

4 Análise dos resultados experimentais

Neste capítulo, à luz do capítulo anterior e dos Fundamentos teóricos, é feita uma análise criteriosa dos resultados experimentais.

4.1 Tensão média “equivalente” e incerteza expandida U_{exp} dos resultados dos experimentos

A Tabela 5, abaixo, mostra um resumo dos resultados experimentais. A tensão média “equivalente” (TME) e o desvio padrão foram calculados apenas com os experimentos não descartados por nenhum dos dois critérios (de atenuação e de Chauvenet). O desvio padrão (DP) constante da Tabela 5 é o desvio padrão dos resultados dos experimentos (das observações) e não o desvio padrão da média, já que quando se faz uma medição na balística interna, ela é feita uma única vez com o transdutor, e não várias vezes para depois se calcular a média dessas várias medidas. Isso decorre do fato de o evento objeto da medição ser instantâneo, o que impossibilita várias medições do mesmo. O significado final é o seguinte: se for feita mais uma observação (se for realizado mais um experimento), espera-se que seu resultado esteja compreendido no intervalo $TME \pm U_{exp}$, com um nível de confiança de 95,45%. Neste intervalo, $U_{exp} = t_{v,p} \times DP$ é a incerteza expandida.

Tabela 5: Análise estatística dos dados experimentais

P		TME (mV)	TDE	$t_{v,p}$	DP (mV)	U_{exp} (mV)	TMP (ms)	
(psi)	(bar)						MÍN	MÁX
500	34,47	347,35	42	2,06	6,75	13,91	4,5	135,7
1000	68,95	722,70	29	2,098	6,09	12,78	3,1	26,0
1500	103,42	1091,8	32	2,086	15,6	32,54	5,7	66,8
2000	137,90	1489,1	32	2,086	18,2	37,97	3,2	51,7
2500	172,37	1836,3	35	2,074	45,9	95,2	2,9	135,0
3000	206,84	2189,6	20	2,14	62,9	134,61	2,5	122,3
3500	241,32	2475,9	29	2,098	60,2	126,30	2,9	118,0
4000	275,79	2951,6	23	2,122	41,2	87,43	1,9	9,5
4500	310,26	3303,6	12	2,25	36	81	1,9	11,8
5000	344,74	3665,6	30	2,094	29,8	62,4	5,1	94,7

Notas: Estão na página seguinte.

Tabela 5 (Continuação) - Análise estatística dos dados experimentais

Notas: P = Pressão de referência
TME = Tensão média “equivalente” à P, ainda não corrigida pela equação de calibração do osciloscópio;
TDE = Total de experimentos aprovados dentre os realizados à dada P;
 $t_{v,p}$ = t de Student;
DP = Desvio padrão dos resultados desses experimentos;
 $U_{exp} = t_{v,p} \times DP$ é a incerteza expandida
TMP = Tempo médio até o pico

4.2 Avaliação de histerese

Para a pressão de 34,47 bar, os experimentos rejeitados foram os de número 40 e 5, respectivamente pelos critérios de atenuação óbvia e de Chauvenet. Ambos experimentos de pressurização. Os experimentos de despressurização, 41, 42, 43, e 44, foram aprovados pelos dois critérios, assim como os outros 38 experimentos de pressurização, o que é um forte indício de não haver o fenômeno de histerese no transdutor. Também para pressão de 68,95 bar, nenhum dos experimentos de despressurização foi descartado por qualquer dos critérios. Eles foram aprovados junto com outros 26 experimentos de pressurização. Idem para as pressões de 103,42; 137,90; 172,37; 241,32; 275,79; 310,26; 344,74 bar. Para a pressão de 206,84 bar, não foram realizados experimentos de despressurização. De toda forma, como visto para todas as outras pressões, não se verificou comportamento de histerese no transdutor.

O fato de todos os experimentos reprovados terem sido de pressurização não é de se surpreender, já que só foi possível fazer experimentos lentos (aqueles mais suscetíveis de terem resposta atenuada) do tipo pressurização e já que a quantidade de experimentos de pressurização foi muito maior que a de despressurização.

4.3 A combinação das incertezas que contribuem para a incerteza total de medição da tensão, com a finalidade de obtenção desta incerteza.

Como visto no capítulo anterior, há que se fazer a propagação das incertezas através das Equações (13) e (14). Obtém-se, então, a Tabela 6, apresentada a seguir:

Tabela 6 – A combinação das incertezas U_{exp} , U_m , e U_{osc} , para a obtenção da incerteza total U_v de medição da tensão

Pressão (bar)	U_{exp} (mV)	U_M (mV)	U_{osc} (mV)	u_v (mV)	U_v (mV)
34,47	13,91	1,5625	3,11	7,18	14,36
68,95	12,78	15,625	5,93	11,44	22,89
103,42	32,54	7,8	17,46	19,00	38,00
137,90	37,97	23,44	17,46	24,89	49,79
172,37	95,20	78,13	38,38	68,33	136,65
206,84	134,61	46,88	38,38	75,04	150,07
241,32	126,30	46,88	38,38	71,33	142,67
275,79	87,43	46,88	38,38	54,88	109,76
310,26	81,00	46,88	38,38	52,35	104,71
344,74	62,40	15,63	38,38	37,72	75,45

4.4

A curva de calibração: Pressão x Tensão

A tabela abaixo mostra os valores de pressão e os valores correspondentes de voltagem, juntamente com suas incertezas.

Tabela 7 – Pressão (com uma dada incerteza) versus Tensão (com uma dada incerteza)

Pressão (bar)		Tensão (mV)	
Valor corrigido pela equação de calibração do manômetro	U_p	Valor corrigido pela equação de calibração do osciloscópio	U_v
34,70	1,19	350,29	14,36
70,30	1,19	729,18	22,89
105,80	1,19	1102,45	38,00
141,10	1,19	1503,63	49,79
176,20	1,19	1845,41	136,65
211,20	1,19	2200,46	150,07
246,10	1,19	2488,18	142,67
280,80	1,19	2966,24	109,76
315,30	1,19	3319,99	104,71
349,80	1,19	3683,79	75,45

Para fins de interpolação, foram ajustadas, pelo método dos mínimos quadrados (2.4.8, de Fundamentos teóricos), algumas curvas aos dados, conforme Tabela 8 e gráficos a seguir:

Tabela 8 – Teste de 4 curvas de ajuste diferentes aos dados, para escolha da melhor

T (mV)	PC (bar)	Ajuste linear: $y=ax$	Ajuste linear $Y=ax+b$	Ajuste polinômio 2º grau	Ajuste polinômio 3º grau
350,29	34,7	33,452695	34,66285	33,33661553	34,95327693
729,18	70,3	69,63669	70,6574	70,21641322	69,79087077
1102,45	105,8	105,283975	106,11805	106,3245732	105,4644437
1503,63	141,1	143,596665	144,23015	144,8840435	144,9439994
1845,41	176,2	176,236655	176,69925	177,5311315	179,2252255

Tabela 8 (Continuação) – Teste de 4 curvas de ajuste diferentes aos dados, para escolha daquela caracterizada pela menor incerteza do ajuste

T (mV)	PC (bar)	Ajuste linear: $y=ax$	Ajuste linear $Y=ax+b$	Ajuste polinômio 2º grau	Ajuste polinômio 3º grau
2200,46	211,2	210,14393	210,429	211,2478526	215,1963269
2488,18	246,1	237,62119	237,7624	238,4227442	244,4322108
2966,24	280,8	283,27592	283,1781	283,2822042	292,769231
3319,99	315,3	317,059045	316,78435	316,2414511	328,0150449
3683,79	349,8	351,801945	351,34535	349,928231	363,4868806
$u_{\text{ajuste}} =$		3,2443869	3,365897655	3,469016622	9,446180779

Notas: A melhor curva de ajuste aos dados é aquela cuja incerteza u_{ajuste} é a menor:
 Ajuste linear, portanto, do tipo $y=ax$;
 T = Tensão corrigida pela equação de calibração do osciloscópio;
 PC = Pressão corrigida pela equação de calibração do manômetro;

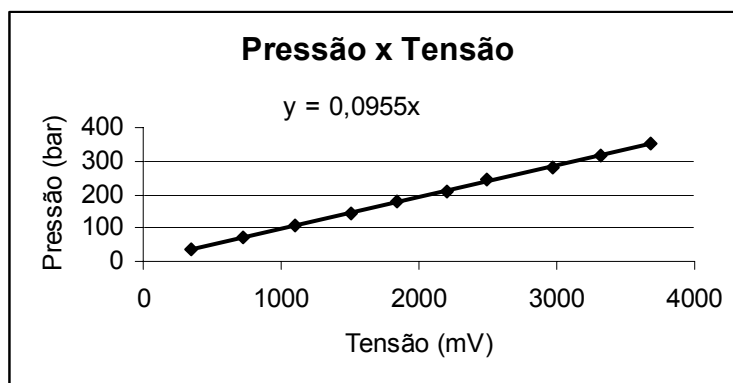


Figura 17 – Melhor curva de ajuste: linear do tipo $y=ax$,

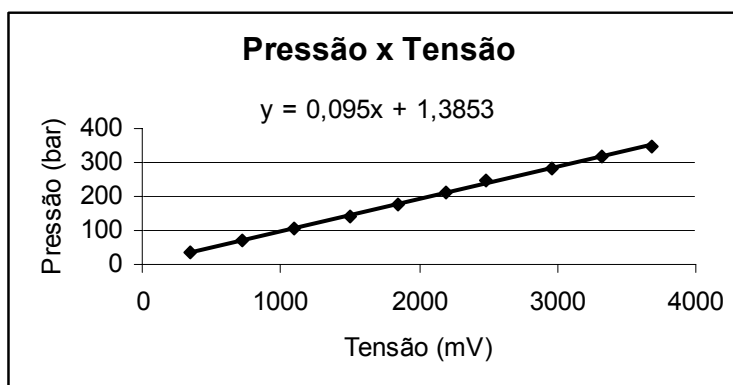


Figura 18 – Ajuste linear do tipo $y=ax+b$

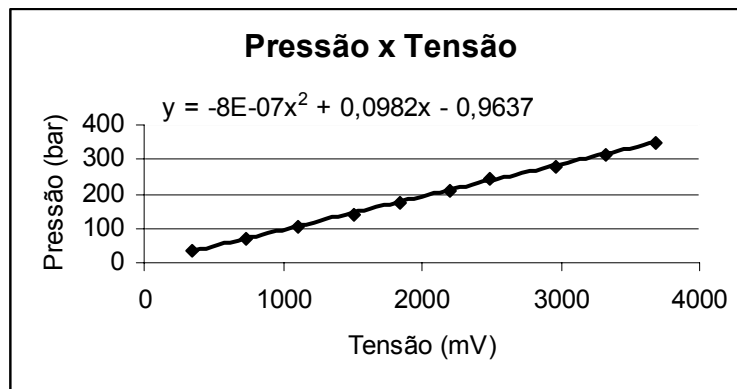


Figura 19 – Ajuste com polinômio do 2º grau

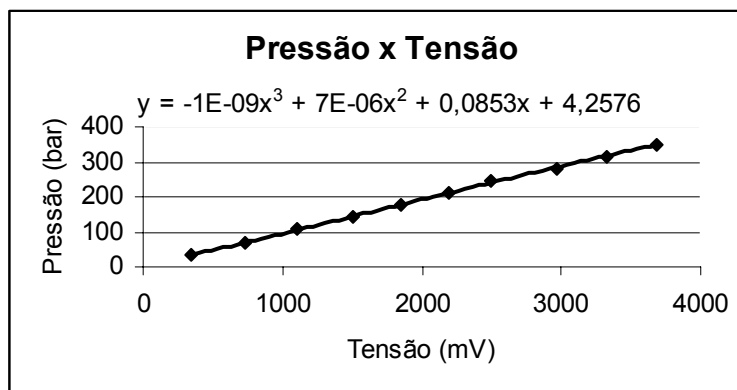


Figura 20 – Ajuste com polinômio do 3º grau

Assim, foi escolhida a equação $P = 0,0955T$ para obtenção da pressão P , a partir da tensão de saída T do transdutor (corrigida). A incerteza de ajuste é: $u_{\text{ajuste}} = 3,2443869 \text{ bar}$

A incerteza global combinada (u) de medição de pressão a partir da voltagem pode ser calculada pela Equação (15): $u^2 = (u_P)^2 + (u_{\text{ajuste}})^2 + (k \cdot u_V)^2 = (U_P / 2)^2 + (u_{\text{ajuste}})^2 + (k \cdot U_V / 2)^2$.

A incerteza expandida (U) é calculada pela multiplicação da incerteza combinada (u) por t de Student ($t_{v,p} = 2,32$ para 10 pontos). A tabela a seguir apresenta os valores de pressão corrigidos, juntamente com sua incerteza de medição.

Tabela 9 – Inferência da pressão, a partir da tensão de saída T do transdutor (corrigida)

Tensão de Saída (mV)	Pressão (bar)	
	Valor Corrigido	u
350,29	34,70	3,3690120
729,18	70,30	3,4748690
1102,45	105,80	3,7646356
1503,63	141,10	4,0660111
1845,41	176,20	7,3113737
2200,46	211,20	7,8885594
2488,18	246,10	7,5690240
2966,24	280,80	6,1926223
3319,99	315,30	5,9899162
3683,79	349,80	4,8846482

Como usual em aplicação de transdutor de pressão, a incerteza do mesmo é referida à faixa, obtida da razão entre a máxima incerteza u encontrada e a máxima pressão: $7,8885594/349,80 = 2,3 \%$

4.5

A influência da pressão no tempo-limite associado ao qual a resposta do transdutor mantém-se isenta de atenuação

Tabela 10 - Pressão x Tempo

Pressão (bar)	Tempo-Limite (ms)
34,70	135,7
70,30	26,0
105,80	66,8
141,10	51,7
176,20	135,0
211,20	122,3
246,10	118,0
280,80	9,5
315,30	11,8
349,80	94,7

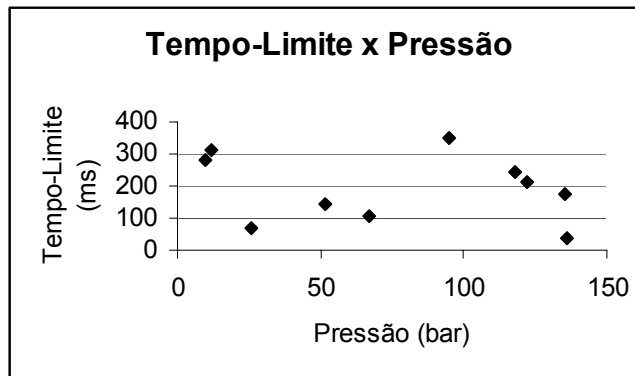


Figura 21 – Tempo-Limite x Pressão

Como se vê na Figura, o comportamento do tempo-limite até o qual não há atenuação varia muito de uma pressão para outra, o que poderia indicar que o critério de atenuação utilizado talvez esteja prejudicado pela dificuldade de controle do tempo de duração do evento pressurização/despressurização, dificuldade essa decorrente do referido controle ser feito manualmente, mesmo no modo pressurização.