

3 Procedimento experimental

O trabalho experimental foi realizado utilizando-se os equipamentos disponíveis na PUC-Rio, juntamente com aqueles que foram cedidos pelo Instituto Militar de Engenharia (IME).

Um outro procedimento experimental, julgado com potencial de obtenção de melhores resultados, foi proposto. Esse procedimento dependia, entretanto, da fabricação de um equipamento para **simulação da balística interna**, no que diz respeito à alta pressão transiente. Este equipamento foi fabricado, conforme projeto, e se encontra em fase de testes e ajustes. No Apêndice H, há mais detalhes do procedimento experimental proposto utilizando-se o equipamento a que se deu o nome de Calibrador Dinâmico de Piezelétrico.

3.1 Procedimento experimental utilizado

Para o procedimento experimental utilizado, foi escolhido o método estático de calibração (1.2, Métodos de calibração), segundo o qual a pressão de referência é aplicada (ou aliviada) bruscamente, mas que difere de uma tarefa típica de medição de pressão na balística interna, pois nesta última a pressão é aplicada bruscamente e, logo em seguida, é aliviada também bruscamente. Na calibração estática, ou ela é aplicada bruscamente e mantida no patamar da pressão de referência, ou então, a pressão de referência, como situação inicial, é aliviada para a pressão atmosférica bruscamente, e essa situação de alívio é mantida. Essa mudança súbita na carga a que o transdutor está sujeito é necessária porque um transdutor piezelétrico, como visto na Introdução, produz um sinal elétrico de saída apenas quando experimenta uma mudança na carga a que está exposto. O método estático de calibração foi escolhido porque podia ser realizado com os equipamentos disponíveis.

O fabricante HPI¹⁰ possui um equipamento, modelo “B 640 Precision Pressure Calibrator”, para calibração estática, assim como a empresa Kistler¹¹

¹⁰ “High Pressure Instrumentation”, empresa fabricante de transdutores piezelétricos de alta pressão, e equipamentos afins. A antiga AVL deu origem à HPI.

¹¹ “Kistler Instrument Corporation”, fabrica produtos/equipamentos similares aos da HPI.

também é fabricante de equipamentos para calibração estática. No catálogo da HPI de título “Static & Dynamic Calibration of Piezoelectric High-Pressure Transducers” encontra-se um resumo sobre método de calibração estática utilizado pelo “B 640”, qual seja: “Balanças de pressão produzindo uma pressão de referência caracterizada por elevada exatidão são usadas para calibração estática. Pesos-padrão com massa conhecida são colocados sobre um pistão com seção reta conhecida, pistão este que está “apoiado” sobre um fluido hidráulico. Assim, as pressões de referência necessárias para a calibração são geradas, uma de cada vez, e aliviadas subitamente para a pressão atmosférica. Essa mudança brusca da pressão serve para determinar a sensibilidade do transdutor.” Note que o procedimento de calibração estática descrito pela HPI limita-se à depressurização súbita. O dispositivo utilizado na PUC-Rio permite tanto pressurização quanto depressurização súbitas, tornando possível avaliação de histerese¹².

O procedimento experimental utilizado consiste em pressurizar (ou depressurizar) subitamente a derivação múltipla (“manifold”), na qual se encontra instalado o transdutor piezelétrico (Figuras 9 e 10), e observar a resposta deste à medida que o tempo de duração do evento pressurização é alterado por meio de uma válvula de restrição. Procedese dessa maneira para encontrar o tempo-limite associado ao qual a resposta do transdutor mantém-se isenta de atenuação, que representaria erro na medição de pressão. Desta maneira, são obtidas várias respostas consideradas não-atenuadas, segundo critério que será apresentado adiante. A resposta não-atenuada média será correspondente à pressão ajustada na bomba, com a ajuda de um manômetro calibrado (Apêndice C) no laboratório de pressão da PUC-Rio, credenciado pelo INMETRO e, portanto, assegurando rastreabilidade ao Sistema Internacional de Unidades.

O dispositivo experimental utilizado, a seguir descrito, pode ser melhor entendido com a ajuda das Figuras 9 e 10, desenho esquemático e foto do dispositivo, respectivamente. Trata-se de uma derivação múltipla cheia de óleo hidráulico, à qual está conectado um transdutor piezelétrico de alta pressão¹³, através de uma conexão fabricada para este fim. Estão conectadas, também, à derivação múltipla, três válvulas: uma das quais na “entrada” da derivação, para ser usada como válvula de pressurização, outra no meio, para ser usada como

¹² Através de contato com o engenheiro da HPI, Heribert Ortner, obteve-se a seguinte informação: não há notícia de que haja histerese na calibração estática (Apêndice E).

válvula de restrição, e a terceira na “saída”, para ser usada como válvula de despressurização.

Com a ajuda desse dispositivo, o transdutor pode ser pressurizado (ou despressurizado) bruscamente, alterando-se o tempo de duração do evento pressurização, através da abertura da válvula de restrição, como já explicado. O dispositivo não permite alterar o tempo de duração do evento despressurização. O sinal elétrico de saída do transdutor, resultante da pressurização/despressurização, é então amplificado por um amplificador de carga para transdutor piezelétrico (Figura 11), e é mostrado na tela de um osciloscópio digital (HP 54501 A).

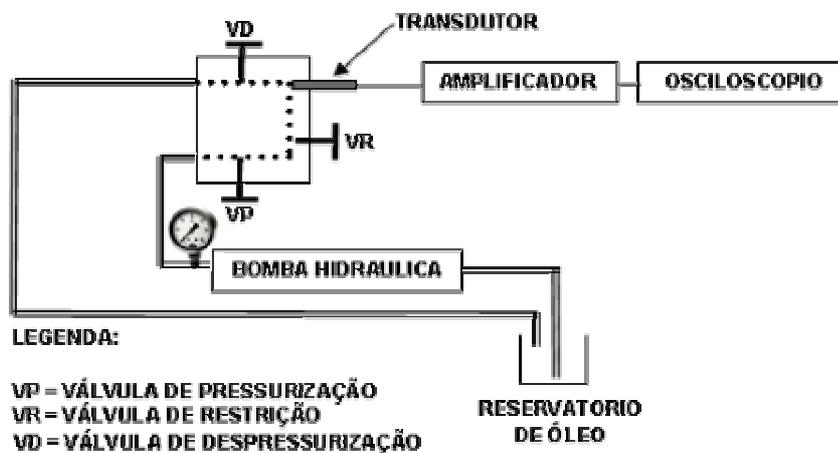


Figura 9 – Desenho esquemático do dispositivo experimental utilizado



Figura 10 – Câmara de teste, com as válvulas e com o transdutor piezelétrico de pressão



Figura 11 - Amplificador de Carga, Kistler, modelo 5004

¹³ Até 5000 bar, KIAG modelo 6203.

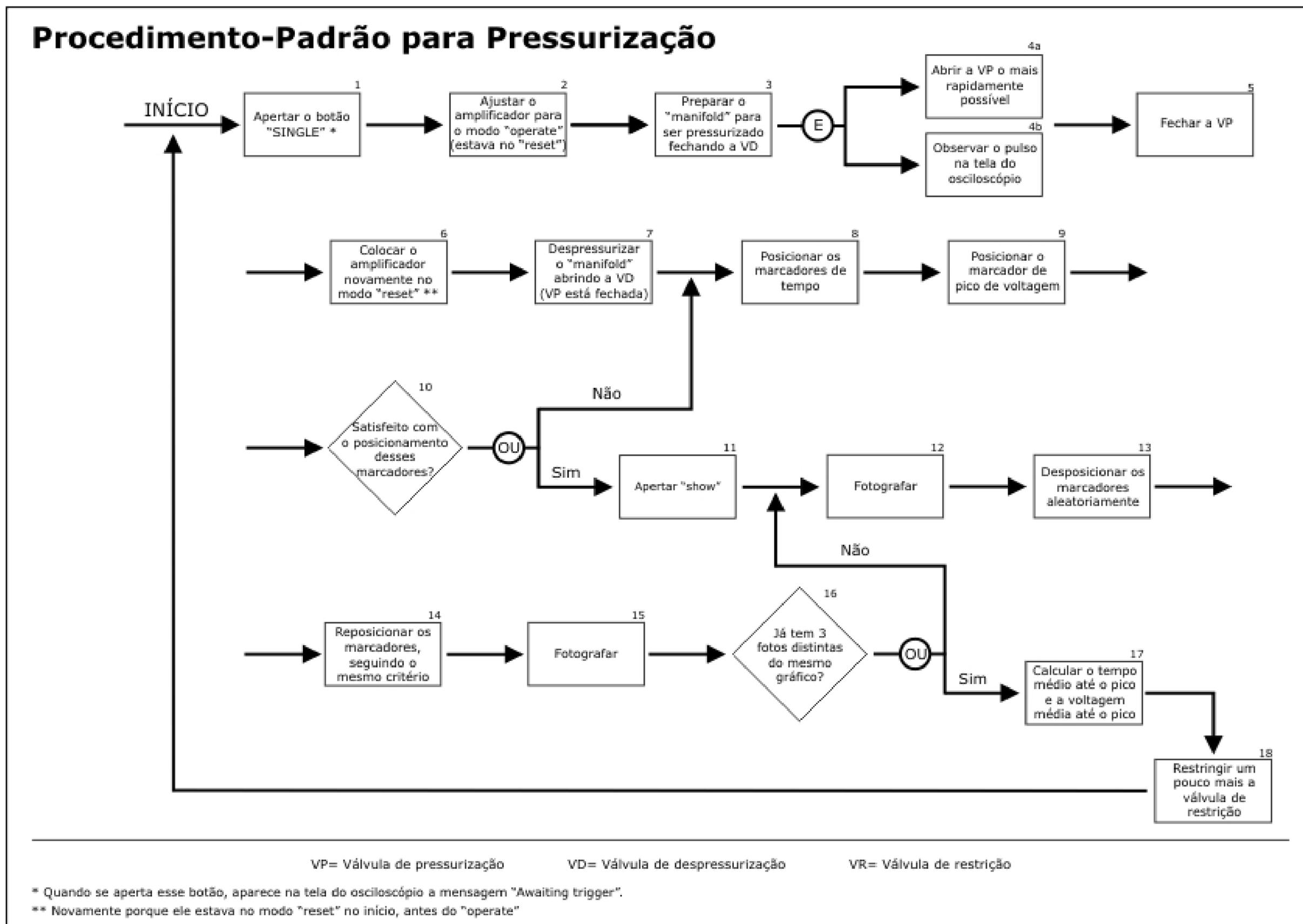


Figura 12 – Procedimento-padrão para pressurização súbita da derivação múltipla na qual está instalado o piezelétrico

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 se abre a VD bruscamente. Com isso, a pressão que atua no transdutor em estudo cai, desde a pressão de referência até a pressão atmosférica, instantaneamente. O Apêndice G descreve como são realizados os experimentos, com maior detalhamento.

3.2

Testes realizados para obtenção da curva de calibração

Foram realizados, ao todo, 340 experimentos para 10 pressões de referência diferentes. De posse dos resultados experimentais, foi escolhida a melhor curva de ajuste a esses resultados, através do método dos mínimos quadrados (2.4.8). Foram realizados muito mais experimentos de pressurização do que de despressurização, porque o dispositivo experimental utilizado, como já foi dito, não permite influenciar significativamente o tempo de duração do evento despressurização, ao passo que essa influência é fácil quando se utiliza o dispositivo para pressurização. Mesmo assim, foram realizados alguns experimentos de despressurização, para que se pudesse fazer avaliação de histerese.

Foi utilizada, em lugar da balança de peso morto, uma bomba hidráulica, para gerar cada pressão de referência em conjunto com um manômetro tipo “bourdon” calibrado (Apêndice C), para servir de padrão. O osciloscópio utilizado também foi calibrado, contra um multímetro (Apêndice D).

A resposta do transdutor, como se pode ver, é mostrada na tela de um osciloscópio digital:

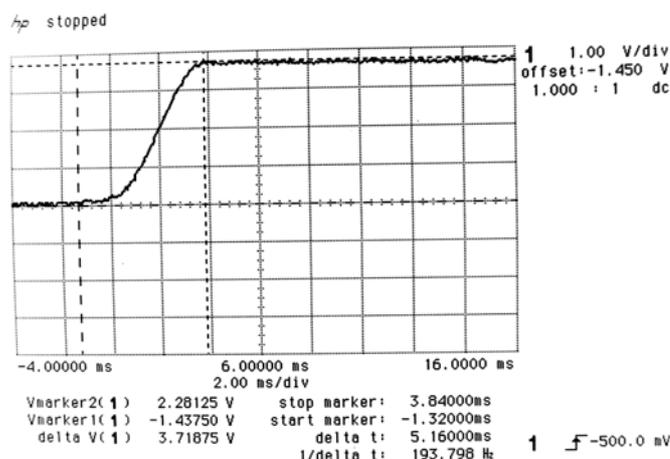


Figura 13 – Experimento 2 (Tabela 45), caracterizado pelo menor delta t dentre todos os experimentos realizados à pressão de 344,74 bar.

3.3 Processamento dos dados

Para cada pressão de referência, foram realizados n experimentos com tempos de duração diferentes. Isso foi feito com ajuda de uma válvula de restrição, cuja abertura era gradativamente diminuída para tornar o evento pressurização pouco a pouco mais lento. Os resultados desses n experimentos, realizados à mesma pressão, foram depois avaliados segundo dois critérios diferentes para rejeição dos experimentos não confiáveis: o critério de atenuação óbvia e, em seguida, o critério de Chauvenet (2.4.5).

O critério de atenuação óbvia, utilizado para descarte dos experimentos cujas respostas estavam claramente inferiores ao valor verdadeiro, foi o seguinte: Como se sabe, à medida que o tempo de duração do evento aumenta, há uma tendência de a resposta ficar atenuada (Figura 14). Esta é uma característica dos transdutores piezelétricos. Considerar-se-á que a resposta está atenuada significativamente a partir do ponto em que o desvio padrão da tensão, calculado com todos os experimentos, desde o de menor tempo de duração até o experimento correspondente àquele ponto, é sempre (ou quase sempre) crescente, ou a partir do ponto seguinte, se o imediatamente anterior provocou queda ou inalteração no desvio padrão da tensão. Veja-se, como exemplo, o estudo abaixo dos experimentos realizados à pressão de 68,95 bar:

Critério de Atenuação Óbvia: A partir do experimento 22, de tempo médio de duração (tempo médio até o pico) de 26 ms, o desvio padrão da tensão é sempre crescente (Tabela 4), mas a resposta correspondente a 26 ms não será considerada atenuada, já que a inclusão deste experimento provocou queda no desvio padrão da tensão de 6,79 para 6,73, conforme Tabela 4.

Tabela 3 – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 1000 psi (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

Tabela 3 (continuação) – Utilização dos critérios de atenuação e de Chauvenet para rejeição de dados. Experimentos a 1000 psi (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?
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	

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

Tabela 4 – Análise do desvio padrão da tensão, à medida que se inclui, no cálculo desse desvio, experimentos cada vez mais lentos, ou seja, caracterizados por maior Δt médio até o pico

Δt médio até o pico (ms)	Desvio padrão da tensão (mV)	Δt médio até o pico (ms)	Desvio padrão da tensão (mV)
3,1		18,3	7,09
4,3	7,37	19,0	6,91
6,0	5,74	19,7	7,07
6,8	8,09	20,1	7,00
7,2	8,05	22,4	6,92
7,4	7,82	22,9	6,80
7,7	7,52	23,3	6,67
8,2	8,16	24,7	6,54
8,4	8,26	24,9	6,58
10,2	8,25	25,7	6,79
14,3	7,87	26,0	6,73
15,1	7,54	32,4	7,29
16,3	7,53	33,7	7,39
17,0	7,26	41,9	7,80
17,1	7,24	48,2	8,55
17,2	7,01	52,7	9,62
17,6	6,88	62,0	9,87
17,8	6,69	71,8	10,64

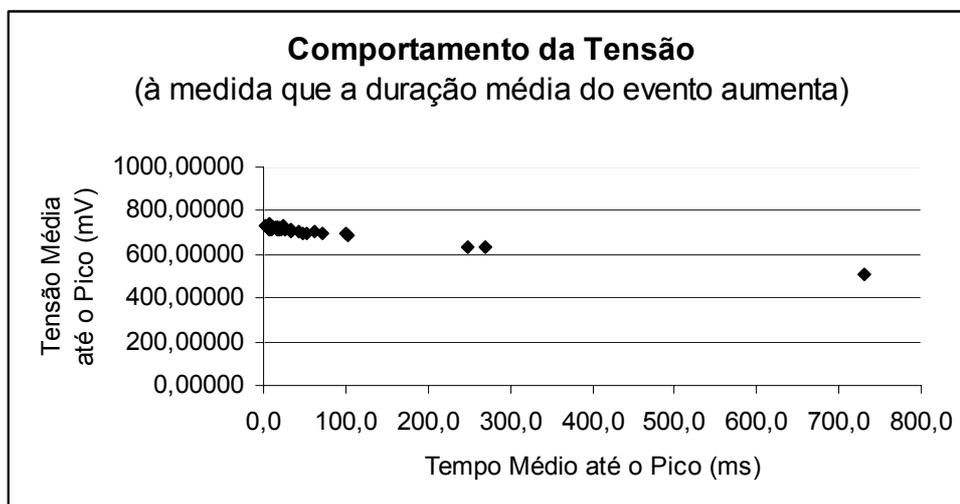


Figura 14 – Tensão média versus tempo médio até o pico. Pressão de 1000 psi (68,95 bar)

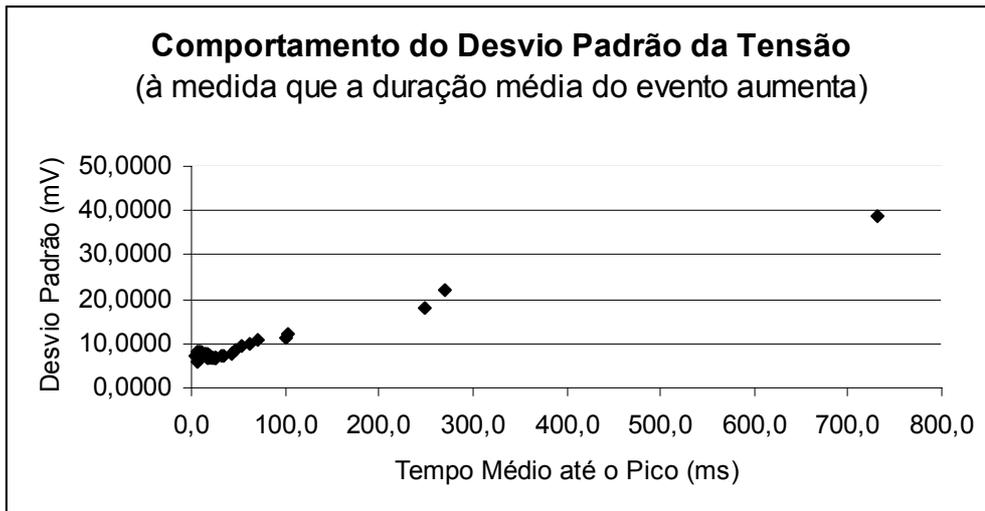


Figura 15 – Desvio padrão como função do tempo médio até o pico. Pressão de 68,95 bar

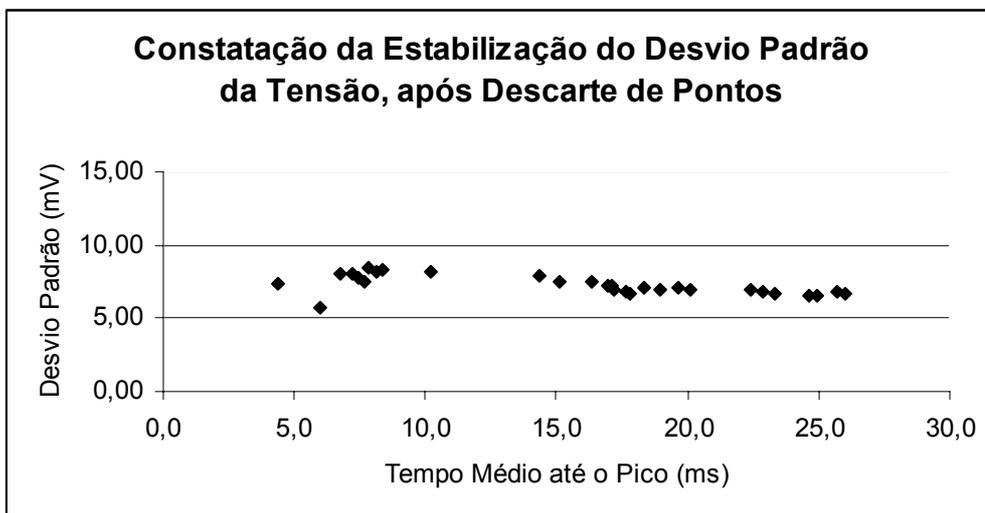


Figura 16 – Estabilização do desvio padrão da tensão, após descarte de pontos pelos critérios de atenuação e de Chauvenet. Pressão de 68,95 bar

Após descarte dos experimentos cujas respostas foram consideradas atenuadas, pode-se aplicar o critério de Chauvenet ao universo restante de pontos, considerando-os pertencentes a uma mesma população (Tabela 3, coluna da direita). Foi elaborado um programa em linguagem Matlab para “rodar” o critério de Chauvenet (Apêndice B). Esse programa foi aplicado a todos os experimentos não-atenuados de uma mesma pressão de referência, para que fossem eliminados experimentos cujos resultados fossem pouco prováveis, e poupou muito tempo de trabalho. No subitem 2.4.5 do capítulo Fundamentos teóricos, o critério de Chauvenet para rejeição de leituras é explicado em detalhes. Seguindo orientação de Holman (2001), esse critério foi aplicado apenas 1 (uma) vez para cada conjunto de experimentos de uma mesma

população. Uma vez rejeitados os dados não confiáveis, por ambos os critérios, constatou-se a estabilização do desvio padrão da tensão, como se pode ver pelo confronto das Figuras 15 e 16. Com os dados confiáveis, foi calculada a resposta média do transdutor (e sua incerteza), resposta média esta correspondente à pressão de referência, que também tem uma dada incerteza, obtida a partir da calibração do manômetro (Apêndice C). O programa constante do Apêndice B, além de rejeitar dados não confiáveis, também calcula a nova média e o novo desvio padrão com os dados não rejeitados. Essa nova média do sinal de saída do piezelétrico é a resposta média do transdutor, equivalente à pressão de referência selecionada, mas ainda carente da correção através da curva de calibração do osciloscópio contra o multímetro (Apêndice D). O “novo” desvio padrão, entretanto, não pode ser computado como a incerteza padrão do sinal de saída do transdutor, pois esta última é resultado da combinação de várias incertezas, quais sejam: incerteza do marcador U_m , incerteza de medição de tensão com o osciloscópio U_{osc} , e a incerteza padrão dos dados experimentais não rejeitados u_{exp} (“novo” desvio padrão, fornecido pelo programa). A incerteza padrão combinada u_v , para um nível de confiança de 95,45%, é dada (ISO GUM, 1998) por:

$$u_v^2 = (u_{exp})^2 + (u_{osc})^2 + (u_m)^2 \quad (12)$$

onde $u_{exp} = U_{exp} / 2$ e $U_{exp} = (t\text{-student} * (\text{“novo” desvio padrão}))$, $u_{osc} = U_{osc} / 2$, obtida através da calibração do osciloscópio (Apêndice D), e $u_m = U_m / 3^{0.5}$ (2.4.6, distribuição de probabilidade retangular), onde $U_m = (V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n}) / 2$. Como para cada experimento foi posicionado 3 vezes o marcador de tensão (Apêndice G), é fácil encontrar o $V_{m\acute{a}x}$ e o $V_{m\acute{i}n}$ para cada experimento. Deve-se entrar com o valor de $(V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n})$ do experimento cuja referida diferença for a maior dentre todos os experimentos àquela pressão, o que é feito em favor da segurança.

$$u_v^2 = (U_{exp} / 2)^2 + (U_{osc} / 2)^2 + (U_m / 3^{0.5})^2 \quad (13)$$

A incerteza expandida U_v da tensão média equivalente a uma certa pressão de referência pode, então, ser calculada (ISO GUM, 1998) para um nível de confiança de 95,45% por:

$$U_v = 2 u_v \quad (14)$$

Desta maneira, pode-se relacionar cada pressão e sua incerteza ($P \pm U_P$) a uma tensão média de saída¹⁴ do transdutor piezelétrico e sua incerteza ($V \pm U_V$), obtendo-se assim a curva de calibração do transdutor pela aplicação do método dos mínimos quadrados (utilizando algumas funções diferentes) a esses dados experimentais, e escolhendo-se a função cuja incerteza do ajuste for a menor, conforme descrito em 2.4.8.

A vantagem de se obter uma curva de calibração para o transdutor é que o comportamento do mesmo pode ser estimado em pontos não determinados experimentalmente, 82,74 bar, por exemplo, entre duas pressões de referência diferentes (Tabela 5). Outra vantagem é se obter a incerteza total de medição da pressão, que inclui outros fatores não levados em conta. Segundo Orlando (2003), ao calcular a incerteza total de medição de pressão com o transdutor, as seguintes incertezas padrão devem ser calculadas:

- A incerteza padrão da tensão de saída: $u_v = U_v / 2$;
- A incerteza padrão da pressão: $u_p = U_p / 2$;
- A incerteza do ajuste: u_{ajuste} .

A incerteza combinada (u) e a incerteza expandida (U) podem ser calculadas como:

$$u^2 = (u_p)^2 + (u_{ajuste})^2 + (k \cdot u_v)^2 \quad (15)$$

$$U = t_{v,p} \cdot u \quad (16)$$

Em (16), $t_{v,p}$ representa o fator de abrangência t de Student, como visto em 2.4.3, no capítulo de Fundamentos teóricos.

¹⁴ Já corrigida pela curva de calibração do osciloscópio.