

# *Monografia de Graduação*

## **Cálculo da Incerteza de Medição na Calibração de uma Balança de Pressão**

**Mariana da Fonseca Pereira**

**Natal, junho de 2006**

**PEREIRA, Mariana da Fonseca – Cálculo da Incerteza de Medição na Calibração de uma Balança de Pressão, Monografia, UFRN, Departamento de Engenharia Química, Programa de Recursos Humanos – PRH 14 / ANP. Áreas de Concentração: Engenharia de Petróleo e Metrologia, Natal/RN, Brasil.**

**Orientador: Prof. Luiz Pedro de Araújo**

**Co-Orientador: Prof. Walter Link**

---

**RESUMO:** A calibração é um procedimento experimental através do qual são estabelecidas as relações entre os valores indicados por um instrumento de medição e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões. Por melhores que sejam as características de um sistema de medição, este sempre apresentará erros, seja por fatores internos, seja por ação das grandezas de influência externas. A perfeita caracterização das incertezas associadas a estes erros é de grande importância para que o resultado da medição possa ser estimado de maneira segura. Este trabalho tem como objetivo a determinação da incerteza de medição no processo de calibração de uma balança de pressão. Esta calibração foi feita por comparação direta contra uma balança de pressão padrão. Compararam-se as duas máquinas em dez pontos igualmente distribuídos ao longo da faixa nominal do mensurando, desprezando-se para efeito de cálculo da área os valores abaixo de 20% da faixa nominal do mensurando. Além dessa determinação, foram calibradas as massas que compõem o mensurando, determinando, também sua incerteza de medição. A calibração foi feita em uma balança de pressão com faixa nominal de 0,1 a 6,0 MPa e incrementos de pressão de 0,1 MPa. O padrão utilizado para a calibração foi outra balança de pressão do tipo pistão invertido. Após a calibração foi feito um modelo matemático, incluindo as grandezas que influenciam na calibração da balança e os erros ocorridos nessa calibração, para calcular a incerteza de medição. A incerteza expandida calculada foi de 410 Pa. Essa incerteza é a incerteza padronizada das medições multiplicada pelo fator de abrangência  $k = 2,0$ , que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza calculada neste trabalho, comparada à faixa de medição da balança de pressão, foi baixa, constatando que o processo de calibração foi feito corretamente.

---

**Palavras Chaves:**

- Cálculo da Incerteza;
- Calibração;
- Balança de Pressão.

## ABSTRACT

### Calculation of the Uncertainty of Measurement in the Calibration of one Balance of Pressure

The calibration is an experimental procedure through which is established the relations between the values indicated for a measurement instrument and the corresponding values of the largenesses established for standards. For better that they are the characteristics of a measurement system, this always will present errors, either for internal factors, either for action of the external largenesses of influence. The perfect characterization of the uncertainties associates to these errors is of great importance so that the result of the measurement can be esteem in safe way. This work has as objective the determination of the uncertainty of measurement in the process of calibration of a pressure scale. This calibration was made by direct comparison against a pressure scale standard. The two machines in ten points equally distributed had been compared with the long one of the nominal band of measurement, disdaining for effect of calculation of the area the values below of 20% of the band of measurement. Beyond this determination, the masses had been calibrated that you compose measurement, determining, also its uncertainty of measurement. The calibration was made in a scale of pressure with band of 0,1 the 6,0 MPa and increments of 0,1 pressure of MPa. The standard used for the calibration was another scale of pressure of the inverted type piston. After the calibration was made a mathematical model, including the largenesses that influence in the calibration of the scale and the errors occurred in this calibration, to calculate the measurement uncertainty. The expanded uncertainty calculated was of 410 Pa. This uncertainty is the standardized uncertainty of the measurements multiplied factor  $k = 2,0$ , that for a distribution it corresponds approximately to a probability of 95%. The uncertainty calculated in this work, compared with the band of measurement of the pressure scale, was low, evidencing that the calibration process was made correctly.

Dedico este trabalho a minha mãe pelo incentivo e colaboração dada a minha formação e ao meu esposo por incentivar o meu aprimoramento e estar ao meu lado nos momentos que mais precisei.

## AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus por permitir a realização e conclusão deste trabalho.
- Agradeço ao professor Luiz Pedro de Araújo, pela orientação e contribuição dada a minha formação no curso de Engenharia Mecânica. Agradeço pela convivência nos últimos anos, onde foi um período suficiente para desenvolver uma relação de respeito e amizade.
- Agradeço ao professor Walter Link, pela oportunidade de realização deste trabalho, bem como pela orientação e interesse demonstrado durante o seu desenvolvimento. Agradeço por todos os momentos de atenção e amizade que se desenvolveram nesses anos.
- Agradeço ao professor José Romualdo Vidal pela amizade e pelo interesse demonstrado durante o período de realização desse trabalho.
- Agradeço aos professores Eduardo Lins, Afonso Avelino e Osvaldo Chiavore pela oportunidade de participar desse programa de recursos humanos.
- Agradeço aos amigos do Laboratório de Metrologia, LabMetrol, especialmente a Jean Barros, Marcelo Tanaka e Alexandro Barreto pela contribuição e ajuda dada durante a realização desse trabalho. Agradeço a ANP-PRH14 pelo auxílio financeiro.
- Agradeço a todos aqueles que contribuíram com a minha formação, especialmente aos meus professores de todas as épocas, que dispuseram de seu tempo e conhecimentos os quais foram fundamentais na minha formação acadêmica.
- Agradeço aos colegas de curso pela amizade e respeito dado durante todo esse tempo de convivência.
- Agradeço aos meus familiares pelo o apoio, compreensão e incentivo durante os momentos mais difíceis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama Comparativo das Escalas de Pressão.....	04
Figura 2.2 – Faixa de Indicação dos Padrões.....	05
Figura 2.3 – Tipos de Tubos de Bourdon.....	06
Figura 2.4 – Princípio de funcionamento de uma membrana ou diafragma.....	07
Figura 2.5 – Princípio de funcionamento de um fole.....	08
Figura 2.6 – Tipos de Coluna de Líquido.....	08
Figura 2.7 – Sensor capacitivo.....	09
Figura 2.8 – Sensor por silício ressonante.....	11
Figura 2.9 – Sensor do tipo piezoelétrico.....	11
Figura 2.10 – Princípio de Funcionamento de uma balança de pressão.....	12
Figura 2.11 – Configuração pistão livre.....	16
Figura 2.12 – Configuração pistão co-axial.....	16
Figura 2.13 – Configuração com a pressão exercida ao longo do comprimento de pistão/cilindro.....	17
Figura 2.14 – Configuração com a pressão exercida na superfície externa do cilindro..	17
Figura 4.1 – Coleção de massas da balança de pressão.....	26
Figura 4.2 – Marcação de uma massa da coleção.....	27
Figura 4.3 – Coleção de massas padrão da classe F1.....	27
Figura 4.4 – Balança 1.....	28
Figura 4.5 – Balança 2.....	29
Figura 4.6 – Balança de Pressão do tipo peso morto (mensurando).....	32
Figura 4.7 – Balança de Pressão do tipo pistão invertido (padrão).....	33
Figura 4.8 – Calibração da balança de pressão, pelo método da comparação.....	34

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Tabela de Student.....	24
Tabela 5.1 – Resultados obtidos na calibração da massa 01.....	37
Tabela 5.2 – Resultados obtidos na calibração da massa 02.....	37
Tabela 5.3 – Resultados obtidos na calibração da massa 03.....	37
Tabela 5.4 – Resultados obtidos na calibração da massa 04.....	37
Tabela 5.5 – Resultados obtidos na calibração da massa 05.....	38
Tabela 5.6 – Resultados obtidos na calibração da massa 06.....	38
Tabela 5.7 – Resultados obtidos na calibração da massa 07.....	38
Tabela 5.8 – Resultados obtidos na calibração da massa 08.....	38
Tabela 5.9 – Resultados obtidos na calibração da massa 09.....	38
Tabela 5.10 – Resultados obtidos na calibração da massa 10.....	38
Tabela 5.11 – Resultados obtidos na calibração da massa 11.....	39
Tabela 5.12 – Resultados obtidos na calibração da massa 12.....	39
Tabela 5.13 – Resultados obtidos na calibração da massa 13.....	39
Tabela 5.14 – Resultados obtidos na calibração da massa 14.....	39
Tabela 5.15 – Resultados obtidos na calibração da massa 15.....	39
Tabela 5.16 – Resultados obtidos na calibração da massa 16.....	39
Tabela 5.17 – Resultados obtidos na calibração da massa 01 com a média e o desvio padrão.....	40
Tabela 5.18 – Resultados obtidos na calibração da massa 15 com a média e o desvio padrão.....	42
Tabela 5.19 – Incerteza das Massas e Pistão.....	44
Tabela 5.20 – Dados da calibração.....	45
Tabela 5.21 – Média e Desvio Padrão das medições.....	45

# SUMÁRIO

<b>1 – Introdução.....</b>	<b>01</b>
<b>1.1 – Objetivos.....</b>	<b>02</b>
1.1.1 – Objetivos Gerais.....	02
1.1.2 – Objetivos Específicos.....	02
<b>2 – Sensores de Pressão.....</b>	<b>03</b>
<b>2.1 – Pressão.....</b>	<b>03</b>
2.1.1 – Unidades de Pressão.....	04
2.1.2 – Escala de Pressão.....	05
<b>2.2 – Medidores de Pressão.....</b>	<b>05</b>
<b>2.3 – Dispositivos para Medição de Pressão.....</b>	<b>06</b>
2.3.1 – Tubo de Bourdon.....	06
2.3.2 – Membrana ou Diafragma.....	07
2.3.3 – Fole.....	07
2.3.4 – Coluna de Líquido.....	08
2.3.5 – Sensor Tipo Capacitivo.....	09
2.3.6 – Sensor Tipo Resistivo (c/ Strain Gauge).....	10
2.3.7 – Sensor por Silício Ressonante.....	10
2.3.8 – Sensor Tipo Piezo-elétrico.....	11
<b>2.4 – Balança de Pressão.....</b>	<b>12</b>
2.4.1 – Configurações Básicas.....	15
<b>3 – Incerteza de Medição.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 – Definição.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2 – Tipos de Incertezas.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3 – Incerteza Padronizada.....</b>	<b>19</b>
3.3.1 – Avaliação do Tipo A.....	20
3.3.2 – Incerteza do Tipo B.....	21
<b>3.4 – Incerteza Combinada.....</b>	<b>22</b>
<b>3.5 – Incerteza Expandida.....</b>	<b>22</b>
<b>3.6 – Fator de Abrangência.....</b>	<b>23</b>
<b>3.7 – Procedimento Geral de Avaliação da Incerteza de Medição.....</b>	<b>24</b>
<b>4 – Metodologia.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1 – Coleção de Massas e Pistão.....</b>	<b>26</b>
4.1.1 – Definição do Mensurando e suas características.....	26
4.1.2 – Definição do Padrão e suas características.....	27

4. 1.2.1 – Massas Padrão.....	27
4. 1.2.2 – Balanças.....	27
4.1.2.2.1 – Balança 1.....	28
4.1.2.2.2 – Balança 2.....	28
4.1.3 – Fontes de erros e incertezas mais comuns em calibração de massa....	29
4.1.4 – Procedimento de Calibração.....	29
4.1.5 – Definição do Modelo Matemático.....	30
4.1.6 – Cálculo da Incerteza.....	30
4.1.6.1 – Dispersão dos Valores da Pesagem.....	30
4.1.6.2 – Incerteza das Massas Padrão.....	31
4.1.6.3 – Efeito da Resolução da Balança.....	31
4.1.6.4 – Efeito da Sensibilidade da Balança.....	31
4.1.6.5 – Efeito do Empuxo.....	31
4.1.6.6 – Efeito da Excentricidade da Balança.....	32
4.1.6.7 – Incerteza devido à Instabilidade do Padrão.....	32
4.2 – Balança de Pressão.....	32
4.2.1 – Definição do Mensurando e suas características.....	32
4.2.2 – Definição do Padrão e suas características.....	33
4.2.3 – Fontes de erros e incertezas mais comuns em calibração se sensores de pressão.....	33
4.2.4 – Procedimento de Calibração.....	34
4.2.5 – Definição do Modelo Matemático.....	34
4.2.6 – Cálculo da Incerteza.....	35
4.2.6.1 – Incerteza do Padrão.....	35
4.2.6.2 – Dispersão dos Valores da Medição.....	35
4.2.6.3 – Efeito da Resolução do Padrão.....	36
4.2.6.4 – Incerteza das Massas.....	36
4.2.6.5 – Incerteza Devido ao Gradiente de Temperatura.....	36
5 – Resultados e Discursão.....	37
5.1 – Coleção de Massas e Pistão.....	37
5.1.1 – Calibração.....	37
5.1.2 – Cálculo da Incerteza.....	40
5.1.2.1 – Cálculo da Incerteza na Massa 01.....	40
5.1.2.1.1 – Dispersão dos Valores da Pesagem.....	40
5.1.2.1.2 – Incerteza das Massas Padrão.....	40
5.1.2.1.3 – Efeito da Resolução da Balança.....	40

5.1.2.1.4 – Efeito da Sensibilidade da Balança.....	40
5.1.2.1.5 – Efeito do Empuxo.....	41
5.1.2.1.6 – Efeito da Excentricidade da Balança.....	41
5.1.2.1.7 – Incerteza devido à Instabilidade do Padrão.....	41
5.1.2.1.8 – Incerteza Combinada.....	41
5.1.2.1.9 – Grau de Liberdade Efetivo.....	41
5.1.2.1.10 – Fator de Abrangência.....	41
5.1.2.1.11 – Incerteza Expandida.....	42
5.1.2.2 – Cálculo da Incerteza na Massa 15.....	42
5.1.2.2.1 – Dispersão dos Valores da Pesagem.....	42
5.1.2.2.2 – Incerteza das Massas Padrão.....	42
5.1.2.2.3 – Efeito da Resolução da Balança.....	42
5.1.2.2.4 – Efeito da Sensibilidade da Balança.....	43
5.1.2.2.5 – Efeito do Empuxo.....	43
5.1.2.2.6 – Efeito da Excentricidade da Balança.....	43
5.1.2.2.7 – Incerteza devido à Instabilidade do Padrão.....	43
5.1.2.2.8 – Incerteza Combinada.....	43
5.1.2.2.9 – Grau de Liberdade Efetivo.....	43
5.1.2.2.10 – Fator de Abrangência.....	44
5.1.2.2.11 – Incerteza Expandida.....	44
5.1.2.3 – Cálculo da Incerteza das Massas.....	44
5.2 – Balança de Pressão.....	45
5.2.1 – Calibração.....	45
5.2.2 – Cálculo da Incerteza.....	45
5.2.2.1 – Incerteza do Padrão.....	46
5.2.2.2 – Dispersão dos Valores da Medição.....	46
5.2.2.3 – Efeito da Resolução do Padrão.....	46
5.2.2.4 – Incerteza das Massas.....	46
5.2.2.5 – Incerteza Devido ao Gradiente de Temperatura.....	46
5.2.2.6 – Incerteza Combinada.....	47
5.2.2.7 – Grau de Liberdade Efetivo.....	47
5.2.2.8 – Fator de Abrangência.....	47
5.2.2.9 – Incerteza Expandida.....	47
6 – Conclusões.....	48
7 – Referências Bibliográficas.....	49
ANEXO I – Relatório de Estágio.....	50

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Atualmente, o conceito de rastreabilidade vem sendo muito utilizado, embora o mesmo não seja compreendido corretamente pela sociedade técnica e acadêmica. Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), a rastreabilidade é definida como a propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão estar relacionado a referências estabelecidas, geralmente padrões nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas definidas. Analogamente, dentro desta cadeia de medição, pode-se considerar as calibrações de instrumentos/equipamentos como sendo rastreáveis.

Há de se considerar, também, a fim de garantir uma confiabilidade ao padrão utilizado, a competência do laboratório em realizar calibrações. Para atender esse requisito, o procedimento de calibração deve ser projetado e executado de forma a assegurar que as calibrações e medições feitas pelo laboratório sejam rastreáveis ao Sistema Internacional de Unidades (SI).

Um grande padrão de pressão encontrado atualmente é a balança de pressão. Esse instrumento é considerado o padrão de referência mais utilizado para a grandeza pressão. Seu princípio de funcionamento se baseia em um sistema de medição cujas grandezas são relacionadas diretamente às unidades básicas do SI. Dada sua confiabilidade e estabilidade essa balança é utilizada para calibração de manômetros padrão e outras balanças de pressão.

Como método fundamental de medição de pressão a exatidão da balança de pressão é a de maior nível (exceto em uma pequena faixa de pressão na região da pressão atmosférica, onde o melhor instrumento é a coluna de mercúrio). Além disso, a balança de pressão possui muitas vantagens práticas, são portáteis e robustas, e capaz de medir altas pressões a uma ampla faixa, com uma exatidão que é pouco dependente do valor de pressão.

### 1.1 – Objetivos

### **1.1.1 – Objetivos Gerais**

Este trabalho visa o estudo do cálculo da incerteza de medição na calibração de uma balança de pressão e seus acessórios (massas e pistão).

### **1.1.2 – Objetivos Específicos**

- Obter o conhecimento dos sensores e padrões de pressão e seus procedimentos de calibração;
- Produzir uma descrição básica dos tipos de balança de pressão, seus princípios de funcionamento e os métodos de calibração;
- Calibrar a coleção de massas e o pistão que fazem parte da balança de pressão e calcular a incerteza de medição nessa calibração;
- Calibrar a balança de pressão e calcular a incerteza de medição nessa calibração;
- Assegurar confiabilidade e rastreabilidade dos resultados obtidos com a calibração desse padrão de pressão;
- Diminuir os riscos de danos das balanças de pressão, devido aos seus deslocamentos atuais para calibração na região sudeste do país e diminuir as desigualdades regionais com relação à estrutura metrológica e aos recursos humanos.

## CAPÍTULO 2

### SENSORES DE PRESSÃO

#### 2.1 – Pressão

A medição de pressão é o mais importante padrão de medida, pois as medidas de vazão, nível, entre outros, podem ser feitas utilizando-se esse princípio. Pressão é definida como o efeito de uma força agindo sobre uma área.

$$P = \frac{F}{A}$$

Onde:

P: pressão

F: força

A: área

#### ➤ **Pressão Atmosférica**

É a pressão exercida pela atmosfera terrestre e medida com um barômetro. Ao nível do mar esta pressão é aproximadamente de 760 mmHg.

#### ➤ **Pressão Relativa**

É a pressão medida em relação à pressão atmosférica, tomada como referência.

#### ➤ **Pressão Absoluta**

É a soma da pressão relativa e atmosférica, também referida como medida a partir do vácuo absoluto.

#### ➤ **Pressão Negativa ou Vácuo**

É quando se mede uma pressão relativa abaixo da pressão atmosférica.

Na figura 2.1 é mostrado um diagrama comparativo das escalas de pressão absoluta, pressão relativa e vácuo em relação à pressão atmosférica.

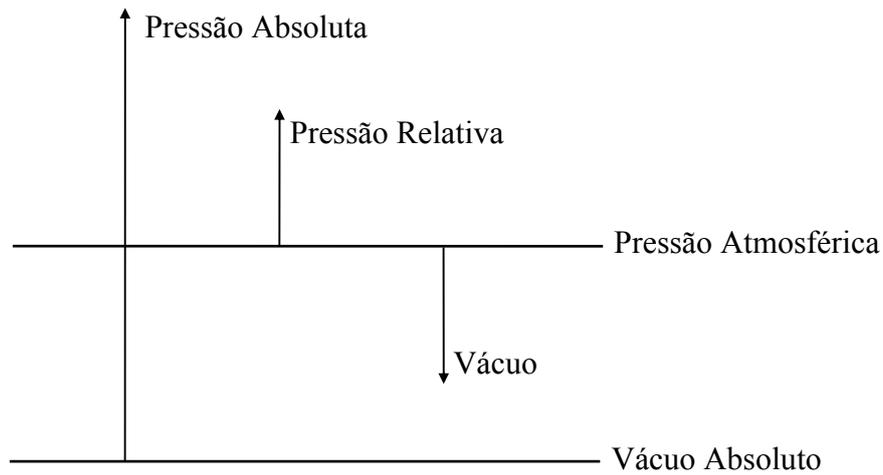


Figura 2.1 – Diagrama Comparativo das Escalas de Pressão.

### ➤ **Pressão Diferencial**

É a diferença entre duas pressões, sendo representada pelo símbolo  $\Delta P$  (delta P). Essa diferença de pressão normalmente é utilizada para medir vazão, nível, pressão, etc.

### ➤ **Pressão Estática**

É o peso exercido por um líquido em repouso ou que esteja fluindo perpendicularmente a tomada de impulso, por unidade de área exercida.

### ➤ **Pressão Dinâmica ou Cinética**

É a pressão exercida por um fluido em movimento. É medida fazendo a tomada de impulso de tal forma que recebe o impacto do fluxo.

## 2.1.1 – Unidades de Pressão

A unidade de pressão no Sistema Internacional (SI) é o Pascal (Pa), definido como uma força de 1 N aplicada a uma superfície de 1 m<sup>2</sup>, portanto 1 Pa = 1 N.m<sup>-2</sup>. Outra unidade aceita é o bar (1 bar = 10<sup>5</sup> Pa). As seguintes unidades (mmHg, mmH<sub>2</sub>O, Torr, atm, kgf.cm<sup>-2</sup>, psi, etc.) deverão ser evitadas. A unidade mmHg, todavia, é ainda internacionalmente aceita somente nas medições de pressão sanguínea devido a sua

larga divulgação e aos problemas envolvendo o uso da unidade SI (hectopascal e quilopascal).

### 2.1.2 – Escala de Pressão

A escala de pressão está baseada em padrões primários que realizem a definição da grandeza. Os padrões primários são caracterizados independentemente por medição direta das grandezas envolvidas. Em função da faixa de indicação os padrões utilizados seguem de acordo com a figura 2.2.

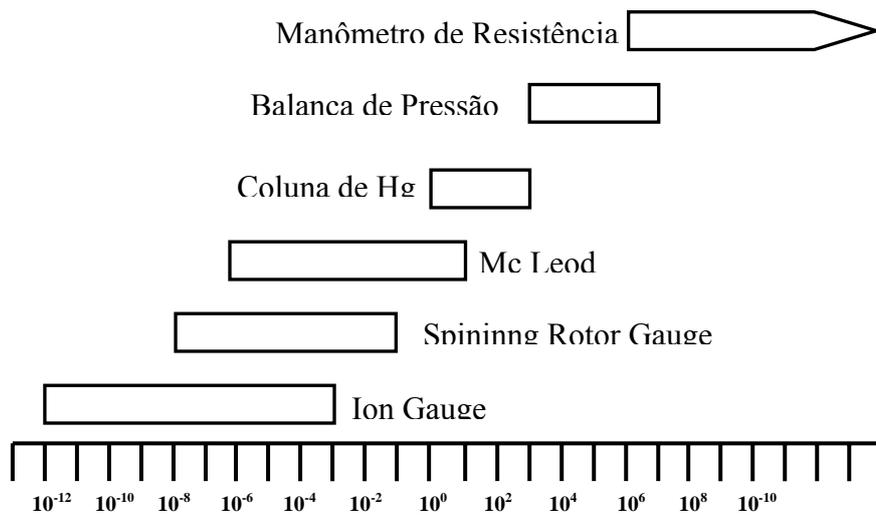


Figura 2.2 – Faixa de Indicação dos Padrões.

### 2.2 – Medidores de Pressão

Quanto ao princípio de medição da pressão os medidores podem ser classificados em dois grupos:

- Medidores Absolutos;
- Medidores Relativos.

Os medidores absolutos são sistemas de medição que podem ser caracterizados numa forma completa e independente com referência apenas às unidades básicas do SI. Quando a pressão é definida pela relação força por unidade de área ou então pela altura de uma coluna líquida a grandeza pressão é dimensionalmente  $P = (ML^{-1}T^{-2})$ . Um padrão primário de pressão envolverá assim a medição de massa, comprimento e tempo. Os manômetros de coluna líquida e as balanças de pressão são exemplos de medidores absolutos. Os medidores relativos medem pressão em função de uma propriedade física

ou um fenômeno físico. Os manômetros, mano-vacuômetros, vacuômetros e transdutores são exemplos de medidores relativos.

## 2.3 – Dispositivos para Medição de Pressão

Os instrumentos de medição de pressão podem ter vários tipos de elementos sensores que também podem ser utilizados como transmissores e controladores. A seguir serão descritos alguns tipos de elementos sensores.

### 2.3.1 – Tubo de Bourdon

Consiste geralmente de um tubo com seção oval, disposto na forma de arco de circunferência tendo uma extremidade fechada, estando a outra aberta à pressão a ser medida. Com a pressão agindo em seu interior, o tubo tende a se expandir resultando um movimento em sua extremidade fechada. Esse movimento é transmitido, através da engrenagem, a um ponteiro que indicará o valor da pressão.

O tubo de Bourdon pode se apresentar nas seguintes formas: tipo C, espiral e helicoidal, mostradas na figura 2.3.

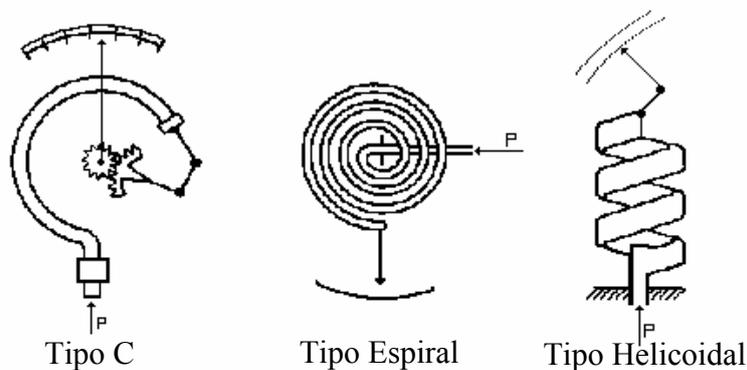


Figura 2.3 – Tipos de Tubos de Bourdon.

### 2.3.2 – Membrana ou Diafragma

É constituído por um disco de material elástico (metálico ou não), fixo pela borda. Uma haste fixa ao centro do disco está ligada a um mecanismo de indicação.

Quando uma pressão é aplicada, a membrana se desloca e esse deslocamento é proporcional à pressão aplicada. A membrana (diafragma) geralmente é ondulada ou

corrugada para aumentar sua área efetiva. Na figura 2.4 é mostrado o princípio de funcionamento de uma membrana ou diafragma.

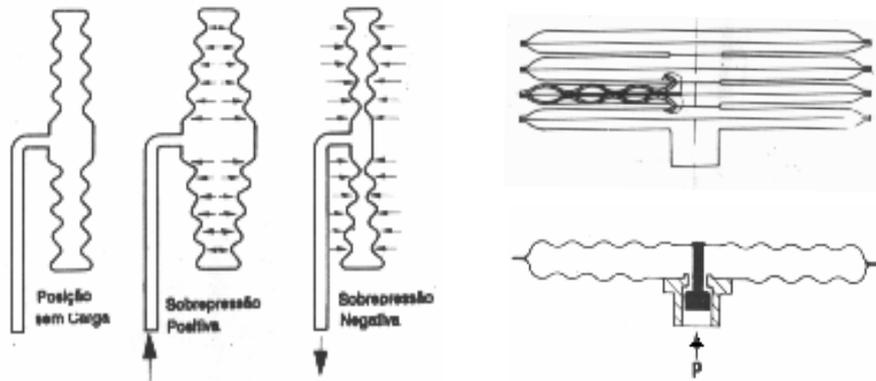


Figura 2.4 – Princípio de funcionamento de uma membrana ou diafragma.

### 2.3.3 – Fole

O fole é também muito empregado na medição de pressão, é basicamente um cilindro metálico corrugado ou sanfonado.

Uma pressão aplicada no interior do fole provoca sua distensão que é proporcional à pressão aplicada. O sistema se mantém em equilíbrio por meio da força de uma mola. Na figura 2.5 é mostrado o princípio de funcionamento de um sensor de pressão com fole.

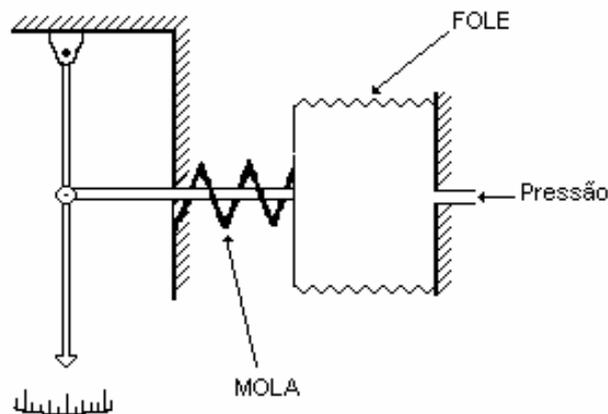


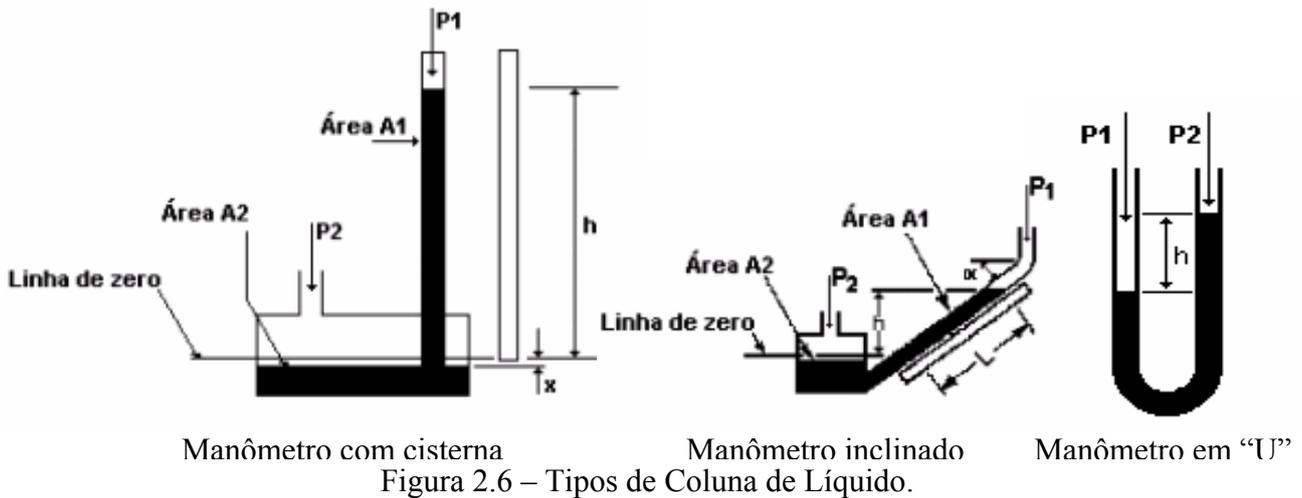
Figura 2.5 – Princípio de funcionamento de um fole.

### 2.3.4 – Coluna de líquido

Consiste, basicamente, de um tubo de vidro, contendo certa quantidade de líquido, fixado a uma base junto a uma escala graduada.

As colunas podem ser basicamente de três tipos: coluna reta vertical, reta inclinada e em forma de “U”. Na figura 2.6 são mostrados os tipos, mais comuns, de coluna de líquido. Os líquidos mais utilizados nas colunas são: água (normalmente com um corante) e mercúrio.

Quando se aplica uma pressão na coluna o líquido é deslocado, sendo que este deslocamento é proporcional à pressão aplicada.



### 2.3.5 – Sensor Tipo Capacitivo

A principal característica dos sensores capacitivos é a completa eliminação dos sistemas de alavancas na transferência da força / deslocamento entre o processo e o sensor.

Este tipo de sensor resume-se na deformação direta de uma das armaduras do capacitor. Tal deformação altera o valor da capacitância total que é medida por um circuito eletrônico.

Esta montagem, se por um lado, elimina os problemas mecânicos das partes móveis, expõe a célula capacitiva às rudes condições do processo, principalmente a temperatura. Este inconveniente pode ser superado através de circuitos de compensação da temperatura, montados juntos ao sensor.

Outra característica inerente é a falta de linearidade entre a capacitância e a distância entre as armaduras devido á deformação não linear, sendo, portanto, necessária

uma compensação (linearização) feita através do circuito eletrônico. Na figura 2.7 é mostrado um esquema de sensor do tipo capacitivo.

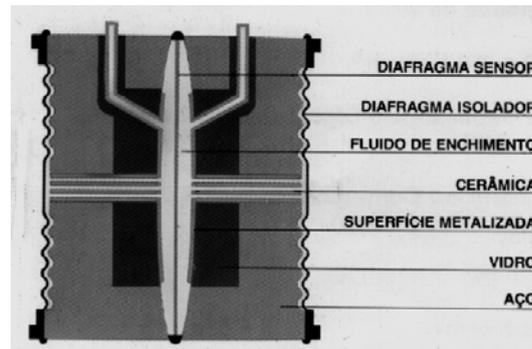


Figura 2.7 – Sensor capacitivo.

O sensor é formado pelos seguintes componentes:

- Armaduras fixas metalizadas sobre um isolante de vidro fundido;
- Dielétrico formado pelo óleo de enchimento (silicone ou fluorube);
- Armadura móvel (diafragma sensor).

Uma diferença de pressão entre as câmaras de alta (High) e de baixa (Low) produz uma força no diafragma isolador que é transmitida pelo líquido de enchimento. A força atinge a armadura flexível (diafragma sensor) provocando sua deformação, alterando, portanto, o valor da capacitância que é medida pelo circuito eletrônico gerando um sinal proporcional à variação de pressão aplicada à câmara da cápsula.

### 2.3.6 – Sensor Tipo Resistivo (c/ Strain Gauge)

Baseia-se no princípio de variação da resistência de um fio, mudando-se as suas dimensões. Para entender como varia a resistência de um condutor é necessário analisar a equação geral da resistência:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

Onde:

R: Resistência do condutor

$\rho$ : Resistividade do material

L: Comprimento do condutor

S: Área da seção transversal

A equação mostra que a resistência elétrica de um condutor é diretamente proporcional à resistividade e ao comprimento e inversamente proporcional a área da seção transversal.

### 2.3.7 – Sensor por Silício Ressonante

O sensor consiste de uma cápsula de silício colocada estrategicamente em um diafragma, utilizando o diferencial de pressão para vibrar em maior ou menor intensidade, afim de que essa frequência seja proporcional à pressão aplicada. Na figura 2.8 é mostrado um sensor por silício ressonante.

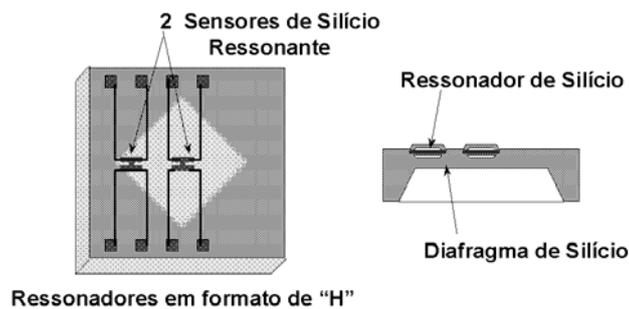


Figura 2.8 – Sensor por silício ressonante.

### 2.3.8 – Sensor Tipo Piezo-elétrico

Os elementos piezo-elétricos são cristais, como o quartzo, a turmalina e o titanato que acumulam cargas elétricas em certas áreas da estrutura cristalina, quando sofrem uma deformação física, por ação de uma pressão. São elementos pequenos e de construção robusta. Seu sinal de resposta é linear com a variação de pressão e são capazes de fornecer sinais de altíssimas frequências de milhões de ciclos por segundo.

O efeito piezo-elétrico é um fenômeno reversível. Se o sensor for conectado a um potencial elétrico, resultará em uma correspondente alteração da forma cristalina. Este efeito é altamente estável e exato, por isso é utilizado em relógios de precisão.

A carga elétrica devida à alteração da forma é gerada sem necessidade de energia auxiliar, uma vez que o quartzo é um elemento transmissor ativo. Esta carga é conduzida à entrada de um amplificador, sendo indicada ou convertida em um sinal

de saída, para tratamento posterior. Na figura 2.9 é mostrado um sensor do tipo piezoelétrico.

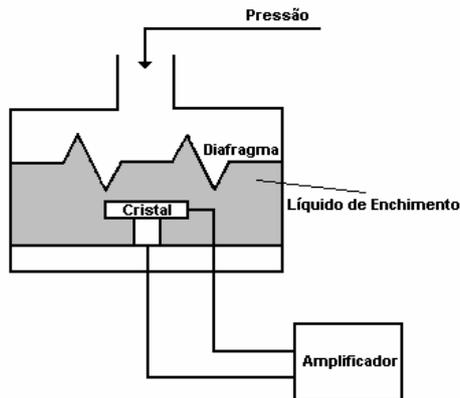


Figura 2.9 – Sensor do tipo piezoelétrico.

#### 2.4 – Balança de Pressão

A balança de pressão, cujo esquema de funcionamento está ilustrado na figura 2.10, é um medidor absoluto e tem como princípio de medição o equilíbrio entre as forças oriundas da pressão de um fluido atuando na base do seu pistão (F) e aquela relativa às massas atuantes no topo do mesmo sob ação da aceleração da gravidade (m.g).

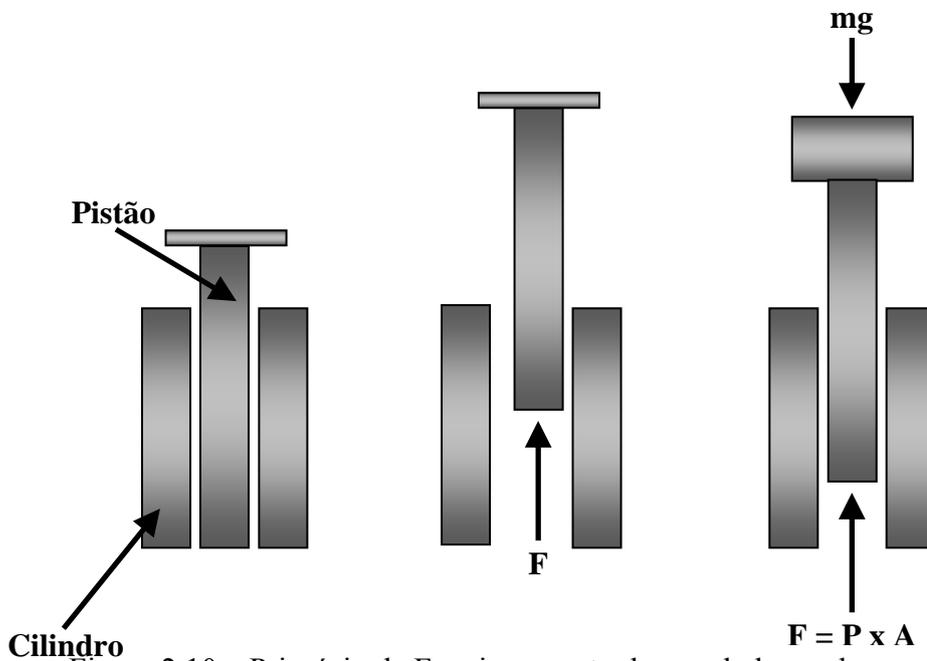


Figura 2.10 – Princípio de Funcionamento de uma balança de pressão.

A balança consiste fundamentalmente de um pistão vertical que pode girar livremente no cilindro. Estes dois elementos devem ser fabricados com boa qualidade, para gerar uma superfície que é chamada de área efetiva. A pressão a ser determinada é

aplicada à base do pistão, gerando uma força vertical ascendente. Esta força é equilibrada por uma força gravitacional descendente causada pelas massas, sujeitas à gravidade local e colocadas no topo do pistão. O pistão é um dos componentes da força ativa.

Em alguns casos, por razões práticas, e principalmente à baixa pressão, o cilindro rotaciona no lugar do pistão. O princípio de funcionamento e os métodos utilizados são exatamente os mesmos neste caso.

A Pressão é transmitida para o elemento móvel por um fluido, que pode ser um gás (usualmente nitrogênio) ou um líquido (usualmente óleo).

Em alguns casos o elemento de medição não é um conjunto cilindro / pistão, é uma balança com esfera flutuante que suporta a carga e uma base semi-esférica que suporta a esfera. Neste caso o regulador do fluxo controla o suprimento do gás para garantir a folga no sistema. Este tipo de balança só se usa com gás e para pressão relativa baixa (~ 300kPa).

Quando as massas são submetidas a vácuo, a pressão medida na balança é a pressão absoluta. A pressão residual criada em volta das massas produz uma força que se opõe à pressão medida.

Quando as massas e o topo do pistão são submetidos à pressão atmosférica mede-se pressão relativa. Em alguns casos, um adaptador permite virar o conjunto pistão-cilindro e nesta condição mede pressão negativa baixa (abaixo da pressão atmosférica), gerando uma força ascendente oposta à força gravitacional.

A caracterização da pressão medida por uma balança é obtida a partir da análise dos diferentes componentes das forças aplicadas ao sistema. Para uma balança, que opera com gás, a pressão medida é dada por:

$$p_e = \frac{\sum_i m_i g [1 - (\rho_a / \rho_{mi})]}{A_p [1 + (\alpha_p + \alpha_c) t - t_r]}$$

Onde:

$p_e$ : pressão medida na base do pistão.

$m_i$ : valor da massa individual de cada peso aplicado ao pistão, incluindo todos os elementos flutuantes.

$g$ : aceleração local gravitacional.

$\rho_a$ : densidade do ar.

$\rho_{mi}$ : densidade de cada peso.

$A_p$ : área efetiva do pistão-cilindro a uma temperatura de referência  $t_r$  (usualmente 20°C) e a uma pressão  $p_e$ .

$\alpha_p$ : coeficiente linear de expansão térmica do pistão.

$\alpha_c$ : coeficiente linear de expansão térmica do cilindro.

$t$ : temperatura do conjunto pistão-cilindro.

Para um líquido que opera em uma balança de medição de pressão, uma expressão similar pode ser elaborada, incluindo a força devido à tensão superficial do líquido.

$$p_e = \frac{\sum_i m_i g [1 - (\rho_a / \rho_{mi})] + \sigma \cdot c}{A_p [1 + (\alpha_p + \alpha_c) t - 20]}$$

Onde:

$\sigma$ : tensão superficial do líquido.

$c$ : é a circunferência do pistão “molhado”.

Usando gás e operando com pressão absoluta, a pressão medida é expressa por:

$$p_{abs} = \frac{\sum_i m_i g}{A_p [1 + (\alpha_p + \alpha_c) t - 20]} + \mu$$

Onde:

$p_{abs}$ : pressão absoluta medida na base do pistão.

$\mu$ : pressão residual em torno dos pesos.

$m_i$ : valor da massa individual para os pesos aplicado ao pistão, referida à densidade específica e não à densidade convencional.

A base do pistão é considerada o nível de referência da balança. Em alguns casos, para razões práticas, o peso inicial é ajustado pelo fabricante para mudar o nível de referência à saída de pressão da balança.

Quando a pressão  $p_m$  é expressa em um nível diferente do nível de referência, um termo de correção (correção da coluna do fluido) deve ser adicionado à expressão do cálculo da pressão.

No modo relativo:

$$P_m = P_e + (\rho_f - \rho_a)g \cdot \Delta h$$

No modo absoluto:

$$P_m = P_{abs} + \rho_f \cdot g \cdot \Delta h$$

Onde:

$\rho_f$ : densidade do fluido pressurizador.

$\rho_a$ : densidade do ar.

$\Delta h$ : diferença entre a altura  $h_1$  do nível de referência e  $h_2$  altura do ponto onde a pressão é medida.

$$\Delta h = h_1 - h_2$$

#### **2.4.1 – Configurações Básicas**

A balança de pressão possui basicamente três configurações diferentes para o conjunto pistão/cilindro.

O tipo construtivo mais comum está esquematizado na figura 2.11, conhecido por pistão livre. A ação do fluido pressurizador na base do pistão, na superfície lateral ao longo do cilindro, provoca deformações mecânicas, causando vazamento excessivo a grandes pressões. Balanças de pressão deste tipo podem ser usadas apenas para valores baixos de pressão, embora com uma configuração apropriada eles podem ser usados com êxito com pressões em torno de 800 MPa.

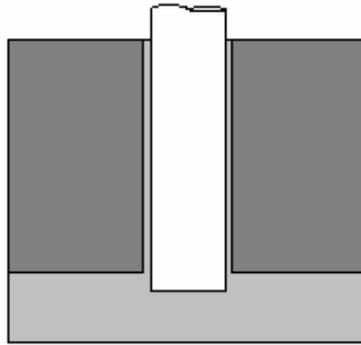


Figura 2.11 – Configuração pistão livre.

A configuração de instrumentos de alta pressão é diferente em dois aspectos: primeiro, a folga radial entre o pistão e o cilindro é substancialmente pequena, apenas com uma folga adequada para baixas pressões; segundo, a carga é aplicada ao pistão trabalhando por meio de outro pistão auxiliar co-axial, como é mostrado na figura 2.12. Este tipo de configuração elimina o problema de vazamento além de eliminar momentos fletores que o carregamento poderia transmitir ao pistão.

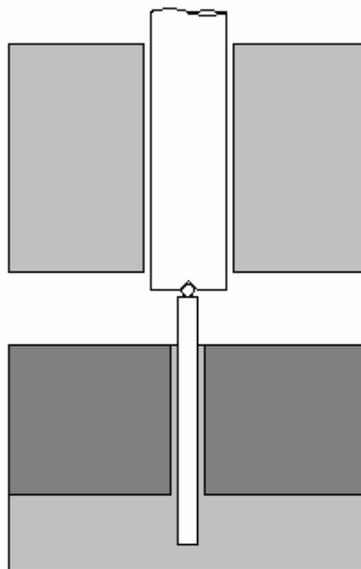


Figura 2.12 – Configuração pistão co-axial.

Para eliminar o problema do vazamento excessivo do fluido a altas pressões duas outras configurações básicas foram desenvolvidas.

No primeiro caso a ação da pressão do fluido é transmitida apenas à base do pistão e ao longo do comprimento do pistão e cilindro, é transmitida na superfície externa do cilindro. Essa pressão externa diminui a folga próxima ao pistão e cilindro ao longo do seu comprimento, reduzindo o vazamento. Esta configuração é mostrada na figura 2.13. O limite máximo de pressão é ajustado por uma redução na folga para uma folga adequada.

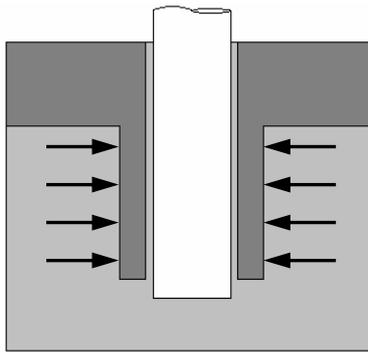


Figura 2.13 – Configuração com a pressão exercida ao longo do comprimento de pistão/cilindro.

Na segunda configuração uma pressão de fluido variável,  $P_j$ , de um sistema de pressão independente, é aplicada na superfície externa do cilindro permitindo o controle da folga entre o pistão e o cilindro como mostra a figura 2.14. Em princípio é possível uma gama grande de pressão utilizando apenas um pistão/cilindro. Porém, na prática é usual utilizar uma série de pistões para obter-se uma melhor sensibilidade em uma medição particular. A solução de balança de pressão apresentada na figura 2.14 é normalmente utilizada em aplicações que necessitem de altas pressões.

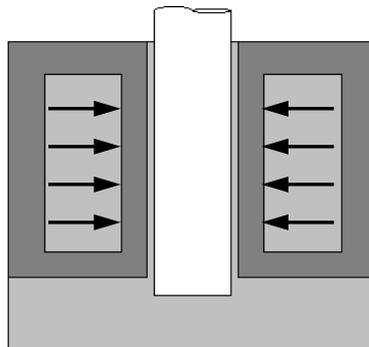


Figura 2.14 – Configuração com a pressão exercida na superfície externa do cilindro.

## CAPÍTULO 3

### CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

#### 3.1 – Incerteza de Medição

A incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do mensurando. O resultado de uma medição após a correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos, é ainda, tão somente uma estimativa do valor do mensurando por causa da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado no que diz respeito aos efeitos sistemáticos.

Na prática, existem muitas fontes possíveis de incerteza em uma medição, incluindo:

- a) definição incompleta do mensurando;
- b) realização imperfeita da definição do mensurando;
- c) amostragem não representativa - a amostra medida pode não representar o mensurando;
- d) conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais;
- e) erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos;
- f) resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;
- g) valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência;
- h) valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no algoritmo de redução de dados;
- i) aproximação e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição;
- j) variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas.

Estas fontes não são necessariamente independentes e algumas das fontes de a) a i) podem contribuir para a fonte j). Naturalmente, um efeito sistemático não reconhecido não pode ser levado em consideração na avaliação da incerteza do resultado de medição, porém contribui para seu erro.

#### 3.2 – Tipos de Incertezas

Têm-se três tipos de incertezas: Incerteza padrão ( $u$ ), Incerteza combinada ( $u_c$ ) e Incerteza expandida ( $U$ ).

A incerteza padrão de um dado aleatório corresponde à estimativa equivalente a um desvio padrão ( $s$ )  $\rightarrow u = \pm s$ . Esta incerteza tem uma probabilidade de ocorrência  $P = 68,27\%$ .

A incerteza combinada de um processo de medição é calculada considerando-se a ação simultânea de todas as fontes de incertezas, ou seja, é a influência combinada de todas as incertezas padrão sobre o resultado da medição (RM). A incerteza combinada  $u_c$  também equivale a um desvio padrão. Esta incerteza também tem uma probabilidade de ocorrência  $P = 68,27\%$ .

A incerteza expandida é determinada a partir da incerteza combinada multiplicada pelo coeficiente t-Student apropriado. Esta incerteza reflete a faixa de dúvidas ainda presente na medição para uma probabilidade de enquadramento definida, geralmente  $95,45\%$ .

### **3.3 – Incerteza Padronizada**

A incerteza padronizada ou padrão de uma fonte de erro é a faixa de dispersão em torno do valor central equivalente a um desvio padrão.

A avaliação da incerteza padronizada pode ser classificada em Tipo A e Tipo B. O propósito de classificação Tipo A e Tipo B é de indicar as duas maneiras diferentes de avaliar as componentes da incerteza e serve apenas para discussão, a classificação não se propõe a indicar que haja qualquer diferença na natureza dos componentes resultando dois tipos de avaliação. Ambos os tipos de avaliação são baseados em distribuições de probabilidade e os componentes de incerteza resultantes de cada tipo são quantificados por variâncias ou desvios padrão.

#### **3.3.1 – Avaliação do Tipo A**

O procedimento tipo "A" para estimativa da incerteza padrão baseia-se no cálculo de parâmetros estatísticos, os quais são obtidos de várias medições. Considere a

variável aleatória  $x$ . Foram efetuadas  $n$  medidas. A média pode ser estimada pela equação:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

O desvio padrão experimental  $S(x)$  é calculado pela equação:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Para que o valor de  $S(x)$  seja confiável é necessário que seja realizado um número suficientemente grande de medições, geralmente  $n \geq 10$ .

Se utilizar o valor médio de várias indicações, obtido a partir da média de um conjunto de " $n$ " indicações de  $x$ , o desvio padrão experimental da média de  $x$  é estimado por:

$$s(\bar{x}) = \frac{S(x)}{\sqrt{n}}$$

A incerteza padrão associada à variável  $x$ , representada por  $u(x)$ , é o próprio desvio padrão da média das " $n$ " observações, ou seja,

$$u(x) = s(\bar{x})$$

O número de graus de liberdade envolvido ( $\nu$ ) na determinação de  $u(x)$  é o número de medições independentes efetuadas menos 1, ou seja:

$$\nu = n - 1$$

### 3.3.2 – Incerteza do Tipo B

Método de avaliação da incerteza por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações.

A incerteza padronizada  $u(x_i)$  é avaliada por julgamento científico baseando-se em todas informações disponíveis sobre a possível variabilidade de  $x_i$ . O conjunto de informações pode incluir:

- dados de medições prévias;
- a experiência ou o conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos;
- especificações do fabricante;
- dados fornecidos em certificados de calibração e outros certificados e;
- incertezas relacionadas a dados de referência extraídos de manuais.

Devem ser coletadas informações que permitam estimar a incerteza associada a cada fonte de erro.

Recomenda-se apresentar o valor associado aos limites de variação da fonte de incertezas em sua unidade natural e identificar o tipo de distribuição de probabilidade envolvida (normal, retangular, triangular ou outra).

Em função do tipo de distribuição será definido o divisor utilizado para converter o valor conhecido na incerteza padronizada. Para distribuições normais este valor geralmente é unitário no caso da avaliação de incerteza tipo “A”, ou coincide com o fator de abrangência utilizado na fonte de informação quando a avaliação tipo “B” é considerada.

Os divisores para algumas distribuições de probabilidade são:

- Retangular =  $\sqrt{3}$
- Triangular =  $\sqrt{6}$
- U = 2

### **3.4 – Incerteza Combinada**

A incerteza padronizada combinada de um resultado de medição é a incerteza padronizada quando este resultado é obtido por meio dos valores de várias outras grandezas, sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos, sendo estes as

variâncias ou covariâncias destas outras grandezas, ponderadas de acordo com quanto o resultado da medição variam com mudanças nestas grandezas.

Deve-se combinar estas incertezas individuais para se ter a influência conjunta de todas as fontes sobre o resultado final:

$$u_c = \sqrt{(u_1)^2 + (u_2)^2 + \dots + (u_n)^2}$$

### 3.5 – Incerteza Expandida

Embora a incerteza padronizada combinada  $u_c(y)$  possa ser universalmente usada para expressar a incerteza de um resultado de medição, em algumas aplicações comerciais, industriais e regulamentadoras, e quando a saúde e a segurança estão em questão, é, muitas vezes, necessário dar uma medida de incerteza que define um intervalo em torno do resultado da medição com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando.

A medida adicional de incerteza que satisfaz o requisito de fornecer um intervalo do tipo indicado anteriormente denominada incerteza expandida e é representada por  $U$ . A incerteza expandida  $U$  é obtida multiplicando-se a incerteza padronizada combinada  $u_c$  por um fator de abrangência  $k$ :

$$U = k \cdot u_c(y)$$

O resultado de uma medição é, então, convenientemente expresso como  $Y = y \pm U$ , que é interpretado de forma a significar que a melhor estimativa do valor atribuível ao mensurando  $Y$  é  $y$ , e que  $y - U$  a  $y + U$  é o intervalo com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que podem ser razoavelmente atribuídos a  $Y$ . Tal intervalo é também expresso como:

$$y - U \leq Y \leq y + U$$

$U$  é interpretado como definindo um intervalo em torno do resultado de medição que abrange uma extensa fração  $P$  da distribuição de probabilidade, caracterizada por

aquele resultado e sua incerteza padronizada combinada, e P é a probabilidade de abrangência ou nível da confiança do intervalo.

Sempre que praticável, o nível da confiança P, associado com intervalo definido por U deve ser estimado e declarado. Deve ser reconhecido que multiplicando  $uc(y)$  por uma constante, não acrescenta informação nova, porém se apresenta a informação previamente disponível de forma diferente. Entretanto, também deve ser reconhecido que, na maioria dos casos, o nível da confiança P (especialmente para valores de P próximos de 1) é um tanto incerto, não somente por causa do conhecimento limitado da distribuição de probabilidade caracterizada, por  $y$  e  $uc(y)$  (especialmente nas extremidades), mas também por causa da incerteza da própria  $uc(y)$ .

### 3.6 – Fator de Abrangência

O valor do fator de abrangência  $k$  deve levar em conta, além do nível de confiança desejado, o número de graus de liberdade efetivos associados ao caso para o intervalo  $y-U$  a  $y+U$ . O valor de  $k$  geralmente está entre 2 e 3, mas pode assumir diversos outros valores.

É comum calcular o número de graus de liberdade efetivos ( $v_{ef}$ ) através da equação de Welch-Satterthwaite:

$$v_{ef} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}}$$

onde:

$uc$  é a incerteza combinada;

$u_i$  é a incerteza padronizada associada à  $i$ -ésima fonte de incerteza;

$v_i$  é o número de graus de liberdade associado à  $i$ -ésima fonte de incerteza;

$N$  é o número total de fontes de incertezas analisadas.

Da aplicação da equação acima resulta o número de graus de liberdade efetivo. O valor de “ $k$ ” para nível de confiança de 95% pode então ser obtido da tabela 3.1:

$v_{ef}$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16
----------	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----

$k_{95}$	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,23	2,20	2,17
$\nu_{ef}$	18	20	25	30	35	40	45	50	60	80	100	$\infty$
$k_{95}$	2,15	2,13	2,11	2,09	2,07	2,06	2,06	2,05	2,04	2,03	2,02	2,00

Tabela 3.1 – Tabela de Student.

Para valores fracionários de  $\nu_{ef}$ , interpolação linear pode ser usada se  $\nu_{ef} > 3$ . Alternativamente o valor de  $k_{95}$  corresponde ao valor de  $\nu_{ef}$  imediatamente inferior na tabela pode ser adotado.

### 3.7 – Procedimento Geral de Avaliação da Incerteza de Medição

- Determinar o modelo matemático que relaciona a grandeza de entrada com a saída;  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$
- Identificar todas as correções a serem feitas ao resultado de medição;
- Listar componentes sistemáticos da incerteza associada a correções e tratar efeitos sistemáticos não corrigidos com parcelas de incerteza;
- Atribuir valores de incertezas e distribuição de probabilidades com base em conhecimentos experimentais práticos ou teóricos;
- Calcular a Incerteza Padronizada ( $u_i$ ) para cada componente de incerteza;
- Calcular a Incerteza Combinada ( $u_c$ ) ou  $u_c(y)$ ;
- Calcular a Incerteza Expandida ( $U$ ).

## CAPÍTULO 4

### METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho irá destacar o procedimento de calibração da balança de pressão e da coleção de massas e do pistão que fazem parte da mesma, bem como a definição do padrão, do mensurando e das grandezas de influência. Também será destacado o modelo matemático e o cálculo da incerteza nessa calibração.

#### 4.1 – Coleção de Massas e Pistão

##### 4.1.1 – Definição do Mensurando e suas características

O mensurando utilizado é uma coleção de massas e o pistão que fazem parte de uma balança de pressão com capacidade de 6 MPa. As massas foram fabricadas pela XIAN e sua classe é M1. A coleção de massas veio enumerada de 1 a 15. Sua unidade de medida é em MPa (pressão) devido ser integrante de uma balança de pressão. A indicação das massas varia de 0,1 a 6 Mpa, com um incremento de 0,1 MPa. As massas com enumeração de 1 a 11 possuem uma pressão de 0,5 MPa e as massa com enumeração de 12 a 15 e o pistão possuem uma pressão de 0,1 MPa. Na figura 4.1 são mostradas a coleção de massas e na figura 4.2 é mostrado a marcação de uma massa.



Figura 4.1 – Coleção de massas da balança de pressão.



Figura 4.2 – Marcação de uma massa da coleção.

#### **4.1.2 – Definição do Padrão e suas características**

##### **4.1.2.1 – Massas Padrão**

O padrão utilizado para a calibração das massas e do pistão foi uma coleção de pesos padrão de aço inoxidável, fabricadas pela KN-Waagen, com classe F1. A unidade de medida dessas massas é em grama. Foi utilizada a coleção de massas padrão com a faixa de 10 a 2000 g, com um incremento de 10 g. A maior incerteza encontrada nessa coleção foi de  $\pm 0,00030$  g. Na figura 4.3 é mostrada a coleção de massas padrão da classe F1.



Figura 4.3 – Coleção de massas padrão da classe F1.

##### **4.1.2.2 – Balanças**

Para a calibração das massas foram utilizadas duas balanças: uma balança com faixa de indicação de 0 a 1201 g (balança 1) e uma balança com faixa de indicação de 0 a 4000 g (balança 2). As figura 4.4 e 4.5 mostram, respectivamente, as balanças 1 e 2.

###### **4.1.2.2.1 – Balança 1**

- Fabricante: Sartorius
- Modelo: CC 1201
- Unidade de Medida: g
- Faixa de Indicação: 0 a 1201 g
- Menor Divisão: 0,0001 g
- Resolução: 0,0001 g
- Exatidão:  $\pm 0,0008$  g



Figura 4.4 – Balança 1.

#### 4.1.2.2.2 – Balança 2

- Fabricante: Digimed
- Modelo: KN 4000
- Unidade de Medida: g
- Faixa de Indicação: 0 a 4000 g
- Menor Divisão: 0,01 g
- Resolução: 0,01 g
- Exatidão:  $\pm 0,05$  g



Figura 4.5 – Balança 2.

#### **4.1.3 – Fontes de erros e incertezas mais comuns em calibração de massa.**

Na calibração de massas existem muitas fontes de incerteza, no entanto, como as massas que foram calibradas são de classe M1, as principais fontes de erros são:

- Dispersão dos Valores da Pesagem;
- Incerteza das Massas Padrão;
- Efeito da Resolução da Balança;
- Variação da massa do Padrão ao longo do tempo;
- Efeito da Sensibilidade da Balança;
- Efeito do Empuxo;
- Efeito da Excentricidade da Balança;
- Incerteza devido à Instabilidade do Padrão.

#### **4.1.4 – Procedimento de Calibração**

Antes de iniciar a calibração as massas e o pistão foram limpos com álcool e climatizados às condições ambientes do laboratório. O tempo para estabilização foi de, aproximadamente, 2 horas.

A calibração do conjunto de massas consistiu essencialmente em compará-las com um padrão de referência. Este padrão de referência foi uma coleção de pesos padrão da classe F1. Em cada massa foi feito o seguinte método de calibração:

- Zera-se a balança;
- Coloca-se a massa padrão e anota a indicação mostrada na balança;
- Zera-se a balança e retira-se a massa padrão;
- Coloca-se o mensurando e anota a indicação mostrada na balança;
- Retira-se o mensurando, coloca-se o padrão e anota a indicação mostrada na balança.

Este procedimento foi feito três séries para cada mensurando. As massas com pressão de 0,1 MPa e o pistão foram calibrados por uma massa padrão de 510 g e as massas com pressão de 0,5 MPa foram calibradas por uma massa padrão de 2500 g.

#### 4.1.5 – Definição do Modelo Matemático

$$m_M = m_P + \Delta_R + \Delta_S + \Delta_{Em} + \Delta_{Ex} + \Delta_I$$

onde:

$m_M$ : Dispersão dos Valores da Pesagem (mensurando);

$m_P$ : Incerteza das Massas Padrão;

$\Delta_R$ : Efeito da Resolução da Balança;

$\Delta_S$ : Efeito da Sensibilidade da Balança;

$\Delta_{Em}$ : Efeito do Empuxo;

$\Delta_{Ex}$ : Efeito da Excentricidade da Balança;

$\Delta_I$ : Incerteza devido à Instabilidade do Padrão.

#### 4.1.6 – Cálculo da Incerteza

##### 4.1.6.1 – Dispersão dos Valores da Pesagem

A incerteza padronizada do processo de pesagem é o desvio padrão da diferença média de massa, para  $n$  ciclos de medição, dividido por  $\sqrt{n}$ .

$$m_M = \pm \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}}$$

##### 4.1.6.2 – Incerteza das Massas Padrão

A incerteza padronizada das massas padrão deve ser determinada a partir do certificado de calibração, dividindo a incerteza apresentada, pelo fator de abrangência  $k$ .

$$m_P = \pm \frac{u(m_P)}{k}$$

##### 4.1.6.3 – Efeito da Resolução da Balança

Para balanças com uma resolução  $\delta$ , a incerteza devido à resolução é dada por:

$$\Delta_R = \pm \frac{\delta}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2}$$

O fator  $\sqrt{2}$  é devido ao fato de se efetuar duas leituras, uma para o padrão e outra para o mensurando.

#### **4.1.6.4 – Efeito da Sensibilidade da Balança**

Para balanças com uma sensibilidade  $S$ , a incerteza devido à sensibilidade é dada por:

$$\Delta_S = \pm \frac{S}{\sqrt{3}}$$

#### **4.1.6.5 – Efeito do Empuxo**

O efeito do empuxo pode ser desconsiderado para a diferença de densidade de massa uma vez que é menor que:  $2 \cdot 10^{-4}$  mg.

#### **4.1.6.6 – Efeito da Excentricidade da Balança**

Para balanças com uma excentricidade  $Ex$ , a incerteza devido à excentricidade é dada por:

$$\Delta_{Ex} = \pm \frac{Ex}{\sqrt{3}}$$

#### **4.1.6.7 – Incerteza devido à Instabilidade do Padrão**

Este tipo de incerteza do peso padrão pode ser estimado pela análise de variação do valor da massa entre calibrações ou ao longo do tempo. Caso não se

tenha disponível essa informação, esta componente da incerteza é a metade da incerteza da massa padrão.

## 4.2 – Balança de Pressão

### 4.2.1 – Definição do Mensurando e suas características

O mensurando utilizado é uma balança de pressão, do tipo peso morto, marca XIAN, com faixa nominal de 0,1 a 6 MPa e incrementos de pressão de 0,1 MPa. Esse mensurando utiliza como fluido de trabalho o óleo hidráulico Tellus 68. Na figura 4.6 é mostrada a balança de pressão.



Figura 4.6 – Balança de Pressão do tipo peso morto (mensurando).

### 4.2.2 – Definição do Padrão e suas características

O padrão utilizado para a calibração da balança de pressão, do tipo peso morto, foi outra balança de pressão do tipo pistão invertido DPG5 – DESGRANGES & HUOT. Na figura 4.7 é mostrada a balança de pressão do tipo pistão invertido. Sua faixa de indicação é de 0 a 10 MPa, com menor divisão de 0,1 Pa. O fluido de trabalho utilizado nessa balança é o N<sub>2</sub> e a incerteza da balança é calculada pela seguinte expressão:

$$U = \pm 80 Pa + (4,6 \cdot 10^{-5} \cdot P)$$

onde:

$U$ : Incerteza da balança de pressão (Pa)

$P$ : Pressão aplicada (Pa)



Figura 4.7 – Balança de Pressão do tipo pistão invertido (padrão).

### 4.2.3 – Fontes de erros e incertezas mais comuns em calibração de sensores de pressão

Na calibração de sensores de pressão existem muitas fontes de incerteza, no entanto, como o sensor de pressão calibrado foi uma balança de pressão do tipo peso morto, as principais fontes de erros são:

- Dispersão dos valores da pesagem;
- Incerteza do padrão utilizado;
- Efeito da resolução do padrão;
- Correção da pressão devido aos erros das massas do mensurando;
- Correção da pressão devido ao afastamento da temperatura de referência.

### 4.2.4 – Procedimento de Calibração

A calibração do mensurando (balança de pressão do tipo peso morto) consistiu na comparação direta contra outra balança de pressão padrão (do tipo pistão invertido). Compararam-se as duas máquinas em dez pontos igualmente distribuídos ao longo da faixa nominal do mensurando, desprezando-se, para efeito de cálculo da área, os valores abaixo de 20% da faixa nominal do mensurando. A temperatura ambiente foi regulada para  $20 \pm 1$  °C e a aceleração da gravidade local, na bancada onde se encontram as balanças, é de  $9,7810905$  m/s<sup>2</sup>. Na figura 4.8 é mostrado o esquema de calibração.

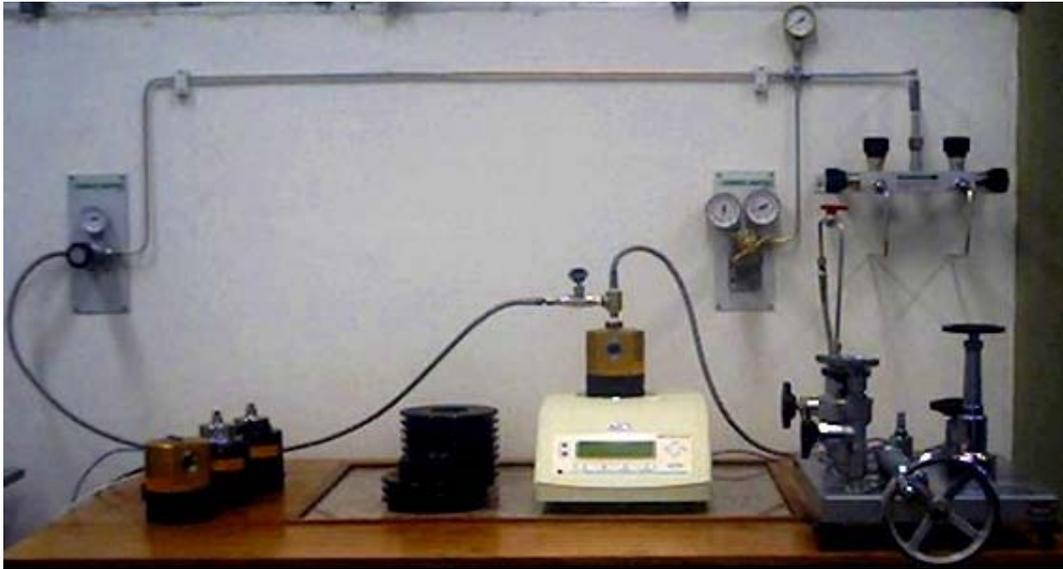


Figura 4.8 – Calibração da balança de pressão, pelo método da comparação.

#### 4.2.5 – Definição do Modelo Matemático

$$P_M = P_P + R_P + \Delta C_m + \Delta C_{\Delta t}$$

onde:

$P_M$ : Pressão gerada pelo mensurando.

$R_P$ : Resolução do padrão.

$P_P$ : Pressão gerada pelo padrão.

$\Delta C_m$ : Correção da pressão devido aos erros das massas do mensurando.

$\Delta C_{\Delta t}$ : Correção da pressão devido ao afastamento da temperatura de referência.

#### 4.2.6 – Cálculo da Incerteza

##### 4.2.6.1 – Incerteza do Padrão

A incerteza padronizada do padrão deve ser determinada a partir do certificado de calibração, dividindo a incerteza apresentada, pelo fator de abrangência  $k$ .

$$P_p = \pm \frac{u(P_p)}{k}$$

A incerteza do padrão é dada pela seguinte expressão:

$$u(P_p) = \pm 80Pa + (4,6 \cdot 10^{-5} \cdot P)$$

#### 4.2.6.2 – Dispersão dos Valores da Medição

A incerteza padronizada do processo de calibração é o desvio padrão da diferença das pressões medidas, para n ciclos de medição, dividido por  $\sqrt{n}$ .

$$P_m = \pm \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}}$$

#### 4.2.6.3 – Efeito da Resolução do Padrão

Para balanças de pressão com uma resolução  $\delta$ , a incerteza devido à resolução é dada por:

$$\Delta_R = \pm \frac{\delta}{\sqrt{3}}$$

#### 4.2.6.4 – Incerteza das Massas

Para o cálculo da incerteza da balança de pressão é necessário que se calculem as incertezas das massas contidas na balança. A incerteza utilizada é a maior incerteza expandida calculada nas massas.

$$\Delta C_m = \pm \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

#### 4.2.6.5 – Incerteza Devido ao Gradiente de Temperatura

Considerando apenas o efeito da temperatura sobre as dimensões do conjunto cilindro-pistão, a diferença de pressão entre padrão e mensurando pode ser escrito na forma de:

$$\Delta P_{\Delta t} = \pm 2 \cdot P_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

onde:

$P_{20}$ : Máxima pressão aplicada no mensurando (6 MPa)

$\alpha$ : Coeficiente de dilatação linear do aço ( $8,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )

$\Delta t$ : Variação da temperatura ambiente em relação à temperatura de referência (20 °C);

$\Delta t = 1 ^\circ\text{C}$

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS E DISCURSÃO

#### 5.1 – Coleção de Massas e Pistão

##### 5.1.1 – Calibração

As tabelas 5.1 a 5.16 mostram os resultados obtidos nas calibrações das massas e do pistão.

<b>Massa N° 01</b>			
<b>Valor Nominal 2500 g</b>	<b>Indicação na Balança</b>		
	<b>Série I</b>	<b>Série II</b>	<b>Série III</b>
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Mensurando</b>	52,5000	52,6000	52,6000
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela 5.1 – Resultados obtidos na calibração da massa 01.

<b>Massa N° 02</b>			
<b>Valor Nominal 2500 g</b>	<b>Indicação na Balança</b>		
	<b>Série I</b>	<b>Série II</b>	<b>Série III</b>
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Mensurando</b>	52,5000	52,5000	52,6000
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela 5.2 – Resultados obtidos na calibração da massa 02.

<b>Massa N° 03</b>			
<b>Valor Nominal 2500 g</b>	<b>Indicação na Balança</b>		
	<b>Série I</b>	<b>Série II</b>	<b>Série III</b>
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Mensurando</b>	52,5000	52,5000	52,6000
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela 5.3 – Resultados obtidos na calibração da massa 03.

<b>Massa N° 04</b>			
<b>Valor Nominal 2500 g</b>	<b>Indicação na Balança</b>		
	<b>Série I</b>	<b>Série II</b>	<b>Série III</b>
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Mensurando</b>	52,7000	52,8000	52,8000
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela 5.4 – Resultados obtidos na calibração da massa 04.

<b>Massa N° 05</b>			
<b>Valor Nominal 2500 g</b>	<b>Indicação na Balança</b>		
	<b>Série I</b>	<b>Série II</b>	<b>Série III</b>

<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Mensurando</b>	52,5000	52,5000	52,6000
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela 5.5 – Resultados obtidos na calibração da massa 05.

<b>Massa N° 06</b>			
<b>Valor Nominal 2500 g</b>	<b>Indicação na Balança</b>		
	<b>Série I</b>	<b>Série II</b>	<b>Série III</b>
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Mensurando</b>	52,6000	52,6000	52,5000
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela 5.6 – Resultados obtidos na calibração da massa 06.

<b>Massa N° 07</b>			
<b>Valor Nominal 2500 g</b>	<b>Indicação na Balança</b>		
	<b>Série I</b>	<b>Série II</b>	<b>Série III</b>
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Mensurando</b>	52,3000	52,2000	52,3000
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela 5.7 – Resultados obtidos na calibração da massa 07.

<b>Massa N° 08</b>			
<b>Valor Nominal 2500 g</b>	<b>Indicação na Balança</b>		
	<b>Série I</b>	<b>Série II</b>	<b>Série III</b>
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Mensurando</b>	52,6000	52,5000	52,6000
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela 5.8 – Resultados obtidos na calibração da massa 08.

<b>Massa N° 09</b>			
<b>Valor Nominal 2500 g</b>	<b>Indicação na Balança</b>		
	<b>Série I</b>	<b>Série II</b>	<b>Série III</b>
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Mensurando</b>	52,2000	52,1000	52,2000
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela 5.9 – Resultados obtidos na calibração da massa 09.

<b>Massa N° 10</b>			
<b>Valor Nominal 2500 g</b>	<b>Indicação na Balança</b>		
	<b>Série I</b>	<b>Série II</b>	<b>Série III</b>
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Mensurando</b>	52,2000	52,1000	52,1000
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela 5.10 – Resultados obtidos na calibração da massa 10.

<b>Massa N° 11</b>			
<b>Valor Nominal 2500 g</b>	<b>Indicação na Balança</b>		
	<b>Série I</b>	<b>Série II</b>	<b>Série III</b>
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Mensurando</b>	52,6000	52,6000	52,5000
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela 5.11 – Resultados obtidos na calibração da massa 11.

<b>Massa N° 12</b>			
<b>Valor Nominal 510 g</b>	<b>Indicação na Balança</b>		
	<b>Série I</b>	<b>Série II</b>	<b>Série III</b>
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Mensurando</b>	0,4324	0,4320	0,4326
<b>Padrão</b>	0,0001	0,0001	0,0001

Tabela 5.12 – Resultados obtidos na calibração da massa 12.

<b>Massa N° 13</b>			
<b>Valor Nominal 510 g</b>	<b>Indicação na Balança</b>		
	<b>Série I</b>	<b>Série II</b>	<b>Série III</b>
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Mensurando</b>	0,4790	0,4784	0,4791
<b>Padrão</b>	- 0,0001	- 0,0002	- 0,0001

Tabela 5.13 – Resultados obtidos na calibração da massa 13.

<b>Massa N° 14</b>			
<b>Valor Nominal 510 g</b>	<b>Indicação na Balança</b>		
	<b>Série I</b>	<b>Série II</b>	<b>Série III</b>
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Mensurando</b>	0,5052	0,5052	0,5054
<b>Padrão</b>	0,0003	0,0003	0,0002

Tabela 5.14 – Resultados obtidos na calibração da massa 14.

<b>Massa N° 15</b>			
<b>Valor Nominal 510 g</b>	<b>Indicação na Balança</b>		
	<b>Série I</b>	<b>Série II</b>	<b>Série III</b>
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Mensurando</b>	0,3604	0,3607	0,3608
<b>Padrão</b>	0,0002	0,0003	0,0002

Tabela 5.15 – Resultados obtidos na calibração da massa 15.

<b>Pistão</b>			
<b>Valor Nominal 510 g</b>	<b>Indicação na Balança</b>		
	<b>Série I</b>	<b>Série II</b>	<b>Série III</b>
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Mensurando</b>	0,5733	0,5732	0,5733
<b>Padrão</b>	0,0008	0,0008	0,0008

Tabela 5.16 – Resultados obtidos na calibração da massa 16.

### 5.1.2 – Cálculo da Incerteza

Como exemplo do cálculo da incerteza será mostrado o cálculo de duas massas: a massa n° 01 e a massa n° 15.

#### 5.1.2.1 – Cálculo da Incerteza na Massa 01

<b>Massa N° 01</b>			
<b>Valor Nominal</b> <b>2500 g</b>	<b>Indicação na Balança (g)</b>		
	<b>Série I</b>	<b>Série II</b>	<b>Série III</b>
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Mensurando</b>	52,5000	52,6000	52,6000
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
	<b>Média (g)</b>		52,5667
	<b>Desvio Padrão (g)</b>		0,0577

Tabela 5.17 – Resultados obtidos na calibração da massa 01 com a média e o desvio padrão.

#### 5.1.2.1.1 – Dispersão dos Valores da Pesagem

$$m_M = \pm \frac{0,0577}{\sqrt{3}} = \pm 0,0333 \text{ g}$$

#### 5.1.2.1.2 – Incerteza das Massas Padrão

$$m_P = \pm \frac{0,0030}{2} = \pm 0,0015 \text{ g}$$

#### 5.1.2.1.3 – Efeito da Resolução da Balança

$$\Delta_R = \pm \frac{0,01}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = \pm 0,0082 \text{ g}$$

#### 5.1.2.1.4 – Efeito da Sensibilidade da Balança

$$\Delta_S = \pm \frac{0,0054}{\sqrt{3}} = \pm 0,0031 \text{ g}$$

#### 5.1.2.1.5 – Efeito do Empuxo

$$\Delta_{Em} = 0 \text{ g}$$

#### 5.1.2.1.6 – Efeito da Excentricidade da Balança

$$\Delta_{Ex} = \pm \frac{0,0098}{\sqrt{3}} = \pm 0,0057 \text{ g}$$

#### 5.1.2.1.7 – Incerteza devido à Instabilidade do Padrão

$$\Delta_I = \pm \frac{I_P}{2} = \pm \frac{0,0030}{2} = \pm 0,0015 \text{ g}$$

#### 5.1.2.1.8 – Incerteza Combinada

$$u_c = \pm \sqrt{(0,0333)^2 + (0,0015)^2 + (0,0082)^2 + (0,0031)^2 + (0)^2 + (0,0057)^2 + (0,0015)^2}$$

$$u_c = \pm 0,0350 \text{ g}$$

#### 5.1.2.1.9 – Grau de Liberdade Efetivo

$$v_{\text{ef}} = \frac{0,0350^4}{\frac{0,0333^4}{2} + \frac{0,0015^4}{\infty} + \frac{0,0082^4}{\infty} + \frac{0,0031^4}{\infty} + \frac{0^4}{\infty} + \frac{0,0057^4}{\infty} + \frac{0,0015^4}{\infty}} = 2,4276$$

#### 5.1.2.1.10 – Fator de Abrangência

Pela tabela de Student, tendo-se o grau de liberdade efetivo, encontra-se o fator de abrangência (k). Para um grau de liberdade efetivo de 2,4 o fator de abrangência é 4,53.

#### 5.1.2.1.11 – Incerteza Expandida

A incerteza Expandida é a incerteza combinada multiplicada pelo fator de abrangência.

$$U = \pm u_c \cdot k = \pm 0,0350 \cdot 4,53 = \pm 0,1584 \text{ g}$$

#### 5.1.2.2 – Cálculo da Incerteza na Massa 15

<b>Massa N° 15</b>			
<b>Valor Nominal</b> <b>510 g</b>	<b>Indicação na Balança (g)</b>		
	<b>Série I</b>	<b>Série II</b>	<b>Série III</b>
<b>Padrão</b>	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Mensurando</b>	0,3604	0,3607	0,3608

<b>Padrão</b>	0,0002	0,0003	0,0002
	<b>Média (g)</b>		0,3606
	<b>Desvio Padrão (g)</b>		0,0002

Tabela 5.18 – Resultados obtidos na calibração da massa 15 com a média e o desvio padrão.

#### 5.1.2.2.1 – Dispersão dos Valores da Pesagem

$$m_M = \pm \frac{0,0002}{\sqrt{3}} = \pm 0,0001 \text{ g}$$

#### 5.1.2.2.2 – Incerteza das Massas Padrão

$$m_P = \pm \frac{0,0007}{2} = \pm 0,0004 \text{ g}$$

#### 5.1.2.2.3 – Efeito da Resolução da Balança

$$\Delta_R = \pm \frac{0,0001}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = \pm 0,0001 \text{ g}$$

#### 5.1.2.2.4 – Efeito da Sensibilidade da Balança

$$\Delta_S = \pm \frac{0,0015}{\sqrt{3}} = \pm 0,0009 \text{ g}$$

#### 5.1.2.2.5 – Efeito do Empuxo

$$\Delta_{Em} = 0 \text{ g}$$

#### 5.1.2.2.6 – Efeito da Excentricidade da Balança

$$\Delta_{Ex} = \pm \frac{0,0030}{\sqrt{3}} = \pm 0,0017 \text{ g}$$

#### 5.1.2.2.7 – Incerteza devido à Instabilidade do Padrão

$$\Delta_I = \pm \frac{I_P}{2} = \pm \frac{0,0007}{2} = \pm 0,0004 \text{ g}$$

#### 5.1.2.2.8 – Incerteza Combinada

$$u_c = \pm \sqrt{(0,0001)^2 + (0,0004)^2 + (0,0001)^2 + (0,0009)^2 + (0)^2 + (0,0017)^2 + (0,0004)^2}$$

$$u_c = \pm 0,0020 \text{ g}$$

#### 5.1.2.2.9 – Grau de Liberdade Efetivo

$$v_{\text{ef}} = \frac{0,0020^4}{\frac{0,0001^4}{2} + \frac{0,0004^4}{\infty} + \frac{0,0001^4}{\infty} + \frac{0,0009^4}{\infty} + \frac{0^4}{\infty} + \frac{0,0017^4}{\infty} + \frac{0,0004^4}{\infty}} = 181353$$

#### 5.1.2.2.10 – Fator de Abrangência

Pela tabela de Student, tendo-se o grau de liberdade efetivo, encontra-se o fator de abrangência (k). Para um grau de liberdade efetivo maior que 100 o fator de abrangência é 2,00.

#### 5.1.2.2.11 – Incerteza Expandida

A incerteza Expandida é a incerteza combinada multiplicada pelo fator de abrangência.

$$U = \pm u_c \cdot k = \pm 0,0020 \cdot 2,00 = \pm 0,0040 \text{ g}$$

#### 5.1.2.3 – Cálculo da Incerteza das Massas

Na tabela 4.17 é mostrado o valor da incerteza da coleção de massas e do pistão.

Identificação	Nominal (MPa)	Incerteza (g)
---------------	---------------	---------------

1	0,05	± 0,158
2	0,05	± 0,158
3	0,05	± 0,158
4	0,05	± 0,158
5	0,05	± 0,158
6	0,05	± 0,158
7	0,05	± 0,158
8	0,05	± 0,158
9	0,05	± 0,158
10	0,05	± 0,158
11	0,05	± 0,158
12	0,01	± 0,004
13	0,01	± 0,004
14	0,01	± 0,004
15	0,01	± 0,004
pistão	0,01	± 0,004

Tabela 5.19 – Incerteza das Massas e Pistão.

## 5.2 – Balança de Pressão

### 5.2.1 – Calibração

Na tabela 5.20 são mostrados os dados encontrados na calibração da balança de pressão.

Pressão Nominal (kPa)	Massas Adicionais (g)			Área Efetiva (cm <sup>2</sup> )	Pressão no Padrão (kPa)
	Série 1	Série 2	Série 3		
600	0,3	0,1	0,0	-	600,3302
1200	1,0	2,0	1,0	-	1200,1368
1800	0,6	0,3	0,9	0,49939	1798,8246
2400	1,5	2,5	2,0	0,49942	2398,2378
3000	4,6	4,5	4,7	0,49949	2997,4022
3600	5,3	5,0	5,7	0,49951	3597,14265
4200	6,3	5,8	5,5	0,49951	4197,0765
4800	7,3	6,7	7,0	0,49951	4796,5023
5400	7,7	8,0	8,6	0,49951	5396,5076
6000	10,3	9,5	10,0	0,49952	5996,1254

Tabela 5.20 – Dados da calibração.

### 5.2.2 – Cálculo da Incerteza

Na tabela 5.21 são mostradas as médias e desvios padrão encontrados nos dados obtidos na calibração da balança de pressão.

Pressão Nominal (kPa)	Massas Adicionais (g)			Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Série 1	Série 2	Série 3		
600	0,3	0,1	0,0	0,1	0,1528
1200	1,0	2,0	1,0	1,3	0,5774
1800	0,6	0,3	0,9	0,6	0,3000
2400	1,5	2,5	2,0	2,0	0,5000
3000	4,6	4,5	4,7	4,6	0,1000
3600	5,3	5,0	5,7	5,3	0,3512
4200	6,3	5,8	5,5	5,9	0,4041
4800	7,3	6,7	7,0	7,0	0,3000
5400	7,7	8,0	8,6	8,1	0,4583
6000	10,3	9,5	10,0	9,9	0,4041
<b>Média do Desvio Padrão (g)</b>					<b>0,3548</b>

Tabela 5.21 – Média e Desvio Padrão das medições.

### 5.2.2.1 – Incerteza do Padrão

Para calcular a incerteza na pressão do padrão irá ser utilizado, na expressão acima, a maior pressão que o mensurando irá ser calibrado, que nesse caso será 6 MPa.

$$u(P_p) = 80Pa + (4,6 \cdot 10^{-5} \cdot 6 \cdot 10^6) = 356Pa$$

$$P_p = \pm \frac{356}{2,0} = \pm 178Pa$$

### 5.2.2.2 – Dispersão dos Valores da Medição

$$m_p = \frac{0,3548}{\sqrt{3}} = 0,2048g$$

$$P = \frac{m_p \cdot g}{A} \rightarrow P = \pm \frac{0,2048 \cdot 9,7810905}{0,5} = \pm 4Pa$$

### 5.2.2.3 – Efeito da Resolução do Padrão

$$\Delta_R = \pm \frac{0,1}{\sqrt{3}} = \pm 0,06Pa$$

### 5.2.2.4 – Incerteza das Massas

$$u_m = \pm \frac{0,158}{\sqrt{3}} = \pm 0,09g$$

$$P = \frac{m_p \cdot g}{A} \rightarrow P = \pm \frac{0,09 \cdot 9,7810905}{0,5} = \pm 1,76Pa$$

### 5.2.2.5 – Incerteza Devido ao Gradiente de Temperatura

$$\Delta P_{\Delta t} = \pm 2 \cdot P_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t = \pm 2 \cdot 6 \cdot 10^6 \cdot 8,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = \pm 102Pa$$

### 5.2.2.6 – Incerteza Combinada

$$u_c = \pm \sqrt{(178)^2 + (4)^2 + (0,06)^2 + (1,76)^2 + (102)^2}$$

$$u_c = \pm 205,20Pa$$

### 5.2.2.7 – Grau de Liberdade Efetivo

$$v_{ef} = \frac{205,20^4}{\frac{4^4}{2} + \frac{178^4}{\infty} + \frac{57,7 \cdot 10^{-6^4}}{\infty} + \frac{0,09^4}{\infty} + \frac{102^4}{\infty}} = 13797661$$

### 5.2.2.8 – Fator de Abrangência

Pela tabela de Student, tendo-se o grau de liberdade efetivo, encontra-se o fator de abrangência (k). Para um grau de liberdade efetivo maior que 100 o fator de abrangência é 2,00.

### 5.2.2.9 – Incerteza Expandida

A incerteza Expandida é a incerteza combinada multiplicada pelo fator de abrangência.

$$U = \pm u_c \cdot k = \pm 205,20 \cdot 2,00 = \pm 410,40Pa$$

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

- A variância dos resultados das medições das massas 01 a 11 foi muito alta em relação às das massas 12 a 15 e a do pistão;
- A incerteza expandida encontrada para as massas de 01 a 11 foi 40 vezes maior em relação às das massas 12 a 15 e a do pistão;
- Nas massas de 01 a 11, a maior incerteza encontrada foi devido as dispersões dos valores da pesagem. Já nas massas de 12 a 15 e o pistão a incerteza expandida teve mais influência ao erro de excentricidade da balança;
- No cálculo da incerteza da balança de pressão a incerteza que mais influenciou no resultado final (incerteza expandida) foi a incerteza do padrão (balança de pressão com pistão invertido) encontrada no certificado de calibração;
- A incerteza expandida encontrada para a balança de pressão do tipo peso morto foi de 400 Pa. Como o incremento de pressão dessa balança é de 0,1 MPa (100000 Pa), a incerteza expandida encontrada foi 250 vezes menor que esse incremento, significando que o mensurando foi calibrado adequadamente, podendo ser utilizado como padrão em outros processos de calibração.
- As incertezas expandidas apresentadas tem um nível da confiança de 95% e fator de abrangência  $k = 2,0$ , segundo EA 04/02.

## CAPÍTULO 7

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alii – Padrões de Unidades de Medidas – 1990 – BNM/LNM/INMETRO.
- Catálogo Geral – Processos de Pesagem Automática – 1994 – Philips.
- Couto, P. R. G.; Oliveira, J. S.; Cinelli, L. R. Algumas considerações sobre as metodologias de cálculo da estimativa da incerteza de medição no ISO GUM 95. In: Metrosul III, 2002, Curitiba. Anais. Curitiba: Rede Paranaense de Metrologia e Ensaio, 2002.
- E. Kreyzig – Matemática Avançada para Engenharia – McGraw Hill.
- Glossário de Termos para a Grandeza Massa – 1998 – Mettler – Toledo.
- Gonçalves Júnior, Armando Albertazzi. Metrologia: Parte 1. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- Guia para a Expressão da Incerteza de Medição – 1998 – INMETRO (tradução).
- H. J. Wernecke – Metrologia Industrial – 1980 – Springer Verlag.
- Machado, S. C. et al. Estimativa de cálculo de incerteza de edição para o ensaio de destilação de óleo diesel automotivo pelo método ASTM D 86 - 02 com destilador manual. In: III Congresso Brasileiro de Metrologia – METROLOGIA 2003 – Metrologia para a Vida, 2003, Recife. Anais. Recife: Sociedade Brasileira de Metrologia – SBM, 2003.
- Monografia – Fundamentos para a Determinação da Massa – 1997 – Mettler – Toledo.
- Monografia – Manometria de Coluna Líquida – 1970 – PTB – Braunschweig.
- Monografia – Pressão e Vácuo – 1970 – NPL – National Physical Laboratory.
- S. News – Balanças de Pressão – NPL – National Physical Laboratory.
- VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia – 2000 – INMETRO.
- W. Link – Metrologia Mecânica – Expressão da Incerteza dos resultados – 1998 – IPT/MITUTOYO/INMETRO/SBM.

- W. Link – Teoria Geral das Balanças de Braços Iguais – 1982 – Monografia – IPT.
- W. Link – Tópicos Avançados da Metrologia Mecânica – Confiabilidade Metrológica e suas Aplicações – 2000 – EMIC/IPT/MITUTOYO/INMETRO/SBM.
- Wayne Moore – Fundamentos da Mecânica de Precisão – 1980.

## **ANEXO I**

### **RELATÓRIO DE ESTÁGIO**

# **Estágio Na Gerência de Engenharia de Poço do Suporte Técnico da Unidade de Negócios de Exploração e Produção do Rio Grande do Norte e Ceará da PETROBRÁS**

## **1 – Introdução**

Este relatório descreve de maneira clara todas as atividades do estágio realizado, tomando como base o plano de estágio elaborado pelos Engenheiros Carlos Francisco Sales de Souza e Ricardo Eugenio de Moraes Lima, orientadores de estágio da empresa concedente (PETROBRÁS).

O estágio curricular obrigatório, ou estágio complementar de ensino, de acordo com a lei nº 6494 de 07/12/1977 e o decreto nº 87497, de 18/08/1982, tem por finalidade aprimorar os conhecimentos adquiridos no período acadêmico confrontando com os desafios do cotidiano da engenharia, e ainda da continuidade ao processo de formação do aluno.

O estágio no Suporte Técnico da Engenharia de Poço tem como objetivo principal adquirir conhecimentos dos diferentes equipamentos utilizados nos processos de perfuração, completação e produção, utilizados pela Petrobrás na unidade de negócios RNCE, bem como utilizar os conhecimentos adquiridos no curso de Engenharia Mecânica para um melhor desempenho nas atividades.

## **2 – Descrição da Empresa**

### **2.1 – Petróleo Brasileiro S/A – PETROBRAS**

A Petrobrás é uma sociedade de economia mista e tem como objetivo realizar atividades de exploração e produção, refino transporte, armazenamento e distribuição.

- **Exploração e Produção**

A Petrobrás, desfrutando do reconhecimento internacional, com tecnologia própria para águas ultra-profundas, está produzindo petróleo a preços competitivos em campos *offshore* (marítimos) a profundidades cada vez maiores, atraindo o interesse de companhias petrolíferas de todo mundo, com as quais está assinando acordos de parceria para a exploração e produção de suas reservas na enorme plataforma submarina brasileira. A abertura da área de exploração e produção para parceiros internacionais gerou, por sua vez, oportunidades E&P em outras partes do mundo, principalmente onde o *know how* da Petrobrás possa contribuir para a realização de negócios. Um exemplo disso é a expansão da presença da Companhia no Golfo do México e na Costa Oeste da África, onde sua experiência em águas profundas adiciona valor aos empreendimentos.

- **Gás Natural**

O gás natural é um combustível limpo, um produto sem restrições ambientais e que reduz significativamente os índices de poluição. O combustível do futuro, como já está sendo chamado, colabora diretamente para a melhoria da qualidade de vida nas grandes metrópoles. Utilizado como matéria-prima nas indústrias siderúrgica, química, petroquímica e de fertilizantes, o gás natural fornece calor, gera eletricidade e força motriz. Na área de transportes tem a capacidade de substituir o óleo diesel, a gasolina e o álcool, participando assim, direta e indiretamente da vida de toda a população. O gás natural é uma nova e promissora fronteira que se abre no horizonte energético brasileiro. Tanto a produção interna, quanto o suprimento externo, são fontes seguras de abastecimento de combustível. Por todas as suas virtudes energéticas, econômicas e ambientais, o gás natural deverá multiplicar a sua presença na matriz energética brasileira, saltando dos atuais 3% para 7% em 2010. Além disso, a área de Gás&Energia atua no desenvolvimento de fontes alternativas

de energia e investe em conservação de energia e energia renovável, como forma de agregar valor aos seus negócios.

- **Refino**

O refino vem acompanhando de perto as transformações que a Petrobrás vivencia nos últimos anos, adequando-se ao novo modelo de mercado do setor no Brasil. O desafio de processar a crescente produção de óleo pesado brasileiro, permitindo a conversão para derivados de alto valor agregado, vem sendo vencido com investimentos e grandes avanços tecnológicos. A Petrobrás tem batido sucessivos recordes em suas refinarias, desenvolvendo tecnologia própria e possibilitando que o petróleo nacional, de característica mais pesada, possa render uma percentagem maior de produtos nobres e aumentar a rentabilidade do negócio. Em refino serão investidos US\$ 4,2 bilhões no período 2002-2005, com recursos próprios, com mais US\$ 700 milhões em parcerias. A atuação do *downstream* (abastecimento) é fundamental para consolidar os objetivos estratégicos da Petrobrás, que caminha para se transformar numa corporação de alto desempenho na área de energia. A intenção é firmar sua liderança no mercado brasileiro, além de expandir suas atividades no exterior, sobretudo na América Latina, onde já dispõe de refinarias na Bolívia e na Argentina.

- **Transporte e Armazenamento**

A empresa subsidiária da Petrobrás responsável pelas atividades de transporte e armazenamento é a Petrobrás Transporte S.A., a Transpetro. A empresa tem como missão atuar de forma rentável na indústria de petróleo e gás, nos mercados nacional e internacional, como fornecedora de serviços de transporte e armazenamento, respeitando o meio ambiente, considerando os interesses dos seus acionistas e contribuindo para o desenvolvimento do país.

- **Distribuição**

Prestar sempre os melhores serviços em mais de sete mil postos espalhados por diversas cidades e rodovias do país é o objetivo da Petrobrás Distribuidora. Com uma trajetória marcada por iniciativas pioneiras e resultados expressivos, a BR mantém a

liderança no mercado brasileiro de distribuição de derivados de petróleo, tendo mais de dez mil grandes empresas como clientes. A maior distribuidora do Brasil está presente em diversos segmentos da indústria: automotivo, marítimo, ferroviário e na aviação. Com isso, os produtos da Petrobrás Distribuidora estão voltados para diferentes aplicações no mercado. Através de um rígido sistema de controle, a empresa garante a alta qualidade que a colocou na liderança do mercado nacional.

### **3 – Descrição das Atividades Desenvolvidas no Estágio**

Como o estágio foi realizado na Engenharia de Poço, os trabalhos feitos envolveram os processos de perfuração, completação e produção de petróleo e gás natural.

A perfuração contempla as atividades relacionadas ao projeto e perfuração, propriamente dita, do poço que faz a comunicação do reservatório com a superfície. O projeto do poço determina as várias fases de perfuração, envolvendo a seleção da técnica apropriada (para a perfuração, cimentação e revestimento do poço), do tipo de sonda, da unidade de perfuração, dos vários equipamentos (brocas, colunas de perfuração e revestimento, ferramentas de monitoração e controle de trajetória do poço, ferramentas de perfilagem, etc.) e dos fluidos de perfuração. No projeto e execução do poço são considerados os fatores econômicos e, principalmente, os aspectos de segurança inerentes à operação.

A completação trata da preparação do poço para produção, envolvendo técnicas de isolamento das zonas produtoras e testes de vazão e pressão do poço. Dependendo-se do potencial produtor do reservatório, vinculado às propriedades petrofísicas da rocha e das propriedades dos fluidos do reservatório, há necessidade da utilização de técnicas de estimulação química (acidificação), mecânica (fraturamento hidráulico) ou químico-mecânica, para se aumentar a produtividade do poço.

A produção envolve o projeto, monitoração e garantia do fluxo de óleo/gás, do reservatório até a superfície, na planta de superfície, e o envio para os sistemas externos de transporte, ou armazenagem. Na linha de produção, são estudadas as propriedades de fluidos e comportamento de fases, fluxo de óleo e/ou gás no reservatório, escoamento multifásico no poço e nos dutos de produção, instalações de produção terrestres e marítimas, separação de óleo, gás e água, métodos de elevação artificial (bombeio de

petróleo no caso de poços sem surgência natural), automação e controle de processos, sistemática de projeto de desenvolvimento de campo e gestão de produção.

### **3.1 – Treinamento**

Com o intuito de integralizar a estagiária com o ambiente de estágio foi realizada uma apresentação das principais atividades desenvolvidas pelo Suporte Técnico do setor de Engenharia de Poço da PETROBRÁS, na unidade de negócios RNCE.

A estagiária, inicialmente, recebeu literaturas, normas e manuais de equipamentos, relacionadas com as atividades desenvolvidas pelo setor. Posteriormente citadas.

- Norma American Petroleum Institute (API) RP 75 – Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits – que tem como objetivo projetar colunas de perfuração em poços de petróleo;
- Norma American Petroleum Institute (API) SPEC 6A – Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment – que tem como objetivo especificar as cabeças de poço e árvores de natal em poços de petróleo;
- Apostila sobre Equipamentos de Poço – Perfuração e Completação – que tem como objetivo mostrar todos os equipamentos necessários, em um poço de petróleo, nas fases de perfuração e completação – Petrobrás – Carlos Francisco Sales de Souza;
- Apostila sobre Equipamentos para Completação de Poços – que tem como objetivo mostrar todos os equipamentos utilizados na completação de poços de petróleo – Petrobrás – Etiberto E. Pinheiro;
- Apostila sobre Equipamentos do Sistema de Controle de Poço na Superfície – que tem como objetivo mostrar todos os equipamentos utilizados, na superfície, para o controle do poço – Petrobrás – Joaquim Leite Ibiapina e Márcio Koki Watanabe (2004).

A estagiária participou de vários cursos para adquirir conhecimento na área de petróleo e gás. Entre eles:

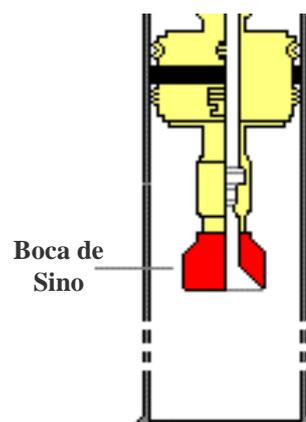
- Curso básico de Segurança Industrial 2 (CBASI-2), realizado na NUTTEC com uma carga horária de 8 horas;
- Curso de Introdução ao SAP/R3 na PETROBRÁS (PRE-204), realizado na PETROBRÁS com uma carga horária de 16 horas;
- Curso de Notas de Manutenção e Inspeção no SAP/R3 (MAN-225), realizado na PETROBRÁS com uma carga horária de 40 horas;
- Curso sobre Executar Intervenções de Custeio e Investimento em Poços no SAP/R3 (POS-207), realizado na PETROBRÁS com uma carga horária de 40 horas;

### 3.2 – Apoio à emissão de Parecer Técnico para Equipamentos de Completação e Produção

Para emitir um parecer técnico (PATEC) é necessário que se tenha um bom conhecimento dos equipamentos utilizados na completção e produção. Um parecer técnico é um documento onde é descrito sucintamente o equipamento que será adquirido. As empresas que fabricam o referido equipamento enviam as descrições técnicas do mesmo e o desenho esquemático para avaliação. Após a avaliação dos equipamentos que cada empresa envia é emitido um parecer técnico listando as empresas que estão aptas para fabricar o equipamento.

Para emitir um parecer técnico é necessário que se conheça sucintamente todos os equipamentos utilizados em poços de petróleo e gás. Abaixo é descrito cada equipamento utilizado nos processos de produção.

**Boca de Sino:** Equipamento posicionado na extremidade da coluna de produção para servir de guia para reentrada de ferramentas descidas abaixo da extremidade da coluna, durante operações efetuadas por dentro (through tubing) da mesma com Arame (Slick-Line), Cabo Elétrico (Wire Line) ou Flexitubo (Coil Tubing). A extremidade em forma de cone dirige as ferramentas para o



interior da coluna evitando que as mesmas fiquem presas.

Figura 1 – Extremidade de uma coluna de produção com boca de sino.

**Sub de Pressurização:** Equipamento componente da coluna de produção que tem por função principal tamponar provisoriamente a coluna permitindo que a mesma possa ser pressurizada internamente para acionamento de equipamentos operados hidraulicamente, como por exemplo, Packer's, Pump-Out's, Âncora Hidráulica, etc. Outra utilidade seria testar a estanqueidade da coluna de produção após instalação da árvore de natal.

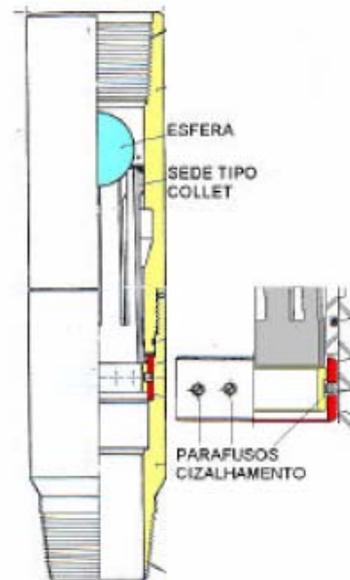


Figura 2 – Sub de Pressurização com esfera e parafusos de cisalhamento.

**Nipple de Assentamento:** Os nipples (perfis) de assentamento são “sub's” diretamente enroscados na coluna de produção que possuem uma área interna polida de vedação e um recesso interno para ancoragem dos equipamentos de controle de

fluxo. Servem para alojar, em profundidades bem definidas, tampões (para isolamento de intervalos), válvulas de contrapressão (para impedir perda de fluido para formação), suspensores de instrumento (descida de registradores Amerada), colocação de chokes de fundo para limitação de vazão, etc.

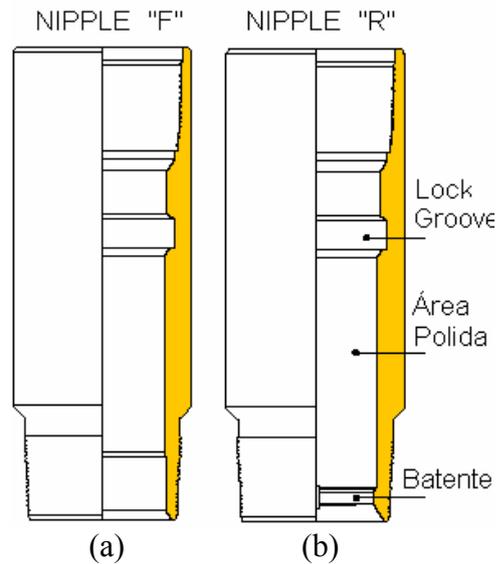


Figura 3 – Nipples de Assentamento Não-Seletivo (a) e Seletivo (b).

#### Âncora de Coluna:

Equipamento componente da coluna de produção de poços bombeados (BM, BCP) cuja profundidade se situe acima de 1000m. Representa uma verdadeira “âncora” para a coluna impedindo a movimentação da mesma por ação dos ciclos de bombeio. Sua instalação em poços profundos é obrigatória em face dos efeitos de alongação e encurtamento da coluna que, entre outros efeitos: reduz a eficiência de bombeio; acelera o desgaste da coluna de hastes e de tubos.

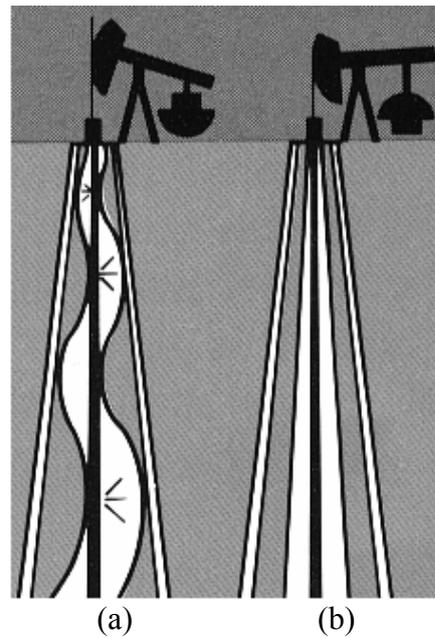


Figura 4 – Sistema de Elevação por BM, sem (a) e com Âncora de Coluna (b).

**Blast-Joint:** As Juntas de Jateamento foram projetados para resistir à erosão provocada pela produção dos fluidos do poço. São posicionados em frente aos intervalos produtores em completações múltiplas. Sua superfície possui endurecimento superficial e seu diâmetro externo equivale ao da luva do tubo, conservando o diâmetro interno do tubo de produção normal.



Figura 5 – Desenho esquemático de um Blast-Joint.

**Conector Divisor Coluna:** Este equipamento conhecido com On-Off Attachment é utilizado como item para desconexão da coluna em um determinado ponto. Normalmente é utilizado quando se tem expectativa de substituição da parte da coluna como no caso de troca de mandris de gás-lift sem a necessidade de desassentamento do packer. Pode ser utilizado para assentamento de packer hidráulico ou packer mecânico de dupla ancoragem ambos funcionando como tampão recuperável, após o assentamento libera-se o conector/divisor.

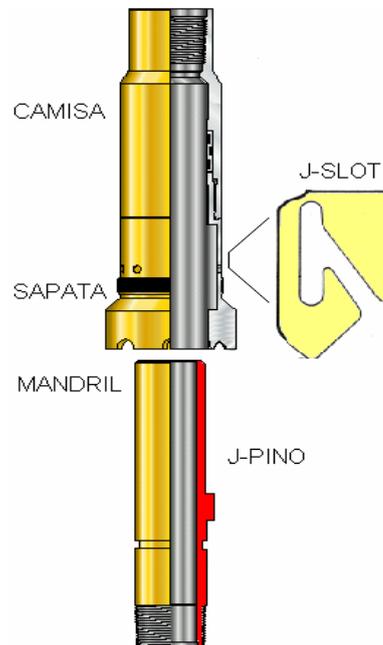


Figura 6 – Desenho Esquemático do On-Off detalhando seus componentes.

### **Junta de Expansão e Separação:**

Equipamento conhecido por TSR (Tubing Seal Receptacle) por funcionar como junta de expansão e também separação para a coluna de produção. O TSR é descido em conjunto com packer hidráulico para funcionar como absorvedor do movimento de encurtamento ou alongamento da coluna e dessa forma evitar que sejam transferidos para o packer esforços indesejáveis.

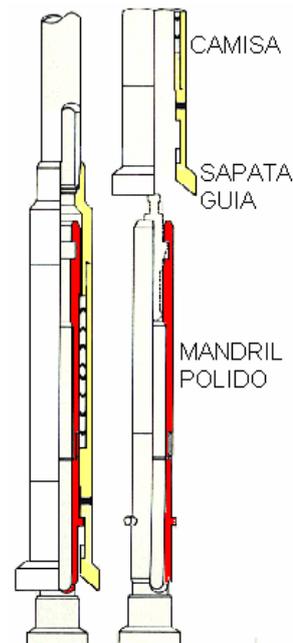


Figura 7 - Desenho Esquemático da Junta de Expansão e Separação detalhando seus componentes.

**Junta de Expansão Térmica:** Equipamento utilizado para absorver a expansão da coluna de tubos em poços de injeção de vapor. É conhecido como junta prisioneira em face de não separar a coluna; possui uma chaveta na camisa e um rasgo longitudinal no mandril que impede o giro da camisa em relação ao mandril. Essa propriedade faz com que esse equipamento possa ser utilizado em conjunto com packer mecânico que necessite de giro na coluna para assentamento. Fica posicionada logo acima do packer para absorver a elongação da coluna por efeito do aumento de temperatura durante a injeção de vapor, isolando o packer desses esforços. Possui pinos de cisalhamento que prendem a camisa ao mandril, desta forma podendo ser descida fechada ou aberta, esses pinos são

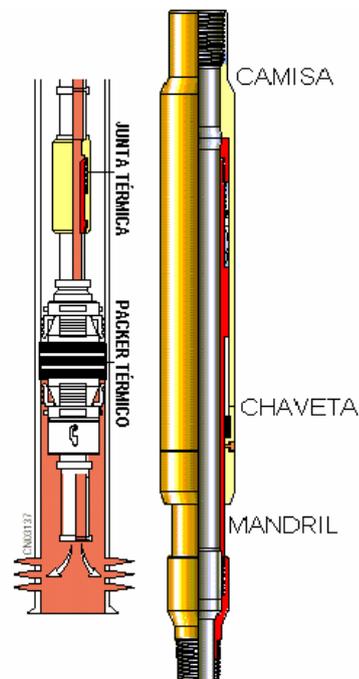


Figura 8 - Desenho Esquemático da Junta de Expansão Térmica.

obrigatoriamente rompidos.

**Válvula de Camisa Deslizante:**

É um equipamento utilizado para estabelecer comunicação entre o espaço anular e coluna através da abertura de uma “janela lateral” operada por arame.

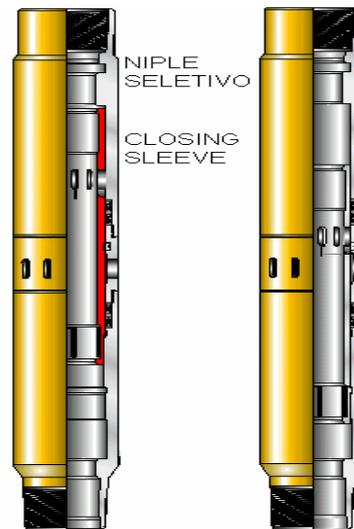


Figura 9 - Desenho Esquemático da Válvula de Camisa Deslizante mostrando a mesma fechada (a) e aberta (b).

**Mandril de Gás-Lift:** Equipamento componente da coluna de produção utilizado para alojamento de válvulas especiais que controlam o fluxo de gás para o interior da coluna de produção. São utilizados em poços que produzem por elevação pneumática. Possuem internamente uma bolsa posicionada lateralmente à passagem vertical e que alojam as válvulas de gás-lift. Sua construção com a bolsa excêntrica posicionada permite acesso vertical ao poço sem nenhuma restrição o que permite a utilização de vários mandris, em série, na coluna. O acesso a determinado mandril para substituição de válvulas é feito por ferramenta especial, descida por arame, os “desviadores” ou Kick-over tool.

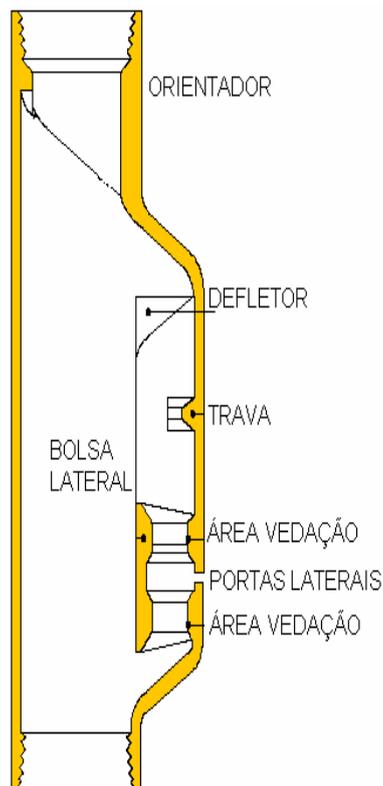


Figura 10 - Desenho Esquemático do Mandril com os seus constituintes.

### **Drenador de Coluna:**

Equipamento utilizado na coluna de produção para garantir circulação de fluidos entre seu interior e o espaço anular coluna/revestimento. Existem drenadores acionados hidráulicamente por pressurização da coluna, pressurização do anular e drenadores acionados mecanicamente através de barras de carga jogados pelo interior da coluna.

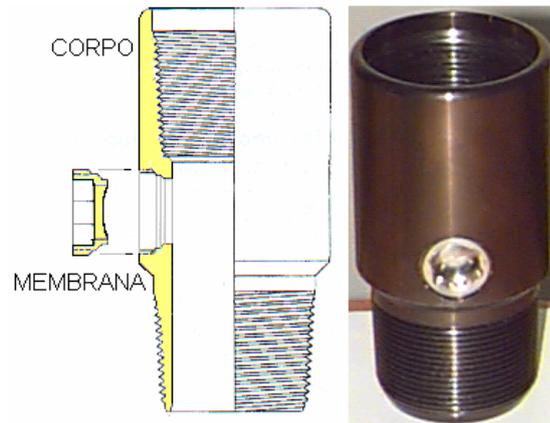


Figura 11 - Desenho Esquemático do Drenador de Coluna do tipo membrana.

Obturadores (Packers): São componentes da coluna de produção ou injeção de poços produtores ou injetores. Também são aplicados em trabalhos preliminares à completação dos poços: localização de furos no revestimento do poço, testes de formação, operações de estimulação, correções de cimentação primária, etc. É um dos componentes mais importantes da coluna e presente em praticamente todos os poços produtores ou injetores. O Obturador (“Packer”) é uma estrutura composta basicamente de um mandril compatível com a coluna de tubos do poço e que oferece ao fluxo uma passagem preferencial; um elemento de vedação que circunda esse mandril preenchendo o espaço anular entre o mesmo e o revestimento (parede) do poço de modo a impedir o fluxo de fluido por esse espaço anular; e por fim o importante componente de ancoragem para permitir sua fixação numa posição particular do poço.

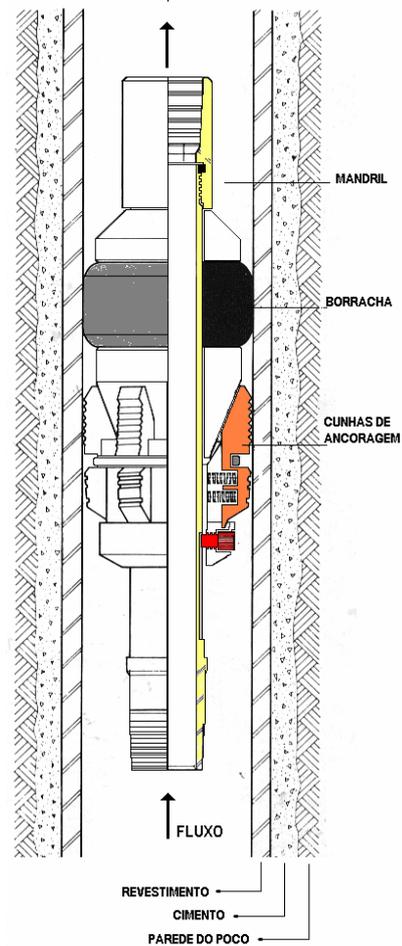


Figura 12 - Desenho Esquemático de um Packer detalhando seus componentes.

### Válvula de Segurança de

**Subsuperfície:** As Válvulas de Segurança de Subsuperfície são equipamentos componentes da coluna de produção de poços produtores ou injetores de gás e poços produtores de óleo por surgência natural ou elevação pneumática (Gás-Lift). São aplicadas em situações onde há previsão da Norma CONTEC N-1860.



Figura 13 – Desenho da Válvula de Segurança de Subsuperfície.

**Cabeça de Produção:** A Cabeça de Produção é a estrutura posicionada para dar continuidade ao revestimento de produção e para alojar os Suspensores que suportam a coluna de produção do poço. Possui saídas laterais para posicionamento de válvulas que darão acesso seguro e controlado ao espaço anular coluna-revestimento.

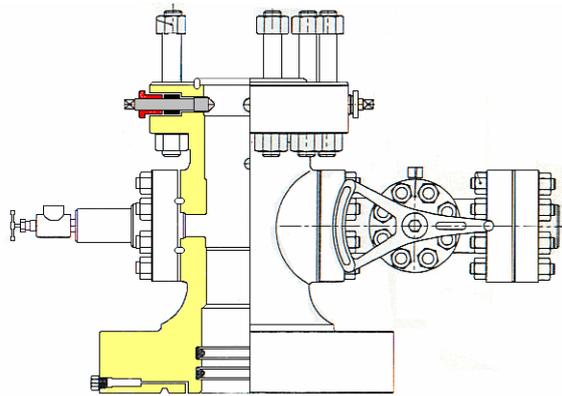


Figura 14 – Cabeça de Produção biflangeada.

**Suspensor de Produção:** Os Suspensores de Produção são equipamentos que trabalham alojados nas cabeças de produção e têm como função principal suportar (suspender) a coluna de produção e promover estanqueidade entre a coluna e o espaço anular coluna - revestimento.

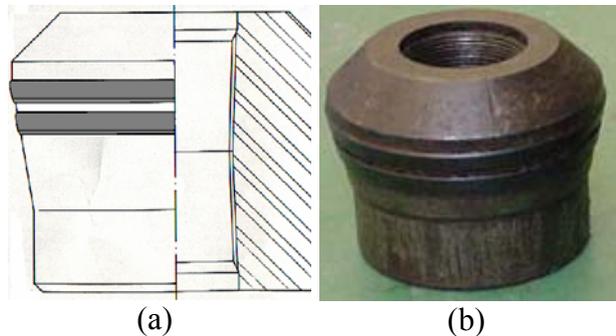


Figura 15 – Suspensor de Produção em corte (a) e em fotografia (b).

**Adaptador Cabeça de Produção:** O Adaptador Cabeça de Produção é o equipamento que fica posicionado na extremidade superior da Cabeça de Produção e que faz a ligação entre esta e a Árvore de Natal. O Adaptador interage com a Cabeça de Produção, com a Árvore de Natal e também com o Suspensor de Produção.

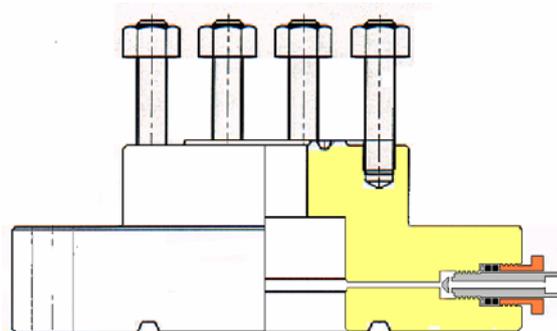


Figura 16 – Desenho esquemático de um adaptador destacando a passagem para pressurização da válvula de segurança.

**Árvore de Natal:** É o conjunto de válvulas, cruzeta, choke, manômetros, niples, responsáveis pelo fluxo seguro e controlado de fluidos do poço. As Árvores

de Natal são compostas basicamente de: *Válvula de Pistoneio*: utilizada para permitir o acesso vertical ao poço por equipamentos operados “Through Tubing” (Arame, Cabo, Flexitubo) sem a necessidade de fechar o poço; *Válvula Mestre Superior Hidráulica*: válvula de bloqueio do poço, normalmente fechada, operada remotamente por pressurização hidráulica; *Válvula Mestre Inferior Manual*: válvula principal de bloqueio do poço, operada manualmente; *Válvula Lateral Pneumática*: válvula de fechamento do poço, normalmente fechada, operada por pressão de ar comprimido, nitrogênio ou gás natural seco; *Válvula Lateral Manual*: válvula para controle e fechamento do poço. Utilizada para fechar o poço quando as válvulas mestras não puderem ser acionadas; *Choke*: equipamento para regulação da vazão de fluidos ou pressão na linha de produção. Restringe a passagem aberta ao fluxo de forma regulada de acordo com a abertura determinada.

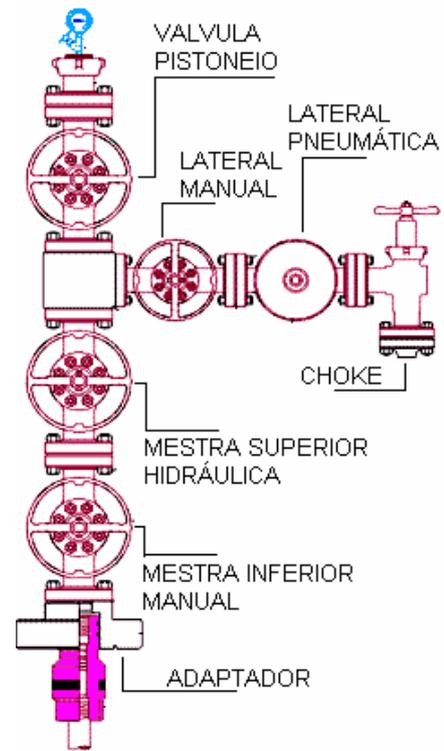


Figura 17 – Desenho esquemático de uma Árvore de Natal detalhando seus principais componentes.

### 3.3 – Projeto de Colunas de Perfuração

Durante a perfuração é necessária a concentração de grande quantidade de energia na broca para cortar as diversas formações rochosas. Esta energia, em forma de rotação e peso aplicado sobre a broca, é transferida às rochas para promover sua ruptura e desagregação em forma de pequenas lascas, ou cascalhos, que são removidos do fundo do poço e carregados até a superfície pelo fluxo do fluido de perfuração.

A coluna de perfuração é a responsável direta por todo esse processo e consta dos seguintes componentes principais: comandos (drill collars), tubos pesados (heavy weight) e tubos de perfuração (drill pipes).

**Comandos (Drill Collars):** Os comandos são elementos tubulares fabricados em aço forjado, usinados e que possuem alto peso linear devido à grande espessura de parede. Suas principais funções são fornecer peso sobre a broca e prover rigidez à coluna, permitindo melhor controle da trajetória do poço. A conexão destes elementos é feita

por uniões enroscáveis usinadas diretamente no corpo do tubo. Externamente os comandos podem ser lisos ou espiralados. Na figura 18 são mostrados o comando liso e o espiralado.

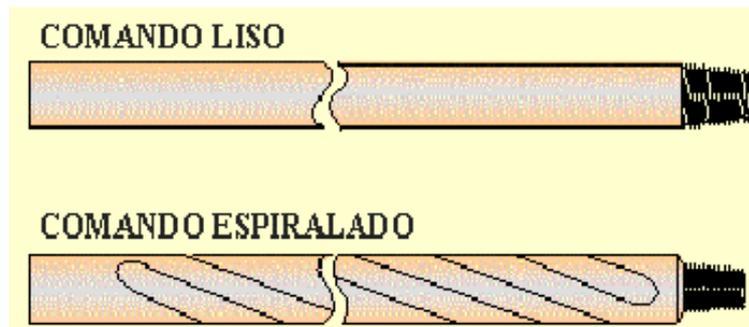


Figura 18 – Comando liso e espiralado.

**Tubos Pesados (Heavy Weight):** Os tubos pesados são elementos tubulares de aço forjado e usinados que têm como função principal promover a transição de rigidez entre os comandos e os tubos de perfuração, diminuindo a possibilidade de fadiga. As características principais desses tubos são: maior espessura das paredes, uniões mais resistentes e revestidas de metal duro e reforço central no corpo do tubo. Na figura 19 é mostrado um tubo pesado, onde pode ser observado o reforço central.



Figura 19 – Tubo pesado com reforço central.

**Tubos de Perfuração (Drill Pipes):** Os tubos de perfuração são tubos de aço sem costura, tratados internamente para diminuição do desgaste interno e corrosão, possuindo nas suas extremidades as conexões cônicas conhecidas como *tool joints*, que são soldadas no seu corpo. O peso por unidade de comprimento, nos tubos de perfuração, é um valor de referência que permite determinar o diâmetro interno, a espessura de parede e o *drift* (máximo diâmetro de passagem) do tubo. Na figura 20 é mostrado um tubo de perfuração. O grau do aço especifica o valor da sua resistência à tensão de escoamento. Os graus do aço para tubos de perfuração, segundo a norm API, são:

Grau	Tensão de Escoamento (psi)
E	75.000 a 105.000
X	95.000 a 125.000
G	105.000 a 135.000

S	135.000 a 165.000
---	-------------------

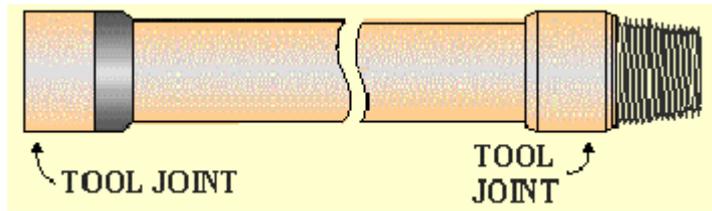


Figura 20 – Tubo de perfuração.

No período do estágio foi feito um projeto, em planilha do Excel, para permitir calcular, de forma simples, as quantidades necessárias de Comandos (Drill Colars), Tubos Pesados (Heavy Weight) e Tubos de Perfuração (Drill Pipes).

Além de calcular os tubos a planilha determina a máxima pressão de colapso que os tubos resistem, de acordo com o grau do aço, a máxima profundidade que a coluna de perfuração pode alcançar e o torque que é gerado pela mesa rotativa.

Os cálculos contidos na planilha são referentes à Norma API RP 75 e os dados de tabelas foram retirados do Petroguia. Abaixo é mostrado a planilha, no excel, do dimensionamento de colunas de perfuração.

### DIMENSIONAMENTO DE UMA COLUNA DE PERFURAÇÃO

	Dados Inseridos
	Dados Calculados
	Dados Constantes

#### 1. Dados do Poço

Poço		
Profundidade Final do Poço		0 ft
Kick of Point		0 ft
Inclinação Máxima		0 rad
Diâmetro da Broca		
Peso sobre Broca		0 lb
Perda de Carga na Broca		
Peso da Lama		
Potência fornecida para a mesa		
Rotação da mesa rotativa		
cos (Inclinação)	1	
Margem de OverPull (MOP)	50000	lb
Fator de Segurança ao Colapso	1,125	
Posição da Linha Neutra (PLN)	0,85	

#### 2. Determinação do Fator de Flutuação

Fator de Flutuação	1
--------------------	---

#### 3. Determinação da quantidade Mínima de Comandos (Drill Colars)

Quantidade	Comprimento Total		OD (pol.)	ID (pol.)	Resist a Tração (lb)	Peso por Pé (lb)
	(m)	(ft)				
0		0				

#### 4. Determinação da quantidade Mínima de Tubos Pesados (Heavy Weight)

Quantidade	Comprimento Total		OD (pol.)	ID (pol.)	Resist a Tração (lb)	Peso por Pé (lb)
	(m)	(ft)				
0		0				

#### 5. Determinação da quantidade Máxima de Tubos de Perfuração (Drill Pipes)

##### GRAU E

Quantidade	Comprimento Total		OD (pol.)	ID (pol.)	Resist a Tração (lb)	Peso por Pé (lb)
	(m)	(ft)				
0		0				
<b>Lim de Escoam (psi)</b>		<b>Rtorq Conex (lb.ft)</b>				
75000						

##### GRAU X

Quantidade	Comprimento Total		OD (pol.)	ID (pol.)	Resist a Tração (lb)	Peso por Pé (lb)
	(m)	(ft)				
0		0				
<b>Lim de Escoam (psi)</b>		<b>Rtorq Conex (lb.ft)</b>				
95000						

##### GRAU G

Quantidade	Comprimento Total		OD (pol.)	ID (pol.)	Resist a Tração (lb)	Peso por Pé (lb)
	(m)	(ft)				
0		0				
<b>Lim de Escoam (psi)</b>		<b>Rtorq Conex (lb.ft)</b>				
105000						

##### GRAU S

Quantidade	Comprimento Total		OD (pol.)	ID (pol.)	Resist a Tração (lb)	Peso por Pé (lb)
	(m)	(ft)				
0		0				
<b>Lim de Escoam (psi)</b>		<b>Rtorq Conex (lb.ft)</b>				
135000						

RESUMO DA COLUNA	DIMENSIONADO	USADO
QUANTIDADE min. DE DCs	#DIV/0!	0
QUANTIDADE min. DE HWs	#DIV/0!	0
QUANTIDADE max. DE DPs Grau E	#DIV/0!	0
QUANTIDADE max. DE DPs Grau X	#DIV/0!	0
QUANTIDADE max. DE DPs Grau G	#DIV/0!	0
QUANTIDADE max. DE DPs Grau S	#DIV/0!	0

#### 6. Determinação da Pressão de Colapso e máxima profundidade de a coluna "seca" pode alcançar

##### GRAU E

Falha no Pseudo Plástico	9083,04 psi	Máx Profundidade	#DIV/0!	m
Falha Plástica	5425,78 psi		#DIV/0!	m
Falha na Transição	2126,91 psi		#DIV/0!	m
Falha no Regime Elástico	1350,62 psi		#DIV/0!	m

##### GRAU X

Falha no Pseudo Plástico	12120,29 psi	Máx Profundidade	#DIV/0!	m
Falha Plástica	6244,69 psi		#DIV/0!	m
Falha na Transição	2698,84 psi		#DIV/0!	m
Falha no Regime Elástico	1965,82 psi		#DIV/0!	m

##### GRAU G

Falha no Pseudo Plástico	13668,77 psi	Máx Profundidade	#DIV/0!	m
Falha Plástica	7566,22 psi		#DIV/0!	m
Falha na Transição	3177,22 psi		#DIV/0!	m
Falha no Regime Elástico	2315,41 psi		#DIV/0!	m

##### GRAU S

Falha no Pseudo Plástico	18445,12 psi	Máx Profundidade	#DIV/0!	m
Falha Plástica	10032,11 psi		#DIV/0!	m
Falha na Transição	4808,57 psi		#DIV/0!	m
Falha no Regime Elástico	3535,74 psi		#DIV/0!	m

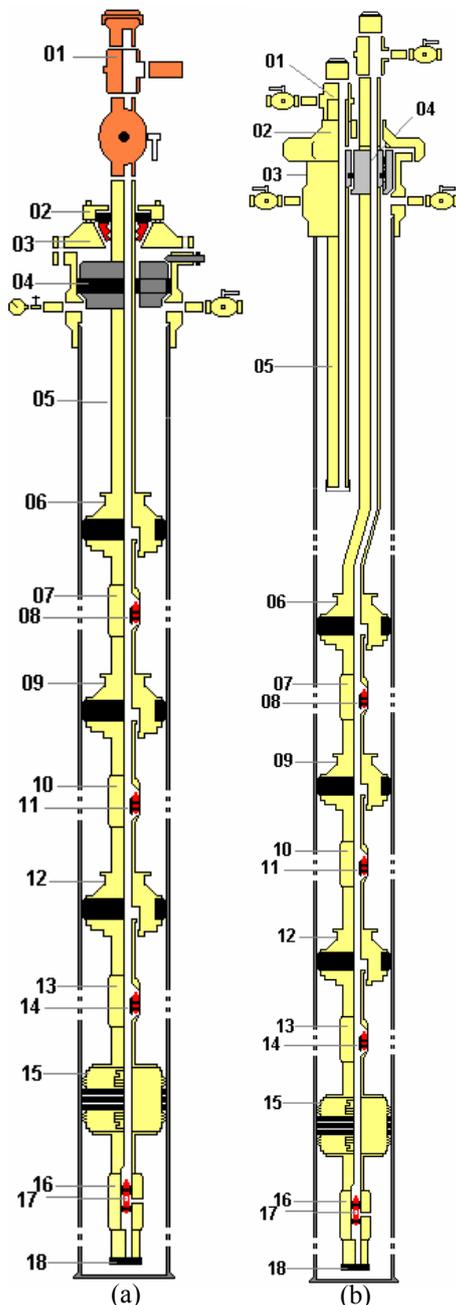
#### 7. Determinação do torque gerado na perfuração

#DIV/0! lb.ft

### 3.4 – Revisão de Projetos Poço-Tipo de Injeção de Água

Poço-Tipo são poços projetados com a finalidade de apresentar um poço padrão para cada processo utilizado. Os materiais inseridos no projeto de um poço-tipo são materiais utilizados com grande frequência nos poços já produzidos. Para cada processo é necessário que haja um poço-tipo a fim de facilitar o projeto. Quando é necessário um equipamento que não se encontra no projeto se insere o mesmo no poço.

Foram desenvolvidos alguns poços-tipo para injeção de água, como poços de injeção de água simples, seletiva e dupla. Na figura 21 é mostrado um esquema de um poço-tipo de injeção de água duplo e seletivo com 4 intervalos.



#### Componentes da Coluna de Produção

1. Árvore de Natal para Injeção de Água
2. Adaptador
3. Cabeça de Produção
4. Suspensor de Produção
5. Tubos de Produção
6. Obturador
7. Mandril de Injeção de Água
8. Válvula Reguladora de Fluxo
9. Obturador
10. Mandril de Injeção de Água
11. Válvula Reguladora de Fluxo
12. Obturador
13. Mandril de Injeção de Água
14. Válvula Reguladora de Fluxo
15. Obturador
16. Niple
17. Regulador de Fluxo
18. Tampão

Figura 21 – Esquema de um poço-tipo de injeção de água (a) injeção de água seletiva de 4 intervalos e (b) injeção de água dupla seletiva de 4 intervalos.

### **3.5 – Embarque em áreas on-shore e off-shore**

No período do estágio a estagiária visitou plataformas, sondas de perfuração e produção. Os processos vistos nessas visitas foram:

- Cimentação Primária (SC-106) – Fazenda Belém;
- Métodos de Elevação (Bombeio Mecânico; Bombeio Centrífugo Submerso; Bombeio por Cavidades Progressivas e Bombeio por Rotorflex) – Campo do Amaro;
- Canhoneio (SPT-04) – Campo do Amaro;
- Perfuração Direcional (SC-106 – Fazenda Belém e SC-95 – Campo do Amaro);
- Perfuração Vertical (PV – Arabaiana e SPP4 – Campo do Amaro)
- Descida de Revestimentos (SC-106 e SC-95 e PV);

### **4 – Áreas de Identificação com o Curso**

As áreas com maior identificação com o curso foram as áreas de projetos mecânicos e seleção de materiais, devido ao estágio ter acontecido no Suporte Técnico da Engenharia de Poço, trabalhando com os diversos tipos de equipamentos de perfuração, completção e produção, onde agrega uma grande noção de tipos e características de materiais, princípios de funcionamento de conjuntos mecânicos e cálculo de esforços mecânicos.

### **5 – Conclusão**

O estágio curricular, para conclusão do Curso de Engenharia Mecânica, realizado na PETROBRÁS foi plenamente satisfatório, uma vez que atuou como uma importante complementação acadêmica que permitiu à aluna a aplicação de conhecimentos adquiridos no decorrer do curso, através do desenvolvimento de atividades práticas relacionadas a sua área de formação.

A principal virtude do estágio foi, além de fornecer novos conhecimentos, possibilitar a sedimentação dos ensinamentos recebidos pelo aluno através de uma

abordagem prática que possibilitou à fixação adequada destes preceitos. O estágio teve fundamental importância também do ponto de vista social, já que permitiu a convivência fraternal e amistosa do estagiário com toda a equipe da Empresa que o recebeu hospitaleiramente e gerou laços de amizade em todos os níveis hierárquicos.

Diante das experiências vivenciadas no decorrer do estágio curricular, infere-se que este seja indispensável ao currículo do Curso de Engenharia Mecânica, pois é através dele que a engenheirando tem a oportunidade de, por um conveniente intervalo de tempo, desenvolver atividades relacionadas ao curso, proporcionando a vivência em possíveis áreas de atuação além de conceber relacionamentos interpessoais, predispondo o estagiário à situações que serão posteriormente deparadas e gerando maior segurança para o seu futuro profissional na área de Engenharia Mecânica.

## **6 – Referências Bibliográficas**

- *American Petroleum Institute (API) RP 75 – Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits*; (1998);
- *American Petroleum Institute (API) SPEC 6A – Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment* (1999);
- *Equipamentos de Poço – Perfuração e Completação – Petrobrás – Carlos Francisco Sales de Souza* (2005);
- *Equipamentos para Completação de Poços – Petrobrás – Etiberto E. Pinheiro* (2004);
- *Equipamentos do Sistema de Controle de Poço na Superfície – Petrobrás – Joaquim Leite Ibiapina e Márcio Koki Watanabe* (2004);
- *Fundamentos de Engenharia de Petróleo – Petrobrás – José Eduardo Thomas* (2001);
- *Petroguia – E&P – CORP/ENGP/TEP* (2002).