

I.  
mar-96

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

Este exemplar corresponde a redação final  
da tese defendida por Rogério Costa  
Faria e aprovada  
pela comissão julgadora em 18/12/1995

Eugênio Spanó Rosa  
ORIENTADOR

Dissertação Apresentada à  
Faculdade de Engenharia Mecânica  
Como Requisito Parcial para a Obtenção do  
Título de Mestre em Engenharia de Petróleo

ml

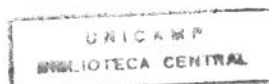
**ESTUDO EXPERIMENTAL DO GRADIENTE DE  
PRESSÃO EM TUBULAÇÕES ANULARES  
CONCÊNTRICAS E EXCÊNTRICAS  
COM E SEM ROTAÇÃO**

47/95

Autor : Rogério Costa Faria

Orientador : Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa

Dezembro de 1995



UNIDADE	TCC	
N.º CHAMADA:	TUNICAMP	
	F225e	
V.	E.	
TOMBO BC/	26977	
PROC	667/96	
C	<input type="checkbox"/>	D <input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,50	
DATA	12/3/96	
N.º CPD	C.M. 00084953-5	

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

F225e Faria, Rogério Costa  
Estudo experimental do gradiente de pressão em tubulações anulares concêntricas e excêntricas com e sem rotação / Rogério Costa Faria.--Campinas, SP: [s.n.], 1995.

Orientador: Eugênio Spanó Rosa.  
Dissertação (mestrado).- Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

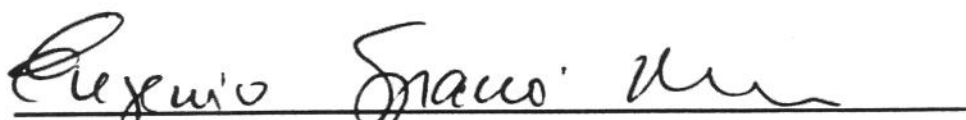
1. Engenharia do petróleo. 2. Poços de petróleo. 3. Fluxo viscoso. 4. Massas girantes de fluidos. 5. Escoamento. I. Rosa, Eugênio Spanó. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

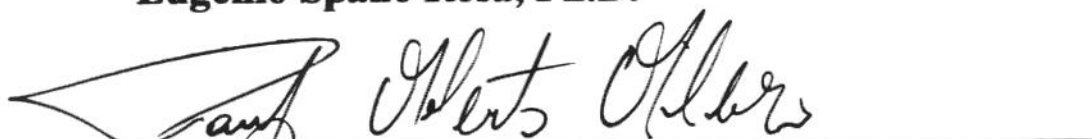
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

**A dissertação “Estudo Experimental do Gradiente de Pressão em Tubulações Anulares Concêntricas e Excêntricas com e sem Rotação” elaborada por Rogério Costa Faria foi aceita pela subcomissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.**

**Campinas, 18 de Dezembro de 1995**

**Banca Examinadora**

  
\_\_\_\_\_  
**Eugênio Spanó Rosa, Ph.D.**

  
\_\_\_\_\_  
**Paulo Roberto Ribeiro, Ph.D.**

  
\_\_\_\_\_  
**Marcelo Moreira Ganzarolli, Ph.D.**

Eu dedico este trabalho

aos meus pais

Délio (*in memoriam*)

e

Luzia Aldira

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Dr. Eugênio Spanó Rosa pelo empenho, orientação e interesse demonstrado durante todo o transcorrer deste trabalho.

Ao professor Dr. Fernando de Almeida França pelo apoio e orientação inicial.

Ao professor Atílio Alberto Triggia pela presteza e participação decisiva na fase inicial do trabalho.

A todos os colegas do E&P-ES pelo apoio, em especial, ao Engenheiro Carlos Roberto Neves de Sousa e ao Técnico José Carlos, pelo fornecimento de dados e materiais fundamentais na fase de projeto do aparato experimental, e à Secretária Margarida pela manutenção do contato com o E&P-ES.

À PETROBRÁS pelo suporte financeiro e pela oportunidade de um aprimoramento técnico/profissional.

Aos funcionários Geraldo, Sílvio e Edimur do laboratório do DE/ FEM/ UNICAMP e Alcimar (CEPETRO), pela participação durante a montagem do aparato experimental.

À presteza, fundamental no cumprimento do prazo, de toda a equipe do CEPETRO, em especial, à Vanira e ao Mário.

A todos os professores, funcionários e colegas da UNICAMP, pela ajuda e agradável convívio durante estes dois anos.

À TERMOQUIP pela qualidade do serviço e atendimento.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
	1.1 HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DAS BOMBAS DE CAVIDADES PROGRESSIVAS (BCP)	1
	1.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA BCP	3
	1.3 MOTIVAÇÃO PARA O TRABALHO	6
	1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO	7
<b>2</b>	<b>ANÁLISE MATEMÁTICA DO ESCOAMENTO ANULAR</b>	<b>8</b>
	2.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	9
	2.2 ARRANJO CONCÊNTRICO	13
	2.3 ARRANJO EXCÊNTRICO	14
	2.4 HIPÓTESES DE TRABALHO	15
<b>3</b>	<b>PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO</b>	<b>16</b>
	3.1 ANÁLISE DIMENSIONAL	17
	3.2 RELAÇÕES ENTRE GRANDEZAS DO MODELO E PROTÓTIPO	18
	3.3 DIMENSIONAMENTO DO MODELO	19
<b>4</b>	<b>APARATO EXPERIMENTAL</b>	<b>26</b>
	4.1 MEDIDORES	35
	4.1.1 Medidor de Pressão	35
	4.1.2 Medidor de Vazão	36
	4.1.3 Medidor de Rotação	38

4.1.4	Medidor de Excentricidade _____	39
4.2	PROPRIEDADES FÍSICAS DO FLUIDO _____	40
4.2.1	Massa Específica _____	40
4.2.2	Viscosidade _____	41
4.3	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS _____	42
4.3.1	Procedimento para Tracionar a Haste _____	42
4.3.2	Posicionamento da Haste Concêntrica _____	43
4.3.3	Procedimento para Determinação da Excentricidade _____	45
4.3.4	Ajuste de Vazão _____	47
4.3.5	Determinação do Diferencial de Pressão no Anular _____	47
4.3.6	Gradiente de Pressão _____	49
<b>5</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS _____</b>	<b>51</b>
5.1	GRADIENTES DE PRESSÃO _____	51
5.1.1	Comentários _____	56
5.2	HASTE SEM LUVA E CONCÊNTRICA _____	56
5.3	HASTE SEM LUVA E EXCÊNTRICA _____	58
5.4	HASTE COM LUVA E CONCÊNTRICA _____	61
5.5	HASTE COM LUVA E EXCÊNTRICA _____	63
5.6	ANÁLISE DE ERRO _____	65
5.6.1	Diferencial de Pressão para Anular Concêntrico _____	65
5.6.2	Diferencial de Pressão para Anular Excêntrico _____	70
<b>6</b>	<b>METODOLOGIA DE CÁLCULO _____</b>	<b>73</b>
6.1	HASTE CONCÊNTRICA _____	73

6.2 HASTE EXCÊNTRICA _____	74
6.3 LUVA E EXTREMIDADES DA HASTE _____	84
6.3.1 Extremidades da Haste _____	85
6.3.2 Influência da luva e Extremidades da Haste no Diferencial de Pressão _____	85
<b>7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES _____</b>	<b>87</b>
7.1 CONCLUSÕES _____	87
7.2 RECOMENDAÇÕES _____	88
<b>APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DOS MEDIDORES _____</b>	<b>89</b>
A.1 DIMENSIONAMENTO E CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE VAZÃO _____	89
A.1.1 Dimensionamento _____	89
A.1.2 Procedimento de Calibração do Medidor de Vazão _____	90
A.2 CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE PRESSÃO _____	94
<b>APÊNDICE B - MEDIDAS DE EXCENTRICIDADE DA HASTE _____</b>	<b>99</b>
<b>BIBLIOGRAFIA _____</b>	<b>100</b>



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - ESQUEMA DE UM POÇO EQUIPADO COM BOMBA DE CAVIDADES PROGRESSIVAS (BCP). _____	4
FIGURA 1.2 - VISTA EM CORTE DA BCP. ONDE A PARTE SOLIDÁRIA AO TUBO EM BORRACHA É O ESTATOR, E A HÉLICE SIMPLES DE METAL QUE OCUPA A PARTE CENTRAL DA SEÇÃO DA BOMBA É O ROTOR. _____	6
FIGURA 2.1 - ESQUEMA DO ANULAR EXCÊNTRICO ENTRE TUBO E HASTE. _____	9
FIGURA 4.1 - VISTA GERAL DO APARATO EXPERIMENTAL. _____	26
FIGURA 4.2 - ESQUEMA GERAL DO APARATO EXPERIMENTAL. _____	27
FIGURA 4.3 - VISTA EM CORTE DA TORRE E DOS COMPONENTES DO MODELO DO POÇO. _____	29
FIGURA 4.4 - VISTA DA PARTE SUPERIOR DA TORRE: PLATAFORMA SUPERIOR DA TORRE, UM DOS TRÊS PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DA TORRE AO TETO, O MOTOR DA HASTE, A PRÓPRIA HASTE, OS PARAFUSOS UTILIZADOS NO TRACIONAMENTO DA HASTE E A EXTREMIDADE SUPERIOR DO TUBO. _____	31
FIGURA 4.5 - ESQUEMA DA LUVA E A EXTREMIDADE DA HASTE. _____	32
FIGURA 4.6 - VISTA LATERAL DO TUBO: LUVA NA POSIÇÃO CONCÊNTRICA NO INTERIOR DO TUBO E UMA DAS NOVE TOMADAS DE PRESSÃO. _____	33
FIGURA 4.7 - VISTA DO PARAFUSO CENTRALIZADOR SOBRE A PLATAFORMA CENTRAL DA TORRE. _____	34
FIGURA 4.8 - CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO: O CD23 E O TRANSDUTOR DE PRESSÃO. _____	35

FIGURA 4.9 - ESQUEMA DO MEDIDOR DE VAZÃO, POSICIONAMENTO DO MANÔMETRO E DO TERMÔMETRO. _____	37
FIGURA 4.10 - CENTRALIZADOR INSTALADO NO TUBO. _____	40
FIGURA 4.11 - VISTA LATERAL DO TUBO DURANTE SEU POSICIONAMENTO. _____	44
FIGURA 4.12 - VISTA EM CORTE DO POSICIONAMENTO DO TUBO PARA O ARRANJO CONCÊNTRICO. _____	44
FIGURA 4.13 - VISTA EM CORTE DO POSICIONAMENTO DO TUBO PARA O ARRANJO EXCÊNTRICO. _____	46

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 4.1- VISCOSIDADE DO ÓLEO OB-54 EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA. _____	42
GRÁFICO 5.1 - GRADIENTE DE PRESSÃO PARA HASTE SEM LUYA E CONCÊNTRICA PARA VAZÃO DE 1923 L/H E ROTAÇÃO DE 450 RPM. _____	52
GRÁFICO 5.2 - GRADIENTE DE PRESSÃO PARA HASTE SEM LUYA E EXCÊNTRICA ( $\lambda=0,46$ ) PARA VAZÃO DE 2150 L /H E ROTAÇÃO DE 450 RPM. _____	53
GRÁFICO 5.3 - GRADIENTE DE PRESSÃO PARA HASTE COM LUYA E CONCÊNTRICA PARA VAZÃO DE 2150 L/H E ROTAÇÃO DE 450 RPM. _____	54
GRÁFICO 5.4 - GRADIENTE DE PRESSÃO PARA HASTE COM LUYA E EXCÊNTRICA( $\lambda=0,49$ ) PARA VAZÃO DE 1811 L/H E ROTAÇÃO DE 450 RPM. _____	55
GRÁFICO 5.5 - DADOS EXPERIMENTAIS E FAIXA DO DIFERENCIAL DE PRESSÃO (DP) ESPERADO PARA HASTE SEM LUYA E CONCÊNTRICA. _____	58
GRÁFICO 5.6 - DADOS EXPERIMENTAIS E FAIXA DO DIFERENCIAL DE PRESSÃO (DP) ESPERADO PARA HASTE SEM LUYA E EXCÊNTRICA ( $\lambda=0,46$ ). _____	60
GRÁFICO 5.7 - DADOS EXPERIMENTAIS E FAIXA DO DIFERENCIAL DE PRESSÃO (DP) ESPERADO PARA HASTE COM LUYA E CONCÊNTRICA. _____	62
GRÁFICO 5.8 - DADOS EXPERIMENTAIS E FAIXA DO DIFERENCIAL DE PRESSÃO (DP) ESPERADO PARA HASTE COM LUYA E EXCÊNTRICA ( $\lambda=0,49$ ). _____	64
GRÁFICO 6.1 - INFLUÊNCIA DA EXCENTRICIDADE NO DIFERENCIAL DE PRESSÃO PARA AS CONFIGURAÇÕES TUBO/HASTE MAIS UTILIZADAS NO CAMPO. _____	83
GRÁFICO A.1 - CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE VAZÃO I. _____	92
GRÁFICO A.2 - CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE VAZÃO II. _____	93

GRÁFICO A.3 - CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE VAZÃO III. _____	93
GRÁFICO A.4 - DADOS EXPERIMENTAIS DA CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO EQUIPADOS COM OS DIAFRAGMAS DE NÚMEROS 20 E 22. _____	96
GRÁFICO A.5 - DADOS EXPERIMENTAIS DA CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO EQUIPADOS COM OS DIAFRAGMAS DE NÚMEROS 26 E 28. _____	97
GRÁFICO A.6 - DADOS EXPERIMENTAIS DA CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTOR DE PRESSÃO EQUIPADO COM O DIAFRAGMA DE NÚMERO 30. _____	98

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 - DIÂMETROS DAS LUVAS “SLIM” E “FULLSIZE”.	5
TABELA 3.1 - VALORES DAS VAZÕES DO MODELO EM FUNÇÃO DAS VAZÕES E VISCOSIDADES DO PROTÓTIPO.	22
TABELA 3.2 - PREVISÕES DOS DIFERENCIAIS DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DAS VAZÕES E VISCOSIDADES DO PROTÓTIPO AO LONGO DE UM TRECHO DE 0,80 M DO MODELO.	23
TABELA 3.3 - VALORES DAS ROTAÇÕES DO MODELO EM FUNÇÃO DAS ROTAÇÕES E VISCOSIDADES DO PROTÓTIPO.	24
TABELA 4.1 - VALORES DA VISCOSIDADE DO ÓLEO OB-54 EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.	41
TABELA 5.1 - DADOS DE VAZÃO VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO PARA HASTE SEM LUYA E CONCÊNTRICA ( ÍNDICES 0 E 450 REFEREM-SE, RESPECTIVAMENTE, ÀS ROTAÇÕES DE 0 E 450 RPM).	57
TABELA 5.2 - DADOS DE VAZÃO VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO PARA HASTE SEM LUYA E EXCÊNTRICA ( OS VALORES DA EXCENTRICIDADE E EXCENTRICIDADE RELATIVA ( $\lambda$ ) SÃO RESPECTIVAMENTE 4,7 MM E 0,46).	60
TABELA 5.3 - DADOS DE VAZÃO VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO PARA HASTE COM LUYA E CONCÊNTRICA.	62
TABELA 5.4- DADOS DE VAZÃO VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO PARA HASTE COM LUYA E EXCÊNTRICA (OS VALORES DA EXCENTRICIDADE E EXCENTRICIDADE RELATIVA ( $\lambda$ ) SÃO RESPECTIVAMENTE 5,0 MM E 0,49).	64
TABELA 5.5 - VALORES DOS ERROS RELATIVOS DOS TRÊS MEDIDORES DE VAZÃO UTILIZADOS.	69
TABELA 6.1 - VALORES DO PARÂMETRO $\lambda_{MAX} \cdot RE_{\Omega}$ PARA A CONFIGURAÇÃO	

TUBO/HASTE: 2 7/8"X 5/8" E 2 7/8"X 3/4".	77
TABELA 6.2 - VALORES DO PARÂMETRO $\lambda_{MAX}$ : $RE_{\Omega}$ PARA AS CONFIGURAÇÕES	
TUBO/HASTE: 2 7/8"X 7/8" E 2 7/8" X 1".	78
TABELA 6.3 - VALORES DO PARÂMETRO $\lambda_{MAX}$ : $RE_{\Omega}$ PARA AS CONFIGURAÇÕES	
TUBO/HASTE: 3 1/2"X 5/8" E 3 1/2"X 3/4".	79
TABELA 6.4 - VALORES DO PARÂMETRO $\lambda_{MAX}$ : $RE_{\Omega}$ PARA AS CONFIGURAÇÕES	
TUBO/HASTE: 3 1/2"X 7/8" E 3 1/2"X 1".	80
TABELA 6.5 - VALORES DA RAZÃO ENTRE O DIFERENCIAL DE PRESSÃO PARA O CASO	
CONCÊNTRICO E EXCÊNTRICO (DPC/DPE) EM FUNÇÃO DA EXCENTRICIDADE	
RELATIVA ( $\lambda$ ), PARA O TUBO DE 2 7/8" E HASTES DE 5/8", 3/4", 7/8" E 1".	81
TABELA 6.6 - VALORES DA RAZÃO ENTRE O DIFERENCIAL DE PRESSÃO PARA O CASO	
CONCÊNTRICO E EXCÊNTRICO (DPC/DPE) EM FUNÇÃO DA EXCENTRICIDADE	
RELATIVA ( $\lambda$ ), PARA O TUBO DE 3 1/2" E HASTES DE 5/8", 3/4", 7/8" E 1".	82
TABELA 6.7- VALORES DO NÚMERO DE REYNOLDS AXIAL PARA A CONFIGURAÇÃO	
TUBO/HASTE: 2 7/8" X 5/8".	84
TABELA 6.8 - COMPARAÇÃO ENTRE O DIFERENCIAL DE PRESSÃO NA LUVA E AO LONGO	
DA HASTE, PARA O ARRANJO CONCÊNTRICO E LUVA DO TIPO "SLIM".	86
TABELA A.1 - CARACTERÍSTICAS DOS MEDIDORES DE VAZÃO.	90
TABELA A.2 - DADOS REFERENTE À CALIBRAÇÃO DOS TRÊS MEDIDORES DE VAZÃO.	92
TABELA A.3 - FAIXA DE PRESSÃO (MMCA) DOS DIAFRAGMAS UTILIZADOS.	95
TABELA B.1 - DETERMINAÇÃO DA EXCENTRICIDADE DA HASTE SEM LUVA NO TRECHO	
COMPREENSIVO ENTRE AS TOMADAS DE PRESSÃO 1 E 5.	99

TABELA B.2 - DETERMINAÇÃO DA EXCENTRICIDADE DA HASTE COM LUVA NO TRECHO

COMPREENDIDO ENTRE AS TOMADAS DE PRESSÃO 1 E 5. \_\_\_\_\_ 99

## NOMENCLATURA

A	:	Área da seção transversal do anular
a	:	Raio do cilindro externo
b	:	Raio do cilindro interno
c	:	Excentricidade
D	:	Diâmetro do tubo (2a)
d	:	Diâmetro da haste (2b)
$D_H$	:	Diâmetro Hidráulico ( $D_H = D - d$ )
$F_E$	:	Fator de Escala
g	:	Aceleração gravitacional
k	:	Razão b/a
L	:	Comprimento do tubo
M	:	Vazão mássica
Q	:	Vazão volumétrica
p	:	Pressão
$\tilde{p}$	:	$\tilde{p} = p - \rho gz$
r	:	Raio
Re	:	Reynolds axial , $Re = \frac{\rho \bar{v}_z 2(a-b)}{\mu}$
$Re_\Omega$	:	Reynolds rotacional, $Re_\Omega = \frac{\Omega b(a-b)}{\nu}$
T	:	Temperatura



### **Letras Gregas**

$\Delta P$	:	Perda de carga no trecho L
$\lambda$	:	Excentricidade relativa. $\lambda = c / (a - b)$
$\mu$	:	Viscosidade do fluido
$\nu$	:	Viscosidade cinemática ( $\mu/\rho$ )
$\rho$	:	Massa específica do fluido
$v$	:	Velocidade
$\bar{v}$	:	Velocidade média ( $Q/A$ )
$\Omega$	:	Rotação do cilindro interno

### **Subscritos**

g	:	mercúrio
m	:	Referente ao modelo
r	:	Radial
z	:	Axial
$\theta$	:	Tangencial

### **Sobrescritos**

*	:	Forma adimensional
---	---	--------------------

### **símbolos**

”	:	Polegada
---	---	----------

## RESUMO

Na busca contínua da redução dos custos de produção do petróleo, um método de elevação artificial que vem se destacando é o sistema de produção através de bombas de cavidades progressivas conhecido, simplesmente, por BCP. Este método que, inicialmente, era destinado à produção de poços rasos (500 m) e de baixas vazões (5m<sup>3</sup>/d), hoje, com o desenvolvimento de novos materiais, já é utilizado em poços com vazões de até 300 m<sup>3</sup>/d e profundidades que chegam a 2000 m. Com a utilização de vazões cada vez maiores, as perdas hidrodinâmicas ao longo do anular tubo/haste passaram a representar uma quantia significativa da energia total a ser fornecida ao fluido e, conseqüentemente, sua determinação assumiu um papel importante no dimensionamento do sistema BCP, exigindo-se, desta forma, uma maior atenção. Visando conhecer melhor o escoamento ao longo da coluna de produção, construiu-se, em laboratório, um modelo na escala de 1:1,88 de um poço equipado com tubo de produção de 2 7/8", haste de 7/8" e luva de 1 5/8", onde o escoamento foi considerado monofásico. A partir deste modelo foram simuladas as faixas de vazão de 0 a 300 m<sup>3</sup>/d, rotação de 100 a 400 rpm e viscosidade de 100 a 4000 cP, que abrangem quase a totalidade das condições de campo dos poços brasileiros equipados com BCP. Foram investigados os efeitos das restrições ao fluxo causadas pela mudança de geometria nas extremidades das hastes e pela presença das luvas(utilizadas nas interligações das hastes). Além das restrições estudou-se a influência da rotação no diferencial de pressão ao longo do anular tubo/haste, para os arranjos concêntricos e excêntricos, tanto para haste sem luva como para haste com luva. Os resultados obtidos, experimentalmente, confirmam, para o caso concêntrico, a não interferência da rotação no gradiente de pressão e para o

arranjo excêntrico, nas faixas de vazão, viscosidade e rotação investigadas, observa-se um ligeiro aumento no diferencial de pressão com a rotação. O diferencial de pressão no anular tubo/luva foi determinado utilizando-se as mesmas equações empregadas no cálculo do diferencial de pressão no anular tubo/haste. Para considerar-se a mudança de geometria das extremidades das hastes, sugere-se um majoramento de 50 % nos valores obtidos para as luvas.

## ABSTRACT

In the continuous search to reduce the petroleum production cost, a distinguished artificial lift method is the Progressive Cavity Pumping system, or simply BCP. Initially, it was only used to produce shallow wells (1600 ft or 500m) and low flow rates (30 bbl/d or 5m<sup>3</sup>/d), but with the development of new materials, the BCP has been applied to wells which produce as much as 2000 bbl/d (300 m<sup>3</sup>/d) and can be installed in depth up to 6500 ft (2000 m). With higher flow rates, the hydrodynamics losses through out the tubing/rod string annulus turned out to represent a reasonable percentage of the total energy applied to produce fluid from the bottom to the surface of the wells. Thus its determination has taken an important role in the system design, demanding more attention. To get a better knowledge of the flow through the tubing/rod string annulus, it was built a 1:1,88 scale model of a well equipped with 2 7/8" tubing, 7/8" rod and 1 5/8" coupling, for monofase flow. With this model, it was simulated the flow rates from 0 to 300 m<sup>3</sup>/d, pump speed from 100 to 400 rpm and viscosity from 100 to 4000 cP, values that typically covers almost the totality of the Brazilian oil wells equipped with BCP. It was investigated the effects of the flow restrictions caused by the complex geometry of the rods' edge and the higher diameter of the couplings. Besides the restrictions, it was studied the influence of the rotation of the rod string in the pressure gradient through out the tubing/rod string annulus for the concentric and eccentric configurations. The experimental results confirmed that in the concentric position, the rotation of the rod string does not interfere in the pressure loss. It was noted in the eccentric case that the rotation of the rod is responsible for a small increase in the pressure loss. The pressure loss caused by the flow through the tubing/coupling annulus was determined by the

same equations that were used to the tubing/rod annulus. In order to consider the complex geometry of the extremity of the rods, it is suggested to increase the value for the pressure loss along the couplings by 50%.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DAS BOMBAS DE CAVIDADES PROGRESSIVAS (BCP)

O cientista francês Rene Moineau apresentou, em sua tese de doutorado pela Universidade de Paris na década de 30, o conceito de uma série de bombas helicoidais, dentre estas encontra-se a bomba que hoje conhecemos por Bomba de Cavidades Progressivas-BCP [Wright, Adair,1993]. A BCP é constituída, basicamente, por duas partes, o rotor, uma hélice simples feita de metal e o estator, uma hélice dupla, constituída por um tubo de metal contendo internamente um elastômero. À medida que o rotor gira excentricamente no interior do estator, são formadas cavidades que caminham da sucção para a descarga da bomba, resultando num deslocamento positivo do fluido [Klein, 1991].

Ainda na década de 30, países como Estados Unidos, Inglaterra e Alemanha passaram a utilizar a BCP nas mais diversas aplicações industriais, inclusive nas transferências de fluidos dos campos de petróleo [Saveth, Klein, 1989]. Contudo foi apenas no início da década de 80, no Canadá, que teve início sua utilização comercial na elevação artificial de petróleo, sendo utilizada em poços cujo óleo apresentava viscosidade acima de 500 cP e os reservatórios encontravam-se à profundidades inferiores a 500 m. Apesar das dificuldades iniciais na utilização da BCP, as vantagens que este novo método propiciava, tais como, baixo custo de investimento, facilidade de manutenção e maior eficiência energética, somada à baixa eficiência dos métodos existentes na produção de óleos com viscosidade entre 500 cP e 15000 cP e com altos

teores de areia, foram os fatores decisivos nos investimentos para o desenvolvimento tecnológico da BCP. Com as melhorias obtidas, tornou-se possível seu uso à maiores profundidades, além do aumento da capacidade de bombeio. Em 1986, passou a ser utilizada largamente na extração de água com alto teor de areia e finos nas minas de carvão dos Estados Unidos. Em 1988 passou a ser empregada na produção de óleos de peso médio ( $20 \text{ cP} < \mu < 500 \text{ cP}$ ). A partir de 1992 passou a ser utilizada na produção de óleos leves ( $\mu < 20 \text{ cP}$ ) tornando-se, desta forma, aplicável a todas as faixas de viscosidade.

Apesar do grande avanço tecnológico alcançado, o sistema ainda apresenta algumas limitações, principalmente, devido ao elastômero, que tem suas características alteradas quando submetido à fluidos com altos teores de aromáticos,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$  e temperaturas acima de  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ .

No Brasil a primeira utilização da BCP na elevação artificial de petróleo ocorreu em 1982 no poço FZB-02 no campo de Fazenda Belém, no Estado do Rio Grande do Norte. Trata-se de um poço com características semelhantes aos poços pioneiros na utilização deste sistema, ou seja, rasos e com óleo de alta viscosidade. Acompanhando a evolução deste método, inclusive com fabricantes nacionais, a BCP passou a ser utilizada para os mais diversos tipos de óleo e situações, inclusive com aplicação em poços localizados no mar. Apesar da recente utilização da BCP, já existem cerca de 800 poços em operação no Brasil, correspondendo a aproximadamente 12% do total de poços produtores de petróleo no Brasil [Gibaldi et al, 1994].

## 1.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA BCP

A BCP fica alojada na extremidade inferior do tubo de produção e seu acionamento é feito a partir de um motor localizado na superfície. O torque é fornecido à bomba através de uma coluna de haste que interliga a cabeça de acionamento, localizada na superfície, à bomba. O escoamento do óleo a partir da descarga da BCP ocorre através do anular compreendido entre o tubo de produção e a coluna de haste. Algumas informações a respeito dos componentes do sistema são apresentadas a seguir [Correa, 1990]. Um esquema geral de um poço equipado com o sistema BCP é apresentado na FIG.1.1 [Mattheus, Dunn, 1991].

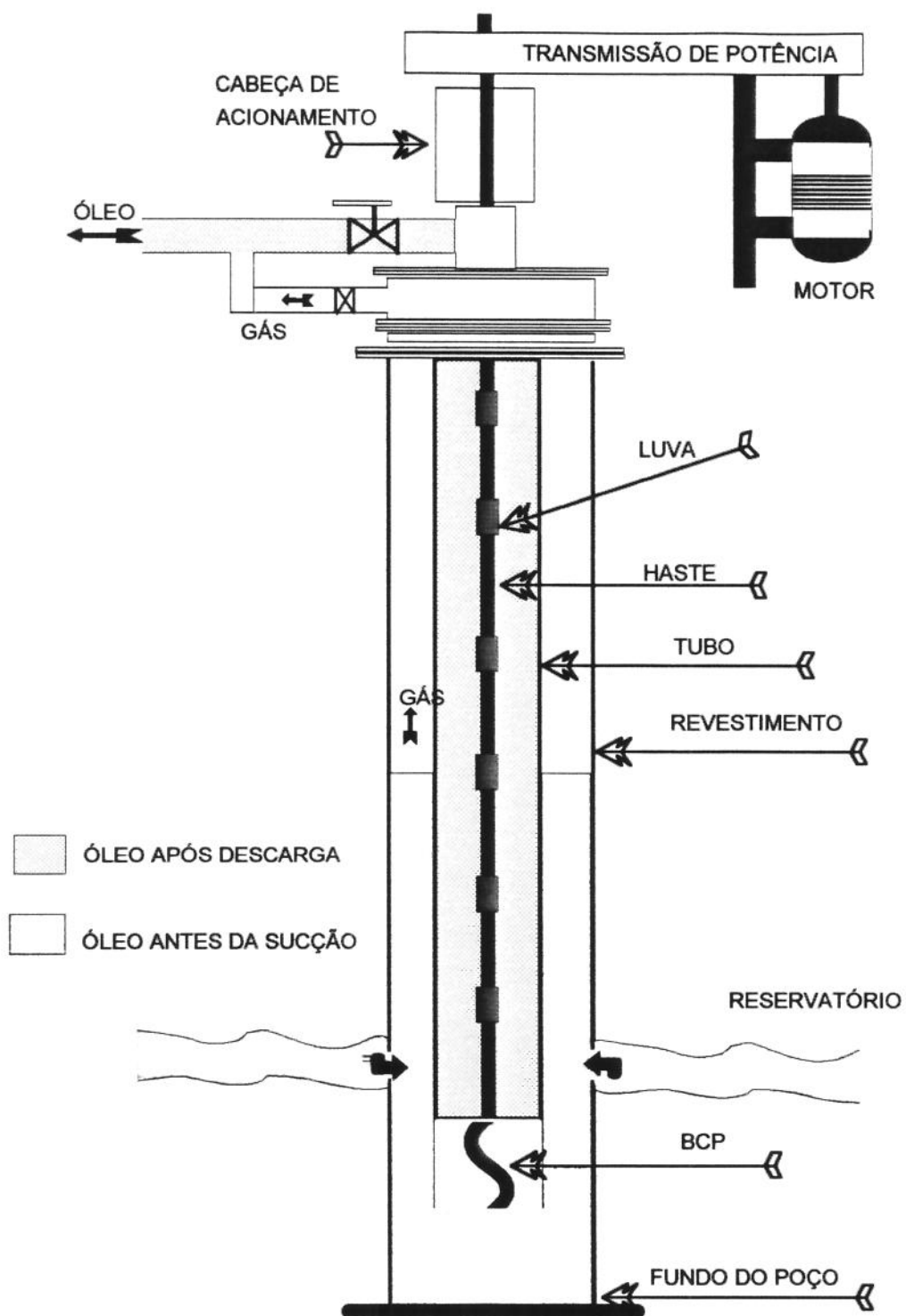
**Motor:** são utilizados motores elétricos e de combustão interna, sendo que a maioria dos poços estão equipados com motores elétricos. Esta preferência pelos motores elétricos deve-se ao baixo custo de manutenção, à alta eficiência energética, ao baixo nível de ruído e à facilidade de operação. Os motores de combustão interna, devido ao seu elevado custo de manutenção e sua baixa eficiência energética, são destinados às áreas não eletrificadas. A potência dos motores utilizados, atualmente, abrange a faixa de 5 a 100 CV.

**Sistema de Transmissão de Potência:** utilizado para transformar as altas rotações e baixo torque dos motores em baixas rotações e torques elevados, que são necessários para promover as rotações da coluna de haste e do rotor da bomba. É constituído, basicamente, por um conjunto de polias, correias e caixa de redução.

**Cabeça de Acionamento:** sua principal função é suportar a carga axial que atua na coluna de haste dando liberdade para o movimento de rotação da coluna de haste.

**Tubo de Produção:** além de servir para o escoamento do óleo do fundo do poço até as instalações de superfície, é o elemento de sustentação da bomba, que fica alojada





**FIGURA 1.1 - Esquema de um poço equipado com Bomba de Cavidades Progressivas (BCP).**

em sua extremidade inferior. É construído em aço com comprimento unitário em torno de 9,4 m. Os diâmetros nominais mais utilizados nos poços equipados com BCP são: 2 7/8” e 3 1/2”. Os diâmetros internos destes tubos são, respectivamente, 2,441” (62 mm) e 2,992” (76 mm).

**Coluna de Haste:** é o elemento do sistema responsável pelo fornecimento do torque à bomba. A coluna de haste é composta por um conjunto de hastes de comprimento unitário igual a 25 ft (7,62 m). Os diâmetros mais utilizados para as hastes são : 5/8” (15,9 mm), 3/4” (19,1 mm), 7/8” (22,2 mm) e 1” (25,4 mm). As hastes são conectadas através de luvas, que são cilindros regulares, cujos comprimentos para os modelos citados são de 4” (101,6 mm) e podem ser do tipo “slim” ou do tipo “fullsize”, sendo a única diferença o fato da “fullsize” apresentar um diâmetro um pouco maior. A TAB.1.1 contém seus diâmetros.

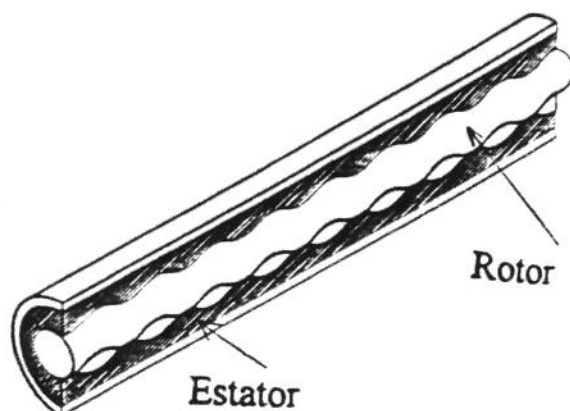
**TABELA 1.1 - Diâmetros das luvas “slim” e “fullsize”.**

Diâmetro nominal		Luva “slim”		Luva “fullsize”	
		Diâmetro		Diâmetro	
(pol)	(mm)	(pol)	(mm)	(pol)	(mm)
5/8	15,9	11/4	31,8	11/2	38,1
3/4	19,1	11/2	38,1	15/8	41,3
7/8	22,2	15/8	41,3	1 13/16	46,0
1	25,4	2	50,8	23/16	55,6

**Bomba:** a BCP é constituída, basicamente, por duas partes: o rotor, uma hélice simples de aço que recebe, normalmente, uma cobertura de cromo para aumentar sua resistência à abrasão e pode ser encontrado com comprimentos entre 1 e 14 m. O estator é constituído de um elastômero moldado na configuração de uma dupla hélice e fixado à parede interna da tubulação, seu comprimento varia de 1 a 16 m (FIG.1.2).

À medida que o rotor gira excentricamente no interior do estator, são formadas

cavidades que caminham da sucção para a descarga da bomba, resultando num deslocamento positivo do fluido.



**FIGURA 1.2 - Vista em corte da BCP. Onde a parte solidária ao tubo em borracha é o estator, e a hélice simples de metal que ocupa a parte central da seção da bomba é o rotor.**

### **1.3 MOTIVAÇÃO PARA O TRABALHO**

Com a utilização da BCP para produzir poços com vazões cada vez maiores, as perdas hidrodinâmicas ao longo do espaço anular compreendido entre o tubo de produção e a coluna de haste passaram a representar uma parcela significativa da energia total despendida na elevação do fluido. Este novo cenário de aplicação da BCP impõe um melhor conhecimento do escoamento ao longo do anular tubo/haste, o que permitirá uma melhor determinação das perdas hidrodinâmicas e conseqüentemente um aperfeiçoamento no dimensionamento do sistema BCP, que inclui dentre outras coisas, a

especificação do número de estágios da bomba, a determinação do diâmetro da haste e do tubo e a potência do motor.

#### **1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Investigação experimental, a partir da construção de um modelo, da influência das restrições causadas pelas luvas e extremidades da haste no escoamento através do anular compreendido entre o tubo de produção e a coluna de haste, e o estudo experimental da influência da rotação no diferencial de pressão para os arranjos tubo/haste concêntricos e excêntricos.

Comparação do diferencial de pressão obtido experimentalmente com as soluções analíticas, e a verificação da influência da luva e excentricidade da haste no diferencial de pressão ao longo do anular.

## 2 ANÁLISE MATEMÁTICA DO ESCOAMENTO ANULAR

Neste capítulo são abordadas as equações que governam o escoamento no anular formado entre o tubo e a haste. O enfoque que pretende-se dar é qualitativo envolvendo uma discussão dos mecanismos físicos responsáveis pelo movimento e sua ordem de magnitude. As principais funções desta análise são: revelar os grupos adimensionais que governam o escoamento e substanciar os resultados experimentais à luz da análise de ordem de magnitude desenvolvida.

A decisão por um trabalho eminentemente experimental foi precedida de um trabalho de pesquisa, onde buscava-se publicações que tratassem das perdas de carga devidas às restrições em anulares (luvas) e a influência da rotação no diferencial de pressão axial para os arranjos concêntricos e excêntricos. Foram consultadas dentre outras fontes os bancos de dados automatizados COMPENDEX (1991-94), Sciece Citation Index (1991-94) e SPE (1951-93), porém não encontrou-se nenhum trabalho que tratasse especificamente do tema de interesse. Contudo para introduzir-se no assunto recorreu-se às revisões bibliográficas que tratassem do escoamento anular entre dois cilindros. Cerca de 150 trabalhos na área foram encontrados com aplicações para : fluidos Newtonianos e não Newtonianos, configurações concêntricas e excêntricas, desenvolvimento hidrodinâmico do escoamento, transição para turbulência, além de proposição de métodos numéricos e analíticos. Optou-se por não reproduzir aqui a revisão bibliográfica, visto que, o escopo deste trabalho é bem mais restrito do que o abrangido por estas áreas, porém deve-se citar, para as pessoas interessadas no tema, as cuidadosas revisões que se encontram nas dissertações de doutorado citadas a seguir:

Elísio Caetano Filho -1985 [Caetano], Paulo Roberto Ribeiro -1994 [Ribeiro] e Moacyr Bartholomeu Laruccia-1995 [Laruccia].

## 2.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A geometria do problema é definida pelo arranjo formado entre uma haste cilíndrica de raio “b” com rotação “ $\Omega$ ” posicionada concêntrica ou excentricamente a um tubo externo estacionário, conforme sugere a FIG. 2.1. A excentricidade ou a distância entre centros tubo/haste é definida pela distância “c”. O conjunto tubo/haste é posicionado na vertical, com o eixo z paralelo e em sentido contrário a aceleração da gravidade. As direções radial e tangencial são representadas por r e  $\theta$  respectivamente, de acordo com o sistema de coordenadas cilíndricas-polar. Neste sistema de coordenadas as componentes das velocidades são dadas por  $v_z, v_r, v_\theta$ .

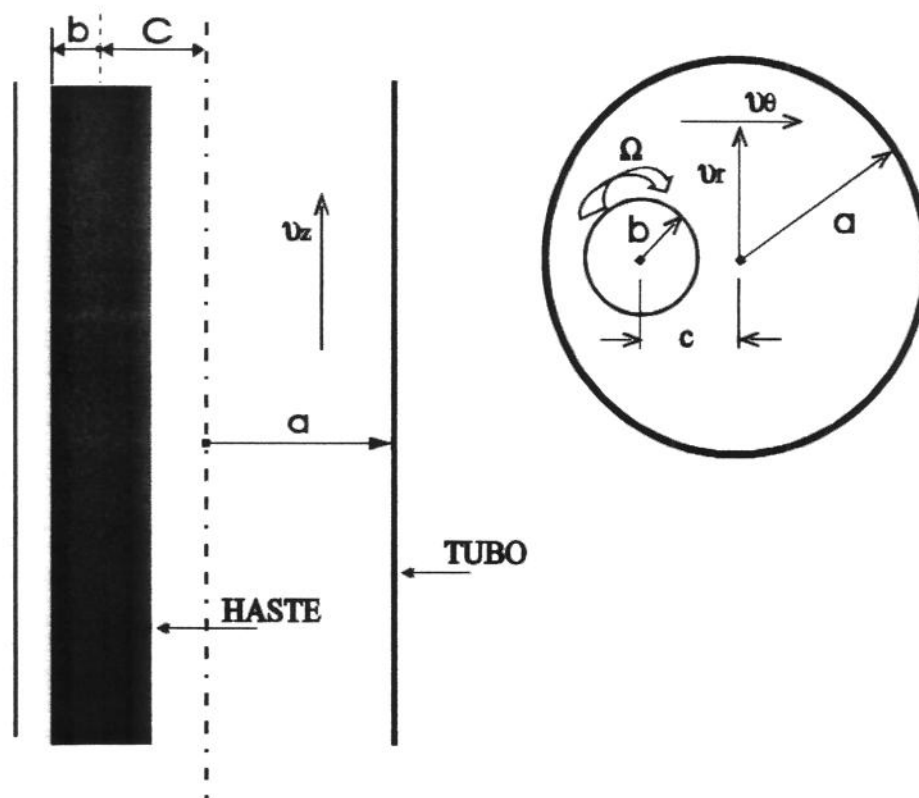


FIGURA 2.1 - Esquema do anular excêntrico entre tubo e haste

Para um escoamento plenamente desenvolvido ( $\partial/\partial z \equiv 0$ ), onde o fluido utilizado seja Newtoniano e incompressível, as equações de conservação em coordenadas cilíndricas-polares reduzem-se a:

Equação da Conservação da Massa:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad (2.1)$$

Equação da Conservação do Momento na direção radial,  $r$  :

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} v_\theta \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial r} + \nu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{v_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right] \quad (2.2)$$

Equação da Conservação do Momento na direção tangencial,  $\theta$  :

$$v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} v_\theta \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \theta} + \nu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{v_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right] \quad (2.3)$$

Equação da Conservação do Momento na direção axial,  $z$  :

$$v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{1}{r} v_\theta \frac{\partial v_z}{\partial \theta} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial z} + \nu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} \right] \quad (2.4)$$

onde:  $\tilde{p} = p - \rho g z$

Observando-se as EQ.2.2 a 2.4 nota-se que devido à condição do escoamento desenvolvido os campos de velocidades radial e tangencial,  $v_r$ ,  $v_\theta$ , são independentes do campo de velocidades axial,  $v_z$ . Por sua vez o campo de velocidades axial depende, através dos termos convectivos da EQ.2.4 do campo de velocidades radial e tangencial. Como consequência pode-se afirmar que o torque necessário para promover a rotação

da haste em um fluido Newtoniano independe da vazão ou, de modo mais explícito, do campo de velocidades axial. Por outro lado o gradiente de pressão na direção axial pode depender, além do campo de velocidades axial, dos campos de velocidades radial e tangencial. Este acoplamento é mostrado, respectivamente, através dos termos difusivos e convectivos da EQ.2.4.

Passa-se a seguir a um procedimento de adimensionalização das EQ.2.1 a 2.4. O objetivo desta análise é revelar a ordem de magnitude dos termos convectivos e difusivos nestas equações. As escalas utilizadas para adimensionalização estão descritas pelas EQ.2.5 a 2.11 onde o sobrescrito (\*) refere-se às grandezas adimensionais.

$$r = r^*(a - b) \quad (2.5)$$

$$z = z^*(a - b) \quad (2.6)$$

$$\theta = \left(\frac{a - b}{c}\right) \theta^* \quad (2.7)$$

$$v_\theta = \Omega b v_\theta^* \quad (2.8)$$

$$v_r = \left(\frac{c}{a - b}\right) \Omega b v_r^* \quad (2.9)$$

$$v_z = \bar{v}_z v_z^* \quad (2.10)$$

$$p = p^* \frac{\mu \bar{v}_z}{a - b} \quad (2.11)$$

onde  $\bar{v}_z = Q / A$ , sendo Q a vazão volumétrica e A a área do anular.

Substituindo-se as EQ.2.5 a 2.11 nas EQ.2.1 a 2.4 obtêm-se as equações de conservação na sua forma adimensional:



Equação da Conservação da Massa:

$$\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} (r^* v_r^*) + \frac{1}{r^*} \frac{\partial v_\theta^*}{\partial \theta^*} = 0 \quad (2.12)$$

Equação da Conservação do Momento na direção radial,  $r$  :

$$\begin{aligned} \text{Re}_\Omega \left[ \lambda^2 v_r^* \frac{\partial v_r^*}{\partial r^*} + \lambda^2 \frac{v_\theta^*}{r^*} \frac{\partial v_r^*}{\partial \theta^*} - \frac{v_\theta^{*2}}{r^*} \right] = \\ = -\Gamma \frac{\partial p^*}{\partial r^*} + \left[ \frac{\lambda}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left( r^* \frac{\partial v_r^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\lambda^3}{r^{*2}} \frac{\partial^2 v_r^*}{\partial \theta^{*2}} - \lambda \frac{v_r^*}{r^{*2}} - \frac{2\lambda}{r^{*2}} \frac{\partial v_\theta^*}{\partial \theta^*} \right] \end{aligned} \quad (2.13)$$

Equação da Conservação do Momento na direção tangencial,  $\theta$  :

$$\begin{aligned} \text{Re}_\Omega \left[ \lambda v_r^* \frac{\partial v_\theta^*}{\partial r^*} + \frac{\lambda}{r^*} v_\theta^* \frac{\partial v_\theta^*}{\partial \theta^*} + \lambda \frac{v_r^* v_\theta^*}{r^*} \right] = \\ = -\frac{\lambda \Gamma}{r^*} \frac{\partial p^*}{\partial \theta^*} + \left[ \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left( r^* \frac{\partial v_\theta^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\lambda^2}{r^{*2}} \frac{\partial^2 v_\theta^*}{\partial \theta^{*2}} - \frac{v_\theta^*}{r^{*2}} + \lambda^2 \frac{2}{r^{*2}} \frac{\partial v_r^*}{\partial \theta^*} \right] \end{aligned} \quad (2.14)$$

Equação da Conservação do Momento na direção axial,  $z$  :

$$\lambda \text{Re}_\Omega \left[ v_r^* \frac{\partial v_z^*}{\partial r^*} + \frac{v_\theta^*}{r^*} \frac{\partial v_z^*}{\partial \theta^*} \right] = -\frac{\partial \tilde{p}^*}{\partial z^*} + \left[ \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left( r^* \frac{\partial v_z^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\lambda^2}{r^{*2}} \frac{\partial^2 v_z^*}{\partial \theta^{*2}} \right] \quad (2.15)$$

onde os grupos adimensionais  $\lambda$ ,  $\text{Re}_\Omega$  e  $\Gamma$  representam, respectivamente, a excentricidade relativa, o Reynolds rotacional e a razão entre as velocidades axial e rotacional, que estão definidos pelas EQ.2.16 a 2.18.

$$\lambda = \frac{c}{a-b} \quad (2.16)$$

$$\text{Re}_\Omega = \frac{\Omega b(a-b)}{\nu} \quad (2.17)$$

$$\Gamma = \frac{\bar{v}_z}{\Omega b} \quad (2.18)$$

Das equações obtidas a equação de interesse é a EQ.2.15, por ser o enfoque principal deste trabalho o estudo do gradiente de pressão na direção axial. Nesta equação pode-se observar que a razão entre os termos convectivos e difusivos é expressa pelo produto dos parâmetros  $\lambda$  e  $Re_{\Omega}$ . Além disto observa-se na EQ.2.15 que o acoplamento do campos de velocidades radial e tangencial ocorre através dos termos convectivos e é o responsável pela introdução do caráter não linear desta equação diferencial parcial. Sua manifestação na solução final pode ser ou não significativa dependendo da ordem de magnitude do produto  $\lambda \cdot Re_{\Omega}$ . No limite quando  $\lambda \cdot Re_{\Omega} \rightarrow 0$ , a EQ.2.15 torna-se linear e apresenta solução analítica conhecida. Neste trabalho verificar-se-á, de maneira experimental, a influência do parâmetro  $\lambda \cdot Re_{\Omega}$  no gradiente de pressão, comparando-se os resultados experimentais com as soluções analíticas quando  $\lambda \cdot Re_{\Omega} \rightarrow 0$ . Para referência passa-se a descrever os resultados analíticos da EQ.2.15 quando  $\lambda \cdot Re_{\Omega} \rightarrow 0$  para os casos dos cilindros concêntricos e excêntricos.

## 2.2 ARRANJO CONCÊNTRICO

Para a haste concêntrica ao tubo, a simetria axial mais o fato de não haver injeção ou sucção de fluido através das paredes, impõe-se as seguintes restrições ao movimento:

$$\frac{\partial(\quad)}{\partial\theta} = 0 \quad (2.19)$$

$$v_r = 0 \quad (2.20)$$

Nestas condições a equação do momento na direção axial (EQ.2.15) reduz-se a uma equação de Poisson, apresentando um balanço entre o termos de pressão e viscoso de maneira similar ao escoamento de Hagen-Poiseuille,

$$-\frac{\partial \tilde{p}^*}{\partial z^*} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left( r^* \frac{\partial v_z^*}{\partial r^*} \right) = 0 \quad (2.21)$$

O gradiente de pressão,  $\Delta P/L$ , é obtido resolvendo-se a EQ.2.21, [White, 1974 ; Bird, 1976]

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{8\mu Q}{\pi a^4 F_k} \quad (2.22)$$

onde:

$$F_k = 1 - k^4 - \frac{(1 - k^2)^2}{\ln(1/k)} \quad (2.23)$$

$$k = \frac{b}{a} \quad (2.24)$$

Como podemos observar na EQ.2.22, para o caso dos cilindros concêntricos o diferencial de pressão independe da rotação.

### 2.3 ARRANJO EXCÊNTRICO

A ausência de simetria axial e a presença de rotação introduzem um grau maior de complexidade na EQ.2.15 que não é possível determinar, de forma analítica, sua solução geral. Entretanto para arranjos excêntricos quando  $\lambda \text{Re}_\Omega \rightarrow 0$ , a EQ.2.15 torna-se uma equação de Poisson apresentando um caráter linear. As dificuldades relativas a ausência de simetria axial podem ser superadas adotando-se um sistema de coordenadas bipolares e não cilíndricas-polar a fim de representar adequadamente as

condições de contorno. No sistema de coordenadas bipolar os círculos excêntricos são transformados em um conjunto de círculos concêntricos [Guckes, 1975]. Pode-se mostrar que neste caso, onde a rotação é nula, o gradiente de pressão,  $\Delta P/L$ , é dado por uma expressão similar à EQ.2.22 [White, 1974]:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{8 \mu Q}{\pi F_g} \quad (2.25)$$

onde:

$$F_g = a^4 - b^4 - \frac{4c^2 m^2}{\beta - \alpha} - 8c^2 m^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n e^{-n(\beta + \alpha)}}{\text{Sinh}(n\beta - n\alpha)} \quad (2.26)$$

$$m = (f^2 - a^2)^{1/2} \quad (2.27)$$

$$f = \frac{a^2 - b^2 + c^2}{2c} \quad (2.28)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \text{Ln} \frac{f + m}{f - m} \quad (2.29)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \text{Ln} \frac{f - c + m}{f - c - m} \quad (2.30)$$

## 2.4 HIPÓTESES DE TRABALHO

As EQ.2.22 e 2.25 definem as fórmulas analíticas de trabalho. Elas foram assim adotadas pelo fato de apresentarem uma solução analítica de relativa simplicidade e alta portabilidade, que pode ser aproximada para a solução do presente problema. O grau de precisão destas relações analíticas na previsão do gradiente de pressão para o presente problema será comparado através de medidas experimentais. A análise de ordem de magnitude apenas revela que as EQ. 2.22 e 2.25 são soluções da EQ.2.15, quando  $\lambda \text{Re}_\Omega \rightarrow 0$ . O quão próximo ou afastado desta condição será revelado comparando-se os resultados analíticos aos experimentais.

### 3 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

A construção do aparato experimental teve por objetivo a reprodução em laboratório do escoamento helicoidal monofásico que ocorre no anular entre o tubo de produção e a coluna de haste nos poços de petróleo que utilizam como método de elevação artificial a BCP.

Na impossibilidade de construir um modelo que representasse as diversas combinações tubo/ haste utilizadas nos poços de petróleo equipados com BCP, escolheu-se, para análise, a combinação mais comum onde utiliza-se tubo de 2 7/8" e haste de 7/8" interligadas por luvas de 1 5/8" do tipo "slim".

Para que o modelo representasse, fielmente, o escoamento que ocorre em um pequeno trecho da coluna de produção dos poços de petróleo, as dimensões geométricas, o tipo de fluido, as vazões e as rotações a serem utilizados no modelo deveriam ser tais que houvesse semelhança geométrica, cinemática e dinâmica entre o poço e o modelo.

As faixas de vazão, rotação e o tipo de fluido a serem utilizados no laboratório deveriam ser criteriosamente escolhidos de forma a abranger a maioria das condições atuais dos poços brasileiros que produzem e os poços candidatos a produzirem por BCP, considerando-se os novos modelos de BCP disponíveis no mercado.

De acordo com o teorema  $\Pi$  de Buckingham, para obter-se a similaridade geométrica, cinemática e dinâmica, entre o modelo e o protótipo, é necessário que um determinado número de grupos adimensionais que regem o escoamento sejam iguais, quando determinados pelo modelo e pelo protótipo.

### 3.1 ANÁLISE DIMENSIONAL

As grandezas envolvidas na determinação do diferencial de pressão entre dois pontos do anular compreendido entre o tubo e a haste são: o próprio diferencial de pressão ( $\Delta P$ ), o comprimento do trecho investigado ( $L$ ), o raio do tubo ( $a$ ), o raio da haste ( $b$ ), a excentricidade da haste ( $c$ ), a velocidade axial do fluido ( $v_z$ ), a rotação da haste ( $\Omega$ ), a massa específica do fluido ( $\rho$ ) e sua viscosidade ( $\mu$ ).

De acordo com o teorema PI de Buckingham, para obter-se a similaridade geométrica, cinemática e dinâmica, a quantidade de grupos adimensionais deve ser igual ao número total de variáveis, neste caso nove, menos o número de dimensões básicas do problema, que são três (massa, comprimento e tempo), portanto serão seis os grupos adimensionais que irão reger o escoamento em questão. Estes grupos podem ser obtidos, diretamente, a partir do teorema PI de Buckingham ou através de uma combinação dos grupos adimensionais que aparecem nas equações de conservação adimensionalizadas (EQ. 2.12. a 2.15). A vantagem de obter-se os grupos adimensionais a partir das equações diferenciais consiste no fato destes parâmetros possuírem um significado físico o que permite a identificação dos mecanismos governantes do escoamento [Rosa, 1995].

Os grupos adimensionais a serem utilizados dividem-se em três tipos, a saber:

Grupos adimensionais dinâmicos:

$$\frac{\Delta P}{\rho \bar{v}_z^2} = EU \quad (\text{Número de Euler}) \quad (3.1)$$

$$\frac{\Omega b(a-b)}{\nu} = Re_\Omega \quad (\text{Reynolds rotacional}) \quad (3.2)$$

Grupo adimensional cinemático:

$$\frac{\bar{v}_z}{\Omega b} = \Gamma \quad (\text{razão de velocidades}) \quad (3.3)$$

Grupos adimensionais geométricos:

$$\frac{c}{a-b} = \lambda \quad (\text{excentricidade relativa}) \quad (3.4)$$

$$\frac{L}{a} = L^* \quad (\text{razão comprimento/raio}) \quad (3.5)$$

$$\frac{b}{a} = b^* \quad (\text{razão entre raios}) \quad (3.6)$$

### 3.2 RELAÇÕES ENTRE GRANDEZAS DO MODELO E PROTÓTIPO

Ao igualar-se os grupos adimensionais do modelo e do protótipo, condição necessária para que haja similaridade, obtêm-se as EQ.3.7 a 3.12, onde as grandezas relacionadas ao modelo estão identificadas através do índice m, enquanto as do protótipo, por conveniência, não possuem índice. As três primeiras equações relacionam as dimensões geométricas do modelo e protótipo e estão definidas através de um fator de escala ( $F_E$ ). As equações seguintes relacionam as vazões (EQ.3.10), as rotações (EQ.3.11) e finalmente as pressões (EQ.3.12).

$$\frac{a_m}{a} = \frac{1}{F_E} \quad (3.7)$$

$$\frac{b_m}{b} = \frac{1}{F_E} \quad (3.8)$$

$$\frac{c_m}{c} = \frac{1}{F_E} \quad (3.9)$$

$$\frac{Q_m}{Q} = \frac{1}{F_E} \frac{\rho}{\rho_m} \frac{\mu_m}{\mu} \quad (3.10)$$

$$\frac{\Omega_m}{\Omega} = F_E^2 \frac{\rho}{\rho_m} \frac{\mu_m}{\mu} \quad (3.11)$$

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P} = F_E^2 \frac{\rho}{\rho_m} \left( \frac{\mu_m}{\mu} \right)^2 \quad (3.12)$$

As EQ 3.7 a 3.12, que permitem determinar as grandezas do modelo em função das do protótipo assegurando a similaridade, foram utilizadas no dimensionamento do modelo apresentado a seguir.

### 3.3 DIMENSIONAMENTO DO MODELO

O primeiro passo para o dimensionamento de um modelo, que simule as diversas situações de produção dos poços produtores de petróleo, foi fazer um levantamento das faixas de vazão, rotação e viscosidade de fluido que ocorrem nos campos de petróleo brasileiros. Os valores obtidos neste levantamento foram:

Faixa de vazão .....: 1 a 300 m<sup>3</sup>/d (limite da BCP)

Faixa de viscosidade .....: 1 a 4000 cP (abrange maioria dos poços)

Faixa de rotação.....: 100 a 400 rpm (valores mais utilizados)

Pela impossibilidade de simular as diferentes combinações de tubo/haste empregadas na produção dos poços equipados com BCP, escolheu-se a mais utilizada, que consiste de:

Diâmetro do tubo.....: 2 7/8" ≅ 62 mm

Diâmetro da haste.....: 7/8" ≅ 22,22 mm

Diâmetro da luva.....: 1 5/8" ≅ 41,3 mm



O valor da massa específica do óleo, para efeito de dimensionamento do modelo, foi considerada constante e igual a  $900 \text{ kg/m}^3$ .

Conhecidas as faixas de vazão, rotação e viscosidade do óleo do protótipo, para definir o modelo restava a escolha apropriada do tipo de fluido a ser utilizado no laboratório e o fator de escala.

A busca para valores do fator de escala compreendeu a faixa de 1 a 4, por resultar em dimensões do modelo compatíveis com os esforços de torção e pressão a que seriam submetidos. Para o fluido escolheu-se, além da água, óleos com viscosidade entre 10 e 500 cP. A partir destes valores, gerou-se para cada combinação possível dos pares: fator de escala e viscosidade do fluido, três tabelas contendo as faixas de vazão, rotação e diferencial de pressão do modelo correspondentes às faixas encontradas no campo.

De posse das diversas alternativas dos pares: fator de escala e viscosidade de fluido, escolheu-se o par  $\mu$  igual a 100 cP e  $F_E$  igual a 1,88, por ser de todas as opções aquela que permitiria a simulação de uma maior faixa das condições de campo, além de apresentar faixas de vazão, rotação e diferencial de pressão compatíveis com a instrumentação disponível.

As dimensões geométricas do modelo correspondentes ao fator de escala 1,88 são:

Diâmetro do tubo .....: 32,43 mm

Diâmetro da haste.....: 12,00 mm

Diâmetro da luva.....: 22,0 mm

Comprimento.....: 0,80 m

Utilizou-se, para fluido do modelo, o óleo conhecido comercialmente por OB-54, com características de fluido Newtoniano, de coloração amarela e viscosidade de 100 cP para temperatura de 26,4 °C e massa específica igual a 875 kg/m<sup>3</sup>.

Os valores das faixas de vazão e rotação do modelo, bem como, a previsão da faixa de pressão encontram-se nas TAB.3.1 a 3.3 e foram obtidos através das substituições das grandezas do protótipo nas EQ.3.14 a 3.16 apresentadas a seguir.

$$Q_m = 2279,6 \frac{Q}{\mu} \quad (3.14)$$

$$\Omega_m = 363,5 \frac{\Omega}{\mu} \quad (3.15)$$

$$\Delta P_m = 820,1 \frac{Q}{\mu} \quad (3.16)$$

Nas EQ.3.14 a 3.16 as unidades a serem utilizadas devem ser: vazão do protótipo (Q) em m<sup>3</sup>/dia, vazão do modelo (Q<sub>m</sub>) em l/h, viscosidade do protótipo (μ) em cP, rotação do modelo (Ω<sub>m</sub>) em rpm e o diferencial de pressão do modelo ΔP<sub>m</sub> em mmca.

**TABELA 3.1 - Valores das vazões do modelo em função das vazões e viscosidades do protótipo.**

		Vazões do Protótipo (m <sup>3</sup> /d)												
		10	25	30	40	50	75	100	125	150	175	200	250	300
(cP)		Vazões do Modelo (l/h)												
V	100	228	570	684	912	1140	1710	2280	2850	3419	3989	4559	5699	6839
i	200	114	285	342	456	570	855	1140	1425	1710	1995	2280	2850	3419
s	300	76	190	228	304	380	570	760	950	1140	1330	1520	1900	2280
c	400	57	142	171	228	285	427	570	712	855	997	1140	1425	1710
o	500	46	114	137	182	228	342	456	570	684	798	912	1140	1368
s	600	38	95	114	152	190	285	380	475	570	665	760	950	1140
i	700	33	81	98	130	163	244	326	407	488	570	651	814	977
d	800	28	71	85	114	142	214	285	356	427	499	570	712	855
a	900	25	63	76	101	127	190	253	317	380	443	507	633	760
d	1000	23	57	68	91	114	171	228	285	342	399	456	570	684
e	1500	15	38	46	61	76	114	152	190	228	266	304	380	456
	2000	11	28	34	46	57	85	114	142	171	199	228	285	342
P	2500	9	23	27	36	46	68	91	114	137	160	182	228	274
r	3000	8	19	23	30	38	57	76	95	114	133	152	190	228
o	4000	6	14	17	23	28	43	57	71	85	100	114	142	171
t														

Os valores das vazões destacados com sombra na TAB.3.1 superam a vazão máxima da bomba de 2150 l/h utilizada no laboratório, portanto, não serão investigados.

Para obter-se os valores de vazão do modelo na TAB.3.1, entra-se com o valor da viscosidade do fluido do protótipo na coluna 2, e com o valor da vazão do protótipo na linha 2. Exemplo: se quisermos simular no laboratório um poço equipado com coluna 2 7/8" e haste concêntrica de 7/8", que produza 50 m<sup>3</sup>/d de um óleo com viscosidade de 500 cP, teremos que ajustar a vazão do modelo para 228 l/h.

**TABELA 3.2 - Previsões dos diferenciais de pressão em função das vazões e viscosidades do protótipo ao longo de um trecho de 0,80 m do modelo.**

		Vazões do Protótipo(m <sup>3</sup> /d)												
		10	25	30	40	<b>50</b>	75	100	125	150	175	200	250	300
(cP)		Pressões do modelo(mmca)												
V	100	82	205	246	328	410	615	820	1025	1230	1435	1640	2050	2480
i	200	41	103	123	164	205	308	410	513	615	718	820	1025	1230
s	300	27	68	82	109	137	205	273	342	410	478	547	683	820
c	400	21	51	62	82	103	154	205	256	308	359	410	513	615
o	<b>500</b>	16	41	49	66	<b>82</b>	123	164	205	246	287	328	410	492
s	600	14	34	41	55	68	103	137	171	205	239	273	342	410
i	700	12	29	35	47	59	88	117	146	176	205	234	293	351
d	800	10	26	31	41	51	77	103	128	154	179	205	256	308
a	900	9	23	27	36	46	68	91	114	137	159	182	228	273
d	1000	8	21	25	33	41	62	82	103	123	144	164	205	246
e	1500	5	14	16	22	27	41	55	68	82	96	109	137	164
	2000	4	10	12	16	21	31	41	51	62	72	82	103	123
P	2500	3	8	10	13	16	25	33	41	49	57	66	82	98
r	3000	3	7	8	11	14	21	27	34	41	48	55	68	82
o	4000	2	5	6	8	10	15	21	26	31	36	41	51	62
t.														

Os valores destacados com sombra na tabela superam a vazão máxima de 2150 l/h da bomba utilizada no laboratório, portanto, não serão investigados (ver TAB. 3.1).

Para obter-se os valores do diferencial de pressão esperado para o modelo na TAB. 3.2, entra-se com o valor da viscosidade do fluido do protótipo na coluna 2, e com o valor da vazão do protótipo na linha 2. Exemplo: se quisermos simular no laboratório um poço equipado com coluna 2 7/8" e haste concêntrica de 7/8", que produza 50 m<sup>3</sup>/d de um óleo com viscosidade de 500 cP, teremos que ajustar a vazão do modelo para 228 l/h (TAB. 3.1), e o diferencial de pressão previsto para o modelo é de 82 mmca (TAB.3.2).

**TABELA 3.3 - Valores das rotações do modelo em função das rotações e viscosidades do protótipo.**

		Rotações do Protótipo (rpm)												
		100	125	150	175	200	225	250	275	<b>300</b>	325	350	375	400
(cP)		Rotações do Modelo (rpm)												
V	100	364	450	545	638	727	818	909	1000	1091	1181	1272	1363	1454
i	200	182	227	273	318	364	409	450	500	545	591	636	682	727
s	300	121	151	182	212	242	273	303	333	364	394	424	450	485
c	400	91	114	136	159	182	204	227	250	273	295	318	341	364
o	500	73	91	109	127	145	164	182	200	218	236	254	273	291
s	600	61	76	91	106	121	136	151	167	182	197	212	227	242
i	700	52	65	78	91	104	117	130	143	156	169	182	195	208
d	800	45	57	68	80	91	102	114	125	136	148	159	170	182
a	<b>900</b>	40	50	61	71	81	91	101	111	<b>121</b>	131	141	151	162
d	1000	36	45	55	64	73	82	91	100	109	118	127	136	145
e	1500	24	30	36	42	48	55	61	67	73	79	85	91	97
	2000	18	23	27	32	36	41	45	50	55	59	64	68	73
P	2500	15	18	22	25	29	33	36	40	44	47	51	55	58
r	3000	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
o	4000	9	11	14	16	18	20	23	25	27	30	32	34	36
t.														

Os valores destacados com sombra na tabela superam a rotação máxima da haste utilizada no laboratório, que foi de 450 rpm, portanto, não serão investigados.

Para obter-se os valores de rotação do modelo, entra-se com o valor da viscosidade do fluido do protótipo na coluna 2, e com o valor da rotação do protótipo na linha 2. Exemplo: se quisermos simular no laboratório um poço equipado com coluna 2 7/8" e haste concêntrica de 7/8", cuja rotação da haste seja de 300 rpm e o óleo produzido tenha viscosidade de 900 cP, teremos que ajustar a rotação do modelo para 121 rpm.

Resumindo-se, o aparato experimental tem as seguintes características:

Diâmetro do tubo: 32,4 mm

Diâmetro da haste : 12,0 mm

Distância entre sensores de pressão: 0,80 m

Faixa de vazão: 0 a 2150 l/h

Faixa de rotação: 0 a 450 rpm

Viscosidade: 100 cP a 26,4 °C

Massa específica do fluido: 875 kg/m<sup>3</sup>

O modelo com as características acima pode reproduzir, para um poço equipado com coluna de produção de 2 7/8" e coluna de haste de 7/8", as seguintes faixas de condições operacionais.

Faixa de vazão: 0 a 300 m<sup>3</sup>/dia

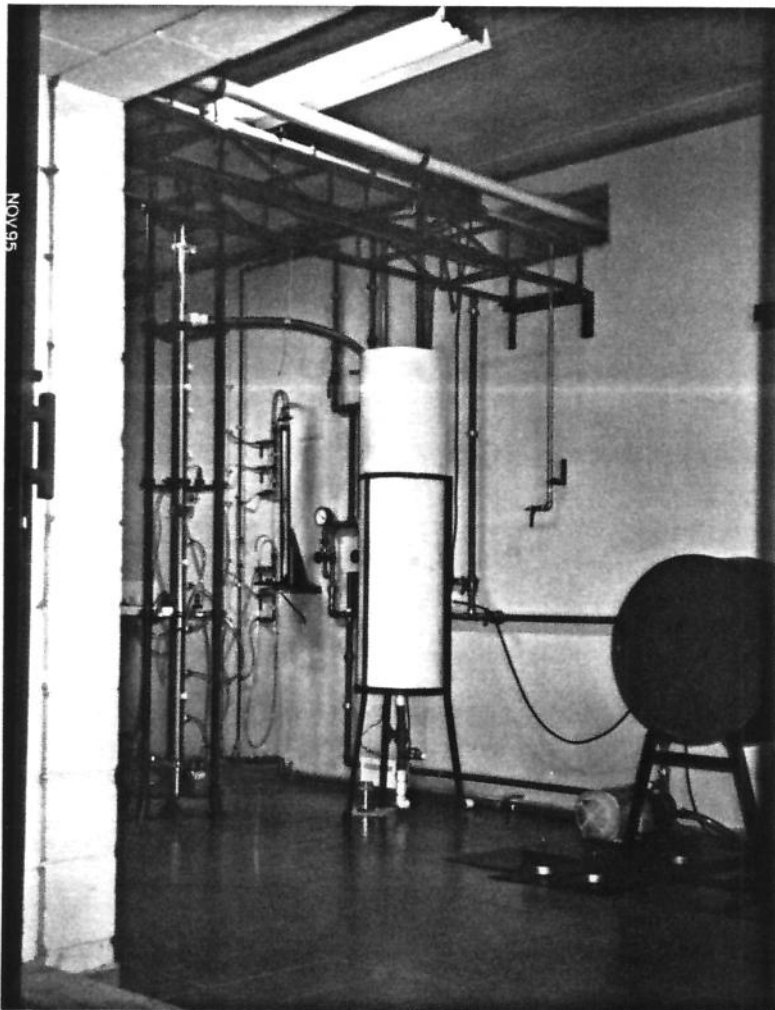
Faixa de viscosidade: 100 a 4000 cP

Faixa de rotação: 100 a 400 rpm

## 4 APARATO EXPERIMENTAL

O estudo experimental do diferencial de pressão ao longo do anular dos poços equipados com BCP foi feito a partir de um modelo em escala de 1:1,88 de um poço equipado com tubos de 2 7/8" e hastes de 7/8" interligadas por luvas "slim" de 1 5/8".

Para o tubo de produção utilizou-se um tubo de acrílico transparente com 2,20 m de comprimento e 32,4 mm de diâmetro, a haste foi feita em aço extrudado com 2,65 m de comprimento e 12 mm de diâmetro, tendo acoplado em sua extremidade superior um motor de 100 W, responsável por sua rotação. A FIG. 4.1 fornece uma visão geral do experimento que é apresentado de forma esquemática e mais rica em detalhes na FIG.4.2



**FIGURA 4.1 - Vista geral do aparato experimental.**

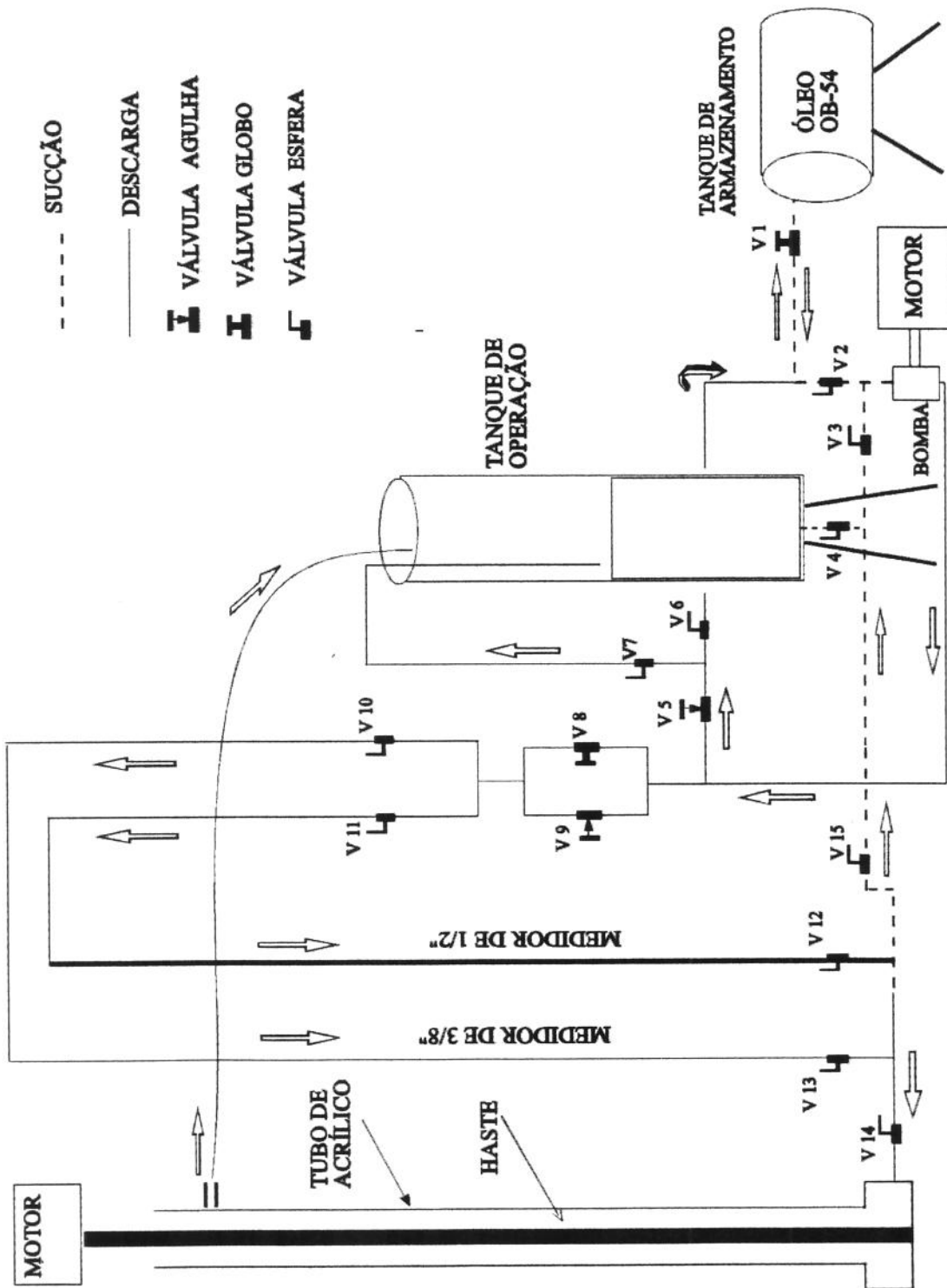


FIGURA 4.2 - Esquema geral do aparato experimental

FIGURA 4.2 - Esquema geral do aparato experimental.



A seguir serão descritos todos os componentes do sistema que aparecem na FIG.4.2.

- **Conjunto Moto-Bomba**

Composto por uma bomba de engrenagem Triglav modelo TG-04, com capacidade para bombear 36 l/min, acionada por um motor de 1,5 CV, adequado para pressões de até 110 psi .

- **Tanque de Armazenamento**

Constituído por um tambor com capacidade para 200 litros, foi posicionado na horizontal sobre um suporte à 0,60 m do piso.

Foi utilizado para receber o óleo do sistema, quando alguma manutenção ou até mesmo movimentação do tanque de operação era necessária. Foi utilizado como supridor de fluido durante a calibração do medidor de vazão.

- **Tanque de Operação**

Tanque cilíndrico fabricado em PVC com 0,40 m de diâmetro e 1,5 m de altura , posicionado na vertical à 0,60 m do piso. Utilizado durante as operações para alimentar a bomba e receber o retorno do óleo proveniente do ajuste de vazão e o óleo da saída do tubo.

- **Tubo**

Formado pela união de dois segmentos de tubo de acrílico transparente de 1,1 m cada, tem diâmetro externo de 41 mm e diâmetro interno de  $32,4 \text{ mm} \pm 0,6 \text{ mm}$ . Os dois segmentos de tubo foram posicionados na vertical e interligados por meio de um flange contendo quatro parafusos de fixação e um anel de vedação (FIG.4.7). A saída do fluxo encontra-se à 0,30 m da extremidade superior. A partir da extremidade inferior do tubo foram instaladas 9 tomadas de pressão igualmente espaçadas de 0,20 m (FIG.4.3).

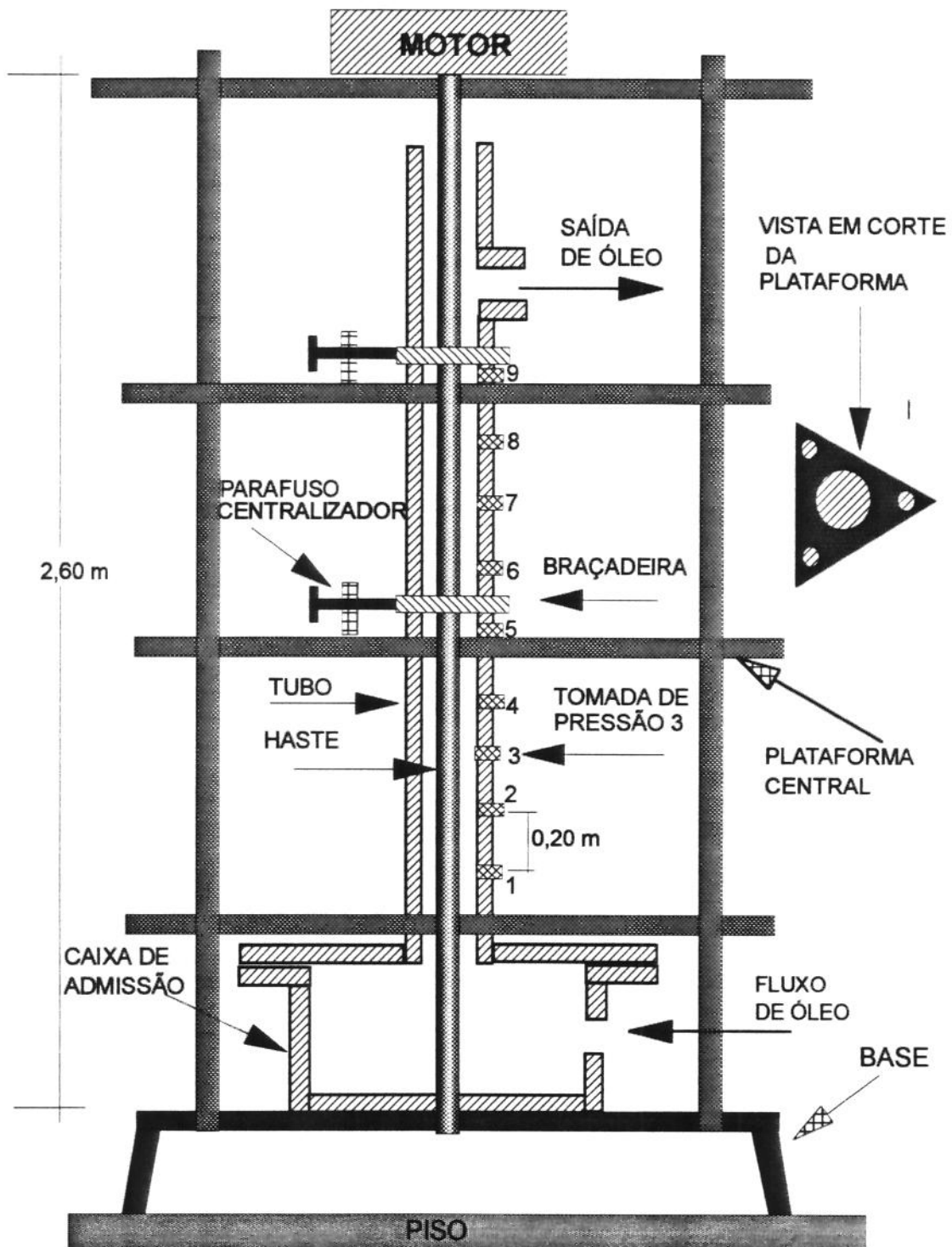


FIGURA 4.3 - Vista em corte da torre e dos componentes do modelo do poço.

A extremidade inferior do tubo é fixada, por intermédio de um flange com oito parafusos, à caixa de admissão. A furação do flange foi feita de maneira a permitir a movimentação lateral do tubo e com isto possibilitar o posicionamento concêntrico ou excêntrico da haste em relação ao tubo. Este tubo representa numa escala de 1:1,88 o tubo de produção de um poço equipado com coluna 2 7/8" (62 mm).

- **Caixa de Admissão**

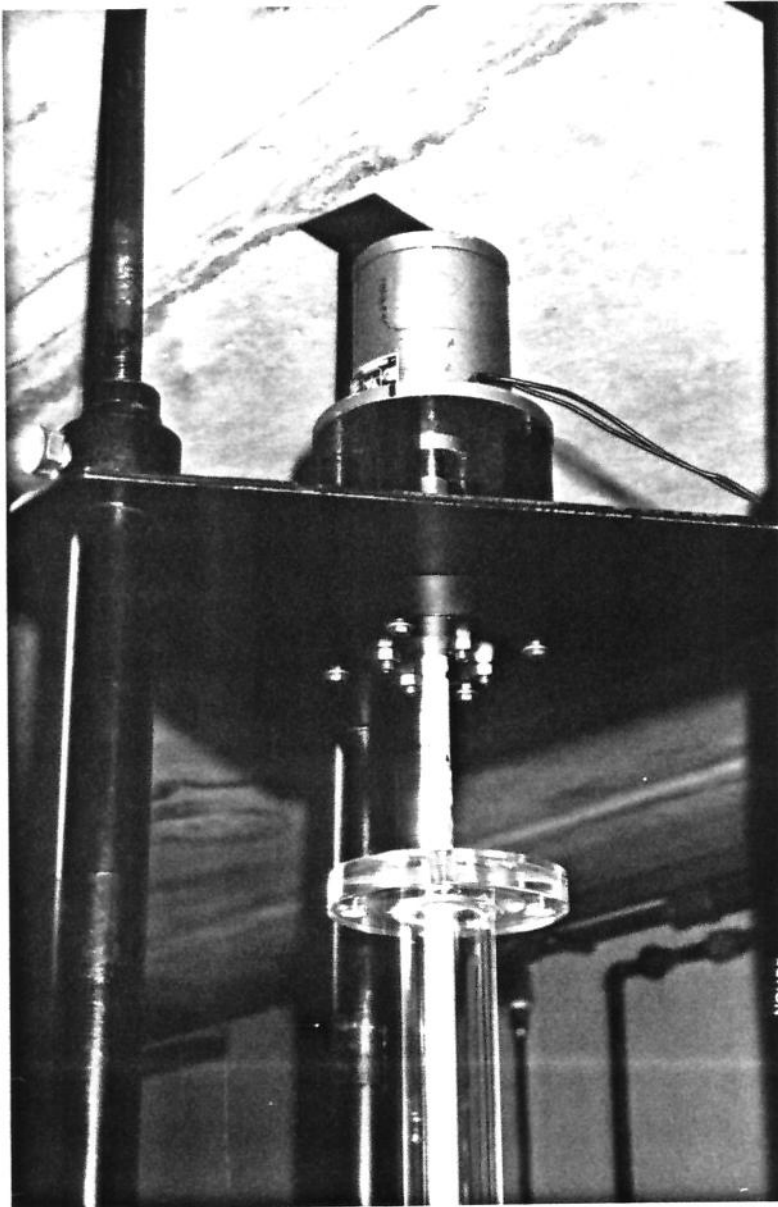
É constituída por um segmento de tubo de acrílico transparente com 0,15 m de diâmetro por 0,10 m de altura.

Tem a função de receber o fluido proveniente do tanque de operação e distribuí-lo uniformemente, reduzindo-se, assim, o comprimento necessário ao desenvolvimento do escoamento no anular tubo/ haste (FIG. 4.3).

- **Motor da Haste**

Trata-se de um motor de corrente contínua de 100 W, localizado no topo da torre, cuja função é promover rotação à haste (FIG.4.4). Sua interligação à haste foi feita por meio de um acoplamento elástico.

O controle de sua rotação é obtido através de um variador de velocidade, localizado, estrategicamente, ao lado das válvulas de controle de vazão. A rotação máxima possível é de 4000 rpm, porém foi regulada para o valor máximo de 600 rpm, que cobre toda a faixa de rotação utilizada.



**FIGURA 4.4 - Vista da parte superior da torre: plataforma superior da torre, um dos três parafusos de fixação da torre ao teto, o motor da haste, a própria haste, os parafusos utilizados no tracionamento da haste e a extremidade superior do tubo.**

- **Haste**

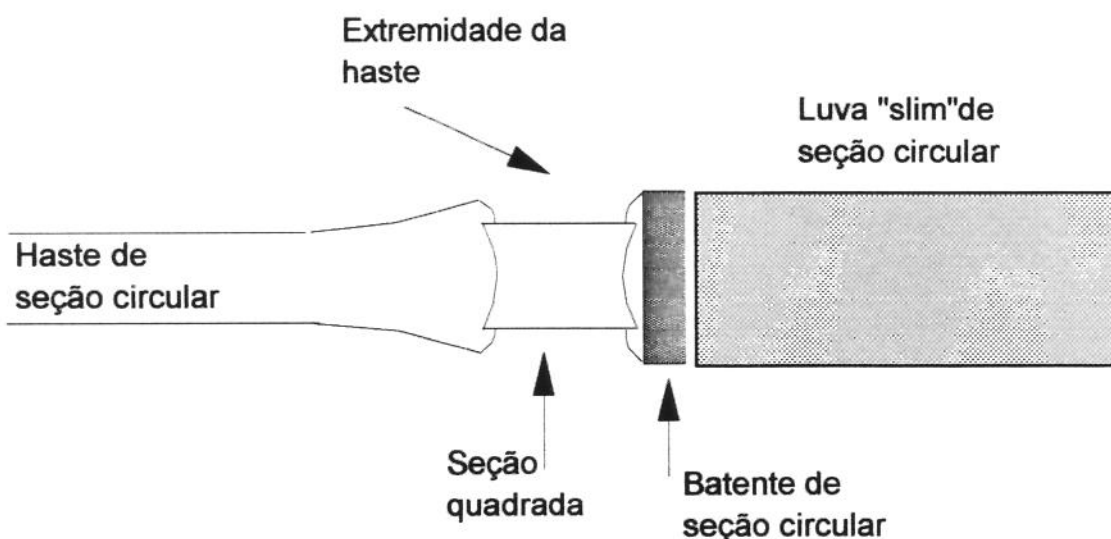
Haste de aço extrudado com 2,65 m de comprimento por 12 mm de diâmetro, pintada na cor branca. Fica localizada no interior do tubo, podendo ocupar diferentes

posições através da mudança de posição do tubo, pois a haste não apresenta movimento lateral. Possui dois rolamentos, um em cada extremidade, que permitem sua rotação. Pode ser tracionada por meio de quatro parafusos que promovem a movimentação longitudinal do rolamento superior em relação à plataforma superior da torre (FIG. 4.4).

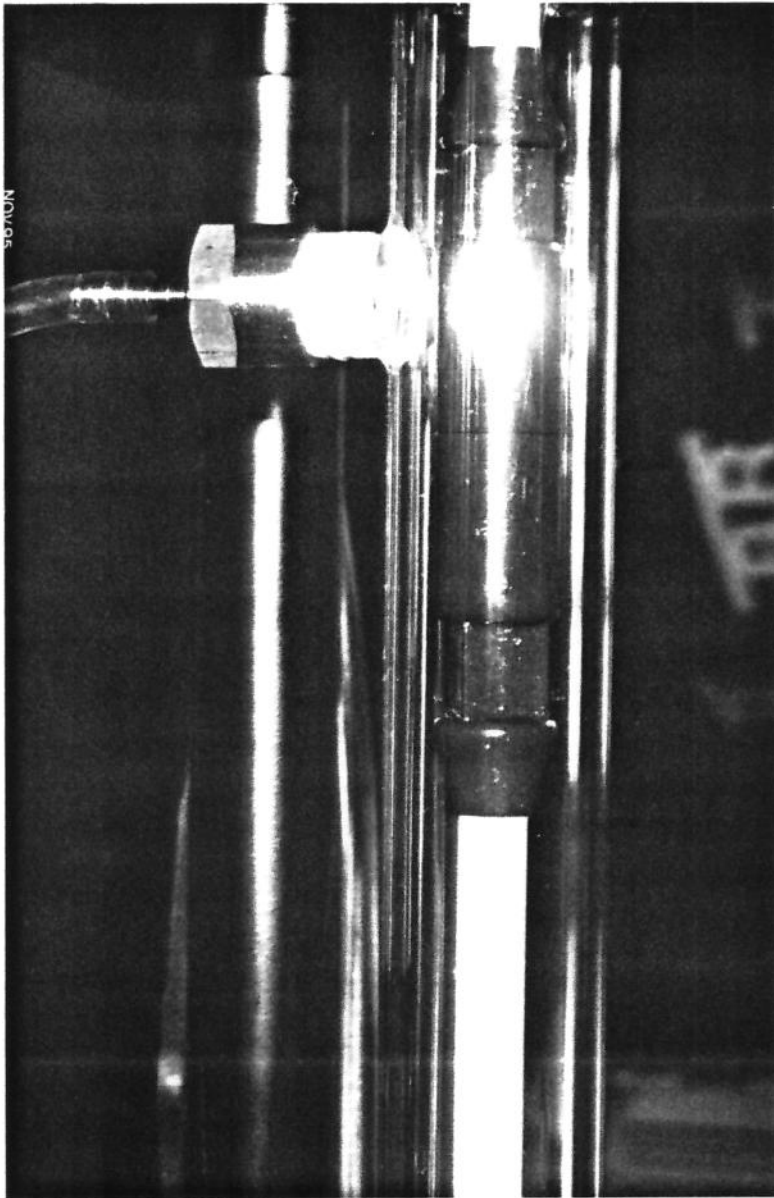
Representa numa escala de 1:1,88 a haste de 7/8" utilizada nos poços de petróleo equipados com BCP (FIG.4.3 e 4.4).

- **Luva e extremidades da haste**

Utilizou-se uma única peça em aço para representar a luva, que é um cilindro regular, e as extremidades da haste, que possuem geometria complexa (FIG.4.5 e 4.6). A peça utilizada é vazada o que elimina a necessidade da utilização de dois segmentos de haste, como ocorre no poço, assim a peça pode correr ao longo da haste e sua fixação é feita por meio de dois pequenos parafusos. Representa numa escala de 1:1,88 a luva "slim" de 1 5/8" e as extremidades da haste de 7/8".



**FIGURA 4.5 - Esquema da luva e da extremidade da haste.**



**FIGURA 4.6 - Vista lateral do tubo: luva na posição concêntrica no interior do tubo e uma das nove tomadas de pressão.**

- **Linhas**

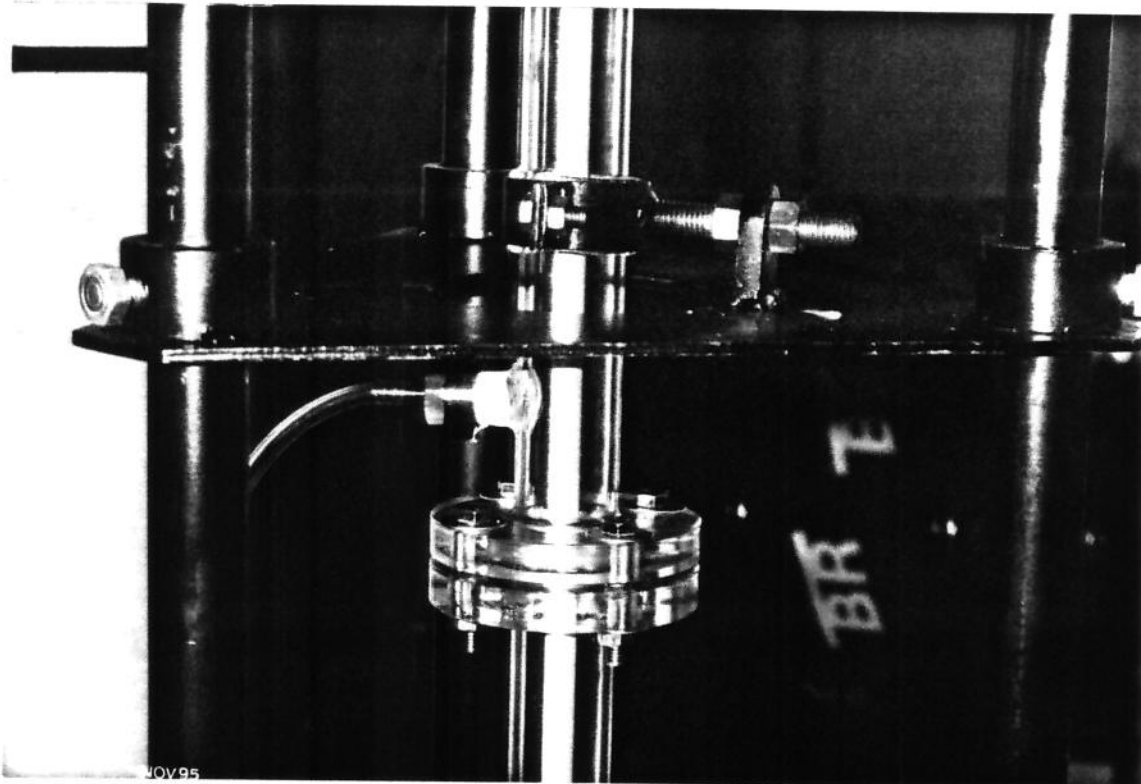
Utilizou-se na maioria do sistema linhas de PVC soldável com diâmetro de 1" (25,4 mm), porém as interligações do tanque, da bomba e da torre ao sistema foram feitas com mangueiras transparentes, o que além de dar uma certa flexibilidade na disposição dos equipamentos, permitiu, o mais importante, a visualização do fluxo.

- **Válvulas**

Para as válvulas que trabalhariam totalmente abertas ou fechadas, foram utilizadas válvulas do tipo esfera, para as válvulas de controle empregou-se válvulas do tipo globo e para aquelas destinadas a ajustes finos optou-se pelas válvulas do tipo agulha.

- **Torre**

Feita em aço é o elemento de sustentação do modelo (tubo, haste e motor). É composta, basicamente, por três tubos de aço com de 3,0 m de comprimento e 1" (25,4 mm) de diâmetro e quatro plataformas triangulares distribuídas ao longo de seu comprimento, responsáveis pela amarração dos três tubos (FIG.4.3 e 4.7). Sobre estas plataformas estão localizados os parafusos centralizadores que permitem a movimentação lateral do tubo de acrílico (FIG. 4.7). A fixação da torre é feita no teto, por meio de três parafusos sem fim (FIG.4.4).



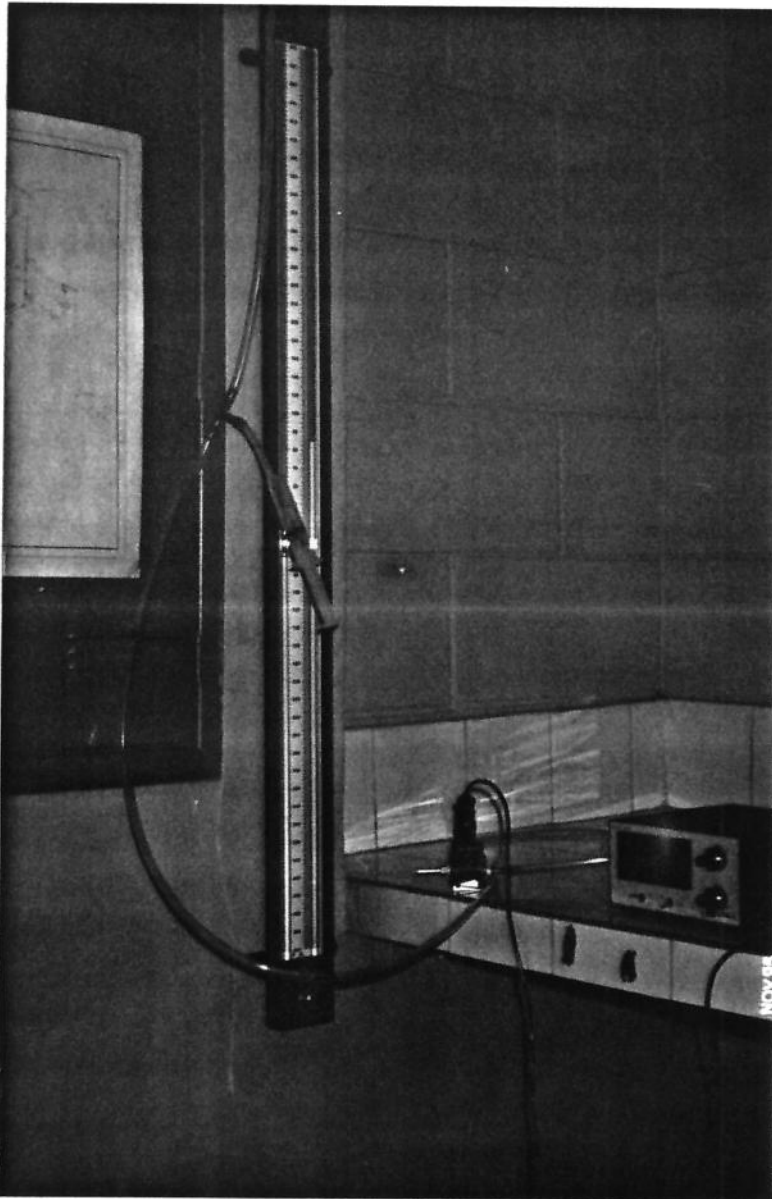
**FIGURA 4.7 - Vista do parafuso centralizador sobre a plataforma central da torre.**

## 4.1 MEDIDORES

### 4.1.1 Medidor de Pressão

Para medição do diferencial de pressão foi utilizado um Transdutor Indicador Digital Modelo CD23 fabricado pela Validyne Engineering Corporation.

O equipamento é composto basicamente pelo CD23 (caixa de processamento e indicação da pressão) e o transdutor (sensor de pressão). Ver FIG.4.8.



**FIGURA 4.8 - Calibração do transdutor de pressão: O CD23 e o transdutor de pressão.**



O transdutor possui em seu interior um diafragma, que é, na realidade, o sensor de pressão. Cada diafragma possui uma faixa característica de pressão na qual espera-se que responda de forma linear ao diferencial de pressão. Neste trabalho utilizou-se os diafragmas de números 20, 22, 26, 28 e 30. No APÊNDICE-A encontram-se suas faixas de trabalho, o procedimento de calibração e a verificação da faixa de pressão onde respondem, linearmente, ao diferencial de pressão aplicado.

O transdutor possui dois pontos para recebimento de pressão, um positivo, que deve ser interligado à tomada de pressão submetida à maior pressão, e outro negativo, que deve ser interligado à de menor pressão.

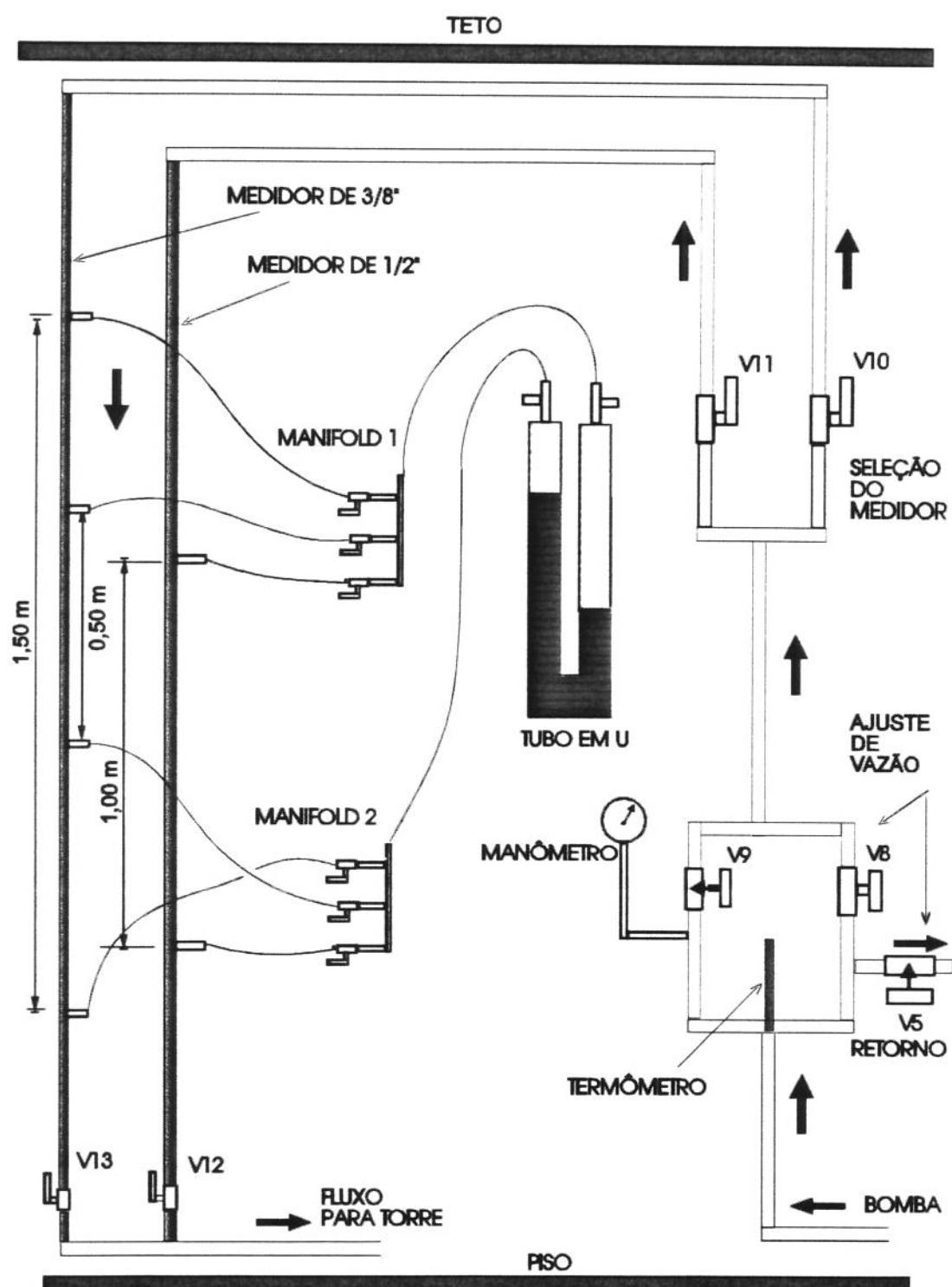
As interligações dos transdutores às tomadas de pressão foram feitas através de mangueiras transparentes de 5/8" de diâmetro, o que permitiu a detecção de bolhas de ar, que comprometeriam as medições caso não fossem eliminadas.

#### **4.1 .2 Medidor de Vazão**

O medidor de vazão utilizado é do tipo resistência linear, que se baseia no fato do diferencial de pressão, entre dois pontos de uma tubulação, variar linearmente com a vazão, quando submetida a um escoamento permanente, laminar e desenvolvido, para um fluido Newtoniano e incompressível [Dally et al, 1993].

Foram utilizados dois tubos de cobre de aproximadamente 3,0 m de comprimento, posicionados na vertical, para onde o fluxo era direcionado antes de ir para a torre. Na medição do diferencial de pressão utilizou-se um tubo em "U" de 25 polegadas com mercúrio. O esquema do medidor é apresentado na FIG.4.9.

A faixa de vazão utilizada no modelo compreende o intervalo de 0 a 2000 kg/h. Para ter-se um medidor de vazão com uma incerteza menor do que 3 %, dividiu-se



**FIGURA 4.9 - Esquema do medidor de vazão, posicionamento do manômetro e do termômetro.**

esta faixa de vazão em três, uma para cada medidor, o que forneceu leituras de altura de mercúrio maiores e mais espaçadas.

Para a faixa de menores vazões (0 a 150 kg/h) foi utilizado um tubo com diâmetro de 3/8" e 1,50 m de distância entre os sensores de pressão. Na medição das vazões intermediárias (150 a 500 kg/h) utilizou-se este mesmo tubo, porém com uma distância entre os sensores de pressão de 0,50 m e, finalmente, na medição da faixa de vazão mais elevada (500 a 2000 kg/h) utilizou-se um tubo de 1/2" de diâmetro e 1,0 m para distância entre os sensores de pressão.

Na interligação dos tubos de medição com o tubo em "U" utilizou-se mangueiras transparentes de 5/8", a fim de detectar-se a presença indesejável de bolhas de ar.

O dimensionamento do medidor de vazão e sua calibração encontram-se no APÊNDICE-A.

#### **4.1 .3 Medidor de Rotação**

A medição da rotação foi realizada por meio de um tacômetro óptico digital. Inicialmente, tentou-se medir a rotação da haste através da parede do tubo de acrílico, porém os resultados não foram satisfatórios. Então, mudou-se o ponto de medição para o espaço acima da extremidade superior do tubo, onde tem-se acesso direto à haste.

Com as primeiras medidas observou-se que a rotação não precisaria ser feita a cada 50 rpm, como previsto inicialmente, pois a influência deste acréscimo de rotação não provocava mudança significativa no diferencial de pressão. Assim, foram realizadas medições do diferencial de pressão para a haste fixa e com rotações de 250 e 450 rpm.

Devido à dificuldade de acesso à extremidade superior do tubo, as medições de rotação passaram a ser feitas diretamente no variador de velocidade. Para isto foi

necessário melhorar a definição do fundo de escala do variador de velocidade e substituir o botão indicador de rotação, além da instalação de um estabilizador de voltagem.

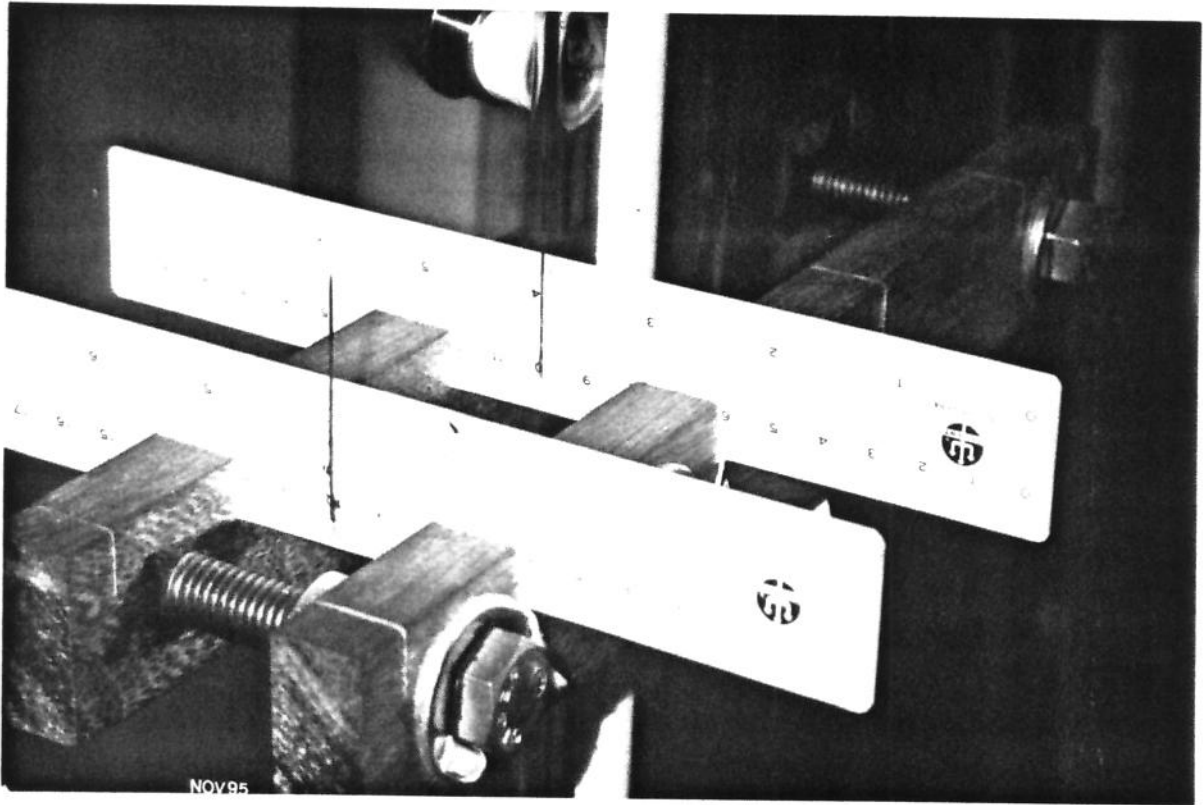
Feitas as modificações, calibrou-se o fundo de escala do variador de velocidade a partir de medições realizadas com o medidor óptico. Esta calibração foi refeita no início de cada sessão de teste.

Para validar as medições realizadas com o tacômetro óptico, foram realizadas comparações com leituras de contato, elaboradas com o próprio tacômetro e medições obtidas a partir de um medidor estroboscópico.

#### **4.1 .4 Medidor de Excentricidade**

Para medição da excentricidade utilizou-se um micrômetro e um centralizador. O centralizador, consiste de duas peças de madeira com 30 x 6 x 2 cm. Estas peças foram posicionadas paralelamente, uma de cada lado do tubo (FIG. 4.10). Na parte superior das peças de madeira, foram feitos dois sulcos afastados de 7 cm, onde foram fixadas duas réguas graduadas. Na parte central destas réguas, foram fixadas agulhas rígidas que serviram de mira. O posicionamento do tubo era feito de tal modo que o alinhamento das agulhas coincidissem com o centro da haste.

O centralizador foi utilizado apenas para o posicionamento do tubo de forma que a haste ocupasse sua posição central.



**FIGURA 4.10 - Centralizador instalado no tubo.**

## **4.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DO FLUIDO**

Utilizou-se, para simular as condições do escoamento de um poço produtor de petróleo, o óleo, conhecido comercialmente por OB-54, com características de fluido Newtoniano, de coloração amarela e viscosidade de 100 cP a 26,4 °C.

### **4.2 .1 Massa Específica**

Para determinação da massa específica, fez-se uso de uma balança analítica com 0,1 mg de precisão e uma proveta de 500 ml com 0,5 ml de precisão. Empregou-se uma amostra de óleo de 500 ml, correspondente a uma massa de 437,8 g, o que resulta no valor de 0,875 g/ml para a massa específica.

Além da determinação feita em laboratório, instalou-se na sala do aparato experimental um tubo em “U” de aproximadamente dois metros de altura, onde, em uma das hastes, colocou-se água e na outra o óleo OB-54. Pôde-se, durante o período de testes, comprovar o valor obtido em laboratório e constatar que a massa específica do óleo OB-54, para a precisão dos equipamentos utilizados, pode ser considerada constante, para a faixa de temperatura de trabalho (23 a 33 °C).

Os valores de altura de óleo e água do tubo em “U” apresentaram, quase que invariavelmente, os valores 1,609 m e 1,414 m respectivamente, o que corresponde ao valor de 0,879 g/ml para a massa específica. Uma diferença de apenas 0,5% em relação ao valor obtido em laboratório.

#### 4.2 .2 Viscosidade

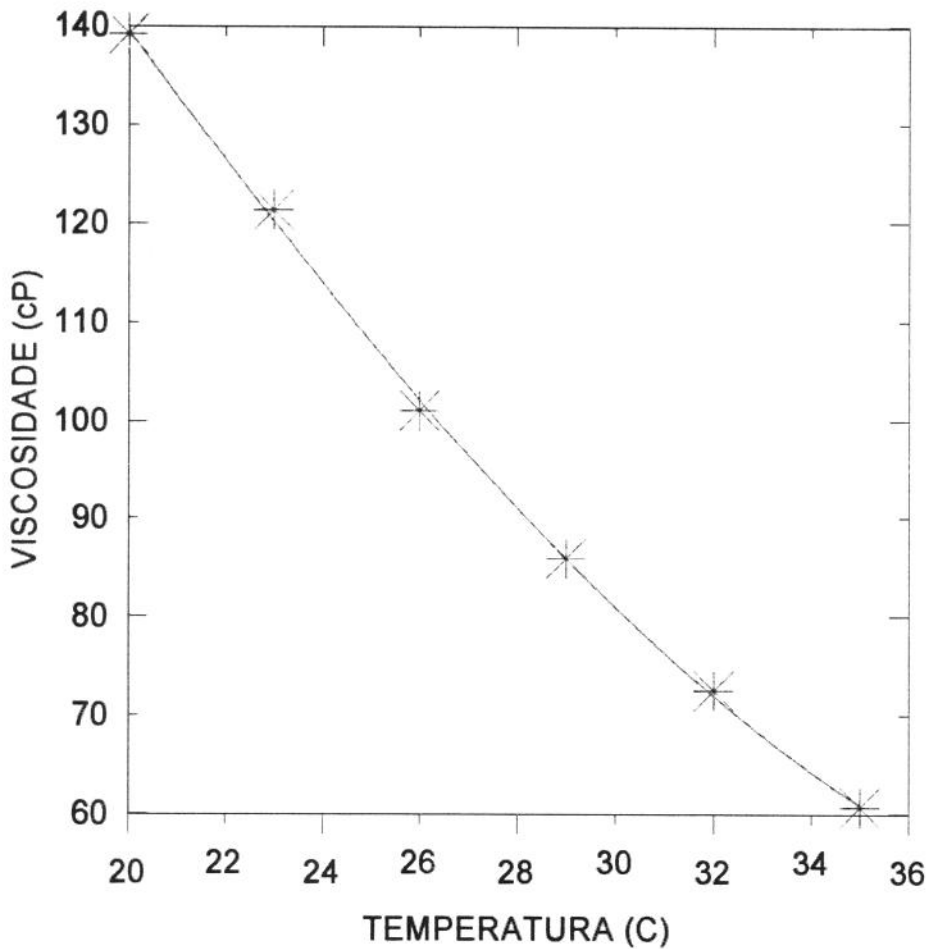
Determinou-se, através de um viscosímetro rotativo (Haake CV20), os valores da viscosidade do óleo OB-54 nas temperaturas de 20, 23, 26, 29, 32 e 35°C (TAB.4.1). No GRAF.4.1 que apresenta na abscissa os valores da temperatura em graus Celsius (°C) e na ordenada a viscosidade em centipoise (cP), estão plotados os valores obtidos para as viscosidades nas temperaturas mencionadas e um ajuste dos pontos medidos, dado por:

$$\mu = 0,3260 \cdot 10^{-2} T^3 - 0,1535 T^2 - 4,3732 T + 262,433 \quad (4.1)$$

onde ( $\mu$ ) é a viscosidade em cP e (T) é a temperatura em °C

**TABELA 4.1 - Valores da viscosidade do óleo OB-54 em função da temperatura.**

Temperatura (°C)	20	23	26	29	32	35
Viscosidade (cP)	139,3	121,4	101,1	86,0	72,6	60,8
Fluido Newtoniano	sim	sim	sim	sim	sim	sim



**GRÁFICO 4.1- Viscosidade do óleo OB-54 em função da temperatura.**

### **4.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS**

#### **4.3 .1 Procedimento para Tracionar a Haste**

Na fase inicial da coleta de dados verificou-se que a partir da rotação de 300 rpm a haste vibrava. Este problema foi amenizado ao tracionar-se a haste.

Para possibilitar o tracionamento da haste foram feitas as seguintes adaptações: na parte superior da haste instalou-se um pino transversal que impede a movimentação

longitudinal do rolamento superior e conseqüentemente de seu alojamento. Na extremidade inferior da haste adaptou-se um parafuso com a mesma finalidade.

As etapas do procedimento para tracionamento da haste são:

- Com a torre na horizontal posiciona-se a haste no interior do tubo
- Fixa-se a extremidade inferior da haste através de um parafuso com arruela. Esta, por ter um diâmetro maior do que o orifício do rolamento, impede o movimento longitudinal da haste.
- Ergue-se o alojamento do rolamento superior através de quatro parafusos tracionadores, que se apoiam na plataforma superior da torre. A haste é tracionada à medida em que se apertam os parafusos tracionadores. O alojamento superior do rolamento e os parafusos tracionadores podem ser vistos na FIG.4.4.

#### **4.3 .2 Posicionamento da Haste Concêntrica**

É obtido movimentando-se unicamente o tubo, pois a haste não possui movimento lateral.

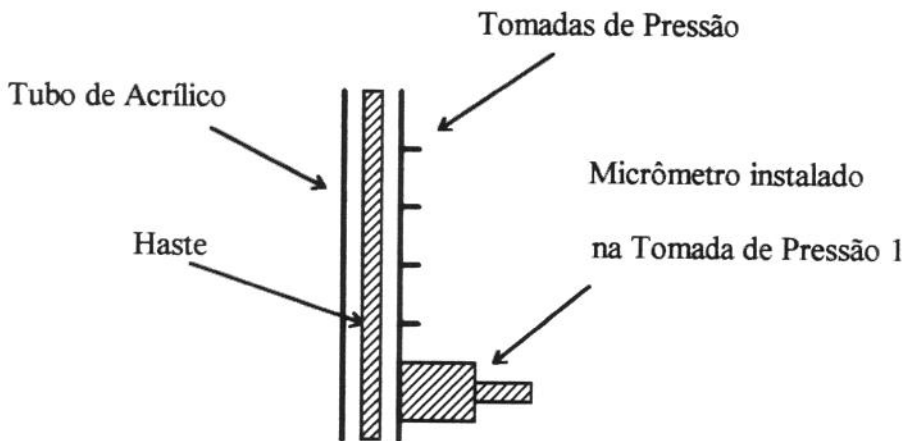
O tubo é fixado à torre em três pontos, um na base, através de oito parafusos que o fixam a caixa de admissão, outro no meio do tubo, onde é interligado à plataforma central da torre, e o terceiro ponto na penúltima plataforma. A interligação do tubo a uma determinada plataforma é obtida por intermédio de uma braçadeira que envolve o tubo e interliga-se à plataforma por meio de um parafuso centralizador (FIG. 4.3 e 4.7).

As etapas deste procedimento são:

- Para o início desta operação o tubo e a haste devem estar na vertical e a torre devidamente fixada ao teto.
- Traciona-se ligeiramente a haste.

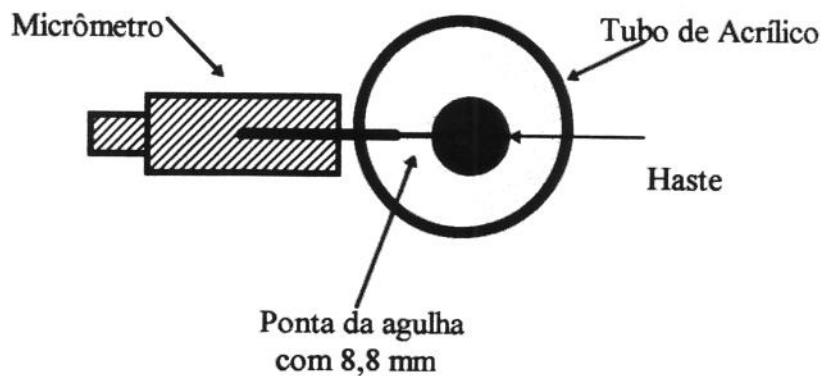


- Liga-se o motor da haste e através do controlador de velocidade aumenta-se gradualmente sua rotação. Caso consiga-se atingir a rotação de 450 rpm sem que, no trecho compreendido entre as tomadas 1 e 5, ocorra vibração da haste, prossegue-se a operação. Caso contrário, aumenta-se a tração na haste.
- Afrouxam-se todos os parafusos do flange inferior do tubo.
- Instala-se o micrômetro na tomada de pressão 1 (FIG.4.11). A leitura do micrômetro deve corresponder àquela que se tem quando a haste está absolutamente no centro.



**FIGURA 4.11 - Vista lateral do tubo durante seu posicionamento.**

- Move-se o tubo até que a haste toque na ponta da agulha adaptada na extremidade do micrômetro (FIG. 4.12).

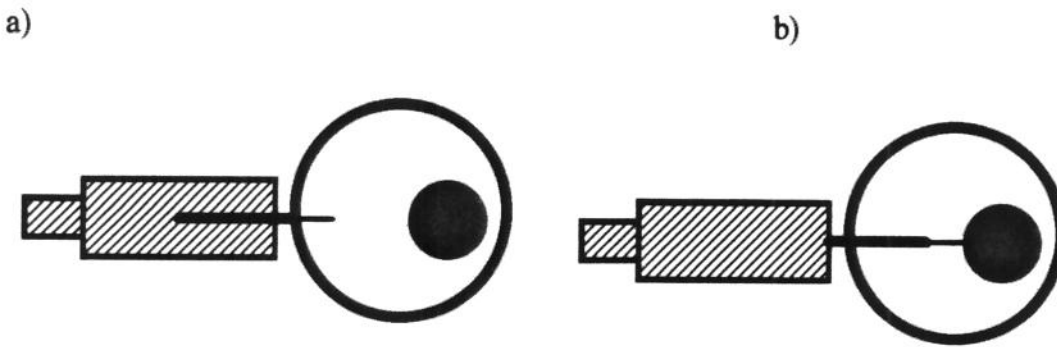


**FIGURA 4.12 - Vista em corte do posicionamento do tubo para o arranjo concêntrico.**

- Instala-se o centralizador logo abaixo da tomada 1 e defasado de 90 graus em relação ao micrômetro. Move-se o tubo de tal forma que o centro da haste coincida com o alinhamento das duas miras do centralizador.
- Inicia-se o aperto dos oito parafusos da base do tubo de forma cruzada. O aperto de cada parafuso é acompanhado da leitura do micrômetro e do centralizador. No final desta operação, confere-se a centralização da haste para diferentes posições da seção. Caso confirme-se a concentricidade da haste prossegue-se a operação.
- Centraliza-se a haste no topo do tubo, onde tem-se acesso a parte interna do tubo (FIG.4.4) e pode-se medir diretamente o anular haste/tubo por meio de um paquímetro.
- Instalam-se o micrômetro e o centralizador logo acima da plataforma central da torre, abaixo da tomada 6.
- Ajusta-se a posição do tubo através do parafuso centralizador. Faz-se a verificação para várias direções.
- Verifica-se a concentricidade da haste no espaço compreendido entre a base do tubo e a tomada de pressão 6. Caso esteja concêntrica, passa-se para o terceiro ponto de fixação da haste localizado na penúltima plataforma, onde utiliza-se o mesmo procedimento para centralizar a haste adotado na plataforma central.
- Verifica-se a centralização na extremidade do tubo, onde a medição é direta, e ao longo do trecho de maior interesse, compreendido entre as tomadas de pressão 1 e 5.

#### **4.3.3 Procedimento para Determinação da Excentricidade**

- Faz-se a leitura do micrômetro quando apenas a ponta da agulha tenha atravessado a parede do tubo (FIG. 4.13-a). Exemplo: 0,961”



**FIGURA 4.13 - Vista em corte do posicionamento do tubo para o arranjo excêntrico.**

- Lê-se novamente o micrômetro quando a agulha atingir a haste (FIG. 4.13-b).

Exemplo: 0,693"

- A distância haste x tubo (anular maior) é obtida pela diferença destas duas medidas acrescidas do comprimento da ponta da agulha.

$$\text{Anular Maior} = 25,4(0,961 - 0,693) + 8,8 = 15,6 \text{ mm}$$

- Determinação do anular tubo x haste para a condição de haste concêntrica.

$$\text{Anular concêntrico} = \text{raio do tubo} - \text{raio da haste}$$

$$\text{Anular concêntrico} = 33,2 / 2 - 12,0 / 2 = 10,6 \text{ mm}$$

- Excentricidade = anular maior - anular concêntrico

$$\text{Excentricidade} = 15,6 - 10,6 = 5,0 \text{ mm}$$

- Dá-se um giro de 90 graus na haste e determina-se novamente a excentricidade.

Repetindo-se este procedimento obtêm-se as excentricidades da haste a 0, 90, 180 e 270 graus, denominadas de posições I, II, III e IV respectivamente. A excentricidade é obtida pela média das quatro medições.

Para a determinação da excentricidade ao longo de um certo trecho da tubulação, faz-se a média entre as diversas excentricidades das tomadas de pressão que se encontrarem neste espaço.

Os dados referentes às medições de excentricidade para haste sem luva e com luva encontram-se no APÊNDICE-B.

#### **4.3.4 Ajuste de Vazão**

- Escolhe-se o medidor de vazão através das válvulas V10 e V11 e dos “manifolds” 1 e 2 (FIG.4.9).
- Liga-se a bomba e direciona-se o fluxo para a linha de retorno, através da abertura da válvula V5 e fechamento das válvulas V8 e V9 (FIG. 4.9).

Durante o ajuste de vazão foram tomados os seguintes cuidados para manter a integridade do sistema e evitar riscos de danos pessoais: ao acionar a bomba deve-se observar o manômetro, pois se uma das diversas possibilidades de arranjo das válvulas V3, V4, V5, V6, V7, V8, V9, V10, V11, V12, V13, V14, V15, estiver bloqueando o fluxo a pressão subirá rapidamente. Neste caso a bomba deve ser desligada imediatamente, pois, sendo a bomba de deslocamento positivo a pressão no sistema certamente ultrapassaria, em um curto espaço de tempo, a pressão máxima de trabalho. Uma outra precaução a ser tomada é manter-se atento à altura de mercúrio. Caso a vazão provoque um diferencial de pressão superior a altura total da coluna de mercúrio, este será misturado ao sistema. Este risco é maior quando se está utilizando o medidor de diâmetro 3/8” e comprimento de 1,50 m.

#### **4.3.5 Determinação do Diferencial de Pressão no Anular**

Foi investigado o diferencial de pressão no espaço anular compreendido entre o tubo e a haste para as seguintes situações: haste sem luva, fixa e com rotação, concêntrica e excêntrica e para haste com luva nas mesmas condições. As faixas de vazão e rotação investigadas foram, respectivamente, 0 a 2000 kg/h e 0 a 450 rpm.

O trecho do tubo escolhido para investigação do diferencial de pressão está compreendido entre as tomadas de pressão 1 e 5, onde observou-se um melhor comportamento no movimento de rotação da haste. A irregularidade do movimento da haste, principalmente, no trecho superior foi atribuída a um ligeiro empeno da haste.

As sessões de testes são constituídas basicamente de:

- Com a torre na posição horizontal, instala-se a haste com ou sem luva, conforme for o caso a ser investigado, no interior do tubo e providencia-se sua fixação à base da torre.
- Encaixa-se a plataforma superior da torre e sobre esta fixa-se o motor da haste.
- Levanta-se a torre.
- Acopla-se o motor à haste.
- Traciona-se a haste.
- Faz-se o posicionamento da haste e tubo na vertical através da escolha adequada de calços que são instalados sob as três sapatas da torre. Para orientação em relação à vertical instalaram-se três fios de prumo defasados de  $120^\circ$ .
- Fixa-se a torre ao teto.
- Verifica-se a verticalização da haste, que pode ter sido alterada no momento da fixação da torre ao teto.
- Verifica-se o posicionamento do tubo em relação à vertical.
- Posiciona-se o tubo de forma a ter-se um arranjo concêntrico ou excêntrico.
- Seleciona-se o medidor de vazão a ser utilizado.

- Instala-se um transdutor de pressão sobre a plataforma central e faz-se sua interligação do lado positivo à tomada 1 e do lado negativo à tomada 5. O transdutor deve estar equipado com um diafragma compatível ao diferencial de pressão esperado.
- Liga-se a bomba com o fluxo de óleo, inicialmente, alinhado para o tanque de operação.
- Ajusta-se a vazão.
- Verifica-se, através do tubo transparente, se há a ocorrência, indesejável, de bolhas de ar no óleo.
- Faz-se a leitura do indicador de pressão no visor do CD23.
- Aciona-se o motor da haste e ajusta-se sua rotação através do variador de velocidade.
- Ajusta-se a rotação para os valores desejados e anotam-se os diferenciais de pressão correspondentes.
- Muda-se o valor da vazão e repete-se o procedimento.

#### **4.3 .6 Gradiente de Pressão**

A determinação do gradiente de pressão fez-se necessária para a verificação da influência das condições de entrada. Para um escoamento desenvolvido o gradiente de pressão é linear.

Para sua determinação, escolheu-se, tanto para a vazão como para a rotação, valores máximos, pois, confirmado o desenvolvimento do escoamento para este caso, o resultado poderia ser generalizado.

O trecho do tubo escolhido para a determinação do gradiente de pressão inicia-se na tomada de pressão 01 e estende-se até a tomada 05.

Procedimento adotado para a determinação do gradiente de pressão:

- Instalam-se quatro transdutores de pressão com os diafragmas 22, 26, 28 e 30 sobre a plataforma central da torre.
- Interligam-se os quatro transdutores pelo lado positivo à tomada de pressão 01, e pelo negativo, distintamente, às tomadas 2, 3, 4 e 5 são interligados os transdutores 22, 26, 28 e 30 respectivamente.
- Liga-se a bomba com o fluxo de óleo, inicialmente, alinhado para a linha de retorno.
- Ajusta-se a vazão.
- Verifica-se através do tubo transparente se há a presença indesejável de bolhas de ar.
- Registram-se os valores das pressões indicadas nos quatros visores dos CD23's, correspondentes a haste fixa.
- Liga-se o motor da haste e ajusta-se sua rotação através do variador de velocidade para 450 rpm.
- Faz-se as leituras dos CD23's correspondentes à haste com rotação de 450 rpm.

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão apresentados os resultados da simulação em laboratório da produção de petróleo em poços que utilizam a BCP como método de elevação artificial de petróleo, equipados com coluna de produção de 2 7/8" e hastes de 7/8" interligadas por luvas de 1 5/8".

Foram simulados os arranjos concêntricos e excêntricos da haste sem luva (haste simples) e com luva, para as faixas de vazão e rotação que abrangem a maioria das condições de produção dos poços equipados e candidatos à utilização de BCP.

O trecho do tubo de acrílico, onde foram feitas as medições do diferencial de pressão, fica compreendido entre as tomadas de pressão 1 e 5, que pode ser visto na FIG.4.3. A escolha deste trecho deu-se em função de um melhor comportamento do movimento da haste e por não haver emendas no tubo.

### 5.1 GRADIENTES DE PRESSÃO

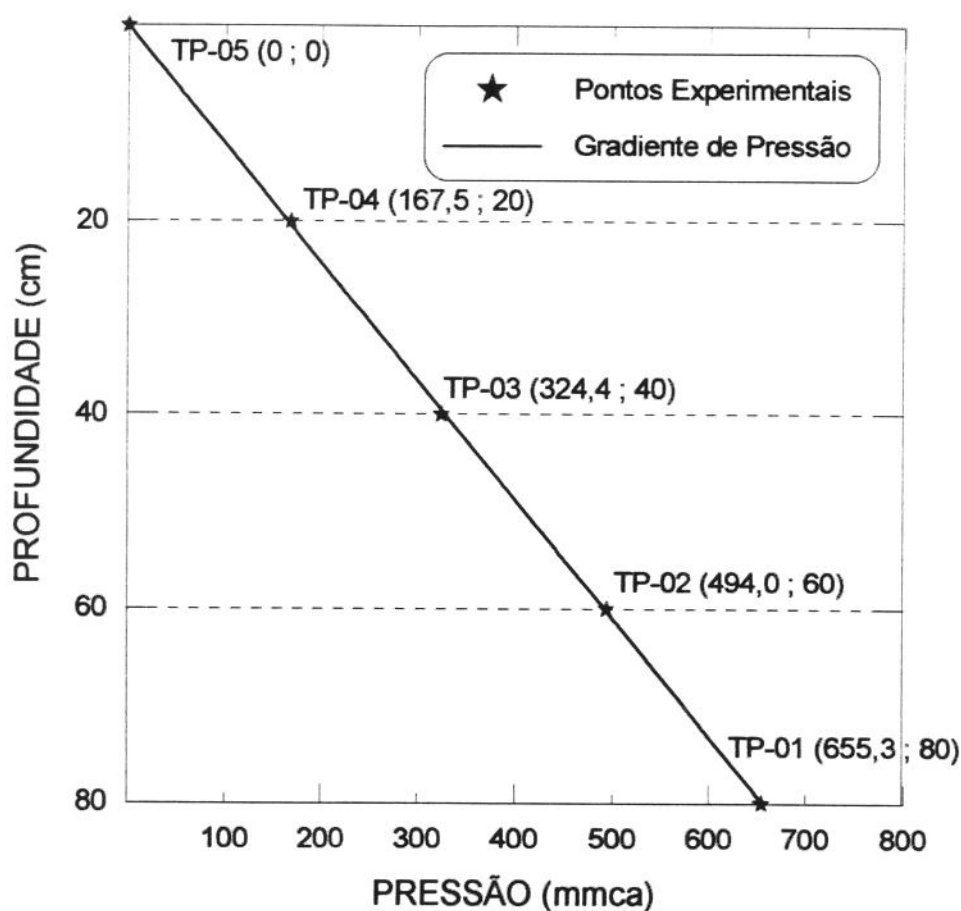
Determinou-se o gradiente de pressão para os arranjos de haste em que seriam investigados os diferenciais de pressão, para verificar-se se o trecho de interesse possuía um escoamento desenvolvido. Escolheu-se valores de vazão e rotação próximos ao máximo, pois, caso fosse confirmada a linearidade do gradiente nestas condições, o resultado poderia estender-se para todas as outras condições de vazão e rotação.

O procedimento adotado na obtenção dos pontos experimentais encontra-se no capítulo 4 item 4.3.6. Os resultados obtidos serão apresentados a seguir de forma gráfica.



Para o gradiente de pressão da haste simples e concêntrica, utilizou-se uma vazão de 1923 l/h e rotação de 450 rpm, mostrado no GRAF.5.1, que na abscissa apresenta os valores de pressão e na ordenada a profundidade. Para o traçado do gradiente, convencionou-se a tomada de pressão 5 como tendo pressão atmosférica e profundidade zero. Esta convenção foi utilizada para todos os gráficos de gradiente (GRAF. 5.1, 5.2, 5.3, 5.4).

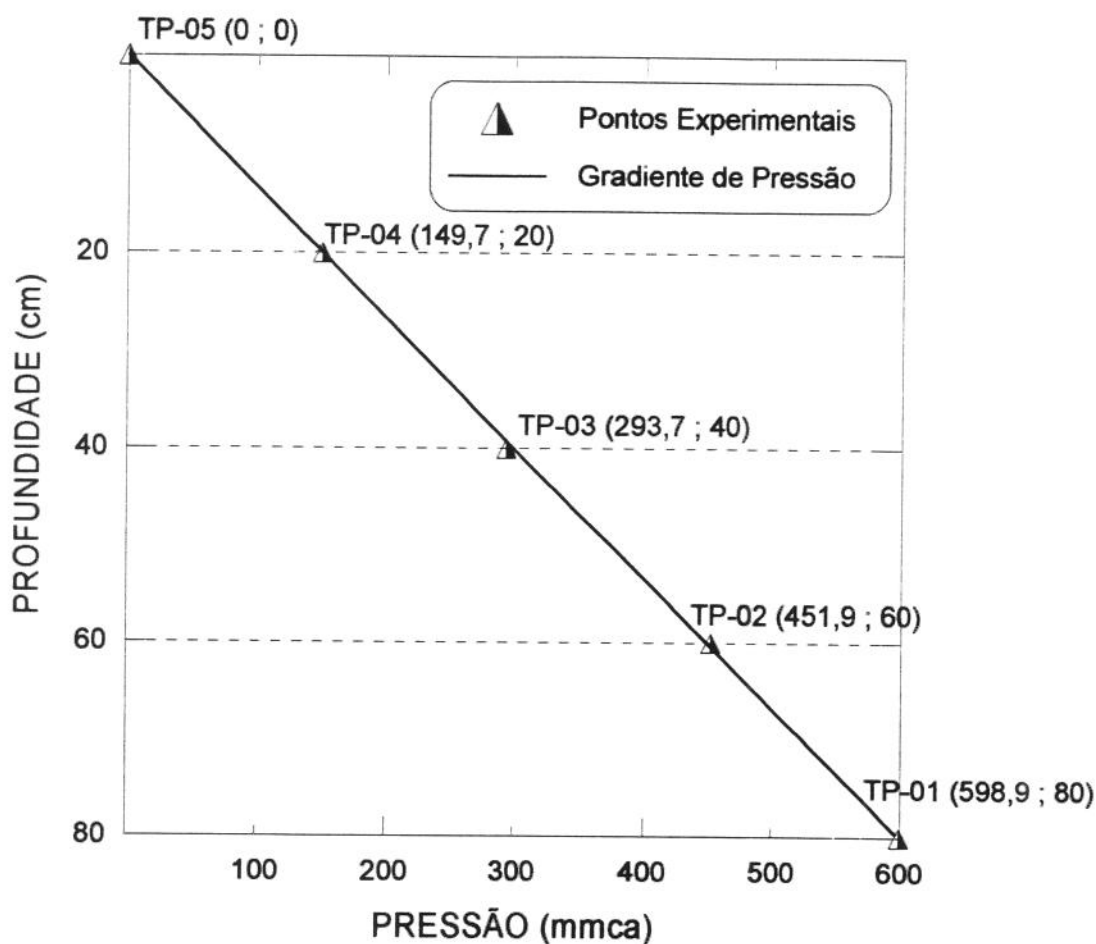
No GRAF.5.1 podemos observar que os valores das pressões nas tomadas de pressão (TP) 1, 2, 3, 4 e 5 encontram-se dispostos de forma linear o que comprova o desenvolvimento do escoamento neste trecho. A disposição das tomadas de pressão encontra-se na FIG.4.3.



**GRÁFICO 5.1 - Gradiente de pressão para haste sem luva e concêntrica para vazão de 1923 l/h e rotação de 450 rpm.**

Para o gradiente de pressão da haste simples e excêntrica ( $\lambda=0,46$ ), utilizou-se uma vazão de 2150 l/h e rotação de 450 rpm. O resultado encontra-se no GRAF.5.2, com o mesmo sistema de coordenadas do GRAF.5.1.

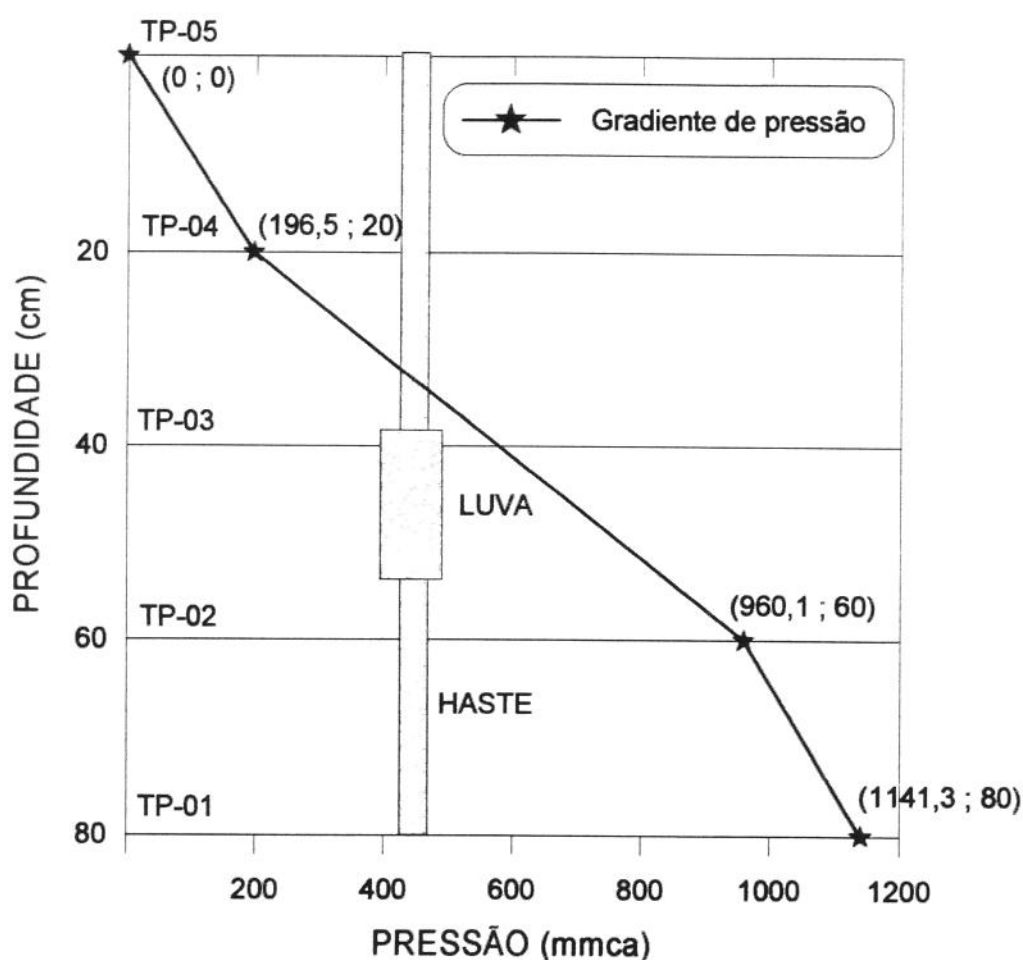
Semelhante ao caso concêntrico, os valores das pressões nas tomadas de pressão de 1 a 5 encontram-se dispostos de forma linear o que comprova o desenvolvimento do escoamento neste trecho. A disposição das tomadas de pressão encontra-se na FIG.4.3.



**GRÁFICO 5.2 - Gradiente de pressão para haste sem luva e excêntrica ( $\lambda=0,46$ ) para vazão de 2150 l/h e rotação de 450 rpm.**

Para o gradiente de pressão da haste com luva e concêntrica, utilizou-se uma vazão de 2150 l/h e rotação de 450 rpm. O resultado encontra-se no GRAF.5.3, que apresenta o mesmo sistema de coordenadas dos GRAF.5.1 e 5.2.

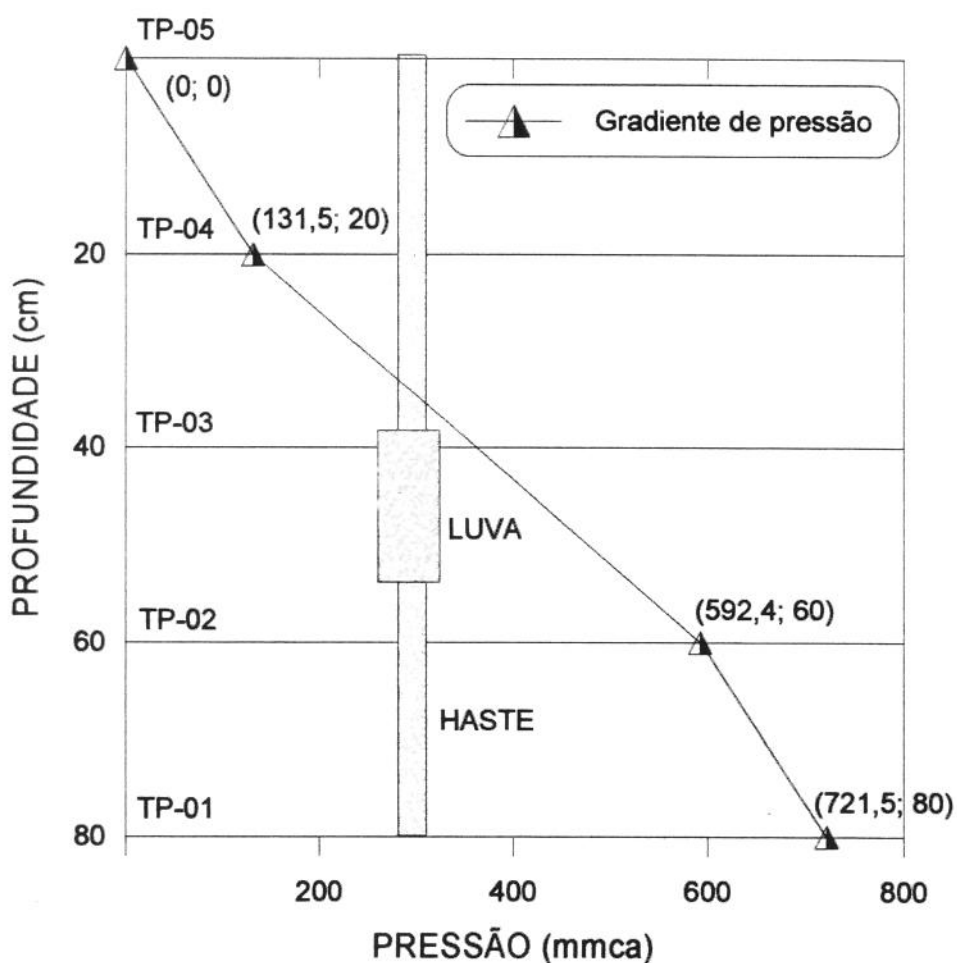
O gradiente de pressão entre as tomadas de pressão 1 e 2 é similar ao do trecho compreendido entre as tomadas de pressão 4 e 5. Este fato mostra que a interferência da luva no escoamento está limitada ao trecho que vai da tomada 2 à 4, portanto, leituras de pressões feitas nas tomadas 1 e 5 já computam toda a interferência da luva no escoamento. No GRAF.5.3 observa-se, conforme esperado, o aumento do gradiente de pressão no trecho onde encontra-se a luva.



**GRÁFICO 5.3 - Gradiente de pressão para haste com luva e concêntrica para vazão de 2150 l/h e rotação de 450 rpm.**

Para o gradiente de pressão da haste com luva e excêntrica ( $\lambda = 0,49$ ), utilizou-se uma vazão de 1811 l/h e rotação de 450 rpm. O resultado encontra-se no GRAF.5.4, onde utilizou-se o mesmo sistema de coordenadas dos gráficos anteriores

Semelhante ao caso concêntrico o GRAF.5.4 mostra que a interferência da luva no escoamento está limitada ao trecho que vai da tomada 2 à 4, portanto leituras de pressões feitas nas tomadas 1 e 5 já computam toda a interferência da luva no escoamento. Observa-se, também, o aumento do gradiente de pressão no trecho onde encontra-se a luva, conforme esperado em função do seu diâmetro ser superior ao da haste.



**GRÁFICO 5.4 - Gradiente de pressão para haste com luva e excêntrica ( $\lambda = 0,49$ ) para vazão de 1811 l/h e rotação de 450 rpm.**

### 5.1.1 Comentários

A forma linear dos gradientes de pressão obtidos para os valores máximos de vazão e rotação, apresentados no GRAF.5.1 e 5.2, garante que o escoamento esteja hidrodinamicamente desenvolvido no trecho compreendido entre as tomadas de pressão 1 e 5, para todas as faixas de vazão e rotação do modelo. O objetivo do traçado dos GRAF.5.3 e 5.4 foi verificar-se se o escoamento em frente às tomadas de pressão 1 e 5 sofria algum tipo de influência devido à presença da luva. A conclusão que se chega, ao verificar-se que o gradiente de pressão, antes da luva, entre as tomadas 1 e 2 tem o mesmo valor do gradiente, após a luva, entre as tomadas 4 e 5, é que a influência da luva está limitada ao trecho compreendido entre as tomadas de pressão 2 e 4 e, portanto, não interfere no escoamento diante das tomadas 1 e 5.

Estas informações deram sustentação à utilização das tomadas de pressão 1 e 5 nas investigações dos diferenciais de pressão no anular para os diversos arranjos de haste. Assunto que será tratado a seguir.

## 5.2 HASTE SEM LUVA E CONCÊNTRICA

A obtenção dos pontos experimentais correspondentes aos diferenciais de pressão entre os sensores de pressão localizados nas tomadas de pressão 1 e 5 do tubo de acrílico, separadas por uma distância de 0,80 m, foi feita de acordo com procedimento descrito no capítulo 4 item 4.3.5 e encontra-se, de forma resumida, na TAB.5.1

Os pontos da TAB.5.1 encontram-se plotados no GRAF.5.5 que apresenta na abscissa os valores de vazão em l/h e na ordenada o diferencial de pressão em mmca. A previsão do diferencial de pressão para a haste sem luva, fixa e concêntrica foi feita a

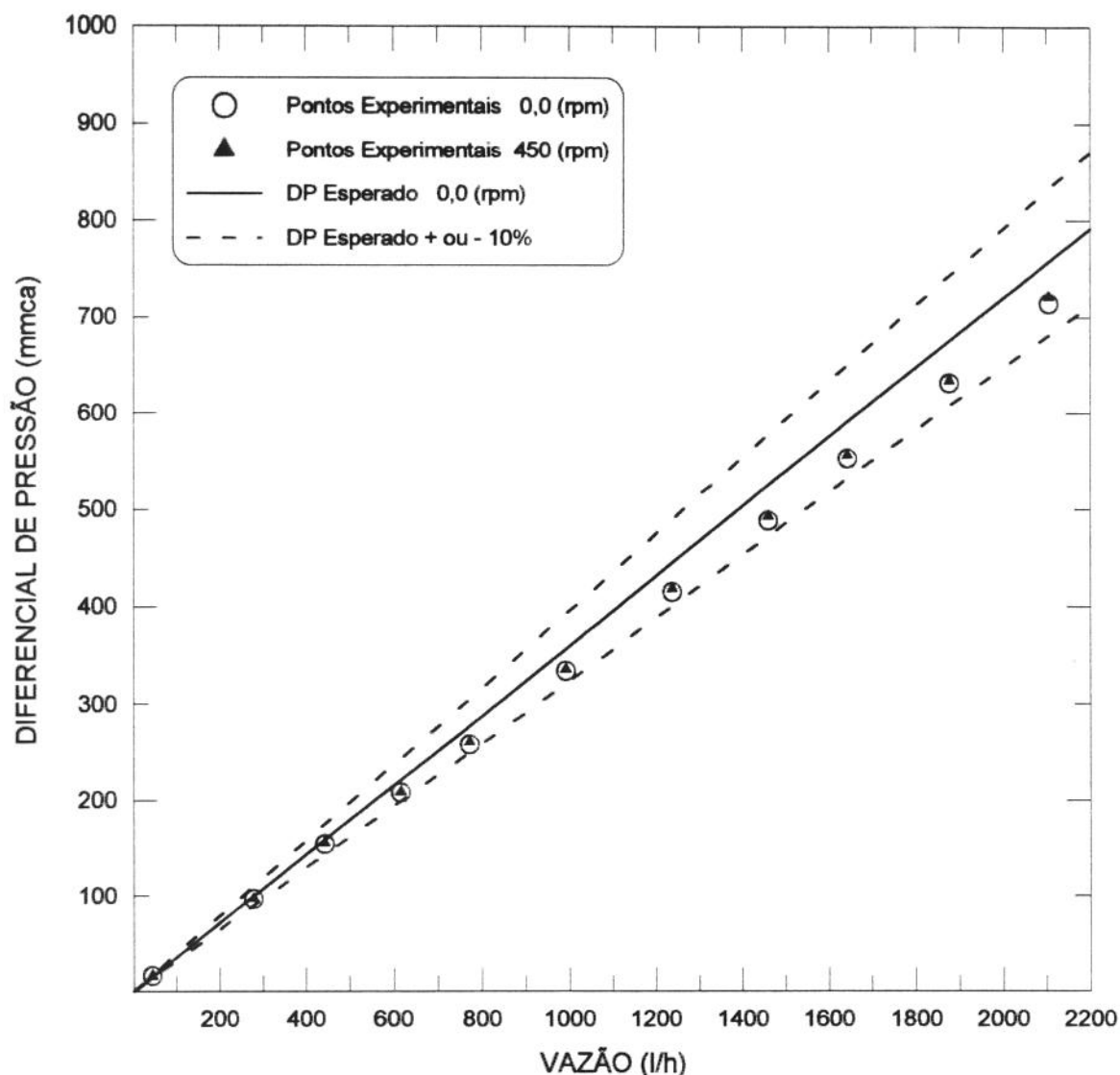
partir da EQ.2.22, e está representada no GRAF.5.5 pela linha contínua. A faixa de valores esperados para o diferencial de pressão, que aparece no GRAF.5.5 em forma de linha descontínua, foi obtida a partir da determinação do erro provável do diferencial de pressão em função dos erros relativos dos valores das variáveis que aparecem nas EQ.2.22 a 2.24. A determinação do erro provável para o diferencial de pressão é apresentada no item 6 deste capítulo.

O GRAF.5.5, por representar o caso mais simples dos arranjos utilizados, inclusive com solução analítica, serviu para validar o experimento, na medida em que os pontos experimentais estão distribuídos na faixa prevista para o diferencial de pressão. Cabe ressaltar que a não coincidência da linha contínua com os pontos experimentais é atribuída às incertezas dos valores das variáveis utilizadas na EQ.2.22.

No GRAF.5.5 podemos observar a linearidade dos pontos experimentais o que confirma a previsão da EQ.2.22. Além deste fato, verifica-se a coincidência dos pontos obtidos para a haste fixa e com rotação de 450 rpm, o que também está de acordo com a EQ.2.22, onde verifica-se que, para o arranjo concêntrico, a rotação não interfere no diferencial de pressão.

**TABELA 5.1 - Dados de vazão versus diferencial de pressão para haste sem luva e concêntrica (índices 0 e 450 referem-se, respectivamente, às rotações de 0 e 450 rpm).**

Vazão (l/h)	$\Delta P_0$ (mmca)	$\Delta P_{450}$ (mmca)	Vazão (l/h)	$\Delta P_0$ (mmca)	$\Delta P_{450}$ (mmca)	Vazão (l/h)	$\Delta P_0$ (mmca)	$\Delta P_{450}$ (mmca)
43,6	16,2	16,3	771,9	258,4	261,1	1644	553,0	556,5
278,9	96,9	97,6	992,5	334,3	336,0	1878	631,5	634,2
442,9	154,3	155,8	1238	415,4	419,0	2106	714,4	721,5
616,0	208,2	209,0	1460	488,6	493,0	-	-	-



**GRÁFICO 5.5 - Dados experimentais e faixa do diferencial de pressão (DP) esperado para haste sem luva e concêntrica**

### 5.3 HASTE SEM LUVA E EXCÊNTRICA

A obtenção dos pontos experimentais correspondentes aos diferenciais de pressão entre as tomadas de pressão 1 e 5, separadas por uma distância de 0,80 m, foi feita de acordo com o procedimento descrito no capítulo 4 item 4.3.5 e encontra-se de forma resumida na TAB.5.2

Os pontos da TAB.5.2 encontram-se plotados no GRAF.5.6 que apresenta o mesmo sistema de coordenadas do GRAF.5.5. A previsão do diferencial de pressão para a haste sem luva, fixa e excêntrica foi feita a partir das EQ.2.25, que está representada no GRAF.5.6 pela linha cheia. A faixa de valores esperados para o diferencial de pressão, que aparece no GRAF.5.6 em forma de linha tracejada, foi obtida a partir determinação do erro provável do diferencial de pressão em função dos erros relativos das variáveis que aparecem nas EQ.2.25 a 2.30. A determinação do erro provável para o diferencial de pressão encontra-se no item 6 deste capítulo.

Os pontos experimentais para haste excêntrica e fixa, representados pelos círculos, encontram-se alinhados e dentro da faixa prevista pela EQ. 2.25, que para o caso da haste excêntrica e fixa corresponde à solução exata. Este fato serviu para validar os dados experimentais.

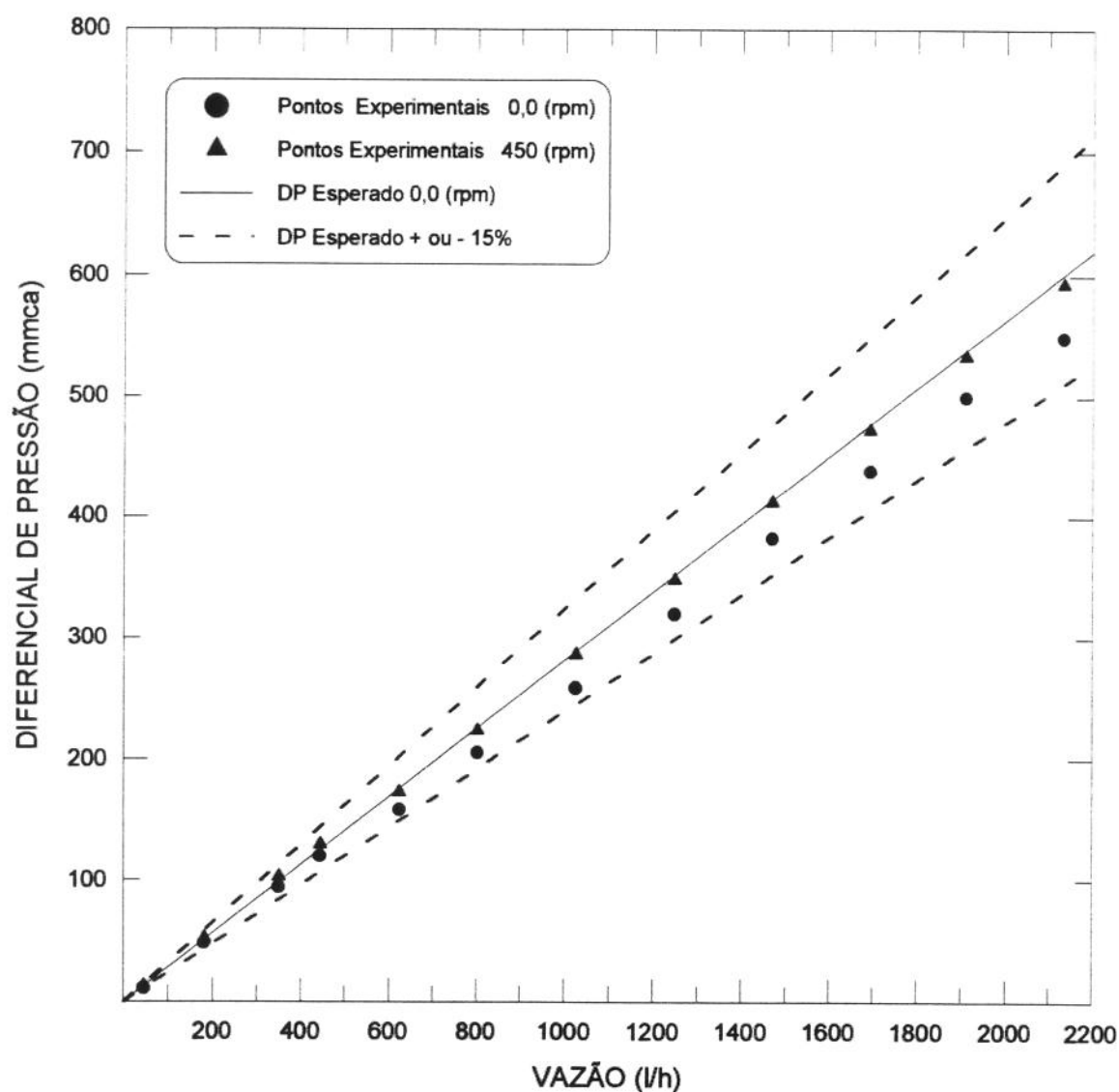
O aumento em torno de 8% verificado no valor do diferencial de pressão para haste com rotação de 450 rpm pode ser atribuído, de forma especulativa, a um possível acoplamento do campo de velocidades axial com os campos de velocidades tangencial e radial, ou ainda, a uma pequena variação da excentricidade da haste, visto que, para o valor de excentricidade relativa em questão ( $\lambda=0,46$ ), nota-se que o diferencial de pressão de acordo com a EQ.2.25 é bastante sensível à excentricidade, assim, bastaria uma variação de 0,9 mm para ocorrer a variação de 8% no diferencial de pressão. Se esta mesma variação de 0,9 mm ocorresse para o caso concêntrico a variação do diferencial de pressão seria de apenas 1%.

Observa-se ainda no GRAF.5.6 a variação linear do diferencial do pressão com a vazão, tanto para os pontos experimentais correspondentes à haste fixa como para a haste com rotação de 450 rpm, conforme previsto pela EQ.2.25.



**TABELA 5.2 - Dados de vazão versus diferencial de pressão para haste sem luva e excêntrica (os valores da excentricidade e excentricidade relativa ( $\lambda$ ) são respectivamente 4,7 mm e 0,46).**

Vazão (l/h)	$\Delta P_0$ (mmca)	$\Delta P_{450}$ (mmca)	Vazão (l/h)	$\Delta P_0$ (mmca)	$\Delta P_{450}$ (mmca)	Vazão (l/h)	$\Delta P_0$ (mmca)	$\Delta P_{450}$ (mmca)
45,5	12,3	13,9	624,9	158,8	172,9	1471	382,8	412,8
181,3	52,8	57,3	803,1	205,5	224,0	1694	439,2	472,8
350,1	94,1	102,8	1026	259,3	286,7	1911	500,1	533,6
445,2	120,0	129,9	1249	320,2	348,4	2134	549,5	593,6



**GRÁFICO 5.6 - Dados experimentais e faixa do diferencial de pressão (DP) esperado para haste sem luva e excêntrica ( $\lambda=0,46$ ).**

#### 5.4 HASTE COM LUVA E CONCÊNTRICA

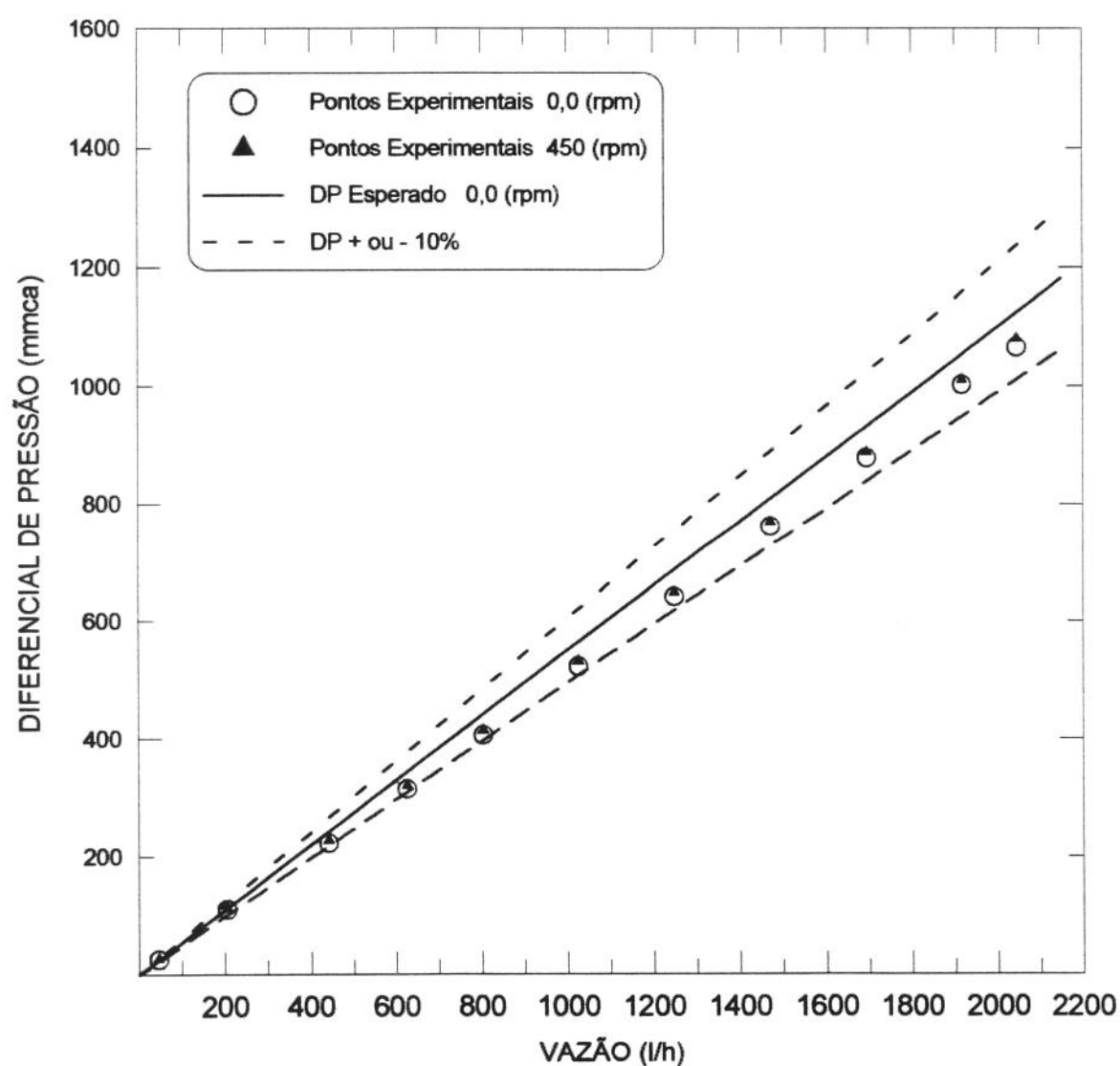
A obtenção dos pontos experimentais correspondentes aos diferenciais de pressão entre as tomadas de pressão 1 e 5, separadas por uma distância de 0,80 m, foi feita de acordo com procedimento descrito no capítulo 4 item 4.3.5 e encontra-se de forma resumida na TAB.5.3.

Os pontos da TAB.5.3 encontram-se plotados no GRAF.5.7, que apresenta o mesmo sistema de coordenadas do GRAF.5.5. A previsão do diferencial de pressão para a haste com luva, fixa e concêntrica, que está representada no GRAF.5.7 pela linha contínua, foi obtida a partir da EQ.2.22, cujo procedimento de cálculo está descrito no capítulo 6, item 6.3. A faixa de valores esperados para o diferencial de pressão, que aparece no GRAF.5.7 em forma de linha descontínua, foi obtida a partir da determinação do erro provável do diferencial de pressão em função dos erros relativos dos valores das variáveis que aparecem nas EQ.2.22 a 2.24. A determinação do erro provável para o diferencial de pressão encontra-se no item 6 deste capítulo.

Os pontos experimentais para a haste concêntrica e fixa mostram uma variação linear do diferencial de pressão com a vazão, comportamento previsto pela EQ.2.22. Além deste fato verifica-se a coincidência dos pontos obtidos para a haste fixa e com rotação de 450 rpm, o que também está de acordo com a EQ.2.22, onde verifica-se que, para o arranjo concêntrico, a rotação não interfere no diferencial de pressão.

**TABELA 5.3 - Dados de vazão versus diferencial de pressão para haste com luva e concêntrica.**

Vazão (l/h)	$\Delta P_0$ (mmca)	$\Delta P_{450}$ (mmca)	Vazão (l/h)	$\Delta P_0$ (mmca)	$\Delta P_{450}$ (mmca)	Vazão (l/h)	$\Delta P_0$ (mmca)	$\Delta P_{450}$ (mmca)
46,2	26,4	27,1	803,1	406,2	414,5	1694	878,0	888,2
205,3	110,5	112,3	1025,9	522,1	531	1917	1003,3	1011,7
440,7	222,7	227,6	1248,7	640,8	648,3	2045	1066,8	1081,3
624,9	314,4	320,2	1471	761,6	769,1			



**GRÁFICO 5.7 - Dados experimentais e faixa do diferencial de pressão (DP) esperado para haste com luva e concêntrica.**

## 5.5 HASTE COM LUVA E EXCÊNTRICA

A obtenção dos pontos experimentais correspondentes aos diferenciais de pressão entre as tomadas de pressão 1 e 5, separadas por uma distância de 0,80 m, foi feita de acordo com procedimento descrito no capítulo 4 item 4.3.5 e encontra-se de forma resumida na TAB.5.4.

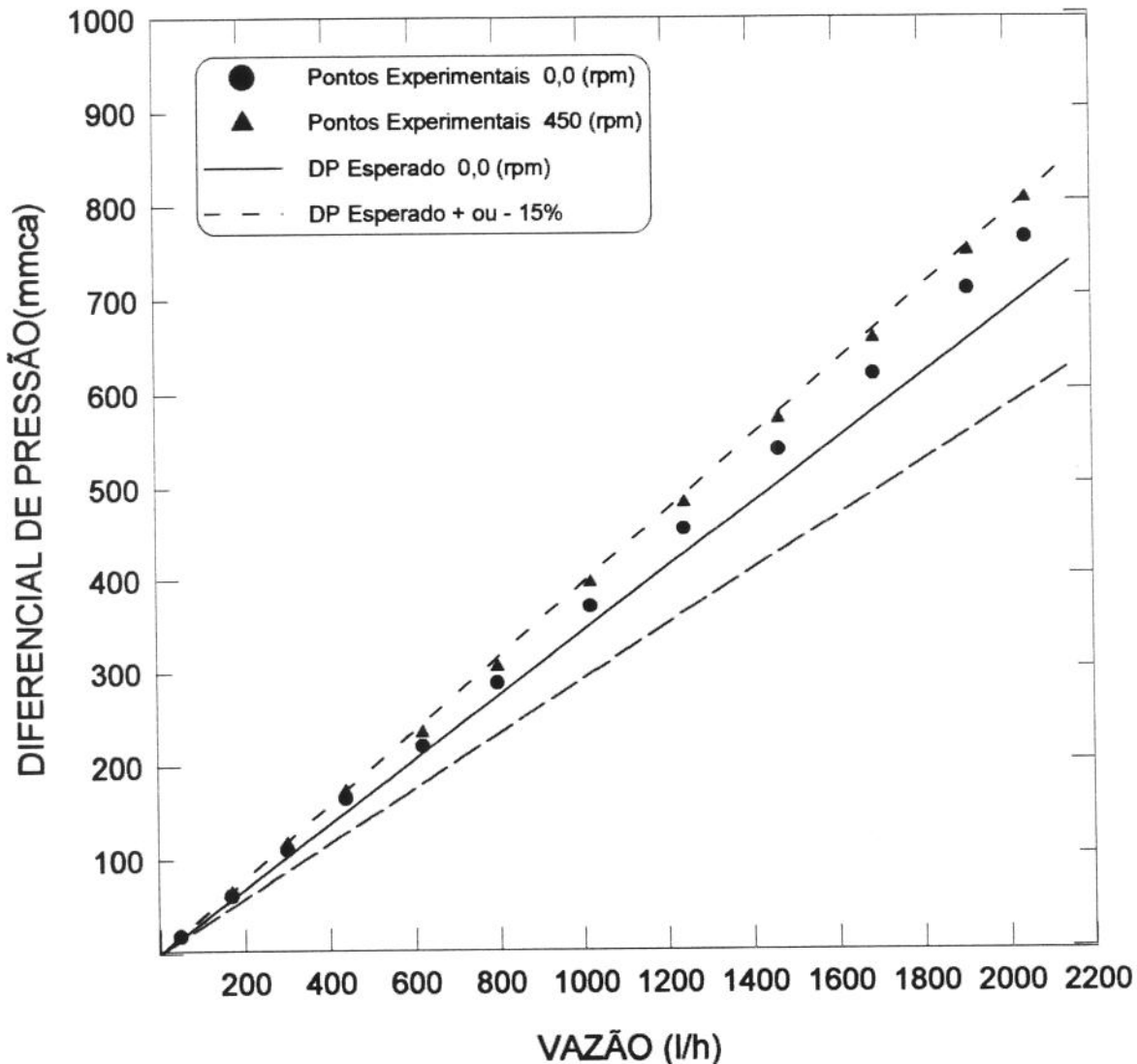
Os pontos da TAB.5.4 encontram-se plotados no GRAF.5.8, que apresenta o mesmo sistema de coordenadas do GRAF.5.5. A previsão do diferencial de pressão para a haste com luva, sem rotação e excêntrica, que está representada no GRAF.5.8 pela linha contínua, foi obtida a partir das EQ.2.25, cujo procedimento de cálculo está descrito no capítulo 6 item 6.3. A faixa de valores esperados para o diferencial de pressão, que aparece no GRAF.5.8 em forma de linha descontínua, foi obtida a partir determinação do erro provável do diferencial de pressão em função dos erros relativos dos valores das variáveis que aparecem nas EQ.2.25 a 2.30. A determinação do erro provável para o diferencial de pressão encontra-se no item 6 deste capítulo.

O aumento em torno de 6 % verificado no valor do diferencial de pressão para haste com rotação de 450 rpm pode ser atribuído, de forma especulativa, a um possível acoplamento do campo de velocidades axial com os campos de velocidades tangencial e radial, ou ainda, a uma pequena variação da excentricidade da haste, visto que, para o valor da excentricidade em questão ( $\lambda=0,49$ ), nota-se no GRAF.6.1 que o diferencial de pressão de acordo com a EQ.2.25 é bastante sensível à excentricidade.

Observa-se, ainda, no GRAF.5.8 a variação linear do diferencial do pressão com a vazão, tanto para os pontos experimentais da haste fixa, como para os pontos correspondentes à haste com 450 rpm, conforme previsto na EQ.2.25.

**TABELA 5.4- Dados de vazão versus diferencial de pressão para haste com luva e excêntrica (os valores da excentricidade e excentricidade relativa ( $\lambda$ ) são respectivamente 5,0 mm e 0,49).**

Vazão (l/h)	$\Delta P_0$ (mmca)	$\Delta P_{450}$ (mmca)	Vazão (l/h)	$\Delta P_0$ (mmca)	$\Delta P_{450}$ (mmca)	Vazão (l/h)	$\Delta P_0$ (mmca)	$\Delta P_{450}$ (mmca)
46,6	18,6	19,3	619,3	220,9	235,5	1466	540,2	572,4
169,1	62,1	64,7	797,6	288,9	306,1	1689	620,5	658
300,4	110,9	117	1020	370,4	396	1911	710,5	750,6
438,4	165,6	172,8	1243	455,1	483,3	2045	765,1	806,1



**GRÁFICO 5.8 - Dados experimentais e faixa do diferencial de pressão (DP) esperado para haste com luva e excêntrica ( $\lambda=0,49$ ).**

## 5.6 ANÁLISE DE ERRO

As variáveis que aparecem no cálculo do diferencial de pressão no anular apresentam pequenas variações em torno de um valor médio. Nesta análise objetiva-se determinar a influência do conjunto destas pequenas variações na incerteza do valor encontrado para o diferencial de pressão, ao utilizar-se as EQ.2.22 e 2.25, que tratam do caso concêntrico e excêntrico respectivamente.

### 5.6.1 Diferencial de Pressão para Anular Concêntrico

Utilizou-se para a previsão do diferencial de pressão no anular concêntrico a EQ.2.22, que para a viscosidade padrão do fluido do modelo de 100 cP e utilizando-se a vazão mássica ao invés da vazão volumétrica, assume a seguinte forma:

$$\Delta P = \frac{12,8 M L}{\pi \rho D^4 F_k} \quad (5.1)$$

Onde:

$$F_k = 1 - K^4 + (1 - K^2)^2 \frac{1}{\ln(K)} \quad (5.2)$$

$$k = d/D \quad (5.3)$$

$\Delta P$  = Perda de carga no anular

$M$  = Vazão mássica

$L$  = Comprimento

$\rho$  = Massa específica do óleo

$D$  = Diâmetro do tubo

$d$  = Diâmetro da haste

A seguir será feita a determinação dos erros relativos de cada uma destas variáveis.

- **Erro relativo do diâmetro do tubo**

O diâmetro médio do tubo foi determinado pela média dos diâmetros das seções inferior e superior. Estes, por sua vez, foram obtidos pela média de quatro medições, a saber,

$$\text{Diâmetro inferior} = (32,8 + 32,6 + 33,0 + 32,8)/4 = 32,8 \text{ mm e} \quad (5.4)$$

$$\text{Diâmetro superior} = (32,1 + 32,0 + 32,1 + 32,1)/4 = 32,08 \text{ mm.} \quad (5.5)$$

Com estes valores obtém-se para o diâmetro médio ( $\bar{D}$ ) o valor de 32,43 mm.

A tolerância ( $\Delta D$ ) para o diâmetro do tubo corresponde a maior diferença entre as leituras feitas e a média destas leituras, ou seja,

$$\Delta D = 33,0 - 32,43 = 0,6 \text{ mm} \quad (5.6)$$

$$D = 32,43 \pm 0,6 \text{ mm} \quad (5.7)$$

O erro relativo do diâmetro do tubo é dado pela razão da tolerância ( $\Delta D$ ) e o diâmetro médio, assim:

$$\frac{\Delta D}{D} = 0,02 \quad (5.8)$$

- **Erro relativo do diâmetro da haste**

O Diâmetro da haste é bastante uniforme, porém apresenta-se ligeiramente empenado. Os resultados das diversas medições realizadas foi de 12,00 mm. Admitiu-se uma tolerância de 0,1 mm, desta forma, o diâmetro da haste é dado por:

$$d = 12,00 \pm 0,1 \text{ mm, e} \quad (5.9)$$

o erro relativo por:

$$\frac{\Delta d}{d} = 0,01 \quad (5.10)$$

- **Erro relativo do comprimento**

O comprimento médio entre as tomadas de pressão 1 e 5 é de 0,80 m. Admitiu-se uma tolerância de 0,01 m, desta forma, o comprimento do trecho é dado por:

$$L = 0,80 \pm 0,01 \text{ m , e} \quad (5.11)$$

seu erro relativo por :

$$\frac{\Delta L}{L} = 0,01 \quad (5.12)$$

- **Erro relativo do fator  $F_k$**

$$F_K = 1 - K^4 + (1 - K^2)^2 \frac{1}{\ln(K)} \quad (5.2)$$

onde:

$$k = d/D \quad (5.3)$$



Para determinação do erro relativo de  $F_K$ , determinou-se primeiro o limite do erro [Rosa, 1995], dado por:

$$\Delta F_K = \left( \frac{\partial F_K}{\partial D} \Delta D \right) + \left( \frac{\partial F_K}{\partial d} \Delta d \right), \quad (5.13)$$

em seguida obteve-se o erro relativo dado por:

$$\frac{\Delta F_K}{F_K} = 0,04 \quad (5.14)$$

- **Erro relativo da massa específica do óleo**

Para a faixa de temperatura de trabalho não foram observadas variações no valor da massa específica. Adotou-se, contudo, um erro relativo de 1% .

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = 0,01 \quad (5.15)$$

- **Erro relativo da vazão mássica**

Foram utilizados três medidores de modo a cobrir a faixa de vazão de 0 a 2000 kg/h. Os valores das Vazões mássicas foram obtidos utilizando-se as equações das retas que melhor se ajustaram aos pontos experimentais obtidos para cada medidor. O valor da tolerância ( $\Delta M$ ) foi obtida adotando-se um intervalo de confiança de 95% com correção do desvio padrão pela distribuição de t-Student [Rosa, 1995].

As equações dos medidores e os resultados dos erros relativos encontrados para cada medidor encontram-se na TAB.5.5 .

**TABELA 5.5 - Valores dos erros relativos dos três medidores de vazão utilizados.**

Medidor	Faixa de Vazão (Kg/h)	Equação do Medidor	$\frac{\Delta M}{M}$
I	0 a 150	$M = 6,59 H - 2,06$	0,04
II	150 a 500	$M = 19,79 H + 0,33$	0,03
III	500 a 2000	$M = 97,46 H - 8,61$	0,03

Onde: M= Vazão mássica (kg/h)

H= Altura de mercúrio do tubo em “U” (polegadas)

O valor de erro relativo médio para a vazão mássica foi obtido pela média dos três medidores,

$$\frac{\Delta M}{M} = 0,03 \quad (5.16)$$

De posse do erro relativo de cada uma das variáveis que aparecem na EQ.5.1, a determinação do erro provável para o diferencial de pressão do anular concêntrico [Moffat, 1985] é dado por:

$$\frac{\Delta \Delta P}{\Delta P} = \left[ \left( \frac{\Delta M}{M} \right)^2 + \left( \frac{\Delta L}{L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)^2 + \left( 4 \frac{\Delta D}{D} \right)^2 + \left( \frac{\Delta F_K}{F_K} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.17)$$

$$\frac{\Delta \Delta P}{\Delta P} = \left[ (0,03)^2 + (0,01)^2 + (0,01)^2 + (4 \cdot 0,02)^2 + (0,04)^2 \right]^{1/2} \quad (5.18)$$

$$\frac{\Delta \Delta P}{\Delta P} = 0,10 \quad (5.19)$$

### 5.6.2 Diferencial de Pressão para Anular Excêntrico

Utilizou-se para a previsão do diferencial de pressão no anular excêntrico a EQ.2.22 , que para a viscosidade padrão do fluido do modelo de 100 cP e utilizando-se a vazão mássica ao invés da vazão volumétrica, assume a seguinte forma:

$$\Delta P = \frac{0,8 M L}{\pi \rho F_g} \quad (5.20)$$

Onde:

$$F_g = a^4 - b^4 - \frac{4c^2 m^2}{\beta - \alpha} - 8c^2 m^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n e^{-n(\beta + \alpha)}}{\text{Sinh}(n\beta - n\alpha)} \quad (5.21)$$

$$f = \frac{a^2 - b^2 + c^2}{2c} \quad (5.22)$$

$$m = (f^2 - a^2)^{1/2} \quad (5.23)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \text{Ln} \frac{f + m}{f - m} \quad (5.24)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \text{Ln} \frac{f - c + m}{f - c - m} \quad (5.25)$$

a= Raio do tubo (D/2)

b= Raio da haste (d/2)

c= Excentricidade

As demais variáveis encontram-se definidas no item anterior

A seguir será feita a determinação dos erros relativos das variáveis definidas neste item.

O erros relativos dos raios do tubo (a) e da haste (b) são idênticos aos dos diâmetros correspondentes, vistos no item anterior.

- **Erro relativo da excentricidade**

A excentricidade média no trecho compreendido pelas tomadas de pressão 1 e 5 foi determinada pela média das excentricidades encontradas para as tomadas 1, 2, 3, 4 e 5. As excentricidades nas tomadas de 1 a 5 por sua vez foram determinadas pela média de quatro medidas de excentricidade feitas com defasagem de 90° uma da outra. Estas medições encontram-se no APÊNDICE-B. O valor médio encontrado para a excentricidade média foi de 4,7 mm e para a tolerância encontrou-se 0,5, assim a excentricidade é dada por:

$$c = 4,7 \pm 0,5 \text{ mm}, \quad (5.26)$$

e seu erro relativo por:

$$\frac{\Delta c}{c} = 0,10 \quad (5.27)$$

- **Erro relativo do fator Fg**

A série

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n e^{-n(\beta + \alpha)}}{\text{Sinh}(n\beta - n\alpha)} \quad (5.28)$$

que aparece na determinação do fator  $F_g$ , para a geometria em questão, é bem representada (98%) por apenas um termo. Desta forma, para a análise de erro, utilizar-se-á para  $F_g$  a expressão:

$$F_g = a^4 - b^4 - \frac{4c^2 m^2}{\beta - \alpha} - 8c^2 m^2 \frac{e^{-(\beta + \alpha)}}{\text{Sinh}(\beta - \alpha)} \quad (5.29)$$

e de forma semelhante ao caso concêntrico o erro relativo será determinado por:

$$\frac{\Delta F_g}{F_g} = \left( \frac{\partial F_g}{\partial a} \frac{\Delta a}{F_g} \right) + \left( \frac{\partial F_g}{\partial b} \frac{\Delta b}{F_g} \right) + \left( \frac{\partial F_g}{\partial c} \frac{\Delta c}{F_g} \right) \quad (5.30)$$

As derivadas que aparecem na EQ. 5.30 foram determinadas através do sistema “Mathematica”. Em seguida substituiu-se os valores de a, b, c e suas tolerâncias, encontrando-se:

$$\frac{\Delta F_g}{F_g} = 0,145 \quad (5.31)$$

A determinação do erro provável para o diferencial de pressão é dado por:

$$\frac{\Delta \Delta P}{\Delta P} = \left[ \left( \frac{\Delta M}{M} \right)^2 + \left( \frac{\Delta L}{L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{\Delta F_g}{F_g} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.31)$$

$$\frac{\Delta \Delta P}{\Delta P} = \left[ (0,03)^2 + (0,01)^2 + (0,01)^2 + (0,145)^2 \right]^{1/2} \quad (5.32)$$

$$\frac{\Delta \Delta P}{\Delta P} = 0,15 \quad (5.33)$$

## 6 METODOLOGIA DE CÁLCULO

Neste capítulo será apresentada uma ferramenta, sustentada nas investigações experimentais, para estimar o diferencial de pressão que ocorre no espaço anular concêntrico ou excêntrico compreendido entre o tubo de produção e a coluna de haste dos poços de petróleo equipados com BCP.

As análises foram feitas para um fluido Newtoniano e incompressível, num escoamento helicoidal, monofásico, isotérmico, laminar e em regime permanente.

### 6.1 HASTE CONCÊNTRICA

Para um arranjo concêntrico, o diferencial de pressão ao longo do anular tubo/haste, independe da rotação da haste, e é determinado de forma exata pela EQ.2.22, reescrita a seguir.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{8 \mu Q}{\pi a^4 F_k} \quad (2.22)$$

onde:

$$F_k = 1 - k^4 - \frac{(1 - k^2)^2}{\ln(1/k)} \quad (2.23)$$

$$k = \frac{b}{a} \quad (2.24)$$

As EQ. 2.22 a 2.24 fornecem o valor do diferencial de pressão ( $\Delta P$ ), ao longo de um trecho de comprimento ( $L$ ), do anular concêntrico compreendido entre um tubo de

raio (a) e uma haste de raio (b), onde escoo um fluido de viscosidade ( $\mu$ ) com uma vazão volumétrica (Q).

Esta solução, por ser exata, não depende de qualquer sustentação experimental, portanto, pode ser usada para qualquer configuração tubo/haste, desde que o escoamento tenha as características já mencionadas.

## 6.2 HASTE EXCÊNTRICA

Diferente do caso onde a haste ocupa a parte central do tubo, no arranjo excêntrico, mesmo para as condições de escoamento e fluido já mencionadas, não temos uma solução exata para a equação:

$$\lambda \text{Re}_\Omega \left[ v_r^* \frac{\partial v_z^*}{\partial r^*} + \frac{v_\theta^*}{r^*} \frac{\partial v_z^*}{\partial \theta^*} \right] = -\frac{\partial \tilde{p}^*}{\partial z^*} + \left[ \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left( r^* \frac{\partial v_z^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\lambda^2}{r^{*2}} \frac{\partial^2 v_z^*}{\partial \theta^{*2}} \right] \quad (2.15)$$

que retrata este escoamento. Porém no limite quando  $\lambda \text{Re}_\Omega \rightarrow 0$ , esta equação torna-se linear e apresenta solução analítica dada pela equação:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{8 \mu Q}{\pi F_g} \quad (2.25)$$

onde:

$$F_g = a^4 - b^4 - \frac{4c^2 m^2}{\beta - \alpha} - 8c^2 m^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n e^{-n(\beta + \alpha)}}{\text{Sinh}(n\beta - n\alpha)} \quad (2.26)$$

$$m = (f^2 - a^2)^{1/2} \quad (2.27)$$

$$f = \frac{a^2 - b^2 + c^2}{2c} \quad (2.28)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} Ln \frac{f+m}{f-m} \quad (2.29)$$

$$\beta = \frac{1}{2} Ln \frac{f-c+m}{f-c-m} \quad (2.30)$$

As EQ.2.25 a 2.30 fornecem o valor do diferencial de pressão ( $\Delta P$ ), ao longo de um trecho de comprimento ( $L$ ), do anular excêntrico compreendido entre um tubo de raio ( $a$ ) e uma haste de raio ( $b$ ) e excentricidade ( $c$ ), onde escoava um fluido de viscosidade ( $\mu$ ) com uma vazão volumétrica ( $Q$ ) para a situação em que  $\lambda \cdot Re_{\Omega} \rightarrow 0$ .

O maior valor do parâmetro  $\lambda \cdot Re_{\Omega}$ , experimentalmente, investigado foi 12,3. Para este valor verificou-se um aumento do diferencial de pressão em torno de 8 %, quando comparado à haste fixa, e esta diferença diminuía até igualar-se ao resultado obtido com a haste fixa à medida em que reduzia-se a rotação e conseqüentemente o valor do parâmetro  $\lambda \cdot Re_{\Omega}$ . Este aumento pode ter ocorrido devido a uma variação da excentricidade da haste, quando submetida à rotação, ou a um possível acoplamento do campo de velocidades axial com os campos de velocidades radial e tangencial.

Admitindo-se a segunda hipótese como verdadeira, o uso da EQ.2.25 fica condicionado a uma majoração na faixa de 8% do valor encontrado para a faixa de  $\lambda \cdot Re_{\Omega}$  que vai de 0 a 12,3 .

Valores do parâmetro  $\lambda_{\max} \cdot Re_{\Omega}$  , são apresentados nas TAB. 6.1 a 6.4 para as faixas de rotação de 100 a 400 rpm e faixa de viscosidade de 100 a 4000 centistokes (cST) para os tubos 2 7/8" e 3 1/2" com haste de 5/8", 3/4", 7/8" e 1" interligadas com luvas do tipo "slim". Estas tabelas cobrem a maioria das condições dos poços equipados ou candidatos à produção com BCP no campos de petróleo brasileiros.



Os valores do parâmetro  $\lambda \cdot Re_{\Omega}$  que aparecem sombreados na TAB.6.1 a 6.4 superam o valor máximo investigado de 12,3, portanto, estão fora do escopo deste trabalho. Para obter-se os valores do  $\lambda \cdot Re_{\Omega}$  nas TAB. 6.1 a 6.4, entra-se com o valor da viscosidade cinemática do fluido na coluna 2, e com o valor da rotação na linha 2. Exemplo: O valor do parâmetro  $\lambda \cdot Re_{\Omega}$  para a configuração tubo de 2 7/8" e haste de 5/8", para uma rotação de 300 rpm e viscosidade do fluido de 1000 cST é 4, que encontra-se dentro da faixa investigada experimentalmente.



TABELA 6.2 - Valores do Parâmetro  $\lambda_{\max} \cdot Re_{\Omega}$  para as configurações tubo/haste:

2 7/8" x 7/8" e 2 7/8" x 1".

		Tubo: 2 7/8" e Haste: 7/8"												
		Rotação (rpm)												
		100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400
(cST)		Parâmetro $\lambda_{\max} \cdot Re_{\Omega}$												
V	100	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
I	200	6	8	9	11	12	14	15	17	18	20	21	23	24
S	300	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
C.	400	3	4	5	5	6	7	8	8	9	10	11	11	12
	500	2	3	4	4	5	5	6	7	7	8	8	9	10
C	600	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8
I	700	2	2	3	3	3	4	4	5	5	6	6	6	7
N	800	2	2	2	3	3	3	4	4	5	5	5	6	6
E	900	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5
M	1000	1	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5
A	1500	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3
T	2000	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
I	2500	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
C	3000	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
A	4000	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

		Tubo: 2 7/8" e Haste: 1"												
		Rotação (rpm)												
		100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400
(cST)		Parâmetro $\lambda_{\max} \cdot Re_{\Omega}$												
V	100	7	9	11	13	15	17	19	20	22	24	26	28	30
I	200	4	5	6	7	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	300	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8	9	9	10
C.	400	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7
	500	1	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	6	6
C	600	1	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5
I	700	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4
N	800	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4
E	900	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3
M	1000	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3
A	1500	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
T	2000	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
I	2500	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C	3000	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
A	4000	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

**TABELA 6.3 - Valores do Parâmetro  $\lambda_{\max} \cdot Re_{\Omega}$  para as configurações tubo/haste:  
3 1/2" x 5/8" e 3 1/2" x 3/4".**

		<b>Tubo: 3 1/2" e Haste: 5/8"</b>												
		Rotação (rpm)												
		100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400
(cST)		Parâmetro $\lambda_{\max} \cdot Re_{\Omega}$												
V	100	18	23	28	32	37	41	46	51	55	60	64	69	74
I	200	9	11	14	16	18	21	23	25	28	30	32	34	37
S	300	6	8	9	11	12	14	15	17	18	20	21	23	25
C.	400	5	6	7	8	9	10	11	13	14	15	16	17	18
	500	4	5	6	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
C	600	3	4	5	5	6	7	8	8	9	10	11	11	12
I	700	3	3	4	5	5	6	7	7	8	9	9	10	11
N	800	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7	8	9	9
E	900	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8
M	1000	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	6	7	7
A	1500	1	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5
T	2000	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4
I	2500	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3
C	3000	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
A	4000	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2

		<b>Tubo: 3 1/2" e Haste: 3/4"</b>												
		Rotação (rpm)												
		100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400
(cST)		Parâmetro $\lambda_{\max} \cdot Re_{\Omega}$												
V	100	19	24	28	33	38	43	47	52	57	62	66	71	76
I	200	9	12	14	17	19	21	24	26	28	31	33	36	38
S	300	6	8	9	11	13	14	16	17	19	21	22	24	25
C.	400	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	17	18	19
	500	4	5	6	7	8	9	9	10	11	12	13	14	15
C	600	3	4	5	6	6	7	8	9	9	10	11	12	13
I	700	3	3	4	5	5	6	7	7	8	9	9	10	11
N	800	2	3	4	4	5	5	6	7	7	8	8	9	9
E	900	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8
M	1000	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8
A	1500	1	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	5	5
T	2000	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4
I	2500	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
C	3000	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3
A	4000	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2



A influência da excentricidade no diferencial de pressão ao longo do anular tubo/haste para as configurações mais comuns está mostrada nas TAB.6.5 e 6.6 e no GRAF.6.1, que apresenta na abscissa os valores da excentricidade relativa ( $\lambda$ ) e na ordenada a razão entre os diferencial de pressão para o caso concêntrico dado pela EQ.2.22 e o diferencial de pressão para o caso excêntrico dado pela EQ.2.25, sob as mesmas condições de escoamento. Podemos observar neste gráfico que o maior diferencial de pressão ocorre quando a haste ocupa a parte central do tubo e diminui à medida em que a excentricidade aumenta, podendo o diferencial de pressão para o caso concêntrico atingir o expressivo patamar de uma vez e meia o valor do diferencial de pressão obtido para a haste excêntrica. Nota-se ainda que o comportamento das curvas é, praticamente, o mesmo para as diversas configurações analisadas.

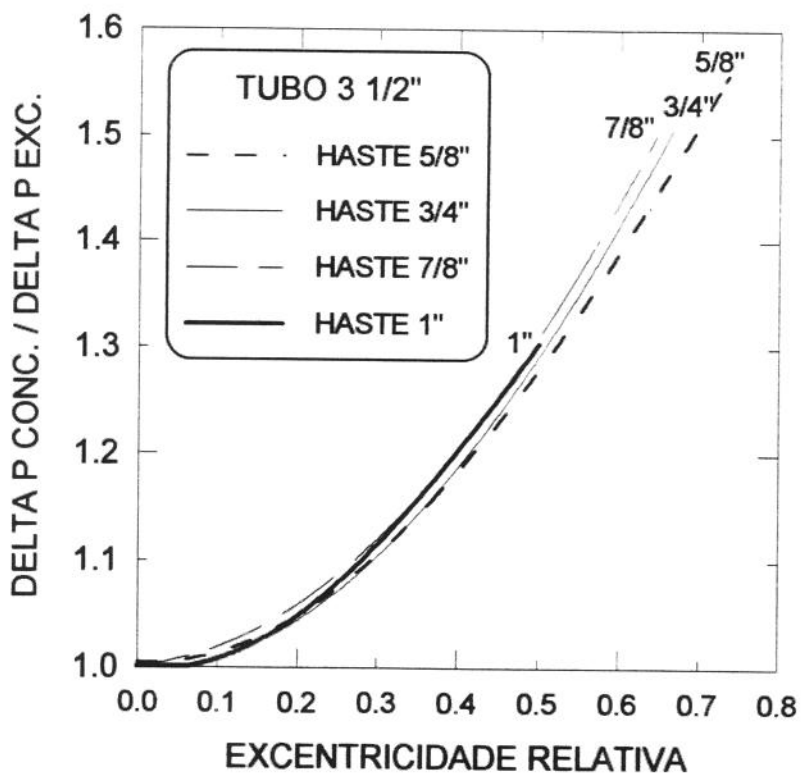
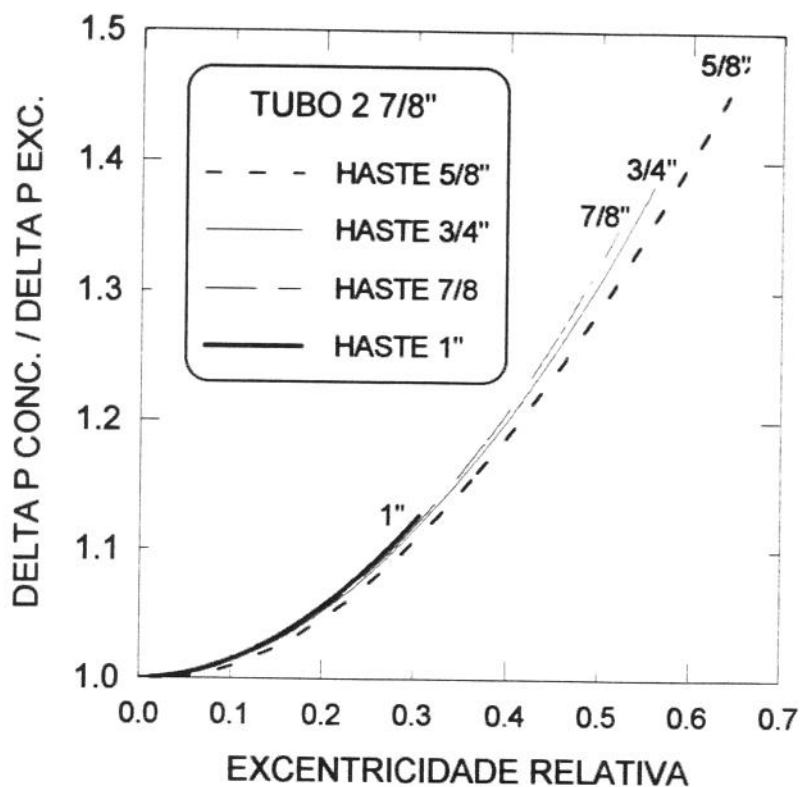
**TABELA 6.5 - Valores da razão entre o diferencial de pressão para o caso concêntrico e excêntrico (DPc/DPe) em função da excentricidade relativa ( $\lambda$ ), para o tubo de 2 7/8" e hastes de 5/8", 3/4", 7/8" e 1".**

<b>Haste 5/8"</b>							
$\lambda$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,655
c (mm)	1,15	2,30	4,61	6,91	9,22	11,52	15,10
DPc/DPe	1	1,0092	1,0476	1,1055	1,189	1,2865	1,4765
<b>Haste 3/4"</b>							
$\lambda$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,557
c (mm)	1,07	2,14	4,29	6,43	8,58	10,72	11,95
DPc/DPe	1,0038	1,0153	1,0516	1,1134	1,199	1,3119	1,3802
<b>Haste 7/8"</b>							
$\lambda$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,52
c (mm)	0,99	1,99	3,98	5,97	7,96	9,95	10,35
DPc/DPe	1,0031	1,0158	1,0525	1,1185	1,2068	1,3210	1,3487
<b>Haste 1"</b>							
$\lambda$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,306	-	-
c (mm)	0,92	1,83	3,66	5,49	5,60	-	-
DPc/DPe	1,0025	1,0153	1,0556	1,1208	1,1271	-	-

**TABELA 6.6 - Valores da razão entre o diferencial de pressão para o caso concêntrico e excêntrico (DPc/DPe) em função da excentricidade relativa ( $\lambda$ ), para o tubo de 3 1/2" e hastes de 5/8", 3/4", 7/8" e 1".**

<b>Haste de 5/8"</b>								
$\lambda$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,600	0,735
c(mm)	1,50	3,01	6,01	9,01	12,02	15,02	18,03	22,09
DPc/DPe	1,012	1,012	1,05	1,1053	1,1831	1,2727	1,4000	1,5556
<b>Haste de 3/4"</b>								
$\lambda$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,600	0,666
c(mm)	1,42	2,85	5,69	8,53	11,38	14,23	17,07	18,95
DPc/DPe	1	1,0105	1,0435	1,1034	1,1852	1,2973	1,4118	1,5
<b>Haste de 7/8"</b>								
$\lambda$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,60	0,645
c(mm)	1,35	2,69	5,38	8,07	10,76	13,45	16,14	17,35
DPc/DPe	1,0091	1,0183	1,0571	1,1212	1,2065	1,3059	1,4416	1,5
<b>Haste de 1"</b>								
$\lambda$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,400	0,5	-	-
c(mm)	1,26	2,53	5,06	7,59	10,12	12,59	-	-
DPc/DPe	1	1,0078	1,0488	1,1121	1,2056	1,303	-	-

Nas TAB.6.5 e 6.6 (c) é o valor da excentricidade em milímetro, DPc/DPe é a razão entre o diferencial de pressão para o caso concêntrico e excêntrico. Os maiores valores de  $\lambda$  para cada configuração correspondem à situação em que a luva toca na parede do tubo.



**GRÁFICO 6.1 - Influência da excentricidade no diferencial de pressão para as configurações tubo/haste mais utilizadas no campo.**



### 6.3 LUVA E EXTREMIDADES DA HASTE

Para a determinação do diferencial de pressão no anular concêntrico compreendido entre a luva (um cilindro regular) e o tubo, adotou-se o mesmo procedimento utilizado para determinação do diferencial de pressão no anular tubo/haste (Eq.2.22), onde o comprimento é o da luva e o raio do cilindro interno refere-se ao raio luva. Este procedimento só tem sustentação experimental para valores do número de Reynolds axial definido por:

$$Re = \frac{\rho \bar{v}_z 2(a-b)}{\mu} \Rightarrow Re = \frac{2Q}{\pi v(a+b)}$$

na faixa investigada (0 a 150). A TAB.6.7 mostra os valores do número de Reynolds axial (Re) para a configuração tubo 2 7/8" e haste 5/8", que dentre as mencionadas, é aquela que apresenta os maiores valores de Re. Os valores de Re que aparecem sombreados na TAB.6.7 superam o valor máximo investigado de 150.

**TABELA 6.7- Valores dos números de Reynolds axial para a configuração tubo/haste: 2 7/8" x 5/8".**

		TUBO: 2 7/8" com HASTE: 5/8"													
		VAZÃO (m3/d)													
		10	25	30	40	50	75	100	125	150	175	200	250	300	
(cST)		Valores dos Números de Reynolds Axial (Re)													
V	100	19	47	57	76	95	142	189	236	284	331	378	473	567	
I	200	9	24	28	38	47	71	95	118	142	165	189	236	284	
S	300	6	16	19	25	32	47	63	79	95	110	126	158	189	
C.	400	5	12	14	19	24	35	47	59	71	83	95	118	142	
	500	4	9	11	15	19	28	38	47	57	66	76	95	113	
C	600	3	8	9	13	16	24	32	39	47	55	63	79	95	
I	700	3	7	8	11	14	20	27	34	41	47	54	68	81	
N	800	2	6	7	9	12	18	24	30	35	41	47	59	71	
E	900	2	5	6	8	11	16	21	26	32	37	42	53	63	
M	1000	2	5	6	8	9	14	19	24	28	33	38	47	57	
A	1500	1	3	4	5	6	9	13	16	19	22	25	32	38	
T	2000	1	2	3	4	5	7	9	12	14	17	19	24	28	
I	2500	1	2	2	3	4	6	8	9	11	13	15	19	23	
C	3000	1	2	2	3	3	5	6	8	9	11	13	16	19	
A	4000	0	1	1	2	2	4	5	6	7	8	9	12	14	

Para obter-se os valores de  $Re$  na TAB.6.7, entra-se com o valor da viscosidade cinemática do fluido na coluna 2, e com o valor da vazão na linha 2. Exemplo: O valor de  $Re$  para a configuração tubo 2 7/8" e haste de 5/8", para uma vazão de 50 m<sup>3</sup>/d e viscosidade cinemática de 1000 cST é 9, portanto dentro da faixa investigada experimentalmente.

Para a determinação do diferencial de pressão no anular excêntrico compreendido entre a luva e o tubo, adotou-se o mesmo procedimento utilizado para determinação do diferencial de pressão no anular tubo/haste excêntrico, onde utilizou-se a EQ.2.25. O valor do comprimento é o da luva e o raio do cilindro interno refere-se ao raio luva. Este procedimento só tem sustentação experimental para valores dos números de Reynolds axial menores do que 150 (TAB.6.7) e para valores do parâmetros  $\lambda \cdot Re_{\Omega}$  menores do que 12,3 (TAB.6.1 a 6.4).

### 6.3.1 Extremidades da Haste

As extremidades da haste, diferente da luva que é um cilindro regular, possuem geometria complexa (FIG.4.5 e 4.6). Uma boa estimativa do diferencial de pressão que acontece nas extremidades das hastes foi obtida ao considerá-las equivalentes a um cilindro com o mesmo diâmetro da luva e metade do comprimento desta. Este procedimento só tem sustentação experimental para valores do parâmetro  $\lambda \cdot Re_{\Omega}$  menor do que 12,3 e número de Reynolds axial menor do que 150.

### 6.3.2 Influência da Luva e Extremidades da Haste no Diferencial de Pressão

O comprimento da luva, já considerando a participação das extremidades das hastes, é de apenas 0,5 ft (0,15 m), enquanto que o comprimento da haste é de 25 ft (7,62 m). Porém, a depender da configuração tubo/haste utilizada, o diferencial de pressão nas luvas pode ser significativo quando comparado ao diferencial de pressão ao

longo da haste. A TAB.6.8 apresenta em termos percentuais a razão entre o diferencial de pressão na luva mais a extremidade da haste e o diferencial de pressão na haste. Estes valores foram obtidos utilizando-se a EQ.2.22, que trata do caso concêntrico.

**TABELA 6.8 - Comparação entre o diferencial de pressão na luva e ao longo da haste, para o arranjo concêntrico e luva do tipo “slim”.**

Diâmetro da Haste	3/4”	5/8”	7/8”	1”
Tubo 2 7/8”	6%	10%	12%	<b>50%</b>
Tubo 3 1/2”	5%	6%	7%	13%

Observa-se na TAB.6.8 que na configuração tubo 2 7/8” e haste de 1”, apesar da utilização de luva “slim”, que é mais esbelta, verifica-se que a perda de carga localizada nas luvas, apesar de seu comprimento ser de apenas 2% do comprimento das haste, corresponde à metade do diferencial de pressão que acontece ao longo da haste.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1 CONCLUSÕES

- Para o arranjo concêntrico a rotação não exerce qualquer influência no diferencial de pressão axial e pode ser previsto de forma exata pela EQ.2.22, para a condição de fluido Newtoniano, escoamento monofásico, laminar, permanente e desenvolvido.
- A previsão do diferencial de pressão para o caso excêntrico com rotação pode ser obtida pela EQ.2.25, para a condição de fluido Newtoniano, escoamento monofásico, laminar, permanente e desenvolvido, desde que o produto  $\lambda \cdot Re_{\Omega}$  seja inferior a 12,3, devendo-se, contudo, majorar o valor obtido dentro de uma faixa de 8%.
- Tanto para o arranjo concêntrico como para o excêntrico os campos de velocidades radial e tangencial independem do campo de velocidades axial. Uma consequência imediata deste fato é a independência do torque, necessário para promover a rotação da haste imersa em um fluido Newtoniano, com a vazão deste fluido.
- A perda de carga localizada nas luvas pode ser estimada pelas EQ.2.22 e 2.25, conforme seja o arranjo concêntrico ou excêntrico, desde que  $Re$  seja menor do que 150 e  $\lambda \cdot Re_{\Omega}$  seja inferior a 12,3, que correspondem à faixa investigada experimentalmente.
- Uma boa estimativa do diferencial de pressão que acontece nas extremidades das hastes foi obtida ao considerá-las equivalentes a um cilindro regular com o mesmo diâmetro da luva e metade do comprimento desta. Este procedimento só tem

sustentação experimental para valores do parâmetro  $\lambda \cdot Re_{\Omega}$  menor do que 12,3 e número de Reynolds axial menor do que 150.

- Para uma dada vazão o diferencial de pressão axial diminui à medida em que aumenta a excentricidade.

## 7.2 RECOMENDAÇÕES

- Ampliar a faixa de investigação de  $Re$  e  $\lambda \cdot Re_{\Omega}$ , de modo a abranger todas as situações de campo (TAB.6.1 a 6.4) e determinar os valores de  $Re$  e  $\lambda \cdot Re_{\Omega}$  correspondentes ao início da região de instabilidade. Para isto será necessária a utilização de rotações bem superiores às empregadas neste trabalho, portanto sugere-se a pesquisa de outros materiais a serem empregados na confecção da haste, além da utilização de uma haste com comprimento menor do que o utilizado neste trabalho.
- Ampliar a investigação para o caso bifásico, de forma a simular o escoamento de poços com produção de óleo e gás.
- Utilizar fluido não Newtoniano.
- Informatizar a coleta dos dados de pressão.
- O mecanismo de posicionamento do tubo deve permitir a sua movimentação em todas as direções e dispor de um sistema para leitura de excentricidade.
- O equipamento utilizado na medição da rotação deve ser capaz de medi-la através do tubo transparente e do fluido.

## APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DOS MEDIDORES

### A.1 DIMENSIONAMENTO E CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE VAZÃO

#### A.1.1 Dimensionamento

O medidor de vazão utilizado é do tipo resistência linear, que se baseia no fato do diferencial de pressão, entre dois pontos de uma tubulação, variar linearmente com a vazão, quando submetida a um escoamento permanente, laminar e desenvolvido, para um fluido Newtoniano e incompressível [Dally et al, 1993].

Foram utilizados para cobrir a faixa de vazão de 0 a 2000 kg/h três medidores, cujos diâmetros e comprimentos, bem como, o fluido utilizado no tubo em “U” foram determinados a partir da Equação de Hagen-Poiseuille, dada por:

$$M = \frac{\pi g \rho (\rho_{hg} - \rho) D_{me}^4}{128 \mu L} H \quad (A.1)$$

onde:

M= vazão mássica de óleo

g = aceleração da gravidade

$\rho$  = massa específica do óleo

$\rho_{hg}$  = massa específica do mercúrio

$D_{me}$  = Diâmetro do tubo do medidor

$\mu$  = Viscosidade do óleo

L= distância entre as tomadas de pressão do tubo do medidor

H= Diferença entre as alturas das colunas de mercúrio do tubo em “U”

Dos fluidos que dispúnhamos para uso no tubo em “U”, o mercúrio (13600 kg/m<sup>3</sup>) foi o que se mostrou mais adequado.

Os diâmetros e comprimentos dos tubos foram escolhidos de forma que fornecessem alturas de mercúrio compatíveis com o tubo em “U” disponível (TAB.A.1).

Para garantir o escoamento desenvolvido no trecho do tubo compreendido entre as tomadas de pressão dos medidores, estas ficaram localizadas em um trecho onde a uma distância equivalente a  $0,05 D_{mc} Re$  a montante não havia qualquer perturbação no escoamento e 20% deste valor a jusante. Na expressão  $0,05 D_{mc} Re$ ,  $D_{mc}$  é o diâmetro da tubulação e  $Re$  é o Número de Reynolds axial.

**Tabela A.1 - Características dos medidores de vazão.**

<b>Características</b>	<b>Medidor I</b>	<b>Medidor II</b>	<b>Medidor III</b>
Faixa de Vazão (kg/h)	0-150	150-500	500-2000
Alturas de Hg (pol)	6,2 até 24,2	4,3 até 22,8	5,6 até 19,5
Diâmetro Nominal (pol)	3/8	3/8	1/2
Diâmetro Interno (mm)	7,8	7,8	13,8
Distância da Entrada (m)	0,90	1,10	1,10
Distância da Saída (m)	0,25	1,05	0,55
Comprimento (m)	1,50	0,50	1,0
Equação do Medidor	$M=6,59H-2,06$	$M=19,79H+0,33$	$M = 97,46H-8,61$

#### **A.1.2 Procedimento de Calibração do Medidor de Vazão**

Na determinação das vazões mássicas utilizou-se uma balança com capacidade para 300 kg e precisão de 0,1 kg e um cronômetro com precisão de centésimo de segundo. Para medição do diferencial de pressão empregou-se um tubo em “U” graduado em décimo de polegada com capacidade para medições de até de 25 pol. Para calibração do medidor procede-se da seguinte forma:

- Seleciona-se o medidor a ser calibrado através das válvulas V10 e V11 e os “manifolds” 1 e 2 (FIG. 4.9 ).

- Liga-se a bomba e direciona-se o fluxo para a linha de retorno (FIG.4.9). Nesta situação de vazão zero, as alturas de mercúrio nas duas hastes do tubo em “U” devem ser iguais.
- Ajusta-se a vazão através das válvulas V5, V8 e V9 de modo a obter-se a altura de mercúrio desejada (FIG.4.9).
- Após passar pelo medidor de vazão o fluxo de óleo é direcionado para o tanque de operação, instalado sobre uma balança.
- Para cada altura de mercúrio é determinada a vazão mássica correspondente, que é obtida pela razão entre as leituras inicial e final da balança e o tempo correspondente.
- Mede-se a temperatura no instante inicial e final e determina-se a temperatura média do fluido.
- Determina-se a viscosidade do fluido a partir da EQ.4.1.
- Corrige-se a vazão mássica para viscosidade de calibração ( $\mu^* = 100$  cP).

$$M = M_T \frac{\mu}{\mu^*} . \text{ Onde } M \text{ e } \mu^* \text{ são, respectivamente, a vazão mássica e a viscosidade}$$

na condição padrão ( temperatura de 26,4 °C correspondente a uma viscosidade de 100 cP) e  $M_T$  e  $\mu$  são referentes à temperatura do fluido durante a calibração.

Plotam-se os vários pontos de altura de mercúrio x vazão mássica corrigida. O ajuste destes pontos que, invariavelmente, foi uma reta, permitiu relacionar a altura de mercúrio do tubo em “U” a uma determinada vazão mássica à viscosidade de 100 cP.

Os dados experimentais referentes à calibração dos três medidores de vazão são apresentados na TAB.A.2 e nos GRAF.A.1, A.2, A.3. Os gráficos possuem na abscissa os valores da altura de mercúrio e na ordenada os valores da vazão mássica na condição padrão ( $T= 26,4$  °C). Pode-se observar, nos três gráficos, o comportamento linear da vazão mássica com a altura de mercúrio, conforme previsto na EQ.A.1.



Tabela A.2 Dados referente à calibração dos três medidores de vazão.

Medidor	Massa (kg)	Tempo (seg)	Altura de Mercúrio (pol)	Temperatura (°C)	Viscosidade (cP)	Vazão @ 100cP (kg/h)
<b>Medidor I</b> D=3/8" L=1,5 m	0,0	0,0	0,0	31,3	75,1	0,0
	7,5	547	6,18	31,3	75,1	37,1
	10	385	12,19	29,8	82,0	76,7
	10	262	18,26	29,0	86,0	118,1
	10	204	24,21	28,2	90,1	159,0
<b>Medidor II</b> D=3/8" L=0,5 m	0,0	0,0	0,0	30,0	81,1	0,0
	10	354	4,28	30,0	81,1	82,6
	20	327	9,97	28,2	90,1	198,4
	30	316	16,35	27,0	96,6	330,3
	30	234	22,79	27,0	96,6	446,7
<b>Medidor III</b> D=1/2" L=1,0 m	20	130	5,6	27,0	96,6	536,3
	30	139	7,49	27,5	93,8	728,8
	40	130	11,75	26,0	102,2	1128,3
	40	93	15,58	26,8	97,7	1506,3
	40	82	19,49	25,0	108,1	1896,0

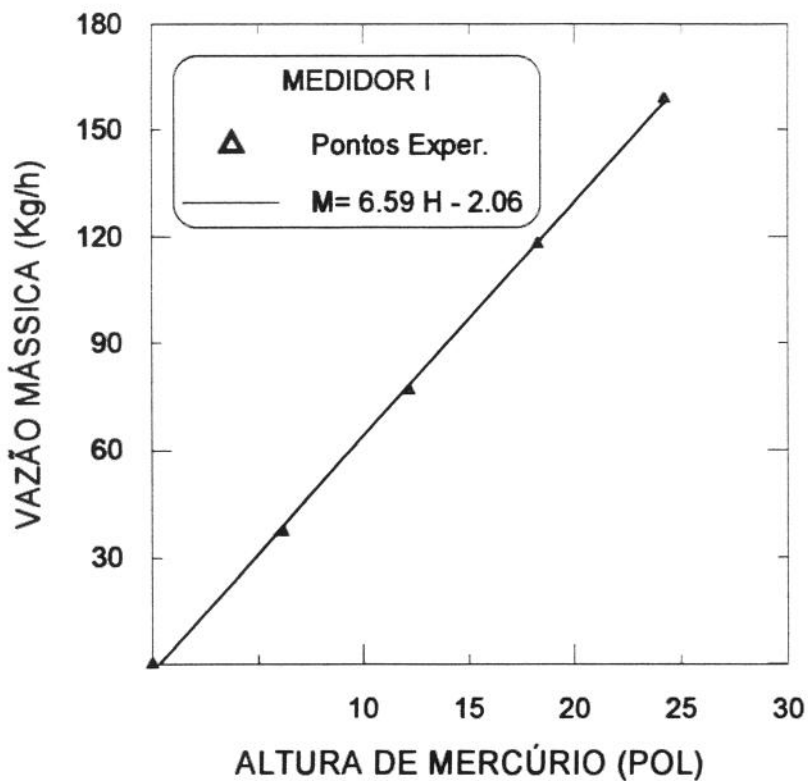
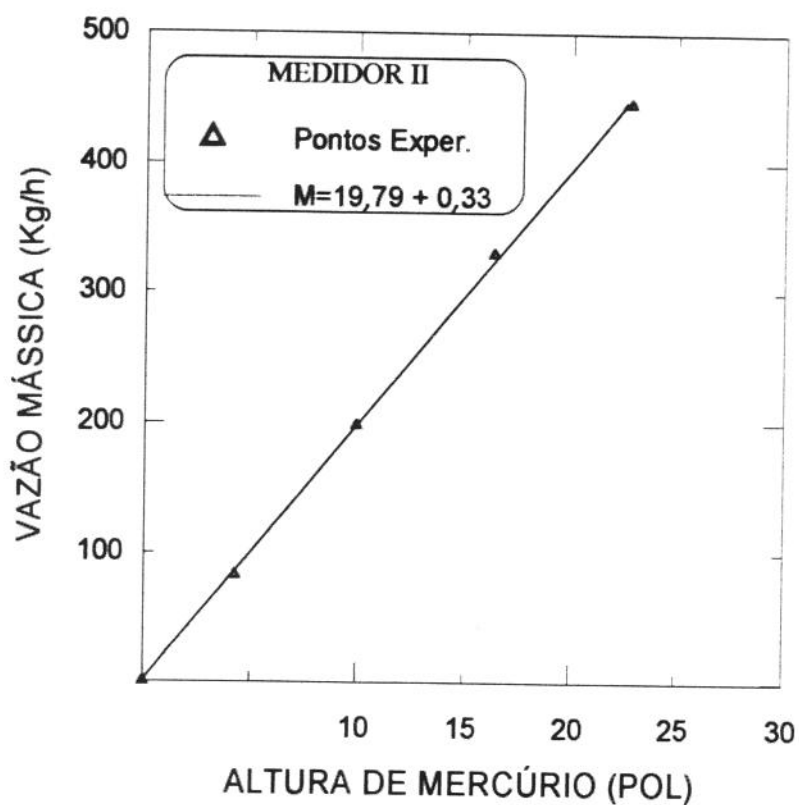
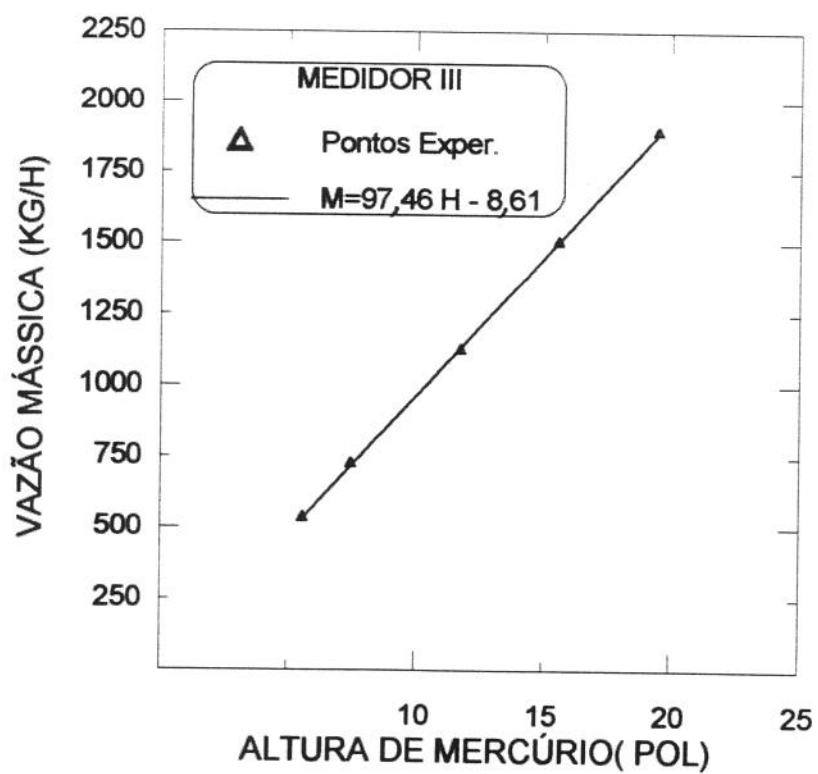


GRÁFICO A.1 - Calibração do Medidor de Vazão I.



**GRÁFICO A.2 - Calibração do Medidor de Vazão II.**



**GRÁFICO A.3 - Calibração do Medidor de Vazão III.**

## A.2 CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE PRESSÃO

O medidor do diferencial de pressão, Validyne CD23, foi calibrado utilizando-se como padrão de pressão um tubo em “U” com água e capacidade para medir pressões de até 1000 mmca (FIG.4.8). Uma das hastes do tubo em “U” foi aberta para a atmosfera e a outra interligada ao transdutor a ser calibrado através de uma mangueira. A esta mangueira foi também interligada uma seringa de 20 ml cujo acionamento, pela adição ou retirada de ar, fornecia a pressão desejada, que era lida no tubo em “U”. Segue procedimento utilizado na calibração do medidor .

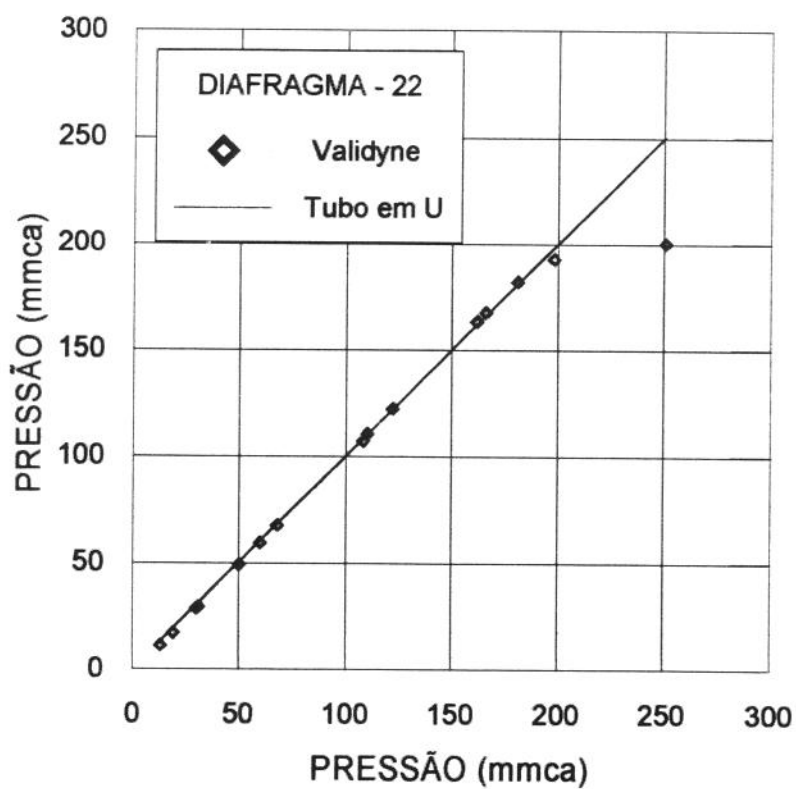
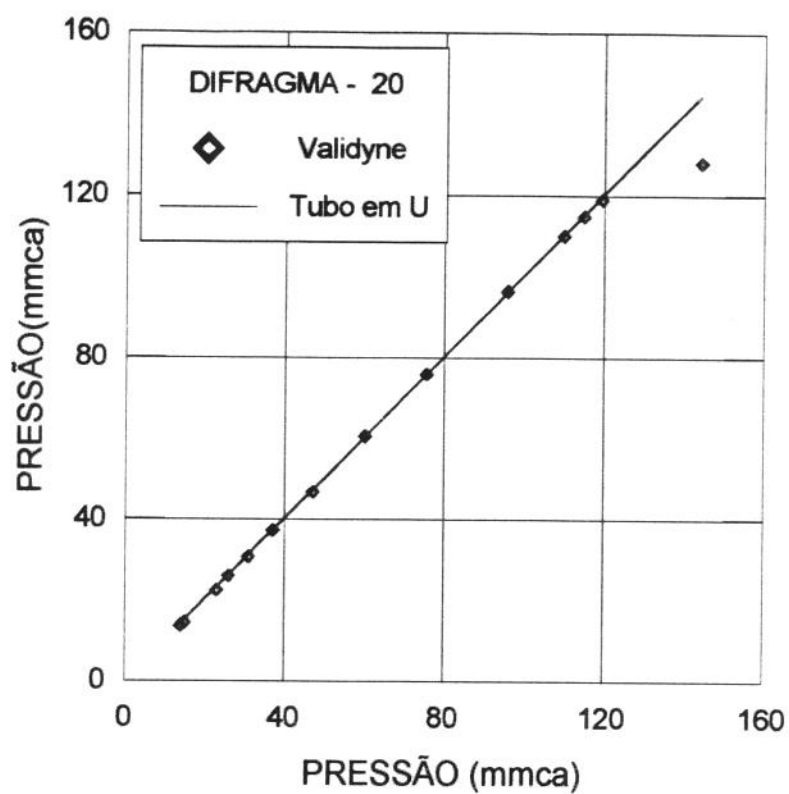
- O lado positivo do transdutor é interligado a haste do tubo em “U” que encontra-se submetida à pressão, e o lado negativo é mantido aberto para a atmosfera.
- Conecta-se, via cabo, o CD23 ao Transdutor .
- Interliga-se o CD23 à fonte de energia elétrica.
- Liga-se o CD23 através da chave liga x desligada localizada em sua parte frontal.
- Posiciona-se a chave Range, localizada ao lado da chave liga x desliga, na posição LOW.
- Neste momento os níveis de água do tubo em “U” devem ser iguais, pois nenhuma pressão deve estar aplicada ao transdutor.
- Na parte frontal do CD23 há um ajustador para o Zero e um outro para o Span. O ajustador do zero deve ser posicionado de tal forma que o visor do CD23 indique 0,00. Feito isto, trava-se este ajustador de modo que não haja qualquer mudança de seu posicionamento enquanto o CD23 for utilizado.
- Muda-se a chave Range para a posição HI.
- Para cada diafragma há uma faixa de pressão de trabalho específica (TAB.A.3). Aplica-se, então, uma pressão igual ao maior valor desta faixa.

**TABELA A.3 - Faixa de pressão (mmca) dos diafragmas utilizados.**

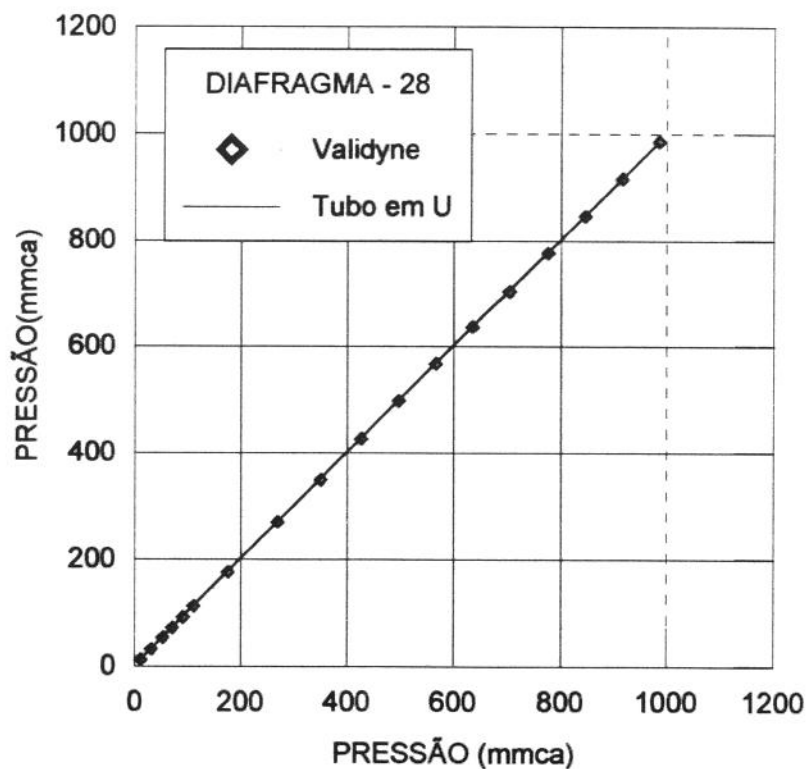
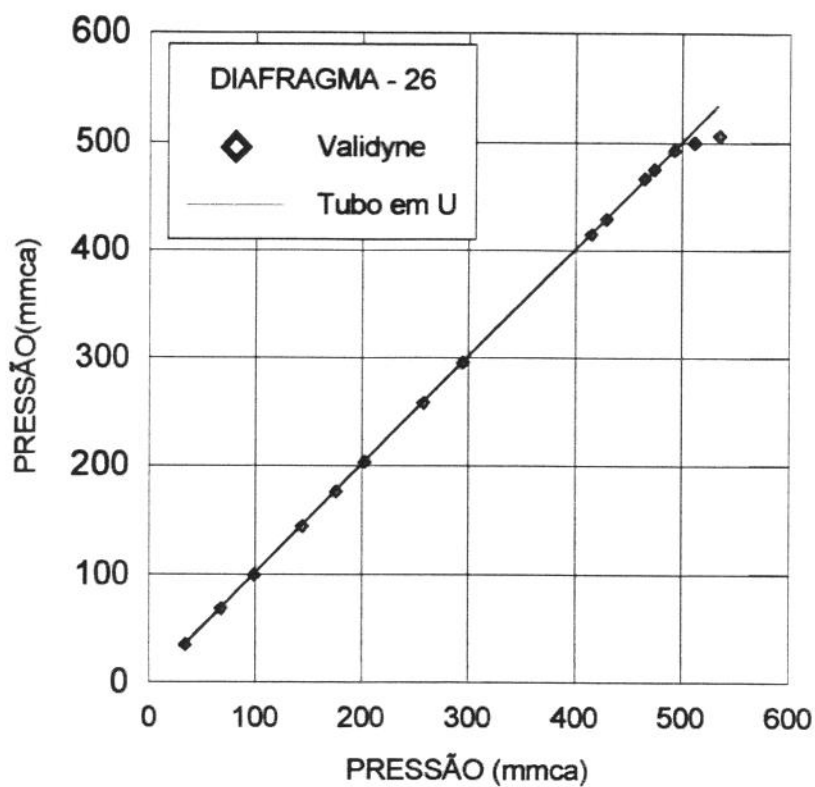
Diafragma número	20	22	26	28	30
$\Delta P$ (mmca)	56-88	88-140	225-350	350-560	560-880

- Ajusta-se o Span, localizado ao lado da chave liga x desliga de tal forma que o visor do CD23 apresente o valor 100,00. Trava-se este ajustador.
- Feito isto, o CD23 está pronto para ser utilizado.
- A determinação da pressão correspondente à leitura do CD23 é obtida multiplicando-se uma constante pelo valor da leitura. Esta constante é obtida dividindo-se o valor da pressão indicada no tubo em “U”, correspondente à leitura de 100,00 no CD23, por 100. Isto é possível, pois, dentro da faixa de pressão característica de cada diafragma, a leitura do CD23 varia linearmente com a pressão.

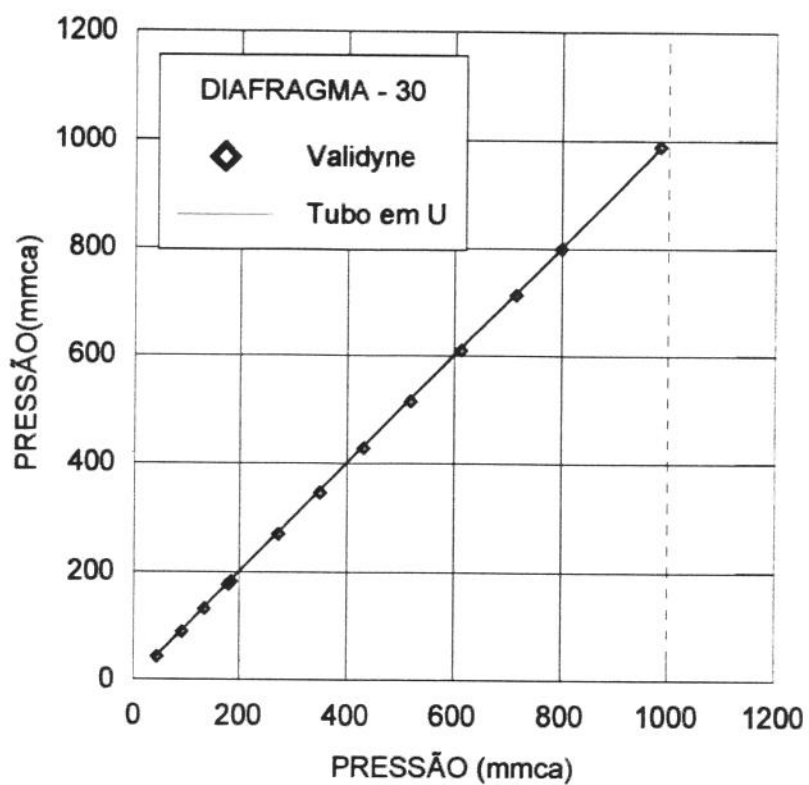
Para cada transdutor foi verificada a faixa de pressão em que a variação da leitura do CD23 mantinha-se linear com a pressão, conforme mostram os GRAF.A.4, A.5 e A.6. A partir destes gráficos comprovou-se que para valores dentro da faixa estabelecida na TAB.A.3 os resultados das pressões obtidas no CD23 coincidem com os valores do padrão. Este comportamento também foi observado para valores abaixo da faixa estabelecida, porém para valores acima da faixa o comportamento linear só é verificado até um valor cerca de 30% maior do que o limite superior da faixa. Além deste fato, há a possibilidade de deformação definitiva do diafragma, caso utilize-se valores 1,5 vezes o limite superior da faixa.



**GRÁFICO A.4 - Dados experimentais da calibração dos transdutores de pressão equipados com os diafragmas de números 20 e 22.**



**GRÁFICO A.5 - Dados experimentais da calibração dos transdutores de pressão equipados com os diafragmas de números 26 e 28.**



**GRÁFICO A.6 - Dados experimentais da calibração dos transdutor de pressão equipado com o diafragma de número 30.**

## APÊNDICE B - MEDIDAS DE EXCENTRICIDADE DA HASTE

Os dados com as medidas das excentricidades encontram-se nas TAB. B.1 e B.2.

Para cada tomada de pressão fez-se medidas de excentricidade em quatro diferentes posições, denominadas de posições I, II, III, IV, defasadas de 90 graus uma da outra.

**TABELA B.1 - Determinação da excentricidade da haste sem luva no trecho compreendido entre as tomadas de pressão 1 e 5.**

Tomada de pressão	Posição I 0°	Posição II 90°	Posição III 180°	Posição IV 270°	Média (mm)
1	4,87	4,35	4,53	5,08	4,71
2	4,91	4,34	4,47	4,51	4,56
3	4,53	4,25	4,47	5,02	4,57
4	4,95	4,81	4,97	4,73	4,87
5	4,95	5,11	5,36	5,27	5,17
					Excentricidade= 4,7mm

A excentricidade média de 4,7 mm foi obtida pela média ponderada em relação ao comprimento que cada uma delas representa.

**TABELA B.2 - Determinação da excentricidade da haste com luva no trecho compreendido entre as tomadas de pressão 1 e 5.**

Tomada de pressão	Posição I 0°	Posição II 90°	Posição III 180°	Posição IV 270°	Média (mm)
1	4,80	5,33	5,45	5,01	5,15
2	4,95	5,42	5,38	4,98	5,18
3	5,08	4,96	4,88	5,06	4,99
4	4,73	4,75	4,76	4,83	4,77
5	5,03	4,52	4,42	5,03	4,75
					Excentricidade=5,0 mm

A excentricidade média no trecho é de 5,0 mm. Determinada da mesma forma utilizada na TAB.B.1. As variações de excentricidade para uma mesma tomada, apenas pelo fato de girarmos a haste, foi atribuída, principalmente, a empenos da haste.



## BIBLIOGRAFIA

**Astil, K.N., Garley, J.T., Martin, B.W.** "The developing tangential velocity profile for axial flow in an annulus with a rotating inner cylinder". Proc. Roy. Soc, vol.307, p.55-69, mar. 1968.

**Bird, R.B. et al.** "Transport Phenomena". Willey International Edition, 1960. p.51-53, 85.

**Caetano F.E.** "Upward vertical two-phase flow through an annulus". The University of Tulsa, 1985. (Tese de Doutorado).

**Coney, J.E.R., EL-Shaarawi, M.A.I.** "A contribution to the numerical solution of developing laminar flow in the entrance region of concentric annuli with rotating inner walls". Transactions of the ASME - Journal of Fluids Engineering, p.333-340, dec. 1974.

**Correa, J.F.S.** "Notas de aula do curso de bombas de cavidades progressivas". 3ª Ed., jan. 1990.

**Dally, J.W, Riley, W.F., McConnell, K.G.** "Instrumentation for Engineering Measurements". Edit. John Wiley & Sons , Inc., 2ª Ed. 1993.

**Guckes, T.L.** "Laminar flow of non-Newtonian fluids in eccentric anullus". Transactions of the ASME, vol 97, p 498-506, may 1975.

**Gibaldi, J.C., Shiratori, N., Pasquetti, A., Abath, E.E., Lucena, F., Neves, C.R., Vinturini, W.L.** "Sistema de bombeio por cavidades progressivas: uma alternativa técnico-econômica crescente na elevação artificial de óleo". Trabalho apresentado no 5º congresso brasileiro de petróleo-1994.

SPE 25417 presented at the SPE production operations symposium, march 1993,  
Oklahoma-EUA.