875
23	98,00	97,60	96,80	2,40625	2,40625	2,37500
24	89,60	88,80	86,80	2,46875	2,46875	2,40625
25	63,60	62,80	62,00	2,53125	2,50000	2,50000
26	117,00	115,00	122,00	2,46875	2,43750	2,50000
27	146,00	146,00	144,00	2,40625	2,40625	2,40625
28	139,00	140,00	142,00	2,40625	2,40625	2,40625
29	225,00	225,00	223,00	2,34375	2,31250	2,34375
30	238,00	237,00	234,00	2,31250	2,31250	2,31250
31	238,00	240,00	240,00	2,37500	2,34375	2,28125
32	376,00	372,00	368,00	2,25000	2,21875	2,25000
33	358,00	344,00	346,00	2,28125	2,28125	2,28125
34	420,00	398,00	396,00	2,21875	2,18750	2,18750
35	440,00	436,00	440,00	2,18750	2,15625	2,18750
Despressurização						
36	8,92	9,08	9,20	2,56250	2,50000	2,53125
37	5,84	5,84	6,60	2,59375	2,59375	2,59375
38	6,40	6,76	6,76	2,50000	2,53125	2,50000

Tabela 35 – Experimentos a 241,32 bar. Análise estatística dos resultados

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (V)	Desvio padrão de Δt (ms)	Desvio padrão de ΔV (V)
1	2,9	2,47917	0,1890	0,0180
2	3,1	2,47917	0,0400	0,0361
3	9,3	2,44792	0,1007	0,0180
4	3,9	2,35417	0,1617	0,0477
5	6,3	2,56250	0,0462	0,0000
6	4,5	2,54167	0,0800	0,0180
7	5,1	2,56250	0,0462	0,0313
8	4,9	2,53125	0,0231	0,0000
9	7,1	2,48958	0,0693	0,0361
10	10,2	2,38542	0,4176	0,0361
11	6,8	2,51042	0,1058	0,0180
12	7,9	2,53125	0,1007	0,0000
13	22,1	2,48958	0,4041	0,0180
14	38,7	2,42708	0,2000	0,0180
15	32,3	2,38542	0,4041	0,0180
16	41,1	2,39583	0,4163	0,0180
17	52,7	2,46875	0,4619	0,0313
18	51,2	2,45833	0,8718	0,0180
19	48,1	2,47917	0,9238	0,0180
20	52,5	2,47917	1,6653	0,0180
21	98,1	2,39583	4,0857	0,0180
22	40,8	2,48958	1,0583	0,0180
23	97,5	2,39583	0,6110	0,0180
24	88,4	2,44792	1,4422	0,0361
25	62,8	2,51042	0,8000	0,0180
26	118,0	2,46875	3,6056	0,0313
27	145,3	2,40625	1,1547	0,0000
28	140,3	2,40625	1,5275	0,0000
29	224,3	2,33333	1,1547	0,0180
30	236,3	2,31250	2,0817	0,0000
31	239,3	2,33333	1,1547	0,0477
32	372,0	2,23958	4,0000	0,0180
33	349,3	2,28125	7,5719	0,0000
34	404,7	2,19792	13,3167	0,0180
35	438,7	2,17708	2,3094	0,0180
36	9,1	2,53125	0,1405	0,0313
37	6,1	2,59375	0,4388	0,0000
38	6,6	2,51042	0,2078	0,0180

Tabela 36 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 241,32 bar

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (V)	Descartar pelo critério de atenuação?	E pelo critério de Chauvenet?
1	2,9	2,47917	Não	Não
2	3,1	2,47917	Não	Não
4	3,9	2,35417	Não	Não
6	4,5	2,54167	Não	Não
8	4,9	2,53125	Não	Não
7	5,1	2,56250	Não	Não
37	6,1	2,59375	Não	Não
5	6,3	2,56250	Não	Não
38	6,6	2,51042	Não	Não
11	6,8	2,51042	Não	Não
9	7,1	2,48958	Não	Não
12	7,9	2,53125	Não	Não
36	9,1	2,53125	Não	Não
3	9,3	2,44792	Não	Não
10	10,2	2,38542	Não	Não
13	22,1	2,48958	Não	Não
15	32,3	2,38542	Não	Não
14	38,7	2,42708	Não	Não
22	40,8	2,48958	Não	Não
16	41,1	2,39583	Não	Não
19	48,1	2,47917	Não	Não
18	51,2	2,45833	Não	Não
20	52,5	2,47917	Não	Não
17	52,7	2,46875	Não	Não
25	62,8	2,51042	Não	Não
24	88,4	2,44792	Não	Não
23	97,5	2,39583	Não	Não
21	98,1	2,39583	Não	Não
26	118,0	2,46875	Não	Não
28	140,3	2,40625	Sim	
27	145,3	2,40625	Sim	
29	224,3	2,33333	Sim	
30	236,3	2,31250	Sim	
31	239,3	2,33333	Sim	
33	349,3	2,28125	Sim	
32	372,0	2,23958	Sim	
34	404,7	2,19792	Sim	
35	438,7	2,17708	Sim	

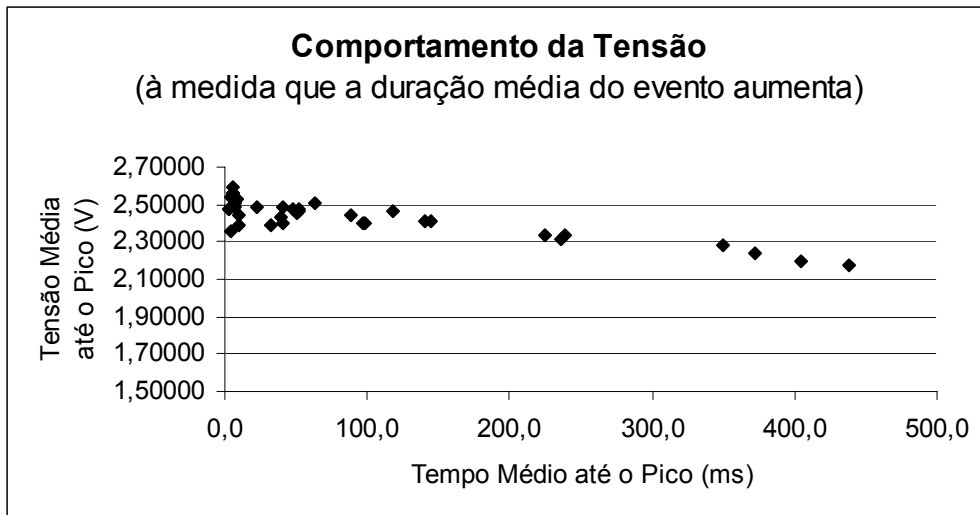


Figura 41 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 3500 psi (241,32 bar)

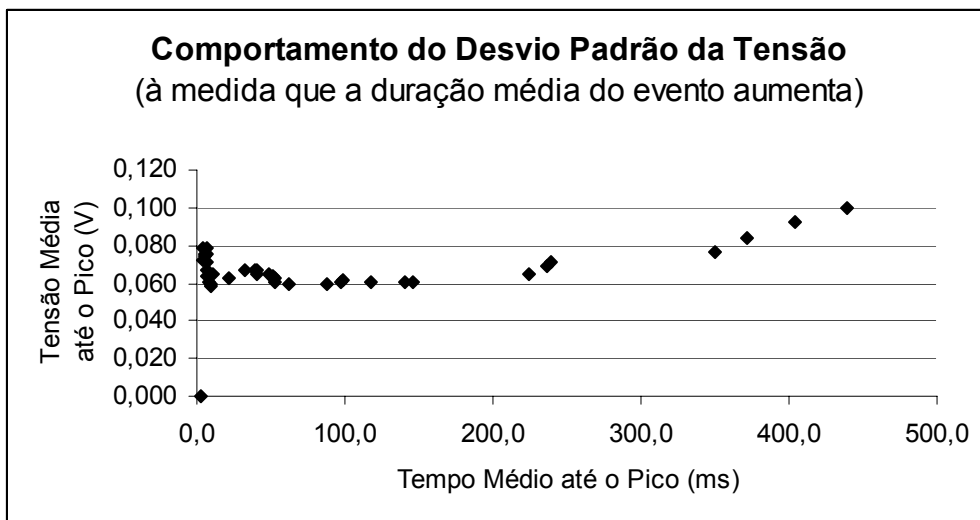


Figura 42 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 241,32 bar

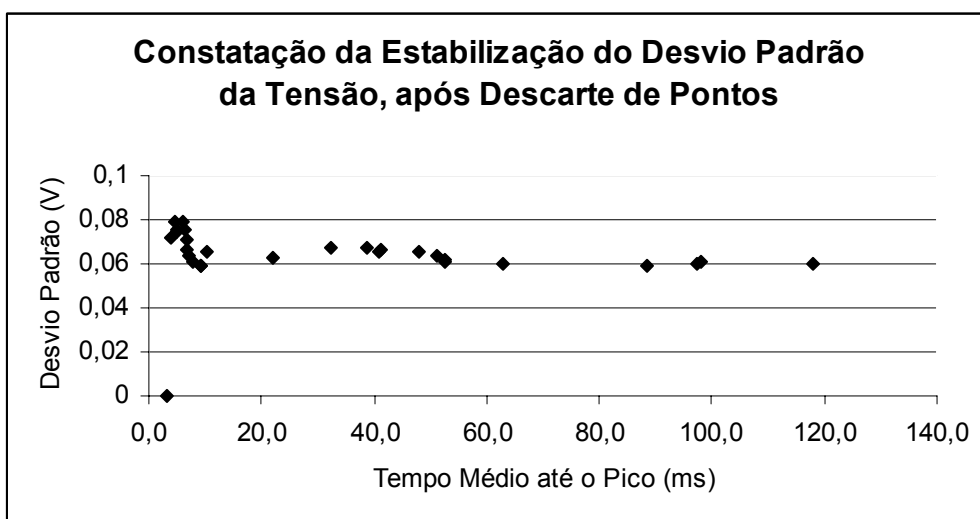


Figura 43 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e de Chauvenet. Pressão de 241,32 bar

Tabela 37 – Resultados dos experimentos a 4000 psi (275,79 bar). Dados experimentais

Pressurização						
Experimento	Δt_1 (ms)	Δt_2 (ms)	Δt_3 (ms)	ΔV_1 (V)	ΔV_2 (V)	ΔV_3 (V)
1	1,80	1,96	1,84	2,84375	2,90625	2,87500
2	1,92	1,84	1,80	2,96875	2,90625	2,87500
3	7,16	7,16	7,16	2,90625	2,90625	2,90625
4	3,88	4,08	3,64	2,90625	2,90625	2,84375
5	4,32	4,44	4,52	2,93750	3,03125	3,03125
6	14,88	15,00	14,80	2,59375	2,59375	2,59375
7	4,60	4,64	4,44	2,96875	2,96875	3,00000
8	4,68	4,80	4,80	2,93750	2,96875	2,93750
9	4,84	4,68	4,76	2,96875	2,96875	2,96875
10	5,08	5,04	5,00	2,96875	2,90625	2,93750
11	5,72	5,60	5,76	2,93750	2,96875	2,96875
12	6,52	6,48	6,68	2,96875	2,93750	2,96875
13	3,92	3,72	3,68	2,93750	2,90625	2,90625
14	5,40	5,36	5,36	2,93750	2,90625	2,93750
15	5,80	5,72	5,72	2,96875	2,90625	2,90625
16	6,72	6,88	6,76	2,93750	2,93750	2,96875
17	6,40	6,44	6,40	2,93750	2,90625	2,90625
18	7,04	6,84	7,04	2,96875	2,90625	2,93750
19	6,00	5,80	5,80	2,93750	2,87500	2,90625
20	6,44	6,52	6,52	2,93750	2,90625	2,90625
21	12,52	12,36	12,44	2,62500	2,59375	2,59375
22	12,04	12,04	12,08	2,71875	2,68750	2,68750
23	13,52	13,28	13,44	2,65625	2,62500	2,65625
24	16,16	16,24	16,56	2,68750	2,62500	2,65625
25	30,50	30,60	29,90	2,81250	2,81250	2,84375
26	57,00	56,00	54,40	2,62500	2,56250	2,53125
27	47,60	47,60	48,40	2,81250	2,81250	2,81250
Despressurização						
28	10,16	8,88	9,52	2,96875	2,96875	2,96875
29	9,16	8,80	8,92	3,00000	2,96875	3,00000
30	5,96	5,88	5,92	3,03125	3,03125	3,03125

A seguir, há uma análise estatística dos resultados:

Tabela 38 – Experimentos a 275,79 bar. Análise estatística dos resultados

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (V)	Desvio Padrão de Δt (ms)	Desvio Padrão de ΔV (V)
1	1,9	2,87500	0,0833	0,0313
2	1,9	2,91667	0,0611	0,0477
3	7,2	2,90625	0,0000	0,0000
4	3,9	2,88542	0,2203	0,0361
5	4,4	3,00000	0,1007	0,0541
6	14,9	2,59375	0,1007	0,0000
7	4,6	2,97917	0,1058	0,0180
8	4,8	2,94792	0,0693	0,0180
9	4,8	2,96875	0,0800	0,0000
10	5,0	2,93750	0,0400	0,0313
11	5,7	2,95833	0,0833	0,0180
12	6,6	2,95833	0,1058	0,0180
13	3,8	2,91667	0,1286	0,0180
14	5,4	2,92708	0,0231	0,0180
15	5,7	2,92708	0,0462	0,0361
16	6,8	2,94792	0,0833	0,0180
17	6,4	2,91667	0,0231	0,0180
18	7,0	2,93750	0,1155	0,0313
19	9,5	2,96875	0,6400	0,0000
20	9,0	2,98958	0,1833	0,0180
21	5,9	3,03125	0,0400	0,0000
22	12,1	2,69792	0,0231	0,0180
23	13,4	2,64583	0,1222	0,0180
24	16,3	2,65625	0,2117	0,0313
25	30,3	2,82292	0,3786	0,0180
26	55,8	2,57292	1,3115	0,0477
27	47,9	2,81250	0,4619	0,0000
28	9,5	2,96875	0,6400	0,0000
29	9,0	2,98958	0,1833	0,0180
30	5,9	3,03125	0,0400	0,0000

Na próxima página, são aplicados os critérios para rejeição de dados, tanto o de atenuação óbvia, quanto o de Chauvenet:

Tabela 39 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 275,79 bar

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (V)	Descartar pelo critério de atenuação?	E pelo critério de Chauvenet?
2	1,9	2,91667	Não	Não
1	1,9	2,87500	Não	Não
13	3,8	2,91667	Não	Não
4	3,9	2,88542	Não	Não
5	4,4	3,00000	Não	Não
7	4,6	2,97917	Não	Não
8	4,8	2,94792	Não	Não
9	4,8	2,96875	Não	Não
10	5,0	2,93750	Não	Não
14	5,4	2,92708	Não	Não
11	5,7	2,95833	Não	Não
15	5,7	2,92708	Não	Não
21	5,9	3,03125	Não	Não
30	5,9	3,03125	Não	Não
17	6,4	2,91667	Não	Não
12	6,6	2,95833	Não	Não
16	6,8	2,94792	Não	Não
18	7,0	2,93750	Não	Não
3	7,2	2,90625	Não	Não
20	9,0	2,98958	Não	Não
29	9,0	2,98958	Não	Não
19	9,5	2,96875	Não	Não
28	9,5	2,96875	Não	Não
22	12,1	2,69792	Sim	
23	13,4	2,64583	Sim	
6	14,9	2,59375	Sim	
24	16,3	2,65625	Sim	
25	30,3	2,82292	Sim	
27	47,9	2,81250	Sim	
26	55,8	2,57292	Sim	

Na página seguinte, pode-se compreender melhor o critério de atenuação óbvia, com a ajuda dos gráficos:

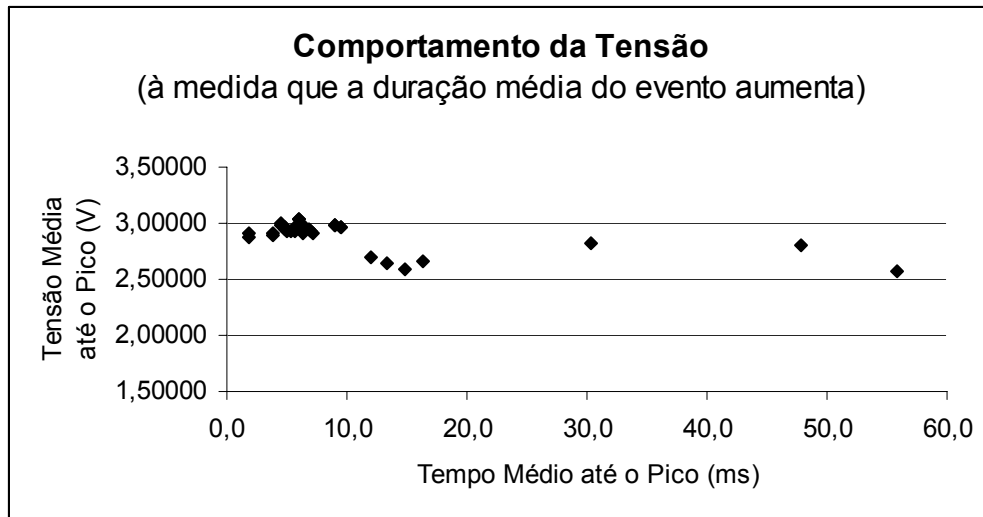


Figura 44 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 4000 psi (275,79 bar)

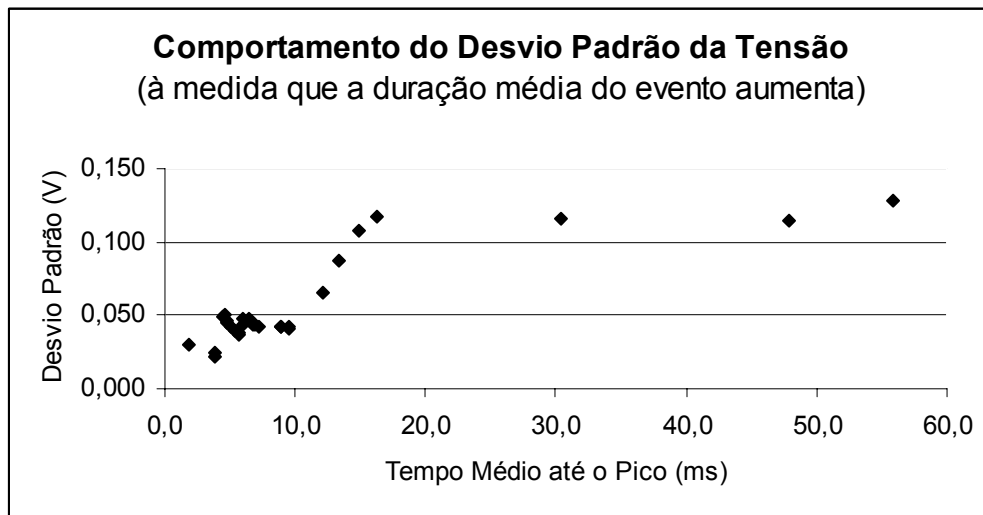


Figura 45 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 275,79 bar

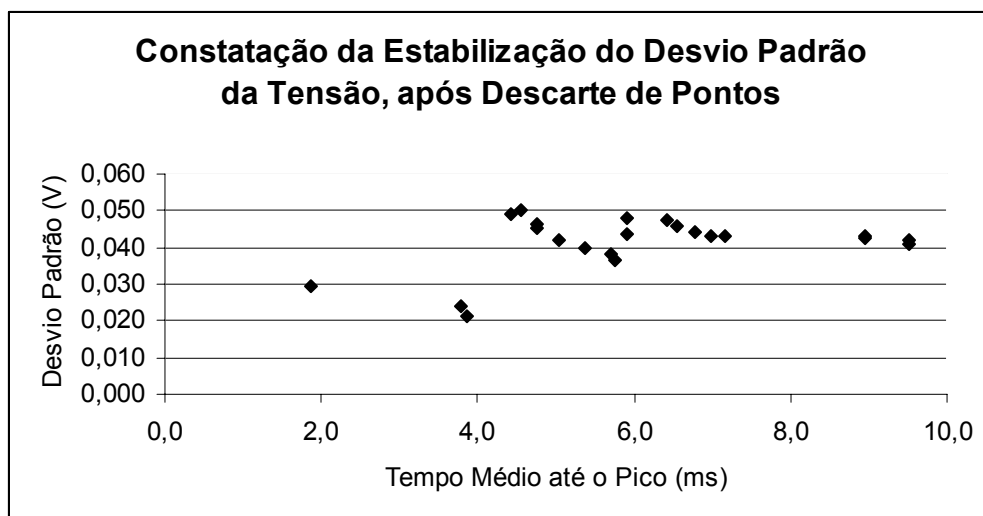


Figura 46 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e de Chauvenet. Pressão de 275,79 bar

Tabela 40 – Resultados dos experimentos a 4500 psi (310,26 bar). Dados experimentais

Pressurização						
Experimento	Δt_1 (ms)	Δt_2 (ms)	Δt_3 (ms)	ΔV_1 (V)	ΔV_2 (V)	ΔV_3 (V)
1	1,92	1,88	1,84	3,28125	3,28125	3,28125
2	2,44	2,36	2,40	3,28125	3,25000	3,28125
3	2,28	2,28	2,40	3,28125	3,28125	3,28125
4	2,64	2,56	2,60	3,28125	3,28125	3,31250
5	12,08	11,28	11,16	3,21875	3,18750	3,18750
6	11,76	11,80	11,80	3,28125	3,25000	3,28125
7	8,84	8,84	8,96	3,28125	3,28125	3,34375
8	7,08	7,08	7,00	3,28125	3,31250	3,28125
9	12,08	11,80	11,88	3,21875	3,15625	3,15625
10	6,48	6,48	6,48	3,37500	3,31250	3,34375
11	6,36	6,20	6,24	3,25000	3,25000	3,25000
12	13,92	12,24	12,88	3,15625	3,06250	3,09375
13	14,72	14,56	14,52	3,09375	3,06250	3,09375
14	12,28	11,96	12,00	3,06250	3,06250	3,06250
15	20,50	19,40	19,50	3,18750	3,12500	3,12500
16	14,80	14,80	14,70	3,12500	3,09375	3,09375
17	16,00	16,30	16,20	3,09375	3,06250	3,06250
18	16,60	17,30	17,30	3,06250	3,03125	3,03125
Despressurização						
19	5,56	5,60	5,56	3,34375	3,34375	3,34375
20	5,48	5,36	5,48	3,37500	3,34375	3,34375
21	6,12	6,00	5,96	3,37500	3,34375	3,34375

Tabela 41– Experimentos a 310,26 bar. Análise estatística dos resultados

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (V)	Desvio Padrão de Δt (ms)	Desvio Padrão de ΔV (V)
1	1,9	3,28125	0,0400	0,0000
2	2,4	3,27083	0,0400	0,0180
3	2,3	3,28125	0,0693	0,0000
4	2,6	3,29167	0,0400	0,0180
5	11,5	3,19792	0,5001	0,0180
6	11,8	3,27083	0,0231	0,0180
7	8,9	3,30208	0,0693	0,0361
8	7,1	3,29167	0,0462	0,0180
9	11,9	3,17708	0,1442	0,0361
10	6,5	3,34375	0,0000	0,0313
11	6,3	3,25000	0,0833	0,0000
12	13,0	3,10417	0,8479	0,0477
13	14,6	3,08333	0,1058	0,0180
14	12,1	3,06250	0,1744	0,0000
15	19,8	3,14583	0,6083	0,0361

Tabela 41 (Continuação) – Experimentos a 310,26 bar. Análise estatística dos resultados

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (V)	Desvio Padrão de Δt (ms)	Desvio Padrão de ΔV (V)
16	14,8	3,10417	0,0577	0,0180
17	16,2	3,07292	0,1528	0,0180
18	17,1	3,04167	0,4041	0,0180
19	5,6	3,34375	0,0231	0,0000
20	5,4	3,35417	0,0693	0,0180
21	6,0	3,35417	0,0833	0,0180

Tabela 42 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 310,26 bar

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (V)	Descartar pelo critério de atenuação?	E pelo critério de Chauvenet?
1	1,9	3,28125	Não	Não
3	2,3	3,28125	Não	Não
2	2,4	3,27083	Não	Não
4	2,6	3,29167	Não	Não
20	5,4	3,35417	Não	Não
19	5,6	3,34375	Não	Não
21	6,0	3,35417	Não	Não
11	6,3	3,25000	Não	Não
10	6,5	3,34375	Não	Não
8	7,1	3,29167	Não	Não
7	8,9	3,30208	Não	Não
5	11,5	3,19792	Não	Sim
6	11,8	3,27083	Não	Não
9	11,9	3,17708	Sim	
14	12,1	3,06250	Sim	
12	13,0	3,10417	Sim	
13	14,6	3,08333	Sim	
16	14,8	3,10417	Sim	
17	16,2	3,07292	Sim	
18	17,1	3,04167	Sim	
15	19,8	3,14583	Sim	

Com a ajuda dos gráficos, na página seguinte, fica mais fácil compreender o critério de atenuação óbvia:

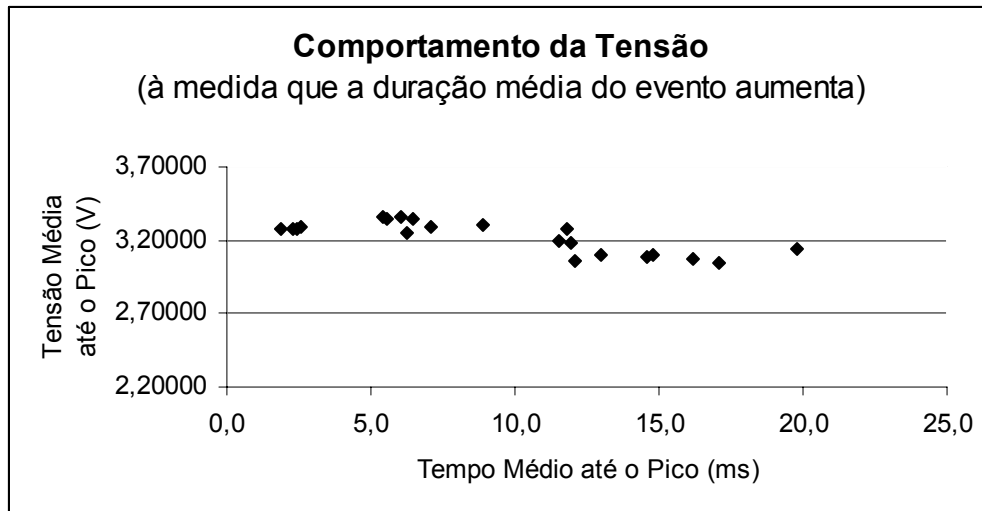


Figura 47 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 4500 psi (310,26 bar)

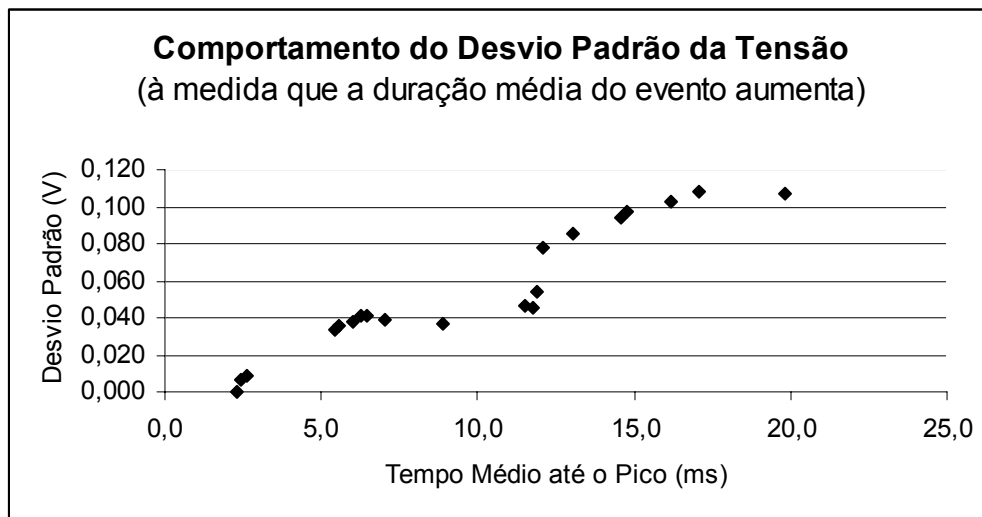


Figura 48 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 310,26 bar

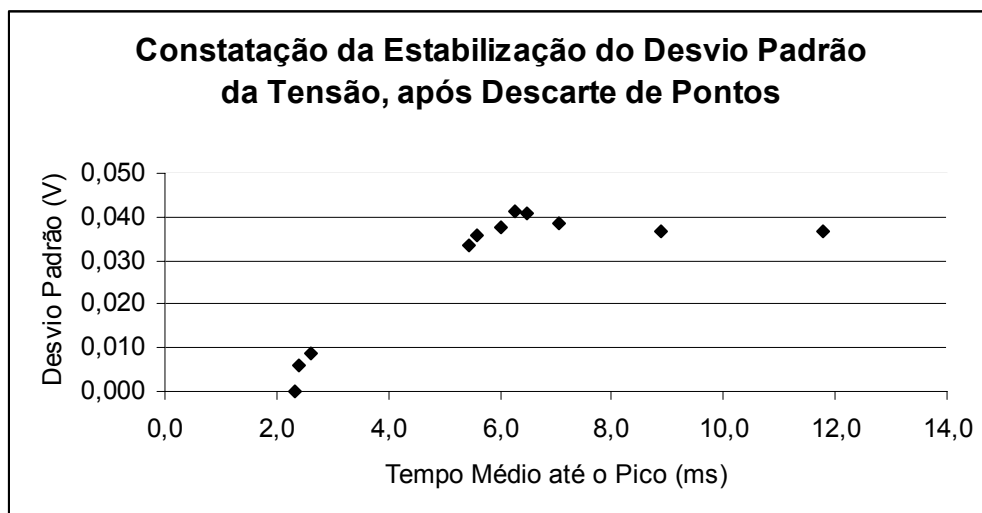


Figura 49 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e de Chauvenet. Pressão de 310,26 bar

Tabela 43 – Resultados dos experimentos a 5000 psi (344,74 bar). Dados experimentais

Pressurização						
Experimento	Δt_1 (ms)	Δt_2 (ms)	Δt_3 (ms)	ΔV_1 (V)	ΔV_2 (V)	ΔV_3 (V)
1	6,32	6,40	6,44	3,68750	3,68750	3,68750
2	4,96	5,08	5,16	3,68750	3,71875	3,71875
3	16,60	15,72	15,68	3,65625	3,65625	3,62500
4	7,20	7,52	7,60	3,53125	3,50000	3,50000
5	6,68	6,80	6,76	3,62500	3,65625	3,62500
6	6,56	6,68	6,68	3,68750	3,65625	3,68750
7	8,00	8,44	8,52	3,65625	3,65625	3,65625
8	6,72	6,44	6,44	3,65625	3,65625	3,65625
9	8,56	8,36	8,32	3,68750	3,65625	3,68750
10	7,20	6,80	6,88	3,62500	3,59375	3,62500
11	11,56	11,68	12,20	3,65625	3,62500	3,65625
12	7,50	7,60	7,20	3,65625	3,65625	3,68750
13	6,90	7,60	7,80	3,62500	3,62500	3,65625
14	27,00	28,80	26,40	3,62500	3,62500	3,59375
15	11,80	13,60	13,60	3,59375	3,62500	3,59375
16	15,00	15,00	14,40	3,65625	3,65625	3,68750
17	26,20	28,80	28,80	3,62500	3,62500	3,62500
18	30,40	30,80	30,80	3,68750	3,71875	3,71875
19	38,00	40,00	38,80	3,68750	3,68750	3,68750
20	45,20	46,00	48,00	3,68750	3,68750	3,68750
21	71,00	81,00	80,00	3,68750	3,68750	3,68750
22	62,00	66,00	69,00	3,71875	3,68750	3,71875
23	16,00	14,00	16,00	3,71875	3,71875	3,75000
24	88,00	98,00	98,00	3,65625	3,65625	3,68750
25	51,00	56,00	57,00	3,68750	3,65625	3,65625
26	53,00	54,00	54,00	3,65625	3,68750	3,65625
27	57,00	59,00	59,00	3,65625	3,65625	3,65625
28	50,00	51,00	51,00	3,68750	3,68750	3,68750
29	203,00	198,00	196,00	3,56250	3,56250	3,53125
30	304,00	296,00	286,00	3,53125	3,53125	3,53125
31	584,00	572,00	572,00	3,37500	3,37500	3,37500
Despressurização						
32	9,10	9,30	9,20	3,68750	3,65625	3,65625
33	9,10	9,20	9,60	3,65625	3,68750	3,65625
34	8,20	8,40	8,60	3,65625	3,68750	3,65625

Tabela 44 – Experimentos a 344,74 bar. Análise estatística dos resultados

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (V)	Desvio Padrão de Δt (ms)	Desvio Padrão de ΔV (V)
1	6,4	3,68750	0,0611	0,0000
2	5,1	3,70833	0,1007	0,0180
3	16,0	3,64583	0,5200	0,0180
4	7,4	3,51042	0,2117	0,0180
5	6,7	3,63542	0,0611	0,0180
6	6,6	3,67708	0,0693	0,0180
7	8,3	3,65625	0,2800	0,0000
8	6,5	3,65625	0,1617	0,0000
9	8,4	3,67708	0,1286	0,0180
10	7,0	3,61458	0,2117	0,0180
11	11,8	3,64583	0,3402	0,0180
12	7,4	3,66667	0,2082	0,0180
13	7,4	3,63542	0,4726	0,0180
14	27,4	3,61458	1,2490	0,0180
15	13,0	3,60417	1,0392	0,0180
16	14,8	3,66667	0,3464	0,0180
17	27,9	3,62500	1,5011	0,0000
18	30,7	3,70833	0,2309	0,0180
19	38,9	3,68750	1,0066	0,0000
20	46,4	3,68750	1,4422	0,0000
21	77,3	3,68750	5,5076	0,0000
22	65,7	3,70833	3,5119	0,0180
23	15,3	3,72917	1,1547	0,0180
24	94,7	3,66667	5,7735	0,0180
25	54,7	3,66667	3,2146	0,0180
26	53,7	3,66667	0,5774	0,0180
27	58,3	3,65625	1,1547	0,0000
28	50,7	3,68750	0,5774	0,0000
29	199,0	3,55208	3,6056	0,0180
30	295,3	3,53125	9,0185	0,0000
31	576,0	3,37500	6,9282	0,0000
32	9,2	3,66667	0,1000	0,0180
33	9,3	3,66667	0,2646	0,0180
34	8,4	3,66667	0,2000	0,0180

Tabela 45 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 344,74 bar

Experimento	Δt médio até o pico (ms)	ΔV médio até o pico (V)	Descartar pelo critério de atenuação?	E pelo critério de Chauvenet?
2	5,1	3,70833	Não	Não
1	6,4	3,68750	Não	Não
8	6,5	3,65625	Não	Não
6	6,6	3,67708	Não	Não
5	6,7	3,63542	Não	Não
10	7,0	3,61458	Não	Não
12	7,4	3,66667	Não	Não
13	7,4	3,63542	Não	Não
4	7,4	3,51042	Não	Sim
7	8,3	3,65625	Não	Não
34	8,4	3,66667	Não	Não
9	8,4	3,67708	Não	Não
32	9,2	3,66667	Não	Não
33	9,3	3,66667	Não	Não
11	11,8	3,64583	Não	Não
15	13,0	3,60417	Não	Não
16	14,8	3,66667	Não	Não
23	15,3	3,72917	Não	Não
3	16,0	3,64583	Não	Não
14	27,4	3,61458	Não	Não
17	27,9	3,62500	Não	Não
18	30,7	3,70833	Não	Não
19	38,9	3,68750	Não	Não
20	46,4	3,68750	Não	Não
28	50,7	3,68750	Não	Não
26	53,7	3,66667	Não	Não
25	54,7	3,66667	Não	Não
27	58,3	3,65625	Não	Não
22	65,7	3,70833	Não	Não
21	77,3	3,68750	Não	Não
24	94,7	3,66667	Não	Não
29	199,0	3,55208	Sim	
30	295,3	3,53125	Sim	
31	576,0	3,37500	Sim	

Na próxima página, há três gráficos bem elucidativos para a compreensão do critério de atenuação óbvia.

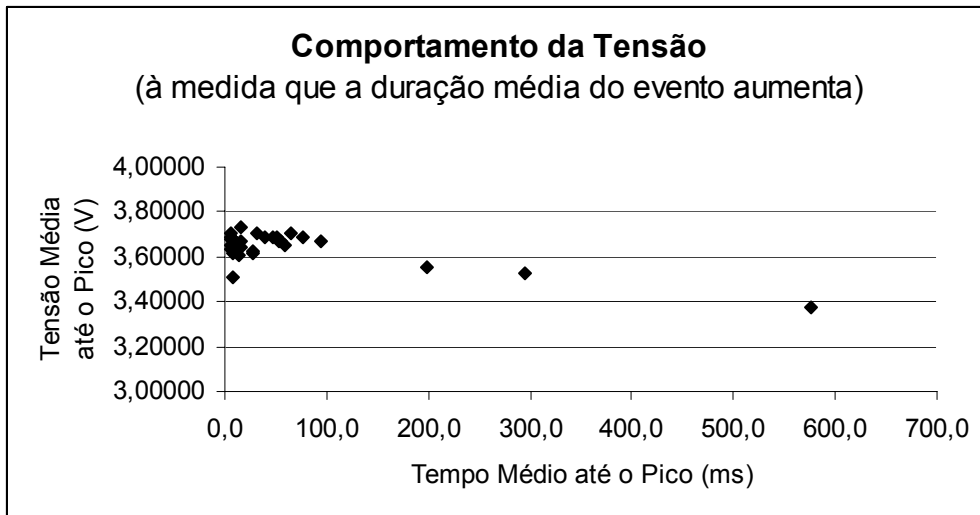


Figura 50 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 5000 psi (344,74 bar)

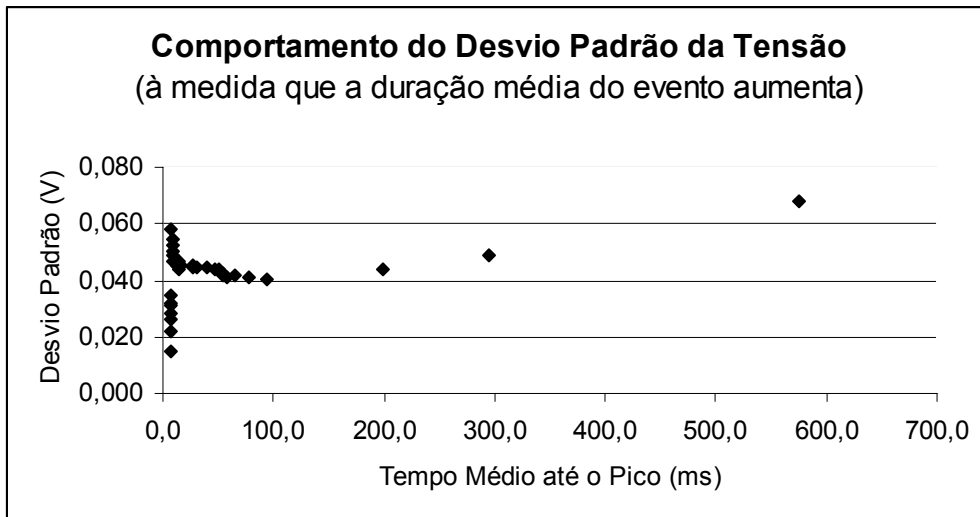


Figura 51 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 344,74 bar

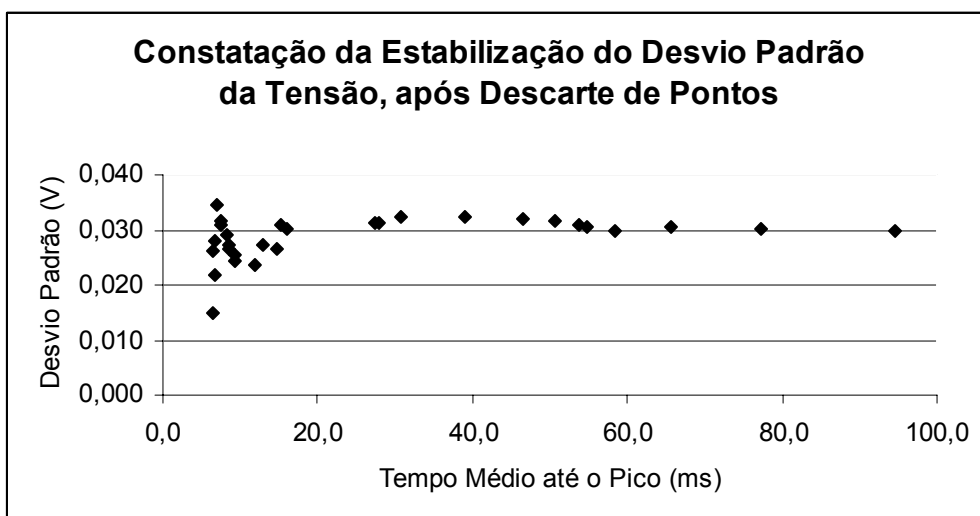


Figura 52 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e de Chauvenet. Pressão de 344,74 bar

APÊNDICE G – Registro dos experimentos realizados utilizando-se o dispositivo mostrado esquematicamente na Figura 53

No presente Apêndice, documenta-se os resultados de dois experimentos de cada pressão de referência, quais sejam: o caracterizado por menor tempo de duração e aquele caracterizado por maior tempo de duração, dentre todos os experimentos realizados a uma dada pressão. Cada página corresponde a um mesmo experimento, o qual foi avaliado três vezes quanto ao posicionamento dos marcadores de tempo e do marcador de pico de voltagem. Isso foi feito para que se pudesse estimar a incerteza do marcador.

Os experimentos foram realizados utilizando-se o dispositivo mostrado esquematicamente na Figura 53.

Para realizar experimentos de pressurização, fecha-se a válvula de despressurização VD e, com a válvula de restrição VR aberta (total ou parcialmente), abre-se a válvula de pressurização VP o mais rapidamente possível. Isso é feito para uma dada pressão de referência, ajustada com a ajuda de um manômetro calibrado (Apêndice C). Como o volume total de fluido hidráulico desde a saída da bomba até a VP é muito maior (cerca de 10 vezes) que o volume do interior da derivação múltipla (“manifold”), e lembrando-se que o interior dessa derivação já é mantido cheio de fluido (à pressão atmosférica), pode-se considerar que a pressão da linha é praticamente inalterada quando da abertura da VP.

Para realizar experimentos de despressurização, primeiro pressuriza-se toda a linha até a VD com uma dada pressão de referência, em seguida fecha-se a VP, então abre-se a VD bruscamente. Com isso, a pressão que atua no transdutor em estudo cai, desde a pressão de referência até a pressão atmosférica. Observe que, nos experimentos de despressurização, não se pode utilizar a VR para influenciar o tempo de duração do evento despressurização.

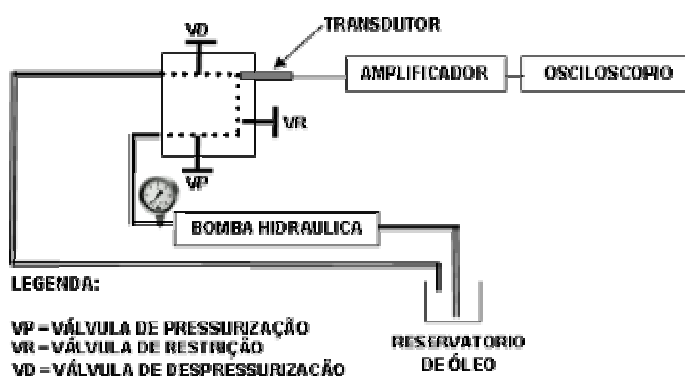


Figura 53- Desenho esquemático do dispositivo experimental utilizado

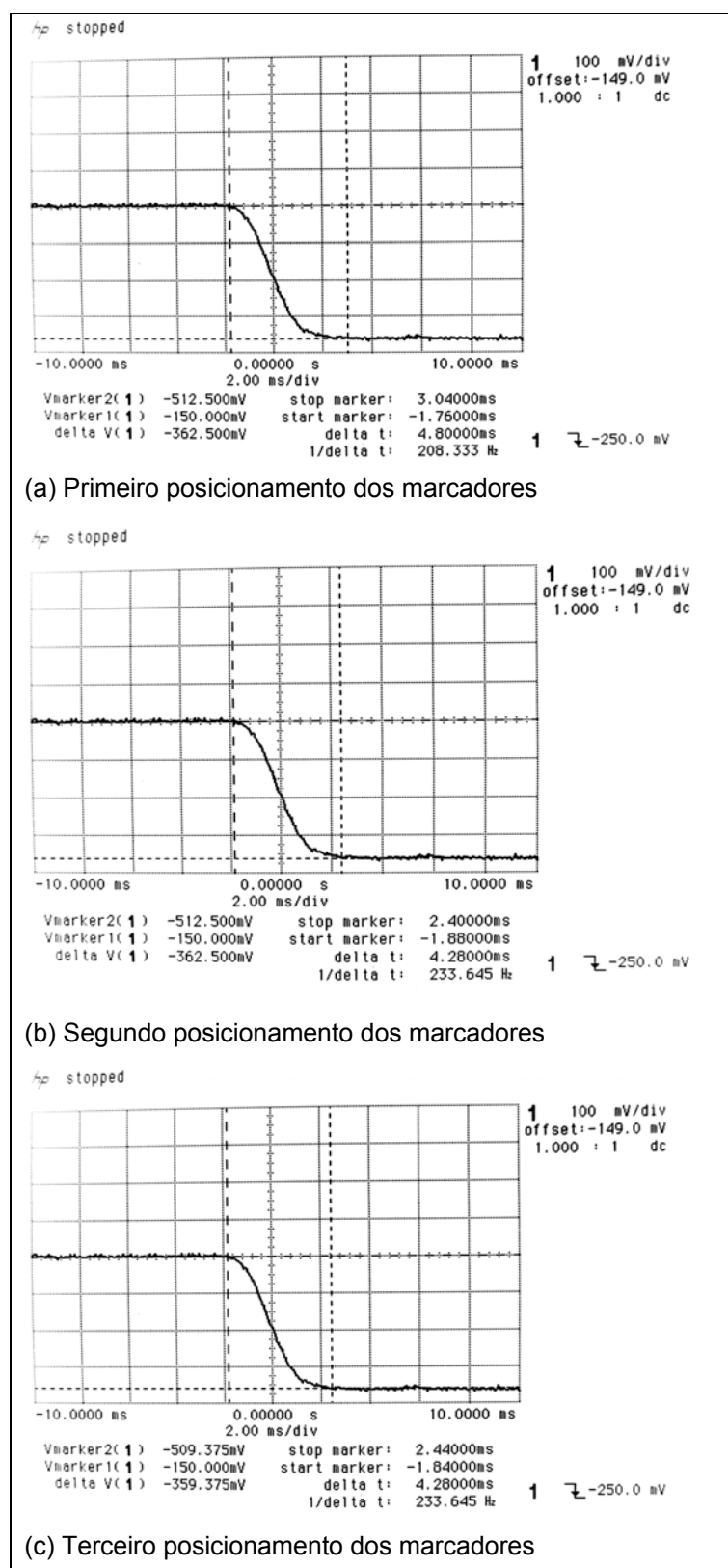


Figura 54 – Experimento 41 (Tabela 18), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 34,47 bar.

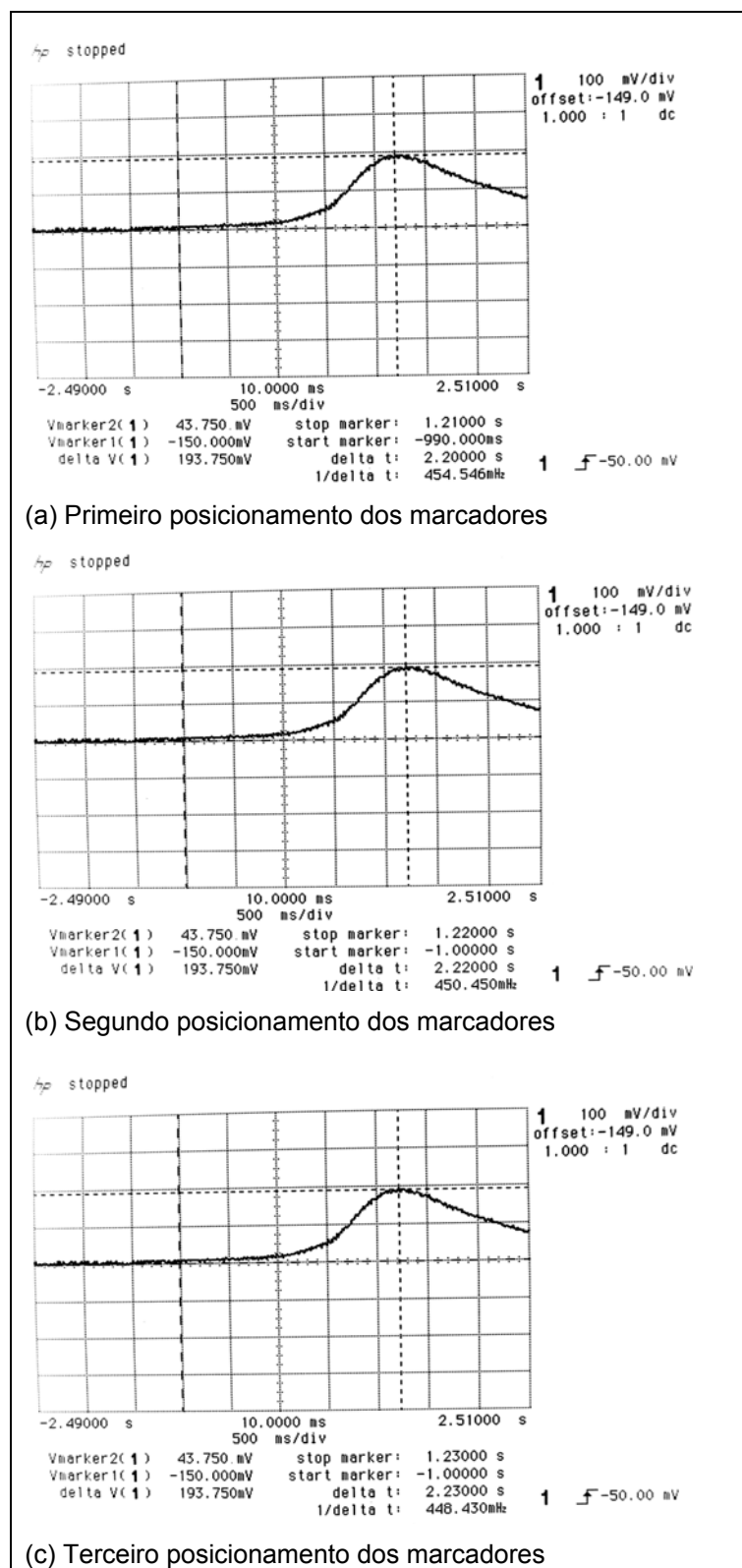


Figura 55 – Experimento 40 (Tabela 18), caracterizado pelo maior Δt dentre todos os experimentos realizados à pressão de 34,47 bar.

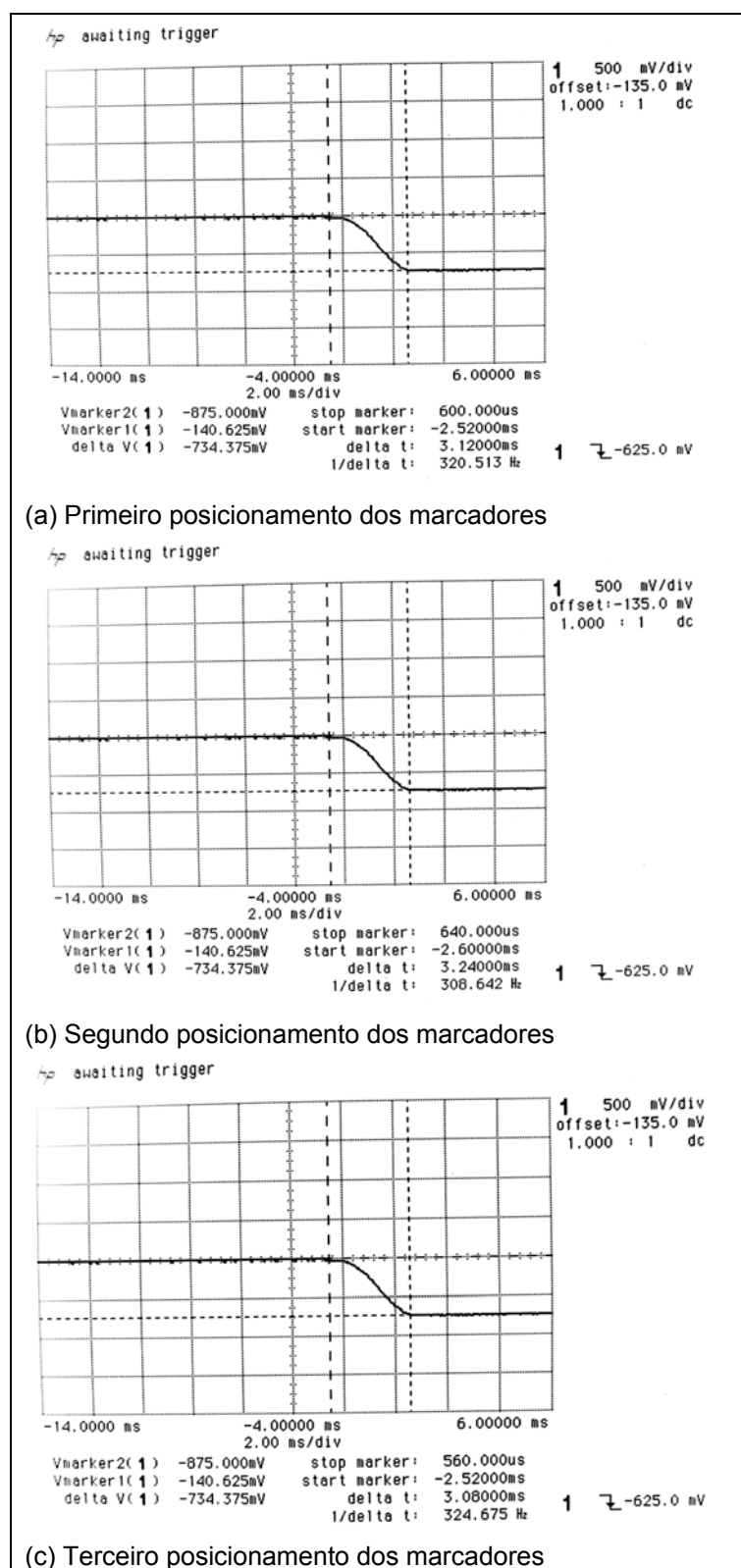


Figura 56 – Experimento 41 (Tabela 21), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 68,95 bar.

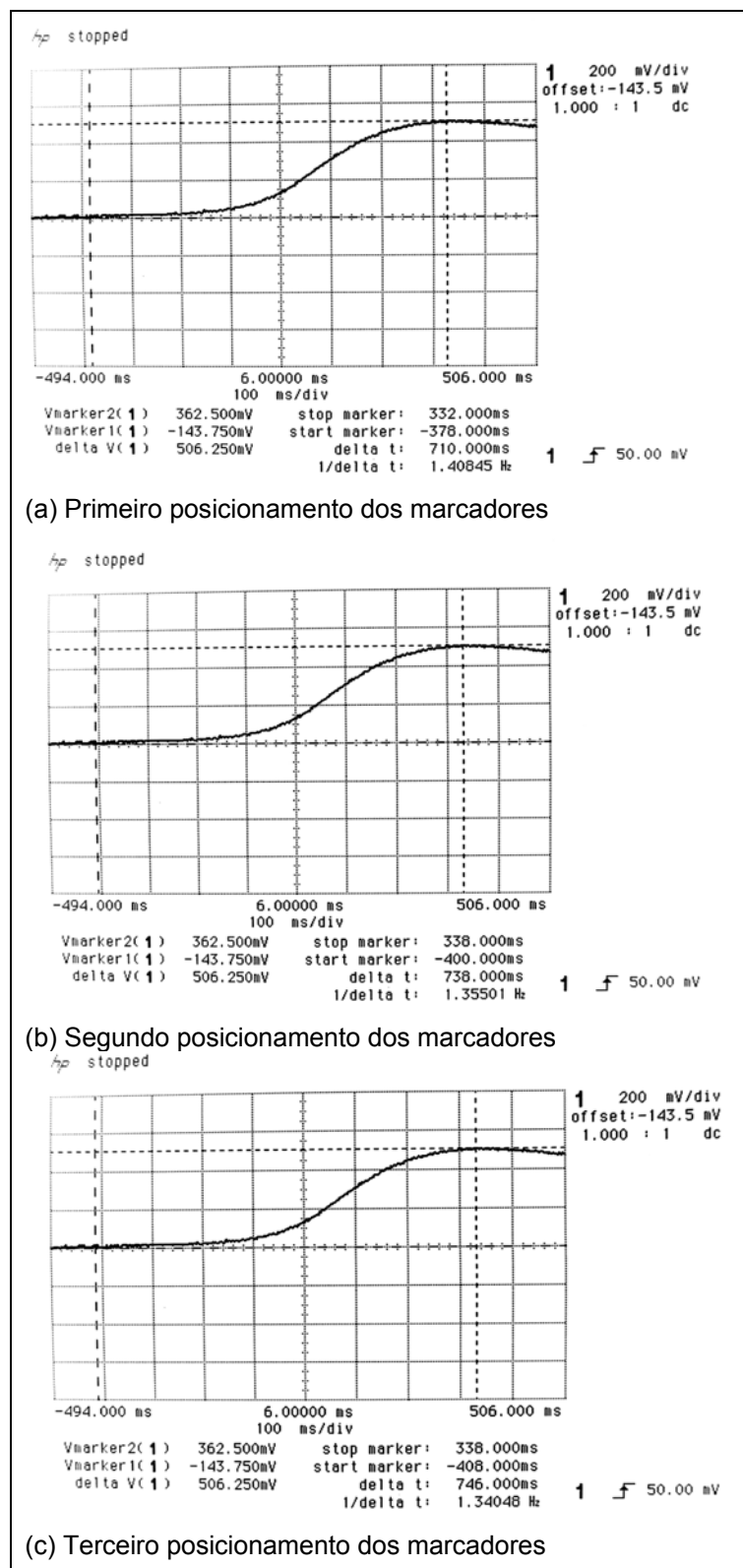


Figura 57 – Experimento 39 (Tabela 21), caracterizado pelo maior delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 68,95 bar.

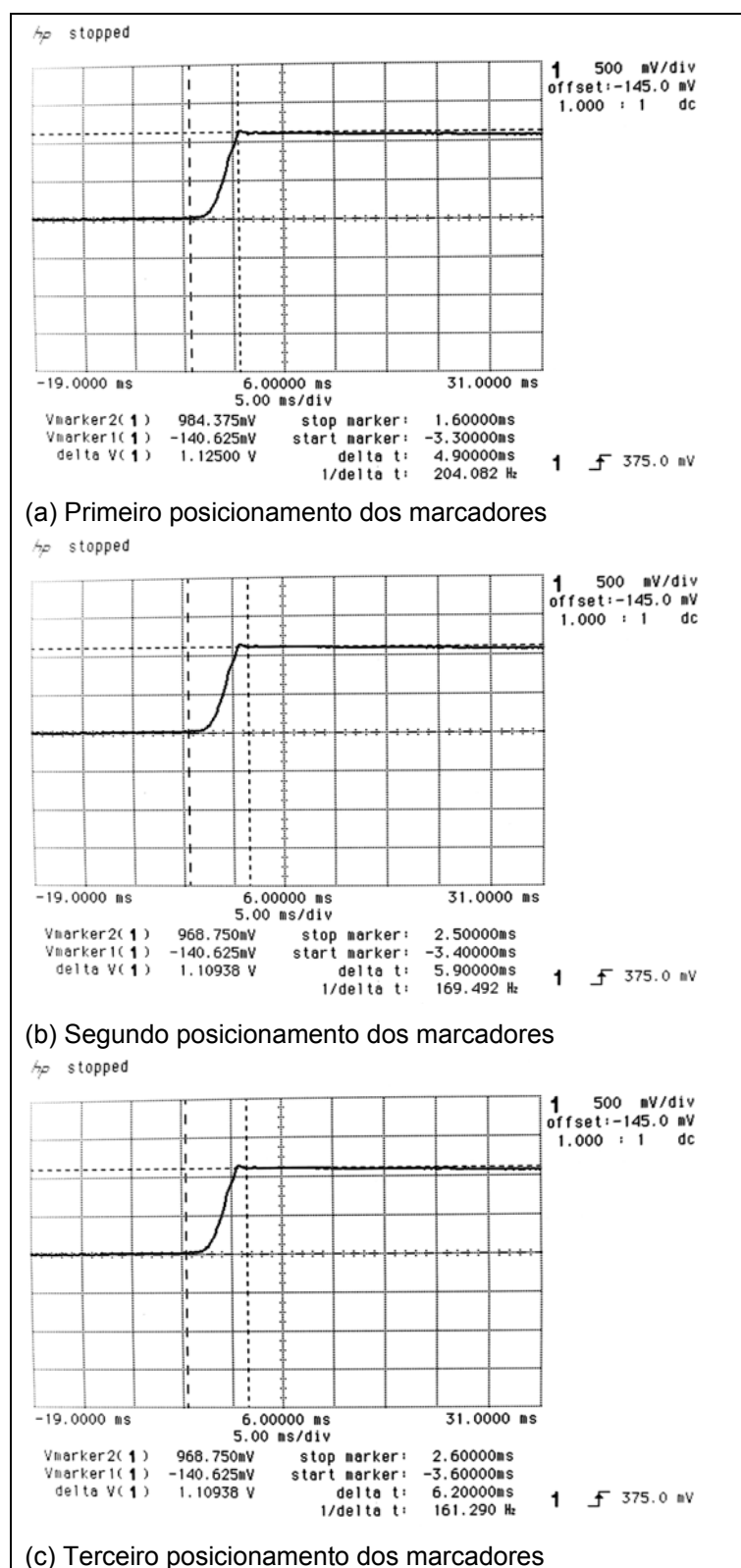


Figura 58 – Experimento 13 (Tabela 24), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 103,42 bar.

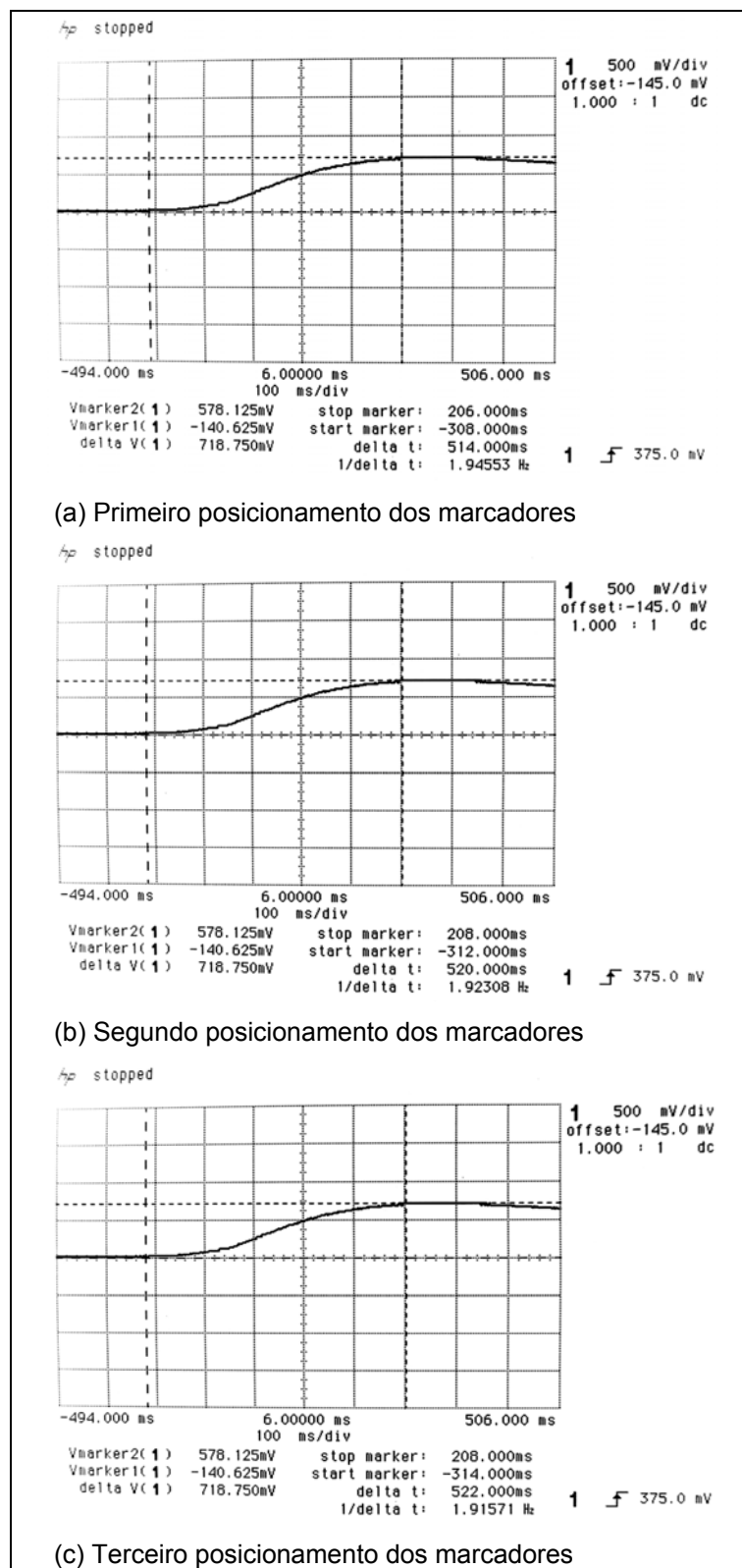


Figura 59 – Experimento 33 (Tabela 24), caracterizado pelo maior Δt dentre todos os experimentos realizados à pressão de 103,42 bar.

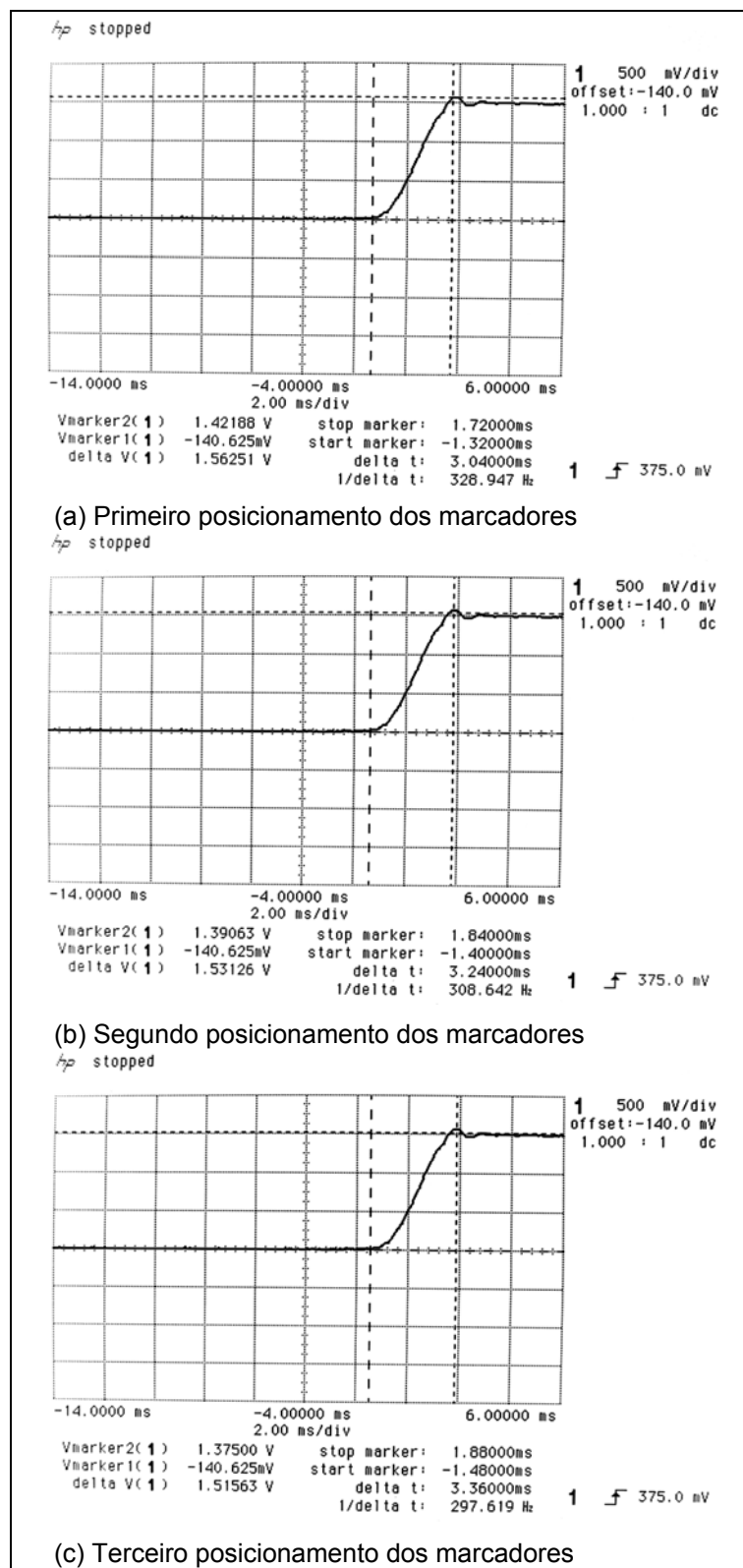


Figura 60 – Experimento 8 (Tabela 27), caracterizado pelo menor Δt dentre todos os experimentos realizados à pressão de 137,90 bar.

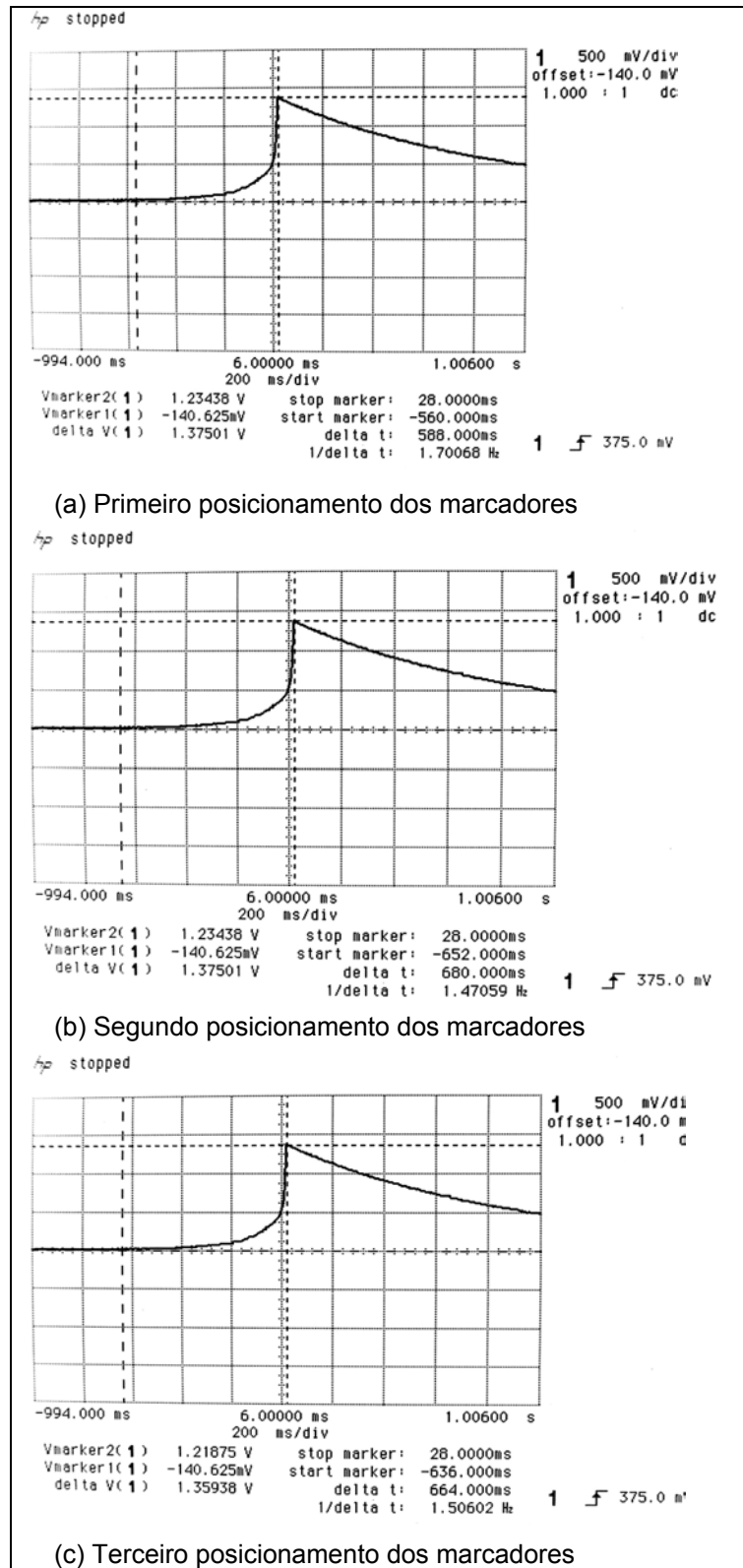


Figura 61 – Experimento 38 (Tabela 27), caracterizado pelo maior delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 137,90 bar.

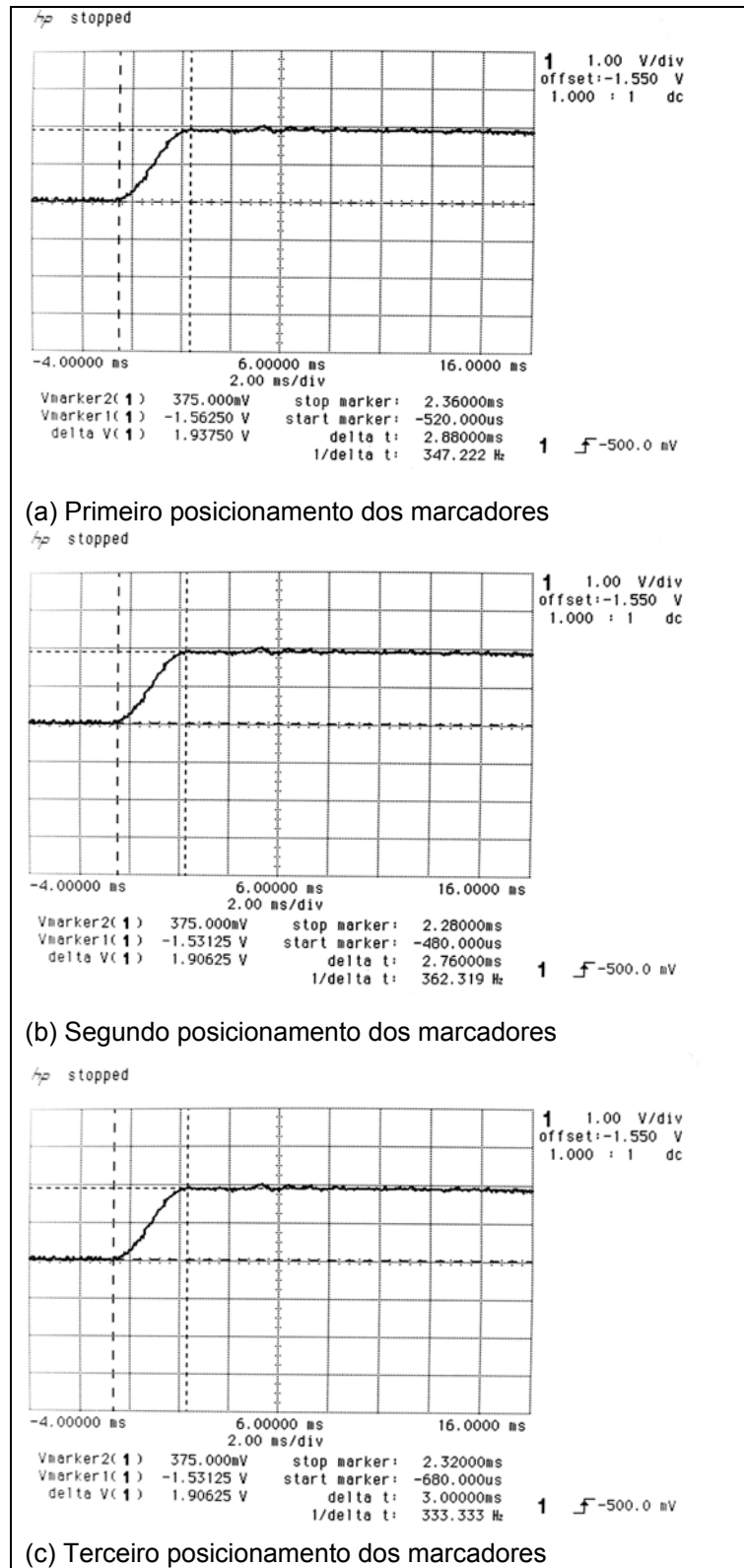


Figura 62 – Experimento 1 (Tabela 30), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 172,37 bar.

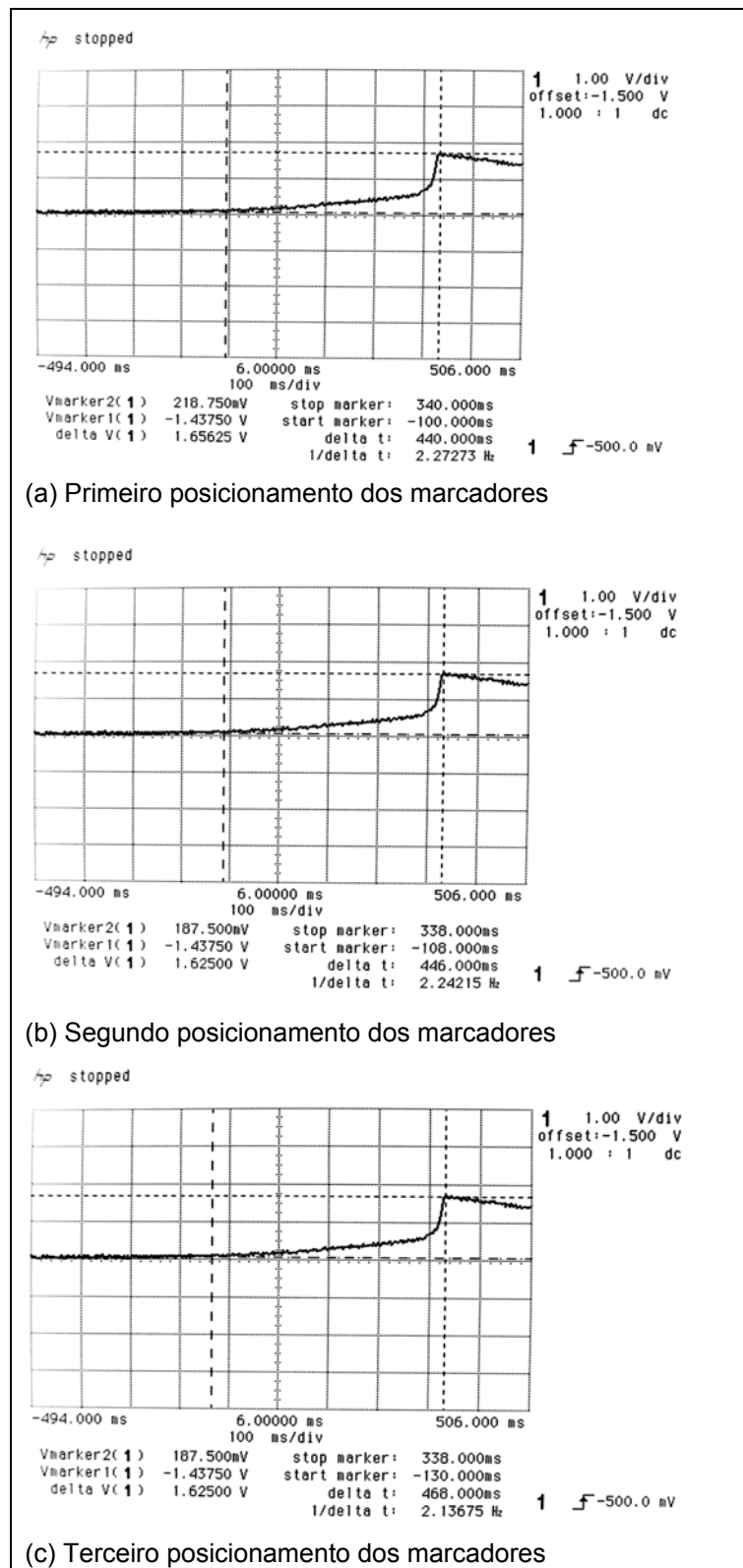


Figura 63 – Experimento 36 (Tabela 30), caracterizado pelo maior Δt dentre todos os experimentos realizados à pressão de 172,37 bar.

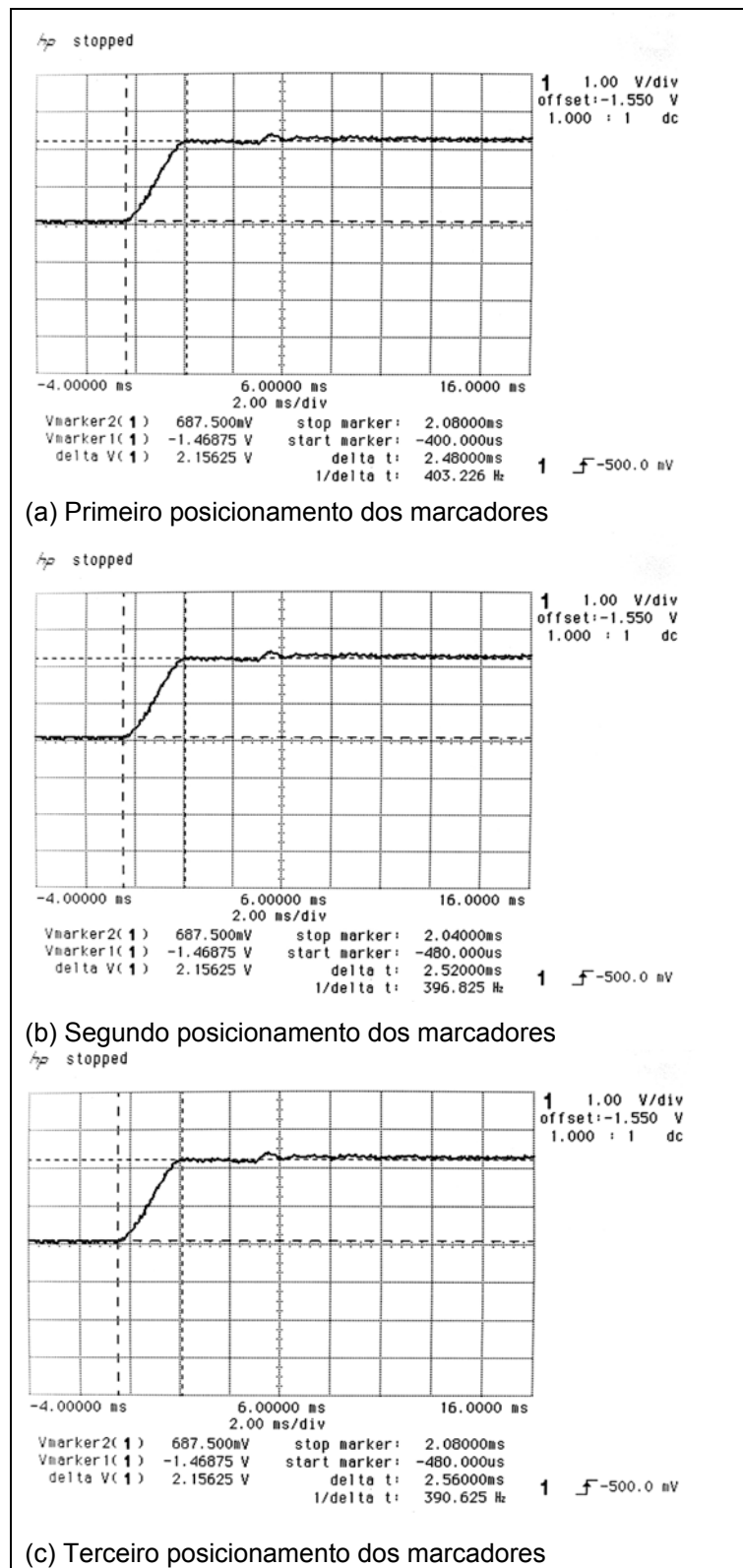


Figura 64 – Experimento 1 (Tabela 33), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 206,84 bar.

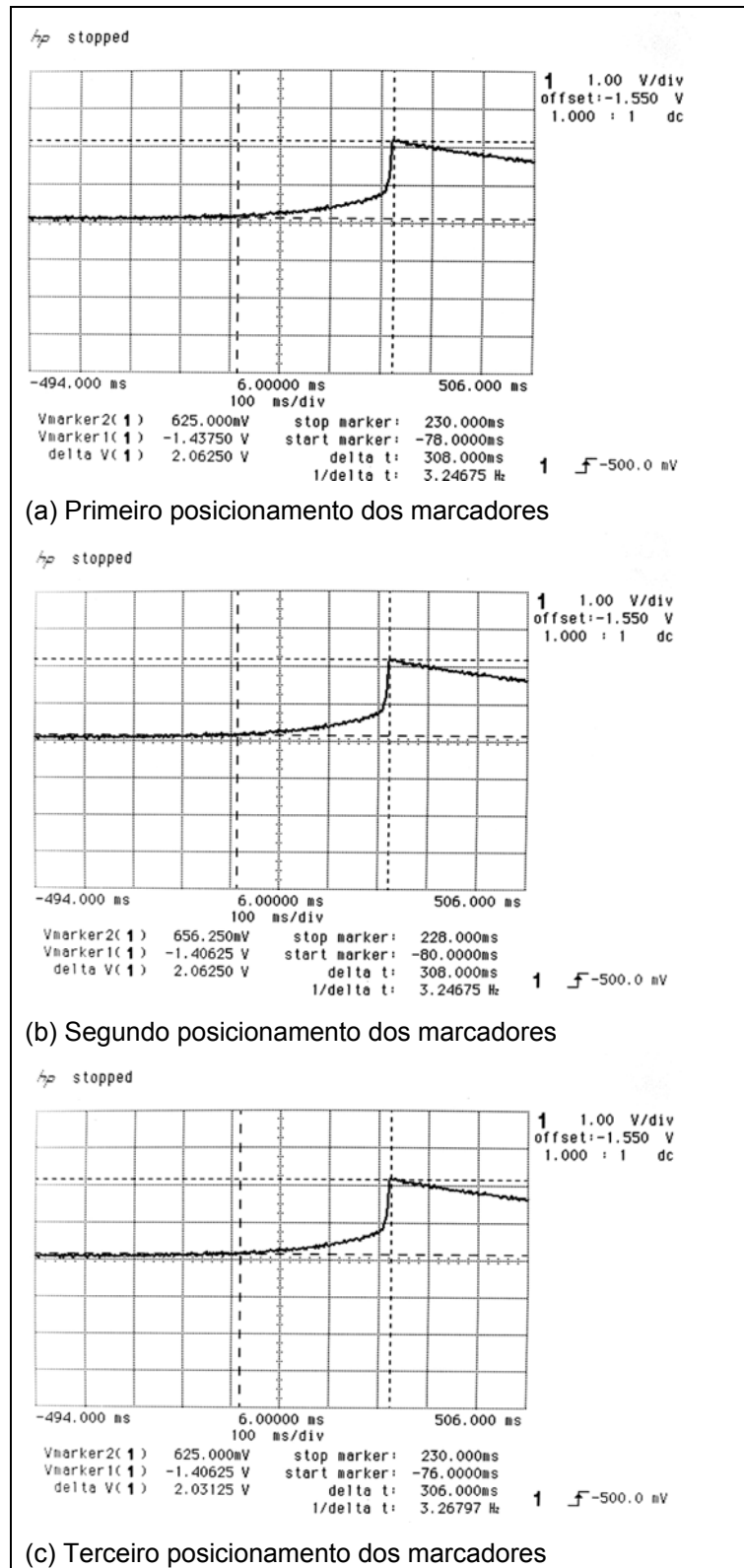


Figura 65 – Experimento 22 (Tabela 33), caracterizado pelo maior Δt dentre todos os experimentos realizados à pressão de 206,84 bar.

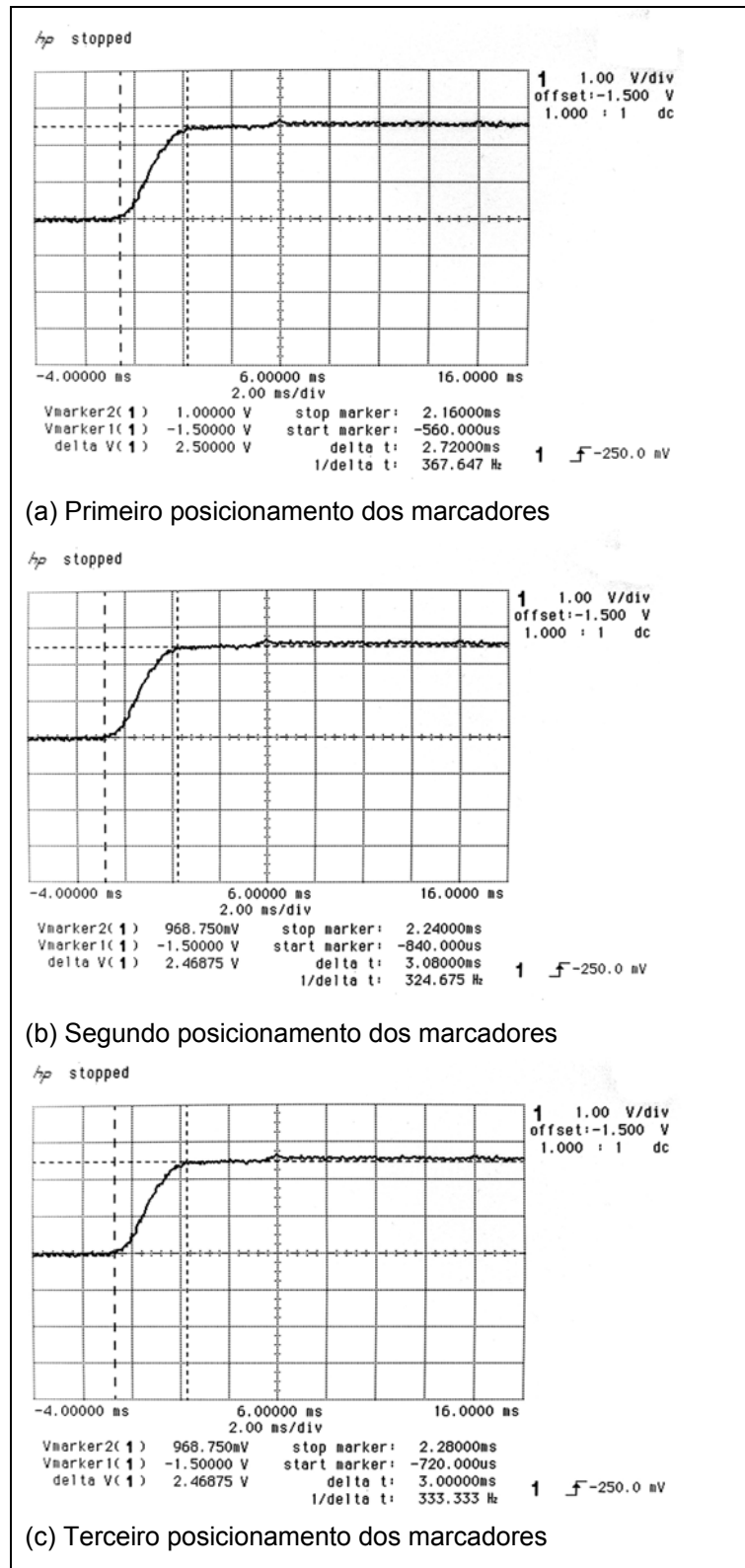


Figura 66 – Experimento 1 (Tabela 36), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 241,32 bar.

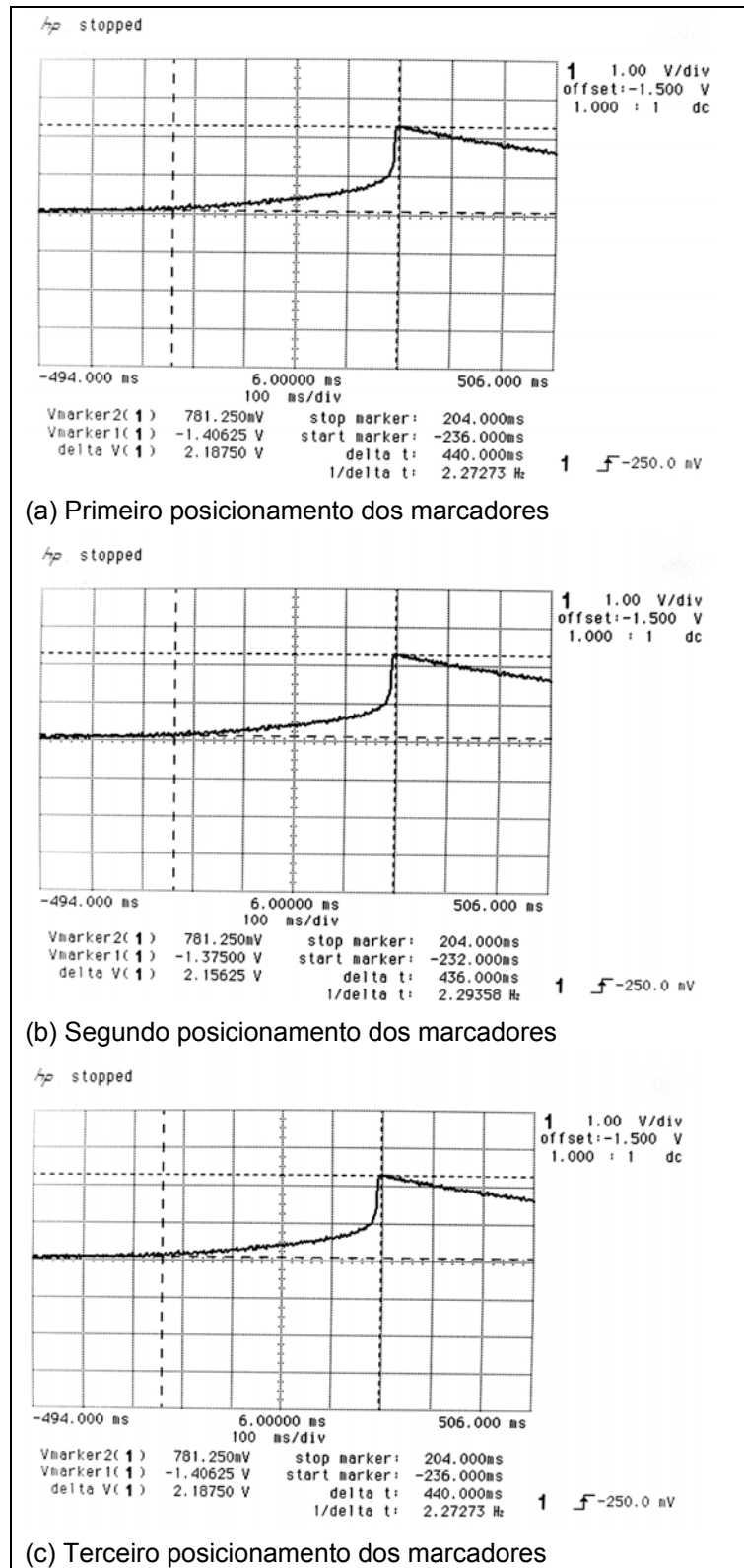


Figura 67 – Experimento 35 (Tabela 36), caracterizado pelo maior delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 241,32 bar.

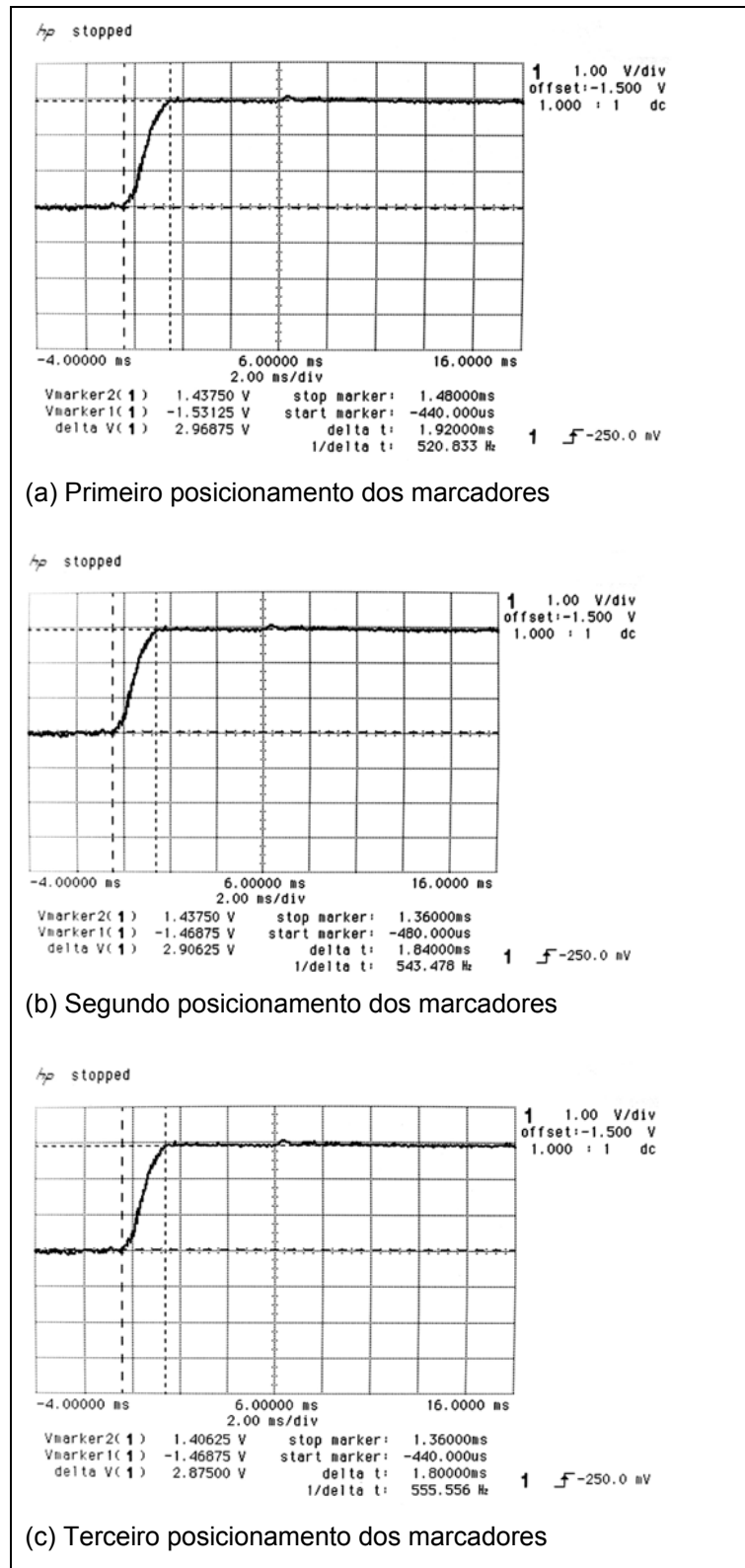


Figura 68 – Experimento 2 (Tabela 39), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 275,79 bar.

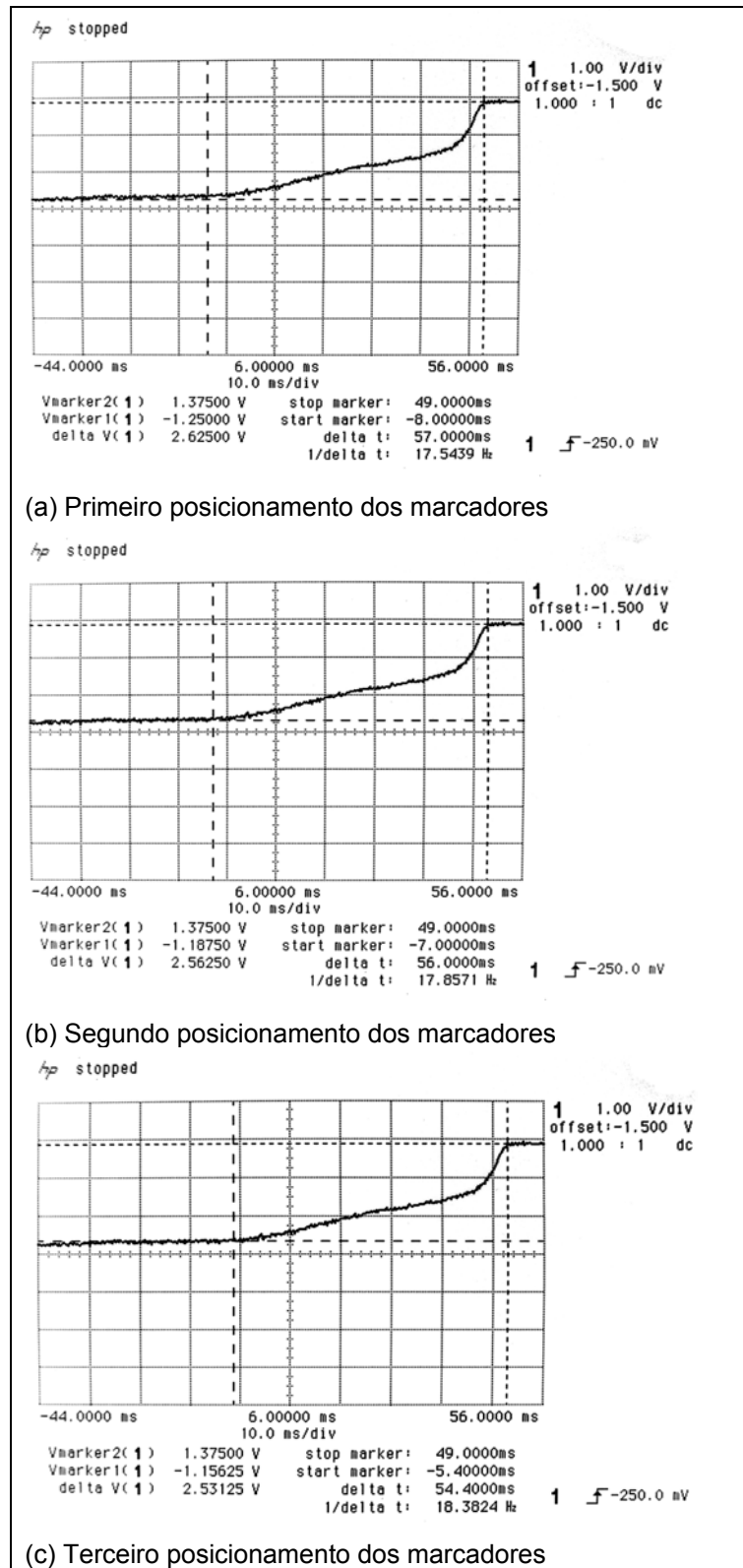


Figura 69 – Experimento 26 (Tabela 39), caracterizado pelo maior delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 275,79 bar.

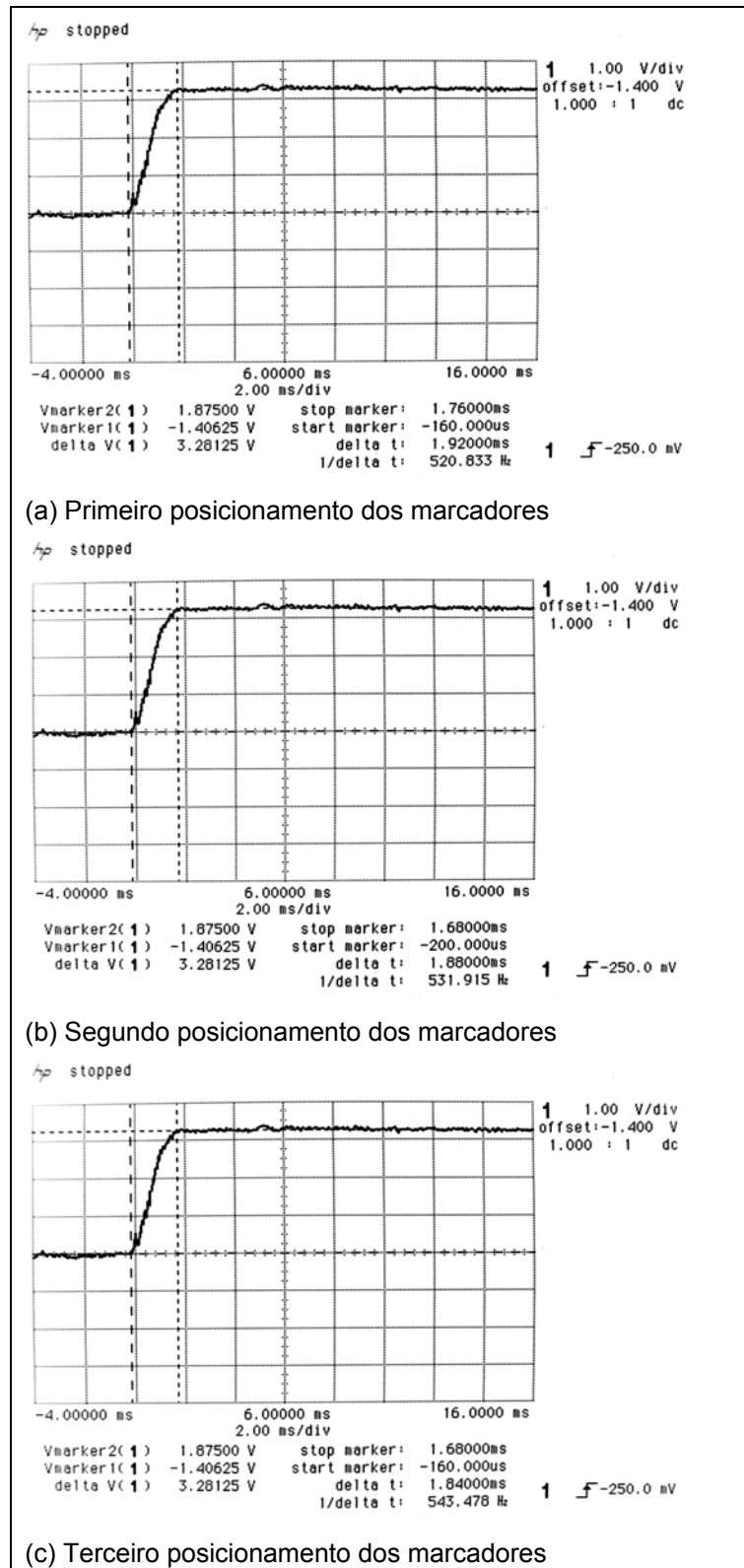


Figura 70 – Experimento 1 (Tabela 42), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 310,26 bar.

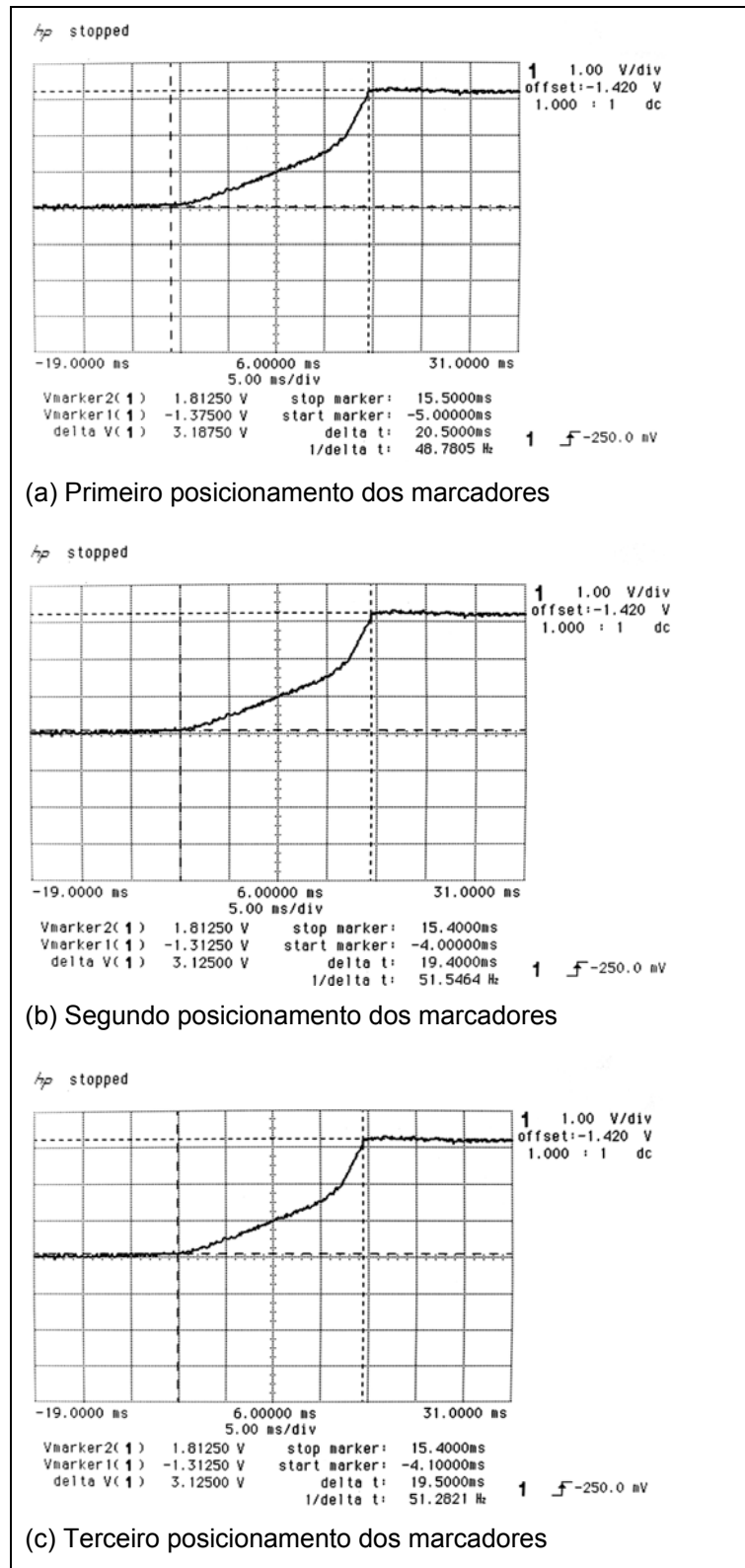


Figura 71 – Experimento 15 (Tabela 42), caracterizado pelo maior delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 310,26 bar.

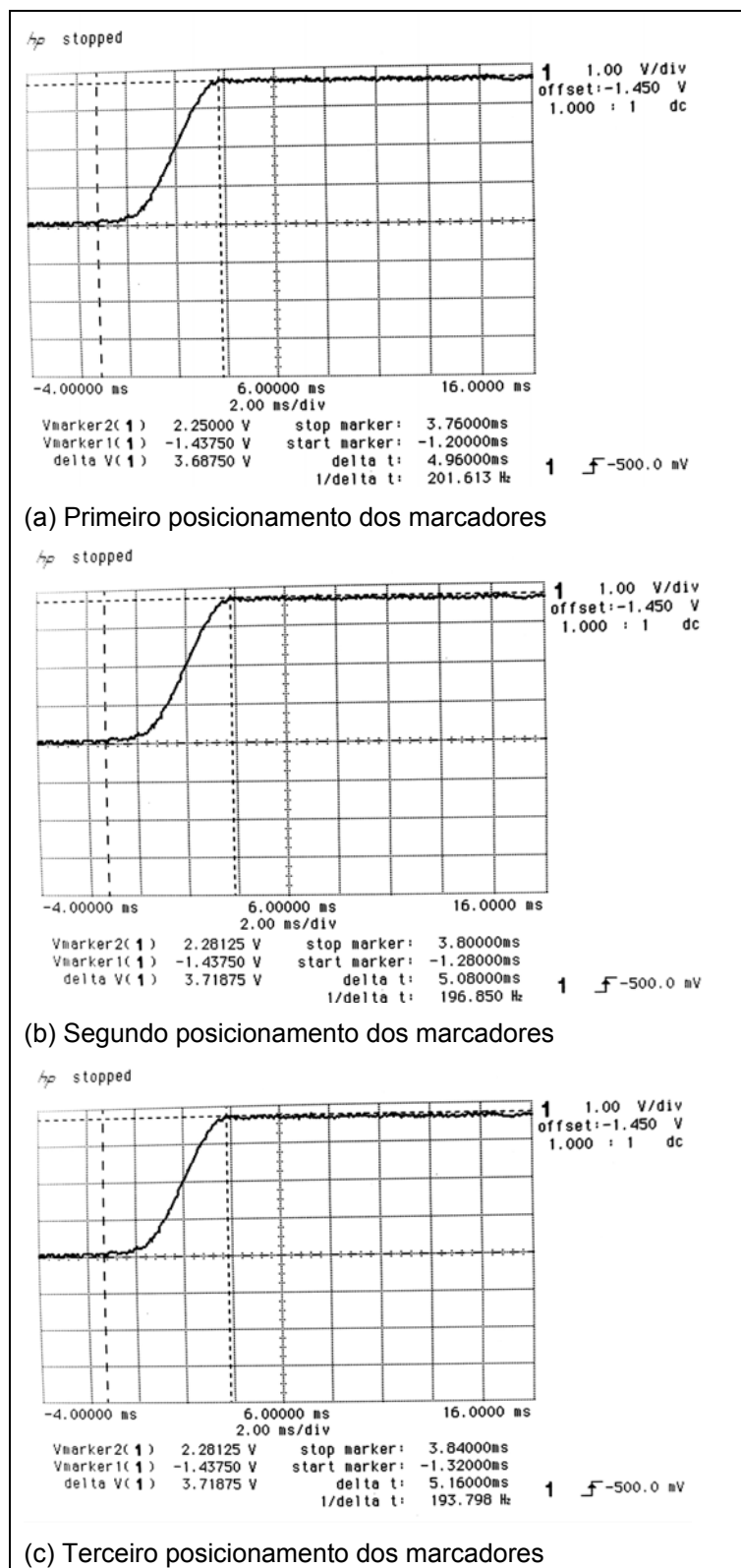


Figura 72 – Experimento 2 (Tabela 45), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 344,74 bar.

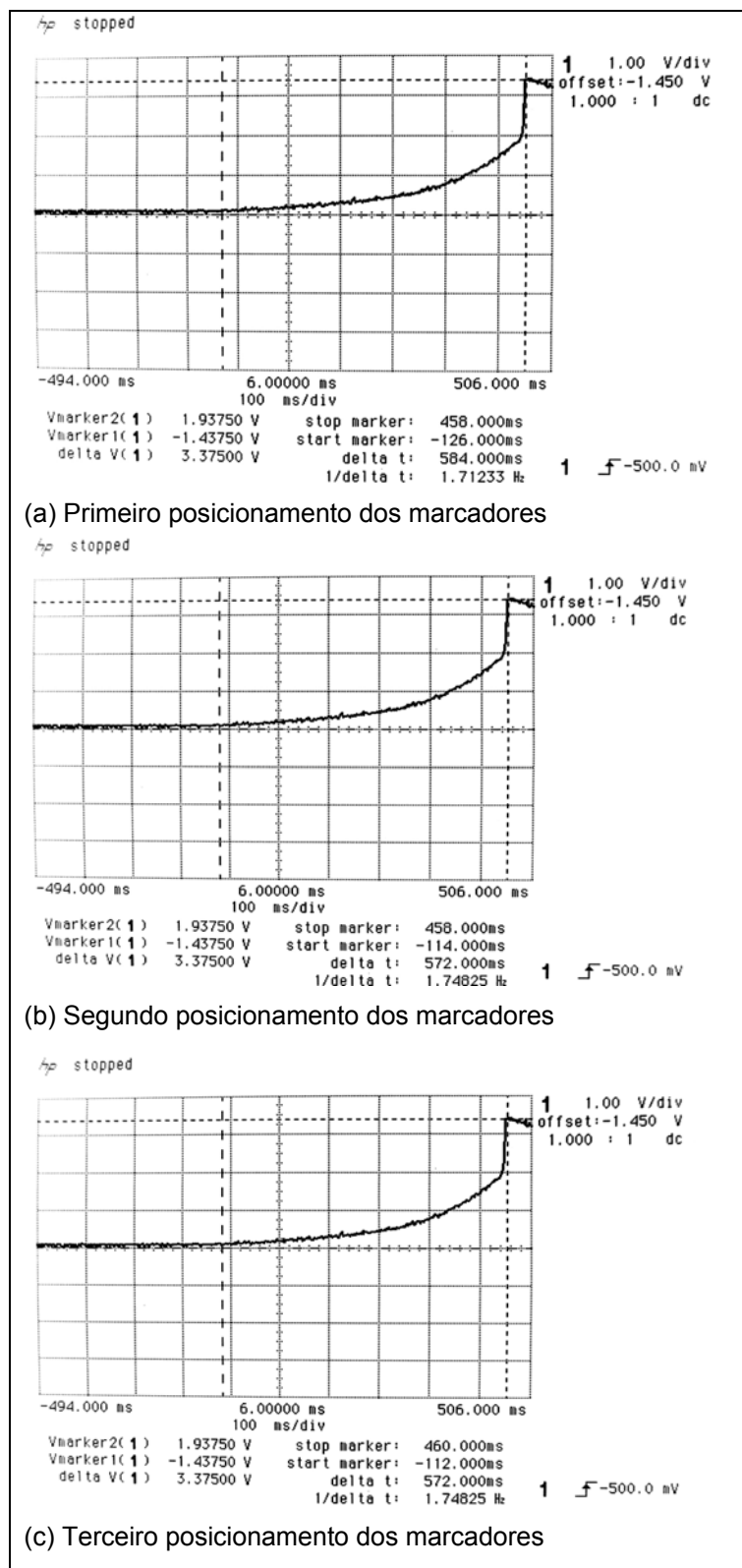


Figura 73 – Experimento 31 (Tabela 45), caracterizado pelo maior delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 344,74 bar.

APÊNDICE H – Procedimento proposto para calibração de transdutor piezelétrico de alta pressão, utilizando-se o Calibrador Dinâmico de Piezelétrico como simulador de balística interna.

Neste Apêndice, é apresentado um equipamento, que foi projetado e fabricado durante o curso, a que se deu o nome de **Calibrador Dinâmico de Piezelétrico** (Figura 74). Ele se destina à calibração de transdutores piezelétricos de alta pressão em toda a faixa de medição. O Calibrador Dinâmico de Piezelétrico nada mais é que um gerador de alta pressão de referência transiente. No momento, ele se encontra em fase de testes e ajustes. Empresas como a “High Pressure Instrumentation” (HPI) e a Kistler, possuem equipamentos similares.

Neste Apêndice, é proposto um método de calibração que utiliza o Calibrador Dinâmico de Piezelétrico como **simulador de balística interna**.



Figura 74 – Calibrador Dinâmico de Piezelétrico, em fase de testes no Campo de Provas da Marambaia (CPrM) do Exército

H.1

Procedimento experimental proposto

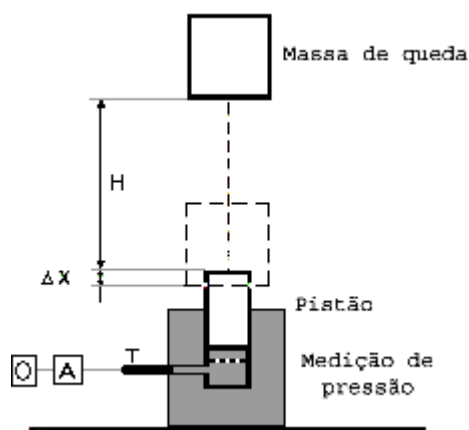


Figura 75 - Desenho esquemático para ilustração do funcionamento do Calibrador Dinâmico de Piezelétrico

O princípio de funcionamento é simples: a partir da queda de um corpo de massa conhecida, de uma altura pré-fixada, sobre um pistão de seção reta também conhecida, que comprime um fluido hidráulico de características definidas e volume pré-estabelecido, ocorrerá um impacto sobre o pistão que resultará numa pressão na câmara hidráulica calculável, se for possível medir quanto o pistão se deslocou. Ainda que não haja como medir esse deslocamento, constatar-se-á a boa repetitividade, através de sistema de medição (Transdutor, amplificador, osciloscópio, T, A, e O, respectivamente, na Figura 75), do pulso de pressão gerado na câmara, quando se deixa cair uma mesma massa de uma mesma altura n vezes. Será possível, então, fazer uma tabela de massa de queda versus pico de pressão médio atingido e tempo médio até o pico, bem como calcular a incerteza expandida desse pico, como, por exemplo:

Tabela 46 – Pico de pressão médio e tempo médio até o pico versus massa de queda (*valores fictícios*)

Pico de Pressão Médio (bar)	Tempo Médio até o Pico (ms)	Incerteza Expandida do Pico de Pressão (%)	Massa de Queda (kg)
343	4,0	2,1	3
747	3,9	2,0	6
1054	4,0	1,9	9
1401	4,1	2,1	12
2098	3,9	0,99	15
2503	4,0	1,01	18
2801	3,9	0,99	21
3505	4,1	1,00	24

Tabela 46(Continuação)– Pico de pressão médio e tempo médio até o pico versus massa de queda (*valores fictícios*)

Pico de Pressão Médio (bar)	Tempo Médio até o Pico (ms)	Incerteza Expandida do Pico de Pressão (%)	Massa de Queda (kg)
4097	4,1	1,01	27
5001	3,9	1,00	30
5990	4,0	0,99	33

H.2

A Física do princípio de funcionamento do Calibrador Dinâmico de Piezelétrico

Hipótese inicial: a pressão no fluido hidráulico será função, unicamente, da redução percentual do volume por ele ocupado. A redução absoluta de volume será igual à área da seção reta do pistão multiplicada pelo deslocamento Δx do mesmo. A redução percentual será a redução absoluta dividida pelo volume inicial ocupado pelo fluido, e este volume será sempre o mesmo e conhecido. Como a seção reta é constante, pode-se afirmar que a redução percentual do volume ocupado pelo fluido hidráulico será função de Δx apenas. Assim, a pressão no fluido hidráulico será função unicamente do deslocamento Δx do pistão.

Qual a “massa equivalente” que provocaria o mesmo deslocamento Δx no pistão se fosse colocada devagar sobre ele? Ou seja, se o Δx do pistão fosse exclusivamente devido ao peso correspondente à massa aplicada, que massa seria necessária para provocar o mesmo Δx no pistão?

Seja m a massa que cai da altura h e m_E a “massa equivalente”. Pode-se afirmar que, ao se colocar a massa m_E sobre o pistão, ela tem apenas energia potencial gravitacional. Desprezando-se as perdas por atrito entre o pistão e o furo, hipótese razoável graças ao excelente acabamento tanto da superfície do pistão quanto da superfície do furo, ambos cromados e polidos e lubrificados por óleo, pode-se dizer que essa energia potencial se transformará integralmente em energia de pressão no fluido, que é uma espécie de energia potencial elástica. Matematicamente:

$$m_E g \Delta x = \text{Energia de Pressão no fluido} \quad (17)$$

Pode-se afirmar, também, que essa Energia de Pressão no fluido, obtida ao se colocar a massa m_E sobre o pistão, é numericamente igual à energia de pressão que se obteria com a queda da massa m da altura h sobre o pistão, com a única diferença que, no caso da massa equivalente m_E , a pressão no fluido seria estática, constante com o tempo, ao passo que com a queda da massa m a pressão seria aplicada subitamente e, logo em seguida, aliviada, ou seja, seria uma pressão instantânea. Assim, considerando desprezível a resistência do ar, hipótese razoável, pois a velocidade “alta” só é atingida pouco antes do impacto, e considerando o atrito insignificante com as hastes-guia-de-queda, hipótese também razoável já que as mesmas são cromadas e têm acabamento polido e são lubrificadas com óleo fino e são usados rolamentos para deslocamento linear para facilitar a queda, pode-se afirmar:

$$mg(h + \Delta x) = \text{Energia de Pressão no fluido} \quad (18)$$

Então:

$$mg(h + \Delta x) = m_E g \Delta x \quad \Rightarrow \quad m_E = \frac{m(h + \Delta x)}{\Delta x} \quad (19)$$

Ora, a massa de queda m é conhecida, bem como h , altura de queda. Se for possível medir o deslocamento Δx do pistão, será fácil calcular a massa equivalente m_E e, conseqüentemente, calcular a pressão máxima que aconteceu no fluido:

$$P = \frac{m_E g}{A} \quad (20)$$

Nesta expressão, P é a pressão, g é a aceleração de gravidade local, e A é a área da seção reta do pistão.

Os detalhes de projeto do Calibrador Dinâmico de Piezelétrico não serão revelados nesta dissertação, já que esse não é o objetivo deste trabalho.

H.3

Considerações a respeito dos erros introduzidos pelas simplificações feitas em H.2

Se os rolamentos para deslocamento linear fossem ideais (são próximos disso), e se o Calibrador funcionasse no vácuo, e também se o atrito do pistão com o furo fosse nulo, não seria necessária qualquer correção.

Assim, já que as hipóteses feitas em H.2 não são 100 % verdadeiras, há que se fazer uma correção. Os erros introduzidos pelas considerações simplificadas de rolamentos ideais, resistência do ar desprezível etc. serão facilmente corrigidos, nesta fase de testes, através da comparação dos resultados calculados com a eq. (20) com os resultados de medições com transdutor calibrado. Poder-se-á, então, fazer uma curva de calibração para, em se “medindo” tanto com a equação, quanto se mediria com o transdutor calibrado?

H.4

Forma alternativa para cálculo da pressão gerada no cilindro de alta pressão do Calibrador Dinâmico de Piezelétrico

Já que o fluido hidráulico contido na câmara e seu volume inicial são conhecidos, se for mesmo possível medir o deslocamento Δx do pistão, será fácil calcular seu volume final e a redução percentual de volume sofrida pelo fluido. A partir dessa redução percentual e do fator de compressibilidade do fluido, é fácil calcular a pressão por ele atingida.

H.5

Procedimento-Padrão (Figura 76)

- 1- Deixar uma dada massa m cair de certa altura fixa h , com ajuda do Calibrador Dinâmico de Piezelétrico;
- 2- Posicionar os marcadores de voltagem e de tempo até o pico e registrar os valores encontrados;
- 3- Voltar para 1, deixando que a mesma massa caia 5 vezes.
- 4- Após as 5 quedas da massa m , calcular a voltagem média e o tempo médio até o pico. Nesses valores médios, já estarão embutidas as incertezas dos marcadores.
- 5- Alterar a massa de queda, e voltar para 1 repetindo esse procedimento para n massas de queda diferentes (9, por exemplo).
- 6- Encontrar a curva que melhor se ajusta aos resultados experimentais.

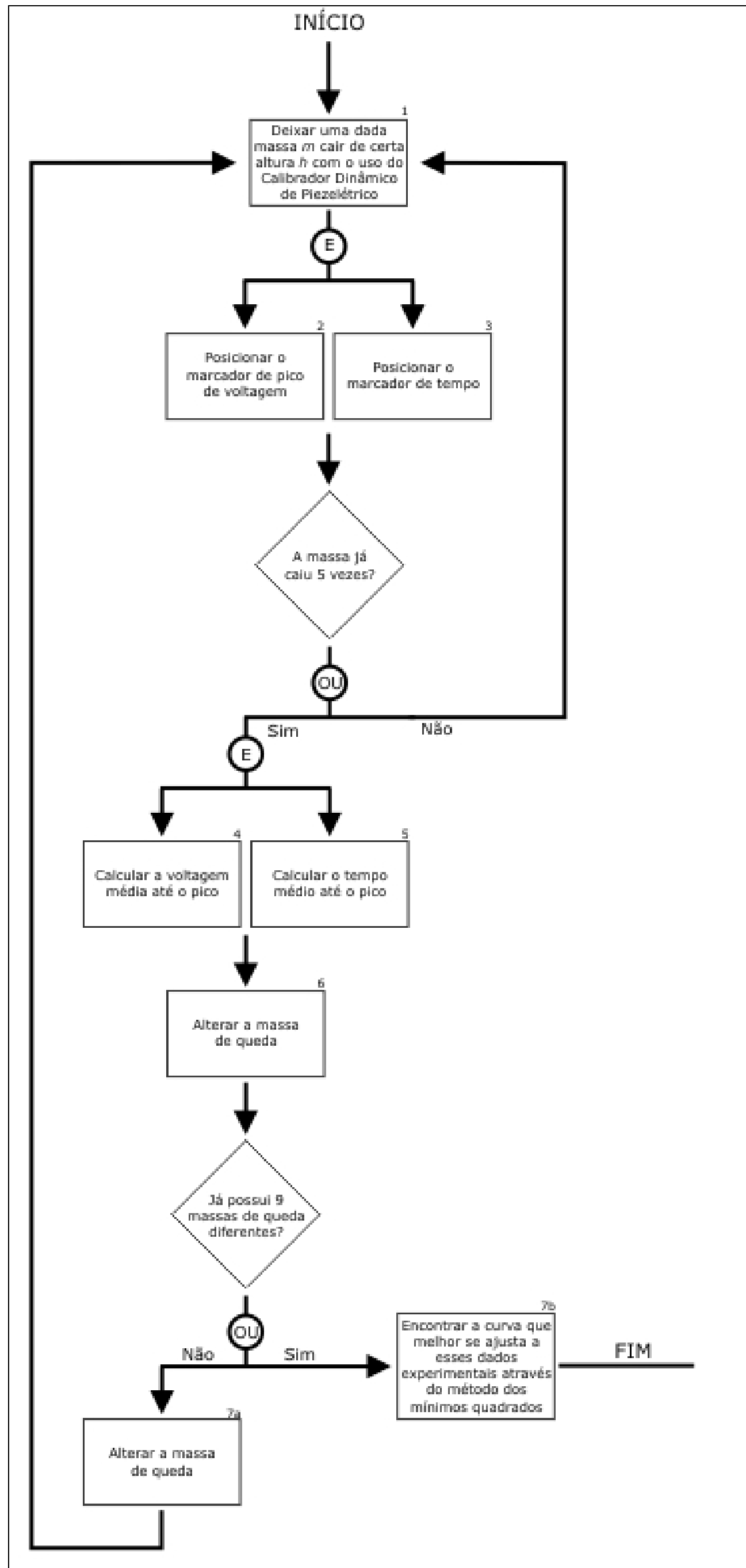


Figura 76 – Procedimento-padrão proposto para calibração de transdutor piezelétrico de pressão, utilizando-se o Calibrador Dinâmico de Piezelétrico

ANEXO A – Especificações técnicas de um transdutor piezelétrico de alta pressão

A seguir, estão registradas as especificações técnicas de um transdutor piezelétrico de alta pressão do fabricante austríaco “High Pressure Instrumentation” (HPI). Observe como o “rise time”²³ é pequeno: este transdutor, na pior das hipóteses, tem “rise time” igual a 2 μ s, de acordo com seu fabricante.

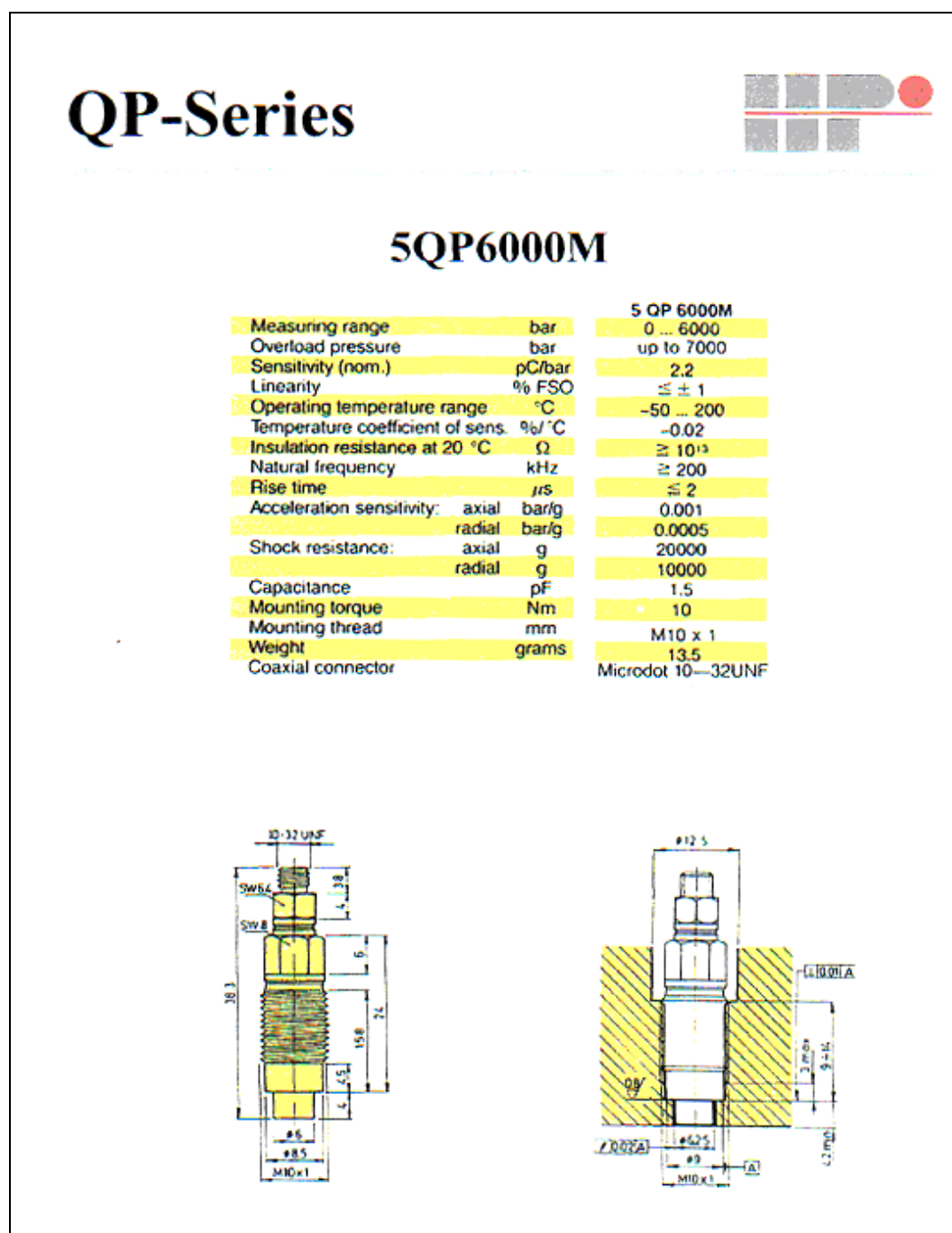


Figura 77 – Especificações técnicas de um transdutor piezelétrico de pressão da HPI
Fonte: Catálogo da HPI

²³ Entende-se por “rise time” o intervalo de tempo necessário para que seja atingido um valor final, uma vez que um degrau foi aplicado como “input” (Orlando, 2004).

ANEXO B – Especificações técnicas do amplificador de carga utilizado: Kistler, Modelo 5004

A seguir, tem-se uma cópia de uma página do manual do amplificador utilizado. Observe a constante de tempo do amplificador. Ela corresponde a um “rise time”²⁴ bem pequeno.

1.2. Technical data (Table 1)			
1.2.1. Charge amplifier			
Scale settings, 12 steps in 1 – 2 – 5 sequence			
Selectable scales, for transducer sensitivity ranges:			
0.01 to 0.11 pC or mV per M.U.	M.U./V	100 to 500,000	a)
0.1 to 1.1 pC or mV per M.U.	M.U./V	10 to 50,000	a)
1 to 11 pC or mV per M.U.	M.U./V	1 to 5,000	a)
10 to 110 pC or mV per M.U.	M.U./V	0.1 to 500	a)
0.1 to 1.1 nC or V per M.U.	M.U./V	0.01 to 50	a)
Accuracy, Medium time constant			
of two most sensitive ranges	%	<±5	
of all other ranges	%	<±1	
Linearity, of Transducer Sensitivity potentiometer			
	%	<±0.5	
Calibration input, sensitivity			
	pC/mV	1 ±0.5%	
Input voltage, absolute maximum, at Charge input			
pulse width <0.5s	V	<±125	
Amplitude linearity			
	%FS	<±0.05	b)
Frequency response error, Long time constant, short input cable			
without filter (direct connection), near DC-100 kHz	%	<±2	
with 180 kHz standard filter; near DC-100 kHz	%	<±5	
with 180 kHz standard filter; near DC-50 kHz	%	-1 to +3	
Low frequency (-5%), approx.			
	Hz	0.5	
3-dB-frequency, with standard filter			
180 kHz, input capacitance up to 1500 pF (approx. 50 ft, 15 m of input cable)	kHz	180 ±10%	
Time constant resistor, setting Long, about			
setting Medium, about	Ω	10 ¹⁴	
setting Short, about	Ω	10 ¹¹	
Time constant, $\tau = R_g \times C_g$ setting Long			
setting Medium	s	up to 100,000	
setting Short	s	1 to 5,000	
Output, unlimited short circuit proof			
Voltage	V	±10	
Current	mA	±5	
Impedance	Ω	100 ±5	
Noise at the output			
10 Hz to 330 kHz, 180 kHz filter, nominal, in μV_{rms}			
	$\frac{\text{Input Cap. [pF]} + 50\text{pF}}{0.1 \times \text{Transd. Sens. [pC/M.U.]} \times \text{Scale [M.U./V]}} + \frac{400}{\text{Dial Setting}}$		
typical value, input shielded	mV_{rms}	0.1/1	c)
Capacitive input load for 1% attenuation, $f < 200$ Hz, in pF			
	$10^4 \times \text{Scale [M.U./V]} \times \frac{\text{Transducer Sensitivity [pC/M.U.]}}{\text{Dial Setting}}$		
a) M.U. = mechanical unit, e.g. psi, bar, lb, N, g			
b) FS = full scale			
c) Dial for transducer sensitivity adjustment set to 10-00 resp. 1-00.			

Figura 78 – Especificações técnicas do amplificador Kistler, modelo 5004, utilizado.

Fonte: Manual do amplificador

²⁴ Entende-se por “rise time” o intervalo de tempo necessário para que seja atingido um valor final, uma vez que um degrau foi aplicado como “input” (Orlando, 2004).

ANEXO C – Especificações técnicas do osciloscópio digital utilizado: HP modelo 54501 A

Aqui mostra-se uma cópia de uma página do manual do osciloscópio utilizado. Observe como o “rise time”²⁵ do amplificador é pequeno: 3,5 ns

Specifications		B
Bandwidth		
Repetitive Single Shot	(dc coupled)	(ac coupled)
	dc to 100 MHz (-3 dB) dc to 1 MHz (based on 10 points per period of input signal)	10 Hz to 100 MHz (-3 dB) 10 Hz to 1 MHz
Risetime	3.5 ns Risetime = 0.35/Bandwidth	
Number of Channels	4 (2 + 2) Channels 2 and 3 are limited attenuator inputs, optimized for digital signals.	
Simultaneous Channels	2 + 2 Channels 1 and 2 simultaneous with 3 or 4. With more than two channels, the other channels are acquired alternately in pairs.	
Vertical Sensitivity	Maximum 5 mV/div Minimum 5 V/div	
Vertical Gain Accuracy (dc)	± 1.5%	
Max Input voltage	± 250 V DC + peak AC (< 10 kHz)	
Offset Accuracy	± 2% of offset + 0.2 x (V/div) + 0.075 div/°C from the calibration temperature for 5 mV/div range, ± 2% of offset + 0.4 x (V/div) + 0.15 div/°C from the calibration temperature	
Voltage Measurement Accuracy	Single Cursor: Gain Accuracy + offset accuracy + A/D resolution Dual Cursor: Gain Accuracy + 2 x A/D resolution	
		Specifications and Characteristics B-1

Figura 79 – Especificações técnicas do osciloscópio digital utilizado: HP modelo 54501 A
Fonte: Manual do osciloscópio

²⁵ Entende-se por “rise time” o intervalo de tempo necessário para que seja atingido um valor final, uma vez que um degrau foi aplicado como “input” (Orlando, 2004).

ANEXO D – Certificado de calibração da balança de pressão que foi usada como padrão na calibração do manômetro (Apêndice C)

	República Federativa do Brasil Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) Laboratório Nacional de Metrologia (LNM)							
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO								
<i>Calibration Certificate issued by LNM/Brazil</i>								
Solicitante do Serviço Customer		LAPRE 0125/2000 Número do Certificado Certificate Number						
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td data-bbox="322 705 1184 772"> Nome: INSTITUTO TECNOLÓGICO DA PUC – ITC/PUC Name </td> </tr> <tr> <td data-bbox="322 772 1184 851"> Endereço: Rua Marquês de São Vicente, 225 – Gávea – Rio de Janeiro – RJ – CEP: 22.453-900 Address </td> </tr> </table>			Nome: INSTITUTO TECNOLÓGICO DA PUC – ITC/PUC Name	Endereço: Rua Marquês de São Vicente, 225 – Gávea – Rio de Janeiro – RJ – CEP: 22.453-900 Address				
Nome: INSTITUTO TECNOLÓGICO DA PUC – ITC/PUC Name								
Endereço: Rua Marquês de São Vicente, 225 – Gávea – Rio de Janeiro – RJ – CEP: 22.453-900 Address								
Identificação do Instrumento de Medição / Padrão Calibrado Measurement Instrument/Calibrated Standard Identification								
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td data-bbox="322 884 1184 952"> Instrumento de Medição/Padrão: Balança de Pressão Instrument/Standard </td> </tr> <tr> <td data-bbox="322 952 1184 996"> Fabricante: XIAN Manufacturer </td> </tr> <tr> <td data-bbox="322 996 1184 1041"> Modelo/Tipo: YS-600/Óleo Model/Type </td> </tr> <tr> <td data-bbox="322 1041 1184 1108"> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td data-bbox="322 1041 718 1108"> Número de Série: 951022 Serial Number </td> <td data-bbox="718 1041 1184 1108"> Código de Identificação: 007 Identification Code </td> </tr> </table> </td> </tr> </table>			Instrumento de Medição/Padrão: Balança de Pressão Instrument/Standard	Fabricante: XIAN Manufacturer	Modelo/Tipo: YS-600/Óleo Model/Type	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td data-bbox="322 1041 718 1108"> Número de Série: 951022 Serial Number </td> <td data-bbox="718 1041 1184 1108"> Código de Identificação: 007 Identification Code </td> </tr> </table>	Número de Série: 951022 Serial Number	Código de Identificação: 007 Identification Code
Instrumento de Medição/Padrão: Balança de Pressão Instrument/Standard								
Fabricante: XIAN Manufacturer								
Modelo/Tipo: YS-600/Óleo Model/Type								
<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td data-bbox="322 1041 718 1108"> Número de Série: 951022 Serial Number </td> <td data-bbox="718 1041 1184 1108"> Código de Identificação: 007 Identification Code </td> </tr> </table>	Número de Série: 951022 Serial Number	Código de Identificação: 007 Identification Code						
Número de Série: 951022 Serial Number	Código de Identificação: 007 Identification Code							
Informações Administrativas Administrative Informations								
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td data-bbox="322 1142 718 1209"> Processo INMETRO: 001012/1999 INMETRO Register </td> <td data-bbox="718 1142 1184 1209"> Data da Calibração: 10/04/2000 Calibration Date </td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="322 1209 1184 1310"> Laboratório Responsável pela Calibração: Laboratório de Pressão - LAPRE Laboratory Responsible for the Calibration </td> </tr> </table>			Processo INMETRO: 001012/1999 INMETRO Register	Data da Calibração: 10/04/2000 Calibration Date	Laboratório Responsável pela Calibração: Laboratório de Pressão - LAPRE Laboratory Responsible for the Calibration			
Processo INMETRO: 001012/1999 INMETRO Register	Data da Calibração: 10/04/2000 Calibration Date							
Laboratório Responsável pela Calibração: Laboratório de Pressão - LAPRE Laboratory Responsible for the Calibration								
28/06/2000 Data da Emissão do Certificado Issued on	 José Renato Real Siqueira Chefe da Divisão de Metrologia Mecânica Head of Division of Mechanical Metrology							
O presente certificado de calibração atende aos requisitos do ABNT-ISO/IEC-Guia 25:1993 e é válido apenas para o instrumento de medição/padrão acima caracterizado, não sendo extensivo a quaisquer outros instrumentos de medição, ainda que similares. A calibração realizada baseou-se em medições diretamente rastreadas aos padrões nacionais do Brasil. Este certificado de calibração somente pode ser reproduzido em sua forma integral; reproduções parciais devem ser previamente autorizadas pelo INMETRO.								
<i>This certificate complies with the requirements of ABNT-ISO/IEC-Guide 25:1993 and applies only to the above mentioned measurement instrument/standard and can not be extended to any other measurement instruments, even similar ones. The calibration performed was based upon measurement directly traceable to the Brazilian metrological national standards. This certificate can be reproduced only in full version; partial reproductions require previous consent of INMETRO.</i>								
LNM - Av. Nossa Senhora das Graças, 50 – Xerém - Duque de Caxias – RJ – Brasil - CEP: 25250-020 LAPRE - Tel.: (021) 679-1311 - Ramais 9046, 9042 e 9034 - Fax: (021) 679-1505 - e-mail: lapre@inmetro.gov.br								
		(Pág 1/4)						

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Calibration Certificate

LAPRE 0125/2000

Número do Certificado

Certificate Number

Características do Instrumento de Medição/Padrão

Measurement Instrument/Standard Characterization

Faixa de indicação: 0,3 a 60 MPa

Acessórios: Coleção de massas XIAN

Informações Pertinentes à Calibração

Information Concerning Calibration

Padrão Utilizado: Balança de Pressão DESGRANGES ET HUOT

Modelo: 5303 - S (PISTÃO 1334)

Incerteza de Medição: 30 ppm

Certificado de Calibração: 0068 PTB 99

Temperatura da Calibração: 20 °C ± 1 °C

Fluido Utilizado: Óleo

Massa específica: 873 kg/cm³

Tensão superficial: 0,028 N/m

Procedimento/Método de Calibração

Calibration Method

A área efetiva ($A_{0,20}$) do conjunto pistão-cilindro da balança de pressão, foi determinada a partir da comparação com um padrão do laboratório, rastreado ao PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt).

Resultados e Declaração de Incertezas

Results and Uncertainties

De acordo com o método de calibração descrito, os valores característicos determinados para o conjunto pistão-cilindro são apresentados na tabela I.

Tabela I

Identificação do Conjunto Pistão-cilindro	Faixa de Indicação (MPa)	Área Efetiva ($A_{0,20}$) x 10 ⁻⁶ m ²	Desvio Padrão x 10 ⁻⁶ m ²	Coefficiente de Deformação (λ) x 10 ⁻⁶ /MPa
Pistão 007	0,3 a 60	10,0070	0,0010	-4,4

28/06/2000

Data da Emissão do Certificado

Issued on

Walmir Sérgio da Silva
Técnico do Laboratório de Pressão
Calibration Executive

Paulo R. G. Couto
Paulo R. G. Couto
Chefe do Laboratório de Pressão
Head of Pressure Laboratory

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Calibration Certificate issued by Inmetro

LAPRE 0125/2000
Número do Certificado
Certificate Number

A tabela II apresenta os valores das massas corrigidas de cada peso e respectivas indicações de pressão, as quais foram determinadas através da seguinte equação:

$$p = \frac{m(1 - \rho_a / \rho_m) \times g_n}{A_{0,20}} \times 10^{-6} \text{ MPa}$$

Onde:

g_n = aceleração da gravidade normal: 9,80665 m/s²

ρ_a = massa específica do ar: 1,2 kg/m³

ρ_m = massa específica dos pesos: 7800 kg/m³ (aço) e 2700 kg/m³ (alumínio)

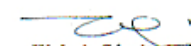
$A_{0,20}$ = área do conjunto pistão - cilindro: 10,0070 x 10⁻⁶ m².

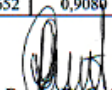
Tabela II

Identificação dos Pesos	Valor Nominal (MPa)	$m(1 - \rho_a / \rho_m)$ (kg)	Pressão (MPa)
Pistão 007	0,3	0,30738	0,3012
951022 1	5	5,08709	4,9852
951022 2	5	5,08878	4,9869
951022 3	5	5,10502	5,0028
951022 4	5	5,09090	4,9890
951022 5	5	5,10538	5,0032
951022 6	5	5,10055	4,9984
951022 7	5	5,10230	5,0002
951022 8	5	5,09971	4,9976
951022 9	5	5,10672	5,0045
951022 10	5	5,09361	4,9916
951022 11	5	5,10776	5,0055
951022 12	1	1,02021	0,9998
951022 13	1	1,02006	0,9996
951022 14	1	1,01977	0,9994
951022 BASE	1	0,92652	0,9080

28/06/2000

Data da Emissão
do Certificado
Issued on


Waldir Sérgio da Silva
Técnico do Laboratório de Pressão
Calibration Executive


Paulo R. G. Couto
Chefe do Laboratório de Pressão
Head of Pressure Laboratory

Este certificado de calibração somente pode ser reproduzido em sua forma integral; reproduções parciais devem ser previamente autorizadas pelo Inmetro.

This certificate can be reproduced only in full version; partial reproductions require previous consent of Inmetro.

(Pag 3/4)

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Calibration Certificate

LAPRE 0125/2000

Número do Certificado

Certificate Number

Continuação

Identificação dos Pesos	Valor Nominal (MPa)	$m(1 - \rho_p/\rho_m)$ (kg)	Pressão (MPa)
007 N 001*	0,1	0,09946	0,09746
007 N 002*	0,1	0,10017	0,09816
007 N 003*	0,1	0,10019	0,09817
007 N 004*	0,1	0,10025	0,09823
007 N 005*	0,3	0,30092	0,29489
007 N 006	0,5	0,50195	0,49191

A incerteza expandida (U) declarada de medição da balança de pressão, para valores iguais ou superiores a 10% do limite superior da sua faixa de indicação é: $\pm 0,015\%$, para um nível de confiança de 95,45% e $k = 2$, de acordo com ISO GUM 1995 (International Organization for Standardization, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Geneva, 1993, revised and reprinted in 1995).

Para medição de pressão fora das condições de referência, os valores apresentados na tabela II deverão ser multiplicados pelo fator:

$$\frac{g}{g_n} \times \frac{1}{1 + (\alpha_c + \alpha_p)(t - 20) + \lambda p_n}$$

Onde:

g = aceleração da gravidade local (m/s^2)

g_n = aceleração da gravidade normal: $9,80665 (m/s^2)$

t = temperatura ($^{\circ}C$) do conjunto pistão-cilindro

α_c, α_p = coeficientes de dilatação térmica linear do cilindro e pistão. ($^{\circ}C^{-1}$)

λ = coeficiente de deformação do conjunto pistão-cilindro (MPa^{-1})

P_n = Pressão nominal (MPa)

Observações:

Remarks

- 1 Pa = 1×10^{-6} MPa [pascal (Pa) Unidade de Pressão do SI];
- * Massas em alumínio.

28/06/2000

Data da Emissão
do Certificado

Issued on

Walmir Sérgio da Silva
Técnico do Laboratório de Pressão
Calibration Executor

Paulo R. G. Couto
Chefe do Laboratório de Pressão
Head of Pressure Laboratory

Este certificado de calibração somente pode ser reproduzido em sua forma integral; reproduções parciais devem ser previamente autorizadas pelo INMETRO.

This certificate can be reproduced only in full version; partial reproductions requires previous consent of INMETRO.

(Pág 4/4)

ANEXO E – Curva de Pressão de um tiro real

A curva de pressão abaixo foi cedida pelo 1º Tenente engenheiro mecânico e de armamento Carlos Frederico Chagas, então chefe da Casa Balística do Campo de Provas da Marambaia (CPrM). Ela foi anexada aqui para ilustrar de forma fidedigna o fenômeno da balística interna, no que diz respeito à pressão.

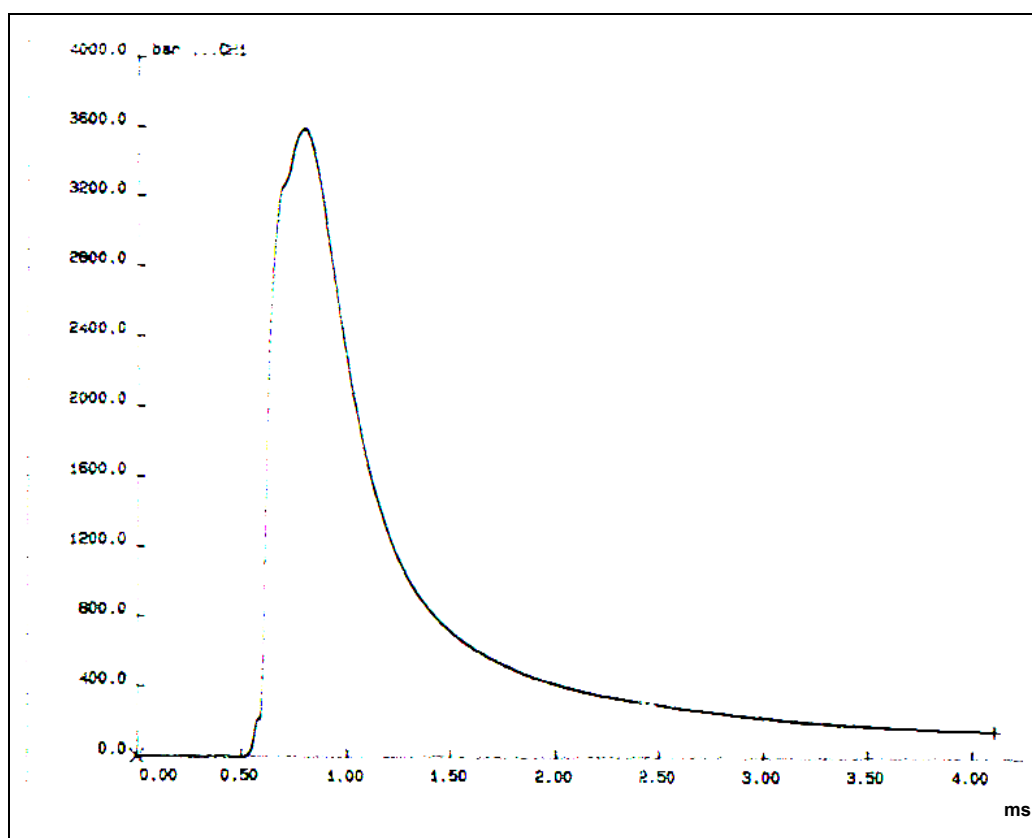


Figura 80 – Curva de pressão de um tiro real, com munição 7,62 mm, realizado na Casa Balística do Campo de Provas da Marambaia (CPrM)

Fonte: Casa Balística do CPrM