

5. Procedimento Experimental

O trabalho experimental foi realizado utilizando-se os equipamentos existentes no SENAI-Rio, PUC-Rio, Laboratório de pressão da UN-BC (Petrobras) e de um equipamento especialmente desenvolvido para o experimento, denominado neste trabalho como “máquina de teste”, descrito em detalhes no próximo sub-item. Esta máquina de teste foi projetada com o objetivo de se obter elevada praticidade no experimento, baixa incerteza a nível laboratorial nas medições e confiabilidade nos resultados.

5.1. A Máquina de Teste

5.1.1. Descrição

O equipamento é composto praticamente por dois cilindros multiplicadores da pressão, duas válvulas manifold de 03 vias onde serão instalados os transmissores objetivo dos ensaios, 04 válvulas manifold de 02 vias, uma placa suporte, tubulação de instrumentação e conexões.

Com exceção da placa suporte que foi construída em alumínio, todos os demais componentes foram adquiridos ou usinados em aço inox AISI 316, de tal sorte a não sofrerem processo de oxidação, contaminando o óleo hidráulico utilizado e garantindo elevada estabilidade na máquina de teste.

Este equipamento foi construído em virtude da grande dificuldade de medir a pressão diferencial, face a elevada pressão estática em várias fases do trabalho, com baixa incerteza e elevada exatidão.

Pode ser observado na Fig. 47 que o interno do cilindro é formado de dois êmbolos, usinados em uma peça única, de maneira que, a força F aplicada sobre um embolo é totalmente transmitida ao outro embolo adjacente, desconsiderando a força de atrito estática entre as paredes dos cilindros (baixa pressão e alta pressão) e as gaxetas/guia dos êmbolos.

$$F = P_a \cdot S_a = P_b \cdot S_b \quad (44)$$

onde, P_a – Alta pressão

P_b - Baixa pressão

Sa – Área do pistão de alta pressão

Sb - Área do pistão de baixa pressão

Se $S_b=100.S_a$,

$$D_b = 10.D_a \quad (45)$$

$$P_a = 100. P_b \quad (46)$$

Concluí-se que, para a multiplicação da baixa pressão (P_b) por 100 é necessário que a relação entre os diâmetros seja de 10. Neste projeto da máquina de teste optou-se por fazer o diâmetro menor $D_a= 10$ mm e o diâmetro maior $D_b= 100$ mm.

Como exemplo pode-se citar que, para $P_b = 0,2$ MPa temos $P_a= 20$ MPa

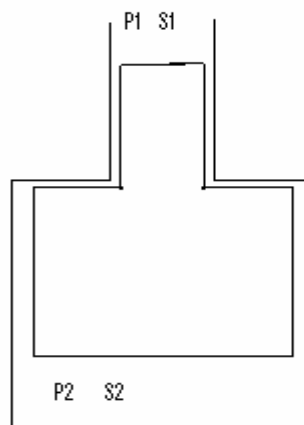


Figura 47: Desenho esquemático dos 02 êmbolos (baixa pressão e alta pressão) dentro do cilindro.

Após a calibração da máquina de teste, no laboratório de pressão da Petrobras (UN-BC), acreditado pela Rede Brasileira de Calibração, medem-se as pressões na baixa pressão e através dos dados levantados na calibração do equipamento, obtendo-se as altas pressões necessárias ao experimento.

Todas as informações relativas ao processo de calibração, detalhes da

montagem necessária, certificados de calibração dos instrumentos utilizados, dados levantados e cálculos de incerteza estão disponíveis no Apêndice A.

A Fig. 48 apresenta a vista geral da Máquina de Teste. A Tab. 8 apresenta a especificação dos componentes.

Tabela 8 - Especificação dos componentes da máquina de teste

Num.	Descrição	Material	Observações
01	Placa de suportaç�o	Alum�nio	
02	Cilindro multiplicador press�o	Inox AISI 316	
03	Embolo de pressuriza�o	Inox AISI 316	
07	Tampa do cilindro	Inox AISI 316	
08	Cantoneira L, suporta�o cilindro	Inox AISI 316	
09	V�lvula manifold 03 vias	Inox AISI 316	
10	Vedante da tampa		
12	Tubing de instrumenta�o, 25 MPA	Inox AISI 316	
13	Tee de instrumenta�o, 25 MPA	Inox AISI 316	
14	Uni�o macho de instrumenta�o, 25 MPA	Inox AISI 316	
15	Parafuso cabe�a sextavada	Inox AISI 316	Fixa�o cilindro
16	Parafuso cabe�a sextavada	Inox AISI 316	Fixa�o tampa
17	Uni�o macho de instrumenta�o, 25 MPA	Inox AISI 316	
18	Adaptador de Tee para v�lvula manifold de 02 vias	Inox AISI 316	

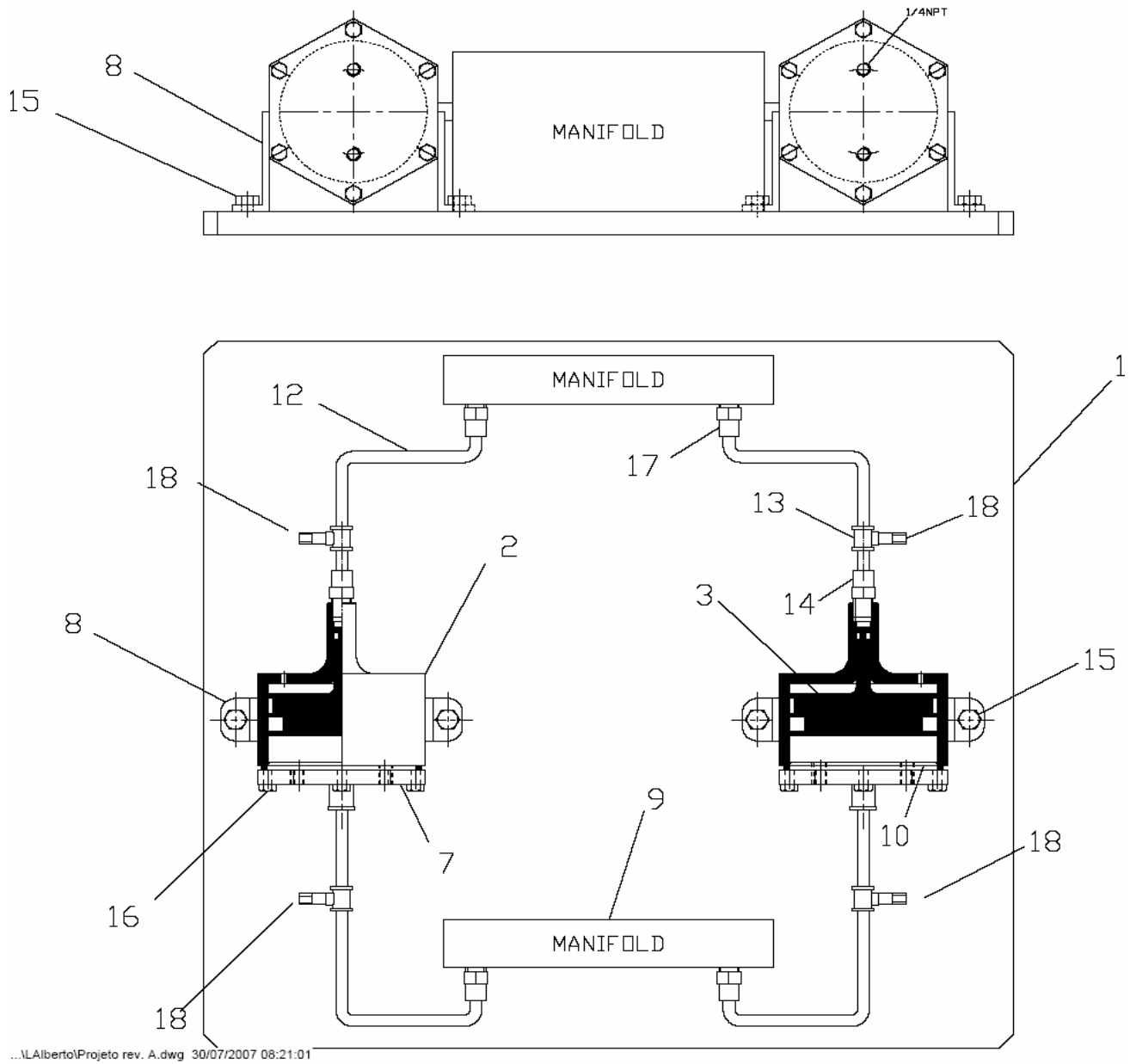


Figura 48: Vista geral da Máquina de Teste

5.1.2. Procedimento de cálculo das constantes α e β .

Em decorrência da força de atrito entre os êmbolos (de alta e baixa pressão) a reta P_a versus P_b não passa pela origem podendo ser escrita conforme

$$P_a = \alpha + \beta P_b. \quad (47)$$

Derivando S^2 (variância do ajuste) em relação a α e após em relação a β e igualando-se a zero, obtém-se duas equações. Destas duas equações com duas incógnitas, podemos extrair α e β .

Um ajuste pelo método dos mínimos quadrados permite calcular os valores de

$$\alpha = \frac{\left(\sum_{i=1}^n P_{a_i}\right)\left(\sum_{i=1}^n P_{b_i}^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n P_{a_i} \cdot P_{b_i}\right)\left(\sum_{i=1}^n P_{b_i}\right)}{n \cdot \left(\sum_{i=1}^n P_{b_i}^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n P_{b_i}\right)^2}. \quad (48)$$

$$\beta = \frac{n \cdot \left(\sum_{i=1}^n P_{a_i} \cdot P_{b_i}\right) - \left(\sum_{i=1}^n P_{a_i}\right)\left(\sum_{i=1}^n P_{b_i}\right)}{n \cdot \left(\sum_{i=1}^n P_{b_i}^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n P_{b_i}\right)^2}. \quad (49)$$

5.1.3. Calibração da Máquina de teste

Com o objetivo de melhor identificar os índices das diversas equações a serem utilizadas, os cilindros foram nomeados como cilindro X, para o lado esquerdo, e cilindro Y para o lado direito, com a máquina vista pelo lado dos cilindros de baixa pressão, Fig. 48.

Foram utilizados nos experimentos os seguintes instrumentos, cujos certificados encontram-se no Apêndice B.

Para baixa pressão:

Manômetro digital, modelo AQS-2 CI, faixa de indicação 0 a 60 PSI, de fabricação Ashcroft.

Incerteza expandida (U) ao nível de confiabilidade de 95,45% ($k = 2$) = 0,0042

PSI (0,0003 kgf/cm²). Portanto a incerteza $u = U/2 = 0,00015$ kgf/cm².

Para alta pressão:

Manômetro digital, modelo AQS-2, faixa de indicação 0 a 3000 PSI, de fabricação Dresser.

Incerteza expandida (U) ao nível de confiabilidade de 95,45% ($k=2$) = 0,51 PSI (0,035 kgf/cm²). Portanto a incerteza $u = U/2 = 0,0175$ kgf/cm².

Os circuitos de alta e baixa pressão foram preenchidos com óleo mineral, cuidando-se para que todo o ar porventura existente fosse retirado e iniciaram-se os testes, pressurizando-se no circuito de baixa pressão e medindo-se em ambos. Em decorrência da inércia do sistema hidráulico foi necessário um tempo de estabilização de 15 minutos por ponto de amostragem.

5.1.3.1. Calibração do cilindro X

Tabela 9 - valores medidos no cilindro X

Ponto	Pb (kgf/cm ²) em carga	Pa (kgf/cm ²) em carga *	Pa (kgf/cm ²) em carga **
1	0,9001	53,9	53,75
2	1,0001	64,35	64,10
3	1,1001	74,92	73,95
4	1,2001	84,67	84,15
5	1,3001	94,23	93,92
6	1,4001	104,13	103,95
7	1,5001	113,83	113,3
8	1,6001	123,41	122,94
9	1,7001	133,13	132,88
10	1,8001	142,90	142,25
11	1,9001	152,71	152,10
12	2,0001	162,18	161,85
13	2,1001	171,76	171,32
14	2,2001	183,04	182,85
15	2,3001	191,68	191,42
16	2,4001	200,46	200,25

Observações:

* Experimento realizado em 17/04/2008 com temperatura controlada de 20,6⁰ C e

umidade de 41%

** Experimento realizado em 29/04/2008 com temperatura controlada de 20,9 °C e umidade de 40%

Utilizando-se as Eq. (48) e (49), tem-se :

$$\alpha = -33,245 \quad (50)$$

$$\beta = 97,724 \quad (51)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-2} \cdot \sum_{i=1}^n [Pa_i - \alpha - \beta \cdot Pb_i]^2} = 0,557 \text{ kgf/cm}^2 \quad (52)$$

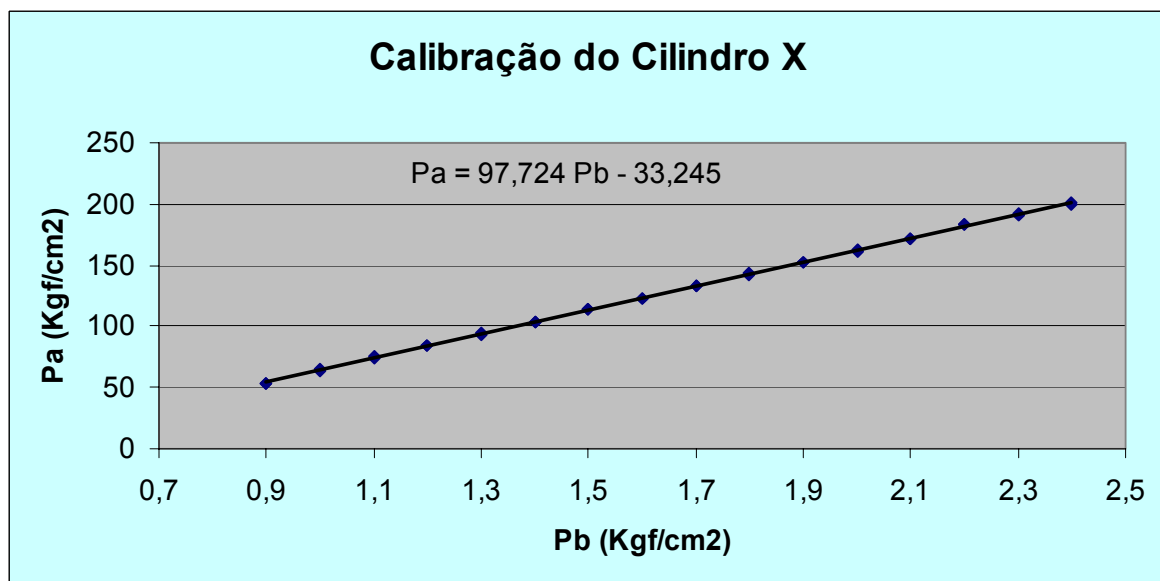


Figura 49: Relação entre Pa e Pb, mostrando a equação da reta ajustada

A incerteza do ajuste é calculada conforme Eq. (53) :

$$u_{\text{verd Pa}} = [u_a^2 + s^2 + (\frac{\partial Pa}{\partial Pb} \cdot u_b)^2]^{1/2} = [u_a^2 + s^2 + (\beta u_b)^2]^{1/2} = 0,557 \text{ kgf/cm}^2 \quad (53)$$

A incerteza verdadeira expandida de Pax a partir da medição de Pb, Pa e reta de ajuste, utilizando-se uma distribuição t-student, e nível de confiança de 95,45% é:

$$U_{\text{verd Pa x}} = 2,09 \times 0,557 = 1,16 \text{ kgf/cm}^2 \quad (54)$$

5.1.3.2. Calibração do cilindro Y

Tabela 10 - Valores medidos no cilindro Y

Ponto	Pb (kgf/cm ²) em carga	Pa (kgf/cm ²) em carga *	Pa (kgf/cm ²) em carga **
1	1,1001	75,85	75,84
2	1,2001	85,40	85,20
3	1,3001	94,38	94,11
4	1,4001	103,66	102,95
5	1,5001	112,18	111,9
6	1,6001	121,27	120,85
7	1,7001	130,82	130,2
8	1,8001	140,22	140,01
9	1,9001	150,16	149,96
10	2,0001	159,53	159,01
11	2,1001	169,03	168,80
12	2,2001	178,32	178,24
13	2,3001	187,79	187,4
14	2,4001	197,24	196,95

Observações:

* Experimento realizado em 29/04/2008 com temperatura controlada de 20,9⁰ C e umidade de 40%

** Experimento realizado em 03/06/2008 com temperatura controlada de 19,9⁰ C e umidade de 53%

Utilizando-se as Eq. (48) e (49), tem-se :

$$\alpha = -27,491 \quad (55)$$

$$\beta = 93,403 \quad (56)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-2} \cdot \sum_{i=1}^n [Pa_i - \alpha - \beta \cdot Pb_i]^2} = 0,529 \text{ kgf/cm}^2 \quad (57)$$

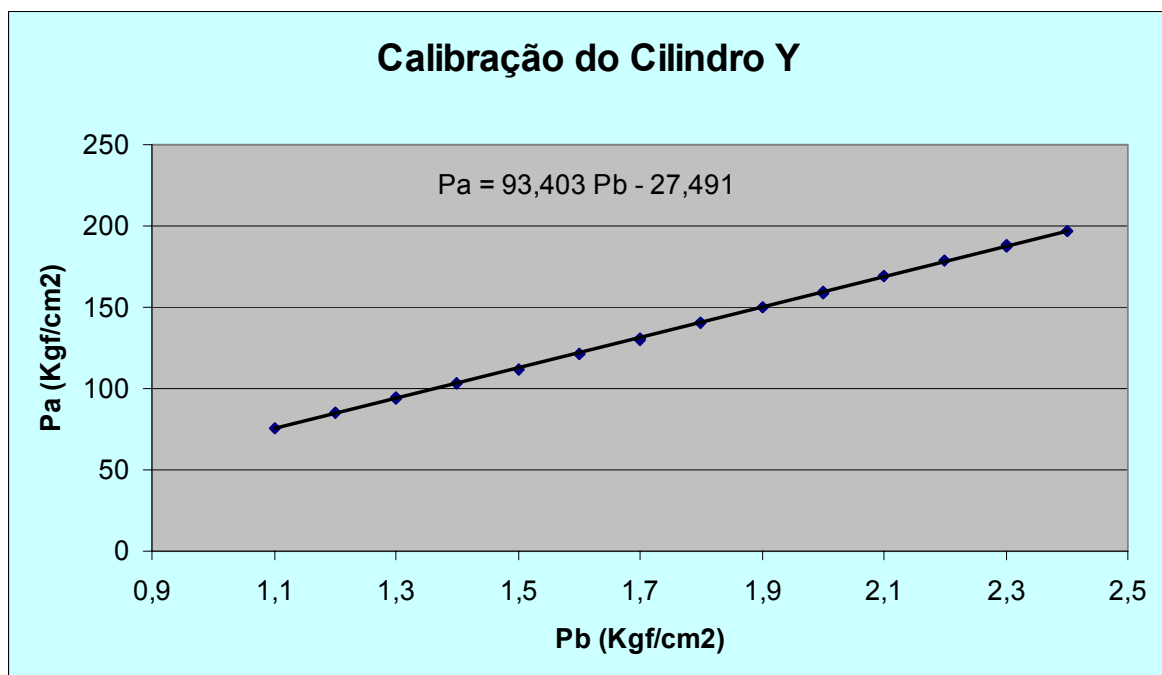


Figura 50: Relação entre Pa e Pb, mostrando a equação da reta ajustada

A incerteza do ajuste é calculada conforme Eq. (58) :

$$u_{\text{verd Pa}} = [u_a^2 + s^2 + (\frac{\partial Pa}{\partial Pb} \cdot u_b)^2]^{1/2} = [u_a^2 + s^2 + (\beta u_b)^2]^{1/2} = 0,529 \text{ kgf/cm}^2 \quad (58)$$

$$U_{\text{verd Pa y}} = 2,11 \times 0,529 = 1,12 \text{ kgf/cm}^2 \quad (59)$$

5.1.3.3. Análise da Calibração da Máquina de Teste

A máquina de teste apresentou um bom desempenho e repetitividade durante os ensaios de calibração, porém em virtude da força de atrito entre as gaxetas e os

cilindros de baixa e alta pressão e guia do cilindro de baixa pressão, esta somente apresenta repetitividade no cilindro X a partir de 60 kgf/cm^2 e no cilindro Y a partir de 80 kgf/cm^2 . Também, decorrente da pressão de atrito acima descrita podemos observar que, a reta a qual exprime a relação entre a baixa e alta pressão não passa pelo zero, conforme podemos observar nas Fig. 49 e 50. Analisando as equações de incerteza verdadeira de P_a ($u_{\text{verd } P_a}$), tanto do cilindro X quanto do cilindro Y , observa-se que a incerteza do ajuste é o fator preponderante entre os três existentes.

Embora a máquina de teste tenha apresentado um bom desempenho e repetitividade durante os ensaios, atingindo plenamente os objetivos para a qual foi construída, isto é a calibração dos dois transmissores com pressões estáticas diferenciadas, a mesma possui uma constante de tempo de estabilização por demais elevada, cerca de 15 minutos por ponto, restrição esta que a inviabiliza para utilização comercial em um laboratório de calibração, uma vez que tal deficiência implica em um tempo de calibração muito elevado incompatível com as necessidades dos laboratórios existentes.

5.2. Calibração dos Transmissores

Neste experimento final foram calibrados dois transmissores diferenciais de pressão, um com sensor de silício ressonante, modelo EJA de fabricação YOKOGAWA e o outro com sensor capacitivo, modelo LD 301 de fabricação SMAR.

Com procedimento análogo ao da calibração da máquina de teste, porém medindo pressão somente no circuito de baixa pressão e com os valores de α_x , α_y , β_x , β_y , $U_{\text{verd } P_a x}$, $U_{\text{verd } P_a y}$ pode-se determinar o ΔP no transmissor em fase de calibração, assim como a incerteza envolvida no experimento.

5.2.1. Metodologia da Calibração

O transmissor ensaiado foi alimentado com tensão de 24 Vcc, utilizando-se de uma fonte fabricante Dawer, modelo FCC- 3005D de alta estabilidade e um resistor de 250Ω em série com a alimentação negativa, conforme prescreve o manual do fabricante. Para as pressões estáticas de 100 kgf/cm^2 , 120 kgf/cm^2 , 140 kgf/cm^2 , 160 kgf/cm^2 , 180 kgf/cm^2 e 200 kgf/cm^2 , em cada lado de baixa pressão da máquina de teste foi colocada uma bomba comparativa e em cada uma delas um manômetro digital com as características e incerteza abaixo discriminadas:

Manômetro digital, modelo AQS-2 CI, faixa de indicação 0 a 60 PSI, de fabricação Ashcroft.

Incerteza expandida (U) ao nível de confiabilidade de 95,45% ($k=2$) = 0,0042 PSI (0,0003 kgf/cm²). Portanto a incerteza $u = U/2 = 0,00015$ kgf/cm².

O erro foi calculado conforme descrito no ISOGUM[8] definido abaixo:

$$\text{Erro} = (\text{valor lido} - \text{VVC}) / \text{VVC}$$

VVC – valor verdadeiro convencional

5.2.1.1. Calibrações para pressão estática igual a atmosférica

Para pressão estática igual a pressão atmosférica, a máquina de teste não foi utilizada, adotando-se procedimento usual de calibração de transmissores diferenciais de pressão, com o lado de baixa pressão (L) aberto para a atmosfera e o lado de alta pressão (H) pressurizado para obter-se a pressão diferencial requerida.

Para o transmissor de fabricação Yokogawa, adotou-se a calibração do fabricante, acompanhada na fábrica do fabricante conforme certificado de calibração N^o 1819X/07.

Para o transmissor de fabricação SMAR foi utilizado a mesma bomba comparativa e manômetro digital utilizado para pressões estáticas iguais ou maiores que 100 kgf/cm².

5.2.2. Cálculo de incerteza das calibrações dos transmissores

5.2.2.1. Para pressões estáticas de 100 kgf/cm² a 200 kgf/cm²

Para esta faixa de pressões foi utilizada a máquina de teste e medido o diferencial de pressão no seu lado de baixa pressão. Usando-se a equação de calibração dos cilindros X (Fig. 49) e Y (Fig. 50), pode-se calcular o diferencial de pressão no lado de alta pressão, a que está submetido o transmissor de pressão, ΔP_{real} :

$$\Delta P_{\text{real}} = P_{\text{ay}} - P_{\text{ax}} \quad (60)$$

A incerteza do diferencial de pressão no lado de alta pressão pode ser calculada pela Eq. (61), levando-se em consideração as Eq. (54) e (59), da estimativa da pressão a partir da medição no lado de baixa pressão :

$$U_{\Delta P_{\text{real}}} = [U_{\text{verd Pa}_y}^2 + U_{\text{verd Pa}_x}^2]^{1/2} = [1,12^2 + 1,16^2]^{1/2} = 1,61 \text{ kgf/cm}^2 \quad (61)$$

Para a redução das incertezas encontradas terão de ser executadas profundas alterações na máquina de teste ou mesmo modificar o princípio de aplicação das pressões, utilizando-se de uma máquina totalmente diferente da projetada.

5.2.2.2. Para pressão estática igual a pressão atmosférica

A incerteza está indicada nas tabelas subseqüentes.

5.3. Calibração do Transmissor Yokogawa

- **Calibração com pressão atmosférica**

Tabela 11 – Calibração a pressão atmosférica

Pressão aplicada lado H	Pressão lida no transmissor	Erro (%)	U (incerteza expandida)
0,0000	0,0010		0,000204
0,5099	0,5109	0,20	0,000204
1,0197	1,0197	0,00	0,000306
1,5296	1,5306	0,07	0,000408
2,0394	2,0405	0,05	0,000408
2,5493	2,5503	0,04	0,000510

Observação : todos os valores de pressão estão em kgf/cm²

O fator de conversão kgf/cm² para kPa é 1kgf/cm² = 98,0665 kPa

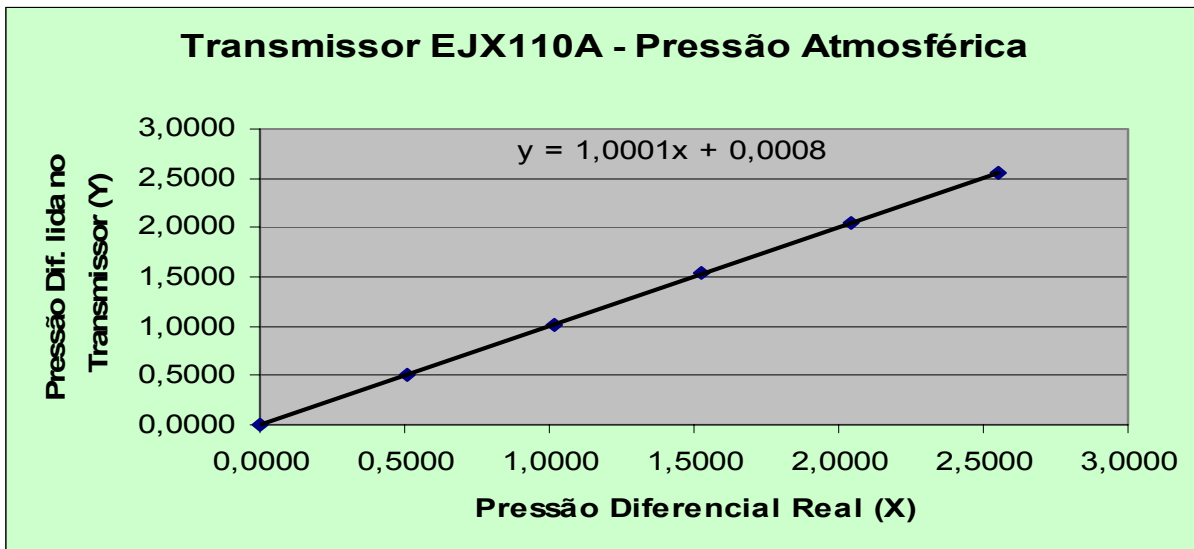


Figura 51: Relação entre o ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (Pressão atmosférica)

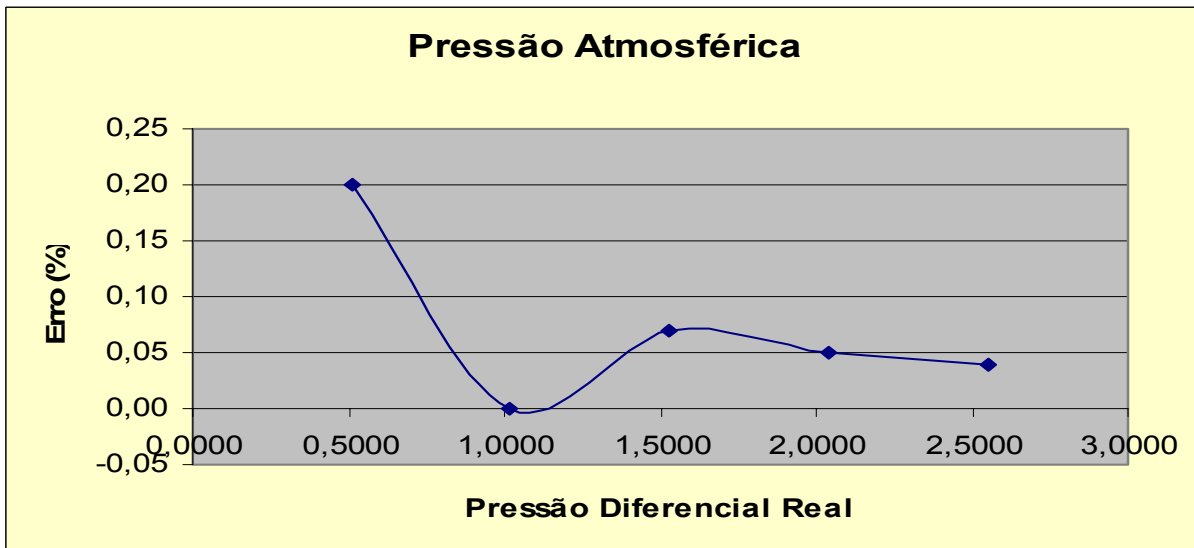


Figura 52: Relação entre o erro e o ΔP_{real} (Pressão atmosférica)

Calibração com pressão estática 100 kgf/cm²

Tabela 12 – Calibração a pressão de 100 kgf/cm²

Cilindro X		Cilindro Y					
Pax	Pbx	Pay	Pby		Pay -Pax	ΔP Transm.	Erro (%)
100,0000	1,3635	101,0	1,3757		1,0	0,985	-1,50
100,0000	1,3635	101,2	1,3778		1,2	1,18	-1,67
100,0000	1,3635	101,4	1,3799		1,4	1,39	-0,71
100,0000	1,3635	101,6	1,3821		1,6	1,575	-1,56
100,0000	1,3635	101,8	1,3842		1,8	1,77	-1,67
100,0000	1,3635	102,0	1,3864		2,0	1,97	-1,50
100,0000	1,3635	102,2	1,3885		2,2	2,169	-1,41
100,0000	1,3635	102,4	1,3907		2,4	2,376	-1,00

Observação : todos os valores de pressão estão em kgf/cm²

O fator de conversão kgf/cm² para kPa é 1kgf/cm² = 98,0665 kPa

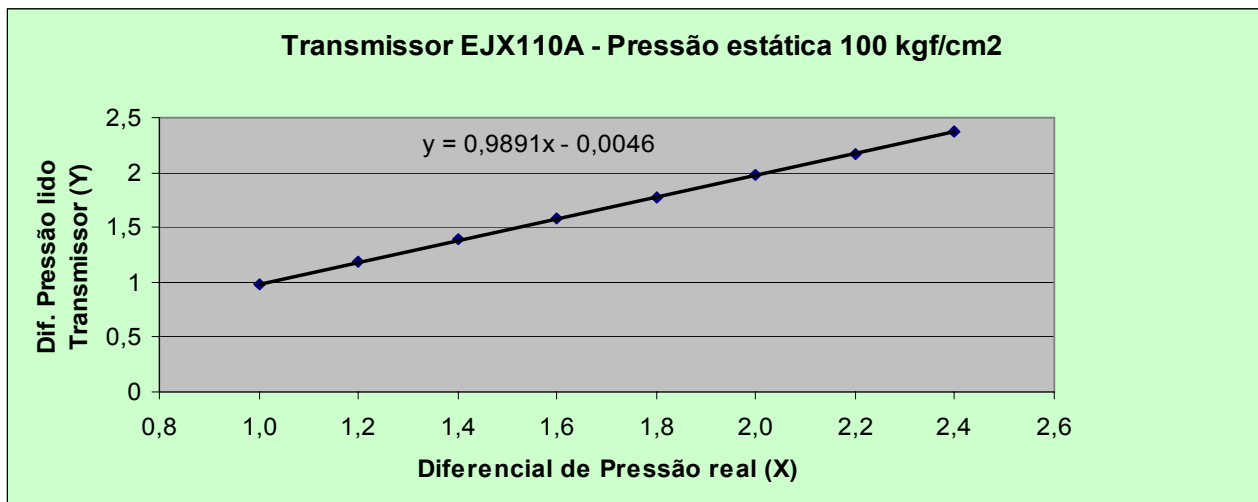


Figura 53: Relação entre o ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (100kgf/cm²)

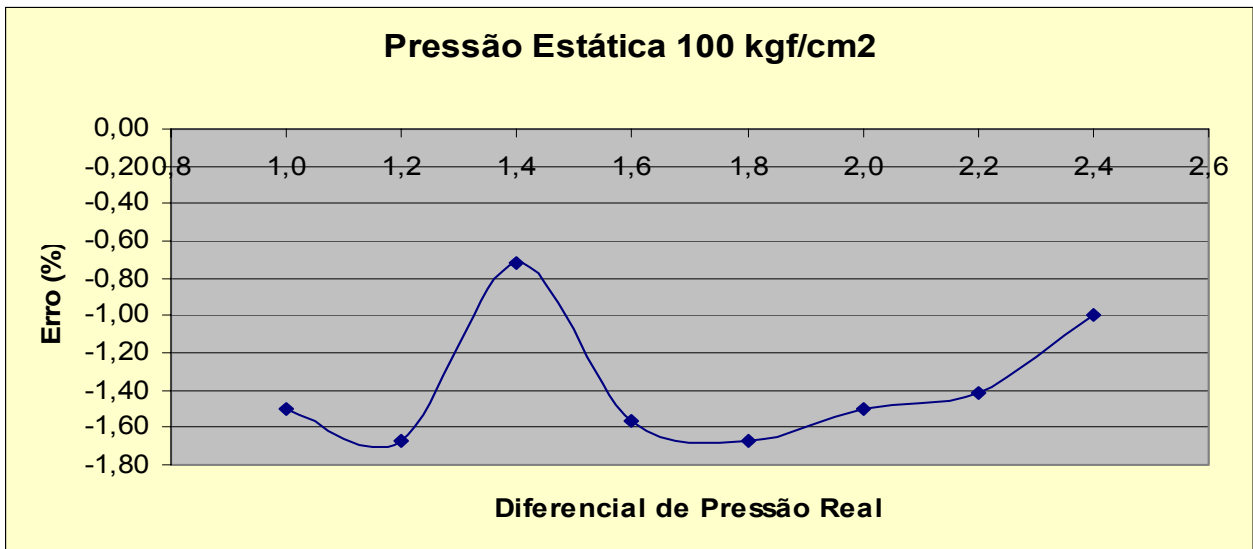


Figura 54: Relação entre o erro e o ΔP_{real} (100kgf/cm²)

- **Calibração com pressão estática 120 kgf/cm²**

Tabela 13 – Calibração a pressão de 120 kgf/cm²

Cilindro X		Cilindro Y					
Pax	Pbx	Pay	Pby		Pay -Pax	ΔP Transm.	Erro (%)
120,0000	1,5681	121,0	1,5898		1,0	0,983	-1,70
120,0000	1,5681	121,2	1,5919		1,2	1,182	-1,50
120,0000	1,5681	121,4	1,5941		1,4	1,385	-1,07
120,0000	1,5681	121,6	1,5962		1,6	1,584	-1,00
120,0000	1,5681	121,8	1,5984		1,8	1,775	-1,39
120,0000	1,5681	122,0	1,6005		2,0	1,968	-1,60
120,0000	1,5681	122,2	1,6026		2,2	2,165	-1,59
120,0000	1,5681	122,4	1,6048		2,4	2,364	-1,50

Observação : todos os valores de pressão estão em kgf/cm²

O fator de conversão kgf/cm² para kPa é $1\text{kgf/cm}^2 = 98,0665\text{ kPa}$

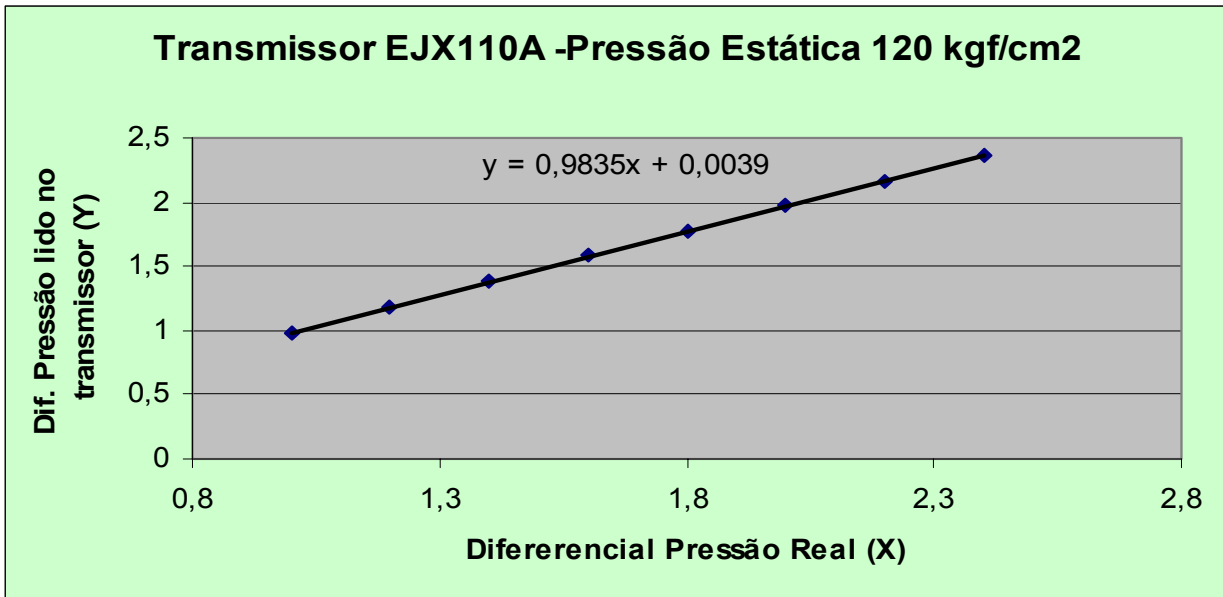


Figura 55: Relação entre o ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (100kgf/cm²)

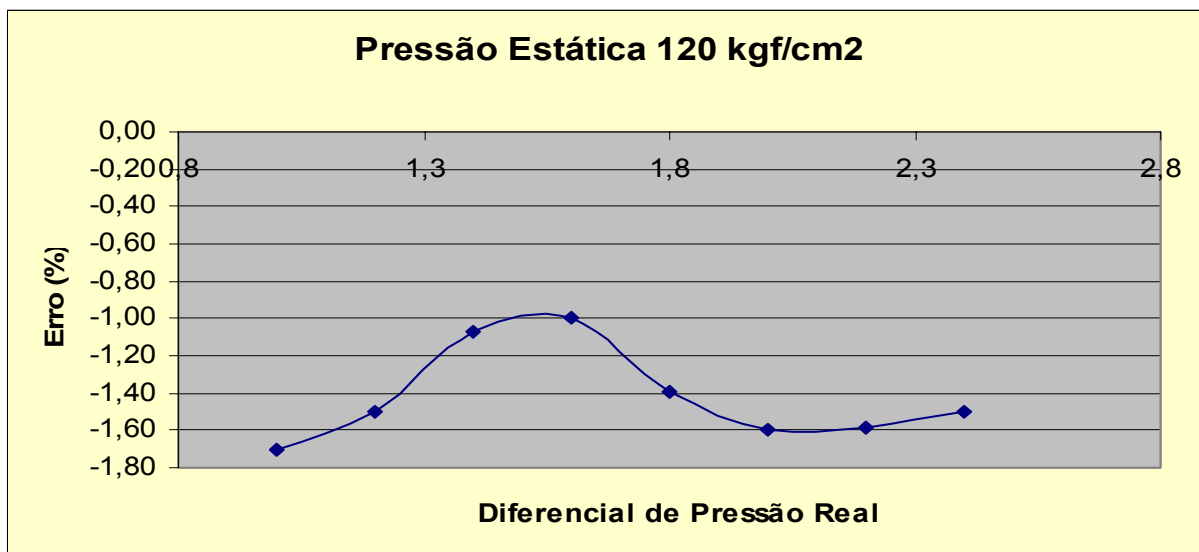


Figura 56: Relação entre o erro e o ΔP_{real} (100kgf/cm²)

Calibração com pressão estática 140 kgf/cm²

Tabela 14 – Calibração a pressão de 140 kgf/cm²

Cilindro X		Cilindro Y					
Pax	Pbx	Pay	Pby		Pay -Pax	ΔP Transm.	Erro (%)
140,0000	1,7728	141,0	1,8039		1,0	0,98	-2,00
140,0000	1,7728	141,2	1,8061		1,2	1,175	-2,08
140,0000	1,7728	141,4	1,8082		1,4	1,375	-1,79
140,0000	1,7728	141,6	1,8103		1,6	1,565	-2,19
140,0000	1,7728	141,8	1,8125		1,8	1,759	-2,28
140,0000	1,7728	142,0	1,8146		2,0	1,963	-1,85
140,0000	1,7728	142,2	1,8168		2,2	2,150	-2,27
140,0000	1,7728	142,4	1,8189		2,4	2,353	-1,96

Observação : todos os valores de pressão estão em kgf/cm²

O fator de conversão kgf/cm² para kPa é 1kgf/cm² = 98,0665 kPa

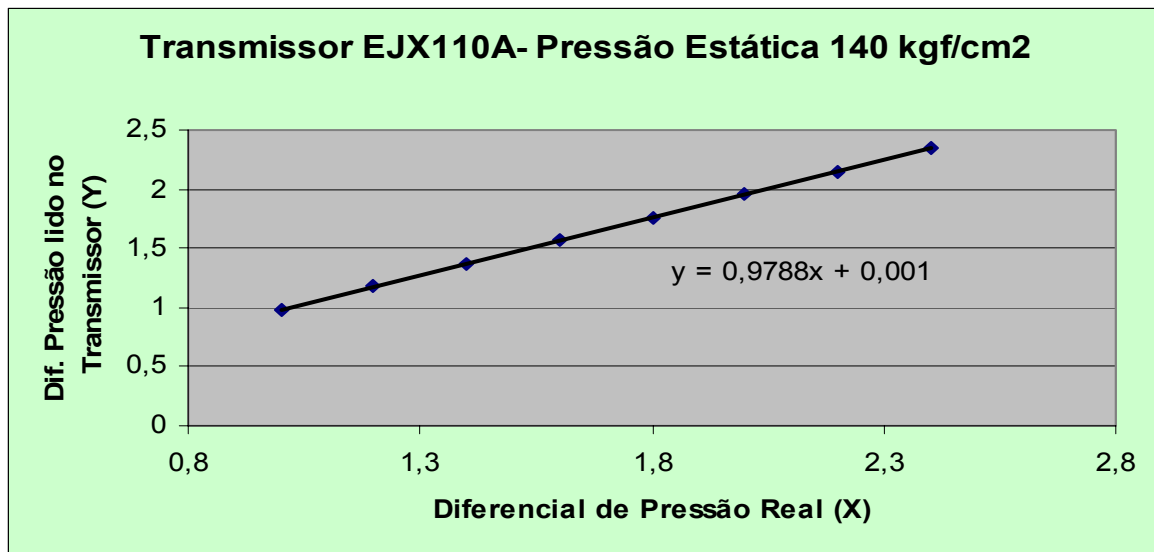


Figura 57: Relação entre o ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (100kgf/cm²)

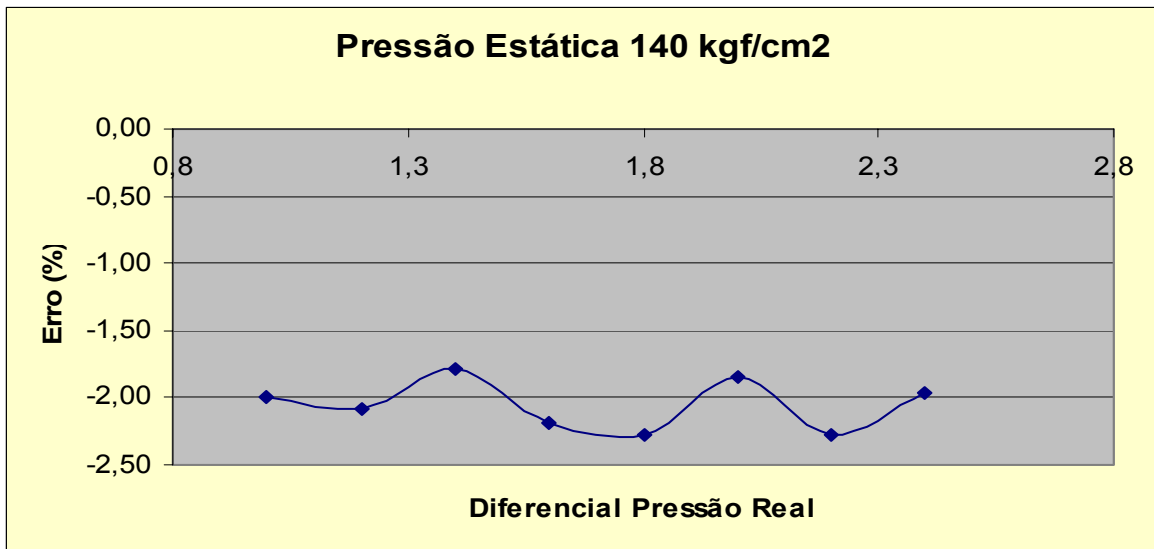


Figura 58: Relação entre o erro e o ΔP_{real} (100kgf/cm²)

Calibração com pressão estática 160 kgf/cm²

Tabela 15 – Calibração a pressão de 160 kgf/cm²

Cilindro X		Cilindro Y					
Pax	Pbx	Pay	Pby		Pay -Pax	ΔP Transm.	Erro (%)
160,0000	1,9775	161,0	2,0180		1,0	0,975	-2,50
160,0000	1,9775	161,2	2,0202		1,2	1,168	-2,67
160,0000	1,9775	161,4	2,0223		1,4	1,367	-2,36
160,0000	1,9775	161,6	2,0245		1,6	1,564	-2,25
160,0000	1,9775	161,8	2,0266		1,8	1,751	-2,72
160,0000	1,9775	162,0	2,0287		2,0	1,947	-2,65
160,0000	1,9775	162,2	2,0309		2,2	2,144	-2,55
160,0000	1,9775	162,4	2,0330		2,4	2,335	-2,71

Observação : todos os valores de pressão estão em kgf/cm²

O fator de conversão kgf/cm² para kPa é $1\text{kgf/cm}^2 = 98,0665\text{ kPa}$

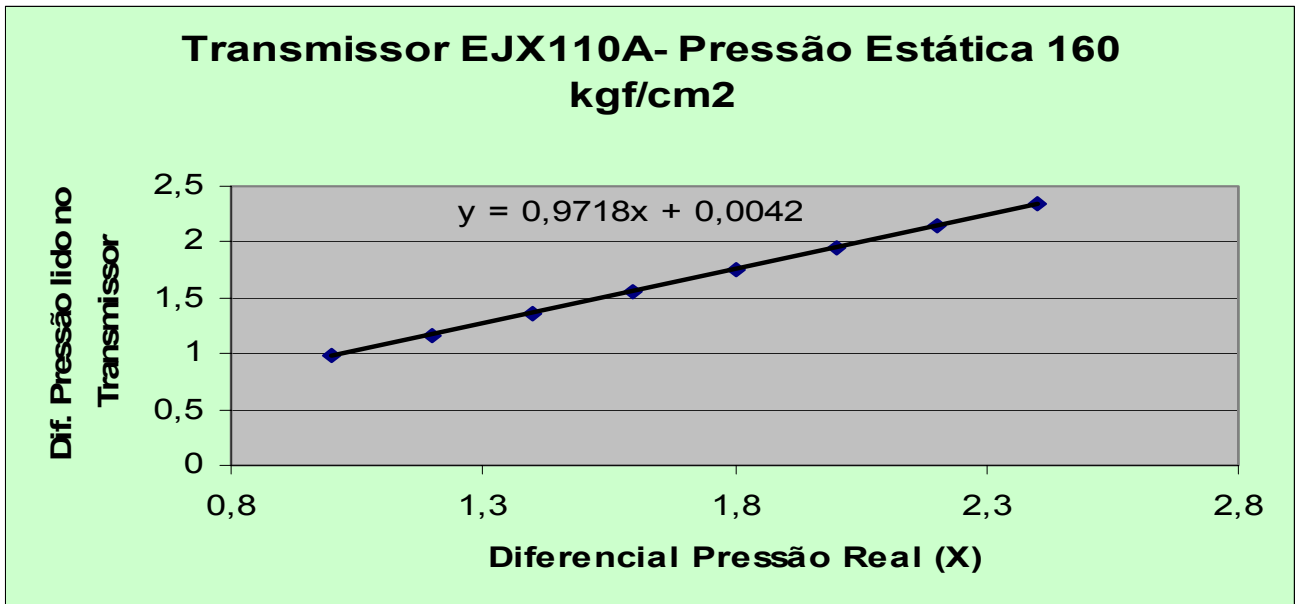


Figura 59: Relação entre o ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (160kgf/cm²)

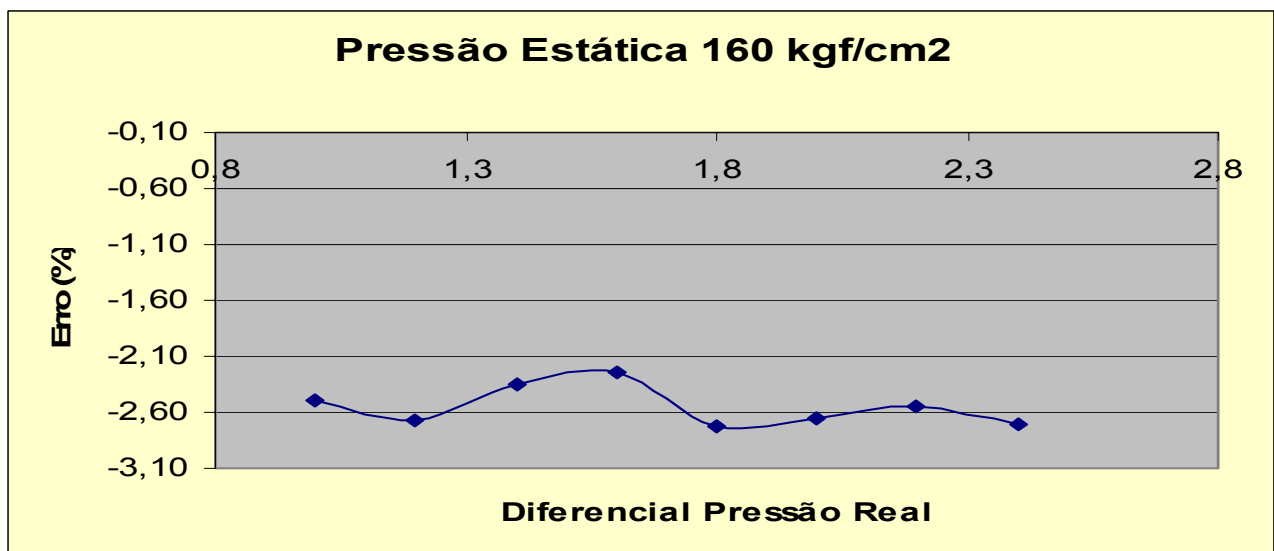


Figura 60: Relação entre o erro e o ΔP_{real} (160kgf/cm²)

Calibração com pressão estática 180 kgf/cm²

Tabela 16 – Calibração a pressão de 180 kgf/cm²

Cilindro X		Cilindro Y						
Pax	Pbx	Pay	Pby		Pay -Pax	ΔP Transm.	Erro (%)	
180,0000	2,1821	181,0	2,2322		1,0	0,970	-3,00	
180,0000	2,1821	181,2	2,2343		1,2	1,161	-3,25	
180,0000	2,1821	181,4	2,2364		1,4	1,356	-3,14	
180,0000	2,1821	181,6	2,2386		1,6	1,550	-3,13	
180,0000	2,1821	181,8	2,2407		1,8	1,744	-3,11	
180,0000	2,1821	182,0	2,2429		2,0	1,934	-3,30	
180,0000	2,1821	182,2	2,2450		2,2	2,134	-3,00	
180,0000	2,1821	182,4	2,2472		2,4	2,319	-3,38	

Observação : todos os valores de pressão estão em kgf/cm²

O fator de conversão kgf/cm² para kPa é 1kgf/cm² = 98,0665 kPa

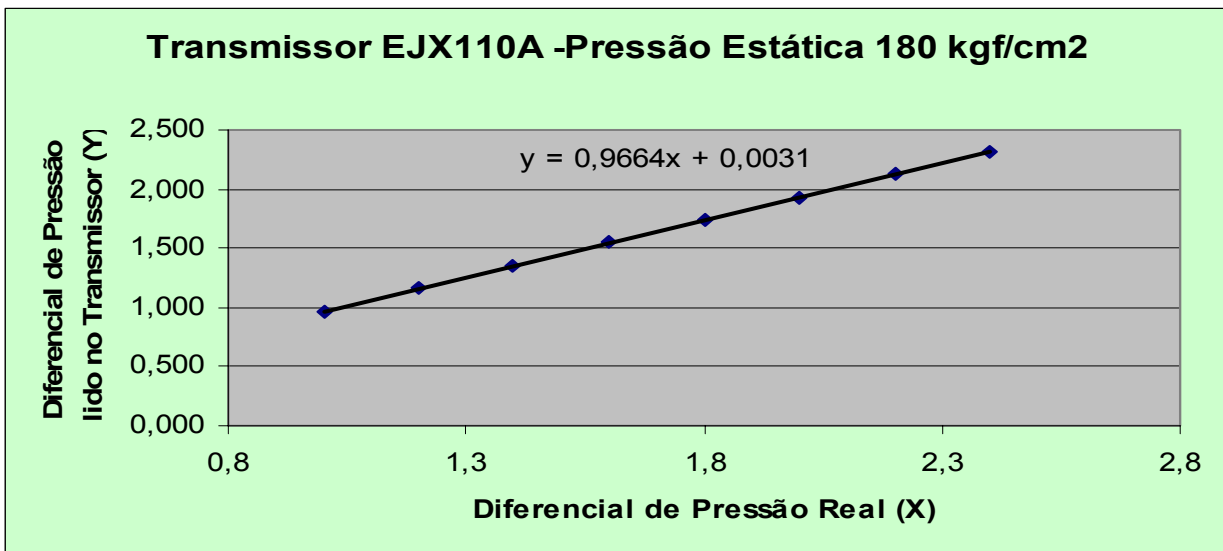


Figura 61: Relação entre o ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (100kgf/cm²)

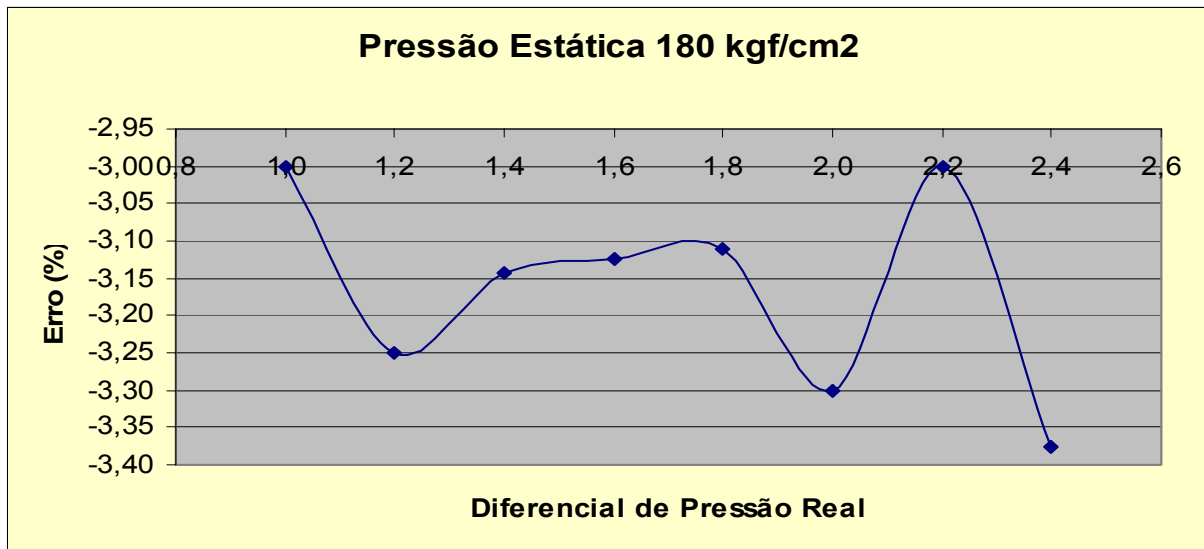


Figura 62: Relação entre o erro e o ΔP_{real} (100kgf/cm²)

Calibração com pressão estática 200 kgf/cm²

Tabela 17 – Calibração a pressão de 200 kgf/cm²

Cilindro X		Cilindro Y					
Pax	Pbx	Pay	Pby		Pay -Pax	ΔP Transm.	Erro (%)
200,0000	2,3868	201,0	2,4463		1,0	0,968	-3,20
200,0000	2,3868	201,2	2,4484		1,2	1,154	-3,83
200,0000	2,3868	201,4	2,4506		1,4	1,350	-3,57
200,0000	2,3868	201,6	2,4527		1,6	1,539	-3,81
200,0000	2,3868	201,8	2,4549		1,8	1,739	-3,39
200,0000	2,3868	202,0	2,4570		2,0	1,927	-3,65
200,0000	2,3868	202,2	2,4591		2,2	2,123	-3,50
200,0000	2,3868	202,4	2,4613		2,4	2,310	-3,75

Observação : todos os valores de pressão estão em kgf/cm²

O fator de conversão kgf/cm² para kPa é 1kgf/cm² = 98,0665 kPa

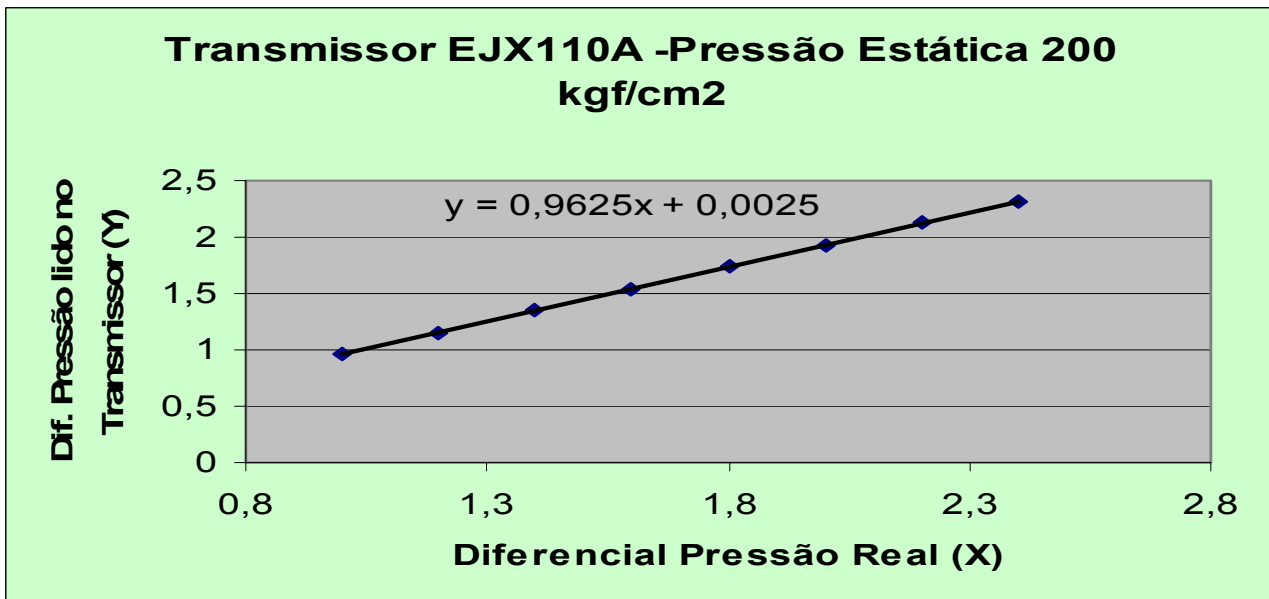


Figura 63: Relação entre o ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (200kgf/cm²)

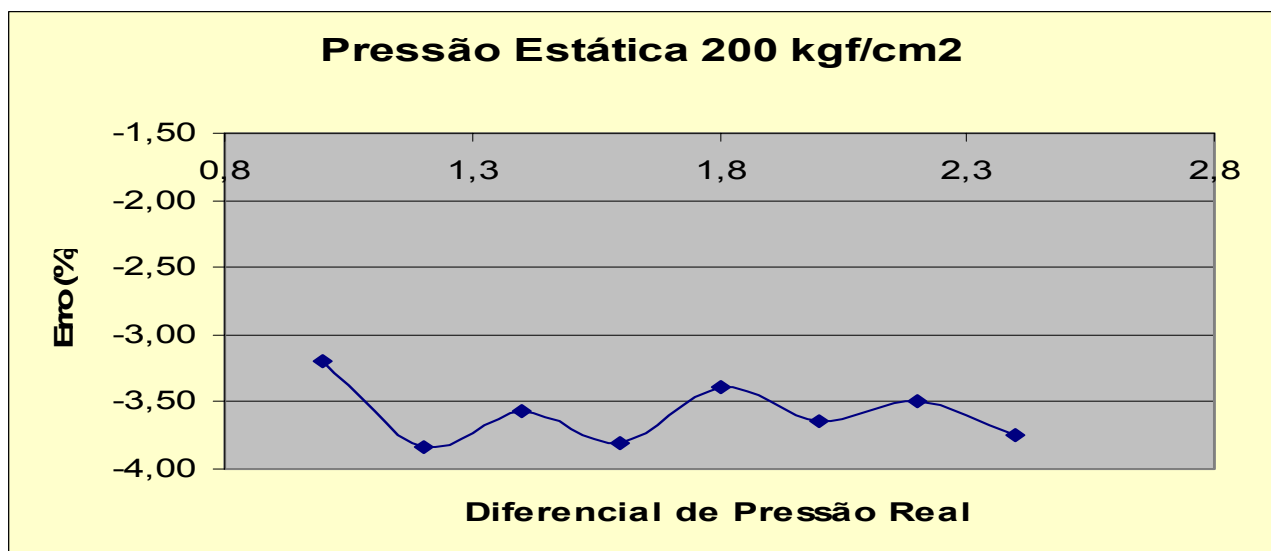


Figura 64: Relação entre o erro e o o ΔP_{real} (200kgf/cm²)

5.4. Análise dos resultados da calibração

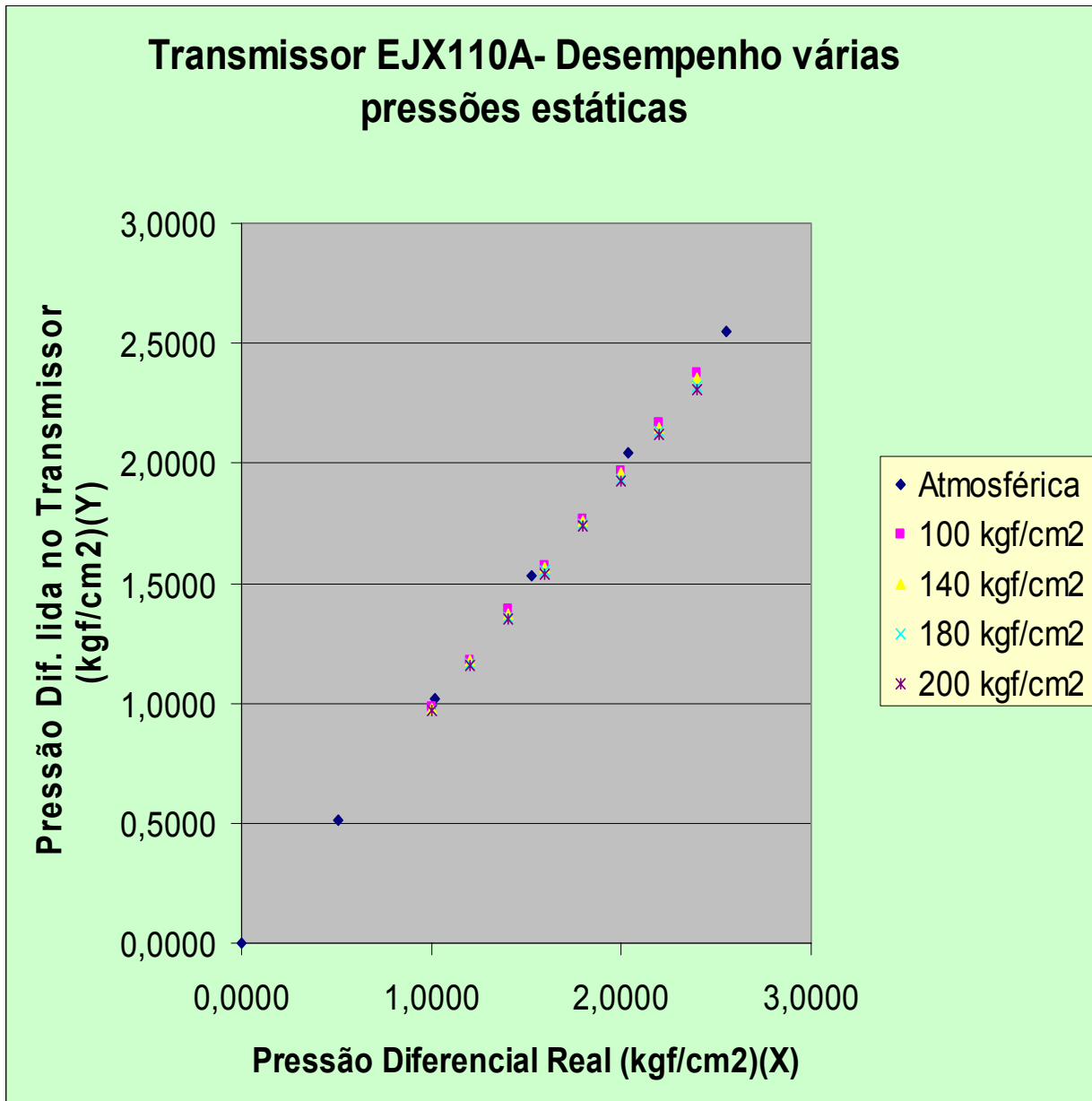


Figura 65: Relação entre o ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor para várias pressões estáticas

Conforme mostra a Fig. 65, a medida que a pressão estática sobe, o transmissor indica pressões diferenciais menores para a mesma pressão diferencial aplicada e portanto aumenta o erro em módulo, embora negativo. O coeficiente angular da curva de calibração varia de um valor igual a 1,0001 à pressão atmosférica, até 0,9625 à pressão de 200 kgf/cm². Esta curva relaciona o diferencial de pressão lido pelo transmissor como função do valor real.

5.5. Calibração do Transmissor SMAR

Calibração com pressão atmosférica

Tabela 18 – Calibração a pressão de atmosférica

Pressão aplicada (lado H)	Pressão lida Transmissor	Erro (%)	U (incerteza expandida)
1,0000	0,9969	-0,0031	0,0003
1,2000	1,2016	0,0013	0,0003
1,4000	1,4016	0,0011	0,0003
1,6000	1,5984	-0,0010	0,0003
1,8000	1,8031	0,0017	0,0003
2,0000	1,9969	-0,0016	0,0003
2,2000	2,2031	0,0014	0,0003
2,4000	2,4031	0,0013	0,0003

Observação : todos os valores de pressão estão em kgf/cm²

O fator de conversão kgf/cm² para kPa é 1kgf/cm² = 98,0665 kPa

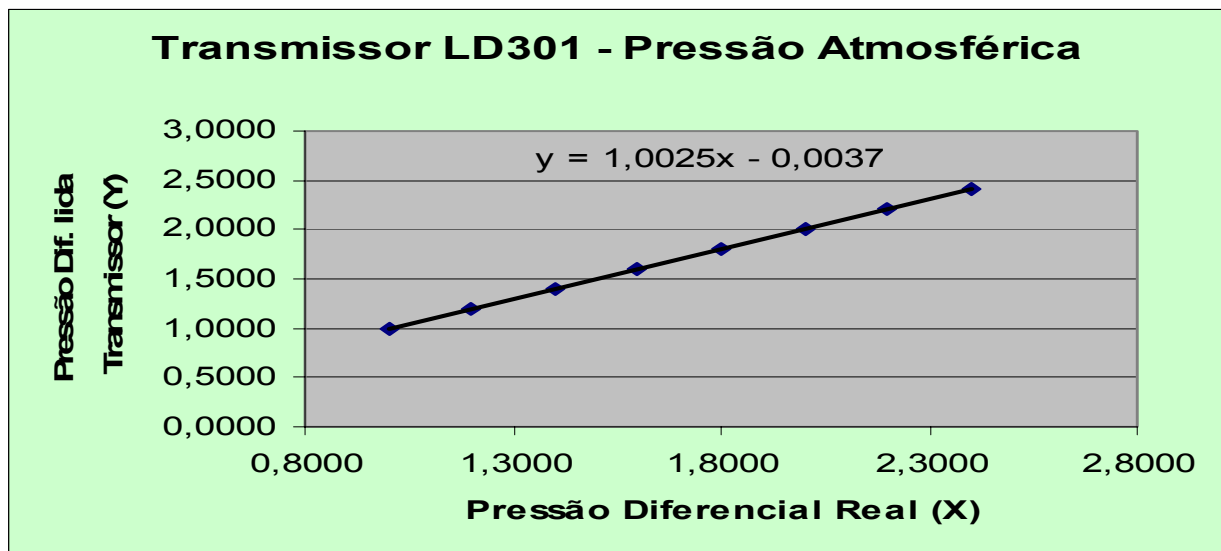


Figura 66: Relação entre o ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (Pressão atmosférica)

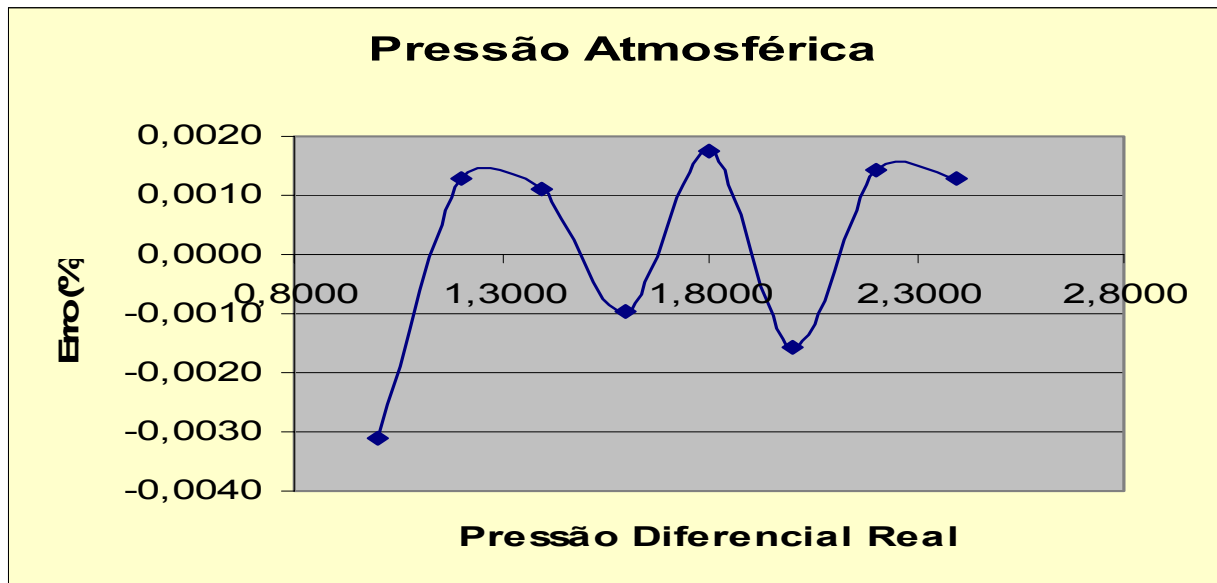


Figura 67: Relação entre o erro e o ΔP_{real} (Pressão atmosférica)

Calibração com pressão estática 100 kgf/cm²

Tabela 19 – Calibração a pressão de 100 kgf/cm²

Cilindro Y		Cilindro X					
Pay	Pby	Pax	Pbx		Pax -Pay	ΔP Transm.	Erro (%)
100	1,3650	101,0	1,3737		1,0	0,984	-1,6
100	1,3650	101,2	1,3758		1,2	1,179	-1,75
100	1,3650	101,4	1,3778		1,4	1,38	-1,43
100	1,3650	101,6	1,3799		1,6	1,573	-1,69
100	1,3650	101,8	1,3819		1,8	1,766	-1,89
100	1,3650	102,0	1,3839		2,0	1,964	-1,80
100	1,3650	102,2	1,3860		2,2	2,163	-1,68
100	1,3650	102,4	1,3880		2,4	2,353	-1,96

Observação : todos os valores de pressão estão em kgf/cm²

O fator de conversão kgf/cm² para kPa é 1kgf/cm² = 98,0665 kPa

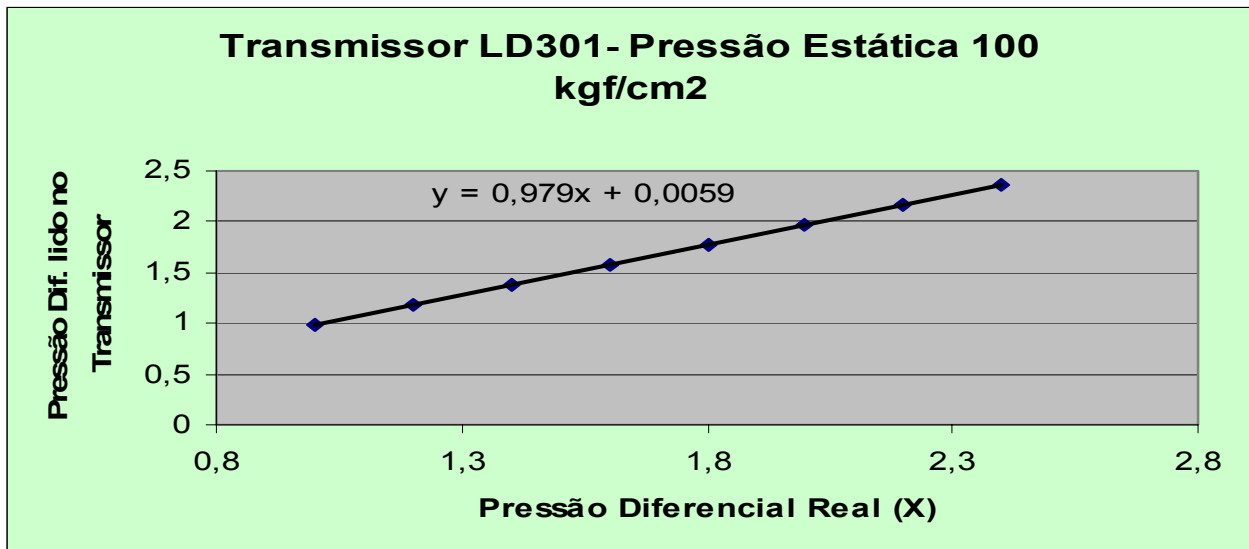


Figura 68: Relação entre o ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (100kgf/cm²)

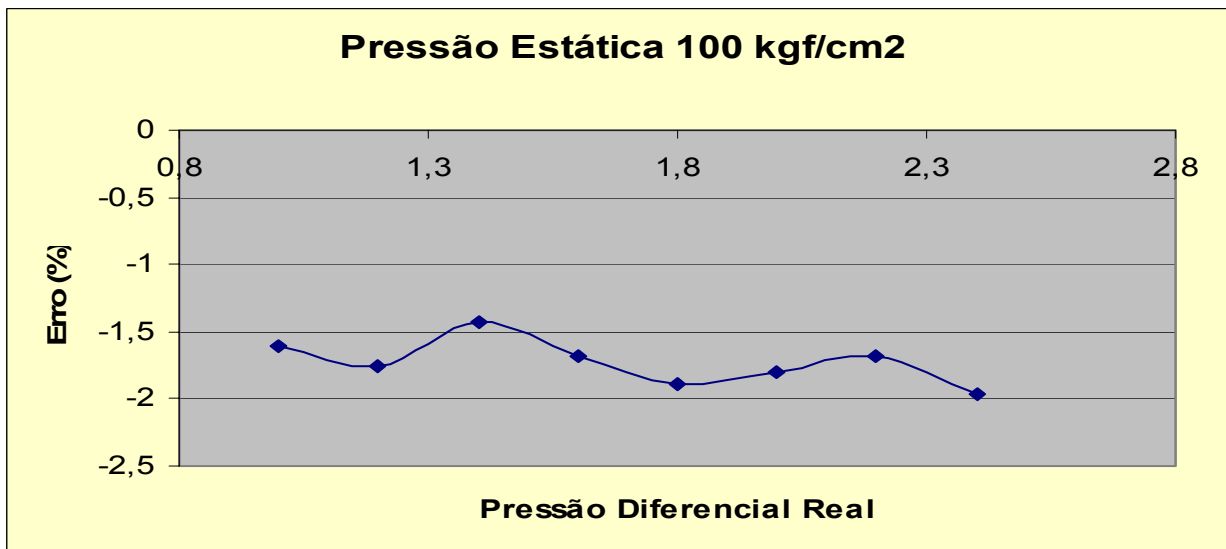


Figura 69: Relação entre o erro e o ΔP_{real} (100kgf/cm²)

Calibração com pressão estática 120 kgf/cm²

Tabela 20 – Calibração a pressão de 120 kgf/cm²

Cilindro Y		Cilindro X					
Pay	Pby	Pax	Pbx		Pax -Pay	ΔP Transm.	Erro (%)
120	1,5791	121,0	1,5784		1,0	0,979	-2,10
120	1,5791	121,2	1,5804		1,2	1,174	-2,17
120	1,5791	121,4	1,5825		1,4	1,374	-1,86
120	1,5791	121,6	1,5845		1,6	1,571	-1,81
120	1,5791	121,8	1,5866		1,8	1,765	-1,94
120	1,5791	122,0	1,5886		2,0	1,959	-2,05
120	1,5791	122,2	1,5907		2,2	2,152	-2,18
120	1,5791	122,4	1,5927		2,4	2,356	-1,83

Observação : todos os valores de pressão estão em kgf/cm²

O fator de conversão kgf/cm² para kPa é 1kgf/cm² = 98,0665 kPa

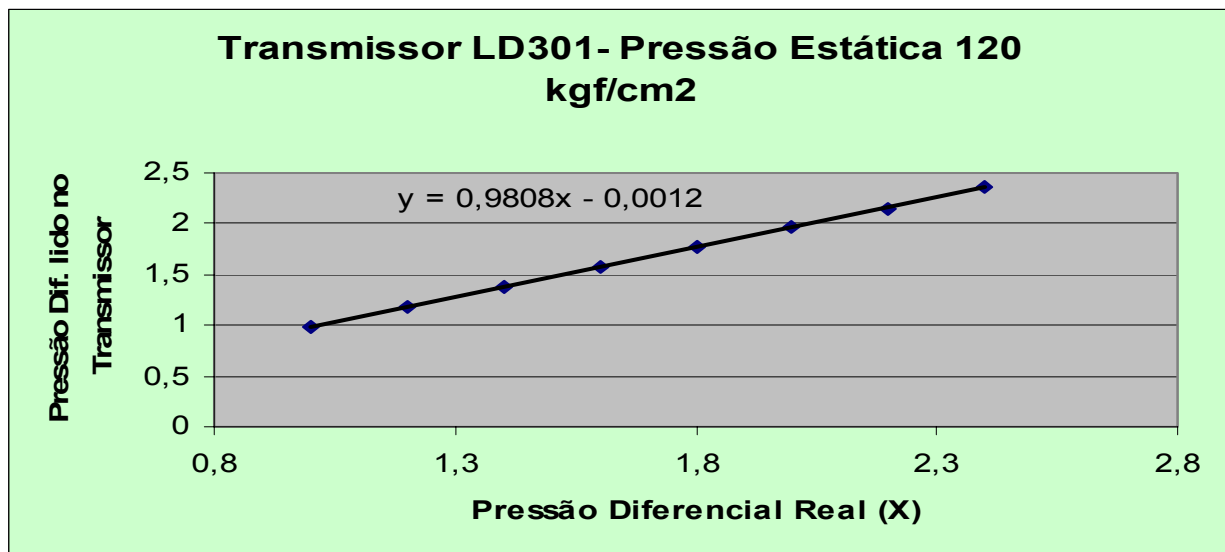


Figura 70: Relação entre o ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (120kgf/cm²)

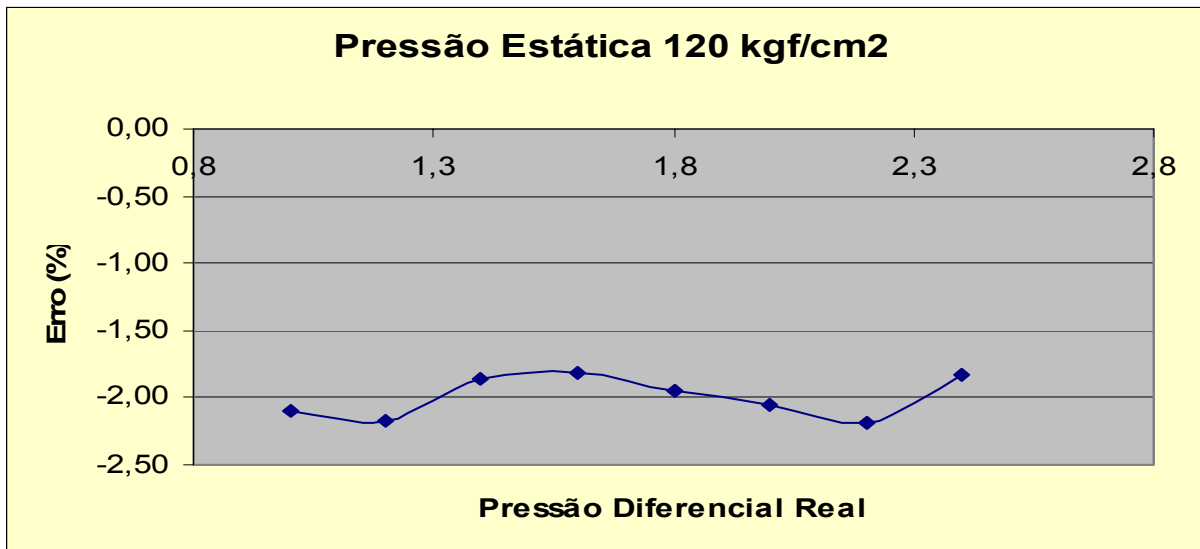


Figura 71: Relação entre o erro e o ΔP_{real} (120kgf/cm²)

Calibração com pressão estática 140 kgf/cm²

Tabela 21 – Calibração a pressão de 140 kgf/cm²

Cilindro Y		Cilindro X					
Pay	Pby	Pax	Pbx		Pax -Pay	ΔP Transm.	Erro (%)
140	1,7932	141,0	1,7830		1,0	0,976	-2,40
140	1,7932	141,2	1,7851		1,2	1,168	-2,67
140	1,7932	141,4	1,7871		1,4	1,366	-2,43
140	1,7932	141,6	1,7892		1,6	1,564	-2,25
140	1,7932	141,8	1,7912		1,8	1,751	-2,72
140	1,7932	142,0	1,7933		2,0	1,947	-2,65
140	1,7932	142,2	1,7953		2,2	2,148	-2,36
140	1,7932	142,4	1,7974		2,4	2,337	-2,62

Observação : todos os valores de pressão estão em kgf/cm²

O fator de conversão kgf/cm² para kPa é $1\text{kgf/cm}^2 = 98,0665\text{ kPa}$

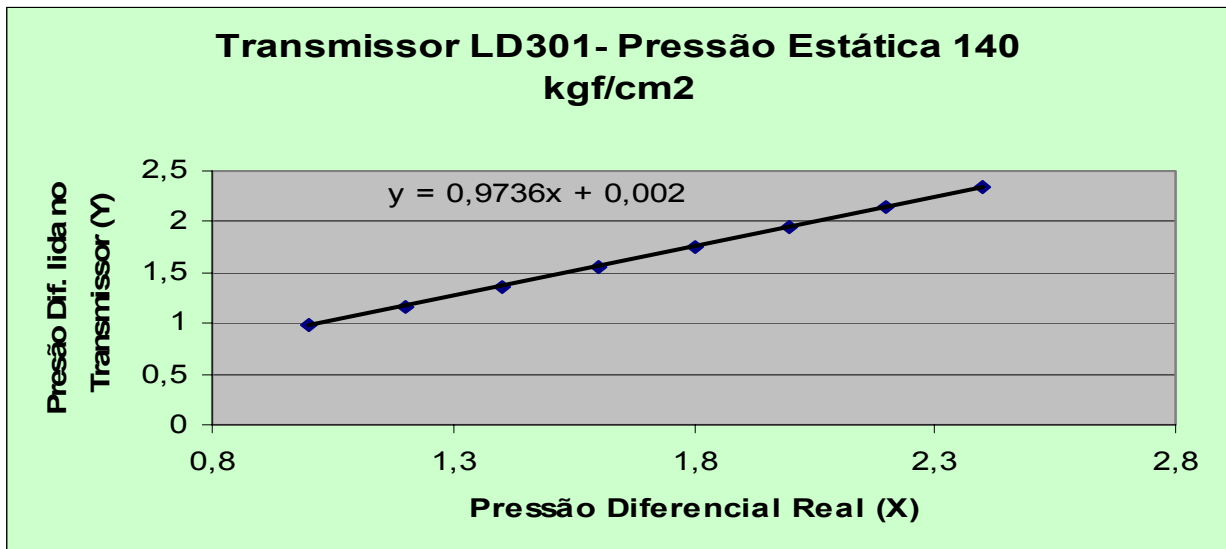


Figura 72: Relação entre o ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (140kgf/cm²)

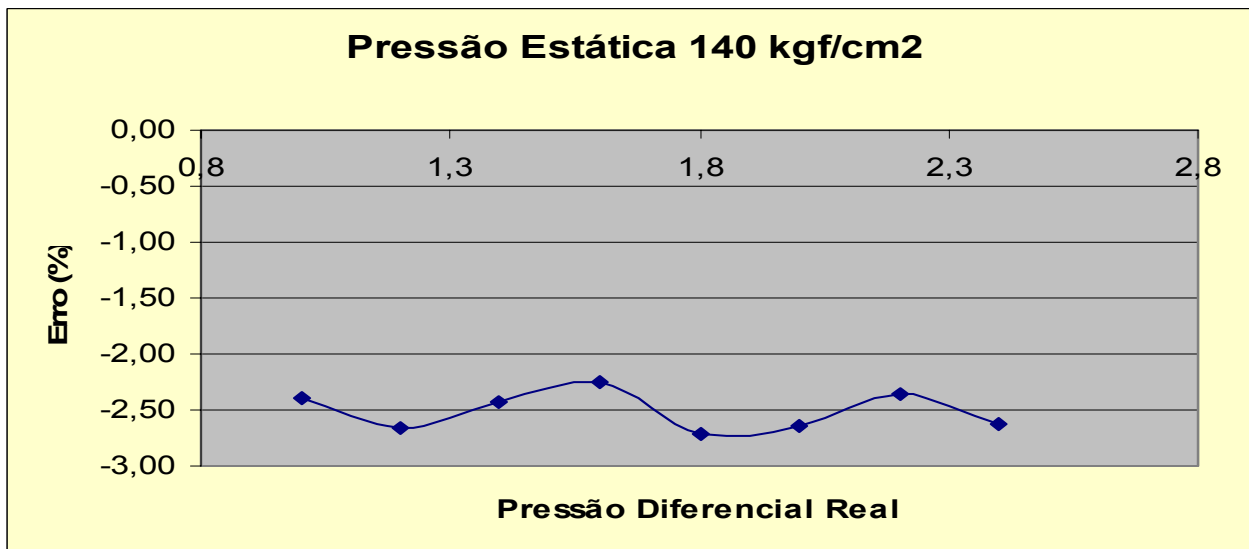


Figura 73: Relação entre o erro e o ΔP_{real} (140 kgf/cm²)

Calibração com pressão estática 160 kgf/cm²

Tabela 22 – Calibração a pressão de 160 kgf/cm²

Cilindro Y		Cilindro X					
Pay	Pby	Pax	Pbx		Pax -Pay	ΔP Transm.	Erro (%)
160	2,0073	161,0	1,9877		1,0	0,973	-2,70
160	2,0073	161,2	1,9897		1,2	1,172	-2,33
160	2,0073	161,4	1,9918		1,4	1,365	-2,50
160	2,0073	161,6	1,9938		1,6	1,556	-2,75
160	2,0073	161,8	1,9959		1,8	1,753	-2,61
160	2,0073	162,0	1,9979		2,0	1,944	-2,80
160	2,0073	162,2	2,0000		2,2	2,144	-2,55
160	2,0073	162,5	2,0030		2,4	2,341	-2,46

Observação : todos os valores de pressão estão em kgf/cm²

O fator de conversão kgf/cm² para kPa é 1kgf/cm² = 98,0665 kPa

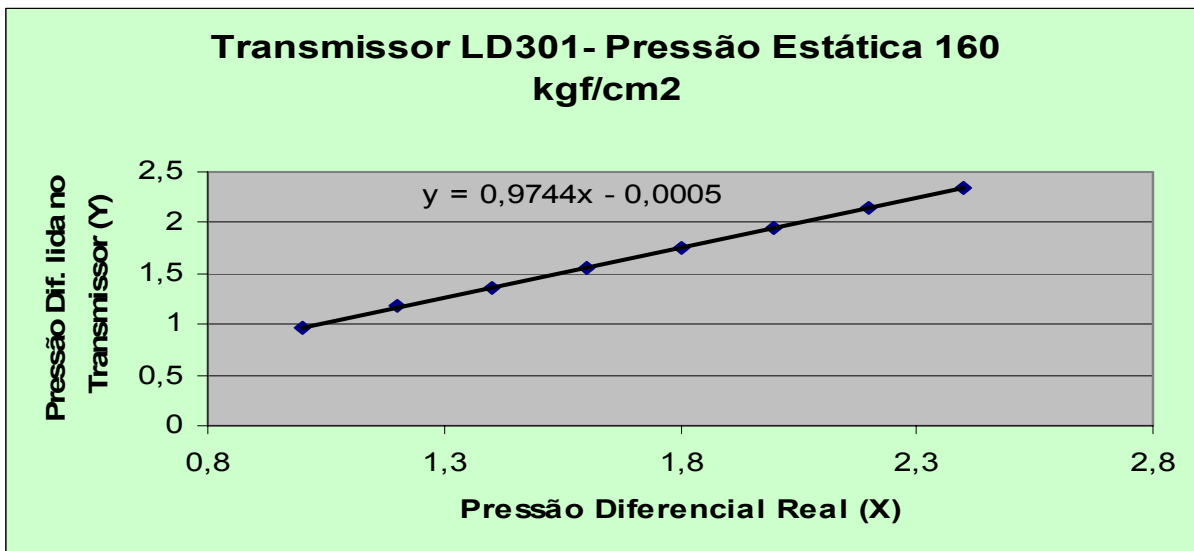


Figura 74: Relação entre o ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (160kgf/cm²)

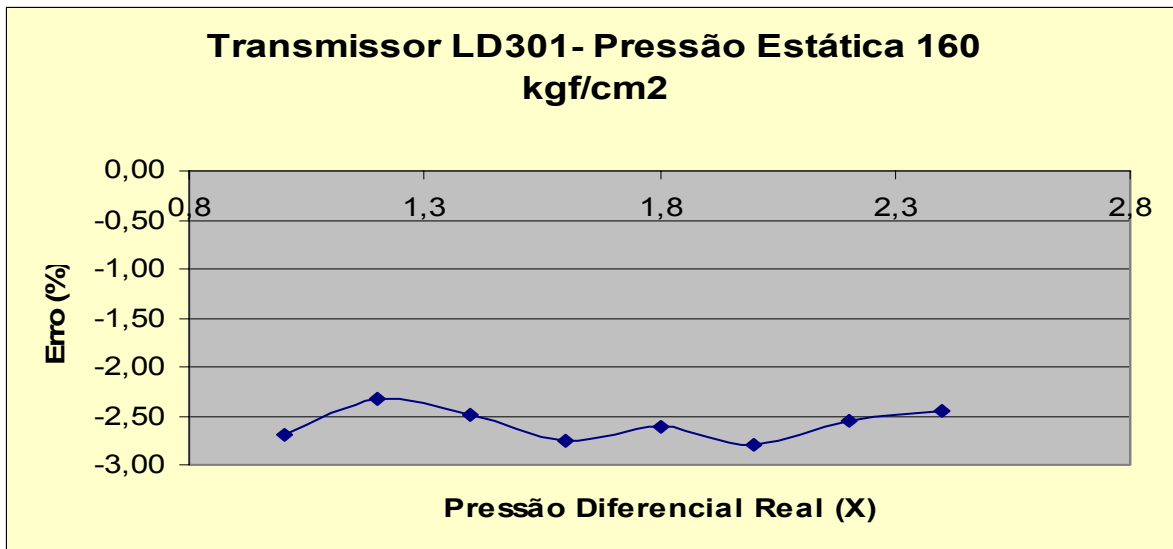


Figura 75: Relação entre o erro e o ΔP_{real} (160kgf/cm²)

Calibração com pressão estática 180 kgf/cm²

Tabela 23 – Calibração a pressão de 180 kgf/cm²

Cilindro Y		Cilindro X					
Pay	Pby	Pax	Pbx		Pax -Pay	ΔP Transm.	Erro (%)
180	2,2215	181,0	2,1923		1,0	0,965	-3,50
180	2,2215	181,2	2,1944		1,2	1,163	-3,08
180	2,2215	181,4	2,1964		1,4	1,350	-3,57
180	2,2215	181,6	2,1985		1,6	1,550	-3,13
180	2,2215	181,8	2,2005		1,8	1,737	-3,50
180	2,2215	182,0	2,2026		2,0	1,927	-3,65
180	2,2215	182,2	2,2046		2,2	2,129	-3,23
180	2,2215	182,4	2,2067		2,4	2,319	-3,38

Observação : todos os valores de pressão estão em kgf/cm²

O fator de conversão kgf/cm² para kPa é $1\text{kgf/cm}^2 = 98,0665\text{ kPa}$

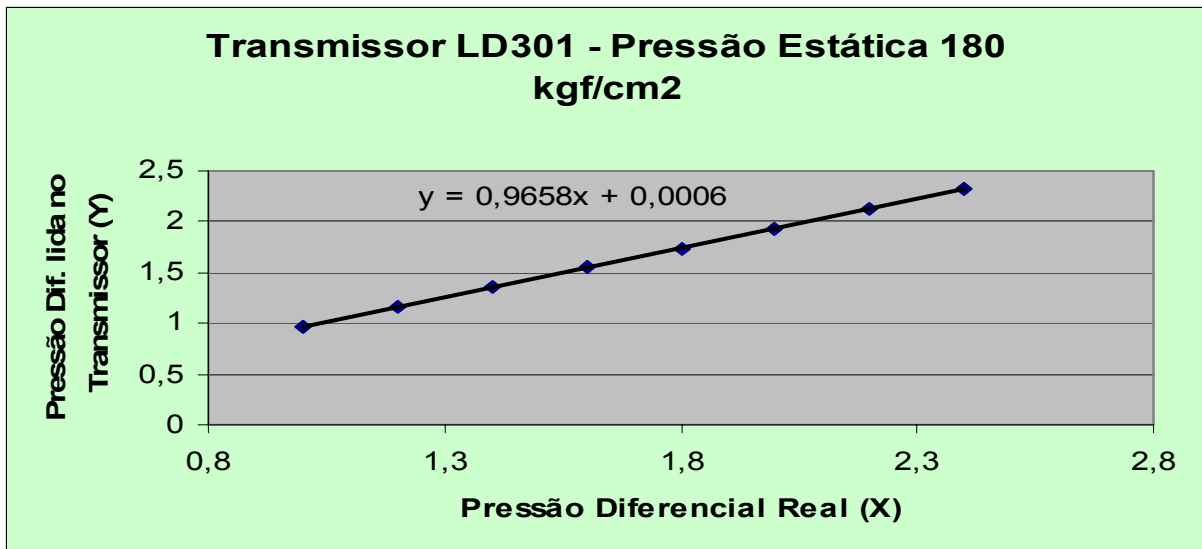


Figura 76: Relação entre o ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (180kgf/cm²)

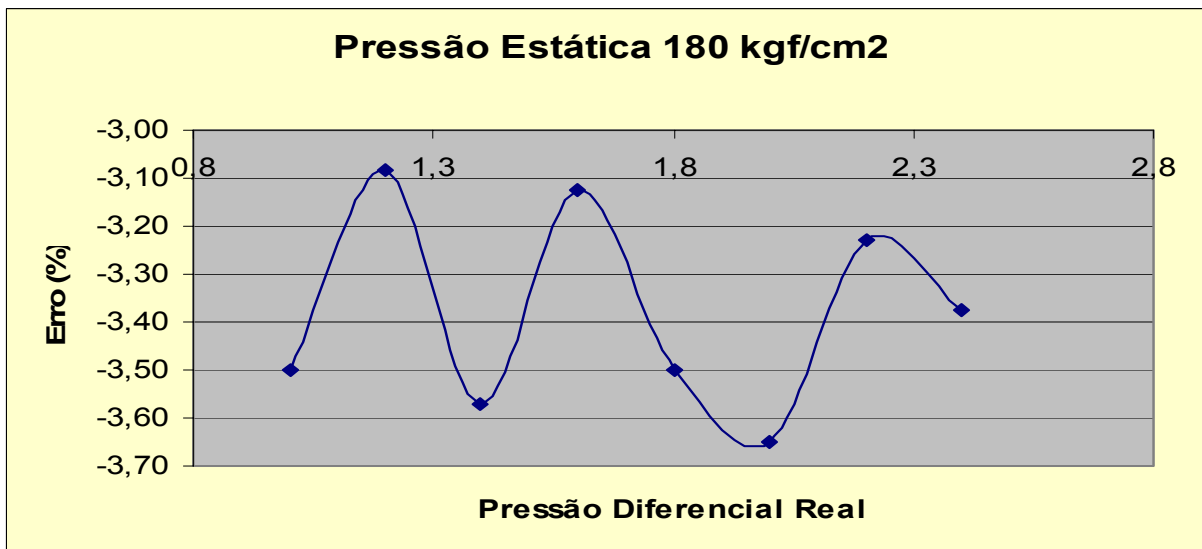


Figura 77: Relação entre o erro e o ΔP_{real} (180kgf/cm²)

Calibração com pressão estática 200 kgf/cm²

Tabela 24 – Calibração a pressão de 200 kgf/cm²

Cilindro Y		Cilindro X					
Pay	Pby	Pax	Pbx		Pax -Pay	ΔP Transm.	Erro (%)
200	2,4356	201,0	2,3970		1	0,960	-4,00
200	2,4356	201,2	2,3991		1,2	1,154	-3,83
200	2,4356	201,4	2,4011		1,4	1,345	-3,93
200	2,4356	201,6	2,4031		1,6	1,533	-4,19
200	2,4356	201,8	2,4052		1,8	1,726	-4,11
200	2,4356	202,0	2,4072		2	1,919	-4,05
200	2,4356	202,2	2,4093		2,2	2,113	-3,95
200	2,4356	202,4	2,4113		2,4	2,301	-4,12

Observação : todos os valores de pressão estão em kgf/cm²

O fator de conversão kgf/cm² para kPa é 1kgf/cm² = 98,0665 kPa

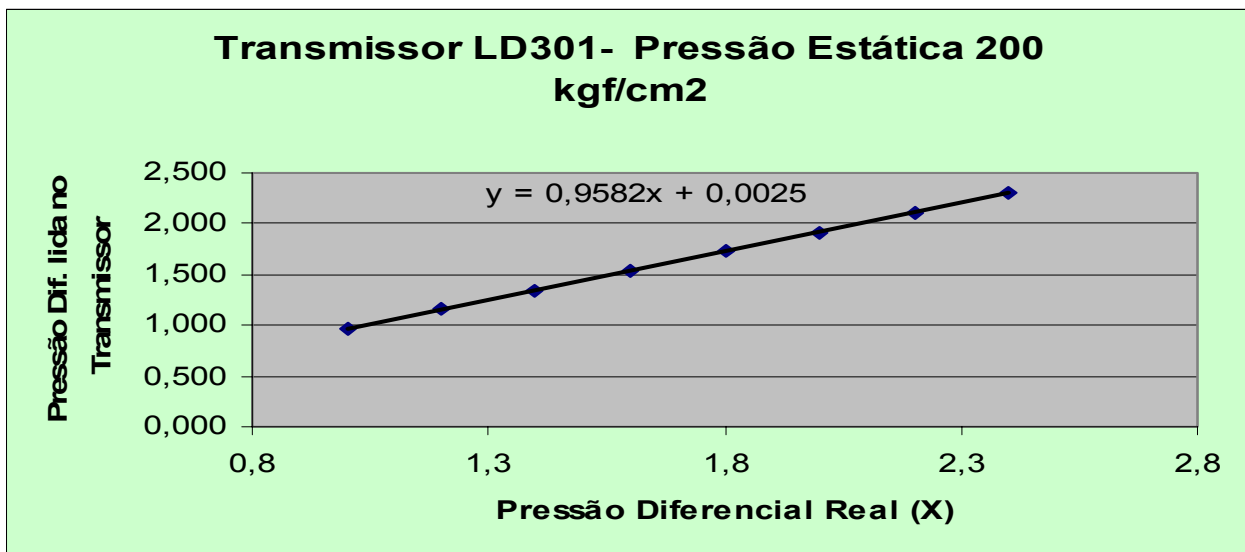


Figura 78: Relação entre o ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (200kgf/cm²)

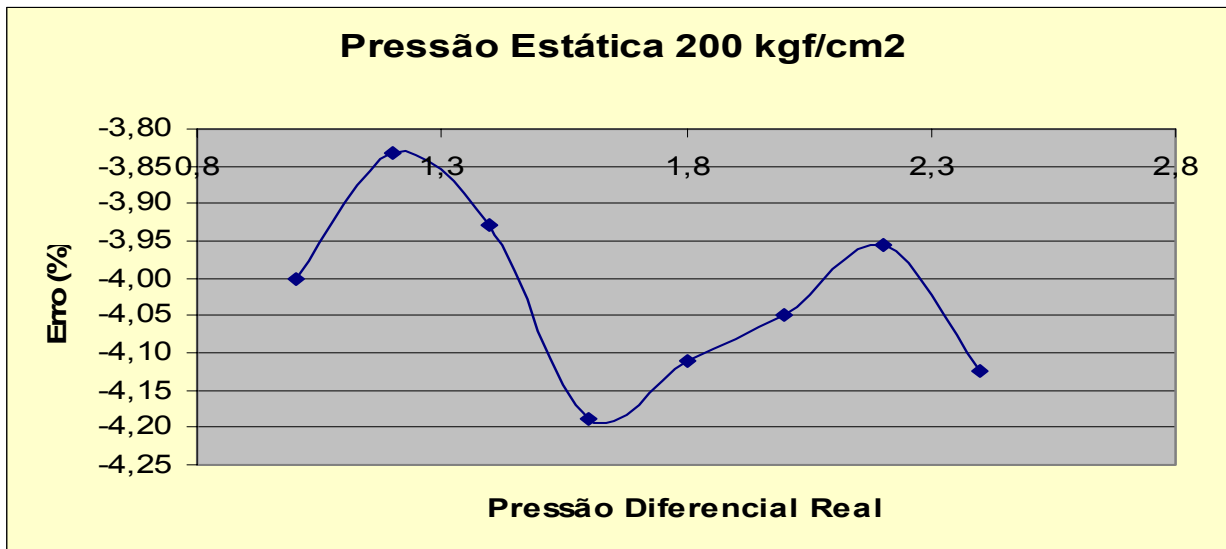


Figura 79: Relação entre o erro e o ΔP_{real} (200kgf/cm²)

5.6. Análise dos resultados da calibração

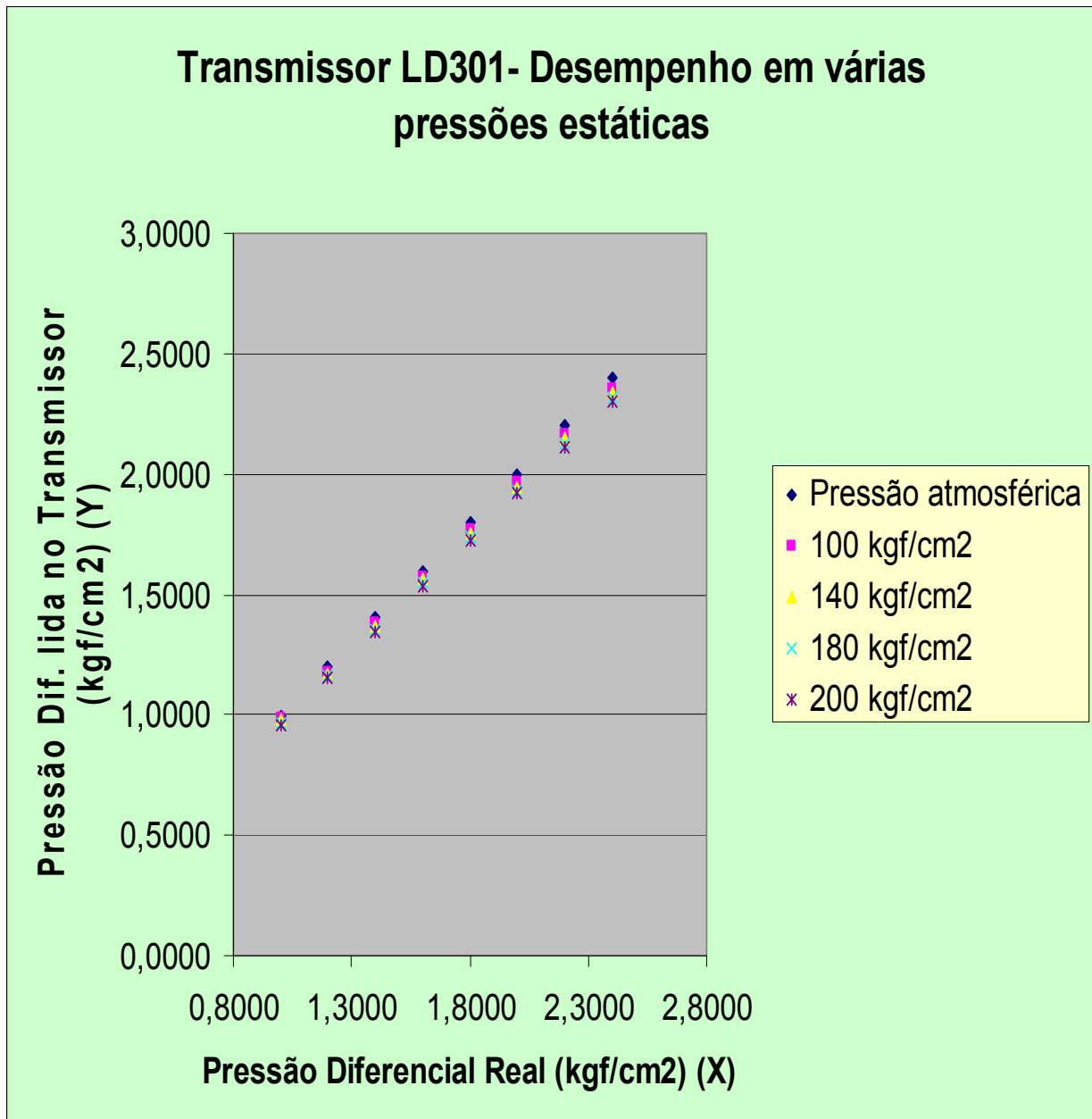


Figura 80: Relação entre o ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor para várias pressões estáticas

Conforme mostra a Fig. 80, a medida que a pressão estática sobe, o transmissor indica pressões diferenciais menores para a mesma pressão diferencial aplicada e portanto aumenta o erro em módulo, embora negativo. O coeficiente angular da curva de calibração varia de um valor igual a 1,0025 à pressão atmosférica, até 0,9582 à pressão de 200 kgf/cm². Esta curva relaciona o diferencial de pressão lido pelo transmissor como função do valor real.