

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

***Avaliação Experimental da Redução do Fluxo de Massa em  
Tubos Capilares pela Deposição de Óleo Éster***

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA**  
**À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE**  
**EM ENGENHARIA MECÂNICA**

***Jackson Braz Marcinichen***

**FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 2001**

**Avaliação Experimental da Redução do Fluxo de Massa em Tubos  
Capilares pela Deposição de Óleo Éster**

**Jackson Braz Marcinichen**

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO

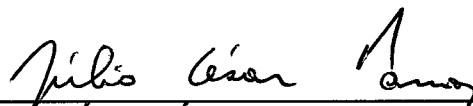
DE

**MESTRE EM ENGENHARIA**

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO CIÊNCIAS TÉRMICAS  
E APROVADA EM SUA FASE FINAL PELO CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

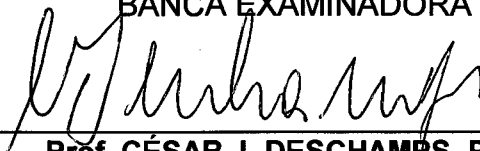


Prof. CLÁUDIO MELO, Ph.D.  
ORIENTADOR

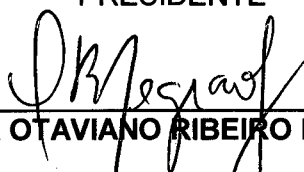


Prof. JÚLIO CÉSAR PASSOS, Dr.  
COORDENADOR DE CURSO

BANCA EXAMINADORA



Prof. CÉSAR J. DESCHAMPS, Ph.D.  
PRESIDENTE



Prof. CÉZAR OTAVIANO RIBEIRO NEGRÃO, Ph.D.



LUÍS C. PASSONI, Dr.



**"Vitorioso não é aquele que  
Vence os outros, mas o que  
Vence a si mesmo,  
Dominando seus vícios e  
Superando seus desafios."**

*Agradeço,*

*a Deus,*

*ao professor Cláudio Melo, pela oportunidade, confiança, conhecimentos transmitidos, amizade e incentivo,*

*à EMBRACO S.A., pelo apoio técnico e financeiro,*

*aos técnicos, graduandos e engenheiros, Gustavo, Luís, Marcelo, Otávio, Rodrigues, Ricardo e Samuel pela dedicação e competência na realização de suas tarefas,*

*aos amigos e amigas, Alexandre, Felipe, Fernando, Heitor, Melisa, Paulo e Samuel, pelo apoio e companheirismo,*

*aos meus familiares, pelo apoio emocional,*

*enfim, a todos que estiveram comigo, de alguma forma, nesta caminhada.*

# SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Símbolos.....</b>	<b>xvi</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>xxii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 - Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 - Sistema de Refrigeração.....	3
1.2 - Tubo Capilar.....	5
1.3 - Fluidos Refrigerantes.....	8
1.4 - Obstrução de Tubos Capilares.....	10
1.5 - Revisão Bibliográfica.....	12
1.6 - Objetivos .....	15
<b>2 - Bancada Experimental para Controle das Condições na Entrada do Tubo Capilar.....</b>	<b>18</b>
2.1 - Sistema de Refrigeração.....	18
2.2 - Calibração do Sistema de Medição.....	22
<b>3 - Ajuste e Verificação do Funcionamento dos Componentes da Bancada .....</b>	<b>23</b>
<b>4 - Medição da Concentração de Óleo no Fluido Refrigerante.....</b>	<b>31</b>
<b>5 - Bomba Dosadora .....</b>	<b>35</b>
5.1 - Efeitos da Dosagem Pulsante sobre o Escoamento de Fluido Refrigerante .....	35
5.2 - Efeito da Dosagem de Óleo sobre o Fluxo de Massa através do Tubo Capilar .....	39
5.3 - Efeito do Óleo sobre a Variação do Fluxo de Massa .....	43
5.4 - Análise de um Teste Típico.....	45

<b>6 - Investigações Complementares .....</b>	<b>50</b>
6.1 - Regime Transiente.....	50
6.2 - Regime Permanente .....	57
<b>7 - Análise do Fluxo de Massa em Função do Diâmetro e do Comprimento do Tubo Capilar .....</b>	<b>67</b>
<b>8 - Conclusões.....</b>	<b>80</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>81</b>
<b>Apêndices.....</b>	<b>83</b>
<b>Apêndice I - Sistema Elétrico, Listagem dos Códigos do Circuito de Refrigeração e Especificação dos Equipamentos da Bancada.....</b>	<b>84</b>
<b>Apêndice II - Calibração dos Transdutores, Medição do Diâmetro Interno do Tubo Capilar e Determinação da Densidade dos Óleos Éster .....</b>	<b>101</b>
<b>Apêndice III - Medição da Vazão de Nitrogênio através do Tubo Capilar.....</b>	<b>120</b>
<b>Apêndice IV - Resultados de Três Testes Típicos .....</b>	<b>124</b>
<b>Apêndice V - Pontos de Medição.....</b>	<b>130</b>
<b>Apêndice VI - Perfil de Temperatura / Funcionamento da Bancada com Dois Compressores Ligados em Série .....</b>	<b>132</b>
<b>Apêndice VII - Norma ASHRAE 41.4 (1996) / Concentração de Óleo em Fluido Refrigerante .....</b>	<b>135</b>
<b>Apêndice VIII - Adaptação da Norma para Realização dos Testes Preliminares.....</b>	<b>139</b>
<b>Apêndice IX - Padrão Modificado para Medição da Concentração de Óleo em Fluido Refrigerante .....</b>	<b>144</b>
<b>Apêndice X - Fluxo de Massa versus Tempo e Critério de Regime Permanente / Dosagem de Óleo .....</b>	<b>146</b>

<b>Apêndice XI - Medição da Vazão de Nitrogênio .....</b>	<b>153</b>
<b>Apêndice XII - Detalhes da Instrumentação e Montagem dos Tubos Capilares Testados .....</b>	<b>164</b>
<b>Apêndice XIII - Medição do Diâmetro Interno dos Tubos Capilares .....</b>	<b>168</b>
<b>Apêndice XIV - Resultados dos Tubos Capilares da Matriz de Testes .....</b>	<b>172</b>
<b>Apêndice XV - Vazão de Nitrogênio através dos Tubos Capilares da Matriz de Testes .....</b>	<b>180</b>

## Lista de Figuras

1.1 Consumo de energia por setor / Setembro de 2000 .....	2
1.2 Ciclo básico de refrigeração .....	3
1.3 Diagrama pressão-entalpia .....	4
1.4 Ciclo de refrigeração com trocador de calor .....	7
1.5 Concentração média de ozônio / Antártida .....	9
2.1 Circuito de refrigeração / bancada de obstrução de tubos capilares .....	18
3.1 Conexões de fixação do tubo capilar .....	23
3.2 Pontos de medição de pressão e temperatura nas extremidades do tubo capilar .....	24
3.3 Fluxo de massa vs. subresfriamento .....	28
3.4 Fluxo de massa vs. subresfriamento (Gonçalves, 1994) .....	28
3.5 Fluxo de massa calculado vs. experimental .....	29
5.1 Oscilação do fluxo de massa durante a dosagem .....	36
5.2 Oscilação da pressão na entrada do tubo capilar durante a dosagem .....	36
5.3 Balanço de massa (Bomba dosadora/Tubo capilar/Medidor de fluxo) .....	37
5.4 Fluxo de massa vs tempo / cap01teste76 .....	39
5.5 Concentração vs tempo / cap01teste76 .....	40
5.6 Fluxo de massa vs. tempo / 48horas / cap01teste80 .....	41
5.7 Concentração vs. tempo / 48horas / cap01teste80 .....	41
5.8 Fluxo de massa vs. tempo / repetibilidade .....	42
5.9 Perfil de pressão ao longo de um tubo capilar .....	43
5.10 Perfil de pressão num tubo capilar - efeito do grau de subresfriamento .....	44
5.11 Fluxo de massa vs. tempo durante 86,47horas de dosagem de óleo .....	45
5.12 Concentração vs. tempo durante 86,47horas de dosagem de óleo .....	46
5.13 Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo / T03 a T10 .....	47

5.14	<i>Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo / T11 a T13</i> .....	47
5.15	<i>Perfil de temperatura ao longo do tubo capilar antes e ao final da dosagem</i> .....	48
5.16	<i>Fluxo de massa no instante das coletas</i> .....	49
6.1	<i>Salto do fluxo de massa / intervalos para taxa de decaimento</i> .....	51
6.2	<i>Fluxo de massa vs. tempo / efeito do subresfriamento / regime transiente</i> .....	52
6.3	<i>Fluxo de massa vs. tempo / efeito da concentração / regime transiente</i> .....	54
6.4	<i>Fluxo de massa vs. tempo / efeito do tipo de óleo / regime transiente</i> .....	56
6.5	<i>Fluxo de massa vs. tempo / efeito do tipo de óleo / regime permanente</i> .....	58
6.6	<i>Variação da concentração nos testes com óleo <math>\alpha 10W</math> e <math>\alpha 22E</math></i> .....	59
6.7	<i>Região de regime permanente / óleo <math>\alpha 10W</math></i> .....	59
6.8	<i>Região de regime permanente / óleo <math>\alpha 22E</math></i> .....	60
6.9	<i>Perfis de temperatura ao longo do tubo capilar / testes com <math>\alpha 10W</math> e <math>\alpha 22E</math></i> .....	60
6.10	<i>Fluxo de massa vs. tempo / efeito da concentração / regime permanente</i> .....	61
6.11	<i>Fluxo de massa vs. tempo para concentração controlada</i> .....	62
6.12	<i>Concentração de óleo controlada</i> .....	63
6.13	<i>Redução do fluxo de massa / 48 horas em função do tempo</i> .....	64
7.1	<i>Redução de fluxo de massa / Capilar 2</i> .....	68
7.2	<i>Perfil de temperatura ao longo do tubo capilar / Capilar 2</i> .....	69
7.3	<i>Redução de fluxo de massa / Capilar 3</i> .....	69
7.4	<i>Perfil de temperatura ao longo do tubo capilar / Capilar 3</i> .....	70
7.5	<i>Redução de fluxo de massa / Capilar 4</i> .....	70
7.6	<i>Perfil de temperatura ao longo do tubo capilar / Capilar 4</i> .....	71
7.7	<i>Redução de fluxo de massa / Capilar 5</i> .....	71
7.8	<i>Perfil de temperatura ao longo do tubo capilar / Capilar 5</i> .....	72
7.9	<i>Equação 7.1 vs. resultados experimentais</i> .....	73
7.10	<i>Equação 7.1 vs. programa CAPILAR / diâmetro interno</i> .....	74
7.11	<i>Equação 7.1 vs. programa CAPILAR / comprimento</i> .....	75
7.12	<i>Equação 7.2 vs. resultados experimentais</i> .....	76

7.13 Redução no fluxo de massa em função do diâmetro e comprimento do capilar .....	77
---	----

## **Apêndices**

I.1 Fluxograma da seqüência de partida dos componentes.....	84
I.2 Circuito elétrico / bancada de obstrução de tubos capilares .....	84
II.1 Calibração do medidor turbina .....	105
II.2 Medição da vazão de nitrogênio .....	112
III.1 Pressão de nitrogênio na entrada do tubo capilar .....	123
IV.1 Perfil de temperatura / cap01teste17 .....	125
IV.2 Intervalo de 5 minutos utilizado no processamento / cap01teste17 .....	125
IV.3 Perfil de temperatura / cap01teste22 .....	127
IV.4 Intervalo de 5 minutos utilizado no processamento / cap01teste22 .....	127
IV.5 Perfil de temperatura / cap01teste26 .....	129
IV.6 Intervalo de 5 minutos utilizado no processamento / cap01teste26 .....	129
VI.1 Perfil de temperatura / cap01teste43 .....	132
VI.2 Perfil de temperatura / cap01teste47 .....	133
VI.3 Perfil de temperatura / cap01teste49 .....	134
VIII.1 Cilindro padrão de teste .....	139
X.1 Fluxo de massa vs. tempo / teste "cap01teste80" .....	146
X.2 Fluxo de massa vs. tempo / teste "cap01teste85" .....	147
X.3 Fluxo de massa vs. tempo / teste "cap01teste89" .....	147
X.4 Fluxo de massa vs. tempo / teste "cap01teste94" [0,11% a 0,15%] / regime permanente .....	148



X.5 Fluxo de massa vs. tempo / teste "cap01teste142".....	148
X.6 Fluxo de massa vs. tempo / teste "cap01teste156"	
[0,47% a 0,63%] / regime permanente.....	149
X.7 Fluxo de massa vs. tempo / teste "cap01teste163"	
[0,55% a 0,74%] / regime permanente.....	149
X.8 Fluxo de massa vs. tempo / teste "cap01teste171"	
[1,49% a 2,65%] / regime permanente não estabelecido.....	150
X.9 Fluxo de massa vs. tempo / teste "cap01teste176"	
[0,90% a 1,05%] / regime permanente.....	150
X.10 Critério de regime permanente / teste "cap01teste94"	
[0,11% a 0,15%] - $\alpha_{22E}$ .....	151
X.11 Critério de regime permanente / teste "cap01teste156"	
[0,47% a 0,63%] - $\alpha_{10W}$ .....	151
X.12 Critério de regime permanente / teste "cap01teste163"	
[0,55% a 0,74%] - $\alpha_{22E}$ .....	152
X.13 Critério de regime permanente / teste "cap01teste176"	
[0,90% a 1,05%] - $\alpha_{22E}$ .....	152
XI.1 Teste com tubo capilar limpo / desobstruído.....	154
XI.2 Teste com tubo capilar obstruído / Teste 1.....	155
XI.3 Teste com tubo capilar obstruído / Teste 2.....	156
XI.4 Teste com tubo capilar obstruído / Teste 3.....	157
XI.5 Teste após 1ª lavagem do tubo capilar / Teste 1.....	158
XI.6 Teste após 1ª lavagem do tubo capilar / Teste 2.....	159
XI.7 Teste após 1ª lavagem do tubo capilar / Teste 3.....	160
XI.8 Teste após 2ª lavagem do tubo capilar / Teste 1.....	161
XI.9 Teste após 2ª lavagem do tubo capilar / Teste 2.....	162
XI.10 Teste após 2ª lavagem do tubo capilar / Teste 3.....	163

XIV.1 Critério de regime permanente / Capilar2.....	172
XIV.2 Concentração controlada / Capilar2.....	172
XIV.3 Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo (1) / Capilar2.....	173
XIV.4 Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo (2) / Capilar2.....	173
XIV.5 Critério de regime permanente / Capilar3.....	174
XIV.6 Concentração controlada / Capilar3.....	174
XIV.7 Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo (1) / Capilar3.....	175
XIV.8 Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo (2) / Capilar3.....	175
XIV.9 Critério de regime permanente / Capilar4.....	176
XIV.10 Concentração controlada / Capilar4.....	176
XIV.11 Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo (1) / Capilar4.....	177
XIV.12 Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo (2) / Capilar4.....	177
XIV.13 Critério de regime permanente / Capilar5.....	178
XIV.14 Concentração controlada / Capilar5.....	178
XIV.15 Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo (1) / Capilar5.....	179
XIV.16 Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo (2) / Capilar5.....	179

## **Lista de Tabelas**

1.1 Geometria dos tubos capilares testados .....	12
3.1 Parâmetros do controlador PID.....	25
3.2 Resultados dos testes .....	27
3.3 Estabilização da bancada com dois compressores em série .....	30
4.1 Medição de concentração de óleo no refrigerante.....	31
4.2 Condição de operação da bancada antes e após a coleta do fluido refrigerante.....	33
4.3 Concentração de óleo no fluido refrigerante na entrada do tubo capilar / Testes somente com separadores de óleo.....	33
4.4 Condição de operação da bancada antes da coleta do fluido refrigerante .....	33
5.1 Concentração de óleo no fluido refrigerante / verificação da homogeneidade.....	38
5.2 Concentração de óleo no fluido refrigerante antes de finalizar a dosagem .....	48
6.1 Testes analisados / efeito do grau de subresfriamento.....	51
6.2 Efeito do grau de subresfriamento na taxa de decaimento .....	52
6.3 Testes analisados / efeito da concentração de óleo .....	53
6.4 Efeito da concentração de óleo na taxa de decaimento.....	54
6.5 Testes analisados / efeito do tipo de óleo .....	55
6.6 Efeito do tipo de óleo na taxa de decaimento.....	56
6.7 Critério de regime permanente / avaliação do efeito da concentração.....	64
6.8 Vazão de nitrogênio através do tubo capilar.....	65
6.9 Redução percentual / HFC134a vs. Nitrogênio .....	66
7.1 Dimensões dos tubos capilares .....	68
7.2 Redução do fluxo de massa .....	72

7.3 Redução percentual de vazão / HFC134a vs. Nitrogênio .....	78
--	----

## **Apêndices**

II.1 Calibração do Coriolis / Fabricante .....	101
II.2 Calibração dos transdutores de pressão.....	102
II.3 Coeficiente de Student vs. número de pontos da amostra.....	103
II.4 Resultados da calibração do medidor turbina.....	106
II.5 Aferição da bomba dosadora.....	110
II.6 Medição da vazão de nitrogênio .....	113
II.7 Medição do diâmetro / Capilar 1 .....	114
II.8 Diâmetro Capilar 1 (microcópico / feixe de laser).....	116
II.9 Avaliação da densidade do óleo éster $\alpha$ 22E.....	118
II.10 Avaliação das densidades dos óleos éster $\alpha$ 10W, RL22H e RL10H.....	119
III.1 Vazão de nitrogênio / Pressão de 2,001bar.....	120
III.2 Vazão de nitrogênio / Pressão de 2,215bar.....	121
III.3 Vazão de nitrogênio / Pressão de 2,399bar.....	122
IV.1 Resultados processados no tempo de 1,5 minuto / cap01teste17.....	124
IV.2 Resultados processados no tempo de 1,5 minuto / cap01teste22.....	126
IV.3 Resultados processados no tempo de 1,5 minuto / cap01teste26.....	128
V.1 Instrumentação no tubo capilar .....	130
V.2 Instrumentação na bancada .....	131
VI.1 Condição de regime estabilizado / cap01teste43.....	132
VI.2 Condição de regime estabilizado / cap01teste47.....	133
VI.3 Condição de regime estabilizado / cap01teste49.....	134

XI.1	Teste com tubo capilar limpo / desobstruído.....	154
XI.2	Teste com tubo capilar obstruído / Teste 1.....	155
XI.3	Teste com tubo capilar obstruído / Teste 2.....	156
XI.4	Teste com tubo capilar obstruído / Teste 3.....	157
XI.5	Teste após 1ª lavagem do tubo capilar / Teste 1.....	158
XI.6	Teste após 1ª lavagem do tubo capilar / Teste 2.....	159
XI.7	Teste após 1ª lavagem do tubo capilar / Teste 3.....	160
XI.8	Teste após 2ª lavagem do tubo capilar / Teste 1.....	161
XI.9	Teste após 2ª lavagem do tubo capilar / Teste 2.....	162
XI.10	Teste após 2ª lavagem do tubo capilar / Teste 3.....	163
XII.1	Instrumentação do Capilar 2.....	164
XII.2	Instrumentação do Capilar 3.....	165
XII.3	Instrumentação do Capilar 4.....	166
XII.4	Instrumentação do Capilar 5.....	167
XIII.1	Diâmetro do Capilar 2 / vazão de nitrogênio.....	168
XIII.2	Diâmetro do Capilar 2 (microscópio / feixe de laser).....	168
XIII.3	Diâmetro do Capilar 3 / vazão de nitrogênio.....	169
XIII.4	Diâmetro do Capilar 3 (microscópio / feixe de laser).....	169
XIII.5	Diâmetro do Capilar 4 / vazão de nitrogênio.....	170
XIII.6	Diâmetro do Capilar 4 (microscópio / feixe de laser).....	170
XIII.7	Diâmetro do Capilar 5 / vazão de nitrogênio.....	171
XIII.8	Diâmetro do Capilar 5 (microscópio / feixe de laser).....	171
XV.1	Vazão de nitrogênio / Capilar 2.....	180
XV.2	Vazão de nitrogênio / Capilar 3.....	180
XV.3	Vazão de nitrogênio / Capilar 4.....	181
XV.4	Vazão de nitrogênio / Capilar 5.....	181

## ***Lista de Símbolos***

$boc1$	Pressão na saída do tubo capilar, bar
$boc3$	Pressão de sucção do compressor CNC, bar
$boc4$	Pressão na entrada do tubo capilar, bar
$boc5$	Pressão na entrada do medidor turbina, bar
$C_{br}$	Concentração medida na base de fluido refrigerante puro, %
$C_{brm}$	Concentração calculada através da relação entre os fluxos de massa na base de fluido refrigerante puro, %
$C_{brm\text{médio}}$	Valor médio da concentração de óleo no fluido refrigerante, %
$C_{brm\text{médio}1}$	Valor médio, ao longo do intervalo 1, da concentração de óleo no fluido refrigerante, %
$C_{brm\text{médio}2}$	Valor médio, ao longo do intervalo 2, da concentração de óleo no fluido refrigerante, %
$C_{brr}$	Concentração real na base de fluido refrigerante puro, %
$C_{\text{médio}}$	Média da concentração das "na" amostras
$C_1, C_2, \dots, C_{na}$	Medida da concentração na amostra 1, 2, ..., na
$D_{\text{capilar}}, D_{\text{nitrogênio}}$	Diâmetro do tubo capilar obtido através da vazão de nitrogênio, mm
Dial	Regulagem do volume dosado por pulso da bomba dosadora, ml/pulso
Dif.	Diferença entre $C_{br}$ e $C_{brm}$ , %
$D, D_{\text{microscópio}}$	Diâmetro do tubo capilar obtido através do microscópio / feixe de laser, mm
$D_{\text{nominal}}$	Diâmetro nominal do tubo capilar, mm
$Dp, \text{Desv. Pad}$	Desvio padrão de uma amostra de N elementos
f	Fator de atrito
FM, FMC	Fluxo de massa indicado pelo Coriois, kg/h
$FM_{(\text{atual})}$	Fluxo de massa no instante atual, kg/h
$FM_{(48\text{atrás})}$	Fluxo de massa a 48 horas atrás do instante atual, kg/h
FM calc.	Fluxo de massa calculado pelo programa CAPILAR, kg/h
FMDOBS	Fluxo de massa no tubo capilar desobstruído, kg/h

$Fm_f$	Fluxo de massa de refrigerante antes de finalizar a dosagem, kg/h
$Fm_{f1}$	Fluxo de massa médio ao final do intervalo 1, kg/h
$Fm_{f2}$	Fluxo de massa médio ao final do intervalo 2, kg/h
$Fm_i$	Fluxo de massa de refrigerante antes de iniciar a dosagem, kg/h
$Fm_{i1}$	Fluxo de massa médio no início do intervalo 1, kg/h
$Fm_{i2}$	Fluxo de massa médio no início do intervalo 2, kg/h
FMOBS	Fluxo de massa no tubo capilar obstruído, kg/h
$FM_{\text{óleo}}$	Fluxo de massa de óleo, g/h
$FM_{\text{ref}}$	Fluxo de massa de fluido refrigerante, kg/h
FMT	Fluxo de massa indicado pelo medidor turbina, kg/h
$H_{\text{dosa}}$	Período de dosagem, h
i	Corrente fornecida pelo Coriolis, A
$I_{\text{ajuste}}$	Incerteza de medição da curva ajustada
$I_D, I_{\text{diâmetro}}$	Incerteza do diâmetro do tubo capilar, mm
$I_m$	Incerteza da massa, g
$I_p$	Incerteza de medição da pressão, bar
$I_{\text{pontual}}$	Incerteza de medição pontual
$I_Q$	Incerteza de medição da vazão através do medidor turbina, l/h
$I_{Q_{\text{ajuste}}}$	Incerteza de medição da curva ajustada para a vazão através do medidor turbina, l/h
$I_{Q_b}$	Incerteza da vazão da bomba dosadora, ml/h
$I_{Q_{\text{pontual}}}$	Incerteza de medição pontual da vazão através do medidor turbina, l/h
$I_{\text{Tempo}}$	Incerteza do tempo, min
$I_V$	Incerteza do volume dosado pela bomba, ml
$I_{\text{vazão}}$	Incerteza da vazão de nitrogênio pelo tubo capilar, l/min
$I_{V_b}$	Incerteza do volume dosado por pulso(stroke), ml/pulso
$I_{V_c}$	Incerteza da velocidade da bomba, pulsos(str)/min
$I_{V_o}$	Incerteza do volume da pipeta, $\text{cm}^3$
$I_p$	Incerteza da densidade média, $\text{g/cm}^3$
$I_{p_d}$	Incerteza da densidade devido a dispersão em relação a

	média, $\text{g/cm}^3$
$l_{\rho p}$	Incerteza da densidade pontual, $\text{g/cm}^3$
$l_{\rho \text{máx}}$	Incerteza pontual máxima da densidade, $\text{g/cm}^3$
$L, L_{\text{capilar}}$	Comprimento do tubo capilar, mm
$L_{\text{rec max}}$	Nível d'água no recipiente no tempo máximo escolhido, mm
$L_{\text{rec min}}$	Nível d'água no recipiente no tempo mínimo escolhido, mm
$m_{\text{amostra}}$	Massa da amostra (óleo e fluido refrigerante), g
$m_{\text{cilindro}}$	Massa do cilindro, g
$m_{\text{óleo}}$	Massa de óleo, g
$m_{\text{óleo dosado}}$	Massa de óleo real inserida no cilindro, g
$m_{\text{óleo medida}}$	Massa de óleo medida, g
$m_{\text{ref}}$	Massa de refrigerante, g
$m_{\text{refrigerante}}$	Massa de fluido refrigerante inserida, g
$N$	Número de pontos da amostra
$n_a$	Número de amostras
$P$	Grau do polinômio ajustado
$P_{\text{cond}}$	Pressão de condensação, bar
$P_e, P_{\text{cap}}$	Pressão na entrada do tubo capilar, bar
$P_{\text{rec}}$	Pressão no interior do recipiente, bar
$P_s$	Pressão na saída do tubo capilar, bar
$P_T$	Pressão na entrada do medidor turbina, bar
$P_{\text{vm}}$	Pressão de saturação do vapor d'água, bar
$Q_b$	Vazão da bomba dosadora, ml/h
$Q_{\text{cal}}$	Vazão calculada através do medidor turbina, l/h
$Q_{\text{cal}i}$	Vazão calculada na i-ésima leitura da amostra através do medidor turbina, l/h
$Q_{\text{med}}$	Vazão medida através do medidor turbina, l/h
$Q_{\text{medi}}$	Vazão medida na i-ésima leitura da amostra através do medidor turbina, l/h
$Q_T$	Vazão através do medidor turbina, l/h



Queda	Redução percentual do fluxo de massa ao longo do período de dosagem, %
R	Resistência do “shunt” , $\Omega$
Re	Número de Reynolds
Red	Redução do fluxo de massa em 48horas, kg/h
Regime	Período de teste, dosando óleo, com fluxo de massa na condição de regime permanente, h
St	Coefficiente de Student
Sub, Subresfr	Subresfriamento na entrada do tubo capilar, °C
Tamb	Temperatura ambiente, °C
Taxa1	Taxa de decaimento do fluxo de massa no intervalo 1, g/h <sup>2</sup>
Taxa2	Taxa de decaimento do fluxo de massa no intervalo 2, g/h <sup>2</sup>
Tecap	Temperatura na entrada do tubo capilar, °C
Tempo	Tempo de dosagem, min
Tempo max	Tempo máximo, s
Tempo min	Tempo mínimo, s
TextC1	Temperatura na superfície externa da entrada do tubo capilar / termopar de colar, °C
Text1	Temperatura na superfície externa da entrada do tubo capilar, °C
TFMC	Temperatura indicada pelo fluxímetro Coriolis, °C
Tint1	Temperatura interna na entrada do tubo capilar, °C
Tirec	Temperatura no interior do recipiente, °C
Tm	Temperatura média entre Tecap e Tirec, °C
Total varred	Total de varreduras
Trf2	Temperatura do termistor da placa 2 do HP, °C
Trf3	Temperatura do termistor da placa 3 do HP, °C
Tsatboc1	Temperatura de saturação para a pressão boc1, °C
Tsatboc4	Temperatura de saturação para a pressão boc4, °C
Tsext	Temperatura na superfície externa da saída do tubo capilar, °C
TsextC	Temperatura na superfície externa da saída do tubo capilar / termopar de colar, °C

T <sub>sint</sub>	Temperatura interna na saída do tubo capilar, °C
TT	Temperatura na entrada do medidor turbina, °C
T01 a T13	Temperaturas na superfície externa do tubo capilar, °C
V	Volume dosado, ml
Varred inicial	Varredura inicial referente ao tempo mínimo
Varred final	Varredura final referente ao tempo máximo
V <sub>b</sub>	Volume dosado por pulso, ml/pulso
V <sub>c</sub>	Velocidade da bomba, pulsos(str)/min
V <sub>cali</sub>	Valor calculado na i-ésima leitura da amostra
V <sub>co</sub>	Tensão fornecida pelo Coriolis, V
V <sub>e</sub>	Velocidade do fluido na equação de Reynolds, m/s
V <sub>i</sub>	Valor da i-ésima leitura da amostra
V <sub>m</sub>	Valor da média aritmética das leituras da amostra
V <sub>medi</sub>	Valor medido na i-ésima leitura da amostra
V <sub>o</sub>	Volume de óleo, cm <sup>3</sup>
VT	Tensão fornecida pelo medidor turbina, V

**Letras Gregas**

$\Delta$	Varição da grandeza no período de 1,5 minuto
$\Delta P$	Perda de carga ao longo do tubo capilar, Pa
$\nu$	Viscosidade cinemática, m <sup>2</sup> /s
$\rho$	Densidade do óleo, g/cm <sup>3</sup>
$\rho_1$	Densidade do líquido subresfriado, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{N2}$	Densidade do nitrogênio, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{refprop}$	Densidade do líquido subresfriado obtida pelo programa REFPROP, kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Desvio padrão

## **Resumo**

Com o aparecimento da crise do ozônio e posteriormente da crise do aquecimento global, as indústrias de refrigeração foram forçadas a substituir o refrigerante CFC12 pelo refrigerante HFC134a. No entanto, a baixa miscibilidade/solubilidade do HFC134a nos óleos minerais até então utilizados, fez com que surgissem os óleos éster. Sistemas de refrigeração com HFC134a e óleo éster passaram então a ser comercializados universalmente.

Como consequência, começaram a surgir problemas de obstrução de tubos capilares por substâncias orgânicas. Tais substâncias (contaminantes) podem ser geradas no compressor através da deterioração química do refrigerante e do óleo ou podem se fazer presentes no sistema através de resíduos do processo de manufatura.

Apesar do forte impacto tecnológico deste problema, raros são os trabalhos que podem ser encontrados na literatura abordando este assunto. Na maioria, estes trabalhos limitam-se a reportar resultados de testes de vida, quando um certo compressor é colocado a operar com uma certa concentração de contaminante, e a redução do fluxo de massa é monitorada ao longo do tempo através de testes padronizados utilizando nitrogênio.

O presente trabalho, de caráter inédito, procura isolar e estudar os efeitos das variáveis independentes (pressão na entrada do tubo capilar, grau de subresfriamento, tipo de óleo, concentração de óleo, diâmetro e comprimento do tubo capilar) sobre a variável dependente (fluxo de massa). Nesta primeira etapa o efeito do contaminante não será considerado.

Para tanto tornou-se necessário construir uma bancada experimental com controle completo de todas as variáveis envolvidas no processo. Os resultados dos testes mostraram que tanto o tipo de óleo como a concentração de óleo no refrigerante provocam uma redução significativa do fluxo de massa, o que leva a crer que muitos dos problemas creditados a presença de contaminantes são na realidade causados pela presença única e exclusiva de óleo éster no sistema.

## **Abstract**

With the phaseout of CFC12, the use of HFC134a and polyolester oil became the preferred refrigerant/oil combination for the refrigerator appliance industry.

The critical problem of this refrigerant/oil combination is the propensity for the capillary tubes to clog with a variety of organic contaminants. Some organic contaminants remain in the refrigerating system during manufacture or assembly and others are generated in the compressor shell through oil and refrigerant chemical deterioration.

In spite of the strong technological impact of this problem, very few works on this matter can be found in the literature. The available works are mostly research reports of durability testes where a system operates during a certain time with a known concentration of contaminant and the flow rate of nitrogen gas is measured. The evaluation is based on the flow rate drop ratio per operating hours.

The aim of the present work is to study the effects of the independent variables (inlet pressure, subcooling, oil type, oil concentration, diameter and length of the capillary) on the dependent variable (mass flow rate). In this first stage the contaminant effect won't be considered.

For doing so an experimental set-up, with complete control of all the variables involved in the process, was then built. The test results showed that the oil type as well as the oil concentration in the refrigerant, produce a significant reduction of the mass flow rate. It seems that many of the problems associated with the presence of contaminants are, in the reality, caused by the only and exclusive presence of ester oil in the refrigerating system.

## **1 - Introdução**

Desde os primórdios o ser humano busca uma forma de conservar alimentos. Os séculos XVII, XVIII e XIX foram marcados pela comercialização do gelo natural e pelo desenvolvimento de equipamentos para gerar frio e conseqüentemente conservar alimentos. No século XIX foram produzidos os primeiros refrigeradores empregando amônia, dióxido de enxofre e cloreto de metila. O grande inconveniente destes refrigeradores era a alta toxidez dos fluidos refrigerantes, tendo sido inclusive registrados na época diversos casos de morte por intoxicação.

No século XX, cientistas da Frigidaire / General Motors sintetizaram fluidos refrigerantes não tóxicos, os CFC's (CloroFluorCarbonos). A partir daí houve um grande desenvolvimento na indústria de refrigeração. Atualmente tais refrigerantes estão sendo substituídos devido a sua forte ação destrutiva sobre a camada de ozônio e seu potencial em provocar o efeito estufa.

Outro marco no avanço da indústria de refrigeração ocorreu em 1970, quando o alto custo de energia forçou um maior investimento em pesquisa com o intuito de aumentar a eficiência dos sistemas de refrigeração. A partir deste ponto o critério de mínimo custo inicial nos projetos foi superado, sendo que o custo operacional passou a ser mais importante.

De acordo com o PROCEL (Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica) o setor residencial é responsável por 28% do consumo total de energia elétrica do país (ver figura 1.1), o que corresponde a 40% do faturamento do setor de energia elétrica.

Estima-se que 10% desta energia é desperdiçada, seja por uso inadequado de aparelhos ou por hábito adquirido pelo consumidor. Constata-se, assim, a necessidade de um forte trabalho educacional com o intuito de minimizar estes desperdícios.

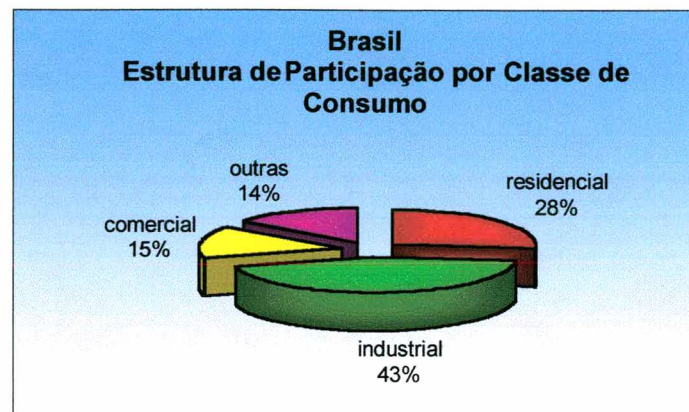


Figura 1.1 - Consumo de energia por setor / Setembro de 2000

Aproximadamente 1/3 do consumo de energia elétrica do setor residencial é associado com a refrigeração. Este alto consumo deve-se ao fato dos equipamentos de refrigeração estarem ligados ininterruptamente (refrigeradores e freezers), ou durante boa parte do dia (condicionadores de ar). Fica claro, então, que a refrigeração é responsável por uma grande parte do consumo de energia, pesando diretamente no orçamento doméstico.

O PROCEL lançou programas incentivando a utilização de equipamentos com melhor desempenho, além de estimular a mudança de hábitos do consumidor com o intuito de minimizar os desperdícios de energia elétrica. A forma adotada foi a utilização de um selo PROCEL de economia, destinado aos equipamentos que apresentam melhor relação custo/benefício.

Verifica-se, assim, a necessidade de um forte investimento de pesquisa na área de refrigeração com o intuito de otimizar os sistemas de refrigeração sempre buscando um menor consumo de energia.

## 1.1 - Sistema de Refrigeração

Sistemas de refrigeração por compressão mecânica de vapores são compostos basicamente por quatro componentes: compressor, condensador, dispositivo de expansão e evaporador, interligados na forma mostrada na figura 1.2. O sistema formado pelos quatro componentes necessita de um fluido de trabalho denominado de fluido refrigerante.

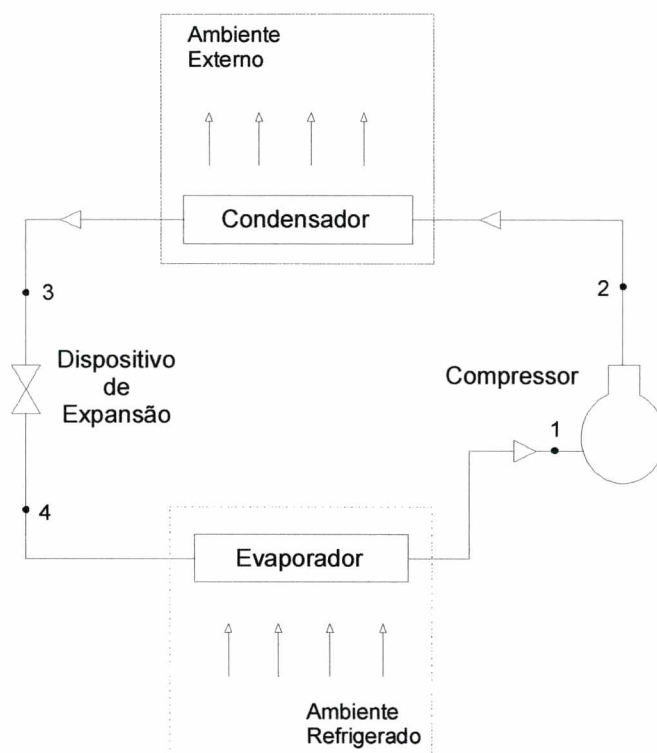


Figura 1.2 - Ciclo básico de refrigeração

O compressor promove a passagem do fluido refrigerante de um estado de vapor superaquecido a baixa pressão (1) para vapor superaquecido a alta pressão (2). Posteriormente, o fluido passa pelo condensador onde é resfriado e condensado (3). A seguir, o fluido refrigerante escoar pelo dispositivo de expansão onde sua pressão é reduzida, originando uma mistura bifásica líquido / vapor na entrada do evaporador (4). No



evaporador o fluido recebe calor do ambiente refrigerado, tornando-se novamente superaquecido (1). A figura 1.3 mostra a representação do ciclo em questão num diagrama de Mollier (pressão vs. entalpia).

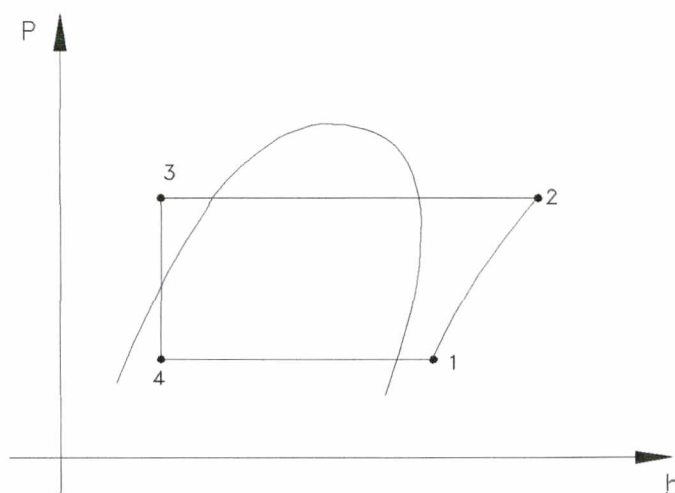


Figura 1.3 - Diagrama pressão-entalpia

O presente trabalho apresenta, inicialmente, uma breve descrição das conseqüências da substituição do fluido refrigerante CFC12 pelo HFC134a em sistemas domésticos de refrigeração por compressão mecânica de vapores. Esta substituição foi motivada por problemas ecológicos, notadamente pela redução da camada de ozônio na estratosfera e pelo efeito estufa.

Em seguida, serão apresentadas as principais características de um tubo capilar, elemento universalmente empregado como dispositivo de expansão em sistemas de refrigeração de pequena capacidade. A ênfase será colocada no problema de obstrução originado pela contaminação do sistema por compostos orgânicos diluídos no óleo e transportados pela mistura óleo / refrigerante ao longo do sistema de refrigeração.

Serão também apresentadas as etapas de construção, calibração e testes de uma bancada experimental desenvolvida para o estudo proposto. A principal característica desta bancada é a possibilidade da dosagem de óleo, contaminado ou não, na entrada do tubo

capilar o que permite a análise dos efeitos causados pelo óleo e contaminante (obstrução do tubo capilar) sobre o perfil de temperatura ao longo do tubo capilar e sobre o fluxo de massa.

## **1.2 - Tubo Capilar**

O tubo capilar desempenha um papel importante num sistema de refrigeração. Ele é responsável pela redução da pressão do sistema da região de alta pressão (condensador) para a região de baixa pressão (evaporador). Dependendo do diâmetro e comprimento do tubo capilar pode-se variar a capacidade de refrigeração do sistema. A escolha das suas dimensões é, portanto, fundamental para a obtenção de sistemas com maior eficiência.

A utilização de tubos capilares como dispositivo de expansão teve início na década de 20, quando o principal fluido refrigerante era o dióxido de enxofre. Este refrigerante, entretanto, exigia diâmetros de tubos capilares muito pequenos, dificultando o processo de fabricação e originando problemas de entupimento, o que restringia a aplicação de tubos capilares.

A difusão dos tubos capilares na indústria de refrigeração ocorreu no início da década de 30 com a introdução dos CFC's (hidrocarbonetos halogenados).

Os tubos capilares são elementos simples, baratos e sem partes móveis. Além disso, permitem ciclos reversos e a equalização das pressões do lado de alta e baixa durante as paradas do compressor, possibilitando assim, a utilização de compressores com menor torque de partida.

Por outro lado, são facilmente obstruídos e não podem ser regulados. A impossibilidade de regulação deve-se ao fato do tubo capilar apresentar geometria fixa. Qualquer desvio da condição nominal de operação (pressão de condensação ou carga térmica, por exemplo) provoca uma redução do coeficiente de performance.

O fluido refrigerante geralmente entra no tubo capilar na condição de líquido subresfriado, onde a sua pressão é reduzida inicialmente apenas por efeitos viscosos. Este

regime de escoamento persiste até que a pressão de saturação seja alcançada. Neste ponto ("flash point"), se inicia a região bifásica quando então a redução de pressão e temperatura se torna mais acentuada. Nesta parte do escoamento, a redução de pressão ocorre simultaneamente por atrito e por aceleração do fluido.

Em tubos capilares, aparecem também regiões de escoamento metaestável. Esta região é caracterizada por um atraso no ponto de vaporização do fluido refrigerante, ou seja, o fluido atinge a pressão de saturação mas não vaporiza.

Adicionalmente, o escoamento geralmente atinge a velocidade do som na extremidade do tubo, caracterizando assim um escoamento bloqueado (crítico) onde o fluxo de massa deixa de ser afetado pelas oscilações da pressão de evaporação.

Na saída do tubo capilar / entrada do evaporador, o refrigerante apresenta um certo título. Entretanto, quanto menor a quantidade de vapor nesta região maior a eficiência do sistema de refrigeração, já que as trocas de calor de natureza latente são mais efetivas. Uma maneira de aumentar a quantidade de líquido na entrada do evaporador consiste na utilização de trocadores de calor tubo capilar / linha de sucção (ver figura 1.4). Neste trocador, líquido a alta pressão e temperatura troca calor com vapor saturado ou superaquecido a baixa pressão e temperatura. Desta maneira, consegue-se reduzir a quantidade de vapor na entrada do evaporador e ao mesmo tempo evitar eventuais problemas de condensação de vapor d'água ao longo da superfície externa da linha de sucção.

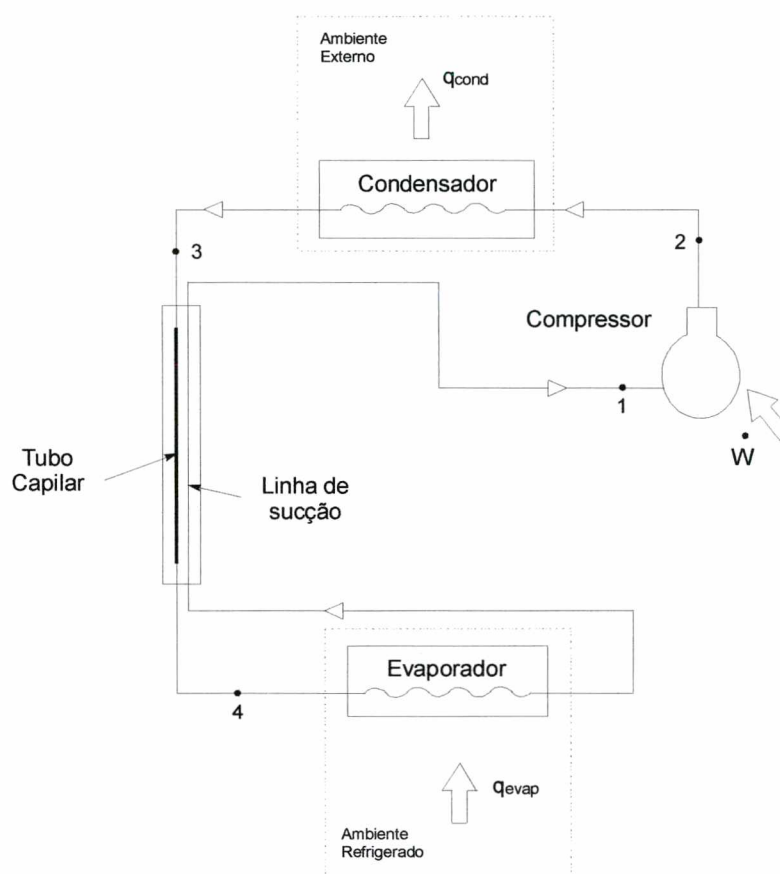


Figura 1.4 - Ciclo de refrigeração com trocador de calor

A presença do trocador aumenta a capacidade de refrigeração mas também altera o estado do fluido refrigerante na entrada do compressor e, conseqüentemente, a potência de compressão. Sendo assim, não é indicado para todos os fluidos refrigerantes.

Do exposto anteriormente, verifica-se que o tubo capilar representa um papel importante num circuito de refrigeração, justificando a preocupação de estudar o seu funcionamento através da variação das condições de operação, do tipo de refrigerante e da geometria.



### **1.3 - Fluidos Refrigerantes**

Na década de 70, verificou-se que os CFC's (Cloro Fluor Carbonos) totalmente halogenados ao serem emitidos para a atmosfera conseguiam atingir a estratosfera, lá reagindo e destruindo a camada de ozônio. Esta camada age como uma barreira natural contra a radiação ultravioleta proveniente do sol.

Os CFC's também contribuem para o efeito estufa, que consiste na absorção da radiação infravermelha refletida pela terra, contribuindo assim para o aquecimento do globo terrestre.

A radiação ultravioleta, por exemplo, pode causar câncer de pele inclusive o melanoma, freqüentemente fatal. Em setembro de 1994, através de um estudo realizado por médicos brasileiros e norte-americanos, demonstrou-se que para cada 1% de redução da camada de ozônio, a incidência de melanomas cresce 2,5%.

A figura 1.5 mostra a variação da concentração média de ozônio sobre a Antártida no mês de outubro, medida em Dobson, entre 1960 e 1994 (Dobson =  $10^{-2}$ mm). Os valores considerados normais variam entre 300 e 500 Dobsons. Verifica-se que em torno de 1975 a concentração atingiu 300 Dobsons e que a partir desta data o decaimento tem sido contínuo.

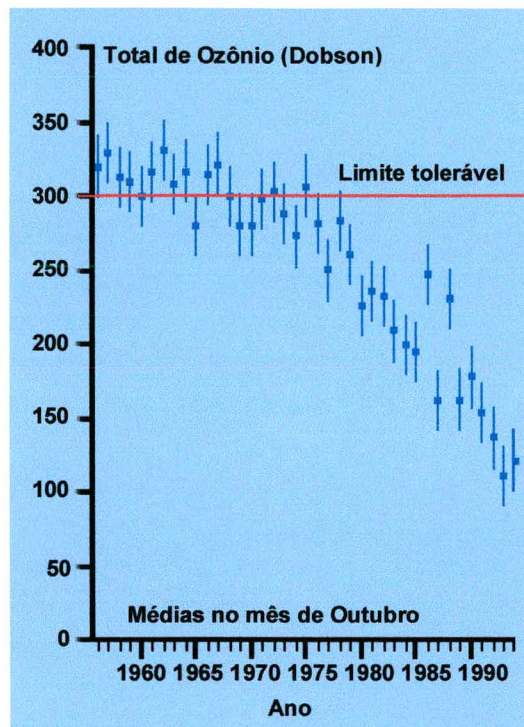


Figura 1.5 - Concentração média de ozônio / Antártida

A situação, mostrada na figura 1.5, fez com que fossem estabelecidos prazos para a substituição dos CFC's por outros fluidos com propriedades semelhantes, mas ecologicamente aceitáveis. Um dos substitutos do CFC12, fluido este largamente utilizado em sistemas de refrigeração de pequena e média capacidade, é o HFC134a (Hidro Fluor Carbono). Uma breve comparação desta substância com o CFC12 é apresentada a seguir:

Vantagens:

- Propriedades termodinâmicas semelhantes ao CFC12;
- Sem efeitos sobre a camada de ozônio.

Desvantagens:

- Totalmente imiscível em óleos minerais e sintéticos, exigindo a utilização de um outro tipo de óleo (éster);

- A umidade no sistema deve ser a menor possível, pois o óleo éster em contato com água se decompõe em ácido e álcool;

- Resíduos clorados também devem ser evitados, pois em contato com óleo éster formam ácidos do tipo HCl e HF, podendo corroer superfícies metálicas, deteriorar o dessecante e o óleo lubrificante;

- Durante o processo de fabricação dos componentes do sistema de refrigeração deve ser evitada a presença de resíduos gordurosos e oleosos. Ao contrário do CFC12, o HFC134a não possui ação solvente o que pode facilitar a deposição desses resíduos no tubo capilar e prejudicar a eficiência do sistema ou até mesmo causar a sua inutilização.

Como pode ser notado, vários problemas estão associados com a substituição do fluido refrigerante CFC12 pelo HFC134a. Torna-se, então, evidente que existe a necessidade de estudos mais detalhados sobre os efeitos provocados por esta troca, notadamente, a obstrução de tubos capilares provocada por elementos não solúveis na mistura óleo éster / HFC134a, propósito maior deste trabalho.

### **1.4 - Obstrução de Tubos Capilares**

Contaminantes orgânicos que aparecem em sistemas de refrigeração, tais como : óleos, graxas, ceras, piche, verniz, adesivos, parafinas, etc, são geralmente parcialmente solúveis na mistura óleo / fluido refrigerante (ASHRAE, 1998).

Alguns contaminantes surgem durante o processo de produção do sistema de refrigeração. Por exemplo:

- Excesso de fluxo de solda;
- Óleos e outros materiais orgânicos utilizados na lubrificação dos moldes do condensador;
- Resinas usadas na cobertura de fios;
- Solventes usados na lavagem de estatores, os quais podem ser absorvidos pelos fios e que durante a operação do compressor podem provocar reações químicas que vão resultar em compostos orgânicos;
- Resinas líquidas ou sólidas formadas pela decomposição do óleo em condições adversas; etc.

O filtro secador, componente localizado entre o condensador e o tubo capilar, não é capaz de reter o contaminante orgânico se este estiver dissolvido na mistura óleo éster / HFC134a. Para se ter uma idéia de dimensão, contaminantes com uma massa menor do que um grama e volume menor que um grão de arroz podem inoperar o sistema de refrigeração.

O resultado da contaminação orgânica é frequentemente notado nos dispositivos de expansão. Resinas e materiais graxos dissolvidos na mistura óleo / fluido refrigerante, na condição líquida, podem precipitar em baixas temperaturas obstruindo tubos capilares e válvulas de expansão.

Esses contaminantes podem ser eliminados mediante uma cuidadosa seleção dos materiais do sistema de refrigeração e de um fino controle da limpeza do processo de fabricação e montagem.

O calor pode provocar a degradação de muitos materiais orgânicos e aumentar as reações químicas. Sendo assim, recomenda-se evitar condições de operação com elevadas temperaturas de descarga do compressor como forma de prevenir a formação de produtos indesejáveis ao sistema de refrigeração.



## 1.5 - Revisão Bibliográfica

Pate et al. (1995) estudaram o efeito dos óleos lubrificantes sobre o fluxo de massa de refrigerante através de tubos capilares adiabáticos. Testes foram realizados com os fluidos refrigerantes HFC134a, HCFC22 e R410a, respectivamente com os seguintes óleos e concentrações, éster (1,40% / ISO32 - Castrol), alkyl benzeno (1,40% / ISO32 - Shrieve Zerol) e éster (1,74% - Mobile). Foram realizados seis testes com cada fluido refrigerante variando-se a pressão na entrada do tubo capilar e o grau de subresfriamento. A geometria dos tubos capilares utilizados para cada fluido refrigerante é mostrada na tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Geometria dos tubos capilares testados

Fluido refrigerante	Comprimento [mm]	Diâmetro [mm]
HFC134a	3302	0,864
HCFC22	1524	1,680
R410a	3302	0,864

Os resultados não foram inteiramente conclusivos. Considerando-se a média dos resultados dos seis testes, verificou-se que em alguns casos ocorria aumento e em outros redução do fluxo de massa de refrigerante com a presença de óleo. Em média obteve-se um aumento de 1,3% no fluxo de massa de HFC134a, um aumento de 1,5% com HCFC22 e um aumento de 0,3% com R410a. Estas variações, entretanto, encontram-se dentro da faixa de incerteza de medição do experimento.

Nada se comenta sobre a forma de controle da concentração de óleo, nem sobre os critérios para estabelecimento de condições de regime permanente. A concentração foi medida através da retirada de uma amostra durante a realização dos testes.

DeVos (1997) investigou a relação entre o nível de obstrução dos tubos capilares com variáveis tais como, o tipo de compressor, tipo de óleo, nível de clorados e nível de umidade. Além de uma descrição visual dos contaminantes, as análises utilizaram um espectroscópio

infra-vermelho e um microscópio eletrônico. O conteúdo total de cloro e de gases não condensáveis no fluido refrigerante foi também medido. Medições do nível de umidade, ferro dissolvido, ácido total, e uma análise de espectro infra-vermelho foram também realizadas nas amostras de óleo.

Verificou-se um aumento da obstrução com o aumento do nível de clorados e umidade. Estes elementos em contato com óleo éster a alta temperatura (acima de 121°C) provocam a sua decomposição gerando sais de ácido carboxílico geralmente encontrados na entrada do tubo capilar. Verificou-se também um desgaste significativo do compressor devido a presença deste ácido.

As medições de vazão através do tubo capilar foram realizadas após um período de três a quatro semanas mantendo-se a carcaça do compressor numa temperatura inferior a 121°C. Os resíduos causadores da obstrução do tubo capilar foram identificados como misturas dos contaminantes adicionados com os produtos da decomposição do óleo éster e sais.

Constatou-se que sistemas limpos apresentam baixos níveis de resíduos, logo a obstrução é pequena. Isto quando comparados com sistemas contaminados espontaneamente. Nenhuma deterioração do óleo éster foi verificada para sistemas limpos.

Taira et al. (1998) realizaram um trabalho procurando acelerar a obstrução de tubos capilares montados em condicionadores de ar. O fenômeno da obstrução foi dividido em quatro estágios. Primeiramente, o contaminante é produzido no lado interno do compressor (**geração**) e, em seguida, conduzido juntamente com o lubrificante para o tubo capilar ou válvula de expansão (**transporte**). Posteriormente, este é separado do refrigerante (**deposição**) e depositado na superfície interna do tubo capilar ou válvula de expansão (**adesão**).

Os resultados dos testes mostraram que a deterioração química dos lubrificantes e refrigerantes pode causar a obstrução. Esta deterioração foi acelerada através do aumento da temperatura do lubrificante.

Alguns cuidados foram tomados na realização dos testes, a saber: i) todo o sistema foi completamente limpo e desidratado, ii) a temperatura de descarga do compressor foi mantida



constante durante o teste, iii) a rotação do compressor foi controlada por um inversor de frequência, iv) A vazão de nitrogênio através do tubo capilar, para uma pressão diferencial fixa, foi medida a cada 500 horas de funcionamento e v) O número total de ácido no fluido refrigerante foi medido a cada 2000 horas. A avaliação baseou-se na queda do fluxo de massa e no aumento do número total de ácido por horas de operação.

Verificou-se que a concentração de lubrificante no refrigerante, o diâmetro do tubo capilar e o tipo e a concentração do contaminante são fatores que aceleram a taxa de obstrução em adição ao aumento da temperatura do óleo.

Em resumo, os seguintes resultados foram obtidos:

- Aumentando a temperatura do óleo, aumenta a taxa de obstrução do tubo capilar. A taxa de obstrução duplica com um aumento de 10°C na temperatura do óleo;
- Aumentando a concentração de lubrificante no refrigerante, aumenta a obstrução;
- Pequenos diâmetros de tubo capilar são obstruídos mais rapidamente que diâmetros maiores para uma mesma concentração de contaminante em circulação;
- O tipo e a concentração do contaminante afetam a taxa de obstrução;
- A adição de inibidores nos óleos, como Alkyl-benzeno, reduz a obstrução em até 50%.

Parise et al. (2000) avaliaram o efeito do óleo sobre o fluxo de massa através de tubos capilares adiabáticos. Foram utilizados o refrigerante R407C e o óleo éster (Emkarate RL68H) numa concentração entre 2,9% a 7,9%. O tubo capilar testado tinha 1,05m de comprimento e 1,06mm de diâmetro. A pressão na entrada do tubo capilar, o grau de subresfriamento e o fluxo de massa variaram respectivamente na seguinte faixa: 1652kPa a 2032kPa, 8,1°C a 28,5°C e 15kg/h a 30kg/h.

Como conclusões verificou-se que o fluxo de massa dependia da concentração de óleo e das condições de entrada do tubo capilar (subresfriado ou saturado). Para altos graus de subresfriamento o fluxo de massa diminuía com a presença de óleo, ocorrendo o contrário com baixos graus de subresfriamento.

Os autores deixam claro que o impacto sobre o fluxo de massa é fortemente dependente das propriedades da mistura óleo / fluido refrigerante (viscosidade, densidade e pressão de vapor). Se a mistura possuir uma viscosidade menor que a viscosidade do fluido puro o fluxo aumenta, caso contrário, o fluxo reduz.

São discutidos também os possíveis efeitos associados com a presença de óleo no escoamento, ou seja, redução da pressão de vapor; o que implicaria num aumento do fluxo de massa pois aumentaria o comprimento da região líquida no tubo capilar e aumento da perda de carga na região líquida do tubo capilar devido ao aumento da viscosidade, o que poderia ocasionar uma redução do fluxo de massa. Dependendo da combinação desses dois efeitos o fluxo poderia aumentar ou reduzir.

Uma forte limitação deste trabalho é o fato das condições de regime permanente não serem claramente apresentadas. Em outras palavras, a redução de fluxo de massa não é tratada como uma função do tempo de operação da bancada.

## **1.6 - Objetivos**

O presente trabalho enfoca o problema de obstrução de tubos capilares, problema este que surgiu após a substituição do CFC12 pelo HFC134a em sistemas de refrigeração do tipo doméstico. Esta obstrução ocorre lentamente, prejudicando a eficiência e consequentemente aumentando o consumo de energia do sistema até o instante de sua total inoperância.

Em sistemas com CFC12, os contaminantes circulam pelo circuito mas não depositam-se no tubo capilar devido a ação solvente do refrigerante. Neste caso, os contaminantes ficam depositados no evaporador, já que esta é uma região de baixa temperatura e de baixa velocidade do fluido. Na saída do tubo capilar, a temperatura é baixa, mas a velocidade é extremamente alta. Este fato, aliado com a ação solvente do CFC12 não permite a deposição de contaminantes no tubo capilar.



Com o aparecimento do problema da obstrução, surgiu a necessidade de se identificar os principais tipos de contaminantes, as concentrações limites e os efeitos das condições de operação, da geometria do tubo capilar e da concentração de óleo no refrigerante.

Para tanto construiu-se um aparato experimental capaz de contaminar o fluido refrigerante com uma quantidade de óleo conhecida e com uma quantidade de contaminante diluída no óleo também conhecida. Este aparato permite também a medição do fluxo de massa através do tubo capilar e do conseqüente perfil de temperatura.

Como já mencionado DeVos (1997) e Taira et al. (1998) aceleraram a obstrução considerando as seguintes variáveis: tipo de compressor, tipo de óleo e contaminante, nível de clorados e umidade, diâmetro do tubo capilar, temperatura na descarga do compressor, fluxo de massa da mistura óleo / fluido refrigerante, etc. Estes trabalhos exigiram, mesmo assim, um elevado tempo de execução, em média 2 a 3 meses para cada teste, já que a obstrução dependia da circulação dos contaminantes ao longo do circuito. No presente trabalho, este tempo é reduzido substancialmente, já que o óleo ,contaminado ou não, é dosado diretamente na entrada do tubo capilar.

Através dos testes verificou-se que o óleo, mesmo isento de contaminantes, também provoca a obstrução do tubo capilar. Desta forma, optou-se por investigar o efeito do óleo sobre a obstrução, alterando-se o tipo de óleo, a concentração, a pressão e o grau de subresfriamento na entrada do tubo capilar tanto para regime permanente como transiente. Estes testes preliminares foram realizados com um mesmo tubo capilar.

Em seguida, resolveu-se investigar em mais detalhes o efeito do óleo éster  $\alpha$ 22E sobre a obstrução do tubo capilar na condição de regime permanente, alterando-se o diâmetro e o comprimento do mesmo. A pressão, o subresfriamento e a concentração de óleo na entrada do tubo capilar foram mantidas constantes.

Foram testados quatro (4) tubos capilares com diâmetro nominal de 0,570mm e 0,790mm e comprimento de 3 e 4 metros. A partir destes resultados foram desenvolvidas

correlações que permitem identificar a redução percentual de vazão através do tubo capilar como uma função do seu diâmetro e comprimento.

## **2 - Bancada Experimental para Controle das Condições na Entrada do Tubo Capilar**

São raros os trabalhos na literatura com enfoque no problema da obstrução de tubos capilares em sistemas que empregam HFC134a e óleo éster. Os existentes procuram analisar o problema utilizando equipamentos convencionais de refrigeração, sem um controle eficaz das variáveis do problema. Como agravante adicional tais testes demandam um período de tempo excessivamente longo.

Para contornar este problema, desenvolveu-se uma bancada experimental com pleno controle das variáveis envolvidas e com a possibilidade de controle da quantidade de óleo e de contaminante na entrada do tubo capilar, o que reduz bastante o tempo requerido por cada teste.

### **2.1 - Sistema de Refrigeração**

A bancada experimental é essencialmente um circuito de refrigeração não convencional constituído por duas regiões de alta e duas regiões de baixa pressão. Uma destas regiões tem por objetivo retirar o óleo contaminado do fluido refrigerante (linha vermelha na figura 2.1). Para esta operação, foram instalados três separadores de óleo (SO3, SO4 e SO5) e três filtros coalescentes (PFG, FIG e FG) com eficiência maior do que 99,9%.

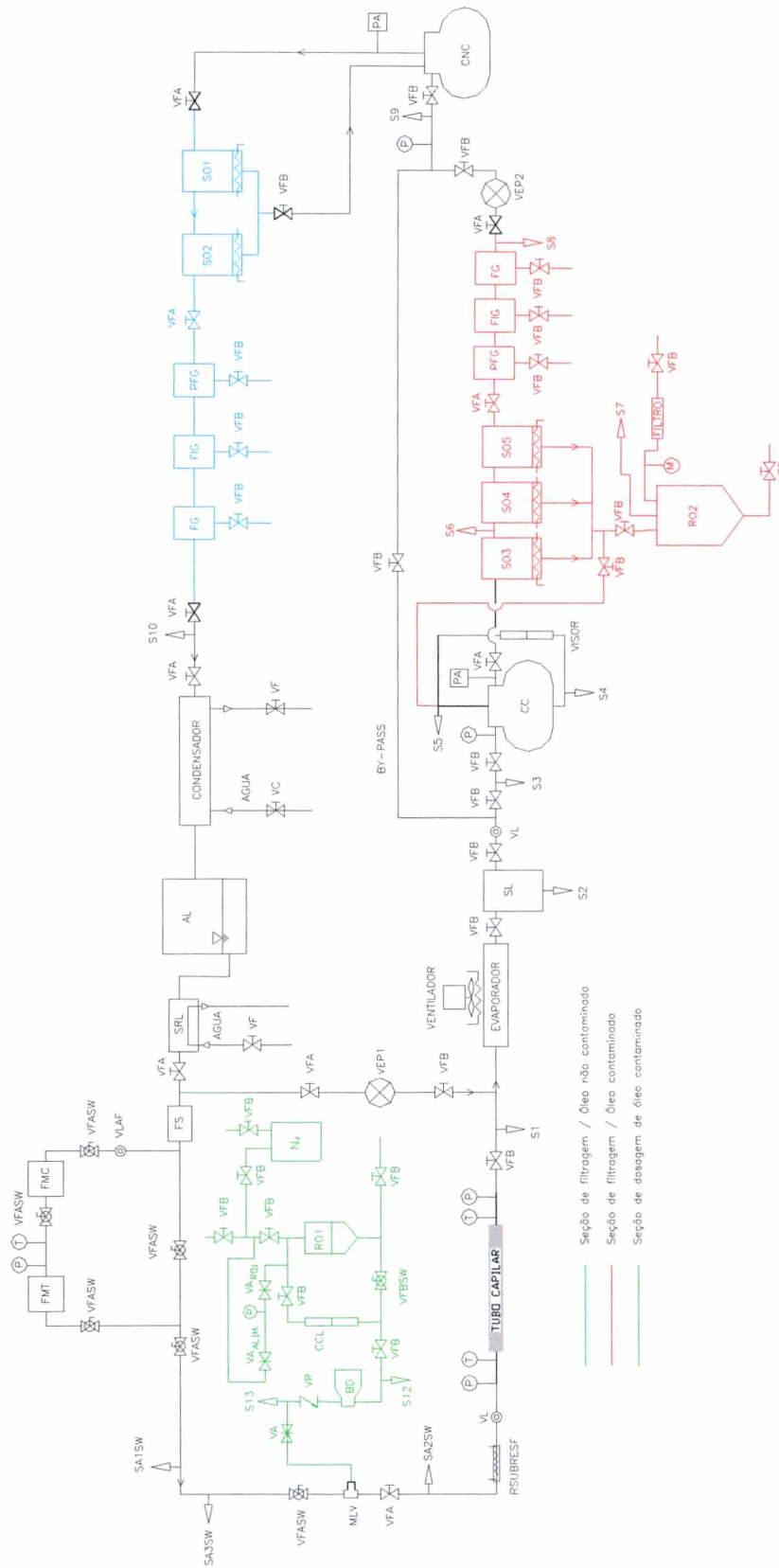


Figura 2.1 - Circuito de refrigeração / bancada de obstrução de tubos capilares



A substância retirada por estes componentes e drenada para o reservatório (RO2) é basicamente uma mistura do óleo contaminado dosado a montante do tubo capilar com óleo proveniente do compressor CC.

O objetivo principal da bancada é dosar óleo contaminado na entrada do tubo capilar com uma concentração de contaminante pré-definida e desta maneira provocar a obstrução. Deve-se tomar cuidado para que, na seção à montante da dosagem (linha verde), o fluido refrigerante esteja isento de óleo e impurezas. Para tanto, instalou-se uma segunda seção de filtração (linha azul). É importante mencionar, que o óleo retirado nesta seção retorna ao compressor, já que este não está contaminado.

Dois seções de amostragem, SA1SW e SA2SW, foram instaladas com o objetivo de controlar a concentração de óleo no refrigerante antes e após a dosagem. Com isto, consegue-se verificar a eficiência do sistema de filtração e a precisão do processo de dosagem efetuado pela bomba dosadora BD.

A concentração de óleo no refrigerante é avaliada seguindo-se as recomendações da norma ASHRAE 41.4 (1996).

A pressão de condensação é controlada através de uma válvula (VC) que regula o fluxo d'água através do condensador. Com a intenção de otimizar o controle efetuado pela válvula, foi instalado um reservatório d'água de 1000 litros posicionado a 9 metros de altura, garantindo-se assim uma alimentação contínua e estável para a válvula (VC) e conseqüentemente um melhor controle da pressão de condensação.

O grau de subresfriamento na entrada do tubo capilar é controlado através de uma resistência elétrica (RSUBRESF) que por sua vez é controlada automaticamente por um controlador PID (Proporcional - Integral - Derivativo).

A pressão de evaporação é controlada através de resistências elétricas colocadas entre o evaporador e o ventilador e pelo by-pass através da válvula de expansão (VEP1).

Resistências de aquecimento encontram-se instaladas nos separadores de óleo (SO1, SO2, SO3, SO4, SO5) com o objetivo de evitar a condensação do refrigerante. Instalou-se

também uma resistência elétrica no separador de líquido (SL) com o objetivo de evitar o congelamento da linha de sucção e a entrada de líquido no compressor.

No tubo capilar foram instalados termopares estrategicamente distribuídos para se obter o perfil de temperatura. Transdutores de pressão foram instalados na entrada e saída do tubo capilar para monitorar as pressões de condensação e evaporação.

Transdutores de pressão foram também instalados na sucção dos dois compressores, como forma de controlar / monitorar a operação em série destes componentes.

O fluxo de massa ao longo do circuito é avaliado através de dois transdutores, um do tipo Coriolis (FMC) e outro do tipo Turbina (FMT). A utilização em série de dois transdutores de fluxo confere maior confiabilidade aos resultados e auxilia na detecção de anomalias durante os testes. Como o medidor turbina indica a vazão volumétrica, há a necessidade de se determinar a densidade do fluido refrigerante para se determinar a vazão em massa. Isto faz com que tanto a pressão como a temperatura sejam monitoradas à montante do medidor.

Os dados experimentais são obtidos através de um sistema de aquisição de dados da HP, com 104 canais de capacidade.

A bancada experimental apresentada permite, portanto, o controle / medição das variáveis dependentes e independentes do processo. Como variáveis dependentes têm-se : perfil de temperatura ao longo do tubo capilar [  $f(\text{tempo})$  ] e o fluxo de massa de refrigerante [  $f(\text{tempo})$  ]. As variáveis independentes são: pressão de condensação, grau de subresfriamento na entrada do tubo capilar, comprimento do tubo capilar, diâmetro do tubo capilar, concentração de óleo, tipo de óleo, concentração de contaminante e tipo de contaminante.

O apêndice I apresenta a especificação dos equipamentos utilizados na bancada, a listagem completa dos códigos indicados na figura 2.1 com suas respectivas denominações e o sistema elétrico da bancada.

## **2.2 - Calibração do Sistema de Medição**

Durante os experimentos foram utilizados transdutores de temperatura, pressão, vazão mássica e volumétrica de refrigerante e vazão de óleo, os quais encontram-se listados no apêndice I.

Esses transdutores foram calibrados e as suas respectivas incertezas de medição determinadas. No apêndice II, mostram-se os procedimentos de calibração e os resultados obtidos.

Para a aquisição dos sinais utilizou-se um sistema da marca HP, que capta os sinais enviados pelos transdutores na forma de tensão e os envia para uma placa de processamento instalada no microcomputador.



### 3 - Ajuste e Verificação do Funcionamento dos Componentes da Bancada

Com o intuito de verificar a estabilidade da bancada e de ajustar os equipamentos de medição e controle, foram realizados testes preliminares com um tubo capilar de diâmetro nominal de 0,6mm e comprimento de 3999mm, denominado de Capilar1. Os testes envolveram três pressões de condensação (9bar, 11bar e 14bar ) e três graus de subresfriamento (5°C, 7;5°C e 10°C).

O tubo capilar foi fixado na bancada soldando-se cada extremidade a um tubo de cobre de diâmetro nominal 1/4" com porca de flange. A conexão de entrada ficou 80,6mm afastada da extremidade do capilar e a de saída 83mm (ver figura 3.1). Nestas duas regiões, a distribuição de temperatura na superfície do tubo capilar não pode ser medida, como seria desejável. Entretanto, com este modo de fixação tanto o transdutor de pressão como o de temperatura ficam residentes na bancada, o que facilita o processo de substituição do tubo capilar e diminui a possibilidade de vazamento.



Figura 3.1 - Conexões de fixação do tubo capilar

É importante mencionar que o tubo capilar é trocado freqüentemente durante os testes, o que justifica a preocupação com o modo de fixação. A figura 3.2 mostra o posicionamento dos transdutores de pressão e de temperatura na entrada e saída do tubo capilar.



Figura 3.2 - Pontos de medição de pressão e temperatura nas extremidades do tubo capilar

Numa primeira etapa de teste, as distribuições de temperatura ao longo do tubo capilar ficaram bem caracterizadas, não observando-se qualquer dificuldade de análise (ver apêndice IV).

O apêndice V mostra os pontos de instrumentação utilizados durante os testes.

A calibração dos instrumentos de medição é apresentada no apêndice II, juntamente com a medição do diâmetro interno do tubo capilar.

Nesta primeira etapa, foram também ajustados os parâmetros de controle do PID e efetuada a calibração do fluxímetro tipo turbina (ver apêndice II). A bancada, nesta etapa, não utilizava filtros coalescentes e utilizava somente um compressor.

Com relação ao PID, foram ajustados parâmetros para cada condição de teste, o que aumentou a eficácia do processo de controle. A tabela 3.1 mostra os parâmetros a serem utilizados em cada condição. É importante mencionar que o ajuste do PID depende de uma série de fatores, quais sejam:

- Temperatura ambiente;
- Comprimento da resistência elétrica e sua distribuição ao longo do tubo;
- Diâmetro da tubulação;

- Isolamento da resistência;
- Fluxo de massa de refrigerante, etc.

Tabela 3.1 - Parâmetros do controlador PID

Pressão [bar]	Subresfriamento [°C]	P	I	D
9	5	75	137	150
9*	7,5	700	400	5
9	7,5	75	137	150
9	7,5	990	300	5
9*	10	50	137	150
9	10	800	137	150
9	10	30	137	150
11	5	990	400	5
11	7,5	700	400	5
11	10	990	600	5
14*	5	4,9	300	20
14	5	4,9	137	20
14	7,5	4,9	300	20
14	10	4,9	137	20

\* Para esta condição estes são os parâmetros preferenciais. Os duplicados são outras alternativas.

Após a determinação dos parâmetros do PID, repetiram-se vários testes durante o processo de calibração do medidor turbina. Todos apresentaram repetibilidade com exceção da condição 9bar/10°C (pressão e subresfriamento na entrada do tubo capilar), devido ao pequeno incremento de temperatura, algo em torno de 1°C a 2°C, a ser conseguido através da resistência de aquecimento.

Os testes foram considerados estabilizados quando as oscilações máximas das pressões, temperaturas e fluxo de massa, num período de 30 minutos, se mantinham respectivamente em 0,1bar, 0,4°C e 0,05kg/h. Deste período de gravação, escolhe-se um intervalo de 5 minutos, onde as variáveis possuem maior estabilidade, e posteriormente um

outro intervalo, de 1,5 minutos, para se obter os valores médios. O apêndice IV mostra três testes típicos, processados na forma indicada.

A tabela 3.2 mostra os resultados obtidos durante o processo de ajuste do PID. A figura 3.3 mostra o comportamento do fluxo de massa em relação ao subresfriamento na entrada do tubo capilar para os três níveis de pressão considerados. Pode-se verificar que a tendência obtida segue bem de perto as observações de Gonçalves (1994), mostradas na figura 3.4.

Tabela 3.2 - Resultados dos testes

Testes / Variáveis	FM [kg/h]	$\Delta$ FM [kg/h]	Pe [bar]	$\Delta$ Pe [kg/h]	Ps [bar]	Tint1 [°C]	Sub [°C]	$\Delta$ Sub [°C]	Fmcalc. [kg/h]
									D <sub>microscópio</sub> 0,596mm
cap01teste3	2,53	D	14,052	0,009	1,061	42,5	10,1	0,1	2,06
cap01teste4	2,52	D	14,041	0,007	1,078	42,5	10,0	0,1	2,05
cap01teste5	1,76	D	9,014	0,006	1,073	29,6	6,0	0,1	1,34
cap01teste6	1,75	D	9,047	0,008	1,074	30,3	5,4	0,1	1,30
cap01teste7	1,72	D	9,000	0,006	1,078	30,5	5,0	0,1	1,27
cap01teste8	1,74	D	9,029	0,006	1,076	30,4	5,3	0,1	1,29
cap01teste9	1,74	D	9,033	0,007	1,077	30,4	5,3	0,1	1,29
cap01teste10	1,72	D	8,989	0,006	1,075	30,5	5,0	0,1	1,27
cap01teste11	1,86	D	9,013	0,006	1,072	25,4	10,2	0,1	1,60
cap01teste12	1,85	D	8,996	0,007	1,071	25,5	10,0	0,2	1,59
cap01teste13	1,86	D	9,019	0,006	1,069	25,6	10,0	0,1	1,59
cap01teste14	1,82	D	8,999	0,007	1,075	27,9	7,6	0,2	1,45
cap01teste15	1,81	D	9,002	0,008	1,078	28,1	7,4	0,1	1,44
cap01teste16	1,82	D	9,002	0,006	1,079	27,8	7,7	0,1	1,46
cap01teste17	1,81	D	9,002	0,005	1,077	28,2	7,3	0,1	1,43
cap01teste18	2,00	D	11,018	0,007	1,080	37,9	5,1	0,1	1,45
cap01teste19	2,00	D	11,017	0,005	1,079	38,1	4,9	0,1	1,44
cap01teste20	2,19	0,01	11,011	0,007	1,079	33,0	10,0	0,2	1,78
cap01teste21	2,19	D	10,996	0,006	1,077	32,9	10,1	0,2	1,79
cap01teste22	2,19	D	11,000	0,007	1,077	33,0	9,9	0,2	1,78
cap01teste23	2,11	D	11,031	0,007	1,075	35,6	7,4	0,1	1,62
cap01teste24	2,10	D	11,025	0,005	1,073	35,5	7,5	0,1	1,63
cap01teste25	2,09	D	10,960	0,007	1,074	35,5	7,4	0,1	1,61
cap01teste26	2,50	D	14,011	0,013	1,079	42,4	10,0	0,1	2,05
cap01teste27	2,50	0,01	14,014	0,007	1,079	42,4	10,1	0,1	2,06
cap01teste28	2,31	0,03	14,027	0,009	1,076	47,5	5,0	0,1	1,70
cap01teste29	2,38	D	14,012	0,008	1,072	44,9	7,5	0,1	1,89
cap01teste30	2,38	D	14,013	0,006	1,069	44,8	7,6	0,1	1,90
cap01teste31	2,38	0,01	14,021	0,009	1,069	44,9	7,6	0,1	1,89
cap01teste32	2,31	0,01	14,014	0,007	1,067	47,4	5,0	0,1	1,70

D - Variação desprezível quando comparada com a incerteza da medida



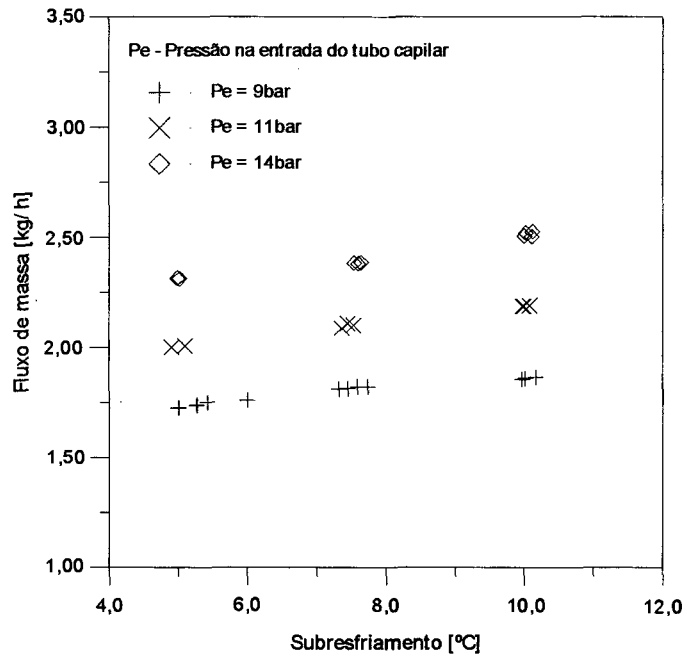


Figura 3.3 - Fluxo de massa vs. subresfriamento

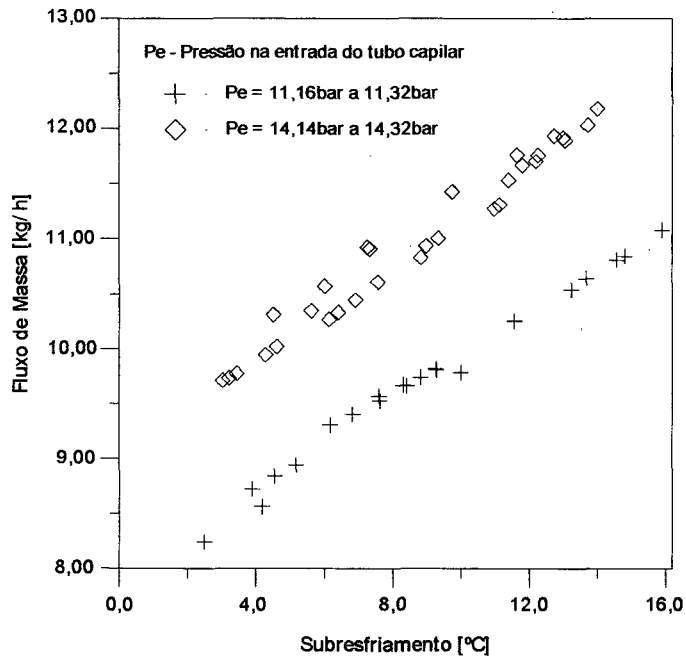


Figura 3.4 - Fluxo de massa vs. subresfriamento (Gonçalves, 1994)

A figura 3.5 compara o fluxo de massa experimental com o calculado através do programa CAPILAR (Boabaid, 1994). Verifica-se que o programa prevê um valor de fluxo de massa em torno de 20% inferior ao valor experimental.

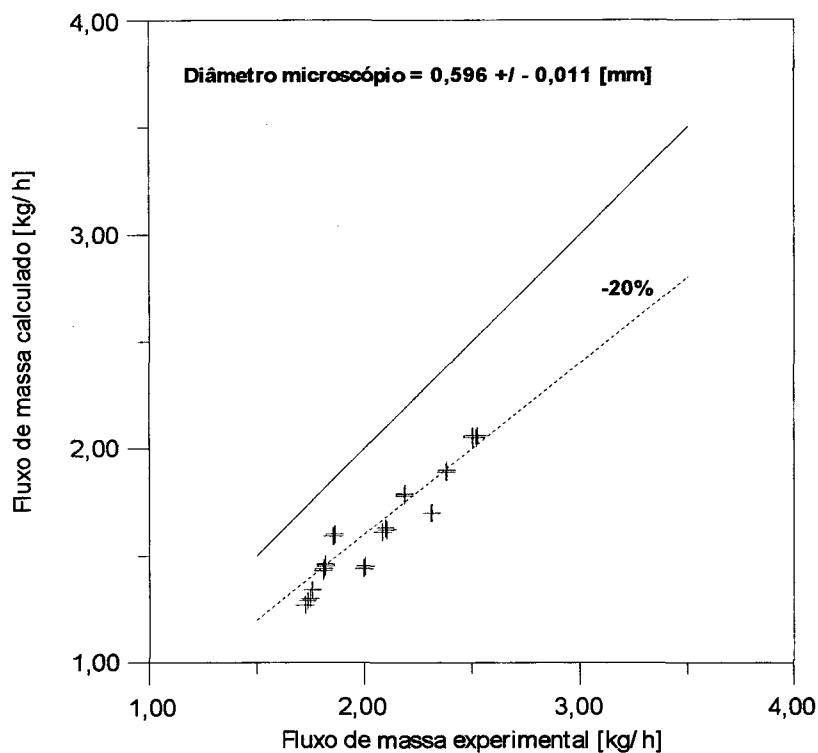


Figura 3.5 - Fluxo de massa calculado vs. experimental

Os testes iniciais foram realizados utilizando-se somente um compressor. Posteriormente foram utilizados dois compressores associados em série, com a finalidade de facilitar o processo de controle da concentração de contaminante no óleo e de óleo no fluido refrigerante.

Para partir simultaneamente os compressores, é necessário manter o by-pass na sucção do compressor CC aberto, evitando que este seja desarmado pelo pressostato de alta (PA).

Caso o by-pass seja mantido fechado ocorrerá um desbalanceamento entre o fluxo de massa deslocado pelo compressor CC e o fluxo de massa que passa através da válvula de expansão VEP2, provocando a elevação da pressão de descarga.

O by-pass é mantido aberto até que as pressões de sucção dos compressores se igualem, instante no qual o by-pass pode ser fechado.

Foram realizados três testes para verificar o funcionamento da bancada com os dois compressores operando em série. Cada teste foi realizado numa pressão diferente (9bar, 11bar, 14bar). Os resultados são mostrados na tabela 3.3 e no Apêndice VI.

Tabela 3.3 - Estabilização da bancada com dois compressores em série

Testes / Variáveis	FM [kg/h]	$\Delta$ FM [kg/h]	Pe [bar]	$\Delta$ Pe [kg/h]	Ps [bar]	Tint1 [°C]	Sub [°C]	$\Delta$ Sub [°C]	FMcalc. [kg/h]
									$D_{\text{microscópio}}$ 0,596mm
cap01teste43	1,79	D	9,021	0,006	1,092	30,4	5,2	0,1	1,29
cap01teste47	2,52	D	14,021	0,007	1,075	42,4	10,1	0,1	2,06
cap01teste49	2,11	D	11,027	0,007	1,077	35,6	7,4	0,1	1,62

#### 4 - Medição da Concentração de Óleo no Fluido Refrigerante

Para avaliar a concentração de óleo no refrigerante, seguiu-se a norma da ASHRAE (ASHRAE 41.4, 1996). No apêndice VII, mostra-se o procedimento empregado bem como o material necessário para realizá-lo.

Primeiramente, com o objetivo de verificar o grau de precisão da norma da ASHRAE, realizaram-se alguns testes a partir de amostras de concentração conhecida. A metodologia utilizada na realização destes testes preliminares encontra-se descrita no apêndice VIII.

Os resultados obtidos através deste procedimento inicial de verificação são mostrados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Medição de concentração de óleo no refrigerante.

Teste	Experimentador	$m_{\text{óleo dosado}}[\text{g}]$	$m_{\text{refrigerante}}[\text{g}]$	$C_{\text{br}} [\%]$	$M_{\text{óleo medida}}[\text{g}]$	$C_{\text{br}} [\%]$
08	A	0,38	59,18	0,64	0,38	0,64
12	A	4,59	41,96	10,94	4,60	10,96
13	A	2,67	56,21	4,75	2,66	4,73
15	A	0,38	57,85	0,66	0,37	0,64
16	A	0,49	46,54	1,05	0,48	1,03
18	A	0,47	58,44	0,80	0,48	0,82
19	A	0,94	21,75	4,32	0,94	4,32
20	B	0,42	48,81	0,86	0,41	0,84
21	C	0,34	58,40	0,58	0,35	0,60
22	B e C	0,48	39,30	1,22	0,49	1,25

Verifica-se que não há necessidade de se empregar o procedimento adicional para massas de óleo inferiores a 3g, prescrito por norma.

O limitante do processo é a massa de óleo e não a concentração, sendo assim, se houver necessidade de se medir concentrações menores do que as indicadas na tabela 4.1 basta coletar uma amostra maior da mistura óleo/fluido refrigerante.

É importante mencionar que os testes 20 e 21 foram realizados por diferentes experimentadores (B e C, respectivamente) e o teste 22 foi realizado por dois experimentadores (B + C), sendo que um preparou a amostra e o outro fez a medição de concentração, sem conhecer previamente a concentração da amostra.

Após os testes preliminares, descritos anteriormente, tornou-se possível definir um padrão modificado para a medição da concentração de óleo no fluido refrigerante. Este padrão é descrito em detalhes no apêndice IX.

Definido o padrão de medição tornou-se possível realizar testes na bancada com o intuito de verificar a eficiência dos separadores de óleo e do conjunto separadores de óleo / filtros coalescentes. Para a realização destes testes aguardou-se a bancada entrar em regime permanente numa condição desejada e procedeu-se, então, a coleta da mistura fluido refrigerante / óleo e a análise da concentração. A coleta foi realizada na região de entrada do tubo capilar. Os resultados obtidos são mostrados nas tabelas 4.2 a 4.5.

Tabela 4.2 - Condição de operação da bancada antes e após a coleta do fluido refrigerante

Testes / Variáveis	Condição	FM [kg/h]	$\Delta$ FM [kg/h]	Pe [bar]	$\Delta$ Pe [kg/h]	Ps [bar]	Tint1 [°C]	Sub [°C]	$\Delta$ Sub [°C]	Fmcalc. [kg/h]
										$D_{\text{microscópio}}$ 0,596mm
cap01teste50	Ac.	2,51	D	13,998	0,006	1,062	42,4	10,0	0,1	2,05
cap01teste51	Dc.	2,43	D	14,027	0,006	1,062	42,4	10,1	0,1	2,06
cap01teste52	Ac.	1,77	D	9,012	0,004	1,066	30,4	5,2	0,1	1,28
cap01teste53	Dc.	1,73	D	9,001	0,010	1,066	30,3	5,2	0,1	1,28
cap01teste55	Ac.	2,44	D	14,029	0,008	1,064	42,4	10,2	0,1	2,06
cap01teste56	Dc.	2,45	D	14,000	0,008	1,064	42,3	10,1	0,1	2,05

Onde.:

Ac. - Antes da coleta de fluido refrigerante;

Dc. - Depois da coleta de fluido refrigerante.

Tabela 4.3 - Concentração de óleo no fluido refrigerante na entrada do tubo capilar  
Testes somente com separadores de óleo

Teste	$m_{\text{cilindro}}$ [g]	$m_{\text{amostra}}$ [g]	$m_{\text{óleo}}$ [g]	$C_{\text{br}}$ [%]
cap01teste50	671,03	59,07	0,03	0,05
cap01teste52	550,22	48,61	0,06	0,12
cap01teste55	443,28	59,85	0,00	0,00

Tabela 4.4 - Condição de operação da bancada antes da coleta do fluido refrigerante

Testes / Variáveis	Condição	FM [kg/h]	$\Delta$ FM [kg/h]	Pe [bar]	$\Delta$ Pe [kg/h]	Ps [bar]	Tint1 [°C]	Sub [°C]	$\Delta$ Sub [°C]	Fmcalc. [kg/h]
										$D_{\text{microscópio}}$ 0,596mm
cap01teste57	Ac.	2,53	D	13,998	0,011	1,058	42,4	10,0	0,2	2,05
cap01teste58	Ac.	1,70	D	9,009	0,007	1,063	30,4	5,1	0,1	1,28
cap01teste59	Ac.	2,48	D	14,040	0,006	1,005	42,3	10,2	0,1	2,07

Tabela 4.5 - Concentração de óleo no fluido refrigerante na entrada do tubo capilar  
Testes com o conjunto separadores de óleo / filtros coalescentes

Teste	$m_{cilindro}$ [g]	$m_{amostra}$ [g]	$m_{óleo}$ [g]	$C_{br}$ [%]
cap01teste57	443,25	59,92	0,02	0,03
cap01teste58	443,25	54,63	0,01	0,02
cap01teste59	443,25	59,97	0,00	0,00

Os resultados apresentados permitem concluir que os separadores de óleo são eficientes e que esta eficiência é aumentada com a presença dos filtros coalescentes.

Os filtros coalescentes foram abertos após 18 horas de funcionamento com o intuito de verificar a condição do elemento filtrante e o depósito de óleo no copo. Constatou-se que o elemento filtrante estava em excelente estado e que o nível de óleo no copo era de poucos mililitros.

## **5 - Bomba Dosadora**

Nesta parte do trabalho, serão apresentadas as atividades iniciais relacionadas com a dosagem de óleo, avaliando-se os efeitos da dosagem pulsante de óleo sobre o escoamento de fluido refrigerante e o efeito da dosagem de óleo sobre o fluxo de massa. O efeito da presença de óleo sobre a variação do fluxo de massa e um teste típico serão também analisados.

### **5.1 - Efeitos da Dosagem Pulsante sobre o Escoamento de Fluido Refrigerante**

Alguns testes foram realizados com o objetivo de verificar o efeito dos pulsos da bomba dosadora sobre o fluxo de massa, pressão na entrada do tubo capilar e sobre a concentração de óleo no fluido refrigerante.

Com a dosagem, o fluxo de massa e a pressão passaram a apresentar oscilações, respectivamente, da ordem de 0,02kg/h e 0,250bar, como pode ser visto nas figuras 5.1 e 5.2, referentes ao teste "cap01teste63". Considerou-se que estas oscilações estão dentro de um limite aceitável para o estudo proposto.



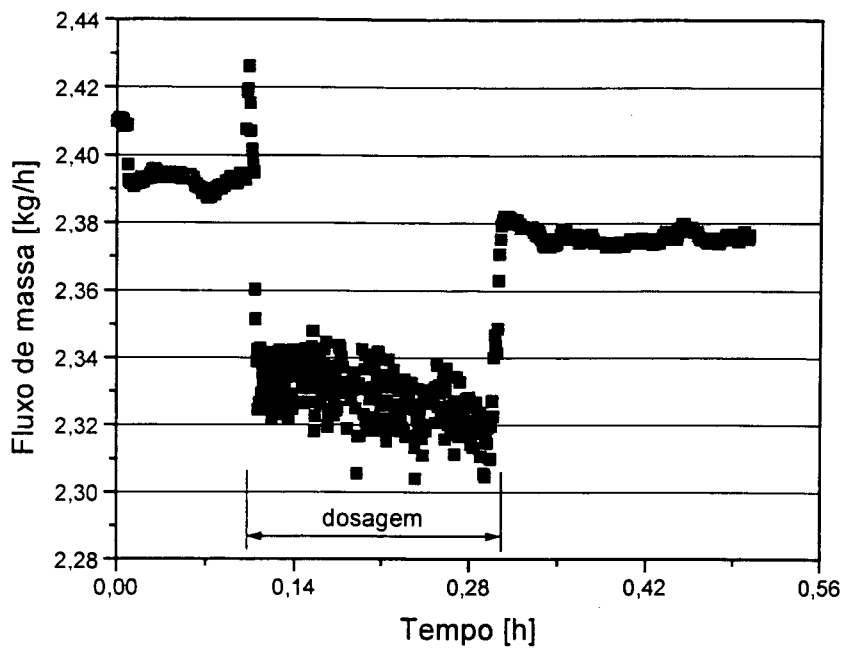


Figura 5.1 - Oscilação do fluxo de massa durante a dosagem

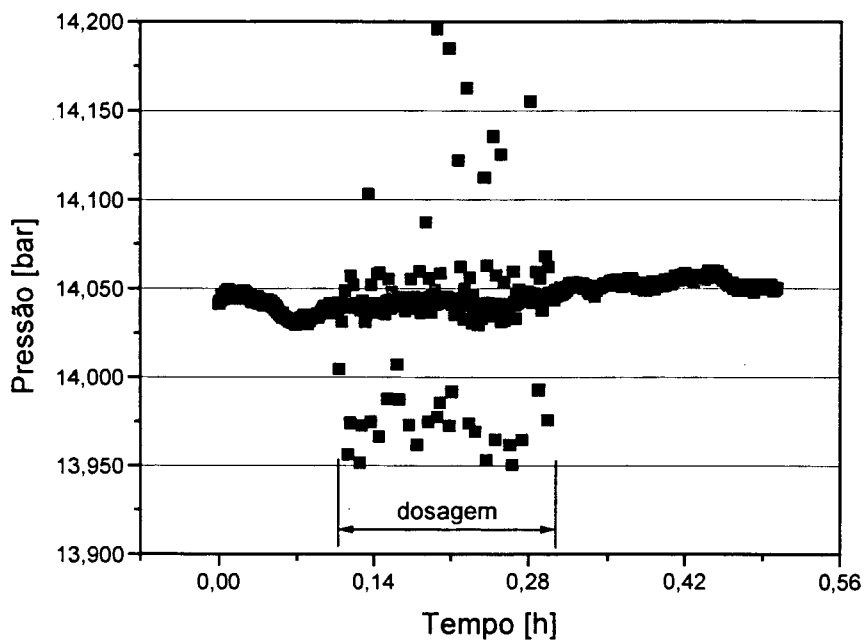
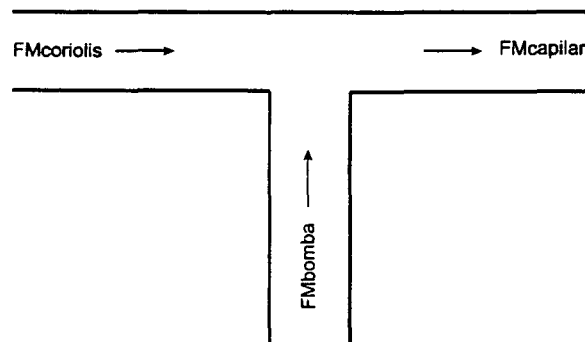


Figura 5.2 - Oscilação da pressão na entrada do tubo capilar durante a dosagem

Verifica-se também que o fluxo de massa após o término da dosagem retorna para um valor inferior ao apresentado antes do início da dosagem, o que já seria uma indicação de uma possível obstrução do tubo capilar pelo óleo. Verifica-se também que durante a dosagem o fluxo de massa diminui, novamente indicando uma obstrução.

Os saltos no fluxo de massa nos instantes inicial e final da dosagem podem ser explicados por um balanço de massa, ou seja, como o fluxo de massa através do tubo capilar se mantém constante, o fluxo de massa a montante da bomba deve diminuir já que uma certa vazão de óleo está sendo introduzida pela bomba (ver figura 5.3).



$$F_{m\text{capilar}} = F_{m\text{coriolis}} + F_{m\text{bomba}} = \text{constante}$$

Figura 5.3 - Balanço de massa (Bomba dosadora/Tubo capilar/Medidor de fluxo)

Para verificar a uniformidade da concentração de óleo no fluido refrigerante, foram realizados testes com uma pressão de 14bar e diferentes concentrações. Os resultados são mostrados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Concentração de óleo no fluido refrigerante / verificação da homogeneidade

Teste	Coleta	FM <sub>óleo</sub> [g/h]	FM <sub>ref</sub> [kg/h]	C <sub>brm</sub> [%]	ASHRAE			
					m <sub>óleo</sub> [g]	m <sub>ref</sub> [g]	C <sub>br</sub> [%]	Dif. [%]
cap01teste74	A	88,63	2,30	3,85	2,17	57,57	3,77	-0,08
cap01teste74	B	88,63	2,33	3,80	2,23	57,26	3,89	0,09
cap01teste75	A	20,14	2,32	0,87	0,53	59,64	0,89	0,02
cap01teste75	B	20,14	2,40	0,84	0,52	59,22	0,88	0,04
cap01teste75	C	20,14	2,34	0,86	0,53	61,09	0,87	0,01

Para o cálculo do fluxo de massa de óleo (FM<sub>óleo</sub>) utilizou-se o valor de 0,94g/cm<sup>3</sup> para a densidade do óleo éster  $\alpha$ 22E. O apêndice II mostra detalhes da medição da densidade do óleo juntamente com a determinação da sua incerteza.

As amostras de óleo/fluido refrigerante foram coletadas em tempos aleatórios com o objetivo de verificar a existência ou não de variações na concentração devido ao fato da dosagem ser pulsante. Para o teste "cap01teste74" o intervalo entre coletas foi de aproximadamente 15 minutos e para o teste "cap01teste75" de aproximadamente 30 minutos.

Os intervalos entre coletas foram limitados pela capacidade da coluna de calibração (200ml) e pelo tempo requerido para a re-estabilização da bancada.

Verificou-se uma boa concordância entre a concentração obtida através da relação entre os fluxos mássicos de óleo e de fluido refrigerante (C<sub>brm</sub>) e a obtida pelo método da ASHRAE (C<sub>br</sub>), indicando que existe uma boa homogeneização entre óleo e fluido refrigerante, apesar do processo de dosagem ser pulsante. Constatou-se também que a concentração de óleo no fluido refrigerante não varia com o momento da coleta.

É importante mencionar que no teste "cap01teste74" a bomba estava funcionando com 60 strokes/minuto e no teste "cap01teste75" com 14 strokes/minuto. Ou seja, no teste "cap01teste75" esperava-se uma homogeneização menor, o que entretanto, não foi constatado.

De acordo com a norma da ASHRAE, a concentração no teste “cap01teste75” é de  $0,88\% \pm 0,02\%$ . Aplicando a mesma metodologia para o cálculo da concentração a partir da relação entre os fluxos mássicos, obtém-se o valor de  $0,86\% \pm 0,03\%$ .

Concluiu-se assim, que a bomba dosadora satisfaz plenamente as condições desejadas, ou seja, mantém a concentração de óleo no fluido refrigerante constante na entrada do tubo capilar.

## 5.2 - Efeito da Dosagem de Óleo sobre o Fluxo de Massa através do Tubo Capilar

De acordo com o item 5.1, existe uma tendência de redução do fluxo de massa através do tubo capilar durante o período de dosagem. Para melhor avaliar este efeito, realizou-se um teste dosando óleo por um tempo de 7,83 horas com uma concentração média de 0,84%. O resultado é ilustrado nas figuras 5.4 e 5.5, e se refere ao teste “cap01teste76”.

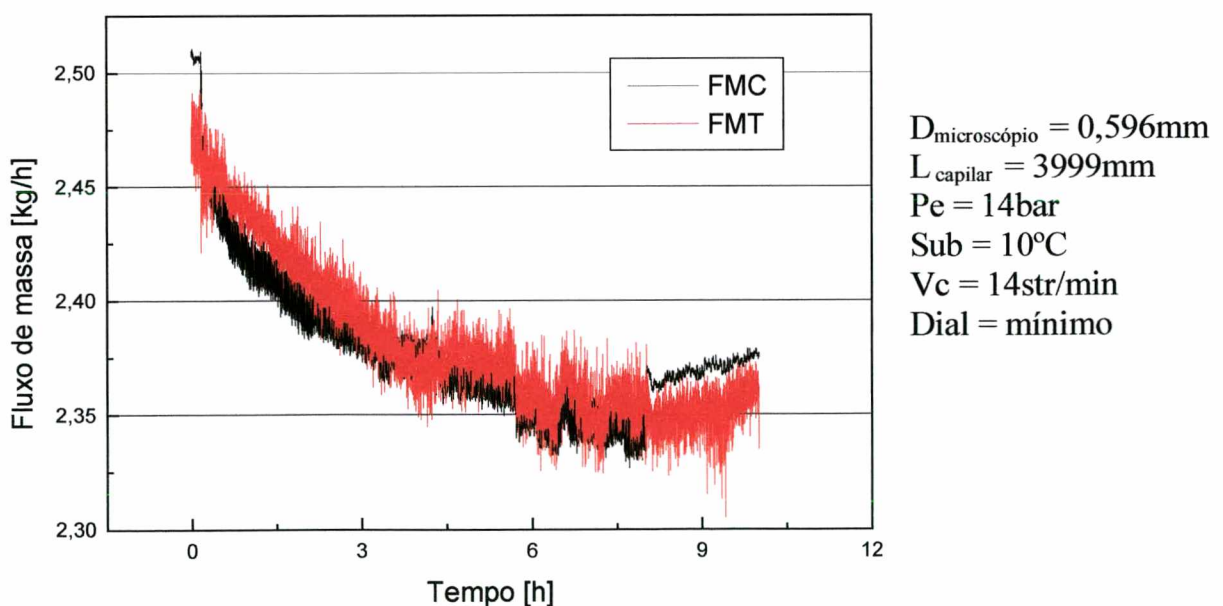


Figura 5.4 - Fluxo de massa vs tempo / cap01teste76

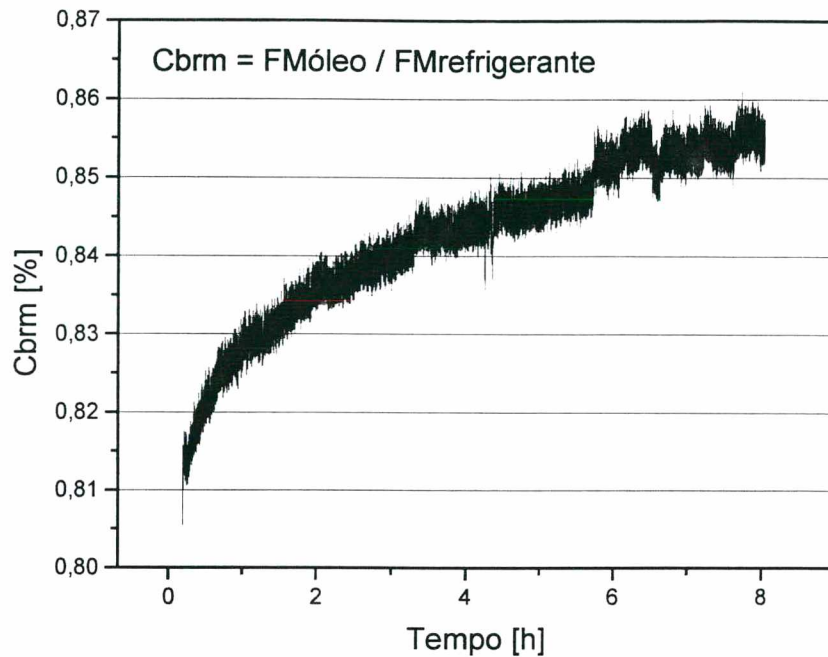


Figura 5.5 - Concentração vs tempo / cap01teste76

A diferença existente entre o fluxo de massa indicado pelo medidor Coriolis (FMC) e o medidor turbina (FMT) encontra-se dentro da faixa de incerteza do medidor turbina. O importante é que os dois medidores apresentem o mesmo comportamento. Deve-se ressaltar que o resultado a ser considerado é o fornecido pelo medidor Coriolis, sendo o medidor turbina utilizado apenas para efeitos comparativos.

Observou-se uma queda contínua do fluxo de massa com o tempo (aproximadamente 6,5% em 7,83 horas). É importante mencionar que o fluxo de massa retornou ao valor inicial somente após três partidas da bancada e com a circulação de fluido refrigerante isento de óleo (aproximadamente 30 horas de funcionamento).

Para averiguar a repetibilidade na queda do fluxo de massa realizou-se um outro teste, nas mesmas condições de pressão e subresfriamento do teste “cap01teste76”, com uma concentração de óleo em fluido refrigerante média de 0,86% e durante um período de 48 horas. O resultado é ilustrado nas figuras 5.6 e 5.7, e se refere ao teste “cap01teste80”.

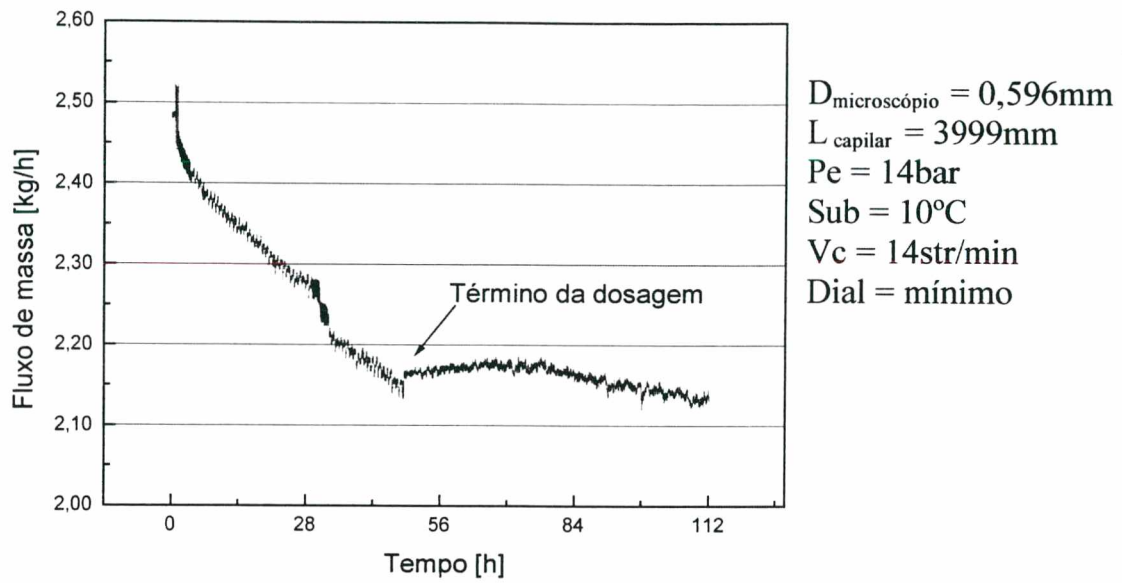


Figura 5.6 - Fluxo de massa vs. tempo / 48horas / cap01teste80

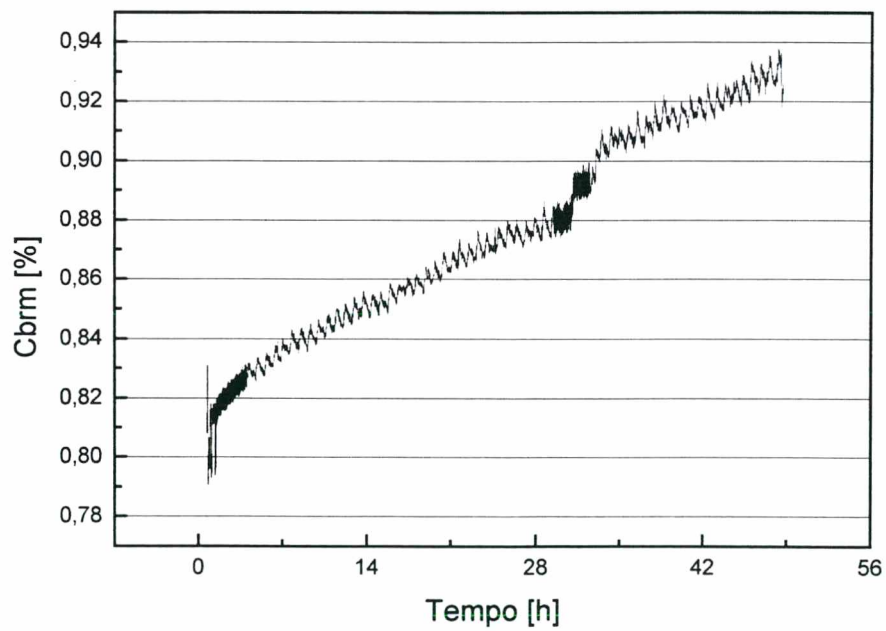


Figura 5.7 - Concentração vs. tempo / 48horas / cap01teste80

Pode-se verificar que ocorre uma redução de 13% no fluxo de massa após 48 horas de funcionamento, e que não há uma tendência de estabilização. Após o término da dosagem manteve-se a bancada em operação por aproximadamente 70 horas e verificou-se que o fluxo de massa não retornava ao valor inicial. Adicionalmente, partiu-se a bancada (3) três vezes, circulando fluido refrigerante isento de óleo, e observou-se também que o fluxo de massa não retornava ao valor inicial. O retorno à condição inicial só foi possível após a lavagem do tubo capilar com CFC11.

A figura 5.8 mostra o comportamento do fluxo de massa com o tempo para os testes “cap01teste76” e “cap01teste80”, verificando-se uma certa repetibilidade no processo de queda do fluxo de massa.

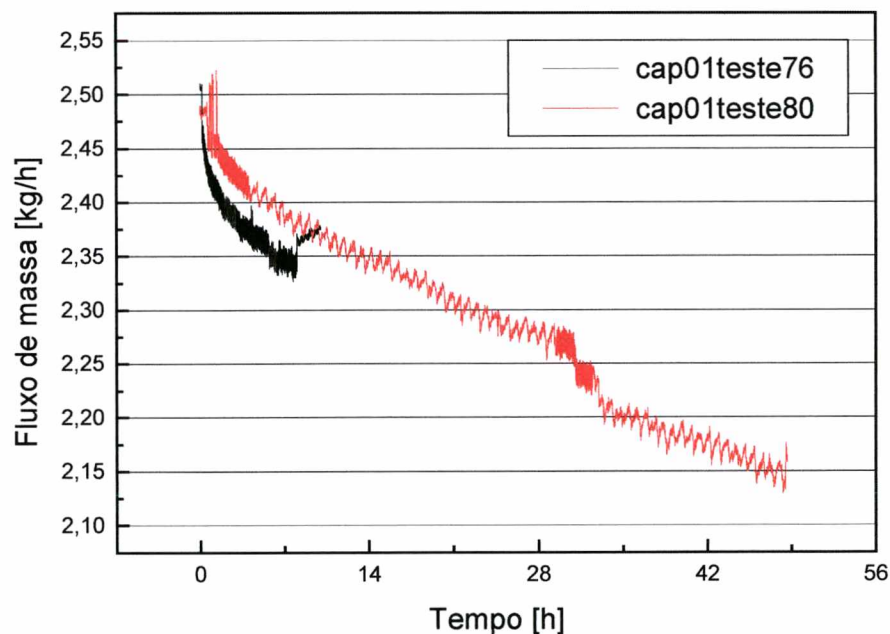


Figura 5.8 - Fluxo de massa vs. tempo / repetibilidade



### 5.3 - Efeito do Óleo sobre a Variação do Fluxo de Massa

O efeito da presença de óleo no fluido refrigerante sobre o fluxo de massa através do tubo capilar se manifesta através das variações de viscosidade e da pressão de vapor.

O aumento da viscosidade aumenta a perda de carga, reduzindo a extensão da região líquida e, desta forma, reduzindo também o fluxo de massa. A redução da pressão de vapor atrasa o ponto de início de vaporização, aumentando assim o fluxo de massa.

A figura 5.9 mostra estes dois efeitos, separadamente e conjuntamente. A linha preta representa a perda de pressão ao longo do tubo capilar para fluido refrigerante puro, a linha vermelha refere-se à mistura óleo / fluido refrigerante considerando somente o efeito da viscosidade e a linha azul refere-se à mistura óleo / fluido refrigerante considerando somente o efeito da redução da pressão de saturação. A linha verde representa o efeito combinado (viscosidade e pressão de saturação).

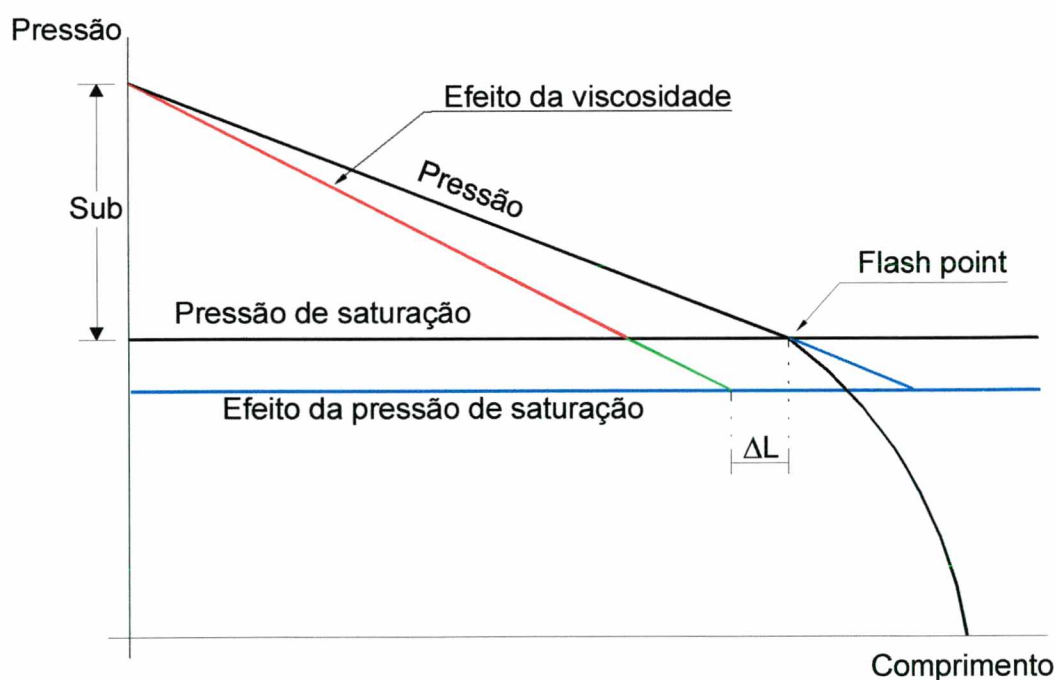


Figura 5.9 - Perfil de pressão ao longo de um tubo capilar



Na representação mostrada na figura 5.9 a posição do flash point variou " $\Delta L$ ", ou seja, diminuiu o comprimento de líquido e conseqüentemente o fluxo de massa.

É importante mencionar que o " $\Delta L$ " pode ser positivo ou negativo dependendo da concentração de óleo no fluido refrigerante e do grau de subresfriamento na entrada do tubo capilar.

A figura 5.10 mostra o efeito do grau de subresfriamento sobre a posição do flash point. Para um pequeno grau de subresfriamento (Sub2) o efeito da viscosidade é pequeno (" $\Delta L_2$ "), podendo o efeito da pressão de saturação ser mais importante e desta maneira propiciar um " $\Delta L$ " positivo, o que significaria um aumento no fluxo de massa. Para maiores graus de subresfriamento, o efeito é inverso.

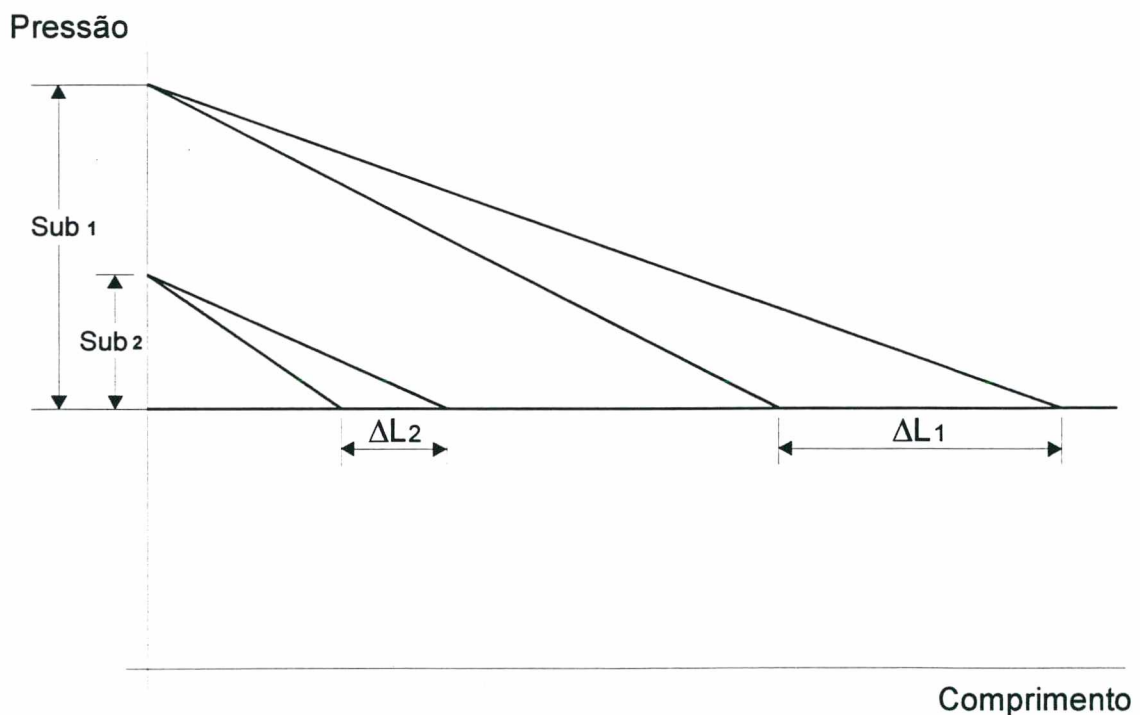


Figura 5.10 - Perfil de pressão num tubo capilar - efeito do grau de subresfriamento

A análise anterior, entretanto, não é suficiente para explicar a queda do fluxo de massa ao longo do tempo. Neste caso, o provável é que o óleo forma um filme dentro do tubo capilar (adesão) diminuindo o diâmetro, o que aumenta a perda de carga e diminui o fluxo de massa. Este filme se forma gradualmente ao longo do tempo.

### 5.4 - Análise de um Teste Típico

Neste item, serão fornecidos detalhes a respeito do processamento e análise de um teste típico, dosando-se óleo na entrada do tubo capilar. A eficiência dos processos de dosagem e filtragem de óleo será também analisada.

O teste utilizado como referência, denominado "cap01teste85", foi realizado com uma pressão de 14 bar e com um grau de subresfriamento de 10°C. Este teste teve uma duração de 86,47 horas e gerou uma redução do fluxo de massa de 15,2% (de 2,52kg/h para 2,13kg/h). Como consequência, a concentração de óleo (éster  $\alpha$ 22E) no refrigerante também variou, estabelecendo-se num valor médio de 0,56% (ver figuras 5.11 e 5.12).

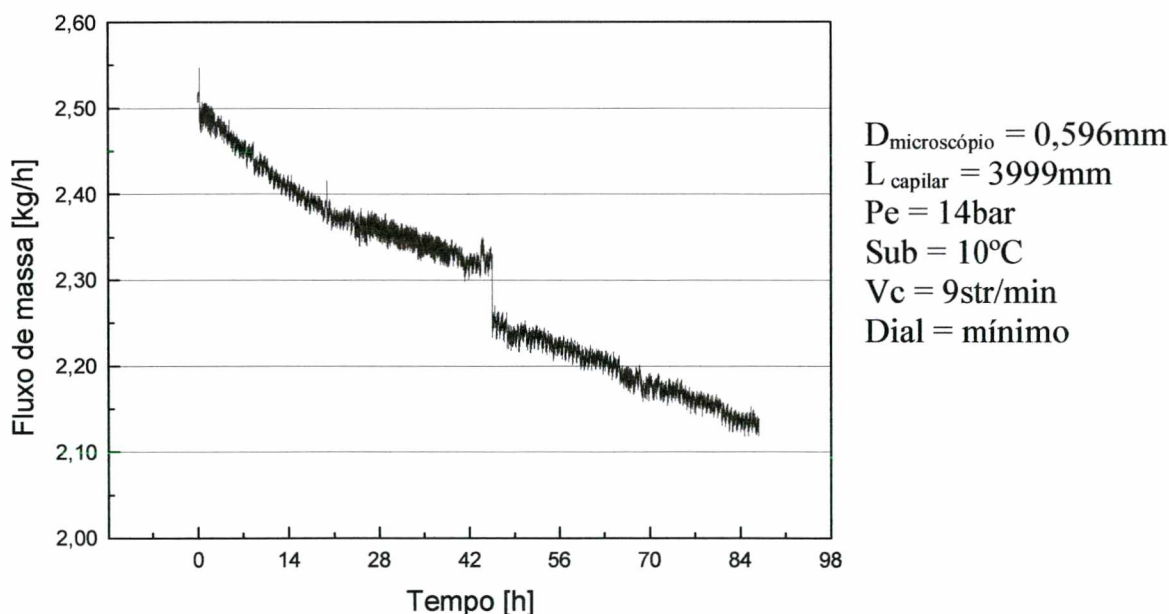


Figura 5.11 - Fluxo de massa vs. tempo durante 86,47 horas de dosagem de óleo

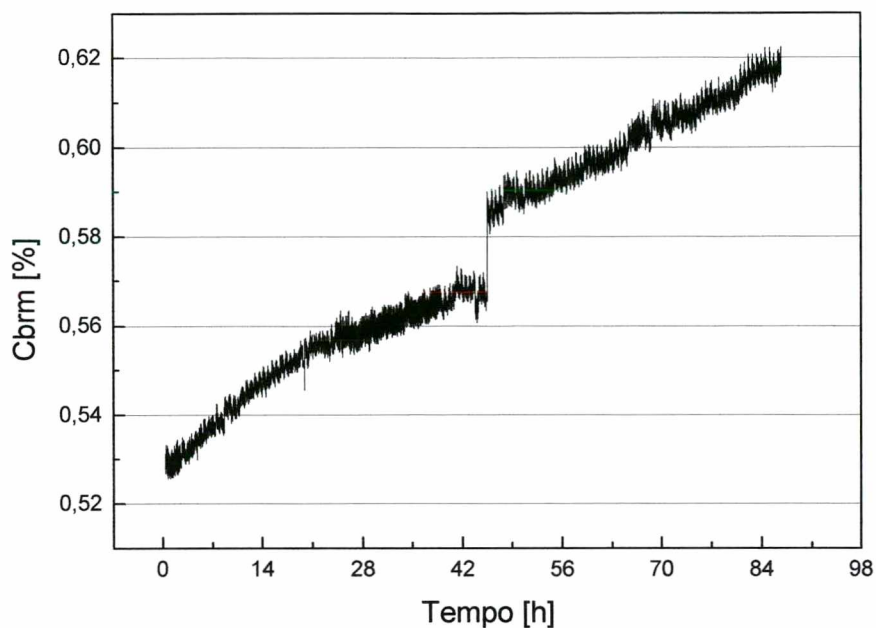


Figura 5.12 - Concentração vs. tempo durante 86,47 horas de dosagem de óleo

Pode-se observar a presença de um salto no fluxo de massa, provavelmente associado com a variação do ponto de início da vaporização no interior do tubo capilar, ponto este não afetado, a princípio, pelo tipo e concentração de óleo.

As figuras 5.13 e 5.14 mostram a evolução temporal das temperaturas ao longo do tubo capilar durante o teste em questão. Fica evidente que o comportamento das temperaturas é descendente com o tempo, indicando um aumento da perda de carga ao longo do tubo capilar e conseqüentemente uma redução do fluxo de massa. Verifica-se também que o salto no fluxo de massa, mostrado na figura 5.11, é acompanhado por variações abruptas das temperaturas próximas do flash point (início da vaporização).

A figura 5.15, além de mostrar o posicionamento dos termopares, utilizados na medição das temperaturas mostradas nas figuras 5.13 e 5.14, ilustra os perfis de temperatura ao longo do tubo capilar antes e ao final do período de dosagem. Verifica-se que ocorreu um

adiantamento do ponto de início da vaporização (variação da inclinação do perfil a partir do ponto 4), fato este também associado com a redução de fluxo de massa.

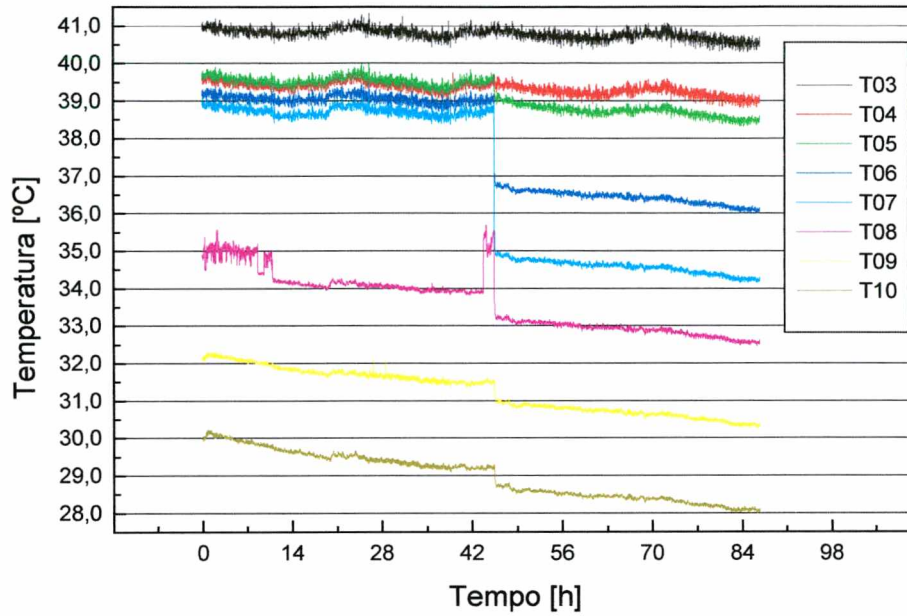


Figura 5.13 - Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo / T03 a T10

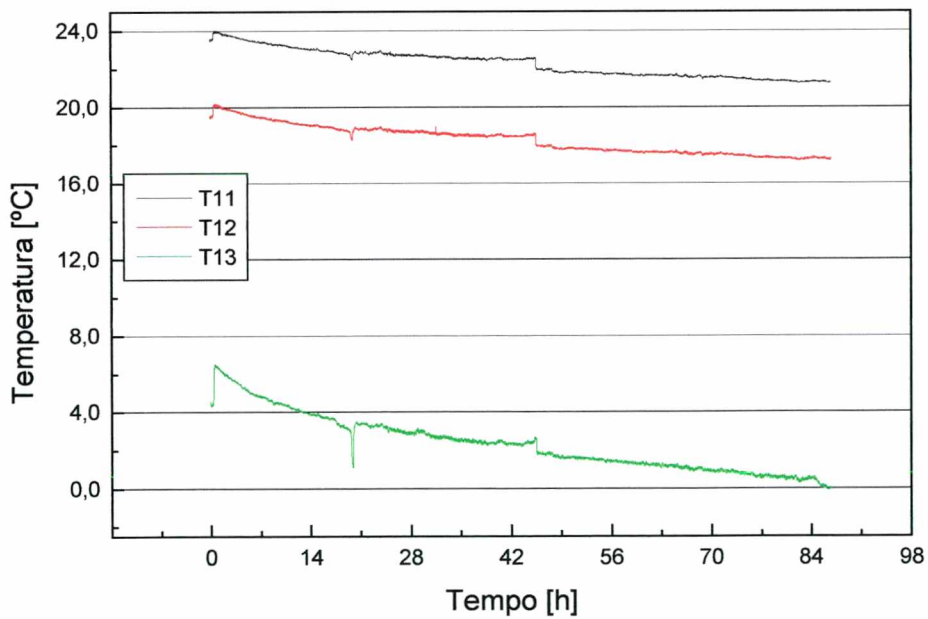


Figura 5.14 - Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo / T11 a T13



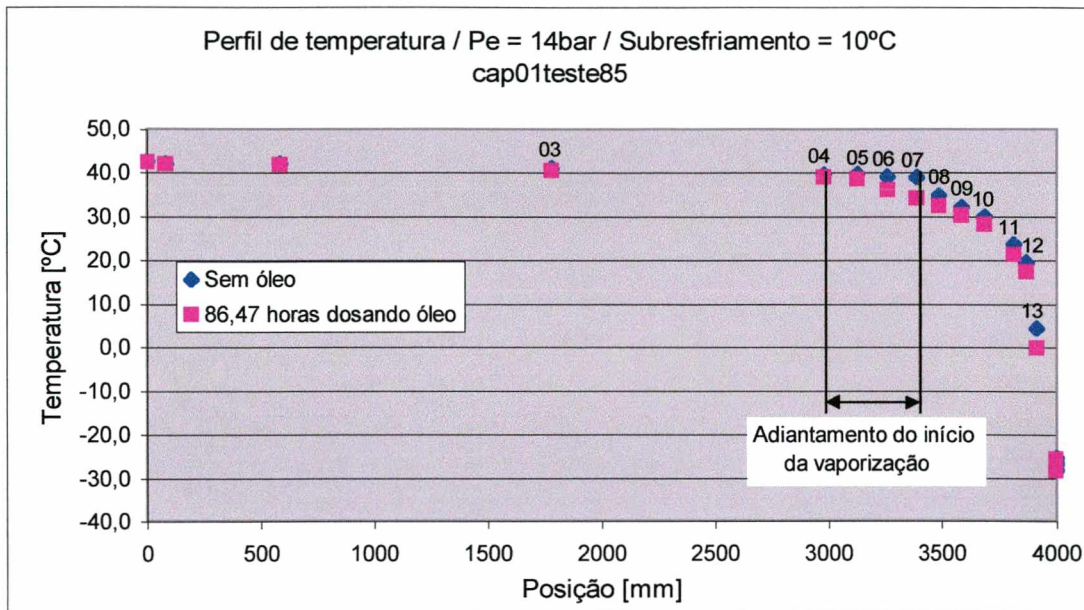


Figura 5.15 - Perfil de temperatura ao longo do tubo capilar antes e ao final da dosagem

Antes de finalizar a dosagem, foram retiradas amostras da mistura óleo/refrigerante a montante e a jusante da bomba dosadora, com o intuito de verificar a eficiência do sistema de dosagem e filtragem de óleo. Os resultados são mostrados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Concentração de óleo no fluido refrigerante antes de finalizar a dosagem

	$C_{br}$ [%]	$C_{brm}$ [%]
A montante da bomba dosadora	0,00	
A jusante da bomba dosadora	0,57	0,62

Pode-se verificar que o sistema de filtragem empregado é bastante eficiente, já que a concentração de óleo no refrigerante a montante da bomba dosadora e ao final do teste é nula. Verifica-se também que o valor medido da concentração a jusante da bomba dosadora ( $C_{br}$ ) é bastante próximo do valor obtido através da relação entre os fluxos mássicos de óleo e

refrigerante (Cbrm), comprovando assim, mais uma vez, a homogeneidade do escoamento e a eficiência do processo de dosagem.

A figura 5.16 mostra a variação do fluxo de massa ao longo do tubo capilar durante o processo de coleta de amostras de refrigerante para medição da concentração (entrada do tubo capilar). Esta coleta é sempre precedida por uma purga, que tem a intenção de eliminar qualquer resíduo de óleo que possa estar acumulado na linha de coleta, o que poderia mascarar o resultado da concentração.

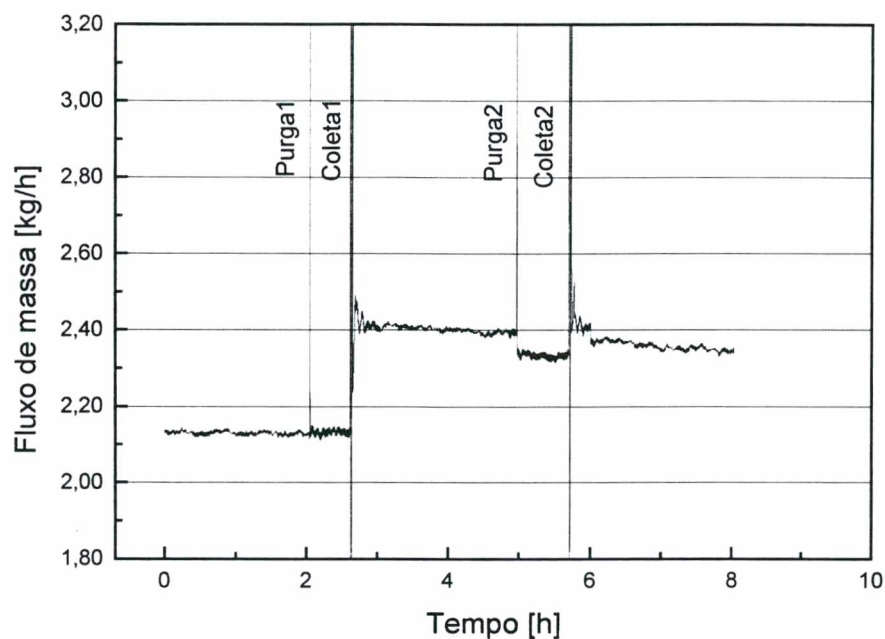


Figura 5.16 - Fluxo de massa no instante das coletas

Verifica-se que, após a primeira coleta, o fluxo de massa assume um valor mais elevado. Uma possível explicação, seria o fato do fluxo de fluido refrigerante ser inicialmente desviado para o cilindro e, depois, repentinamente para o tubo capilar. Isso poderia propiciar um certo arraste de uma possível película de óleo presente no interior do tubo capilar, aumentando assim o fluxo de massa.

## **6 - Investigações Complementares**

O efeito do grau de subresfriamento, da concentração e do tipo de óleo sobre o fluxo de massa de refrigerante ao longo do tubo capilar será investigado neste item. Para tanto resolveu-se dividir a presente análise em duas partes: regime transiente e permanente. Todos os testes foram realizados com o mesmo tubo capilar testado, ou seja, diâmetro nominal de 0,6mm e comprimento de 3999mm.

### **6.1 - Regime Transiente**

A análise dos dados em regime transiente exigiu a introdução de uma nova variável, aqui denominada de taxa de decaimento, a qual expressa a variação absoluta do fluxo de massa ao longo de um determinado intervalo de tempo. A introdução desta nova variável, entretanto, exige que os intervalos de tempo sejam escolhidos com cuidado devido ao aparecimento de saltos de fluxo de massa ao longo dos testes, conforme mostrado na figura 6.1.

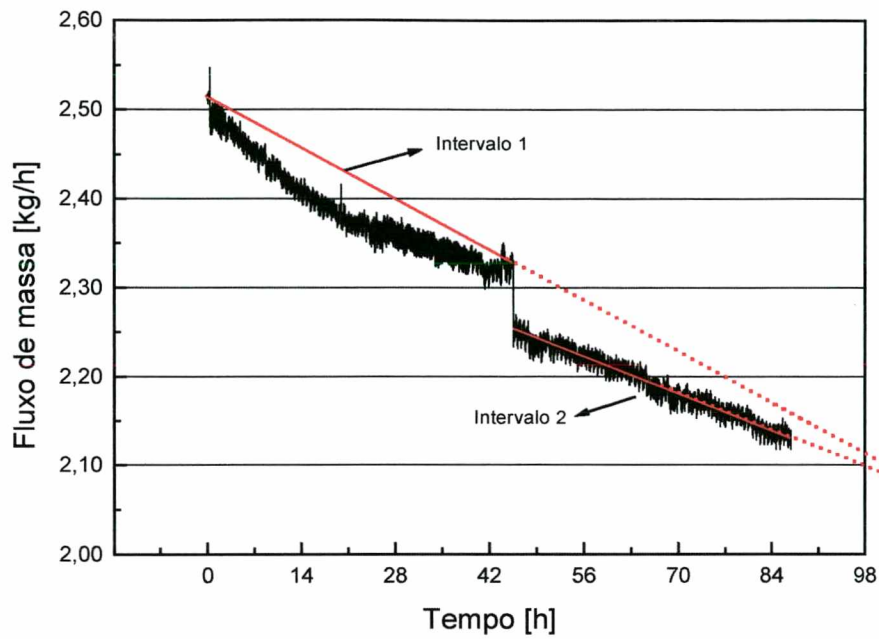


Figura 6.1 - Salto do fluxo de massa / intervalos para taxa de decaimento

Inicialmente, investigou-se o efeito do grau de subresfriamento. Foram analisados três testes; “cap01teste85”, “cap01teste89” e “cap01teste163”; cujas condições são mostradas na tabela 6.1. Maiores detalhes podem ser encontrados no apêndice X.

Tabela 6.1 - Testes analisados / efeito do grau de subresfriamento

Teste	Regime [h]	Pe [bar]	Sub [°C]	Óleo	Cbrm <sub>médio</sub> [%]	H <sub>dosa</sub> [h]	F <sub>mi</sub> [kg/h]	F <sub>mf</sub> [kg/h]	Queda [%]
cap01teste85	NR	14	10	Éster $\alpha$ 22E	0,56	86,47	2,52	2,13	15,2
cap01teste163	10,36	14	10	Éster $\alpha$ 22E	0,65	295,92	2,51	1,86	26,2
cap01teste89	NR	14	5	Éster $\alpha$ 22E	0,56	113,64	2,39	1,91	20,3

Onde:

NR - Fluxo de massa não entrou em regime permanente.



Como ocorreram saltos no fluxo de massa, no início do teste “cap01teste89” e durante o teste “cap01teste85”, resolveu-se considerar dois intervalos de tempo distintos: intervalo1 (1 – 45horas) e intervalo2 (46 – 86horas). Deve-se ressaltar que no teste “cap01teste163” não ocorreram saltos no fluxo de massa. A tabela 6.2 mostra os resultados obtidos para os intervalos selecionados.

Tabela 6.2 - Efeito do grau de subresfriamento na taxa de decaimento

Teste	Sub [°C]	Cbrm <sub>médio1</sub> [%]	Fm <sub>i1</sub> [kg/h]	Fm <sub>r1</sub> [kg/h]	Taxa1 [g/h <sup>2</sup> ]	Cbrm <sub>médio2</sub> [%]	Fm <sub>i2</sub> [kg/h]	Fm <sub>r2</sub> [kg/h]	Taxa2 [g/h <sup>2</sup> ]
cap01teste85	10	0,56	2,50	2,32	4,02	0,60	2,25	2,14	2,75
cap01teste163	10	0,57	2,49	2,36	2,88	0,60	2,36	2,26	2,59
cap01teste89	5	0,53	2,29	2,12	3,85	0,57	2,12	2,00	3,01

A figura 6.2 mostra o comportamento do fluxo de massa referente aos testes “cap01teste85”, “cap01teste89” e “cap01teste163” ao longo de um período de dosagem de 86horas.

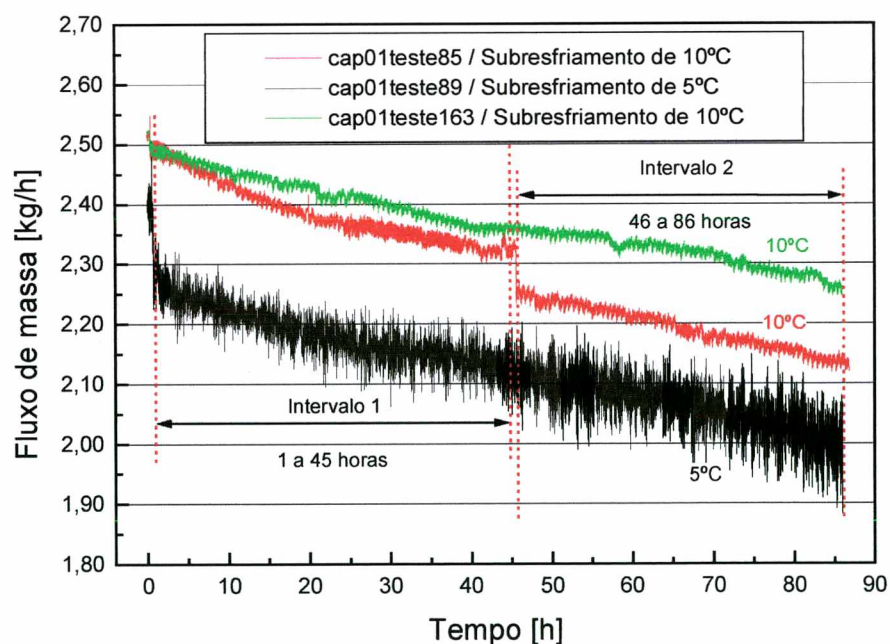


Figura 6.2 - Fluxo de massa vs. tempo / efeito do subresfriamento / regime transiente

Embora a concentração média dos testes, nos dois períodos analisados, não tenha sido exatamente a mesma, pode-se concluir que o efeito do grau de subresfriamento sobre a taxa de decaimento não é significativo, principalmente quando considera-se a variação obtida com testes realizados nas mesmas condições (“cap01teste85” e “cap01teste163”). Fica claro, porém, que a taxa de decaimento reduz com o tempo, indicando a tendência para o regime permanente (a taxa do intervalo2 é inferior a taxa do intervalo1).

Em seguida, resolveu-se investigar o efeito da concentração de óleo sobre a taxa de decaimento. Foram então escolhidos os testes referenciados como “cap01teste80”, “cap01teste85”, “cap01teste163” e “cap01teste94”, cujas condições são mostradas na tabela 6.3. Maiores detalhes destes testes também podem ser encontrados no apêndice X.

Tabela 6.3 - Testes analisados / efeito da concentração de óleo

Teste	Regime [h]	Pe [bar]	Sub [°C]	Óleo	Cbrm <sub>médio</sub> [%]	H <sub>dosa</sub> [h]	Fm <sub>i</sub> [kg/h]	Fm <sub>r</sub> [kg/h]	Queda [%]
cap01teste80	NR	14	10	Éster $\alpha$ 22	0,86	48,00	2,48	2,16	13,0
cap01teste85	NR	14	10	Éster $\alpha$ 22	0,56	86,47	2,52	2,13	15,2
cap01teste163	10,36	14	10	Éster $\alpha$ 22	0,65	295,92	2,51	1,86	26,2
cap01teste94 <sup>(1)</sup>	69,44	14	10	Éster $\alpha$ 22	0,13	808,54	2,50	1,89	24,5

<sup>(1)</sup>Neste teste houve uma interrupção na dosagem de óleo por 18,83horas devido a uma queda de energia. Conclui-se que o “H<sub>dosa</sub>” seria provavelmente menor caso não houvesse ocorrido queda de energia.

Para a presente análise, a exemplo da comparação anterior, foram selecionados 2 intervalos de tempo, denominados intervalo1 (18 – 45horas) e intervalo2 (47 – 86horas). A tabela 6.4 mostra o resultado dos processamentos realizados, os quais devem ser analisados juntamente com a figura 6.3.

Tabela 6.4 - Efeito da concentração de óleo na taxa de decaimento

Teste	Cbrm <sub>médio1</sub> [%]	Fm <sub>i1</sub> [kg/h]	Fm <sub>r1</sub> [kg/h]	Taxa1 [g/h <sup>2</sup> ]	Cbrm <sub>médio2</sub> [%]	Fm <sub>i2</sub> [kg/h]	Fm <sub>r2</sub> [kg/h]	Taxa2 [g/h <sup>2</sup> ]
cap01teste80	0,89	2,32	2,16	5,88	-----	-----	-----	-----
cap01teste85	0,56	2,39	2,32	2,71	0,60	2,25	2,14	2,92
cap01teste163	0,58	2,43	2,36	2,65	0,60	2,35	2,26	2,54
cap01teste94	0,11	2,48	2,42	2,16	0,12	2,42	2,36	1,49

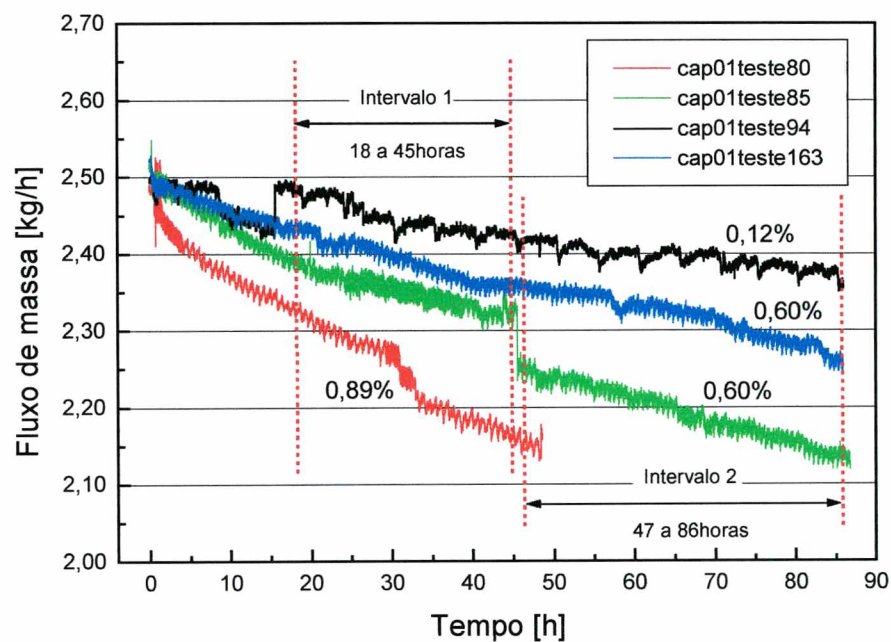


Figura 6.3 - Fluxo de massa vs. tempo / efeito da concentração / regime transiente

Analisando os resultados referentes ao intervalo1, verifica-se nitidamente que a taxa de decaimento aumenta com o aumento da concentração. Esta tendência não fica clara, entretanto, para os testes realizados com uma concentração média de 0,56 e 0,58% (a figura 6.3 mostra inclusive um comportamento invertido). Este pequeno desvio de comportamento pode, entretanto, ser creditado as incertezas experimentais e ao período de tempo selecionado. A mesma tendência é observada no intervalo2, verificando-se também pequenos desvios da taxa de decaimento para um mesmo nível médio de concentração.



Neste caso, não fica evidente que a taxa de decaimento se reduz com o tempo (teste “cap01teste85” aumentou a taxa de decaimento). Este fato está diretamente associado com o período escolhido para análise, o que, mais uma vez, reforça a tese de se escolher com o maior cuidado os períodos de tempo para análise.

Finalmente, resolveu-se investigar o efeito do tipo de óleo sobre a taxa de decaimento. Para tanto, tomou-se como base os testes mostrados na tabela 6.5 e na figura 6.4, todos mostrados com maiores detalhes no apêndice X.

Os óleos utilizados foram o “éster  $\alpha$ 22E” (22cst de viscosidade) e o “éster  $\alpha$ 10W” (10cst de viscosidade). O símbolo “E” significa sem anti-espumante e o símbolo “W” representa a presença de um aditivo anti-desgaste no óleo “ $\alpha$ 10W”. Os dois óleos possuem aditivos anti-oxidante.

Tabela 6.5 - Testes analisados / efeito do tipo de óleo

Teste	Regime [h]	Pe [bar]	Sub [°C]	Óleo	Cbrm <sub>médio</sub> [%]	H <sub>dosa</sub> [h]	Fm <sub>i</sub> [kg/h]	Fm <sub>f</sub> [kg/h]	Queda [%]
cap01teste85	NR	14	10	Éster $\alpha$ 22E	0,56	86,47	2,52	2,13	15,2
cap01teste163	10,36	14	10	Éster $\alpha$ 22E	0,65	295,92	2,51	1,86	26,2
cap01teste142	NR	14	10	Éster $\alpha$ 10W	0,55	86,54	2,47	2,17	12,1
cap01teste156	15,00	14	10	Éster $\alpha$ 10W	0,56	206,65	2,60	1,95	25,1

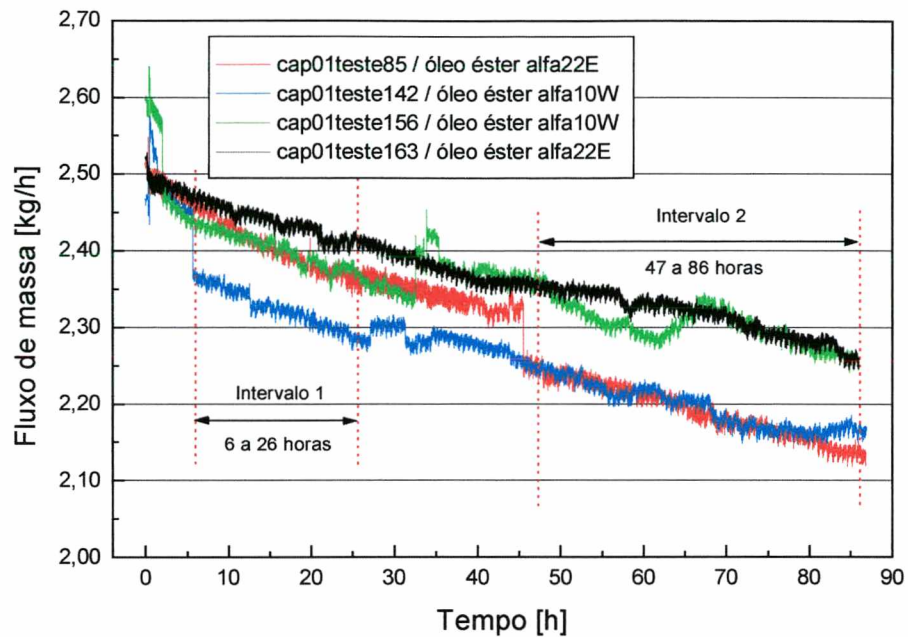


Figura 6.4 - Fluxo de massa vs. tempo / efeito do tipo de óleo / regime transiente

Os testes foram comparados também através de dois intervalos de tempo distintos: intervalo1 (6 – 26horas) e intervalo2 (47 – 86horas). A tabela 6.6 mostra os resultados do processamento.

Tabela 6.6 - Efeito do tipo de óleo na taxa de decaimento

Teste	Óleo	Cbrm <sub>médio1</sub> [%]	Fm <sub>f1</sub> [kg/h]	Fm <sub>f1</sub> [kg/h]	Taxa1 [g/h <sup>2</sup> ]	Cbrm <sub>médio2</sub> [%]	Fm <sub>f2</sub> [kg/h]	Fm <sub>f2</sub> [kg/h]	Taxa2 [g/h <sup>2</sup> ]
cap01teste85	Éster α22E	0,55	2,46	2,36	4,89	0,60	2,25	2,14	2,92
cap01teste163	Éster α22E	0,57	2,46	2,41	2,64	0,60	2,35	2,26	2,54
cap01teste142	Éster α10W	0,54	2,37	2,28	4,17	0,57	2,24	2,16	2,18
cap01teste156	Éster α10W	0,51	2,43	2,36	3,30	0,53	2,37	2,26	2,84

Embora a concentração média nos dois períodos analisados não tenha se mantido exatamente constante, pode-se verificar que o efeito do tipo de óleo (viscosidade) não fica

nítido (esperava-se obter uma maior taxa de decaimento com o óleo de maior viscosidade -  $\alpha 22E$ ).

Conclui-se, então, que para melhor avaliar o efeito do subresfriamento, da concentração e do tipo de óleo sobre a taxa de decaimento um maior número de testes seria necessário. Efeito significativo foi notado somente com a concentração, onde maiores concentrações implicam em maiores taxas de decaimento, apesar de não existir repetibilidade da taxa de decaimento para a mesma concentração.

## **6.2 - Regime Permanente**

Os testes apresentados a seguir foram realizados com o intuito de verificar o impacto do tipo e da concentração de óleo sobre o fluxo de massa em regime permanente. São testes que exigem um período de tempo extremamente longo, já que estes só terminam quando a taxa de decaimento se torna praticamente nula. Vale lembrar, que ao término de cada teste o tubo capilar foi lavado com CFC11 com o propósito de eliminar a obstrução.

Inicialmente, procurou-se estudar o efeito do tipo de óleo (éster  $\alpha 10W$  e éster  $\alpha 22E$ ). Dois testes foram escolhidos para a presente análise: “cap01teste156” ( $\alpha 10W$ ) e “cap01teste163” ( $\alpha 22E$ ), os quais são mostrados na Figura 6.5.

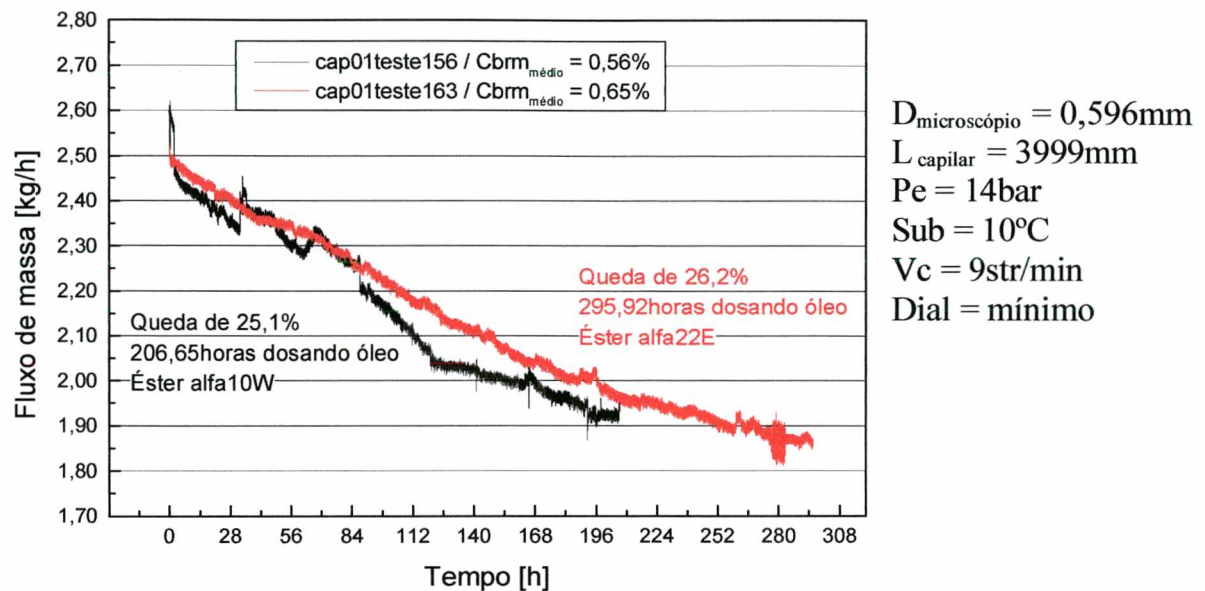


Figura 6.5 - Fluxo de massa vs. tempo / efeito do tipo de óleo / regime permanente

Pode-se verificar que a taxa de decaimento (inclinação das curvas), para ambos os testes, não variou significativamente nas primeiras 190 horas de operação, apesar da diferença de viscosidade entre os óleos.

Nas primeiras 110 horas, entretanto, o teste com o óleo  $\alpha 10W$  apresentou uma maior taxa de decaimento, o que talvez não possa ser explicado pela diferença de viscosidade mas sim pela presença de um aditivo anti-desgaste.

O teste realizado com o óleo  $\alpha 10W$  atingiu o regime permanente após 191,65 horas e o teste com  $\alpha 22E$  somente após 285,56 horas de operação. Findados os testes, encontrou-se uma variação de fluxo de massa de 25,1% (de 2,60 kg/h a 1,95 kg/h) e de 26,2% (de 2,51 kg/h a 1,86 kg/h), respectivamente, para os testes realizados com  $\alpha 10W$  e  $\alpha 22E$ .

Após o regime permanente ter sido atingido a bancada foi mantida em operação por mais algumas horas, com o intuito de se assegurar esta condição de funcionamento. As figuras 6.7 e 6.8 mostram as horas finais de teste, respectivamente para os testes com  $\alpha 10W$  e  $\alpha 22E$ .



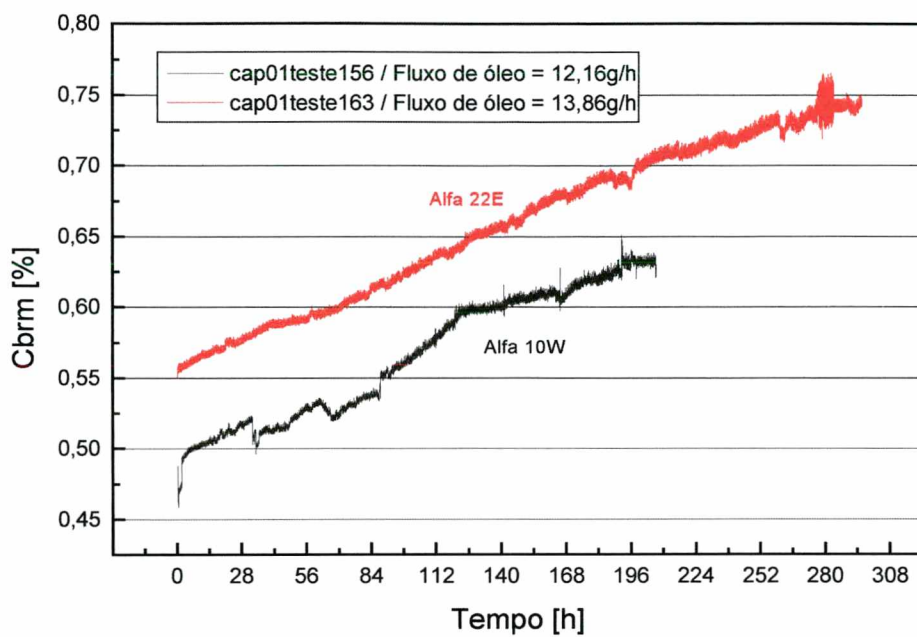


Figura 6.6 - Variação da concentração nos testes com óleo  $\alpha$ 10W e  $\alpha$ 22E

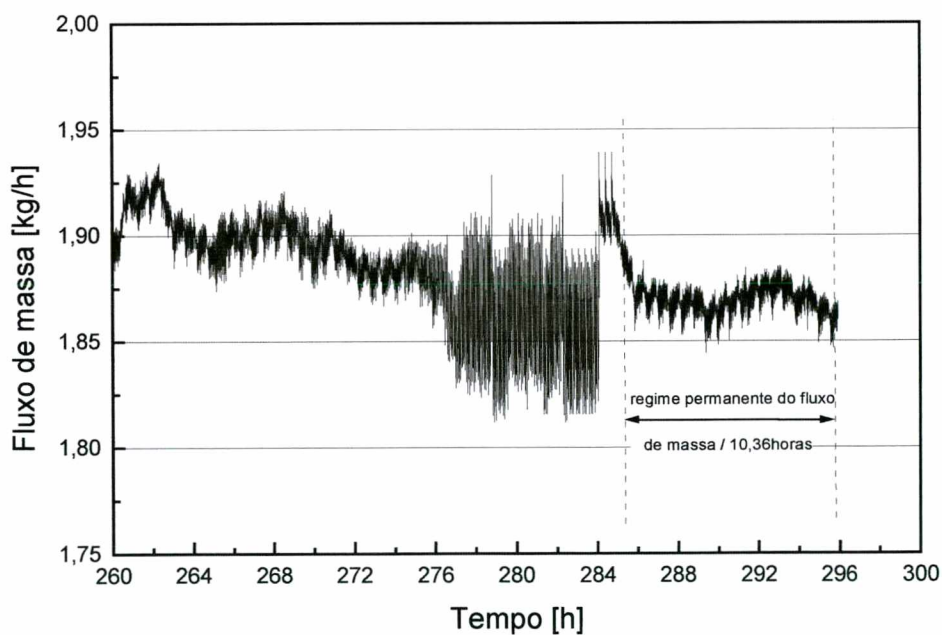


Figura 6.7 - Região de regime permanente / óleo  $\alpha$ 10W



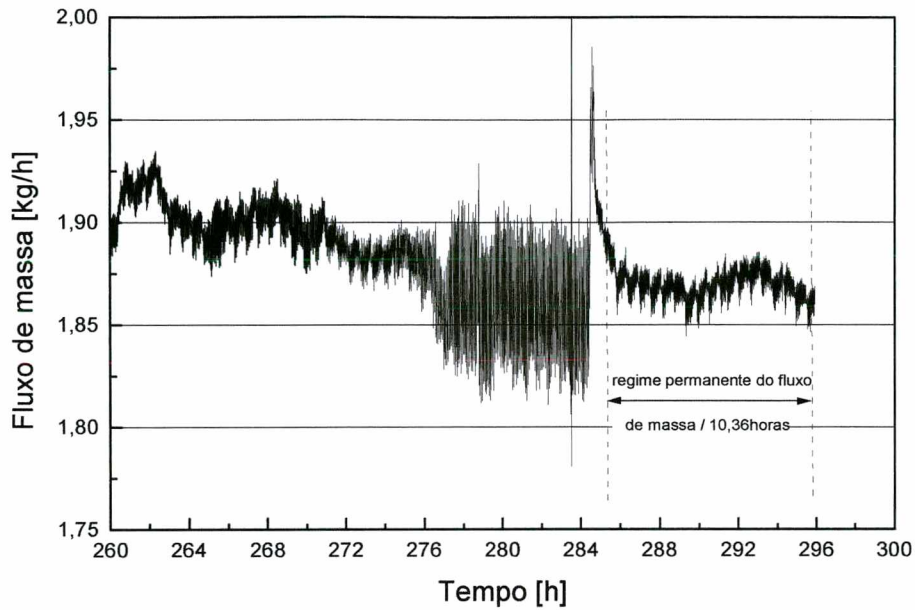


Figura 6.8 - Região de regime permanente / óleo  $\alpha 22E$

Para melhor compreender o efeito observado, resolveu-se investigar os perfis de temperatura ao longo do tubo capilar, particularmente na região que contém o ponto provável de início de vaporização (ver figura 6.9).

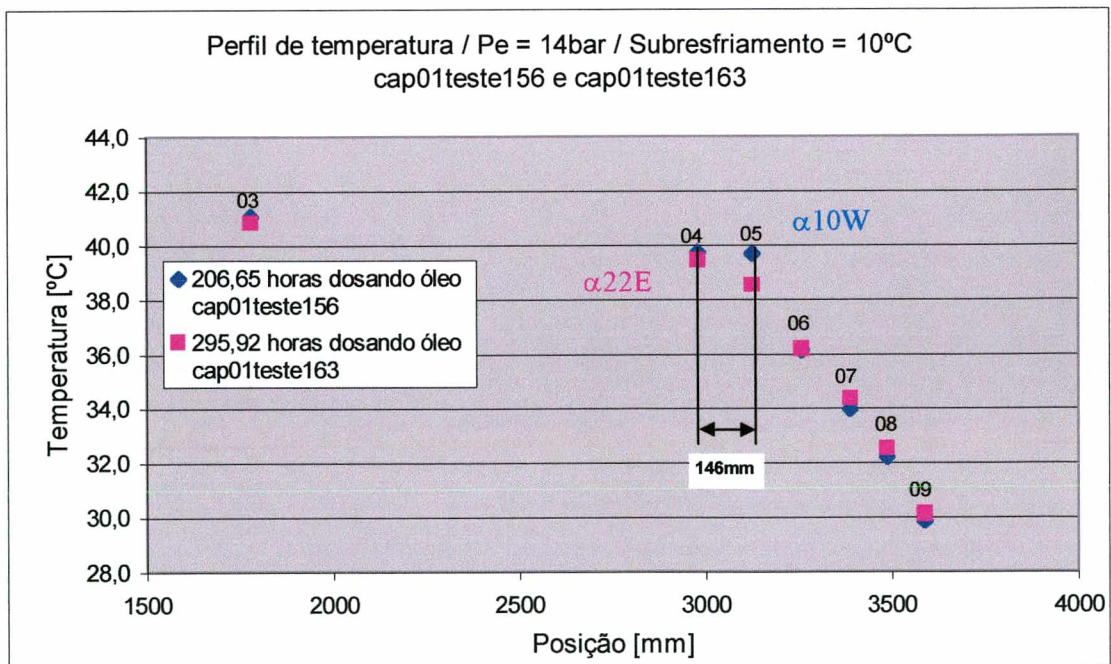


Figura 6.9 - Perfis de temperatura ao longo do tubo capilar / testes com  $\alpha 10W$  e  $\alpha 22E$

Verifica-se que no teste realizado com  $\alpha 22E$  ocorreu um adiantamento do ponto de início de vaporização, o que, a princípio, poderia explicar o menor valor de fluxo de massa na condição de regime permanente.

Como comentário final, destaca-se a maior dificuldade de limpar o tubo capilar com CFC11 após a operação com óleo éster  $\alpha 10W$ . Este fato pode estar associado com a presença do aditivo anti-desgaste, o que propicia uma maior aderência do óleo nas paredes do tubo capilar.

Numa segunda etapa, procurou-se investigar o efeito da concentração de um mesmo tipo de óleo sobre as condições de regime permanente. Para tanto, realizaram-se três (3) testes com concentração nas seguintes faixas: [0,11% a 0,15%], [0,55% a 0,74%] e [1,49% a 2,65%], mostrados na figura 6.10.

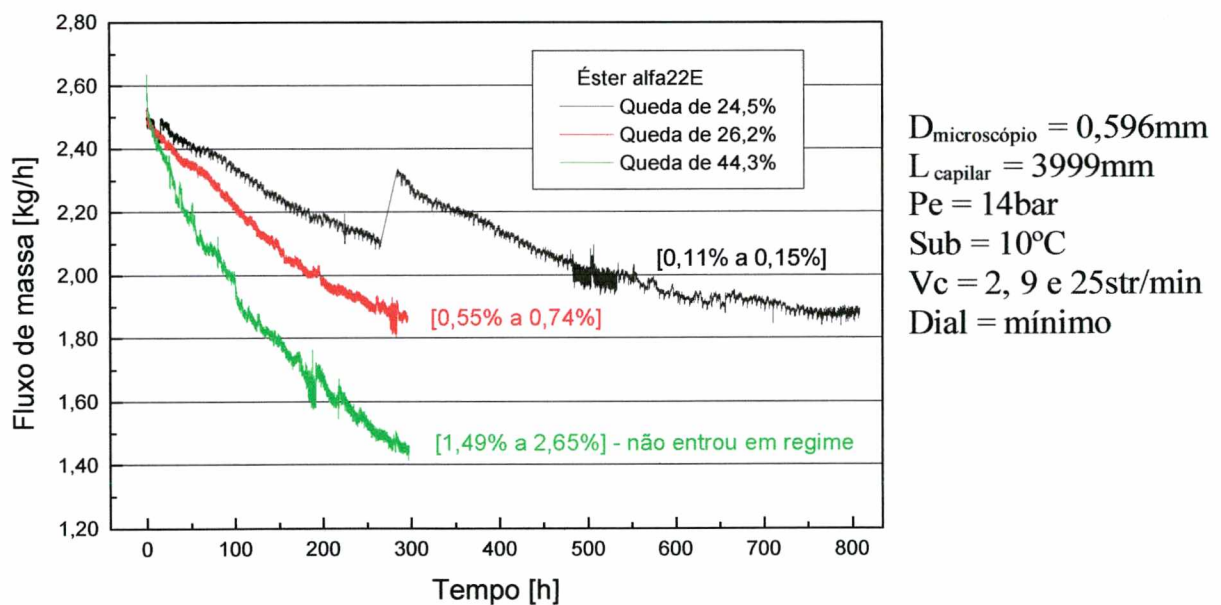


Figura 6.10 - Fluxo de massa vs. tempo / efeito da concentração / regime permanente

Os resultados mostrados na figura 6.10 indicam claramente que a variação da concentração de [0,11% a 0,15%] para [0,55% a 0,74%] não afetou a condição de regime permanente (em torno de 1,86 kg/h), mas teve efeitos marcantes sobre o tempo de teste que passou respectivamente de 808,54 horas para 295,92 horas (aqui deve-se mencionar que o

período de duração do teste realizado com [0,11% a 0,15%] foi afetado pela interrupção de energia elétrica). Para concentrações mais elevadas, o fluxo de massa se reduz substancialmente.

Os testes anteriores foram realizados com um fluxo de massa de óleo constante, o que explica o aumento da concentração com o tempo.

Para finalizar esta etapa de investigação realizou-se um teste com concentração de óleo controlada na entrada do tubo capilar (0,90% a 1,05%). O fluxo de óleo foi então reduzido a medida que o fluxo de refrigerante também reduzia, mantendo assim a concentração dentro de uma faixa limitada.

As figuras 6.11 e 6.12 mostram, respectivamente, a queda do fluxo de massa e a concentração ao longo do teste.

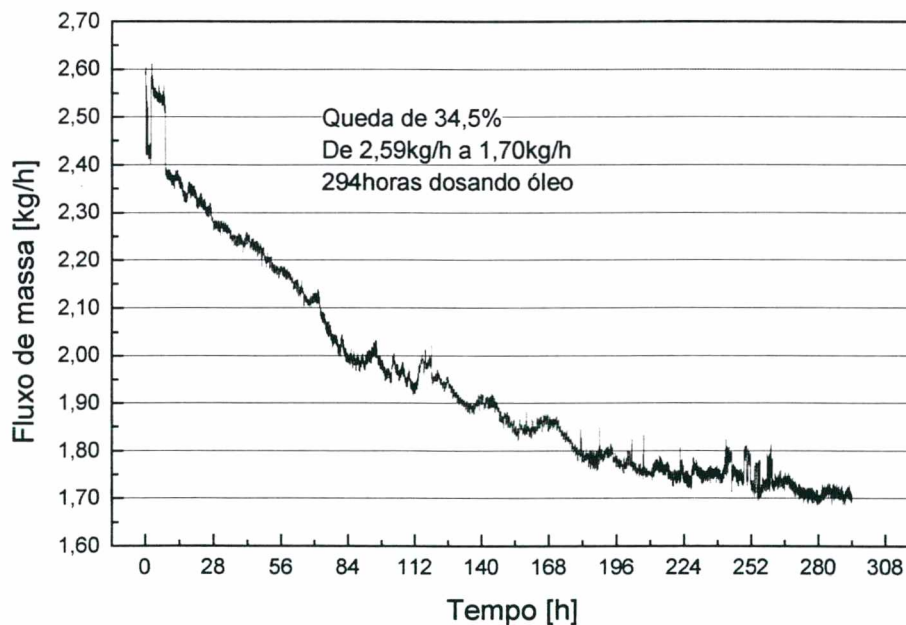


Figura 6.11 - Fluxo de massa vs. tempo para concentração controlada

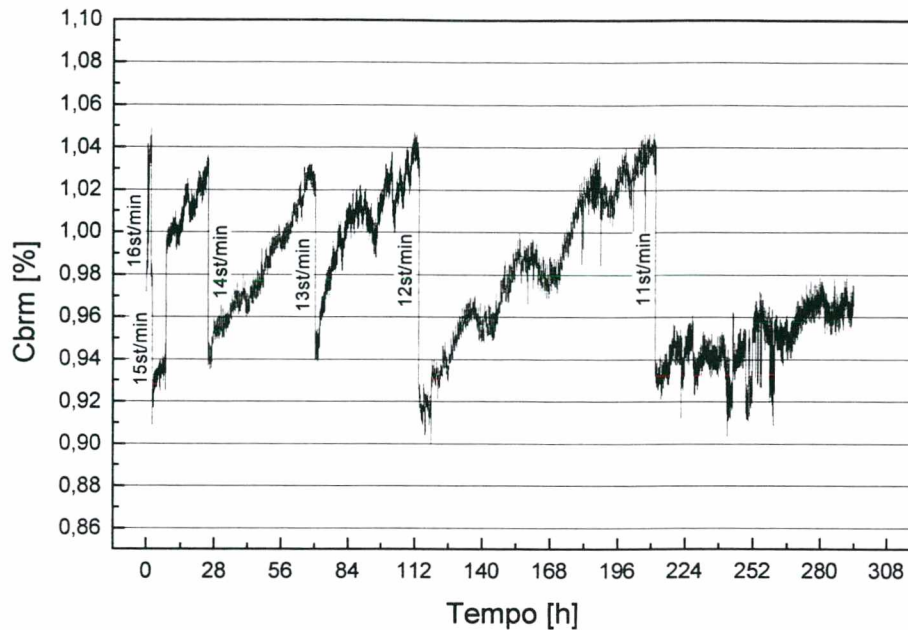


Figura 6.12 - Concentração de óleo controlada

A partir deste teste definiu-se um outro critério para o estabelecimento das condições de regime permanente, o qual é apresentado a seguir:

1. Redução de 0,05kg/h no fluxo de massa ao longo de 48 horas;
2. Atingido este limite continuar o teste por um período mínimo de 48 horas, verificando a manutenção do nível estabelecido;
3. Caso o itens 1 e 2 sejam satisfeitos o fluxo de massa é considerado em regime permanente. O valor tomado para o fluxo de massa é o correspondente ao instante inicial do período mencionado no item 1.

A figura 6.13 mostra a redução do fluxo de massa/48 horas em função do tempo, para o teste com concentração controlada. O regime permanente foi atingido após 185,50 horas de operação num fluxo de massa de 1,78kg/h, o que significa uma queda de 31,2%.



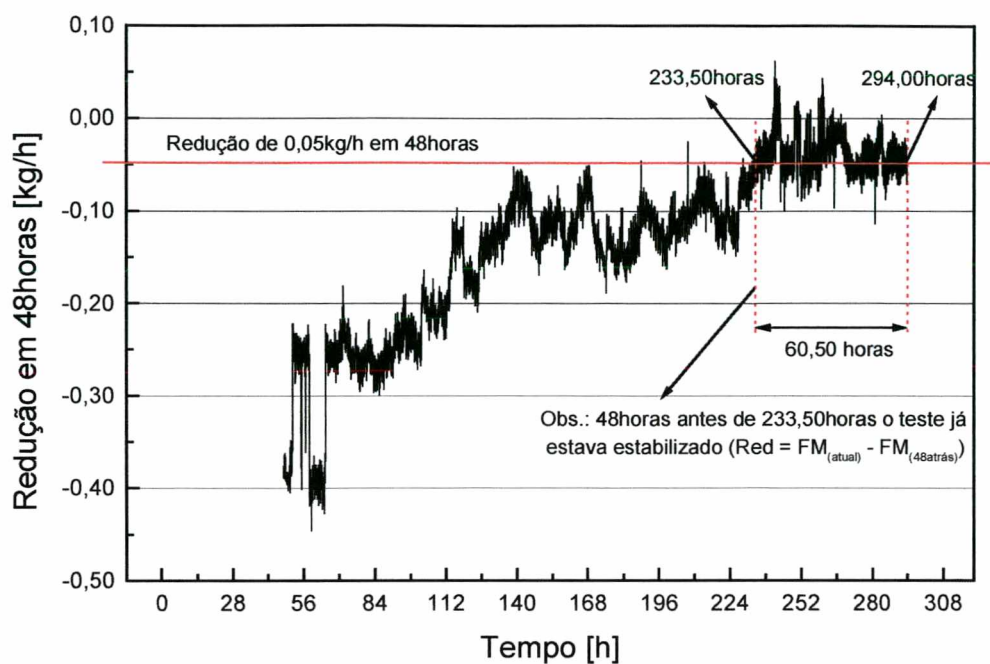


Figura 6.13 - Redução do fluxo de massa / 48 horas em função do tempo

A tabela 6.7 mostra um resumo dos resultados obtidos, já empregando o critério definido anteriormente.

Tabela 6.7 - Critério de regime permanente / avaliação do efeito da concentração

Faixa de concentração [%]	Fluxo inicial [kg/h]	Critério de regime permanente			Final do teste		
		Fluxo final [Kg/h]	Redução [%]	Tempo [dias]	Fluxo final [Kg/h]	Redução adicional [%]	Tempo adicional [dias]
0,11 – 0,15	2,50	1,94	22,5	26,9 <sup>*</sup>	1,89	2,0	6,8 <sup>*</sup>
0,55 – 0,74	2,51	1,95	22,2	8,8	1,86	4,0	3,5
0,90 – 1,05	2,59	1,78	31,2	7,7	1,70	3,3	4,5
1,49 – 2,65	2,60	1,45	44,3	12,4 <sup>#</sup>	-----	-----	-----

\* - Teste com interrupção por queda de energia.

+ - Critério de regime permanente para este teste foi de 0,02kg/h em 48 horas.

# - Critério de regime permanente não foi alcançado.

O critério de regime permanente foi aplicado em todos os testes, sendo que para o teste com concentração de [0,11% a 0,15%] a variação mínima admitida foi de 0,02kg/h / 48horas devido ao pequeno gradiente de redução do fluxo de massa. Maiores detalhes podem ser vistos no apêndice X.

Avaliando os resultados obtidos através do critério introduzido com os obtidos mantendo a bancada em operação até que a variação do fluxo de massa fosse praticamente nula, verifica-se que ocorre uma pequena variação da taxa de redução do fluxo de massa e uma economia substancial de tempo de teste.

Verifica-se, mais uma vez, que em baixas concentrações apenas o tempo de teste é afetado, não ocorrendo o mesmo para concentrações mais elevadas.

Em seguida, procurou-se relacionar a redução de vazão observada nos experimentos com HFC134a com a redução da vazão de nitrogênio através do tubo capilar obtida pelo uso de uma bancada que utiliza uma técnica normalizada, ASHRAE 28 (1996). Os resultados obtidos são mostrados nas tabelas 6.8 e 6.9.

Tabela 6.8 - Vazão de nitrogênio através do tubo capilar

Vazão [l/min]	Original	Obstruído	1ª Lavagem	2ª Lavagem
Teste1	----	2,45	2,61	2,66
Teste2	----	2,45	2,62	2,67
Teste3	----	2,45	2,61	2,67
<b>Média</b>	2,69±0,06	2,45±0,06	2,61±0,06	2,67±0,06
<b>Redução [%]</b>				
Original vs. Obstruído	<b>8,9</b>			
Original vs. 1ª Lavagem	3,0			
Original vs. 2ª Lavagem	0,7			

Tabela 6.9 - Redução percentual / HFC134a vs. Nitrogênio

HFC134a	FM [kg/h]	Redução [%]	
		HFC134a	Nitrogênio
Original	2,59		
Antes da coleta	1,70	34,5	
Após a coleta	2,13	17,9	8,9

Analisando a tabela 6.8, verifica-se que houve a necessidade de duas lavagens do tubo capilar com CFC11 para a vazão retornar ao seu valor original. Verifica-se também que o nitrogênio não elimina a película de óleo, pois a vazão é considerada como a média de três (3) testes realizados em seqüência os quais apresentaram repetibilidade. Maiores detalhes dos testes com nitrogênio são mostrados no apêndice XI.

A tabela 6.9 mostra a redução percentual do fluxo de massa de HFC134a antes e após a coleta de refrigerante na entrada do tubo capilar. Esta coleta foi realizada ao final de cada teste com o objetivo de comparar a concentração na entrada do tubo capilar obtida pelo método da ASHRAE com a concentração calculada pela relação entre fluxos mássicos de óleo e refrigerante. Verifica-se que após a coleta a redução percentual diminui devido a uma possível limpeza do tubo capilar por arraste (ver item 5.4).

A tabela 6.9 mostra que uma redução de 8,9% na vazão de nitrogênio corresponde, no presente caso, a uma redução de vazão de HFC134a de 17,9%, mostrando que a vazão de nitrogênio não reflete claramente a condição real de operação do sistema de refrigeração.

Sendo assim, cuidados devem ser tomados para generalizar tais números, antes da realização de mais testes envolvendo outras condições de operação, tubos capilares e tipos de óleo.



## **7 - Análise do Fluxo de Massa em Função do Diâmetro e do Comprimento do Tubo Capilar**

A partir das observações do capítulo 6, verificou-se que o problema de obstrução em tubos capilares é causado, em parte, pelo óleo. Desta forma, antes de dar início a investigações envolvendo a presença de contaminantes, resolveu-se estudar, em maiores detalhes, o efeito do óleo.

Resolveu-se também analisar o problema apenas em regime permanente, investigando-se somente o efeito do diâmetro e comprimento do tubo capilar. Investigações futuras devem contemplar outras variáveis de interesse, como o tipo e a concentração de óleo e as condições de operação.

Desta forma, foram preparadas 4 amostras de tubo capilar a partir de dois lotes, um de diâmetro nominal de 0,570mm e outro de 0,790mm. Desses lotes cortou-se tubos capilares de 3 e 4 metros de comprimento. As demais variáveis; pressão, subresfriamento e concentração; foram mantidas constantes e respectivamente nos seguintes valores: 14bar, 10°C e 1%. Empregou-se o óleo éster  $\alpha$ 22E e o critério de regime permanente apresentado no item 6.2.

Detalhes da montagem e instrumentação dos tubos capilares são mostrados no apêndice XII.

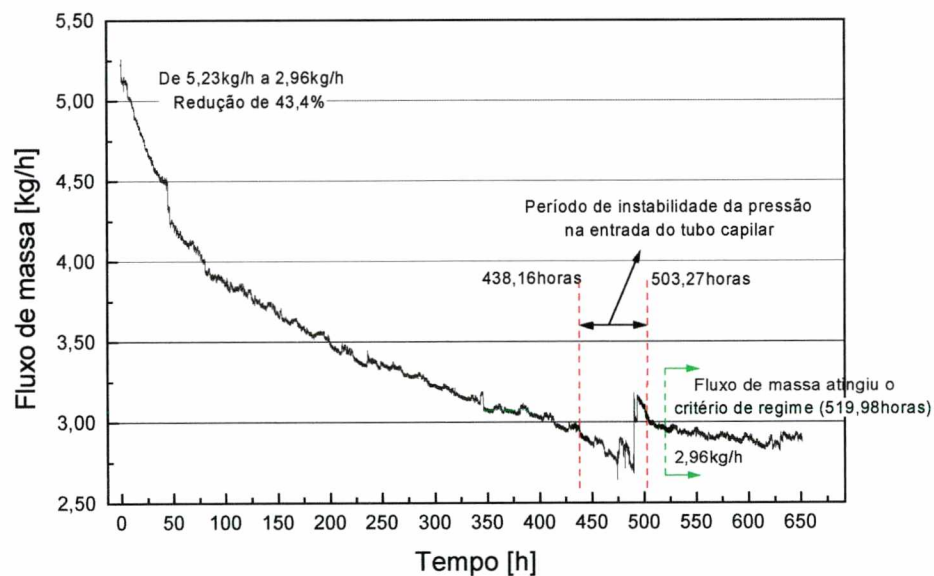
As dimensões dos tubos capilares utilizados são mostradas na tabela 7.1. Maiores detalhes sobre as medições de diâmetro são mostrados no apêndice XIII.



Tabela 7.1 - Dimensões dos tubos capilares

	Comprimento [mm]	D <sub>nominal</sub> [mm]	D <sub>nitrogênio</sub> [mm]	D <sub>microscópio</sub> [mm]
Capilar 2	3994	0,790	0,86±0,01	0,747±0,022
Capilar 3	4000	0,570	0,68±0,01	0,567±0,021
Capilar 4	3008	0,570	0,66±0,01	0,577±0,011
Capilar 5	3008	0,790	0,85±0,01	0,752±0,023

Foram realizados quatro (4) testes, um com cada tubo capilar. Os resultados são mostrados nas figuras 7.1 a 7.8. A tabela 7.2 mostra um resumo dos resultados obtidos. O controle da concentração e a redução do fluxo de massa / 48 horas para cada teste são mostrados no apêndice XIV, juntamente com outras análises complementares.



D<sub>microscópio</sub> = 0,747mm  
L<sub>capilar</sub> = 3994mm  
P<sub>e</sub> = 14bar  
Sub = 10°C

Figura 7.1 - Redução de fluxo de massa / Capilar 2

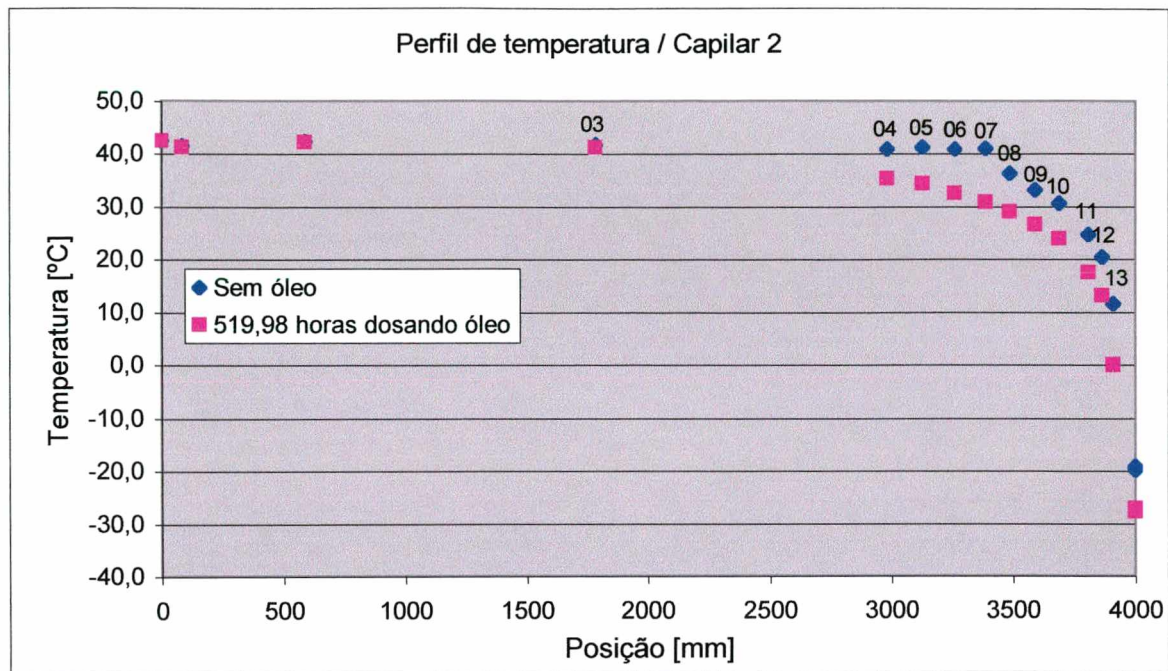
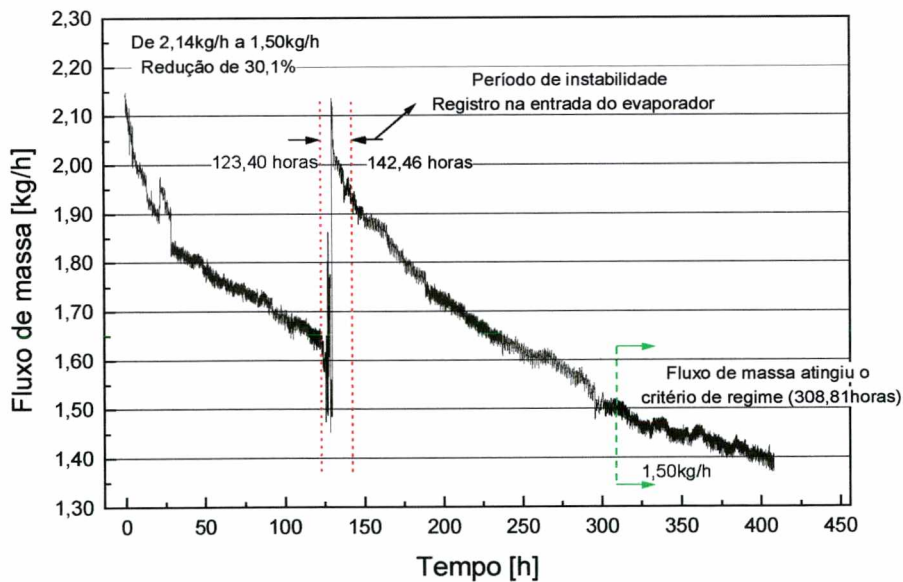


Figura 7.2 - Perfil de temperatura ao longo do tubo capilar / Capilar 2



$D_{\text{microscópio}} = 0,567\text{mm}$   
 $L_{\text{capilar}} = 4000\text{mm}$   
 $Pe = 14\text{bar}$   
 $Sub = 10^{\circ}\text{C}$

Figura 7.3 - Redução de fluxo de massa / Capilar 3

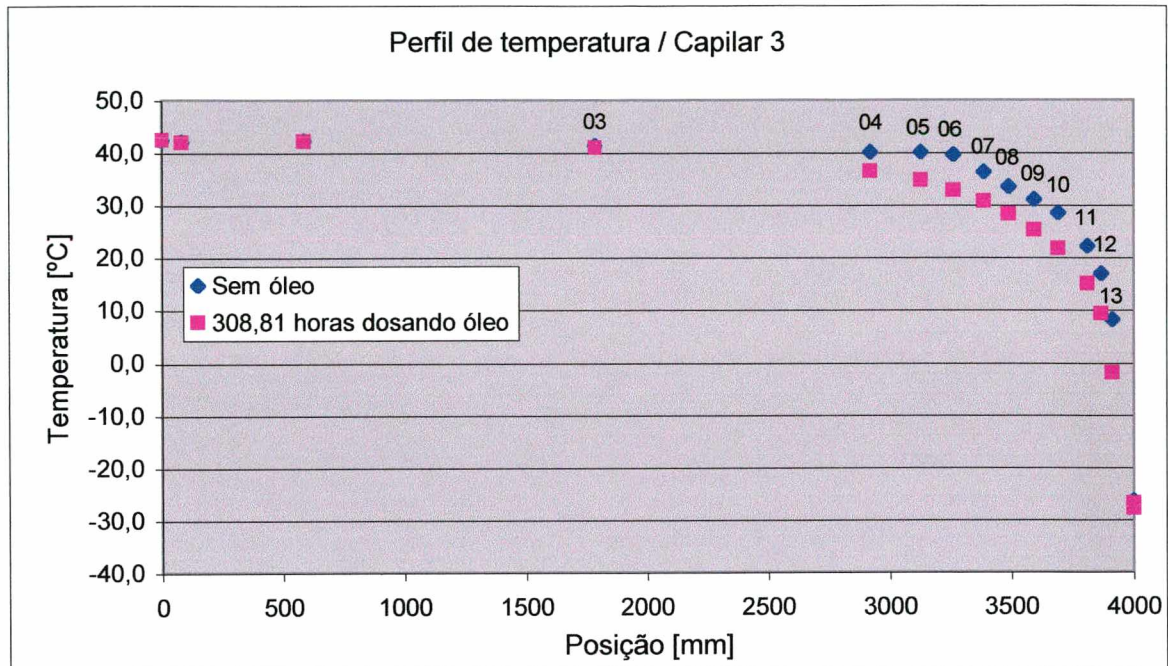


Figura 7.4 - Perfil de temperatura ao longo do tubo capilar / Capilar 3

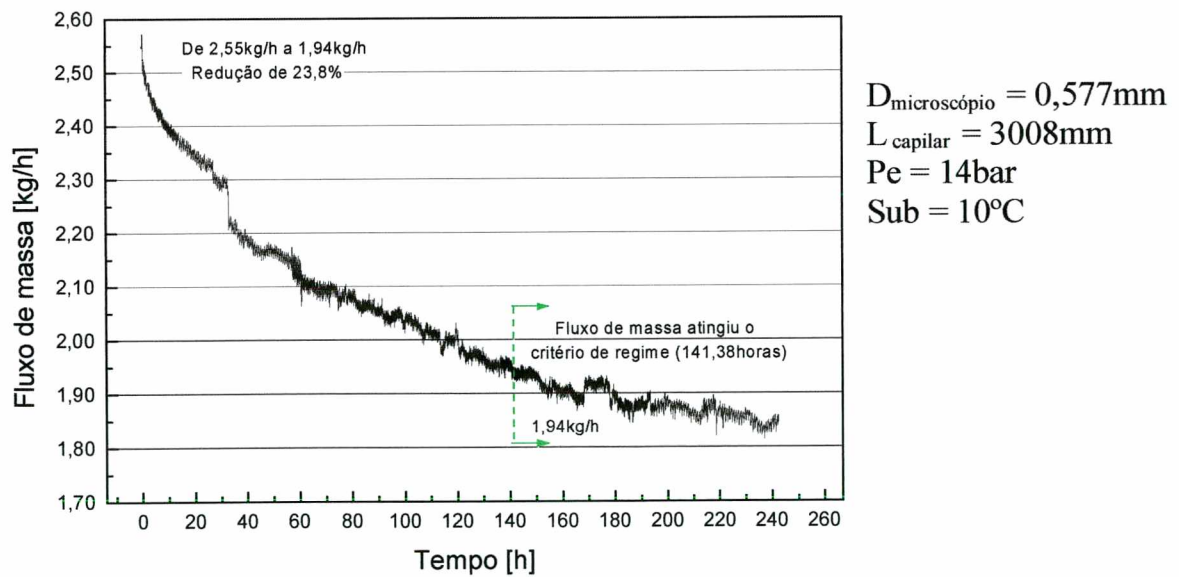


Figura 7.5 - Redução de fluxo de massa / Capilar 4



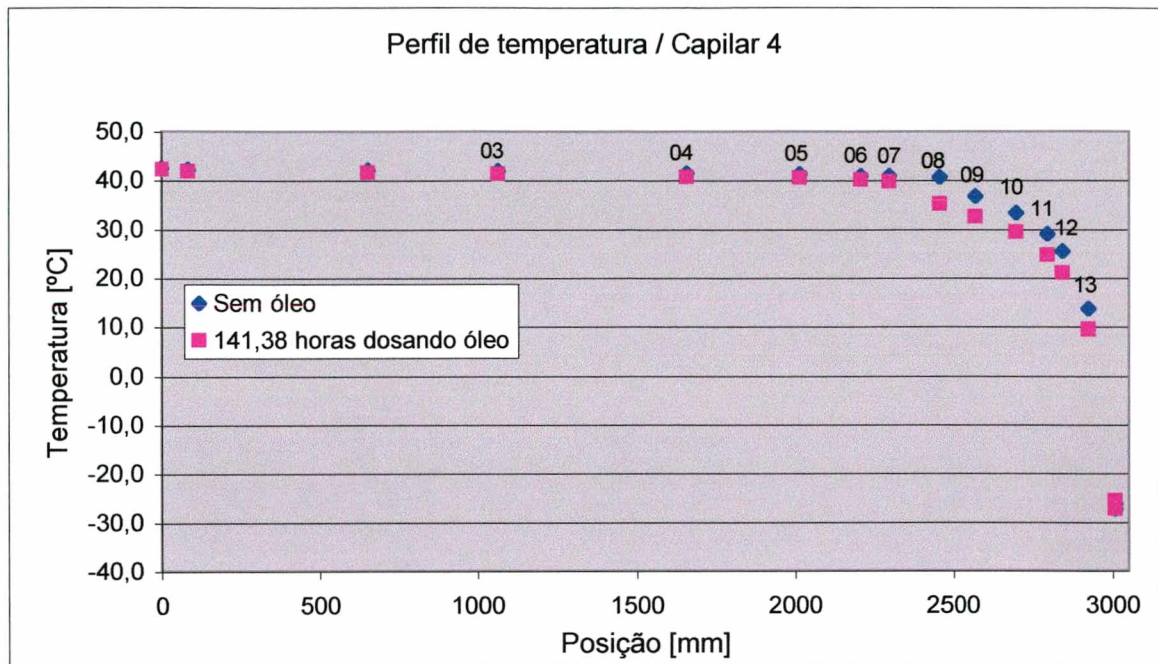


Figura 7.6 - Perfil de temperatura ao longo do tubo capilar / Capilar 4

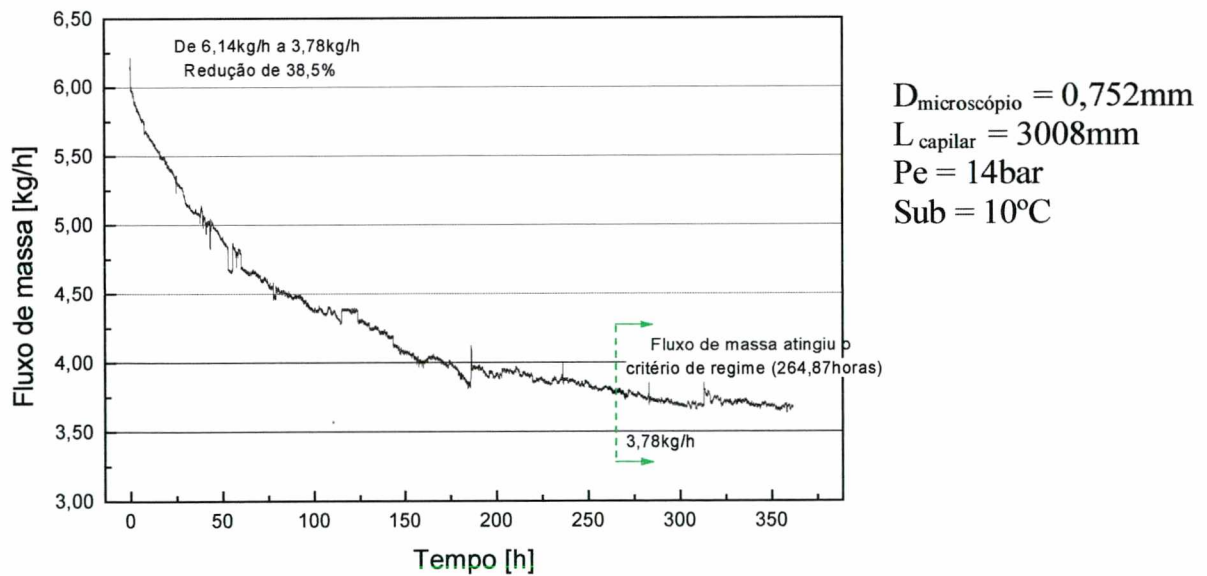


Figura 7.7 - Redução de fluxo de massa / Capilar 5

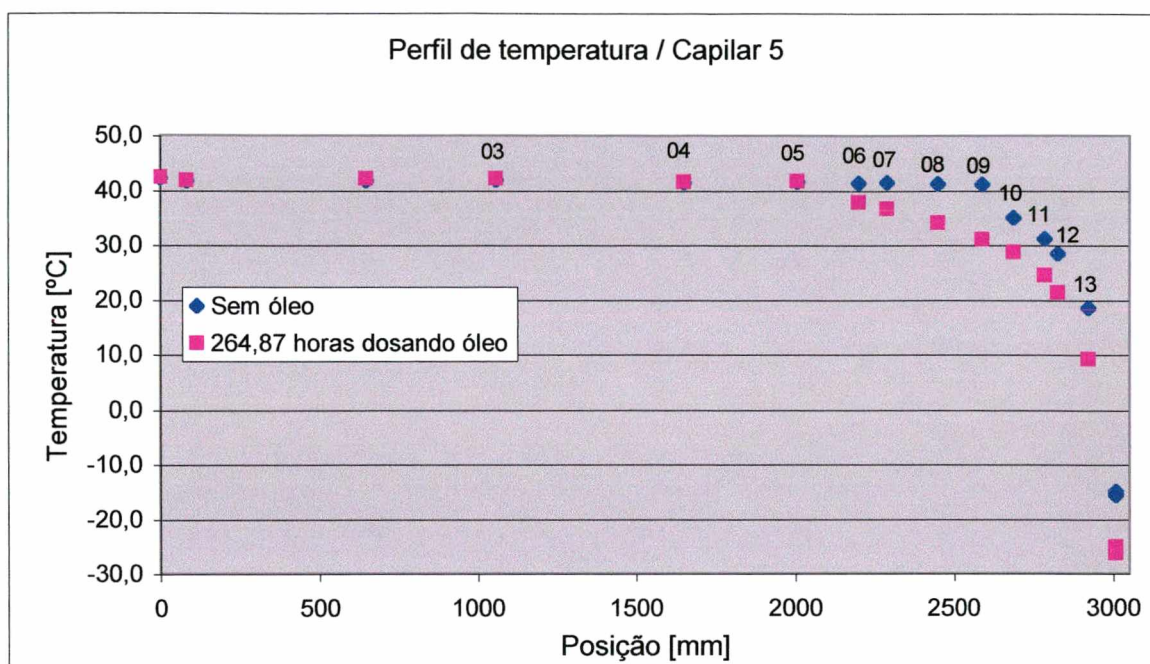


Figura 7.8 - Perfil de temperatura ao longo do tubo capilar / Capilar 5

Tabela 7.2 - Redução do fluxo de massa

	Faixa de concentração [%]	Fluxo inicial [kg/h]	Critério de regime permanente			Final do teste		
			Fluxo final [Kg/h]	Redução [%]	Tempo [dias]	Fluxo final [Kg/h]	Redução adicional [%]	Tempo adicional [dias]
Capilar 2*	0,84 - 1,10	5,23	2,96	43,4	21,7	2,88	1,4	5,5
Capilar 3#	0,88 - 1,06	2,14	1,50	30,1	12,9	1,39	5,0	4,1
Capilar 4	0,93 - 1,06	2,55	1,94	23,8	5,9	1,85	3,5	4,2
Capilar 5	0,94 - 1,08	6,14	3,78	38,5	11,0	3,68	1,5	4,0

\*Teste com trecho de instabilidade na pressão de entrada do capilar [65,11 horas].

#Teste com anomalia no registro na entrada do evaporador [19,06 horas].

A partir dos dados apresentados na tabela 7.2, torna-se possível explorar uma forma de equação que represente o efeito do diâmetro e do comprimento sobre o fluxo de massa através de um tubo capilar, sujeito a condições fixas de operação. Para tubos capilares não obstruídos tal correlação é mostrada a seguir (equação 7.1).

$$FM = -16,11485 * D^2 + 30,448 * D^3 + \frac{6580,088}{L} \quad 7.1$$

A figura 7.9 mostra uma comparação entre as previsões da equação 7.1 e os resultados experimentais.

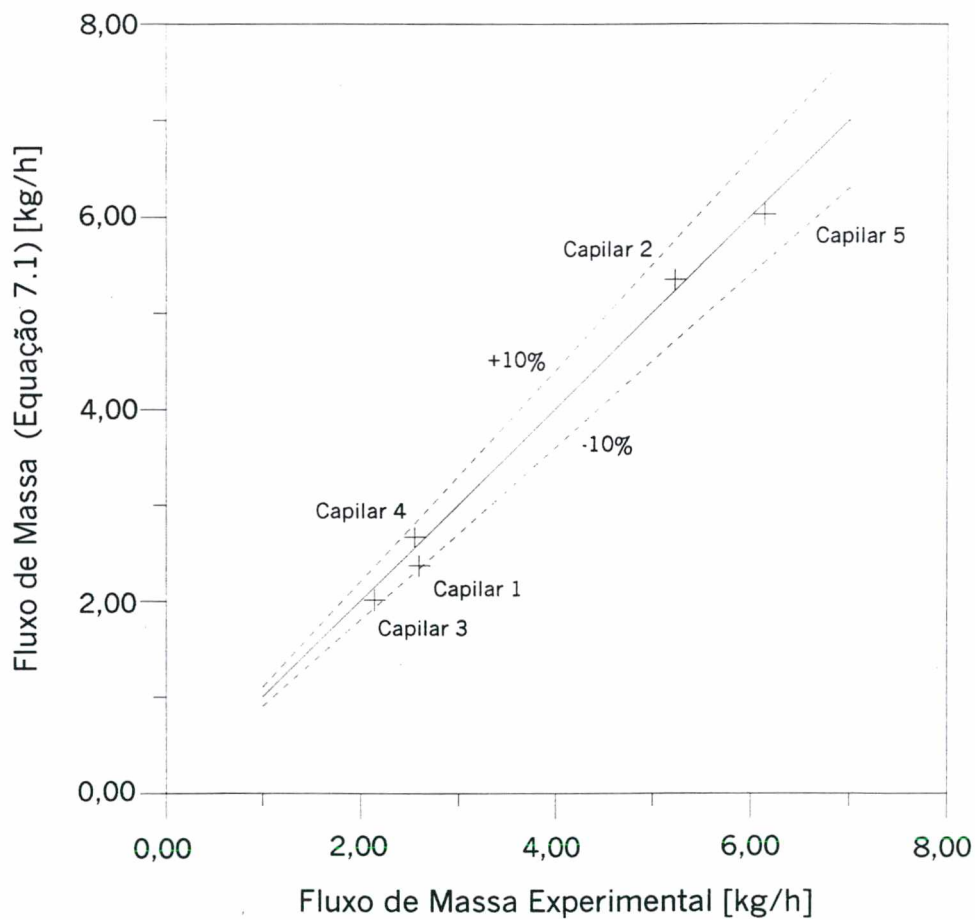


Figura 7.9 - Equação 7.1 vs. resultados experimentais

Pode-se verificar que a diferença se mantém dentro da faixa de  $\pm 10\%$ , inclusive para o Capilar 1, não utilizado durante o processo de regressão.

Para verificar o comportamento da equação 7.1 com outros diâmetros e comprimentos, resolveu-se compará-la com as previsões do programa CAPILAR. Tal comparação é mostrada nas figuras 7.10 e 7.11, respectivamente para o diâmetro e para o comprimento.

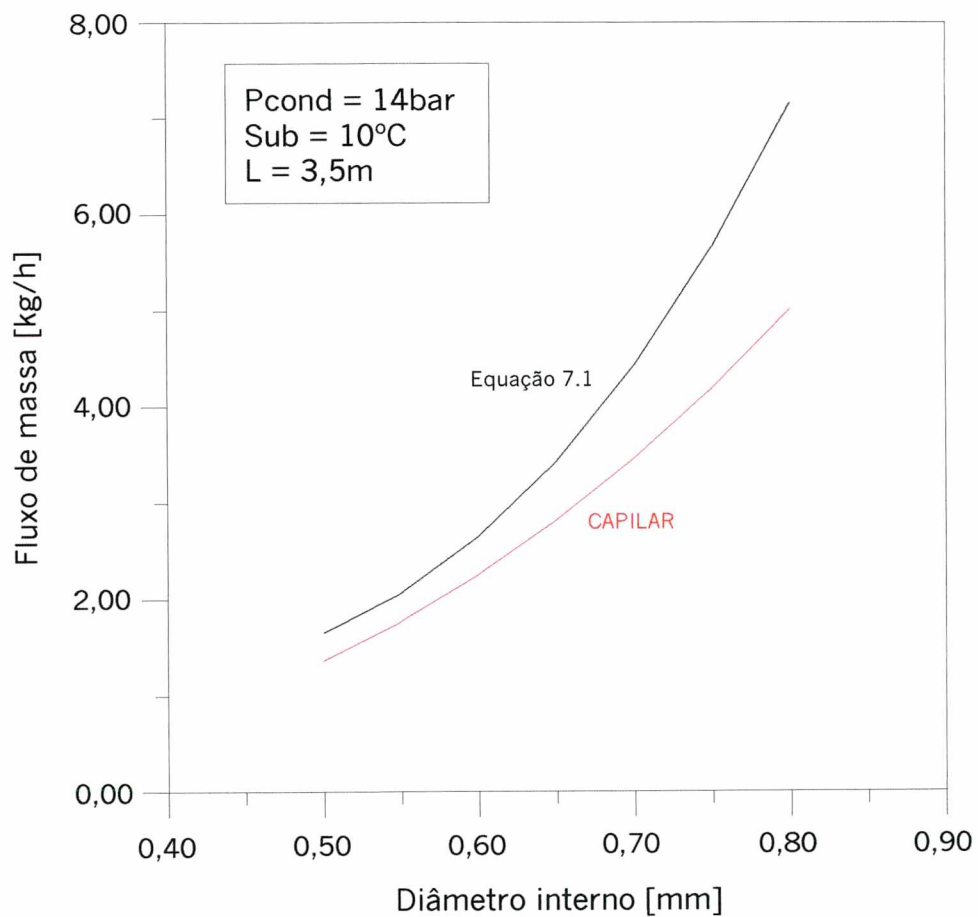


Figura 7.10 - Equação 7.1 vs. programa CAPILAR / diâmetro interno



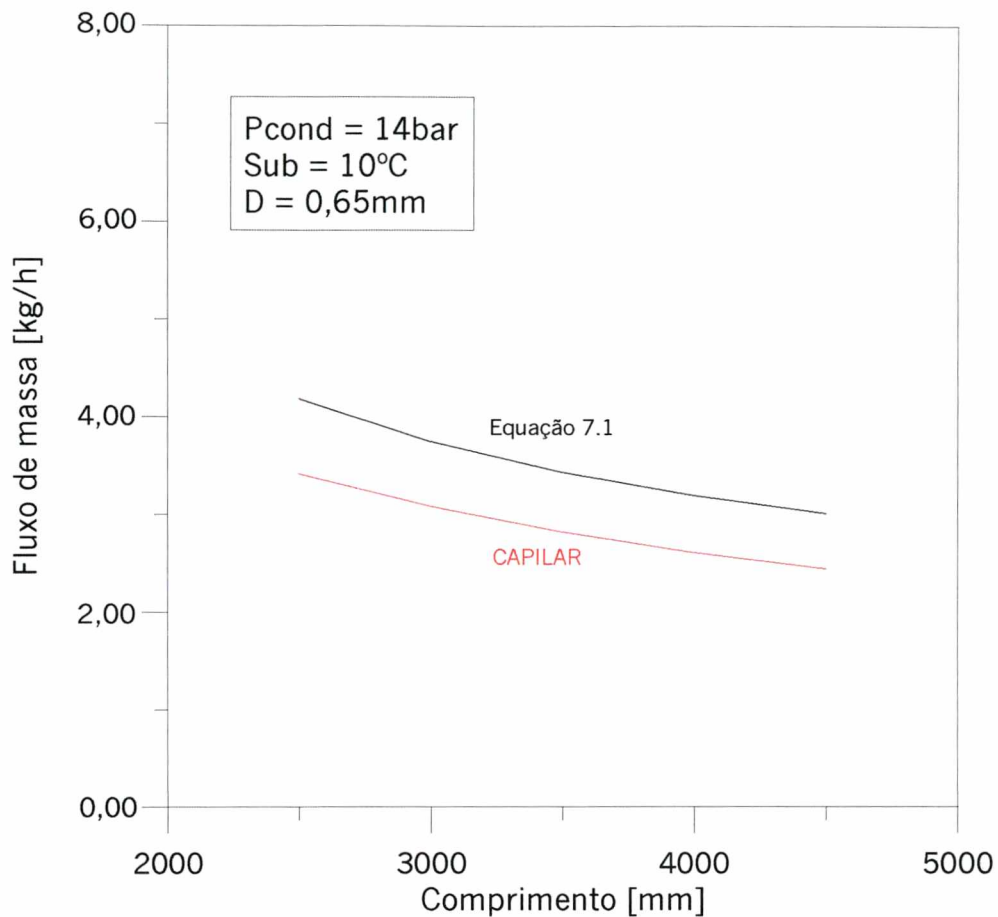


Figura 7.11 - Equação 7.1 vs. programa CAPILAR / comprimento

Como mostrado no capítulo 3, o programa CAPILAR fornece valores inferiores aos valores experimentais e, conseqüentemente, também inferiores aos valores fornecidos pela equação 7.1.

Verifica-se também, que a equação 7.1 representa bem o efeito do comprimento sobre o fluxo de massa, apesar desta ter sido obtida em condições de operação fixas (14bar e 10°C). O mesmo já não acontece com o diâmetro, o que deixa claro que o efeito desta variável é dependente das condições de operação.

Recomenda-se portanto, a realização de um maior número de testes com um maior número de variáveis, o que vai permitir a determinação do efeito combinado de duas ou mais variáveis.

Repetindo-se o mesmo procedimento, mas utilizando dados experimentais para a condição de regime permanente / tubo capilar obstruído, chega-se a seguinte expressão:

$$FM = -11,73114 * D^2 + 18,80919 * D^3 + \frac{6989,428}{L} \quad 7.2$$

A figura 7.12 compara os resultados previstos pela equação 7.2 com os resultados experimentais.

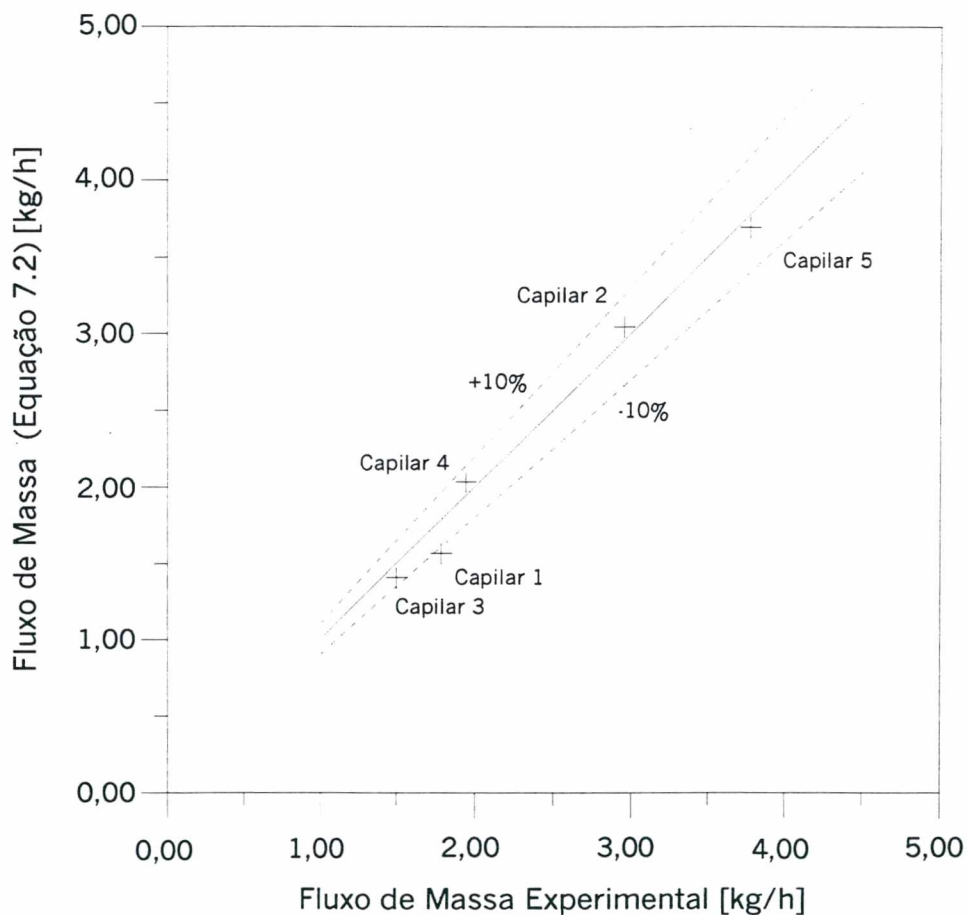


Figura 7.12 - Equação 7.2 vs. resultados experimentais

A exemplo da equação 7.1, verifica-se que a equação 7.2 também representa adequadamente os resultados experimentais.

Dividindo os resultados gerados pela equação 7.2 pelos resultados da equação 7.1, obtém-se o percentual de redução de fluxo de massa em função do diâmetro e do comprimento do tubo capilar (ver figura 7.13).

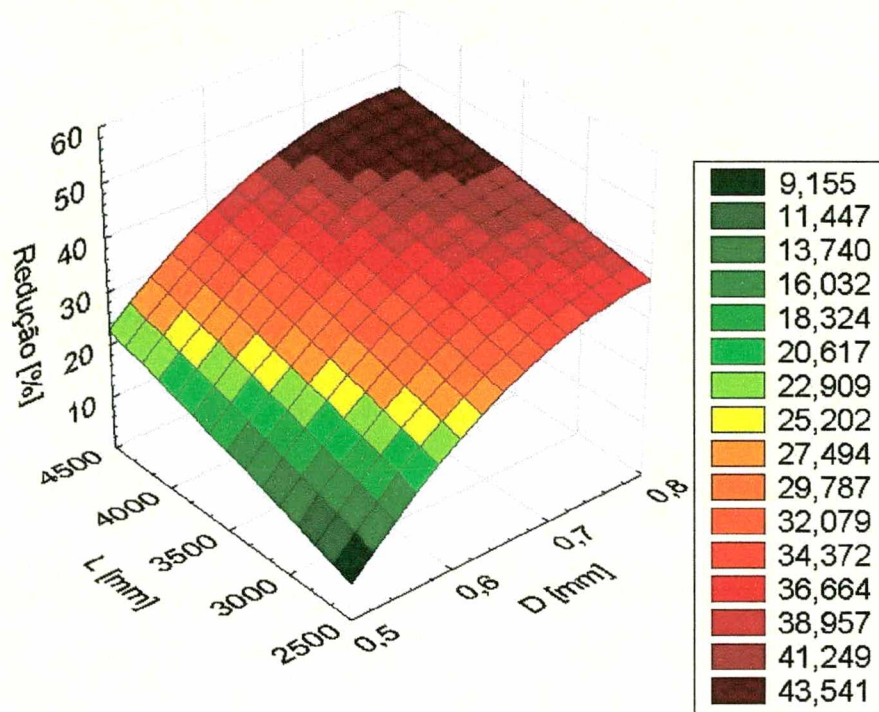


Figura 7.13 - Redução no fluxo de massa em função do diâmetro e comprimento do capilar

Apesar da base de dados ser ainda restrita, os resultados apresentados na figura 7.13, mostram que a redução percentual do fluxo de massa aumenta com o aumento do diâmetro e com o aumento do comprimento do tubo capilar.

Acredita-se que em tubos capilares de mesmo comprimento a redução de vazão seja governada pela espessura da película de óleo que adere na superfície interna do tubo capilar. Quanto maior o diâmetro, maior a área disponível para adesão, maior a espessura da película de óleo e consequentemente maior a redução do fluxo de massa.

Em tubos capilares de mesmo diâmetro, a redução de vazão seria governada pela extensão da película de óleo. Quanto maior o comprimento, maior a extensão da película de óleo e conseqüentemente maior a redução do fluxo de massa.

Deve-se ressaltar que estas afirmações têm caráter especulativo, já que são referentes a um único óleo (éster  $\alpha$ 22E), concentração ( $\cong 1\%$ ), pressão de condensação (14bar) e grau de subresfriamento (10°C). Além disso, o número de pontos experimentais é também bastante restrito, o que impede qualquer generalização dos resultados apresentados.

Cada um dos quatro (4) tubos capilares foi também testado com nitrogênio (ASHRAE 28, 1996), antes e após a realização dos testes de obstrução, obtendo-se os resultados mostrados na tabela 7.3. A redução percentual de vazão mostrada para o HFC134a refere-se a redução total, ou seja, ao somatório das colunas 5 e 8 da tabela 7.2. É conveniente mencionar também, que nestes testes não foram tomadas amostras de refrigerante ao final de cada teste, para evitar um possível arraste da película de óleo (ver item 5.4).

Tabela 7.3 - Redução percentual de vazão / HFC134a vs. Nitrogênio

	$L_{\text{capilar}}$ [mm]	$D_{\text{nominal}}$ [mm]	Redução <sub>HFC134a</sub> [%]	Redução <sub>Nitrogênio</sub> [%]
Capilar 2	3994	0,790	44,8	15,3
Capilar 3	4000	0,570	35,1	8,5
Capilar 4	3008	0,570	27,3	16,3
Capilar 5	3008	0,790	40,0	22,9

Da tabela 7.3, fica evidente que a redução percentual de vazão obtida através dos testes com nitrogênio não corresponde aos valores obtidos com HFC134a. A diferença não pode também ser creditada a um possível arraste da película de óleo pelo nitrogênio, como mostrado no apêndice XV.

O efeito do diâmetro sobre a redução de fluxo de massa observado nos testes com HFC134a se repetiu nos testes com nitrogênio. Por outro lado, o efeito do comprimento se manifestou de maneira oposta.

Quaisquer informações para este fato, neste momento, são meramente especulativas. É necessário ampliar a base de dados antes de se realizar uma análise mais aprofundada do fenômeno em questão

## **8 - Conclusões**

O objetivo maior deste trabalho foi investigar o problema da obstrução de tubos capilares em sistemas de refrigeração que utilizam HFC134a e óleo éster. Para tanto, desenvolveu-se uma bancada experimental específica, única na literatura, com possibilidade de gerar, controlar e medir as variáveis de interesse.

Testes preliminares foram realizados, investigando-se o efeito da concentração e do tipo de óleo e do grau de subresfriamento sobre o fluxo de massa e sobre a distribuição de temperatura resultantes. Ao contrário do esperado verificou-se que o óleo, mesmo isento de contaminantes, provoca a obstrução do tubo capilar.

Testes adicionais foram então realizados para se verificar o impacto do diâmetro e do comprimento do tubo capilar sobre a redução do fluxo de massa. Verificou-se que a redução percentual do fluxo de massa cresce com o aumento do diâmetro e com o aumento do comprimento do tubo capilar.

Correlações foram desenvolvidas para prever o fluxo de massa através de tubos capilares sujeitos ao escoamento de HFC134a puro e contaminado com óleo éster  $\alpha 22E$ .

Comparações realizadas com testes normalizados de medição de vazão através de nitrogênio (ASHRAE 28, 1996), indicaram que esta técnica fornece variações de vazão sempre inferiores as observadas na bancada.

Testes adicionais são ainda necessários como forma de se explorar o efeito do tipo e concentração do óleo e das condições de operação (pressão e grau de subresfriamento). Sugere-se que estes experimentos sejam planejados estatisticamente como forma de se investigar não apenas o efeito individual de cada variável mas também das combinações entre elas.

## ***Referências Bibliográficas***

ASHRAE Refrigeration Handbook, Organics Contaminants - Sludge, Wax, and Tars, capítulo 6, 1998, pp. 6.6-6.7.

ASHRAE 28, Method of Testing Flow Capacity of Refrigerant Capillary Tubes, 1791 Tullie Circle, NE, Atlanta, GA 30329, 1996.

ASHRAE 41.4, Standard Method for Measurement of Proportion of Lubricant in Liquid Refrigerant, 1791 Tullie Circle, NE, Atlanta, GA 30329, 1996.

ASTM, Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement, STP470A, 4<sup>th</sup> Ed., 1981.

BOABAID, C. N., Análise do Desempenho de Tubos Capilares Adiabáticos, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 1994.

DEVOS, R., R-134a Qualification - Industry Refrigerator Capillary Data, ASHRAE Trans., Vol.103, Part 2, 1997, pp. 640-648.

GONÇALVES, J. M., Análise Experimental do Escoamento de Fluidos Refrigerantes em Tubos Capilares, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 1994.

INCROPERA, F. P., DeWITT, D. P., Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, Guanabara Koogan S.A, 3<sup>a</sup> edição, 1992.



JÚNIOR, A. A. G., Metrologia e Controle Geométrico, Laboratório de Metrologia e Automação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, Parte 1 e 2, 1993.

MARCINICHEN, J. B., Construção, calibração e validação de uma bancada de medição de vazão de nitrogênio em tubos capilares, Relatório Interno - NRVA, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 1998.

PARISE, J. A. R., MOTTA, S. Y., BRAGA, S. L., Experimental Study of Adiabatic Capillary Tubes: Critical Flow of Refrigerant / Oil Mixtures, artigo submetido para o International Journal of HVAC & R Research, 2000.

PATE, M. B., BITTLE, R. R., WOLF, D. A., Adiabatic Capillary Tube Performance with Alternative Refrigerants, ASHRAE research report RP-762, 1995, pp. 139-149.

TAIRA, S., OONUMA, Y., YAMAKAWA, K., YAJIMA, R., Accelerated Evaluation of Capillary Clogging in HFC Air Conditioners, International Refrigeration Conference at Purdue, West Lafayette, Indiana, July 14-17, 1998, pp. 425-429.

## ***Apêndices***

## **Apêndice I - Sistema Elétrico, Listagem dos Códigos do Circuito de Refrigeração e Especificação dos Equipamentos da Bancada**

A seqüência de partida dos componentes da bancada obedece ao fluxograma mostrado na figura I.1.

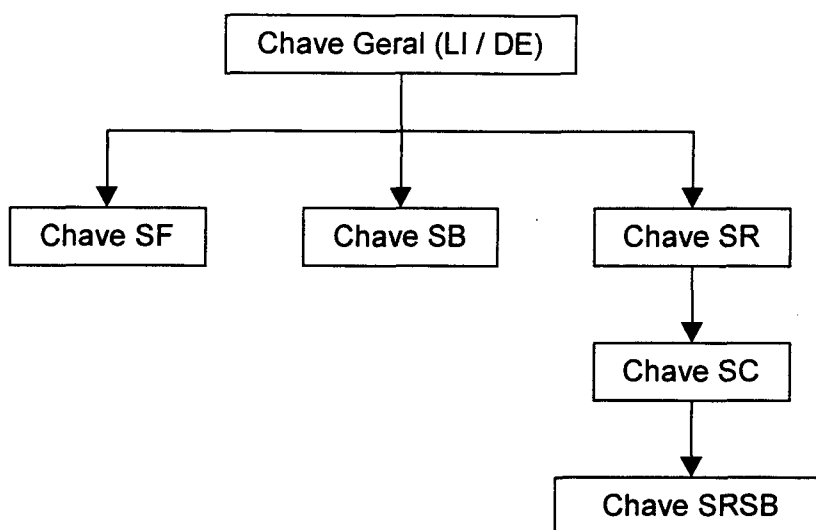


Figura I.1 - Fluxograma da seqüência de partida dos componentes

Como pode ser observado a partida do módulo de potência da resistência de controle do subresfriamento (SRSB) depende da partida dos compressores (SC) que por sua vez depende da chave SR. Este cuidado foi tomado com o objetivo de aumentar a segurança durante a partida e funcionamento da bancada.

A figura I.2 mostra o circuito elétrico da bancada.

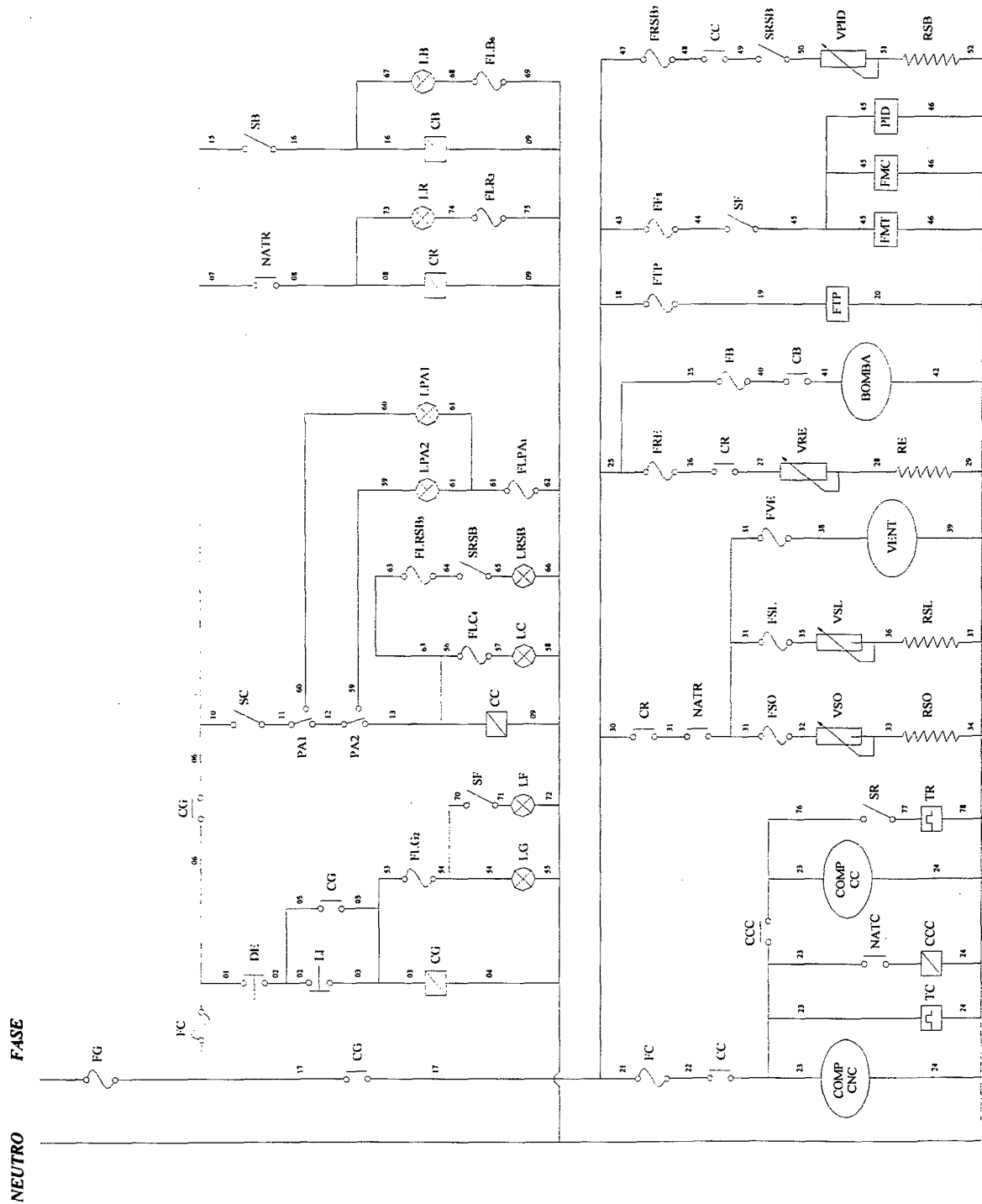


Figura 1.2 - Circuito elétrico / bancada de obstrução de tubos capilares

A seguir serão apresentados os códigos das figuras 2.1 e I.2 com as suas respectivas especificações.

**Figura 2.1 - Circuito de refrigeração**

**AL** - Acumulador de líquido

**BD** - Bomba dosadora de óleo

**CC** - Compressor com óleo contaminado

**CCL** - Coluna de calibração

**CNC** - Compressor com óleo não contaminado

**FG** - Filtro de fluido refrigerante

**FIG** - Filtro intermediário de fluido refrigerante

**FILTRO** - Filtro de fluido refrigerante

**FMC** - Fluxímetro Coriolis

**FMT** - Fluxímetro Turbina

**FS** - Filtro secador

**M** - Manómetro

**MLV** - Misturador óleo/fluido refrigerante

**N2** - Pulmão de nitrogênio para RO1

**P** - Transdutor de pressão absoluta

**PA** - Pressostato de alta

**PFG** - Pré - filtro de fluido refrigerante

**RSUBRESEF** - Resistência de controle do grau de subresfriamento

**R01,R02** - Reservatório de óleo

**SA1SW, SA2SW, SA3SW** - Válvulas das seções de amostragem

**SL** - Separador de líquido

**S01,S02,S03,S04,S05** - Separadores de óleo

SRL - Subresfriador de líquido

S1 a S13 - Válvulas de serviço

I - Transdutor de temperatura

VA - Válvula agulha

VA<sub>ALIM</sub> - Válvula agulha de alimentação do nitrogênio

VA<sub>RO1</sub> - Válvula agulha de liberação de nitrogênio para RO1

VC - Válvula de controle da pressão de condensação

VEP1, VEP2 - Válvulas de expansão

VF - Válvula de controle do fluxo d'água

VFA, VFASW - Válvulas de fechamento da região de alta pressão

VFB, VFBSW - Válvulas de fechamento da região de baixa pressão

VLA, VL - Visores de líquido

VR - Válvula de retenção

Figura I.2 - Circuito elétrico

BOMBA - Bomba dosadora

CB - Contatora da bomba dosadora

CC - Contatora dos compressores

CCC - Contatora auxiliar de acionamento do compressor contaminado

CG - Contatora da chave geral

COMP CC - Compressor com óleo contaminado

COMP CNC - Compressor com óleo não contaminado

CR - Contatora das resistências

DE - Contato normalmente fechado da chave geral

FB - Fusível da bomba dosadora

FC - Fusível dos compressores

FC1 - Fusível dos comandos



FFTP - Fusível da fonte dos transdutores de pressão

FF8 - Fusível da alimentação dos fluxímetros e PID

FG - Fusível geral

FLB6 - Fusível da lâmpada indicadora do funcionamento da bomba dosadora

FLC4 - Fusível da lâmpada indicadora do funcionamento dos compressores

FLG2 - Fusível da lâmpada indicadora do acionamento da chave geral

FLPA1 - Fusível da lâmpada indicadora do acionamento do pressostato de alta

FLRSB5 - Fusível da lâmpada indicadora do funcionamento da resistência de controle do subresfriamento

FLR3 - Fusível da lâmpada indicadora do funcionamento das resistências

FMC - Fluxímetro Coriolis

FMT - Fluxímetro turbina

FRE - Fusível da resistência do evaporador

FRSB7 - Fusível da resistência de controle do subresfriamento

FSL - Fusível da resistência do separador de líquido

FSO - Fusível das resistências dos separadores de óleo

FTP - Fonte dos transdutores de pressão

FVE - Fusível do ventilador

LB - Lâmpada indicadora do acionamento da bomba dosadora

LC - Lâmpada indicadora do acionamento dos compressores

LF - Lâmpada indicadora do acionamento dos fluxímetros e PID

LG - Lâmpada indicadora do acionamento da chave geral

LI - Contato normalmente aberto da chave geral

LPA1 - Lâmpada indicadora do acionamento do pressostato de alta 1

LPA2 - Lâmpada indicadora do acionamento do pressostato de alta 2

LR - Lâmpada indicadora do acionamento do ventilador e das resistências dos separadores de óleo, do separador de líquido e do evaporador

LRSB - Lâmpada indicadora do acionamento da resistência do subresfriamento

NATC - Contato normal aberto de "TC"

NATR - Contato normal aberto de "TR"

PA1, PA2 - Pressostato de alta

PID - Controlador proporcional-integral-derivativo

RE - Resistência do evaporador

RSB - Resistência de controle do subresfriamento

RSL - Resistência do separador de líquido

RSO - Resistências dos separadores de óleo

SB - Chave de acionamento da bomba dosadora

SC - Chave de acionamento dos compressores

SF - Chave de acionamento dos fluxímetros e do PID

SR - Chave de acionamento do ventilador e das resistências dos separadores de óleo, separador de líquido e evaporador

SRSB - Chave de acionamento do módulo de potência da resistência de controle do subresfriamento

TC - Temporizador de acionamento do compressor contaminado

TR - Temporizador de acionamento de "RSO", "RSL" e "VENT"

VENT - Ventilador

VPID - Controlador de potência do PID

VRE - Variador de tensão da resistência do evaporador

VSL - Variador de tensão da resistência do separador de líquido

VSO - Variador de tensão das resistências dos separadores de óleo

A especificação dos equipamentos utilizados na bancada é mostrada a seguir.

**1 - Fonte de alimentação para os transdutores de pressão**

**Fabricante : MCE**

**Modelo : CH5 / 1**

**Entrada : 110/220Vca**

**Saída : 5Vcc / 1A**

**2 - Transdutores de pressão**

**Fabricante : Hottinger Boldwin Nesstechnik (HBM)**

**Modelo : P3MB**

**Faixa de operação : 0 a 10bar e 0 a 20bar**

**3 - Medidor de vazão tipo turbina**

**Fabricante : Tryon Trading**

**3.1 - Turbina**

**Modelo : MF20-CB-PH-A-4X-C**

**N/S : 209473**

**3.2 - Transmissor de pulso**

**Modelo : SP714**

**N/S : 209626**

**3.3 - Conversor**

**Modelo : SP2900**

**N/S : X 19570**

**4 - Sistema de fixação da tubulação do medidor turbina**

**Fabricante : Swagelok**

**4.1 - Suporte Kit**

**Código : 304-S1-PP-6T**

**4.2 - Weld Plate**

**Código : 304-S1-WPE**

**5 - Medidor de fluxo de massa tipo Coriolis**

**Fabricante : Danfoss do Brasil**

**5.1 - Sensor**

**Modelo : Mass 2100 DI 1.5**

**N/S : 009413N189**

**5.2 - Conversor**

**Modelo : Mass 3000**

**Código : 083H0061**

**N/S : 000901N236**

## **6 - Sistema de aquisição de dados**

**Fabricante : Hewlett-Packard Brasil S.A.**

### **6.1 - Unidade central (mainframe) HP75000 série B**

**Modelo : E1300A**

### **6.2 - Interface HP-IB**

**Modelo : Placa HP-82341 e cabo HP-IB**

### **6.3 - Multímetro interno**

**Modelo : HP E1326B**

### **6.4 - Módulo multiplexador para temperatura**

**Modelo : HP E1344A 16-Channel High Voltage Thermocouple Relay Multiplexer**

### **6.5 - Módulo multiplexador para pressão**

**Modelo : HP E1356A 8-Channel 350 $\Omega$  Strain Gage Multiplexer**

## **7 - Controlar de temperatura tipo PID**

**Fabricante : Poitec**

### **7.1 - Módulo de potência 25A**

**Modelo : Robertshaw CTP 1-2-25**

### **7.2 - Controlador universal de processo**

**Modelo : Temp. Fuzzy - Unidade Básica E5CK-AA1**

### **7.3 - Módulo de saída corrente/relé**

**Modelo : Para E5CK OMRON E53-C4R4**

**8 - Resistência de aquecimento para subresfriamento**

**Fabricante : Heat con**

**Modelo : 25W/m**

**9 - Bomba Dosadora**

**Fabricante : Vibropac**

**Tipo : Pistão eletromagnético**

**Modelo : LMI-Milton Roy H913-917 com**

**Características : - Vazão máxima de 500ml/h**

**Pressão máxima de 21bar**

**Alimentação 220V, 60Hz, Monofásica**

**Microprocessada para receber controle de 4 a 20mA**

**10 - Coluna de calibração da bomba da dosadora**

**Fabricante : Vibropac**

**Código : 35645**

**Característica : Capacidade de 200ml com conexões de ½ NPTF.**

**11 - Filtros coalescentes de óleo**

**Fabricante : Parker Hannifin**

**Código : H1S-2HM06-013**

**Característica : Grau de filtragem 2**



Código : H1S-6HM06-013

Característica : Grau de filtragem 6

Código : H1S-10HM06-013

Característica : Grau de filtragem 10

12 - Válvula esfera em latão

Fabricante : Swagelok

Código : B-44S6

13 - Visor de líquido

Fabricante : Danfoss do Brasil

Código : 014-018200

14 - Pressostato de alta

Fabricante : Danfoss do Brasil

Tipo : KP5

Código : 60-1171

15 - Válvula diafragma

Fabricante : Danfoss do Brasil

Tipo : BML 10 3/8" solda ext.

Código : 009G022200

Tipo : BML 10 3/8"

Código : 009G012700

16 - Trocador de calor para condensador e subresfriador

Fabricante : Danfoss do Brasil

Tipo : Intercambiador HE 1,0

Código : 015D000400

17 - Separador de óleo

Fabricante : Danfoss do Brasil

Tipo : OUB1 com conexão 3/8" solda a cobre

Código : 40B0010 + 2 x 40B0140

18 - Filtro secador

Fabricante : Danfoss do Brasil

Tipo : Núcleo sólido 100% de molecular sieves

Código : DML53S

19 - Regulador de pressão de condensação

Fabricante : Danfoss do Brasil

Tipo : WVFX 10-25 / 3,5 a 16bar / máx. 19bar

Código : 3N1100

**20 - Compressor**

**Fabricante : Embraco**

**Modelo : FFI 12HBX**

**21 - Transdutor de temperatura**

**Fabricante : Omega**

**Modelo : Tipo T (Cu – Co)**

**Faixa de operação : -75°C a 177°C**

**22 - Resistência de aquecimento dos separadores de óleo e separador de líquido**

**Fabricante : Fisatom**

**Modelo : 5 (fita de aquecimento), classe 300**

**Faixa de operação : 100W e 200W**

**23 - Separador de líquido**

**Fabricante : Atenas**

**Modelo : AS 300 ¾"**

**24 - Acumulador de líquido**

**Fabricante : Embraco**

**Modelo : Carcaça de compressor EM**

**25 - Isolamento para tubo capilar**

**Fabricante : Isosul**

**Modelo : Placa de isopor (15x28x50)cm**

**26 - Evaporador**

**Fabricante : Elgin**

**Modelo : Tipo colméia**

**27 - Resistência de aquecimento do ar para o evaporador**

**Fabricante : Enxuta**

**Modelo : Resistência da secadora de roupa portátil**

**28 - Ventilador para o evaporador**

**Fabricante : Mebsa**

**Modelo : 1/25 CV**

**29 - Válvula de expansão automática**

**Fabricante : Fligor**

**Modelo : Pressostática AI – 0,3**

### 30 - Canalizações

Material : Cobre

Diâmetro : 3/8" e 1/4"

### 31 - Fusíveis

Fabricante : Siemens

Modelos:

Diazed Siemens 35A para alimentação geral da bancada.

Diazed Siemens 2A para alimentação dos comandos.

Diazed Siemens 2A para alimentação do ventilador.

Diazed Siemens 2A para alimentação da resistência do separador de líquido.

Diazed Siemens 2A para alimentação das resistências dos separadores de óleo.

Diazed Siemens 6A para alimentação da resistência do ar do evaporador.

Diazed Siemens 2A para alimentação da bomba dosadora.

Diazed Siemens 16A para alimentação dos compressores.

Diazed Siemens 4A para alimentação da fonte dos transdutores de pressão.

1,5A para alimentação da resistência de controle do subresfriamento.

0,5A para alimentação do fluxímetro Coriolis, do medidor turbina e do controlador PID.

0,1A para alimentação da lâmpada indicativa do acionamento da bomba dosadora.

0,1A para alimentação da lâmpada indicativa do acionamento das resistências dos separadores de óleo, da resistência do separador de líquido, da resistência do ar do evaporador e do ventilador.

0,1A para alimentação da lâmpada indicativa do acionamento dos pressostatos de alta.

0,1A para alimentação da lâmpada indicativa do acionamento da resistência de controle

do subresfriamento.

0,1A para alimentação da lâmpada indicativa do acionamento dos compressores.

0,1A para alimentação da lâmpada indicativa do acionamento da chave geral.

## 32 - Chaves

Fabricante : Weg

### 32.1 - Chave geral

Modelo : Botão duplo BWDPLVRG01

### 32.2 - Chave de acionamento dos componentes

Modelo : Seletor Knob curto BWXSLD0V

## 33 - Contatora

Fabricante : Weg

Modelo :

⇒ CW07 CA / Bomba dosadora

⇒ CWM09 CA / Ventilador, resistência do separador de óleo, resistência do separador de líquido, resistência do evaporador e compressor

⇒ CWM25 CA / Alimentação geral do sistema (contadoras e comandos)

## 34 - Disjuntor

Fabricante : Pial legrand

Modelo : Monofásico 35A

## 35 - Sinaleiro indicativo da atuação do pressostato

**Fabricante : WEG**

**Modelo : BWXLVD**

**36 - Variador de tensão**

**Fabricante : Pial legrand**

**Modelo : 500W e 1000W**



## **Apêndice II - Calibração dos Transdutores, Medição do Diâmetro Interno do Tubo Capilar e Determinação da Densidade dos Óleos Éster**

### II.1 - Calibração do medidor de fluxo de massa Coriolis

Como incerteza de medição do fluxo de massa, utilizou-se o erro do equipamento mais ou menos a maior variação observada, durante o processo de calibração realizado pelo fabricante, ou seja, a maior diferença entre o valor correto e o indicado pelo instrumento. A tabela II.1 mostra os resultados fornecidos pelo fabricante.

Tabela II.1 - Calibração do Coriolis / Fabricante

FMC [kg/h]	Massa real [g]	Massa medida [g]	Erro da massa [%]	Erro no FMC [kg/h]
14,55	249,846	249,747	0,04	0,006
14,10	242,190	242,153	0,02	0,002
3,00	52,754	52,774	-0,04	-0,001
3,00	52,593	52,608	-0,03	-0,001
0,60	10,651	10,655	-0,04	0,000
0,60	10,621	10,635	-0,13	-0,001

O fabricante admite um erro no equipamento de  $\pm 0,25\%$  para fluxos acima de 1,2kg/h. Desta forma, a incerteza utilizada para o fluxímetro foi de  $\pm 0,0025$  FMC  $\pm 0,006$ kg/h. Sendo assim, para um fluxo de 10kg/h a incerteza observada é de  $\pm 0,03$ kg/h.

O fluxímetro utilizado foi ajustado para uma saída linearizada de corrente, entre 4mA e 20mA, que corresponde a uma faixa de fluxo de massa entre 0kg/h e 10kg/h. Como o sistema de aquisição lê apenas sinais de tensão, instalou-se um "shunt" de  $326,360\Omega \pm 0,005\Omega$ ,

o que gerou sinais de tensão entre 1,30544V e 6,52720V e deu origem a seguinte equação:

$$FMC = 1,91506312V_{co} - 2,499999 \quad \text{II.1}$$

$$V_{co} = R_i \quad \text{II.2}$$

### II.2 - Calibração dos transdutores de pressão

Para calibração dos transdutores de pressão, utilizou-se uma máquina de peso morto, obtendo-se as curvas e as incertezas mostradas na tabela II.2.

Tabela II.2 - Calibração dos transdutores de pressão

TRANSDUTORES					
COEFICIENTES	BOC1 (10bar)	BOC2 (10bar)	BOC3 (10bar)	BOC4 (20bar)	BOC5 (20bar)
A	-3,12453E-05	-0,000029555	-3,05131E-05	2,694E-07	3,88E-08
B	0,000952095	0,000894159	0,000931474	-1,18907E-05	-1,3054E-06
C	-0,010965731	-0,010190186	-0,010744506	0,000166185	-7,2517E-06
D	0,059822115	0,054785134	0,058778328	-0,000348225	0,000870155
E	0,844927954	0,862764364	0,847915862	0,995690647	0,993123325
F	0,142376106	0,116120591	0,10720977	0,033547154	-0,111599113
Incerteza [bar]	0,005	0,005	0,007	0,014	0,004
$P_c = A \cdot S^5 + B \cdot S^4 + C \cdot S^3 + D \cdot S^2 + E \cdot S + F$ P <sub>c</sub> = pressão calibrada S = sinal lido					

A equação para o cálculo da incerteza da pressão (II.3) utiliza a incerteza de medição pontual ( $I_{pontual}$ ), relativa a dispersão dos pontos obtida durante a calibração e a incerteza de medição da curva ajustada ( $I_{ajuste}$ ), relativa a diferença observada entre o valor obtido na

calibração e o valor fornecido pela curva. Estas parcelas podem ser calculadas como indicado a seguir.

$$I_p = \sqrt{I_{\text{ajuste}}^2 + I_{\text{pontual}}^2} \quad \text{II.3}$$

$$I_{\text{pontual}} = D_p St \quad \text{II.4}$$

onde St é o coeficiente de Student que depende do número de pontos da amostra (ver tabela II.3).

Tabela II.3 - Coeficiente de Student vs. número de pontos da amostra

Número de pontos da amostra	St
2	12,7
3	4,3
4	3,2
5	2,8
6	2,6
8	2,4
10	2,3
20	2,1
30	2,0
50	2,0
100	2,0
200	1,96
>200	1,96

$$D_p = \sqrt{\frac{\sum_i (V_i - V_m)^2}{(N-1)}} \quad \text{II.5}$$

$$I_{\text{ajuste}} = \sqrt{\frac{\sum_i (V_{\text{cali}} - V_{\text{medi}})^2}{N - (1 + P)}} \quad \text{II.6}$$

### II.3 - Calibração dos transdutores de temperatura

Para medição de temperatura estão sendo utilizados termopares tipo T, de 0,254mm. A curva de calibração utilizada é a padrão IPTS68 (International Practical Temperature Scale – 1968) da norma ASTM (ASTM, 1981). A incerteza de medição da temperatura foi estabelecida em +/- 0,2°C (Gonçalves, 1994).

### II.4 - Calibração do medidor Turbina

O medidor turbina foi calibrado utilizando-se dados gerados pelo transdutor de fluxo de massa Coriolis e a densidade do líquido, que por sua vez, é obtida através do programa REFPROP a partir dos valores de temperatura e pressão. Desta maneira, utilizando-se a equação II.7, consegue-se determinar a vazão e posteriormente correlacioná-la com a tensão fornecida pelo medidor turbina.

$$Q_{\text{med}} = \frac{FMC}{\rho_1} \quad \text{II.7}$$

O medidor turbina fornece um sinal linear entre 4mA e 20mA. Para converter este sinal em tensão instalou-se um “shunt” de 329,420Ω +/- 0,005Ω, o que gerou uma faixa de tensão entre 1,31768V e 6,5884V.

A equação II.8, ajustada linearmente a partir dos resultados experimentais, representa a vazão ( $Q_{cal}$ ) em função da tensão medida ( $VT$ ).

$$Q_{cal} = -0,2928VT + 0,7712 \quad \text{II.8}$$

O ajuste linear de calibração do medidor turbina é mostrada na figura II.1.

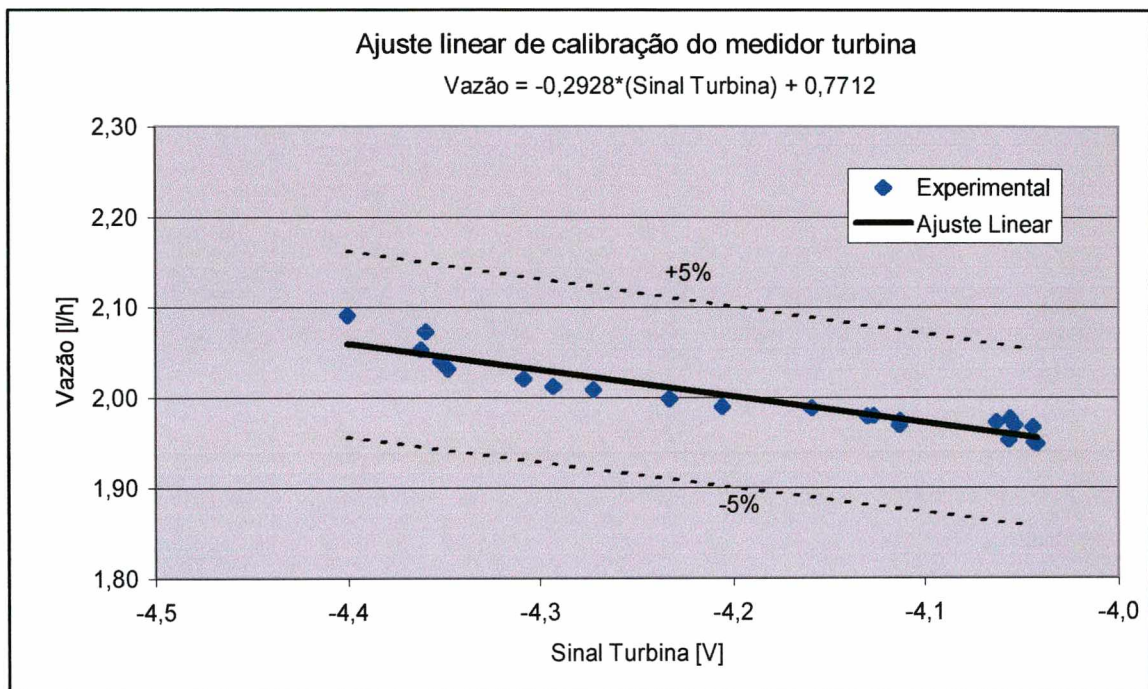


Figura II.1 - Calibração do medidor turbina

A tabela II.4 mostra os resultados experimentais obtidos, juntamente com a vazão calculada através das equações II.7 ( $Q_{med}$ ) e II.8 ( $Q_{cal}$ ).

Tabela II.4 - Resultados da calibração do medidor turbina

Teste	TT [°C]	PT [bar]	$\rho_l$ [kg/m <sup>3</sup> ]	FMC [kg/h]	$Q_{med}$ [l/h]	$Q_{cal}$ [l/h]	Dp [l/h]	$IQ_{pontual}$ [l/h]	$IQ_{ajuste}$ [l/h]
cap01teste76a	27,9	14,264	1199,953	2,51	2,09	2,06	0,0072	0,02	0,01
cap01teste76b	27,9	14,263	1199,984	2,49	2,07	2,05	0,0101	0,02	$IQ$ [l/h]
cap01teste76c	27,9	14,267	1199,977	2,46	2,05	2,05	0,0082	0,02	<b>0,03</b>
cap01teste76d	27,8	14,262	1200,538	2,45	2,04	2,05	0,0075	0,02	
cap01teste76e	27,7	14,275	1200,912	2,44	2,03	2,04	0,0024	0,01	
cap01teste76f	27,6	14,287	1201,217	2,43	2,02	2,03	0,0053	0,01	
cap01teste76g	27,5	14,268	1201,457	2,42	2,01	2,03	0,0040	0,01	
cap01teste76h	27,6	14,291	1201,337	2,41	2,01	2,02	0,0045	0,01	
cap01teste76i	27,6	14,283	1201,286	2,40	2,00	2,01	0,0046	0,01	
cap01teste76j	27,6	14,295	1201,318	2,39	1,99	2,00	0,0046	0,01	
cap01teste76k	27,7	14,302	1200,849	2,39	1,99	1,99	0,0048	0,01	
cap01teste76l	27,8	14,275	1200,584	2,38	1,98	1,98	0,0070	0,02	
cap01teste76m	27,8	14,313	1200,435	2,38	1,98	1,98	0,0061	0,01	
cap01teste76n	27,7	14,286	1200,952	2,37	1,97	1,98	0,0059	0,01	
cap01teste76o	27,7	14,317	1201,026	2,36	1,97	1,98	0,0034	0,01	
cap01teste76p	27,6	14,303	1201,220	2,35	1,95	1,96	0,0085	0,02	
cap01teste76q	27,4	14,328	1202,222	2,34	1,95	1,95	0,0045	0,01	
cap01teste76r	27,4	14,310	1202,122	2,34	1,95	1,95	0,0044	0,01	
cap01teste76s	27,4	14,336	1202,087	2,36	1,97	1,96	0,0033	0,01	
cap01teste76t	27,3	14,341	1202,427	2,37	1,97	1,96	0,0050	0,01	
cap01teste76u	27,3	14,351	1202,589	2,37	1,97	1,96	0,0063	0,01	
cap01teste76v	27,3	14,361	1202,508	2,38	1,98	1,96	0,0066	0,02	

A incerteza de medição da vazão foi calculada através da equação II.9.

$$IQ = \sqrt{IQ_{pontual}^2 + IQ_{ajuste}^2} \quad \text{II.9}$$

Onde,  $IQ_{pontual}$  representa a máxima incerteza da vazão pontual (Eq. II.10) e  $IQ_{ajuste}$  representa a incerteza do processo de ajuste (Eq. II.11).

$$IQ_{\text{pontual}} = Dp St \quad \text{II.10}$$

$$IQ_{\text{ajuste}} = \sqrt{\frac{\sum_i (Q_{\text{cali}} - Q_{\text{medi}})^2}{N - (1 + P)}} \quad \text{II.11}$$

A incerteza de medição da vazão volumétrica é portanto de  $\pm 0,03$  [l/h].

## II.5 - Padrão de calibração e determinação da incerteza da Bomba Dosadora

Com o objetivo de contaminar o fluido refrigerante com uma determinada quantidade de óleo instalou-se uma bomba com capacidade de dosagem de 0,030ml/min a 8ml/min. Esta bomba efetua a dosagem por pulsos, sendo que cada pulso pode ser regulado através de um Dial entre 0,030ml a 0,080ml. A frequência dos pulsos pode ser regulada entre 1 a 100 pulsos/min, com incrementos de (1) um pulso/min.

A vazão da bomba é dada pela equação II.12.

$$Qb = Vc * Vb * 60 \quad \text{II.12}$$

onde.:

Vc - Velocidade da bomba [str/min];

Vb - Volume dosado por pulso (stroke) [ml/str];

Qb - Vazão da bomba [ml/h].

Para o cálculo do volume dosado por pulso (Vb), utiliza-se a equação II.13.

$$Vb = \frac{V}{\text{Tempo} * Vc} \quad \text{II.13}$$



onde.:

V - Volume dosado [ml];

Tempo - Tempo de dosagem [min].

A incerteza da vazão (IQb) é dada pela equação II.14,

$$IQb = \sqrt{\left(\frac{\partial Qb}{\partial Vb} * IVb\right)^2 + \left(\frac{\partial Qb}{\partial Vc} * IVc\right)^2} \quad \text{II.14}$$

onde.:

$$\frac{\partial Qb}{\partial Vb} = 60 * Vc \quad \text{II.14.1}$$

$$\frac{\partial Qb}{\partial Vc} = 60 * Vb \quad \text{II.14.2}$$

A incerteza do volume dosado por pulso (IVb) é dada pela equação II.15,

$$IVb = \sqrt{\left(\frac{\partial Vb}{\partial V} * IV\right)^2 + \left(\frac{\partial Vb}{\partial \text{Tempo}} * I\text{Tempo}\right)^2 + \left(\frac{\partial Vb}{\partial Vc} * IVc\right)^2} \quad \text{II.15}$$

onde:

$$\frac{\partial Vb}{\partial V} = \frac{1}{\text{Tempo} * Vc} \quad \text{II.15.1}$$

$$\frac{\partial Vb}{\partial \text{Tempo}} = -\frac{V}{\text{Tempo}^2 * Vc} \quad \text{II.15.2}$$

$$\frac{\partial V_b}{\partial V_c} = - \frac{V}{\text{Tempo} * V_c^2} \quad \text{II.15.3}$$

onde ..

IV - Incerteza do volume dosado pela bomba;

ITempo - Incerteza do tempo.

As incertezas do tempo e da velocidade da bomba (IVc) serão consideradas nulas devido seus valores não serem representativos no cômputo geral da incerteza. Deste modo, o segundo e terceiro termo dentro da raiz da equação II.15 são eliminados. A incerteza do volume será tomada como a menor divisão de escala ( IV = 1,0ml).

Deste modo, as incertezas do volume dosado por pulso e da vazão da bomba são dadas respectivamente pelas equações II.16 e II.17.

$$IV_b = \frac{IV}{\text{Tempo} * V_c} \quad \text{II.16}$$

$$IQ_b = \frac{60 * IV}{\text{Tempo}} \quad \text{II.17}$$

Primeiramente, aferiu-se a bomba em relação ao volume de óleo dosado por pulso com diferentes pressões na linha de dosagem. Para isto, instalou-se uma coluna graduada na sucção da bomba que permitiu a avaliação do volume de óleo dosado num determinado tempo. A regulagem do volume por pulsos foi fixada no valor mínimo e variou-se a velocidade da bomba, ou seja, o número de pulsos por minuto.

Foram realizados vários testes, com pressões de 9bar e 14bar na entrada do tubo capilar. Os resultados obtidos são mostrados na tabela II.5.

Tabela II.5 - Aferição da bomba dosadora

Teste	Pecap [bar]	Dial	Vc [str/min]	V [ml]	Tempo [min]	Vb [ml/str]	Qb [ml/h]	IQb [ml/h]
cap01teste60	14	Mínimo	30	7,0	7,7	0,030	54,7	7,8
cap01teste61	14	Mínimo	5	2,5	18,6	0,027	8,1	3,2
cap01teste62	14	Mínimo	30	12,0	14,1	0,028	51,1	4,3
cap01teste63	14	Mínimo	30	9,5	11,4	0,028	49,8	5,2
cap01teste64	14	Mínimo	30	10,0	12,8	0,026	46,7	4,7
cap01teste65	14	Mínimo	30	11,0	14,4	0,025	45,8	4,2
cap01teste66	14	Mínimo	30	11,5	15,9	0,024	43,4	3,8
cap01teste67	14	Mínimo	30	8,5	11,2	0,025	45,7	5,4
cap01teste68	14	Mínimo	5	8,5	67,3	0,025	7,6	0,9
cap01teste69	14	Mínimo	30	49,5	66,4	0,025	44,7	0,9
cap01teste70	14	Mínimo	60	99,0	63,7	0,026	93,2	0,9
cap01teste71	9	Mínimo	5	9,5	60,3	0,032	9,5	1,0
cap01teste72	9	Mínimo	30	55,5	61,1	0,030	54,5	1,0
cap01teste73	9	Mínimo	60	112,0	60,0	0,031	111,9	1,0
cap01teste74	14	Mínimo	60	193,5	123,1	0,026	94,3	0,5
cap01teste75	14	Mínimo	14	75,0	210,1	0,026	21,4	0,3
cap01teste76	14	Mínimo	14	167,0	470,2	0,025	21,3	0,1

Onde:

Dial - Regulagem de volume por pulso

⇒ Dial em 20 - valor mínimo - 0,030ml/pulso

⇒ Dial em 100 - valor máximo - 0,080ml/pulso

Verifica-se que de acordo com a pressão de trabalho, para a mesma regulagem, o volume dosado por pulso varia. Nota-se também que a incerteza da vazão diminui com o aumento do tempo de dosagem.

Conclui-se assim que o melhor modo de avaliar a dosagem de óleo por pulso, e consequentemente a vazão de óleo sendo dosado, consiste na utilização da coluna de calibração por um período mínimo de (1) uma hora. O valor encontrado deve então ser empregado como o valor padrão para o teste sendo realizado. Este procedimento deve ser realizado em cada teste.

Vale lembrar que o óleo na sucção da bomba está pressurizado por nitrogênio com uma pressão aproximada de 2bar, para evitar a contaminação da bancada com ar.

## II.6 - Avaliação do diâmetro interno do tubo capilar

Para determinar o diâmetro interno do Capilar 1 através da vazão de nitrogênio, partiu-se da equação de Darcy (II.18), considerando-se o escoamento no interior do tubo em regime laminar e completamente desenvolvido.

Os testes de vazão de nitrogênio foram realizados controlando-se a pressão na entrada do tubo capilar (Pecap) para que o valor limite do número de Reynolds (2300) não fosse extrapolado.

$$\Delta P = \frac{f \rho_l V_e^2 L}{2 D} \quad \text{II.18}$$

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{II.19}$$

$$Re = \frac{V_e D}{\nu} \quad \text{II.20}$$

$$V_e = \frac{4 \cdot \text{Vazão}}{\pi D^2} \quad \text{II.21}$$

Para determinar a vazão de nitrogênio através do tubo capilar seguiu-se a norma da ASHRAE 28 (1996). Esta norma exige a utilização de uma bancada específica para medição da vazão, disponível no NRVA (Marcinichen, 1998).

O procedimento de teste baseia-se na passagem de nitrogênio a uma pressão conhecida na entrada do tubo capilar, o qual desloca um volume d'água contido no interior de um recipiente. A vazão de nitrogênio através do tubo capilar será a vazão d'água deslocada do recipiente (figura II.2).

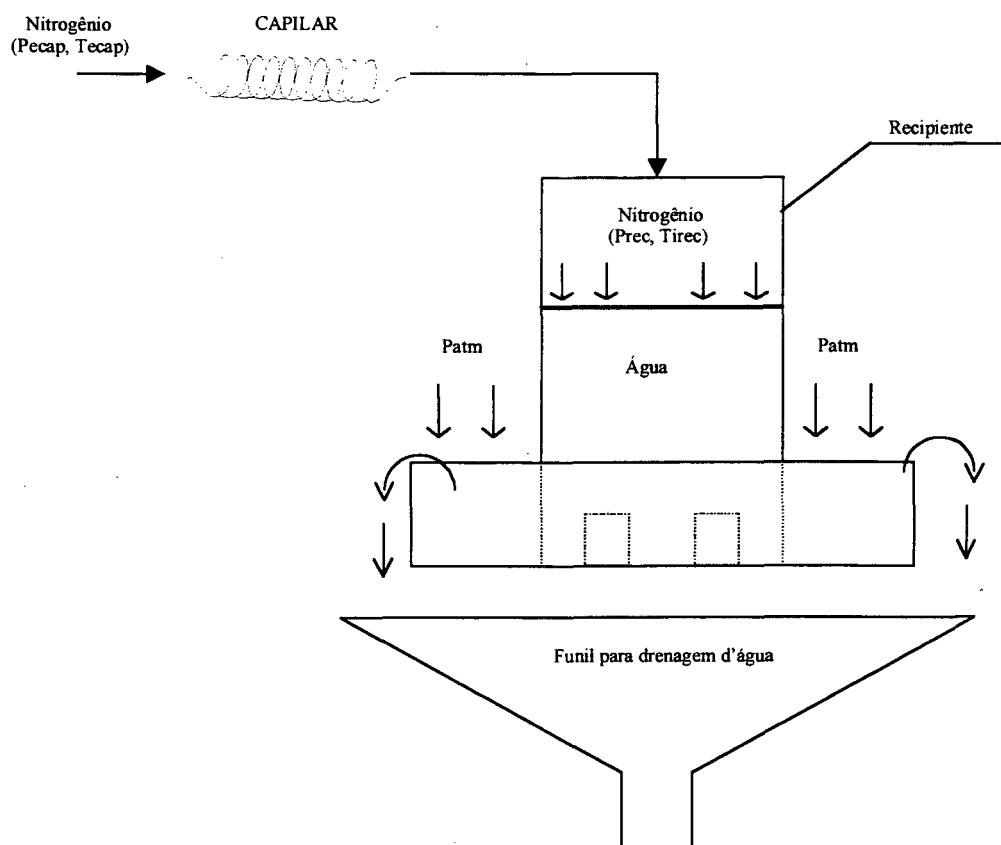


Figura II.2 - Medição da vazão de nitrogênio

A tabela II.6 mostra um resumo dos resultados obtidos, enquanto que o apêndice III mostra tais resultados em detalhes.

Tabela II.6 - Medição da vazão de nitrogênio

Teste	Pecap [bar]	Prec [bar]	Tecap [°C]	Tirec [°C]	Tm [°C]	Vazão [l/min]	lvazão [l/min]
1	2,001	1,072	22,7	22,3	22,5	0,44	0,08
2	2,215	1,079	22,7	22,3	22,5	0,54	0,03
3	2,399	1,082	22,7	22,3	22,5	0,61	0,02

O cálculo da incerteza da medição de vazão de nitrogênio seguiu o apresentado por Marcinichen (1998).

A densidade ( $\rho_{N_2}$ ) e a viscosidade ( $\nu$ ) do nitrogênio foram calculadas através de correlações geradas a partir de dados apresentados por Incropera et al. (1992). Estas equações são mostradas a seguir, onde "Tm" representa a temperatura média do nitrogênio ao longo do tubo capilar.

$$\rho_{N_2} = 0,00001292T_m^2 - 0,01162092T_m + 3,44697768 \quad \text{II.22}$$

$$\nu = 0,000000000108T_m^2 + 0,000000028200T_m - 0,000002320000 \quad \text{II.23}$$

$$T_m = \frac{T_{\text{ecap}} + T_{\text{irec}}}{2} \quad \text{II.24}$$

O diâmetro interno do tubo capilar foi então calculado com base nas equações anteriores, encontrando-se o valor indicado na tabela II.7.

Tabela II.7 - Medição do diâmetro / Capilar 1

$\Delta P$ [Pa]	Vazão [l/min]	$v \cdot 10E6$ [m <sup>2</sup> /s]	$\rho_{N2}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$L_{capilar}$ [mm]	$D_{nitrogênio}$ [mm]	Reynolds	Diâmetro médio [mm]	$I_D$ [mm]
132000	0,61	15,458	1,141	3999	0,69	1221,0	0,69	0,03
113000	0,54	15,456	1,141	3999	0,69	1072,0		
93000	0,44	15,457	1,141	3999	0,69	875,6		

A incerteza do diâmetro ( $I_D$ ) foi determinada pela equação II.25 (Júnior, 1993), sendo que, as incertezas da densidade e viscosidade do nitrogênio, da perda de carga ao longo do tubo capilar e do comprimento do tubo capilar foram desprezadas no cômputo da incerteza do diâmetro por terem baixa representabilidade.

$$I_D = \left( \frac{32 * \rho_{N2} * L_{capilar} * v}{\pi * \Delta P} * \sqrt[3]{\frac{128 * \rho_{N2} * Vazão * L_{capilar} * v}{\pi * \Delta P}} \right) * I_{Vazão} \quad II.25$$

O diâmetro interno do tubo capilar foi também determinado através da utilização de um microscópio / feixe de laser. Primeiramente, preparou-se as amostras para análise conforme a seqüência definida a seguir.

- 1 - Cortar pedaços de tubo capilar de 20mm (quatro pedaços de cada extremidade do tubo capilar),
- 2 - Preparar peças de acrílico com furos para encaixar os tubos capilares cortados (quatro furos por peça),
- 3 - Instalar os tubos capilares nas peças de acrílico formando as amostras (a furação no acrílico vai garantir a perpendicularidade do tubo capilar),
- 4 - Embutir as amostras com resina (interior do tubo capilar deve ser preenchido com resina),



5 - Lixar gradualmente as amostras pelo lado do acrílico , ou seja, lixa mais grossa até a mais fina (retirar no mínimo 5mm de material - resina / acrílico / tubo capilar ),

6 - Realizar polimento da superfície lixada (utilizar pasta diamantada).

Finalizada a etapa de preparação da amostra, efetua-se a medição. Deve-se medir no mínimo seis (6) diâmetros por tubo capilar em ângulos variados em relação a uma referência pré-definida. A medição é relativamente simples, seguindo a seguinte seqüência:

- 1 - Posicionar a amostra sob a objetiva do microscópio;
- 2 - Focar o tubo capilar a ser medido;
- 3 - Tangenciar o feixe de laser sobre uma extremidade do diâmetro do tubo capilar;
- 4 - Zerar a distância e avançar com o laser até tangenciar a outra extremidade do diâmetro do tubo capilar;
- 5 - Ler a distância percorrida pelo feixe de laser (diâmetro).

Foram preparadas duas (2) amostras, uma para cada extremidade do tubo capilar (cada amostra contém quatro (4) tubos capilares). Desses quatro (4) tubos capilares por amostra foram escolhidos os dois (2) melhores para medição do diâmetro.

O diâmetro foi considerado como a média geral dos diâmetros dos quatro (4) tubos capilares medidos. A incerteza do diâmetro ( $I_{\text{diâmetro}}$ ) foi determinada pela equação II.26. A incerteza do microscópio / feixe de laser é de  $0,3\mu\text{m}$ , e foi considerada desprezível. Os resultados obtidos são mostrados na tabela II.8.

$$I_{\text{diâmetro}} = DP_{\text{diâmetro}} * St \quad \text{II.26}$$

Onde,

$DP_{\text{diâmetro}}$  - Desvio padrão das medidas de diâmetro,

St - Coeficiente de Student.

Tabela II.8 - Diâmetro Capilar 1 (microcópio / feixe de laser)

Capilar 1				
Medição do diâmetro	Amostra entrada		Amostra saída	
	Peça 1 C1E <sub>1</sub> [mm]	Peça 2 C1E <sub>2</sub> [mm]	Peça 3 C1S <sub>2</sub> [mm]	Peça 4 C1S <sub>4</sub> [mm]
1 - 0°	0,602	0,604	0,593	0,593
2 - 30°	0,597	0,598	0,593	0,601
3 - 60°	0,590	0,599	0,600	0,593
4 - 90°	0,583	*	0,599	0,593
5 - 120°	0,588	0,600	0,595	0,591
6 - 150°	0,601	0,602	0,598	0,600
<b>Diâmetro<sub>médio</sub> [mm]</b>	<b>0,596</b>			
<b>DP<sub>diâmetro</sub> [mm]</b>	<b>0,005</b>			
<b>l<sub>diâmetro</sub> [mm]</b>	<b>0,011</b>			

\* - Medida não efetuada devido a irregularidade do diâmetro

O diâmetro do tubo capilar obtido pelo método de medição da vazão de nitrogênio apresenta baixa confiabilidade por uma série de fatores: Incerteza das pressões de entrada e saída do tubo capilar, incerteza da vazão, incerteza das equações utilizadas, hipótese de escoamento laminar, etc... Devido a esta baixa confiabilidade, este valor de diâmetro é usado apenas como orientação inicial. Sendo assim, o valor do diâmetro utilizado para o tubo capilar será aquele obtido pelo método do microscópio / feixe de laser.

## II.7 - Determinação da densidade do óleo

Para a determinação da densidade do óleo éster  $\alpha 22E$ , foram efetuadas 10 medições de massa e volume. Para isto, utilizou-se uma balança com precisão de 0,01g, uma pipeta com precisão de 0,05ml e um béquer com capacidade de 50ml. O valor da massa foi tomado como a média aritmética de três medidas consecutivas.

Primeiramente, pesou-se o béquer limpo e seco. Posteriormente, adicionou-se com a pipeta um volume de óleo conhecido, para então efetuar a pesagem do béquer com óleo. A massa de óleo foi então considerada como a diferença entre as massa médias obtidas.

As equações II.27 e II.28 representam, respectivamente, a densidade do óleo ( $\rho$ ) e a sua incerteza de medição ( $I\rho$ ).

$$\rho = \frac{m_{\text{óleo}}}{V_o} \quad \text{II.27}$$

$$I\rho = \sqrt{(I\rho_{\text{pmáx}})^2 + (I\rho_d)^2} \quad \text{II.28}$$

$$I\rho_p = \sqrt{\left(\frac{\partial\rho}{\partial m} * I_m\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial V_o} * IV_o\right)^2} \quad \text{II.28.1}$$

$$I\rho_d = DP * St \quad \text{II.28.2}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial m} = \frac{1}{V_o} \quad \text{II.28.3}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial V_o} = -\frac{m}{V_o^2} \quad \text{II.28.4}$$

A incerteza de medição da massa ( $I_m$ ) e do volume ( $IV_o$ ) são, respectivamente, 0,01g e 0,05cm<sup>3</sup>.

A tabela II.9 mostra os testes realizados com suas respectivas incertezas. O resultado final foi admitido como a média das medidas.

Tabela II.9 - Avaliação da densidade do óleo éster  $\alpha$ 22E

Medida	Massa [g]	Volume [cm <sup>3</sup> ]	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	$l_{pD}$
1	3,51	3,75	0,94	0,01
2	3,67	3,90	0,94	0,01
3	3,85	4,05	0,95	0,01
4	3,32	3,55	0,94	0,01
5	3,73	3,95	0,94	0,01
6	3,42	3,65	0,94	0,01
7	3,66	3,90	0,94	0,01
8	3,76	4,00	0,94	0,01
9	3,65	3,90	0,94	0,01
10	3,58	3,80	0,94	0,01
$l_{pD} = 0,01$				
Resultado final – Densidade $\pm$ Incerteza [g/cm <sup>3</sup> ] = 0,94 $\pm$ 0,02				

Para os óleos éster  $\alpha$ 10W, RL10H e RL22H seguiu-se o mesmo procedimento descrito anteriormente. Os resultados são mostrados na tabela II.10

Tabela II.10 - Avaliação das densidades dos óleos éster  $\alpha$ 10W, RL22H e RL10H

Óleo éster $\alpha$ 10W				
Medida	Massa [g]	Volume [cm <sup>3</sup> ]	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	$l_{p_p}$
1	3,57	3,85	0,93	0,01
2	3,60	3,85	0,94	0,01
3	3,75	4,05	0,93	0,01
4	3,80	4,10	0,93	0,01
5	3,65	3,95	0,92	0,01
$l_{p_d} = 0,01$				
Resultado final – Densidade $\pm$ Incerteza [g/cm <sup>3</sup> ] = 0,93 $\pm$ 0,02				
Óleo éster RL22H				
Medida	Massa [g]	Volume [cm <sup>3</sup> ]	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	$l_{p_p}$
1	4,05	4,10	0,99	0,01
2	3,97	4,00	0,99	0,01
3	4,07	4,10	0,99	0,01
4	4,09	4,15	0,99	0,01
5	4,04	4,10	0,99	0,01
$l_{p_d} = 0,01$				
Resultado final – Densidade $\pm$ Incerteza [g/cm <sup>3</sup> ] = 0,99 $\pm$ 0,02				
Óleo éster RL10H				
Medida	Massa [g]	Volume [cm <sup>3</sup> ]	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	$l_{p_p}$
1	3,75	3,95	0,95	0,01
2	3,90	4,10	0,95	0,01
3	3,64	3,85	0,95	0,01
4	3,79	4,00	0,95	0,01
5	4,23	4,45	0,95	0,01
$l_{p_d} = 0,01$				
Resultado final – Densidade $\pm$ Incerteza [g/cm <sup>3</sup> ] = 0,95 $\pm$ 0,01				

## **Apêndice III - Medição da Vazão de Nitrogênio através do Tubo Capilar**

As tabelas III.1 a III.3 e a figura III.1 mostram os resultados dos testes de vazão de nitrogênio com o propósito de determinar o diâmetro interno de um tubo capilar de 3999mm de comprimento e 0,600mm de diâmetro nominal (Capilar 1). As pressões utilizadas na entrada do tubo capilar foram de 2,001bar, 2,215bar e 2,399bar.

Tabela III.1 - Vazão de nitrogênio / Pressão de 2,001bar

**Data de execução do teste:** 17/11/1999  
**Diâmetro do tubo capilar:** 0,600 mm  
**Comprimento do tubo capilar:** 3,999 m

**Varred. inicial:** 1                      **Varred. final:** 984

	<b>Média</b>	<b>Desv.Pad</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Dif. Max/Min</b>
<b>Tamb (°C)</b>	22,3	0,070	22,5	22,2	0,3
<b>Prec (bar)</b>	1,077	0,006	1,092	1,067	0,025
<b>PeCap (bar)</b>	2,216	0,179	3,027	1,785	1,242
<b>TeCap (°C)</b>	22,7	0,058	23,0	22,6	0,4
<b>Tirec (°C)</b>	22,3	0,052	22,4	21,8	0,6

**Total varred:** 984                      **Tempo Total:** 1549 s

### Determinação da Vazão no Intervalo de Tempo Escolhido

**Tempo min(s):** 430                      **Lrec min (mm):** 19,62                      **Varred inicial:** 274  
**Tempo max(s):** 560                      **Lrec max (mm):** 32,34                      **Varred final:** 355

**Vazão (l/min):** 0,41                      **Incerteza (l/min):** 0,08                      **Pvm (bar):** 0,03  
**F1**                      0,97  
**F2**                      1,08                      **Vazão corrigida (l/min):** 0,44

### Variáveis no intervalo de Tempo Escolhido

	<b>Média</b>	<b>Desv.Pad</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Dif. Max/Min</b>
<b>Tamb (°C)</b>	22,3	0,008	22,3	22,3	0,0
<b>Prec (bar)</b>	1,072	0,005	1,080	1,069	0,011
<b>PeCap (bar)</b>	2,001	0,012	2,025	1,982	0,043
<b>TeCap (°C)</b>	22,7	0,070	22,8	22,7	0,1
<b>Tirec (°C)</b>	22,3	0,049	22,3	21,8	0,4

Tabela III.2 - Vazão de nitrogênio / Pressão de 2,215bar

Data de execução do teste: 17/11/1999  
 Diâmetro do tubo capilar: 0,600 mm  
 Comprimento do tubo capilar: 3,999 m

Varred. inicial: 1                      Varred. final: 984

	<i>Média</i>	<i>Desv.Pad</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Dif. Max/Min</i>
<i>Tamb (°C)</i>	22,3	0,070	22,5	22,2	0,3
<i>Prec (bar)</i>	1,077	0,006	1,092	1,067	0,025
<i>PeCap (bar)</i>	2,216	0,179	3,027	1,785	1,242
<i>TeCap (°C)</i>	22,7	0,058	23,0	22,6	0,4
<i>Tirec (°C)</i>	22,3	0,052	22,4	21,8	0,6

Total varred: 984                      Tempo Total: 1549 s

#### Determinação da Vazão no Intervalo de Tempo Escolhido

Tempo min(s): 654                      Lrec min (mm): 43,79                      Varred inicial: 415  
 Tempo max(s): 995                      Lrec max (mm): 84,61                      Varred final: 632

Vazão (l/min): 0,51                      Incerteza (l/min): 0,03                      Pvm (bar): 0,03  
 F1                      0,98  
 F2                      1,08                      Vazão corrigida (l/min): 0,54

#### Variáveis no intervalo de Tempo Escolhido

	<i>Média</i>	<i>Desv.Pad</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Dif. Max/Min</i>
<i>Tamb (°C)</i>	22,3	0,023	22,4	22,3	0,1
<i>Prec (bar)</i>	1,079	0,004	1,081	1,070	0,011
<i>PeCap (bar)</i>	2,215	0,014	2,252	2,187	0,065
<i>TeCap (°C)</i>	22,7	0,050	22,8	22,7	0,1
<i>Tirec (°C)</i>	22,3	0,050	22,3	21,8	0,4



Tabela III.3 - Vazão de nitrogênio / Pressão de 2,399bar

Data de execução do teste: 17/11/1999  
 Diâmetro do tubo capilar: 0,600 mm  
 Comprimento do tubo capilar: 3,999 m

Varred. inicial: 1                      Varred. final: 984

	<i>Média</i>	<i>Desv.Pad</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Dif. Max/Min</i>
<i>Tamb (°C)</i>	22,3	0,070	22,5	22,2	0,3
<i>Prec (bar)</i>	1,077	0,006	1,092	1,067	0,025
<i>PeCap (bar)</i>	2,216	0,179	3,027	1,785	1,242
<i>TeCap (°C)</i>	22,7	0,058	23,0	22,6	0,4
<i>Tirec (°C)</i>	22,3	0,052	22,4	21,8	0,6

Total varred: 984                      Tempo Total: 1549 s

#### Determinação da Vazão no Intervalo de Tempo Escolhido

*Tempo min(s)*: 1064                      *Lrec min (mm)*: 94,20                      *Varred inicial*: 675  
*Tempo max(s)*: 1537                      *Lrec max (mm)*: 159,20                      *Varred final*: 975

*Vazão (l/min)*: 0,58                      *Incerteza (l/min)*: 0,02                      *Pvm (bar)*: 0,03  
*F1*                      0,98  
*F2*                      1,08                      *Vazão corrigida (l/min)*: 0,61

#### Variáveis no intervalo de Tempo Escolhido

	<i>Média</i>	<i>Desv.Pad</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Dif. Max/Min</i>
<i>Tamb (°C)</i>	22,4	0,027	22,5	22,4	0,1
<i>Prec (bar)</i>	1,082	0,003	1,092	1,080	0,012
<i>PeCap (bar)</i>	2,399	0,017	2,511	2,306	0,205
<i>TeCap (°C)</i>	22,7	0,029	22,9	22,7	0,2
<i>Tirec (°C)</i>	22,3	0,061	22,3	21,9	0,4

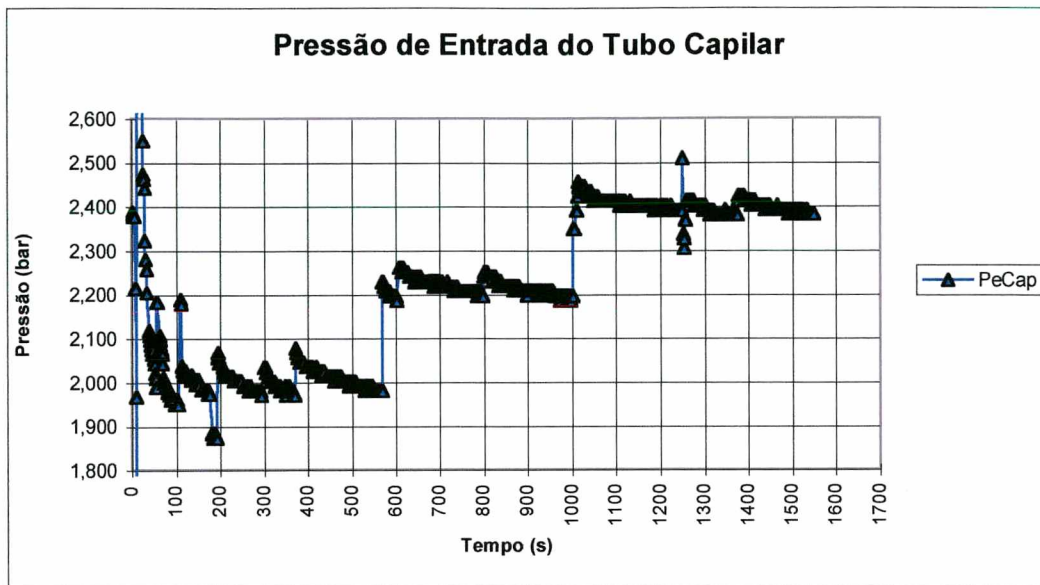


Figura III.1 - Pressão de nitrogênio na entrada do tubo capilar

### **Apêndice IV - Resultados de Três Testes Típicos**

A seguir serão mostrados resultados obtidos em três (3) testes típicos realizados no Capilar 1 para diferentes pressões e subresfriamentos na entrada do tubo capilar.

Teste 1 - cap01teste17 / As linhas tracejadas verticais nos gráficos delimitam os 5 minutos utilizados no processamento.

Tabela IV.1 - Resultados processados no tempo de 1,5 minuto / cap01teste17

<b>cap01teste17 - 1,5 minuto</b>				
	<b>Tempo de gravação de 30 minutos</b>			
<b>18-Jan-00</b>	<b>Média</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Dif. Máx-min.</b>
<b>FMC [kg/h]</b>	1,81	1,81	1,81	0,00
<b>TFMC [°C]</b>	27,7	27,7	27,7	0,0
<b>Trf2 [°C]</b>	26,6	26,6	26,6	0,0
<b>Trf3 [°C]</b>	26,7	26,7	26,7	0,0
<b>boc4 [bar]</b>	9,002	9,004	8,999	0,005
<b>Tsatboc4 [°C]</b>	35,5	35,5	35,5	0,0
<b>boc1 [bar]</b>	1,077	1,089	1,067	0,021
<b>Tsatboc1 [°C]</b>	-24,8	-24,6	-25,0	0,4
<b>boc3 [bar]</b>	0,984	0,992	0,978	0,014
<b>boc5 [bar]</b>	9,187	9,191	9,184	0,007
<b>ST [V]</b>	-1,958	-1,941	-1,991	0,050
<b>TT [°C]</b>	25,8	25,8	25,7	0,1
<b>TextC1 [°C]</b>	PID	PID	PID	PID
<b>Tint1 [°C]</b>	28,2	28,3	28,2	0,1
<b>Text1 [°C]</b>	28,2	28,2	28,2	0,0
<b>T01 [°C]</b>	28,1	28,1	28,1	0,0
<b>T02 [°C]</b>	28,3	28,3	28,2	0,1
<b>T03 [°C]</b>	28,1	28,1	28,1	0,0
<b>T04 [°C]</b>	27,8	27,8	27,8	0,0
<b>T05 [°C]</b>	27,8	27,9	27,8	0,1
<b>T06 [°C]</b>	27,7	27,7	27,6	0,1
<b>T07 [°C]</b>	23,5	23,6	23,5	0,1
<b>T08 [°C]</b>	21,6	21,6	21,6	0,0
<b>T09 [°C]</b>	19,4	19,4	19,4	0,0
<b>T10 [°C]</b>	17,2	17,2	17,1	0,1
<b>T11 [°C]</b>	10,0	10,0	10,0	0,0
<b>T12 [°C]</b>	5,6	5,6	5,6	0,0
<b>T13 [°C]</b>	-6,7	-6,6	-6,8	0,2
<b>TSext [°C]</b>	-25,7	-25,6	-25,8	0,2
<b>TSint [°C]</b>	-27,7	-27,5	-27,9	0,4
<b>TSextC [°C]</b>	-26,5	-26,3	-26,7	0,4
<b>Subresfr [°C]</b>	7,3	7,4	7,3	0,1

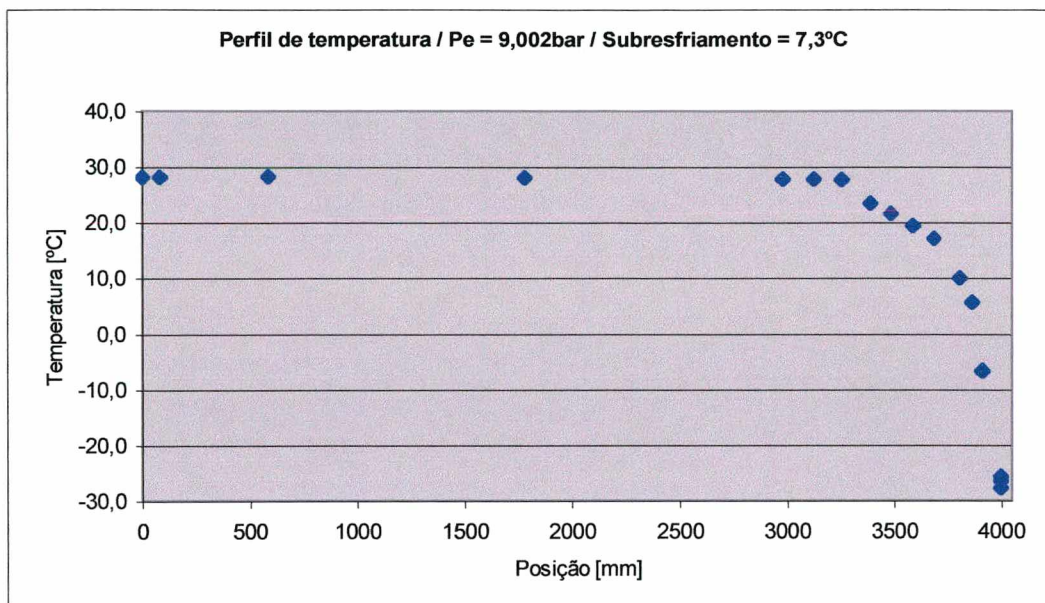


Figura IV.1 - Perfil de temperatura / cap01teste17

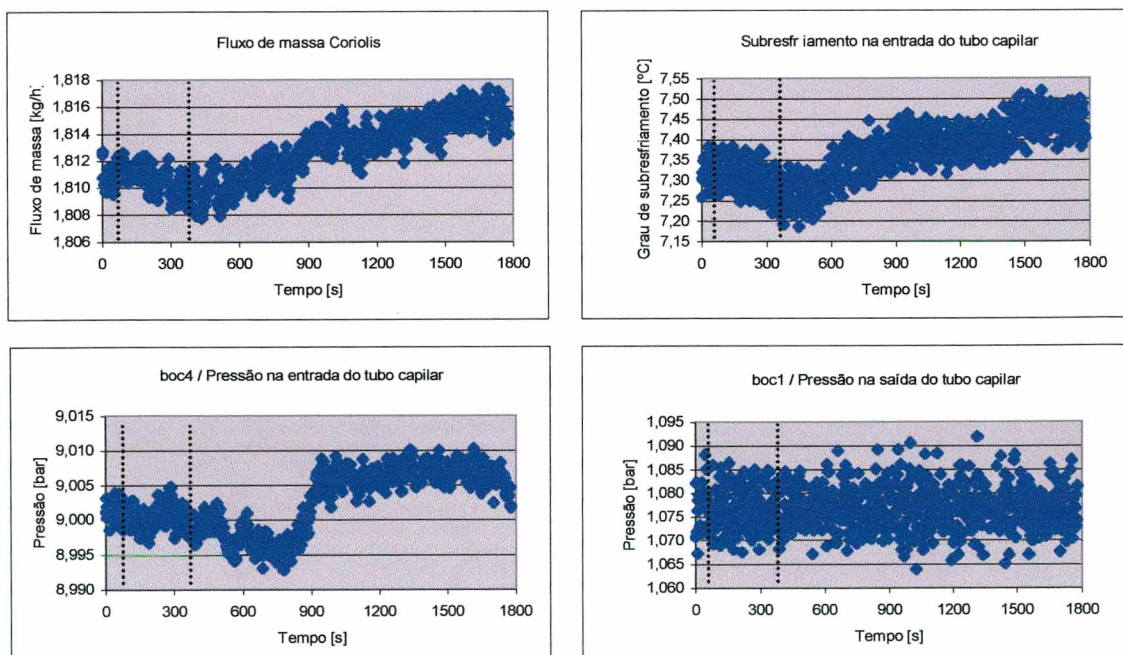


Figura IV.2 - Intervalo de 5 minutos utilizado no processamento / cap01teste17



## Teste 2 - cap01teste22

Tabela IV.2 - Resultados processados no tempo de 1,5 minuto / cap01teste22

<b>cap01teste22 - 1,5 minutos</b>				
	<b>Tempo de gravação de 30 minutos</b>			
<b>20-Jan-00</b>	<b>Média</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Dif. Máx-min.</b>
<b>FMC [kg/h]</b>	2,19	2,19	2,19	0,00
<b>TFMC [°C]</b>	29,9	29,9	29,9	0,0
<b>Trf2 [°C]</b>	26,1	26,1	26,1	0,0
<b>Trf3 [°C]</b>	26,2	26,2	26,2	0,0
<b>boc4 [bar]</b>	11,000	11,004	10,997	0,007
<b>Tsatboc4 [°C]</b>	43,0	43,0	43,0	0,0
<b>boc1 [bar]</b>	1,077	1,088	1,066	0,022
<b>Tsatboc1 [°C]</b>	-24,8	-24,6	-25,0	0,4
<b>boc3 [bar]</b>	0,989	0,997	0,982	0,015
<b>boc5 [bar]</b>	11,203	11,207	11,200	0,007
<b>ST [V]</b>	-1,574	-1,569	-1,581	0,012
<b>TT [°C]</b>	26,8	26,8	26,7	0,1
<b>TextC1 [°C]</b>	PID	PID	PID	PID
<b>Tint1 [°C]</b>	33,0	33,0	32,9	0,1
<b>Text1 [°C]</b>	33,0	33,0	32,9	0,1
<b>T01 [°C]</b>	32,8	32,8	32,8	0,0
<b>T02 [°C]</b>	32,8	32,9	32,8	0,1
<b>T03 [°C]</b>	32,4	32,4	32,4	0,0
<b>T04 [°C]</b>	31,7	31,8	31,7	0,1
<b>T05 [°C]</b>	31,8	31,8	31,8	0,0
<b>T06 [°C]</b>	31,6	31,7	31,6	0,1
<b>T07 [°C]</b>	31,5	31,6	31,5	0,1
<b>T08 [°C]</b>	28,6	28,6	28,6	0,0
<b>T09 [°C]</b>	24,8	24,9	24,8	0,1
<b>T10 [°C]</b>	22,6	22,6	22,6	0,0
<b>T11 [°C]</b>	15,4	15,4	15,4	0,0
<b>T12 [°C]</b>	10,9	10,9	10,8	0,1
<b>T13 [°C]</b>	-1,7	-1,7	-1,8	0,1
<b>TSext [°C]</b>	-25,4	-25,3	-25,5	0,2
<b>TSint [°C]</b>	-27,7	-27,4	-28,0	0,6
<b>TSextC [°C]</b>	-26,6	-26,4	-26,7	0,3
<b>Subresfr [°C]</b>	10,0	10,0	9,9	0,1

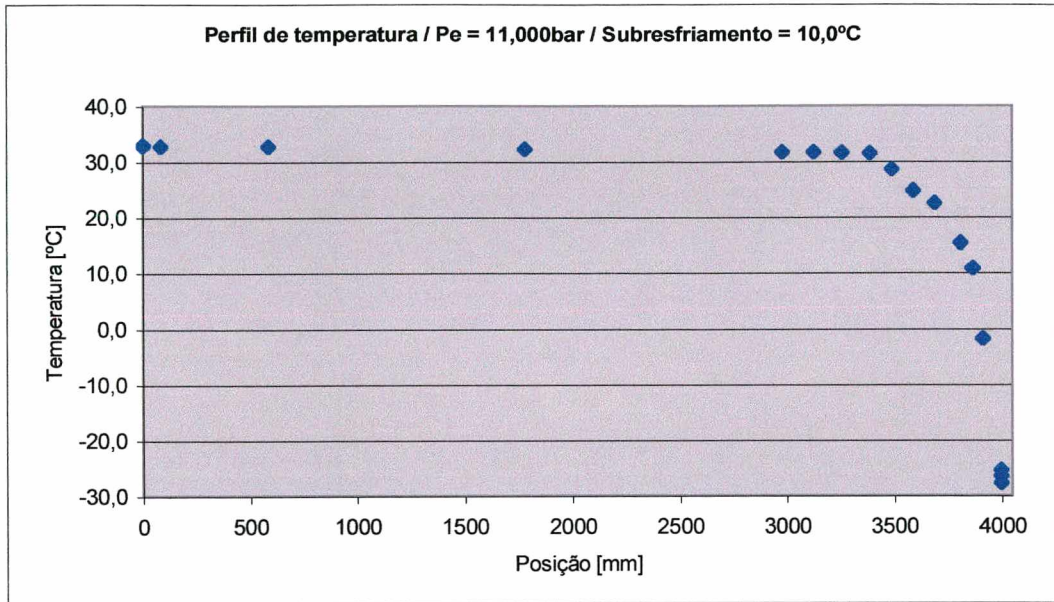


Figura IV.3 - Perfil de temperatura / cap01teste22

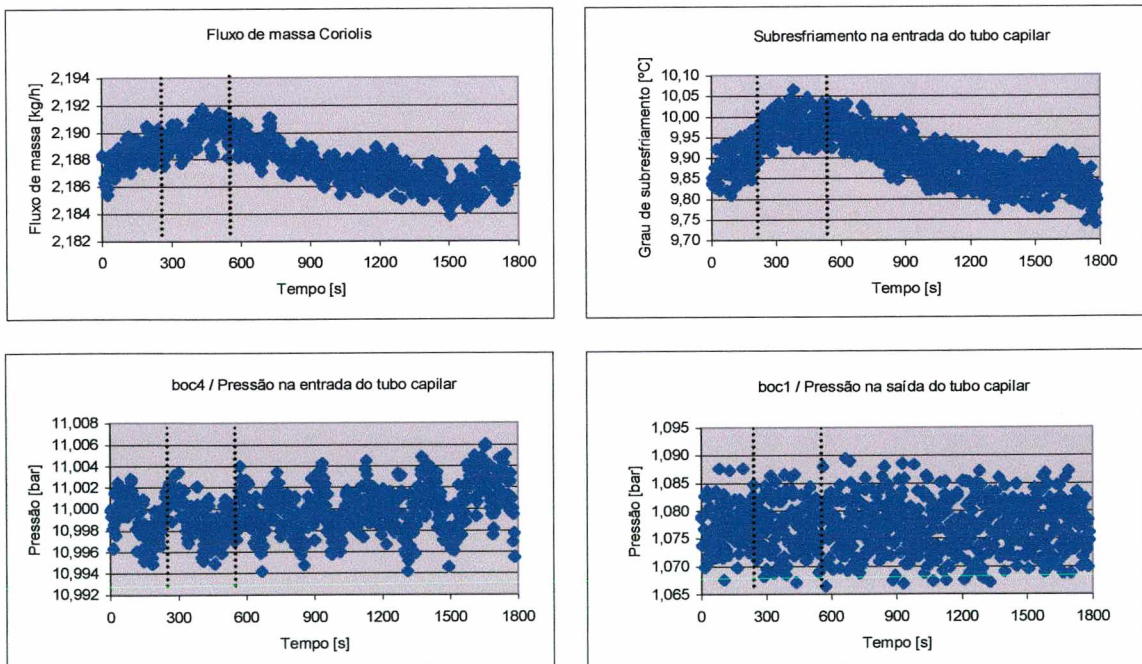


Figura IV.4 - Intervalo de 5 minutos utilizado no processamento / cap01teste22

## Teste 3 - cap01teste26

Tabela IV.3 - Resultados processados no tempo de 1,5 minuto / cap01teste26

<b>cap01teste26 - 1,5 minutos</b>				
	<b>Tempo de gravação de 30 minutos</b>			
<b>24-Jan-00</b>	<b>Média</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Dif. Máx-min.</b>
<b>FMC [kg/h]</b>	2,50	2,51	2,50	0,01
<b>TFMC [°C]</b>	33,6	33,6	33,6	0,0
<b>Trf2 [°C]</b>	27,2	27,2	27,2	0,0
<b>Trf3 [°C]</b>	27,3	27,3	27,3	0,0
<b>boc4 [bar]</b>	14,011	14,018	14,004	0,013
<b>Tsatboc4 [°C]</b>	52,4	52,5	52,4	0,1
<b>boc1 [bar]</b>	1,079	1,091	1,070	0,021
<b>Tsatboc1 [°C]</b>	-24,7	-24,5	-24,9	0,4
<b>boc3 [bar]</b>	1,000	1,007	0,992	0,014
<b>boc5 [bar]</b>	14,234	14,241	14,227	0,014
<b>ST [V]</b>	-1,605	-1,596	-1,620	0,025
<b>TT [°C]</b>	29,5	29,5	29,4	0,1
<b>TextC1 [°C]</b>	42,4	42,5	42,4	0,1
<b>Tint1 [°C]</b>	PID	PID	PID	PID
<b>Text1 [°C]</b>	42,4	42,4	42,3	0,1
<b>T01 [°C]</b>	42,2	42,2	42,1	0,1
<b>T02 [°C]</b>	42,0	42,1	42,0	0,1
<b>T03 [°C]</b>	41,2	41,2	41,1	0,1
<b>T04 [°C]</b>	40,0	40,1	40,0	0,1
<b>T05 [°C]</b>	40,2	40,2	40,1	0,1
<b>T06 [°C]</b>	40,0	40,0	39,9	0,1
<b>T07 [°C]</b>	38,8	38,9	38,8	0,1
<b>T08 [°C]</b>	34,0	34,1	34,0	0,1
<b>T09 [°C]</b>	31,6	31,6	31,6	0,0
<b>T10 [°C]</b>	29,0	29,1	29,0	0,1
<b>T11 [°C]</b>	21,2	21,2	21,2	0,0
<b>T12 [°C]</b>	16,2	16,3	16,2	0,1
<b>T13 [°C]</b>	2,7	2,8	2,7	0,1
<b>TSext [°C]</b>	-25,3	-25,1	-25,4	0,3
<b>TSint [°C]</b>	-27,7	-27,5	-27,9	0,4
<b>TSextC [°C]</b>	-26,5	-26,4	-26,6	0,2
<b>Subresfr [°C]</b>	10,0	10,1	9,9	0,2



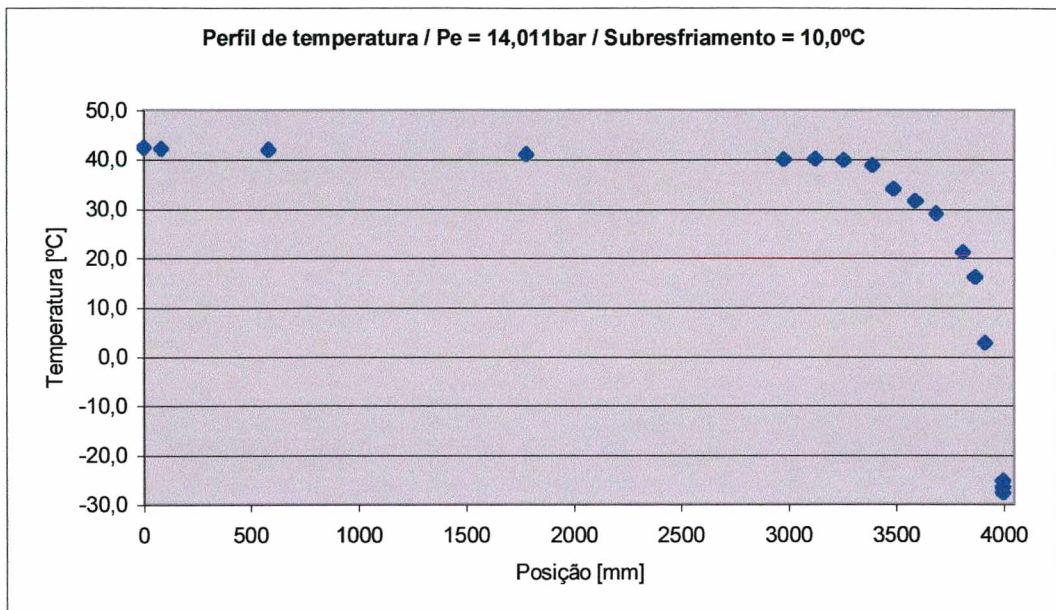


Figura IV.5 - Perfil de temperatura / cap01teste26

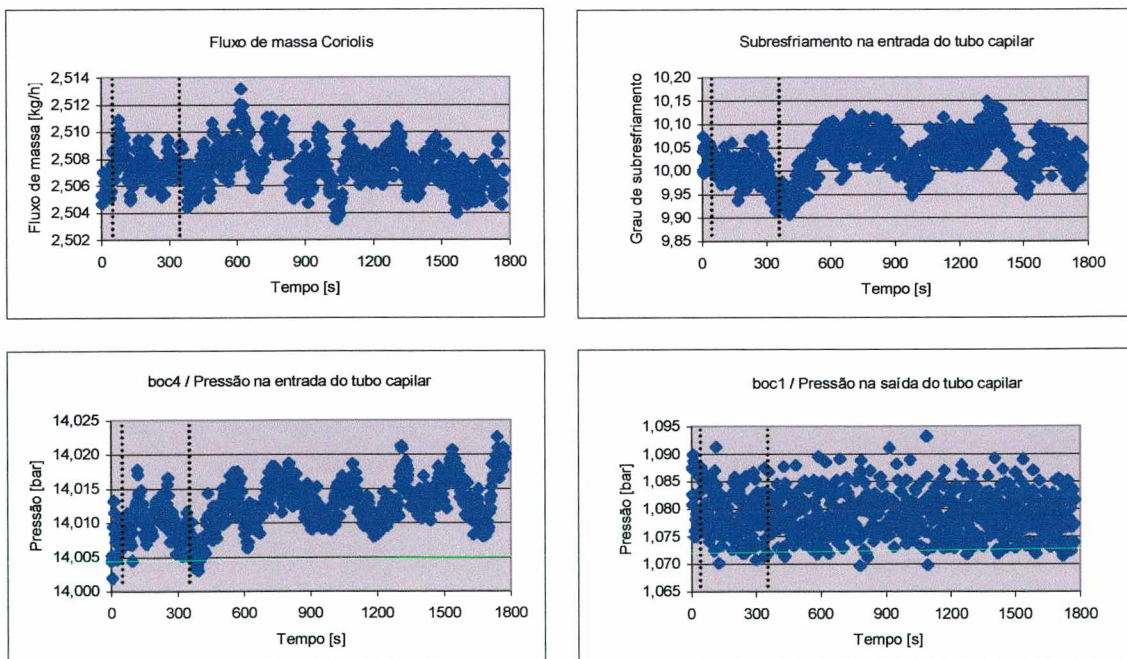


Figura IV.6 - Intervalo de 5 minutos utilizado no processamento / cap01teste26



## **Apêndice V - Pontos de Medição**

As tabelas V.1 e V.2 mostram os pontos de medição no tubo capilar e na bancada de testes.

Tabela V.1 - Instrumentação no tubo capilar

<b>Cód. HP</b>	<b>Cód. Cabos</b>	<b>Canal HP</b>	<b>Posição no tubo capilar [mm]</b>	<b>Designação</b>
Tint 1	02	601	0	Temperatura interna
Text 1	03	602	0	Temperatura externa
Textc1	01	600	0	Temperatura externa colada
T01	04	603	82	Temperatura externa
T02	05	604	586	Temperatura externa
T03	06	605	1780	Temperatura externa
T04	07	606	2979	Temperatura externa
T05	08	607	3125	Temperatura externa
T06	09	608	3257	Temperatura externa
T07	10	609	3388	Temperatura externa
T08	11	610	3487	Temperatura externa
T09	12	611	3588	Temperatura externa
T10	13	612	3687	Temperatura externa
T11	14	613	3812	Temperatura externa
T12	15	614	3868	Temperatura externa
T13	16	615	3914	Temperatura externa
Tsint	18	501	3999	Temperatura interna
Tsxt	17	500	3999	Temperatura externa
Tsxtc	19	502	3999	Temperatura externa colada

Tabela V.2 - Instrumentação na bancada

Pontos de instrumentação ao longo da bancada			
TT	TT	503	Temperatura interna na entrada do medidor turbina
Boc1	-	701	Pressão na saída do tubo capilar
Boc2	-	702	Pressão de sucção do compressor contaminado
Boc3	-	703	Pressão de sucção do compressor não contaminado
Boc4	-	704	Pressão na entrada do tubo capilar
Boc5	-	705	Pressão na entrada do medidor turbina
TFMC	AS2	102	Temperatura no fluxímetro coriolis
FMC	AS1	101	Fluxo de massa no coriolis
QT	ST	100	Vazão turbina

### Códigos dos cabos dos transdutores de pressão

A + → Alimentação dos transdutores (positivo 5V)

S1 + → Sinal do transdutor boc1 (positivo)

S2 + → Sinal do transdutor boc2 (positivo)

S3 + → Sinal do transdutor boc3 (positivo)

S4 + → Sinal do transdutor boc4 (positivo)

S5 + → Sinal do transdutor boc5 (positivo)

V1 + → Alimentação do transdutor boc1 (positivo)

V2 + → Alimentação do transdutor boc2 (positivo)

V3 + → Alimentação do transdutor boc3 (positivo)

V4 + → Alimentação do transdutor boc4 (positivo)

V5 + → Alimentação do transdutor boc5 (positivo)

## **Apêndice VI - Perfil de Temperatura / Funcionamento da Bancada com Dois Compressores Ligados em Série**

As tabelas VI.1 a VI.3 e as figuras VI.1 a VI.3 ilustram respectivamente os resultados dos testes “cap01teste43”, “cap01teste47” e “cap01teste49” na condição de regime estabilizado.

Tabela VI.1 - Condição de regime estabilizado / cap01teste43

cap01teste43 - 1,5 minutos				
Tempo de gravação de 30 minutos				
07-Fev-00	Média	Máximo	Mínimo	Dif. Máx.-mín.
FMC [kg/h]	1,79	1,79	1,79	0,00
TFMC [°C]	27,2	27,3	27,2	0,1
Trf2 [°C]	27,2	27,2	27,2	0,0
Trf3 [°C]	27,3	27,3	27,3	0,0
boc4 [bar]	9,021	9,024	9,018	0,006
Tsatboc4 [°C]	35,6	35,6	35,6	0,0
boc1 [bar]	1,092	1,100	1,084	0,017
Tsatboc1 [°C]	-24,5	-24,3	-24,6	0,3
boc2 [bar]	0,993	0,998	0,987	0,011
boc3 [bar]	1,080	1,083	1,078	0,004
boc5 [bar]	9,209	9,211	9,206	0,005
ST [V]	-2,217	-2,199	-2,234	0,035
TT [°C]	26,0	26,0	26,0	0,0
TextC1 [°C]	PID	PID	PID	PID
Tint1 [°C]	30,4	30,4	30,3	0,1
Text1 [°C]	30,4	30,4	30,3	0,1
T01 [°C]	30,2	30,3	30,2	0,1
T02 [°C]	30,4	30,4	30,4	0,0
T03 [°C]	30,0	30,0	30,0	0,0
T04 [°C]	29,5	29,6	29,5	0,1
T05 [°C]	29,6	29,6	29,5	0,1
T06 [°C]	29,4	29,4	29,4	0,0
T07 [°C]	29,3	29,4	29,3	0,1
T08 [°C]	27,2	27,2	27,2	0,0
T09 [°C]	20,9	20,9	20,9	0,0
T10 [°C]	18,8	18,8	18,7	0,1
T11 [°C]	11,9	11,9	11,8	0,1
T12 [°C]	7,5	7,5	7,4	0,1
T13 [°C]	-4,8	-4,7	-4,8	0,1
TSext [°C]	-25,2	-25,1	-25,3	0,2
TSint [°C]	-27,4	-27,2	-27,5	0,3
TSextC [°C]	-26,1	-26,0	-26,2	0,2
Subresfr [°C]	5,2	5,3	5,2	0,1

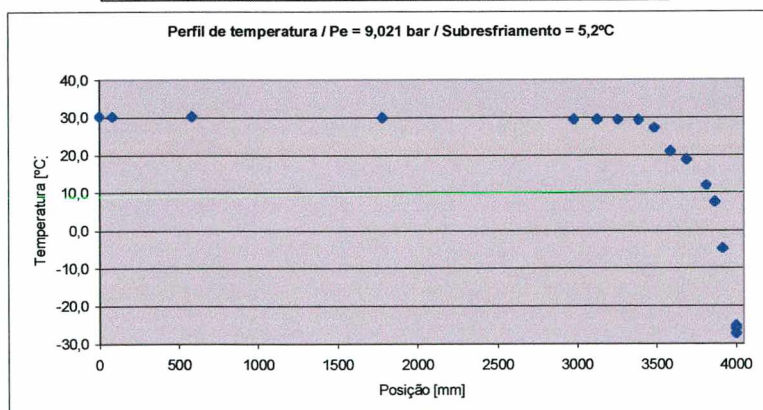


Figura VI.1 - Perfil de temperatura / cap01teste43



Tabela VI.2 - Condição de regime estabilizado / cap01teste47

cap01teste47 - 1,5 minutos				
Tempo de gravação de 30 minutos				
09-Fev-00	Média	Máximo	Mínimo	Dif. Máx-min.
FMC [kg/h]	2,53	2,53	2,52	0,01
TFMC [°C]	32,1	32,1	32,1	0,0
Trf2 [°C]	27,0	27,0	27,0	0,0
Trf3 [°C]	27,1	27,1	27,1	0,0
boc4 [bar]	14,021	14,025	14,018	0,007
Tsatboc4 [°C]	52,5	52,5	52,5	0,0
boc1 [bar]	1,075	1,086	1,066	0,021
Tsatboc1 [°C]	-24,8	-24,6	-25,0	0,4
boc2 [bar]	0,978	0,985	0,972	0,013
boc3 [bar]	1,162	1,165	1,159	0,006
boc5 [bar]	14,247	14,250	14,244	0,006
ST [V]	-3,925	-3,897	-3,960	0,063
TT [°C]	28,7	28,8	28,7	0,1
TextC1 [°C]	PID	PID	PID	PID
Tint1 [°C]	42,4	42,5	42,4	0,1
Text1 [°C]	42,3	42,4	42,3	0,1
T01 [°C]	42,1	42,1	42,1	0,0
T02 [°C]	41,9	42,0	41,9	0,1
T03 [°C]	41,0	41,1	41,0	0,1
T04 [°C]	39,9	39,9	39,8	0,1
T05 [°C]	40,0	40,0	40,0	0,0
T06 [°C]	39,8	39,9	39,8	0,1
T07 [°C]	39,6	39,6	39,6	0,0
T08 [°C]	38,7	38,7	38,7	0,0
T09 [°C]	32,1	32,1	32,0	0,1
T10 [°C]	29,6	29,6	29,6	0,0
T11 [°C]	22,1	22,1	22,0	0,1
T12 [°C]	17,3	17,3	17,2	0,1
T13 [°C]	4,4	4,4	4,4	0,0
TSext [°C]	-25,2	-25,0	-25,3	0,3
TSint [°C]	-27,8	-27,6	-27,9	0,3
TSextC [°C]	-26,5	-26,4	-26,6	0,2
Subresfr [°C]	10,1	10,1	10,0	0,1

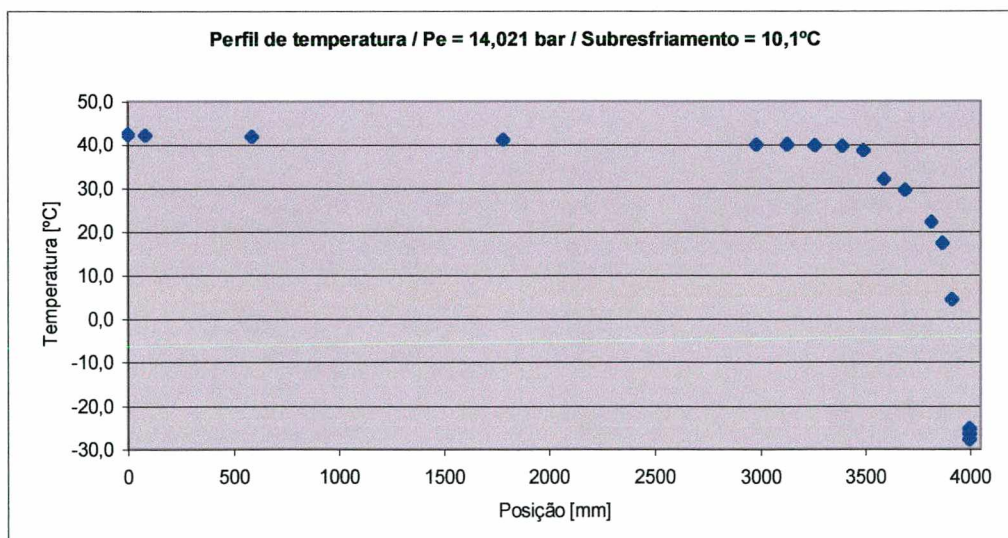


Figura VI.2 - Perfil de temperatura / cap01teste47

Tabela VI.3 - Condição de regime estabilizado / cap01teste49

cap01teste49 - 1,5 minutos				
Tempo de gravação de 30 minutos				
09-Fev-00	Média	Máximo	Mínimo	Dif. Máx-min.
FMC [kg/h]	2,11	2,11	2,11	0,00
TFMC [°C]	29,3	29,3	29,3	0,0
Trf2 [°C]	27,2	27,2	27,2	0,0
Trf3 [°C]	27,3	27,3	27,3	0,0
boc4 [bar]	11,027	11,029	11,023	0,007
Tsatboc4 [°C]	43,1	43,1	43,0	0,1
boc1 [bar]	1,077	1,088	1,070	0,019
Tsatboc1 [°C]	-24,8	-24,5	-24,9	0,4
boc2 [bar]	0,979	0,984	0,975	0,009
boc3 [bar]	1,108	1,112	1,105	0,007
boc5 [bar]	11,229	11,233	11,225	0,008
ST [V]	-3,064	-2,997	-3,133	0,135
TT [°C]	27,2	27,2	27,1	0,1
TextC1 [°C]	PID	PID	PID	PID
Tint1 [°C]	35,6	35,7	35,6	0,1
Text1 [°C]	35,6	35,6	35,5	0,1
T01 [°C]	35,4	35,4	35,3	0,1
T02 [°C]	35,4	35,4	35,3	0,1
T03 [°C]	34,7	34,8	34,7	0,1
T04 [°C]	33,9	34,0	33,9	0,1
T05 [°C]	34,0	34,0	34,0	0,0
T06 [°C]	33,9	33,9	33,8	0,1
T07 [°C]	33,7	33,8	33,7	0,1
T08 [°C]	32,3	32,4	32,3	0,1
T09 [°C]	26,0	26,0	25,9	0,1
T10 [°C]	23,7	23,7	23,6	0,1
T11 [°C]	16,5	16,5	16,4	0,1
T12 [°C]	11,9	12,0	11,9	0,1
T13 [°C]	-0,5	-0,4	-0,5	0,1
TSext [°C]	-25,3	-25,3	-25,4	0,1
TSint [°C]	-27,7	-27,6	-27,9	0,3
TSextC [°C]	-26,4	-26,4	-26,5	0,1
Subresfr [°C]	7,4	7,5	7,4	0,1

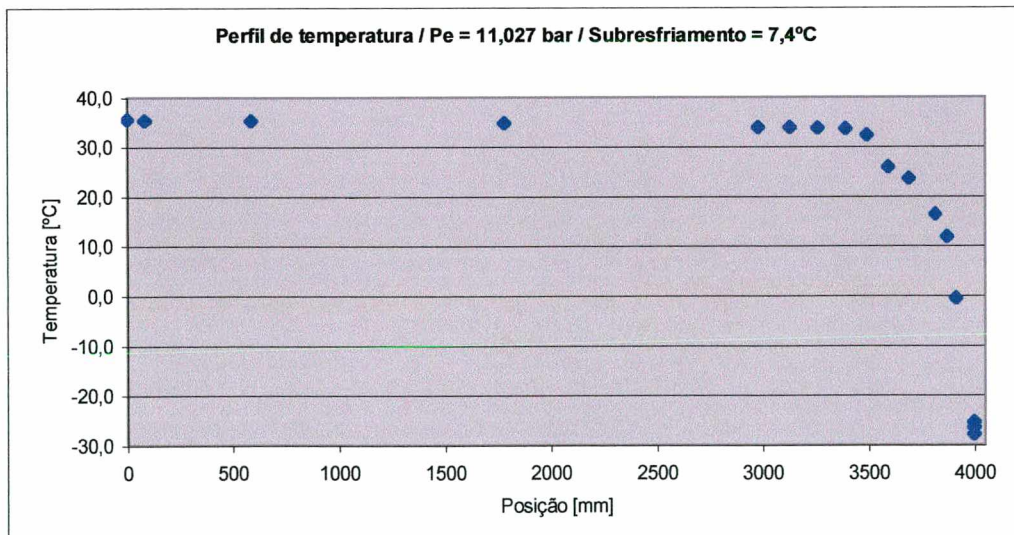


Figura VI.3 - Perfil de temperatura / cap01teste49

## **Apêndice VII - Norma ASHRAE 41.4 (1996) / Concentração de Óleo em Fluido Refrigerante**

### **A - Preparação do cilindro**

A.1 - Lavar o cilindro com solvente para remover qualquer resíduo orgânico.

A.2 - Secar o cilindro num forno com circulação forçada de ar (15 minutos / 150°C).

A.3 - Evacuar o cilindro até uma pressão inferior a 100  $\mu\text{mHg}$  ( $\sim 0,1335\text{mbar}$ ).

A.4 - Resfriar o cilindro na temperatura ambiente.

A.5 - Pesar o cilindro - balança com resolução de 0,1g (W1).

### **B - Amostragem**

B.1 - A massa máxima de fluido refrigerante ( $m_{\text{máx}}$ ) a ser coletada deve ser determinada através da multiplicação do volume do cilindro por 0,8 e pela densidade do fluido refrigerante líquido.

Volume do cilindro  $\cong 50\text{ml}$ .

HFC134a na temperatura de 25°C  $\rightarrow \rho_l = 1206,7\text{kg/m}^3$ .

$m_{\text{máx}} \cong 48,27\text{g}$ .

B.2 - O cilindro deve ser montado num ponto da bancada onde exista apenas fluido refrigerante líquido.

B.3 - Evacuar o cilindro juntamente com a linha de conexão cilindro / bancada.

B.4 - Colocar o cilindro num banho frio.

B.5 - Abrir a válvula do cilindro e a válvula do sistema.

B.6 - Coletar uma massa que ocupe no máximo 80% do volume do cilindro.



B.7 - Fechar as válvulas. Cuidar com sobrepressão devido a formação de vapor com o aumento da temperatura.

B.8 - O tubo de conexão do cilindro à bancada deve ser cuidadosamente desconectado imediatamente após a amostra ter sido retirada para evitar problemas de sobrepressão na linha de líquido.

B.9 - Pesar o cilindro - balança com resolução de 0,1g (W2) – A superfície do cilindro deve estar seca.

### **C - Separação do fluido refrigerante do lubrificante**

C.1 - O cilindro deve ser conectado a um sistema de recuperação de fluido refrigerante.

C.2 - Ajustar a temperatura do cilindro até que a pressão interna seja 0,5bar +0,15bar superior a menor pressão do lado do recuperador.

C.3 - Abrir a válvula lentamente para garantir a passagem apenas de vapor.

C.4 - Conectar o cilindro em uma bomba de vácuo e evacuá-lo até 2,67mbar(2000  $\mu$ mHg).

C.5 - Pesar o cilindro – balança com resolução de 0,1g (W3).

C.6 - Caso  $W3-W1 > 3g$ .

Massa de óleo é  $W3-W1$ .

Concentração na base de fluido refrigerante puro é  $W3-W1/W2-W3$ .

Concentração na base da amostra é  $W3-W1/W2-W1$ .

C.7 - Caso  $W3-W1 < 3g$ .

C.8 - Enxaguar a parede interna do cilindro com solvente para remover qualquer resíduo de lubrificante.

Pentano para óleo mineral e alkylbenzeno.

Acetona para POE e PAG.

Alternativa - Pentano seguido de acetona.



C.9 - Coletar a solução resultante num béquer de 150ml.

C.10 - Utilizar uma placa quente para evaporar o solvente (volume residual entre 10ml e 20ml). A temperatura deve ser controlada para que nenhum lubrificante seja expelido para fora do béquer (ponto de ebulição do solvente é +10°C).

C.11 - A amostra deve ser transferida para um béquer de 50ml, sendo este pré-pesado com uma resolução de 0,0001g (W4).

C.12 - Se a amostra contiver partículas sólidas, esta deve ser filtrada através de um filtro com capacidade de reter partículas de diâmetro maior ou igual a 3mm.

C.13 - Se necessário, o béquer de 150ml e o filtro devem ser lavados com solvente para remover qualquer óleo remanescente.

C.14 - O solvente deverá ser quase completamente evaporado no béquer de 50ml através de uma placa quente ou preferivelmente num forno que provoque a ebulição rápida do solvente mas não expila o lubrificante para fora do béquer.

C.15 - O béquer deverá ser transferido para um forno com ventilação forçada onde será mantido a 121°C por no mínimo 2 horas como forma de remover qualquer solvente remanescente.

C.16 - O béquer deverá ser transferido para um dessecador onde deve permanecer até esfriar.

C.17 - Pesar o béquer com a amostra – balança com resolução de 0,0001g (W5).

Massa de óleo é  $W5-W4$ .

Concentração na base do refrigerante puro é  $W5-W4/W2-W3$ .

Concentração na base da amostra é  $W5-W4/W2-W1$ .

C.18 - A média aritmética de no mínimo (3) três determinações independentes com diferença inferior a 5% é a concentração de lubrificante.

C.19 - A concentração em massa de lubrificante deverá ser expressa como a média mais ou menos três desvio padrão da média ( $\pm 3\sigma$ ).

$$\sigma = \frac{\sqrt{(C_1 - C_{\text{médio}})^2 + (C_2 - C_{\text{médio}})^2 + (C_3 - C_{\text{médio}})^2 + \dots + (C_{na} - C_{\text{médio}})^2}}{\sqrt{na^2 - na}} \quad \text{VII.1}$$

$$C_{\text{médio}} = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_{na}}{na} \quad \text{VII.2}$$

onde :

$\sigma$  - Desvio padrão;

$C_1, C_2, \dots, C_{na}$  - Medida da concentração na amostra 1, 2,..., na;

na - Número de amostras;

$C_{\text{médio}}$  - Média da concentração das "na" amostras.

#### **D - Materiais recomendados pela norma**

D.1 - Cilindro de alta pressão, de aço inoxidável 304 ou alumínio, com válvula agulha. A pressão de ruptura deste cilindro deve ser maior ou igual a (5) cinco vezes a pressão de saturação do fluido refrigerante para uma temperatura de 60°C. O cilindro deve ter um disco de ruptura ou uma válvula de alívio que suporte até a metade da pressão de ruptura.

D.2 - Balança analítica com resolução de 0,0001g.

D.3 - Balança com resolução de 0,01g.

D.4 - Conexões e tubulações compatíveis com a mistura óleo / refrigerante.

D.5 - Placa quente.

D.6 - Forno com ventilação forçada com capacidade de atingir até 150°C.

D.7 - Filtro de papel com capacidade de reter partículas  $\geq 3\mu\text{m}$ .

D.8 - Bequer de 50ml e 150ml.

D.9 - Bomba de vácuo com capacidade de atingir vácuo abaixo de 100  $\mu\text{mHg}$  (~0,1335mbar).

D.10 - Solvente (Pentano ou acetano).

## **Apêndice VIII - Adaptação da Norma para Realização dos Testes Preliminares**

### **A - Preparação do cilindro:**

A.1 - Lavar o cilindro com solvente.

No mínimo dois enxágües. Lavar também as roscas da válvula.



Figura VIII.1 - Cilindro padrão de teste

A.2 - Secar no forno (30 min / 150 °C).

De 5 em 5 minutos abrir a porta do forno por 5 segundos, procedendo aberturas e fechamentos rápidos, com o objetivo de evitar o aumento da concentração de vapor de acetona no interior do forno.

A.3 - Evacuar o cilindro

Chegar a  $2,0 \cdot 10^{-2}$  mbar

A.4 - Aguardar o equilíbrio térmico com o ar da sala de teste (mínimo 1 hora)

A.5 - Evacuar o cilindro ( $< 100\mu\text{m Hg} = 0,1335\text{mbar}$ )

Chegar a  $2,0 \cdot 10^{-2}$  mbar

A.6 - Pesar o cilindro ( $W_1$ ).

Média de no mínimo (3) três medições, sendo que antes de cada medida a balança deve ser zerada.

## B - Amostragem

B.1 - Inserir um volume de óleo retirando o tampão existente em um dos lados do cilindro. Utilizar uma pipeta graduada lavada previamente com acetona.

B.2 - Evacuar o cilindro / Na vertical / Vácuo por cima - válvula agulha.

Chegar entre  $2,0 \cdot 10^{-2}$  a  $3,0 \cdot 10^{-2}$  mbar

B.3 - Pesar o cilindro ( $W_1 + W_{\text{óleo}}$ ).

Média de no mínimo (3) três medições, sendo que antes de cada medida a balança deve ser zerada.

B.4 - Inserir massa de fluido refrigerante através da válvula agulha ( $M_r$ ).

Purgar a mangueira de carga antes de abrir a válvula.

B.5 - Agitar a mistura óleo/fluido refrigerante.

B.6 - Pesar o cilindro. Superfície do cilindro deve estar seca ( $W_2$ ).

Média de no mínimo (3) três medições, sendo que antes de cada medida a balança deve ser zerada.



## C - Separação do fluido refrigerante do óleo

### C.1 - Abrir a válvula do cilindro bem lentamente.

Esta etapa deve ser feita com muito cuidado. A abertura da válvula deve ser extremamente pequena, pois caso contrário, parte do óleo pode sair em forma de névoa (tempo de liberação de  $\pm 2$  hora). A vazão de fluido refrigerante deve ser bem pequena, sendo possível visualizar vapor saindo através da válvula num jato pequeno e lento.

### C.2 - Aguardar o equilíbrio térmico com o ar da sala de teste (mínimo 1 hora).

Caso a superfície do cilindro esteja úmida, secar com papel toalha.

Realizar uma pré-pesagem.

### C.3 - Evacuar o cilindro (até aproximadamente $2,0 \cdot 10^{-2}$ mbar) / Na vertical / pela válvula agulha.

Deve-se adotar o seguinte procedimento:

#### C.3.1 - Evacuar a mangueira de conexão cilindro / bomba de vácuo até $3,0 \cdot 10^{-2}$ mbar.

C.3.2 - Dar uma pequena abertura na válvula agulha de tal maneira que o vácuo fique próximo de  $2,5 \cdot 10^{-1}$  mbar. Manter o vácuo neste valor através de pequenas aberturas seqüenciais na válvula até o instante em que o vácuo começar a ficar abaixo deste valor. A partir deste instante (válvula com abertura considerável), deve-se deixar o vácuo cair até aproximadamente  $5 \cdot 10^{-2}$  mbar e fechar a válvula. Para finalizar deve-se abrir novamente a válvula (abertura considerável) e verificar que a pressão não ultrapassa  $9 \cdot 10^{-2}$  mbar.

### C.4 - Pesar o cilindro (**W<sub>3</sub>**).

Média de no mínimo (3) três medições, sendo que antes de cada medida a balança deve ser zerada.

## **D - Resultados:**

Massa de óleo:  $W_3 - W_1$

Concentração na base de fluido refrigerante puro:  $(W_3 - W_1) / (Mr)$

## **E - Cuidados ao longo da realização do experimento**

→ Evitar ao máximo tocar no cilindro com as mãos ou encostá-lo em alguma superfície suja. Usar sempre papel toalha. Isto também se aplica para as válvulas (corpo e manopla).

→ Zerar a balança antes de qualquer medição

→ Sempre que a zeragem da balança for realizada deve-se aguardar alguns instantes para verificar a ocorrência de eventuais oscilações no valor indicado.

→ Usar a balança sempre com a capela.

→ O resultado da medição de qualquer massa deve ser a média de no mínimo três medições.

→ Durante a medição não se debruçar sobre a mesa de sustentação da balança, nem colocar qualquer objeto sobre a mesma. O mesmo se aplica para a etapa de zeragem.

→ As anotações das medidas não devem ser feitas sobre a mesa de sustentação da balança.

→ Manter a temperatura da sala de teste o mais constante possível (manter o condicionador de ar sempre ligado).

→ Após cada etapa do procedimento de medição, caso o cilindro apresente aumento ou diminuição de temperatura, aguardar no mínimo (1) uma hora para o equilíbrio térmico com o ar da sala de teste.

→ Durante a liberação de fluido refrigerante do cilindro pode ocorrer condensação de vapor d'água na sua superfície externa devido a diminuição de temperatura. Neste caso, deve-se secar o cilindro com papel toalha e aguardar o equilíbrio térmico.

→ Muito cuidado deve ser tomado na liberação do vapor de fluido refrigerante do cilindro, pois caso a abertura da válvula agulha seja demasiada, o óleo sairá junto com o fluido refrigerante. A abertura deve ser extremamente pequena e o processo de liberação lento (em torno de 1 a 2 horas).

→ O anel da torre universal deve estar enrolado com papel toalha para evitar deposição de resíduos do anel no cilindro.



## ***Apêndice IX - Padrão Modificado para Medição da Concentração de Óleo em Fluido Refrigerante***

Os itens "A" (Preparação do cilindro), "C" (Separação do fluido refrigerante do óleo) e "D" (Resultados) são idênticos à metodologia apresentada no apêndice VIII. O item "B" (amostragem) apresenta algumas modificações e será descrito a seguir.

### **B - Amostragem**

B.1 - A massa máxima de fluido refrigerante ( $m_{\text{máx}}$ ) a ser coletada deve ser determinada através da multiplicação do volume do cilindro por 0,8 e pela densidade do fluido refrigerante líquido.

Volume do cilindro  $\cong$  50ml .

HFC134a na temperatura de 25°C  $\rightarrow \rho_l = 1206,7\text{kg/m}^3$ .

$m_{\text{máx}} \cong 48,27\text{g}$ .

B.2 - O cilindro deve ser montado num ponto da bancada onde exista apenas fluido refrigerante líquido.

B.3 - Evacuar a linha de conexão cilindro / bancada. Utilizar uma bifurcação com válvula (enxaguar previamente a bifurcação com acetona).

B.4 - Purgar um trecho igual ou maior a linha de coleta da mistura (utilizar uma extensão de tubo, previamente enxaguada com acetona, na bifurcação).

B.5 - Após a estabilização da bancada, evacuar a linha de conexão cilindro / bancada. Utilizar uma bifurcação com válvula (enxaguar previamente a bifurcação com acetona).

B.6 - Abrir a válvula agulha do cilindro e a válvula do sistema.

B.7 - Coletar uma massa que ocupe no máximo 80% do volume do cilindro.

B.8 - Fechar as válvulas. Cuidar com sobrepressão devido a formação de vapor com o aumento da temperatura.

B.9 - O tubo de conexão do cilindro à bancada deve ser cuidadosamente desconectado imediatamente após a amostra ter sido retirada para evitar problemas de sobrepressão na linha de líquido.

B.10 - Pesar o cilindro - balança com resolução de 0,1g (**W2**) – A superfície do cilindro deve estar seca.

Obs.: Nos itens B.1 e B.7, a carga de fluido refrigerante a ser coletada foi limitada devido a preocupação com o aumento de pressão por aumento de temperatura. Nas coletas a partir da bancada esta limitação não existe pois a temperatura do fluido a ser coletado é sempre maior que a ambiente, logo ocorrerá diminuição de pressão.

## Apêndice X - Fluxo de Massa versus Tempo e Critério de Regime

### Permanente / Dosagem de Óleo

A seguir serão mostradas as figuras que representam a queda do fluxo de massa e o critério de regime permanente para os testes realizados com o Capilar 1 (3999mm de comprimento e 0,600mm de diâmetro nominal).

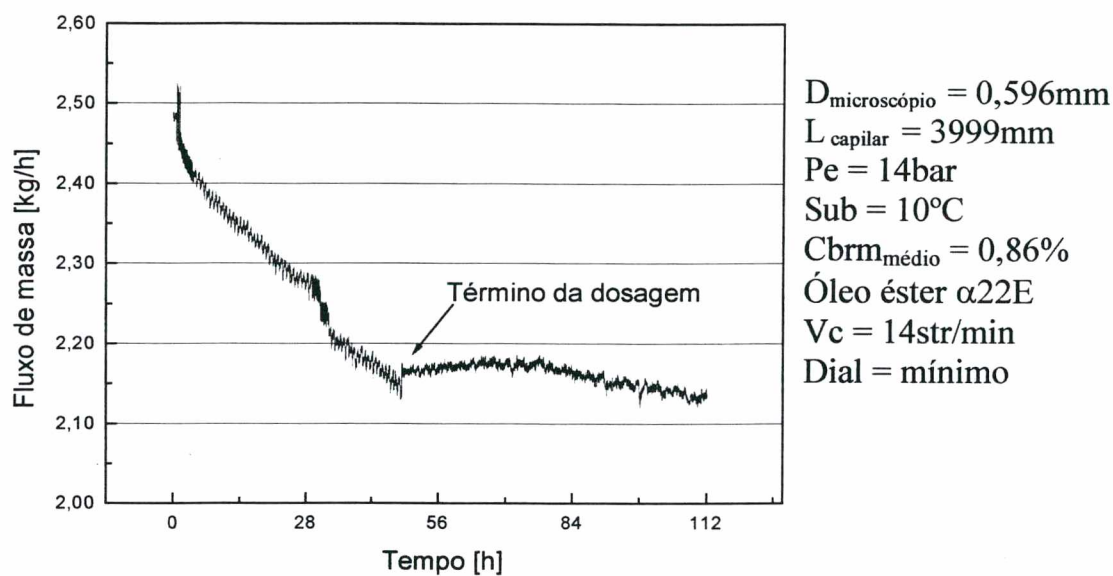


Figura X.1 - Fluxo de massa vs. tempo / teste "cap01teste80"

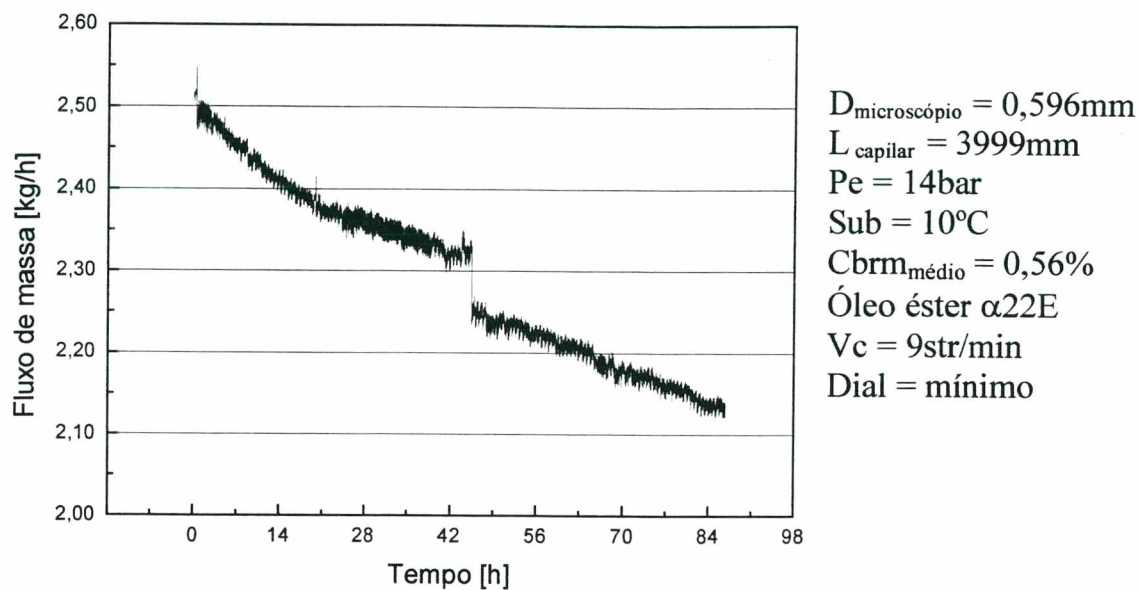


Figura X.2 - Fluxo de massa vs. tempo / teste "cap01teste85"

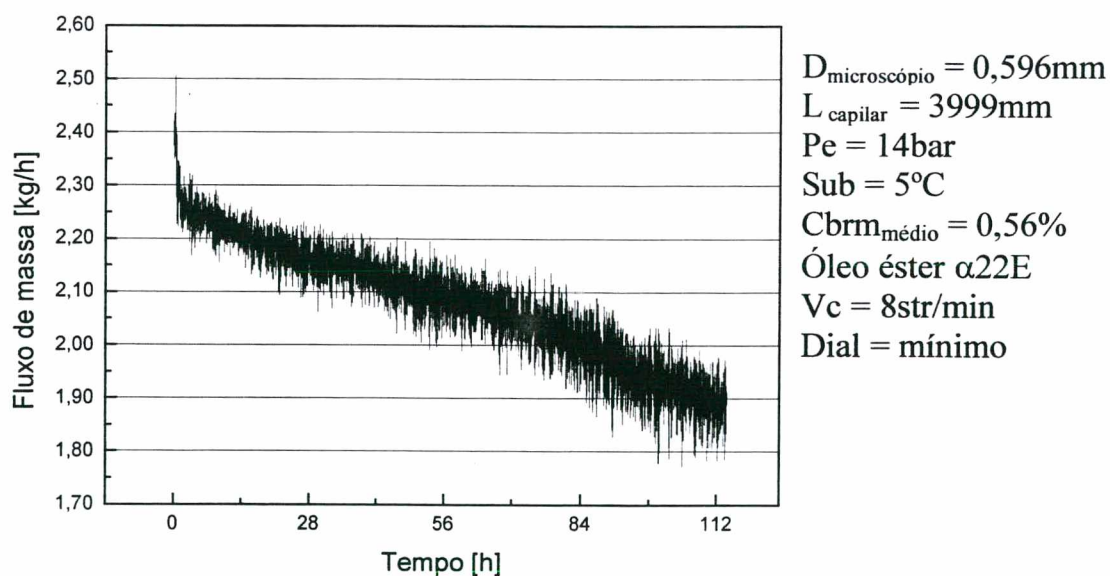


Figura X.3 - Fluxo de massa vs. tempo / teste "cap01teste89"

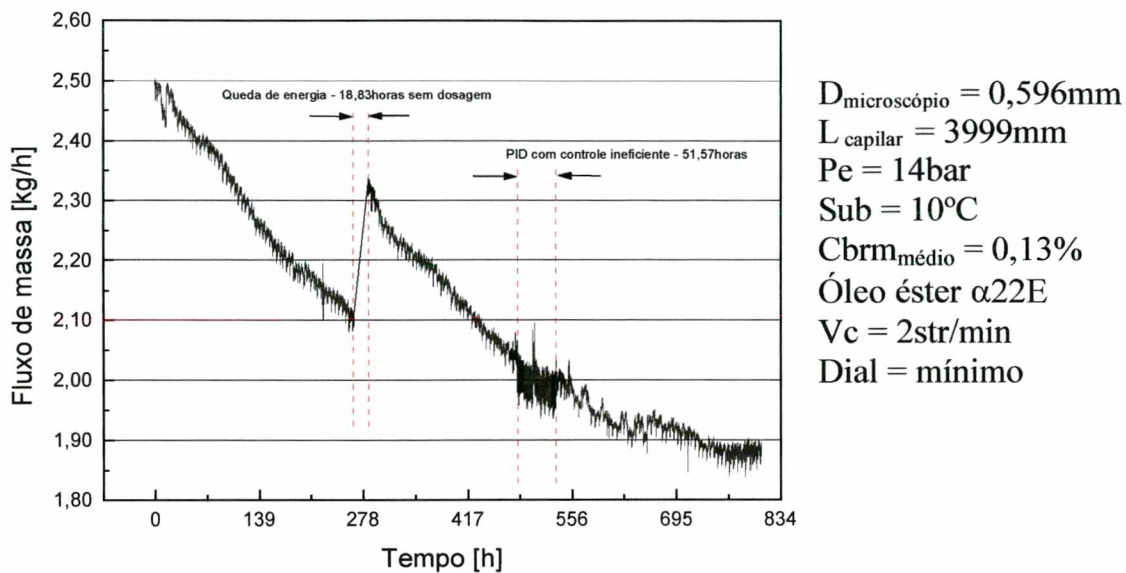


Figura X.4 - Fluxo de massa vs. tempo / teste "cap01teste94" [0,11% a 0,15%] / regime permanente

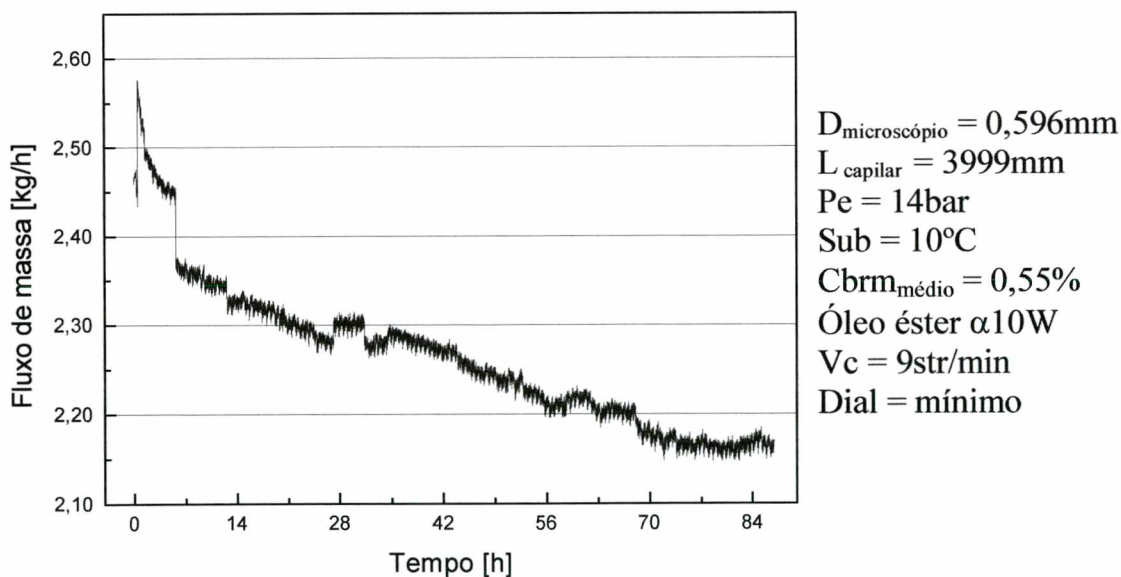


Figura X.5 - Fluxo de massa vs. tempo / teste "cap01teste142"

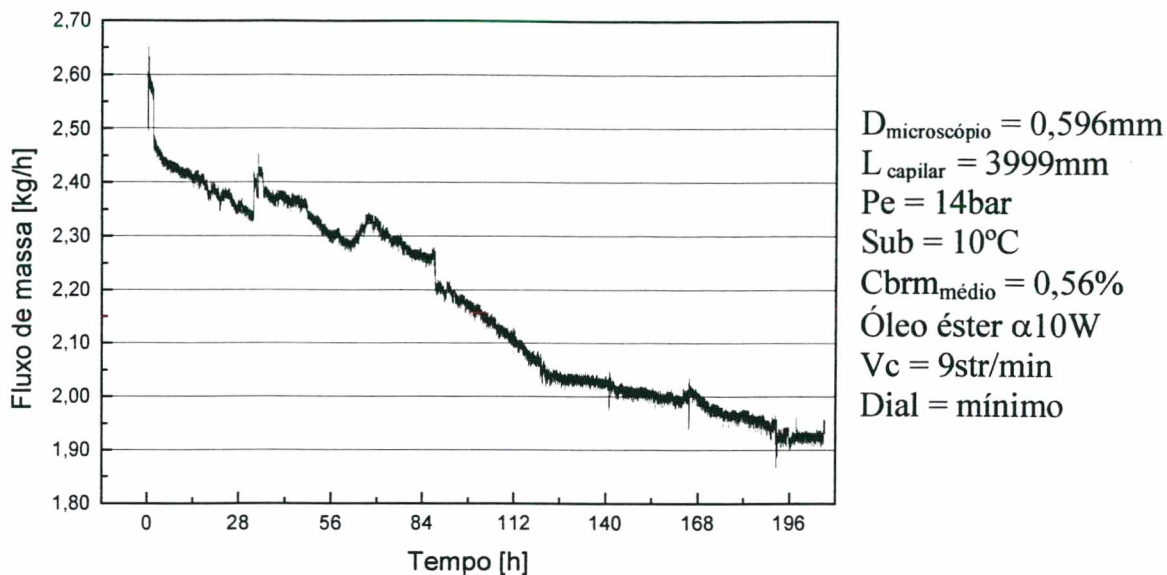


Figura X.6 - Fluxo de massa vs. tempo / teste "cap01teste156" [0,47% a 0,63%] / regime permanente

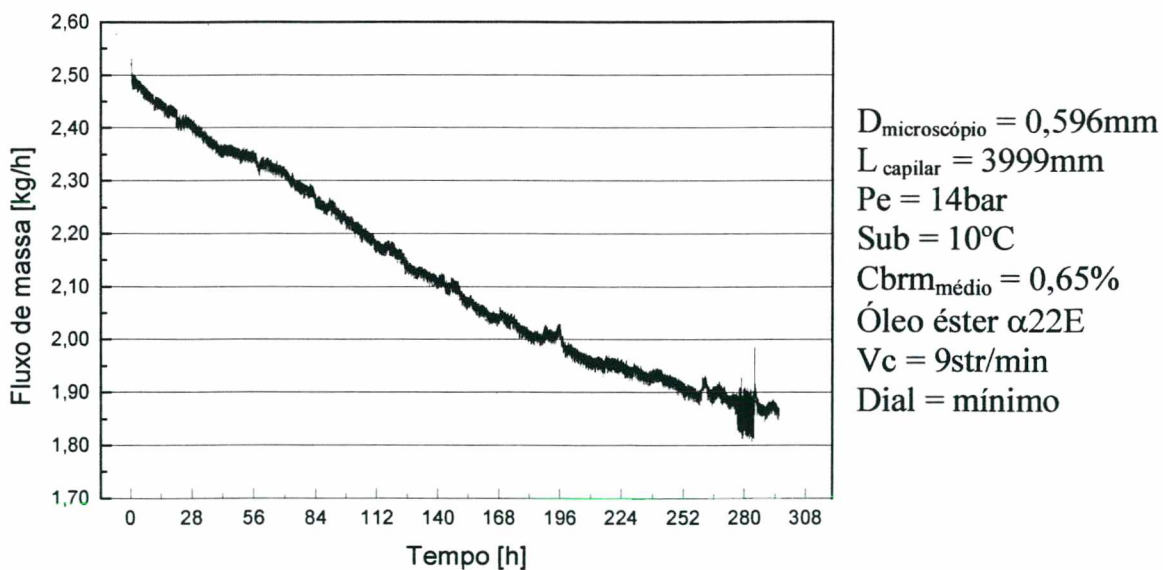


Figura X.7 - Fluxo de massa vs. tempo / teste "cap01teste163" [0,55% a 0,74%] / regime permanente



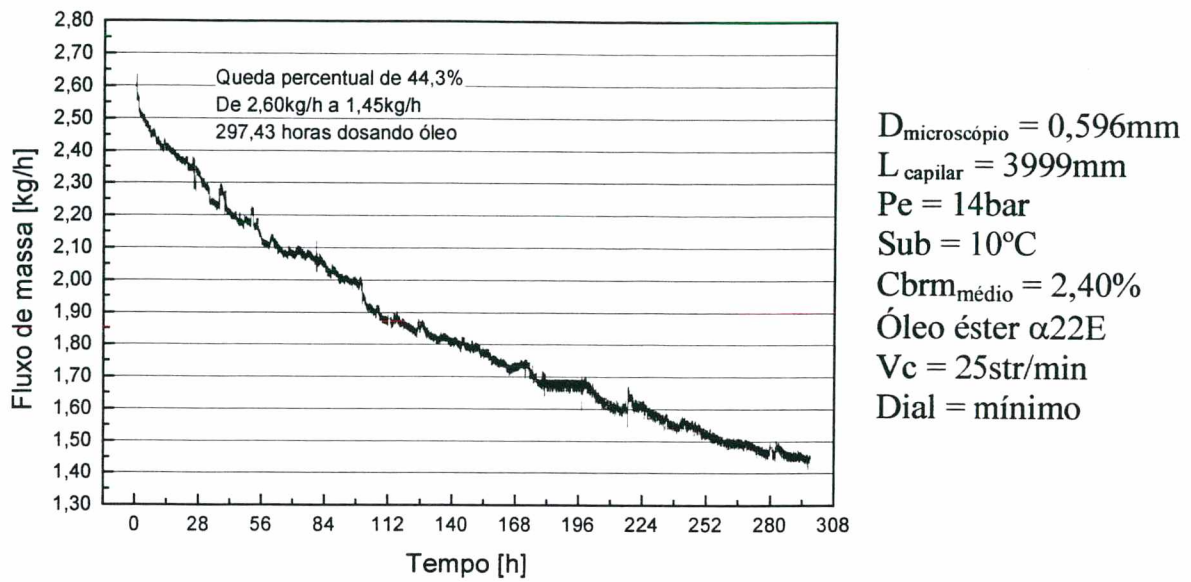


Figura X.8 - Fluxo de massa vs. tempo / teste "cap01teste171" [1,49% a 2,65%] / regime permanente não estabelecido

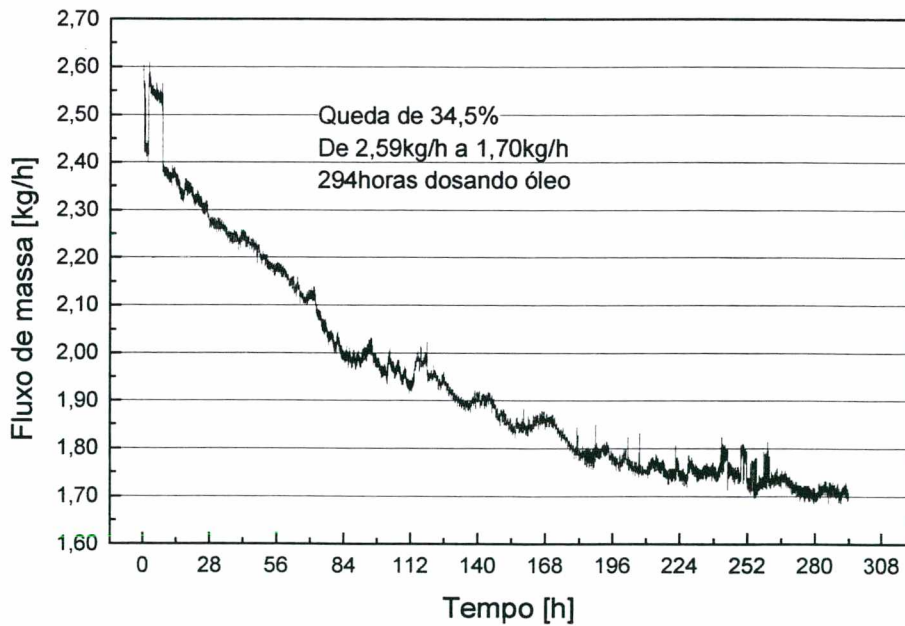


Figura X.9 - Fluxo de massa vs. tempo / teste "cap01teste176" [0,90% a 1,05%] / regime permanente



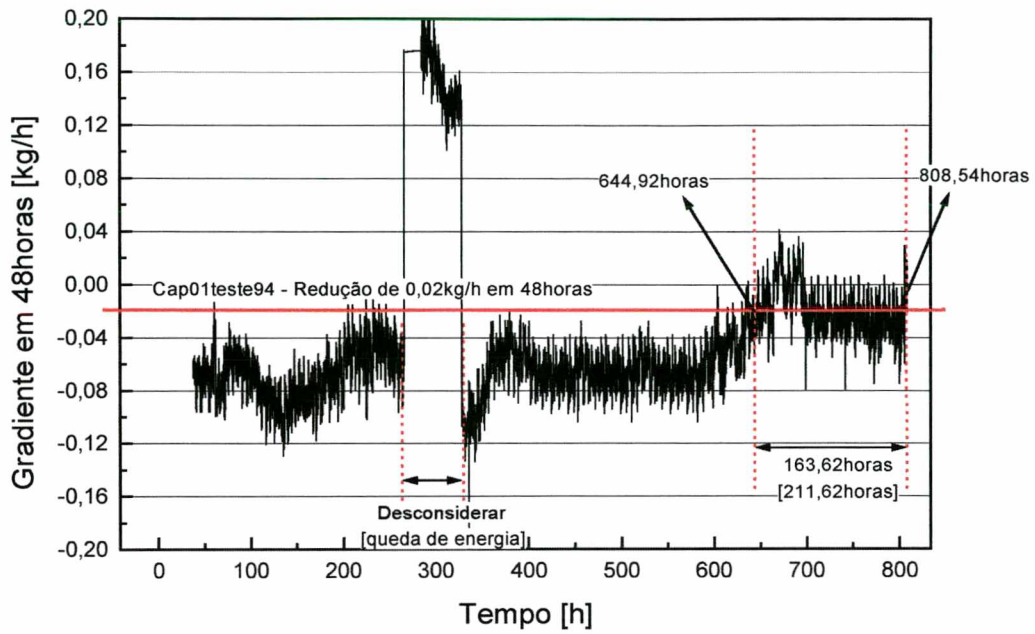


Figura X.10 - Critério de regime permanente / teste “cap01teste94”

[0,11% a 0,15%] -  $\alpha$ 22E

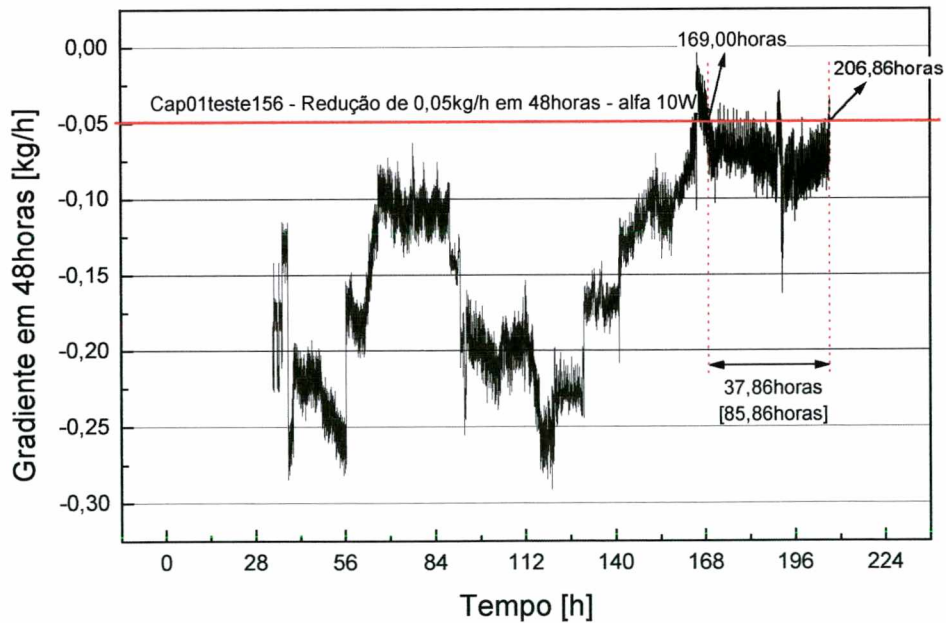


Figura X.11 - Critério de regime permanente / teste “cap01teste156”

[0,47% a 0,63%] -  $\alpha$ 10W

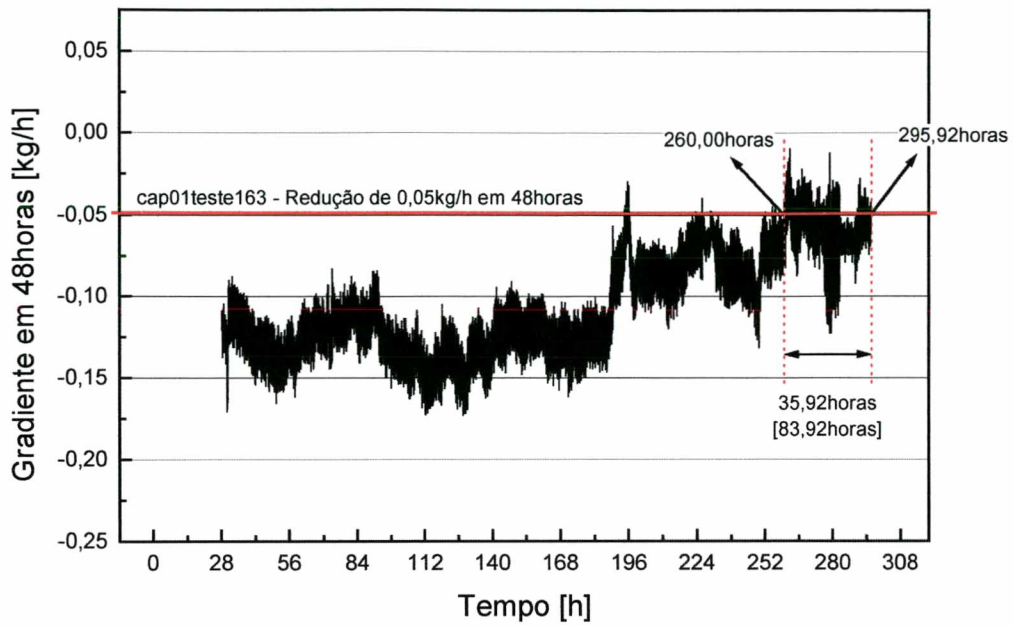


Figura X.12 - Critério de regime permanente / teste “cap01teste163”

[0,55% a 0,74%] -  $\alpha$ 22E

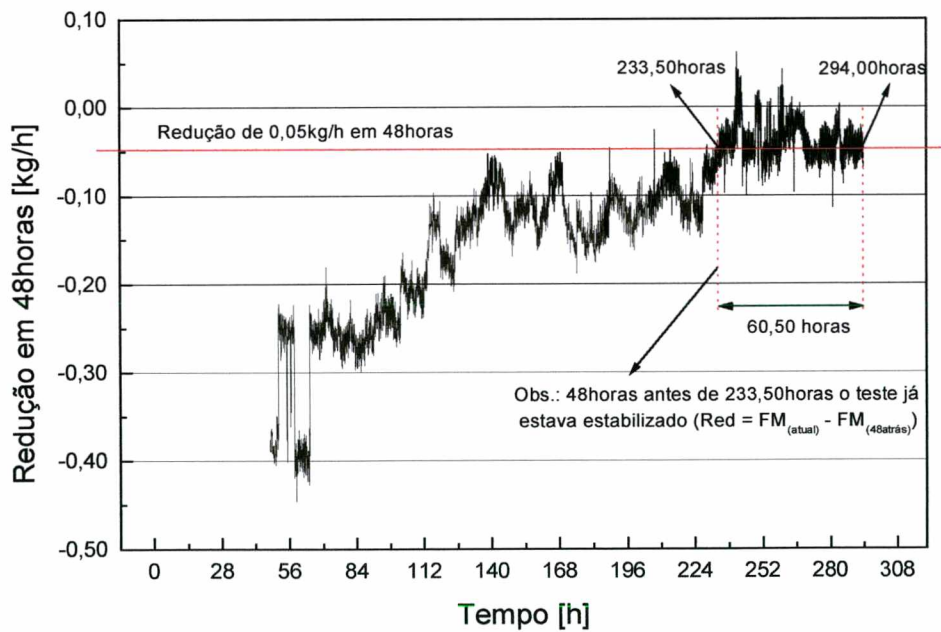


Figura X.13 - Critério de regime permanente / teste “cap01teste176”

[0,90% a 1,05%] -  $\alpha$ 22E

## ***Apêndice XI - Medição da Vazão de Nitrogênio***

A medição da vazão de nitrogênio em tubos capilares tem, na prática de refrigeração, basicamente dois propósitos. O primeiro e mais importante é o de identificar alguma possível obstrução. Identificada a obstrução o procedimento adotado é o de lavar o tubo capilar e analisar as impurezas numa tentativa de entender a causa desta obstrução. Um segundo propósito seria o de especificar um tubo capilar para uma dada aplicação. Isto é complicado pela dificuldade de se estabelecer uma relação direta entre a vazão de nitrogênio e a vazão de fluido refrigerante (CFC12, HFC134a, etc...).

As tabelas XI.1 a XI.10 e as figuras XI.1 a XI.10 mostram as medições da vazão de nitrogênio através do Capilar 1 (diâmetro nominal de 0,6mm e comprimento de 3999mm). Os resultados seguem a seguinte seqüência: teste com tubo capilar limpo, testes com tubo capilar obstruído, testes após 1ª lavagem com CFC11 e testes após 2ª lavagem com CFC11. Detalhes sobre o teste de vazão de nitrogênio em tubos capilares foram apresentados no apêndice II.

Tabela XI.1 - Teste com tubo capilar limpo / desobstruído

Data de execução do teste: 16/11/1999  
 Diâmetro do tubo capilar: 0,600 mm  
 Comprimento do tubo capilar: 3,999 m

Varred. inicial: 1 Varred. final: 259

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	23,0	0,023	23,0	22,9	0,1
Prec (bar)	1,094	0,007	1,111	1,080	0,031
PeCap (bar)	7,909	0,015	8,035	7,838	0,198
TeCap (°C)	23,8	0,019	23,9	23,6	0,3
Tirec (°C)	22,5	0,078	22,7	22,4	0,3

Total varred: 259 Tempo Total: 406 s

Determinação da Vazão no Intervalo de Tempo Escolhido

Tempo min(s): 46 Lrec min (mm): 2,80 Varred inicial: 30  
 Tempo max(s): 406 Lrec max (mm): 219,53 Varred final: 259

Vazão (l/min): 2,55 Incerteza (l/min): 0,06 Pvm (bar): 0,03  
 F1 0,98  
 F2 1,08 Vazão corrigida (l/min): 2,69

Variáveis no intervalo de Tempo Escolhido

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	23,0	0,020	23,0	22,9	0,1
Prec (bar)	1,095	0,006	1,111	1,080	0,031
PeCap (bar)	7,911	0,005	7,924	7,902	0,022
TeCap (°C)	23,8	0,017	23,9	23,8	0,2
Tirec (°C)	22,5	0,082	22,7	22,4	0,3

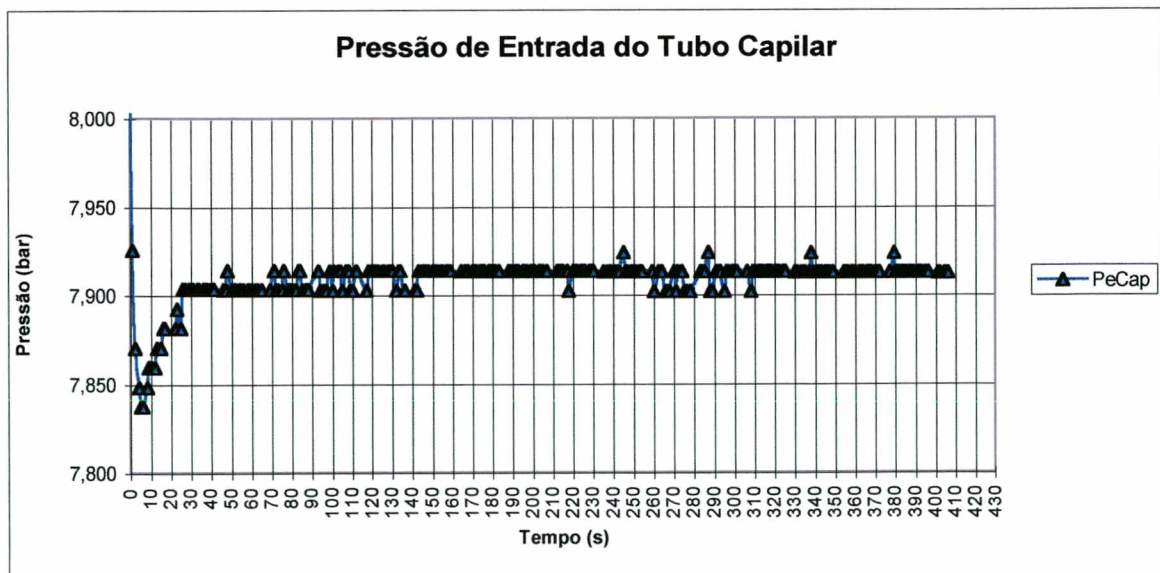


Figura XI.1 - Teste com tubo capilar limpo / desobstruído



Tabela XI.2 - Teste com tubo capilar obstruído / Teste 1

Data de execução do teste: 8/11/2000  
 Diâmetro do tubo capilar: 0,600 mm  
 Comprimento do tubo capilar: 3,999 m

Varred. inicial: 1 Varred. final: 277

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	22,1	0,023	22,1	22,0	0,1
Prec (bar)	1,076	0,008	1,086	1,065	0,021
PeCap (bar)	7,924	0,053	8,536	7,856	0,680
TeCap (°C)	21,3	0,072	21,8	20,6	1,1
Tirec (°C)	22,1	0,233	23,0	21,9	1,1

Total varred: 277 Tempo Total: 434 s

Determinação da Vazão no Intervalo de Tempo Escolhido

Tempo min(s): 41 Lrec min (mm): 0,28 Varred inicial: 26  
 Tempo max(s): 434 Lrec max (mm): 219,86 Varred final: 277  
 Vazão (l/min): 2,37 Incerteza (l/min): 0,06 Pvm (bar): 0,03  
 F1 0,98  
 F2 1,06 Vazão corrigida (l/min): 2,45

Variáveis no intervalo de Tempo Escolhido

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	22,1	0,021	22,1	22,0	0,1
Prec (bar)	1,077	0,007	1,086	1,065	0,021
PeCap (bar)	7,916	0,029	7,999	7,856	0,143
TeCap (°C)	21,3	0,050	21,8	21,2	0,6
Tirec (°C)	22,1	0,092	22,3	21,9	0,4

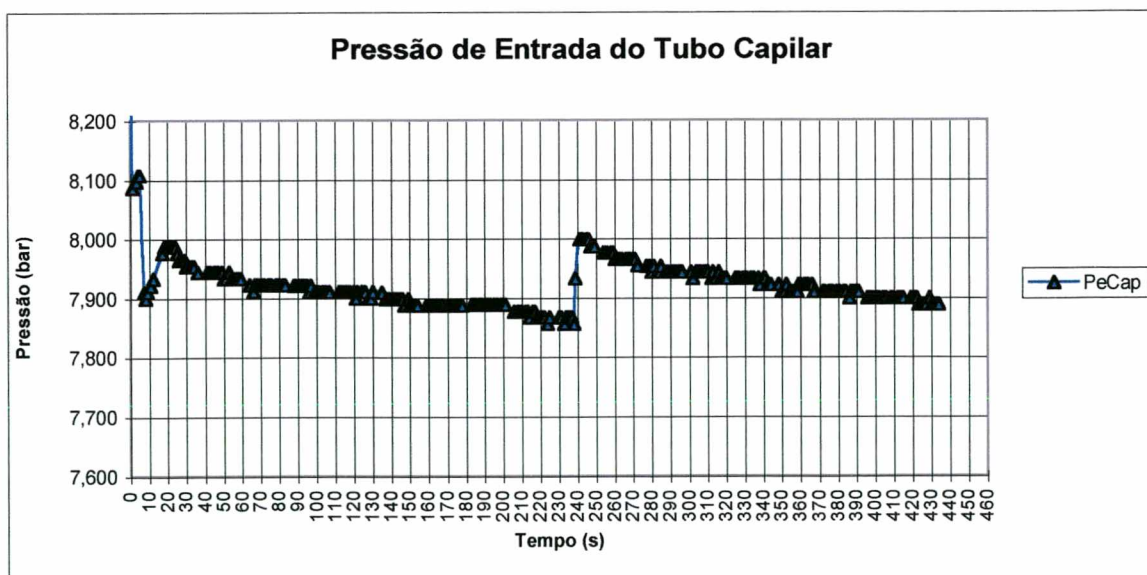


Figura XI.2 - Teste com tubo capilar obstruído / Teste 1

Tabela XI.3 - Teste com tubo capilar obstruído / Teste 2

Data de execução do teste: 8/11/2000  
 Diâmetro do tubo capilar: 0,600 mm  
 Comprimento do tubo capilar: 3,999 m

Varred. inicial: 1 Varred. final: 271

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	22,3	0,024	22,3	22,2	0,1
Prec (bar)	1,076	0,008	1,086	1,055	0,032
PeCap (bar)	7,898	0,025	7,988	7,823	0,165
TeCap (°C)	21,5	0,063	21,8	21,4	0,5
Tirec (°C)	23,2	0,249	24,3	22,8	1,5

Total varred: 271 Tempo Total: 423 s

Determinação da Vazão no Intervalo de Tempo Escolhido

Tempo min(s): 31 Lrec min (mm): 0,01 Varred inicial: 22  
 Tempo max(s): 423 Lrec max (mm): 219,25 Varred final: 269  
 Vazão (l/min): 2,37 Incerteza (l/min): 0,06 Pvm (bar): 0,03  
 F1 0,97  
 F2 1,06 Vazão corrigida (l/min): 2,45

Variáveis no intervalo de Tempo Escolhido

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	22,3	0,022	22,3	22,2	0,1
Prec (bar)	1,076	0,008	1,086	1,055	0,032
PeCap (bar)	7,896	0,019	7,955	7,866	0,088
TeCap (°C)	21,5	0,064	21,8	21,4	0,4
Tirec (°C)	23,1	0,121	23,6	22,8	0,8

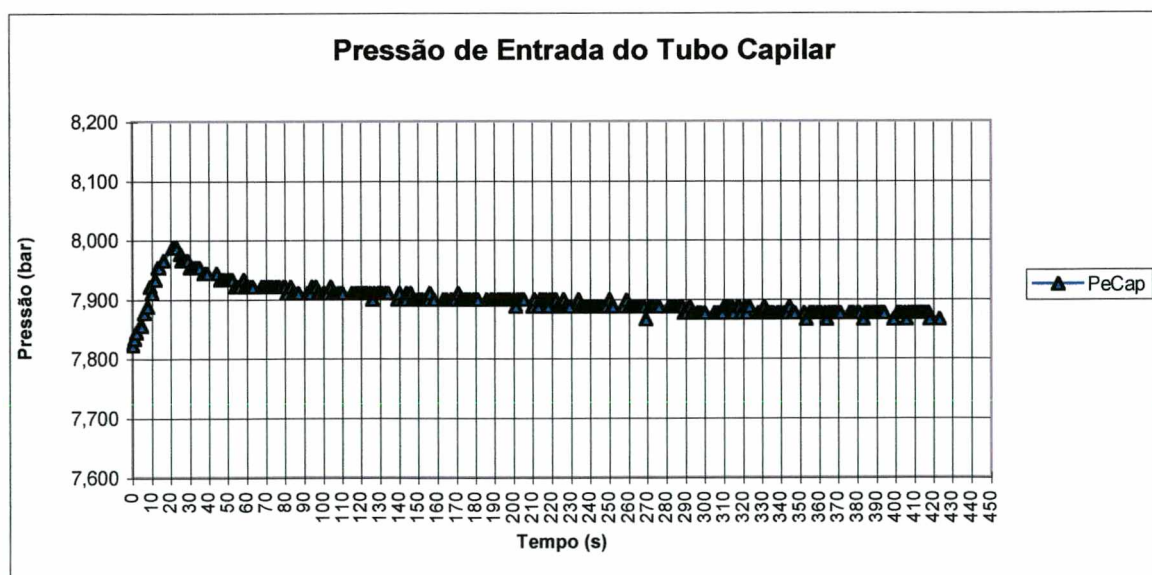


Figura XI.3 - Teste com tubo capilar obstruído / Teste 2

Tabela XI.4 - Teste com tubo capilar obstruído / Teste 3

Data de execução do teste: 8/11/2000  
 Diâmetro do tubo capilar: 0,600 mm  
 Comprimento do tubo capilar: 3,999 m

Varred. inicial: 1 Varred. final: 269

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	22,4	0,034	22,5	22,3	0,1
Prec (bar)	1,075	0,008	1,107	1,055	0,052
PeCap (bar)	7,889	0,025	7,954	7,757	0,197
TeCap (°C)	21,6	0,061	21,9	21,4	0,4
Tirec (°C)	23,4	0,290	24,6	23,0	1,7

Total varred: 269 Tempo Total: 423 s

Determinação da Vazão no Intervalo de Tempo Escolhido

Tempo min(s): 31 Lrec min (mm): 0,17 Varred inicial: 22  
 Tempo max(s): 423 Lrec max (mm): 219,15 Varred final: 269  
 Vazão (l/min): 2,37 Incerteza (l/min): 0,06 Pvm (bar): 0,03  
 F1 0,97  
 F2 1,06 Vazão corrigida (l/min): 2,45

Variáveis no intervalo de Tempo Escolhido

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	22,4	0,030	22,5	22,3	0,1
Prec (bar)	1,076	0,008	1,107	1,055	0,052
PeCap (bar)	7,890	0,015	7,954	7,855	0,099
TeCap (°C)	21,6	0,059	21,9	21,5	0,4
Tirec (°C)	23,4	0,153	24,0	23,0	1,0

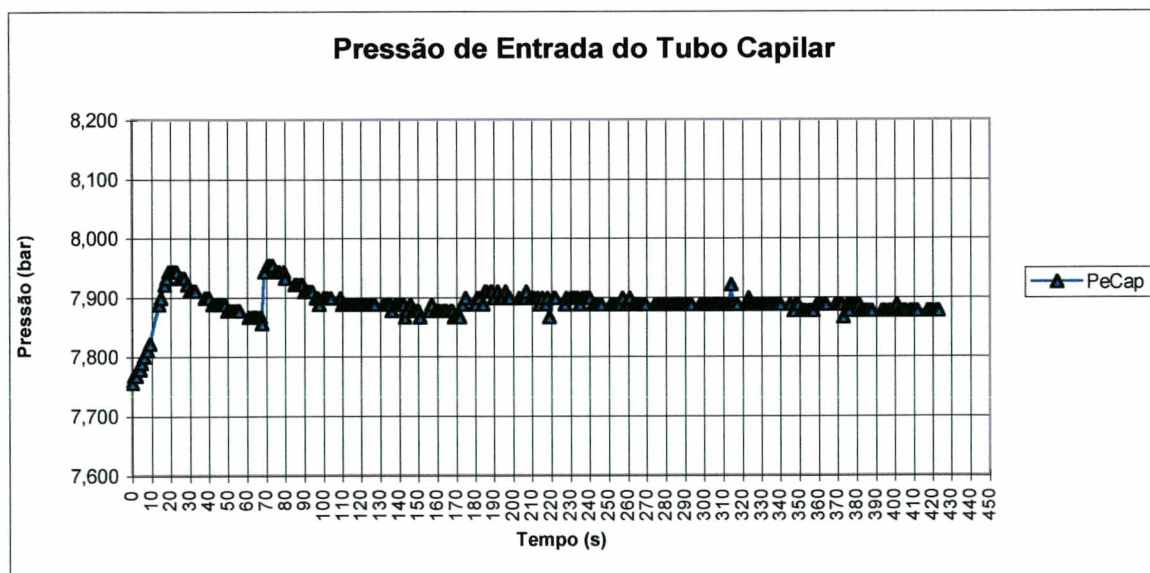


Figura XI.4 - Teste com tubo capilar obstruído / Teste 3



Tabela XI.5 - Teste após 1ª lavagem do tubo capilar / Teste 1

Data de execução do teste: 10/11/2000  
 Diâmetro do tubo capilar: 0,600 mm  
 Comprimento do tubo capilar: 3,999 m

Varred. inicial: 1 Varred. final: 253

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	22,6	0,016	22,6	22,6	0,1
Prec (bar)	1,083	0,006	1,096	1,069	0,027
PeCap (bar)	7,902	0,025	7,993	7,850	0,143
TeCap (°C)	21,9	0,101	22,3	21,8	0,4
Tirec (°C)	22,8	0,154	23,2	22,5	0,7

Total varred: 253 Tempo Total: 396 s

Determinação da Vazão no Intervalo de Tempo Escolhido

Tempo min(s): 107 Lrec min (mm): 49,32 Varred inicial: 69  
 Tempo max(s): 396 Lrec max (mm): 219,80 Varred final: 253  
 Vazão (l/min): 2,50 Incerteza (l/min): 0,06 Pvm (bar): 0,03  
 F1 0,97  
 F2 1,07 Vazão corrigida (l/min): 2,61

Variáveis no intervalo de Tempo Escolhido

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	22,6	0,013	22,6	22,6	0,1
Prec (bar)	1,085	0,004	1,096	1,077	0,019
PeCap (bar)	7,900	0,011	7,926	7,889	0,037
TeCap (°C)	21,9	0,092	22,3	21,8	0,4
Tirec (°C)	22,8	0,117	23,0	22,5	0,4

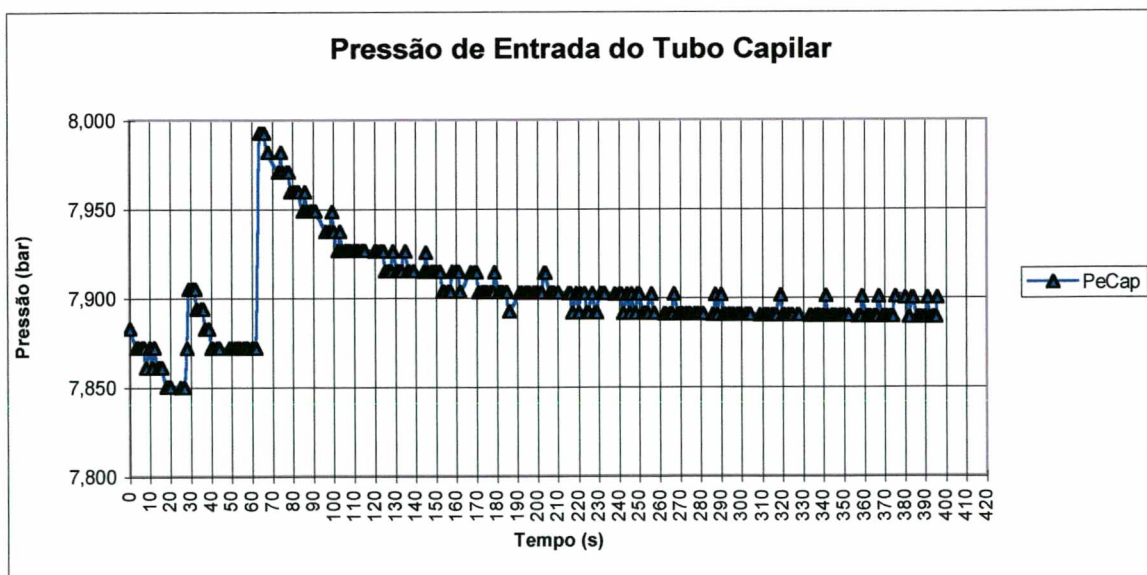


Figura XI.5 - Teste após 1ª lavagem do tubo capilar / Teste 1

Tabela XI.6 - Teste após 1ª lavagem do tubo capilar / Teste 2

Data de execução do teste: 10/11/2000  
 Diâmetro do tubo capilar: 0,600 mm  
 Comprimento do tubo capilar: 3,999 m

Varred. inicial: 1 Varred. final: 255

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	22,2	0,019	22,2	22,2	0,1
Prec (bar)	1,087	0,008	1,104	1,064	0,040
PeCap (bar)	7,893	0,047	8,021	7,778	0,243
TeCap (°C)	22,5	0,144	22,7	22,2	0,5
Tirec (°C)	23,2	0,187	23,8	22,9	0,9

Total varred: 255 Tempo Total: 402 s

Determinação da Vazão no Intervalo de Tempo Escolhido

Tempo min(s): 137 Lrec min (mm): 62,91 Varred inicial: 89  
 Tempo max(s): 402 Lrec max (mm): 219,58 Varred final: 255  
 Vazão (l/min): 2,50 Incerteza (l/min): 0,06 Pvm (bar): 0,03  
 F1 0,97  
 F2 1,08 Vazão corrigida (l/min): 2,62

Variáveis no intervalo de Tempo Escolhido

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	22,2	0,018	22,2	22,2	0,1
Prec (bar)	1,089	0,008	1,104	1,073	0,031
PeCap (bar)	7,881	0,011	7,909	7,863	0,047
TeCap (°C)	22,5	0,143	22,7	22,2	0,5
Tirec (°C)	23,1	0,115	23,2	22,9	0,3

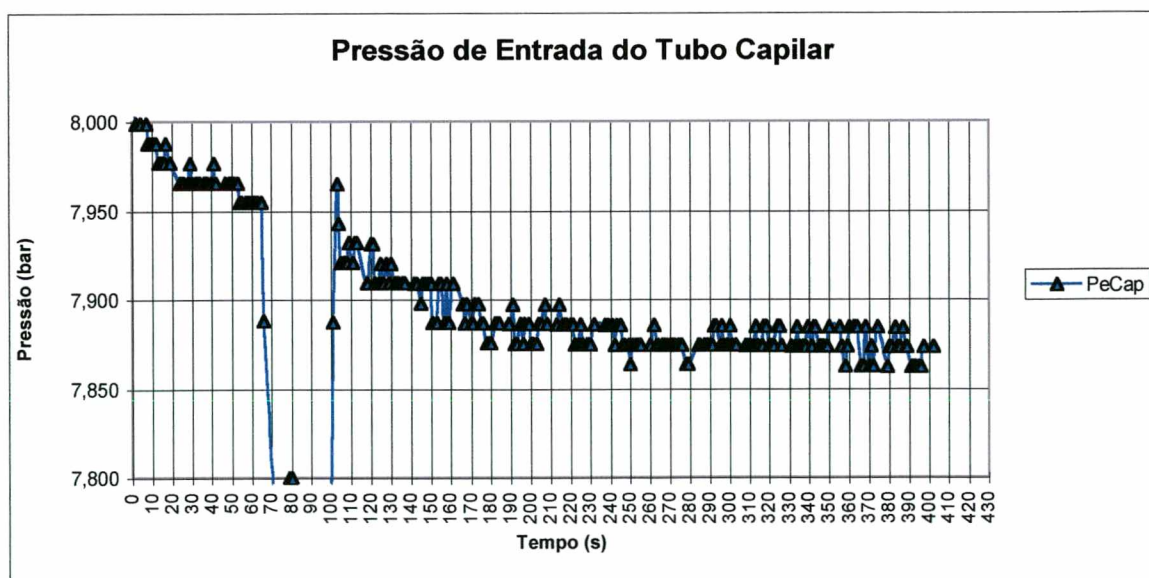


Figura XI.6 - Teste após 1ª lavagem do tubo capilar / Teste 2

Tabela XI.7 - Teste após 1ª lavagem do tubo capilar / Teste 3

Data de execução do teste: 10/11/2000  
 Diâmetro do tubo capilar: 0,600 mm  
 Comprimento do tubo capilar: 3,999 m

Varred. inicial: 1 Varred. final: 291

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	22,6	0,033	22,7	22,6	0,1
Prec (bar)	1,067	0,009	1,089	1,048	0,041
PeCap (bar)	7,968	0,197	8,485	7,874	0,612
TeCap (°C)	22,7	0,132	22,9	22,1	0,7
Tirec (°C)	23,9	0,337	24,7	23,4	1,2

Total varred: 291 Tempo Total: 458 s

Determinação da Vazão no Intervalo de Tempo Escolhido

Tempo min(s): 94 Lrec min (mm): 0,72 Varred inicial: 59  
 Tempo max(s): 458 Lrec max (mm): 219,25 Varred final: 291  
 Vazão (l/min): 2,54 Incerteza (l/min): 0,06 Pvm (bar): 0,03  
 F1 0,97  
 F2 1,06 Vazão corrigida (l/min): 2,61

Variáveis no intervalo de Tempo Escolhido

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	22,7	0,027	22,7	22,6	0,1
Prec (bar)	1,070	0,008	1,089	1,053	0,036
PeCap (bar)	7,890	0,006	7,905	7,874	0,032
TeCap (°C)	22,7	0,083	22,9	22,2	0,7
Tirec (°C)	23,7	0,121	24,1	23,4	0,7

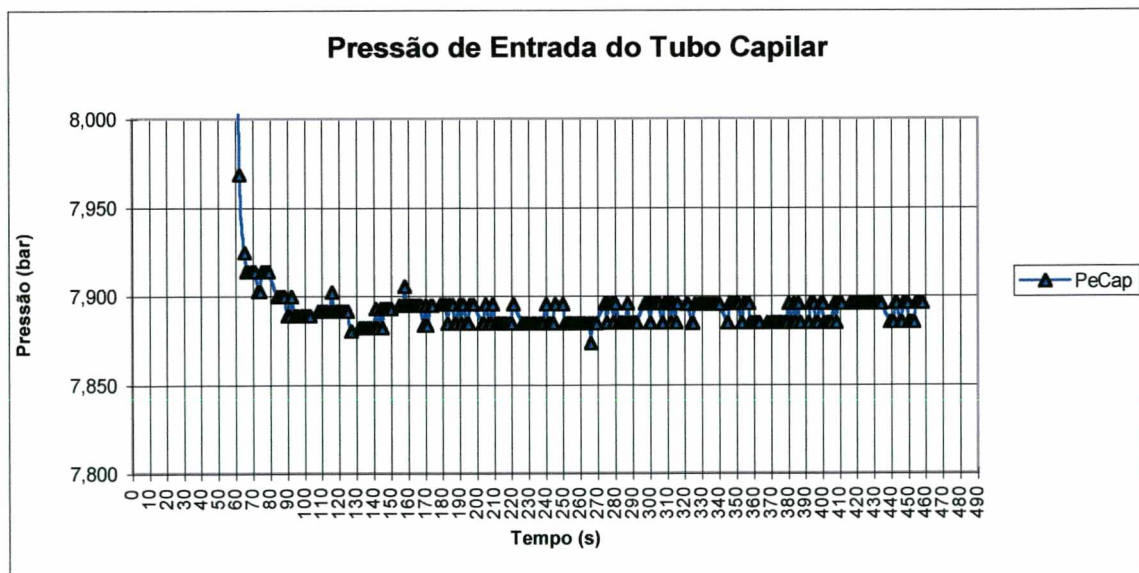


Figura XI.7 - Teste após 1ª lavagem do tubo capilar / Teste 3



Tabela XI.8 - Teste após 2ª lavagem do tubo capilar / Teste 1

Data de execução do teste: 20/11/2000  
 Diâmetro do tubo capilar: 0,600 mm  
 Comprimento do tubo capilar: 3,999 m

Varred. inicial: 1                      Varred. final: 252

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	22,3	0,027	22,3	22,2	0,1
Prec (bar)	1,079	0,007	1,097	1,066	0,031
PeCap (bar)	7,892	0,020	7,964	7,864	0,100
TeCap (°C)	21,1	0,068	21,7	20,7	1,0
Tirec (°C)	22,9	0,237	23,9	22,7	1,2

Total varred: 252                      Tempo Total: 398 s

Determinação da Vazão no Intervalo de Tempo Escolhido

Tempo min(s): 35                      Lrec min (mm): 0,61                      Varred inicial: 24  
 Tempo max(s): 396                      Lrec max (mm): 218,60                      Varred final: 251  
 Vazão (l/min): 2,56                      Incerteza (l/min): 0,06                      Pvm (bar): 0,03  
 F1                      0,97  
 F2                      1,07                      Vazão corrigida (l/min): 2,66

Variáveis no intervalo de Tempo Escolhido

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	22,3	0,024	22,3	22,2	0,1
Prec (bar)	1,081	0,006	1,097	1,066	0,031
PeCap (bar)	7,888	0,014	7,931	7,864	0,067
TeCap (°C)	21,1	0,061	21,7	21,1	0,6
Tirec (°C)	22,8	0,102	23,2	22,7	0,5

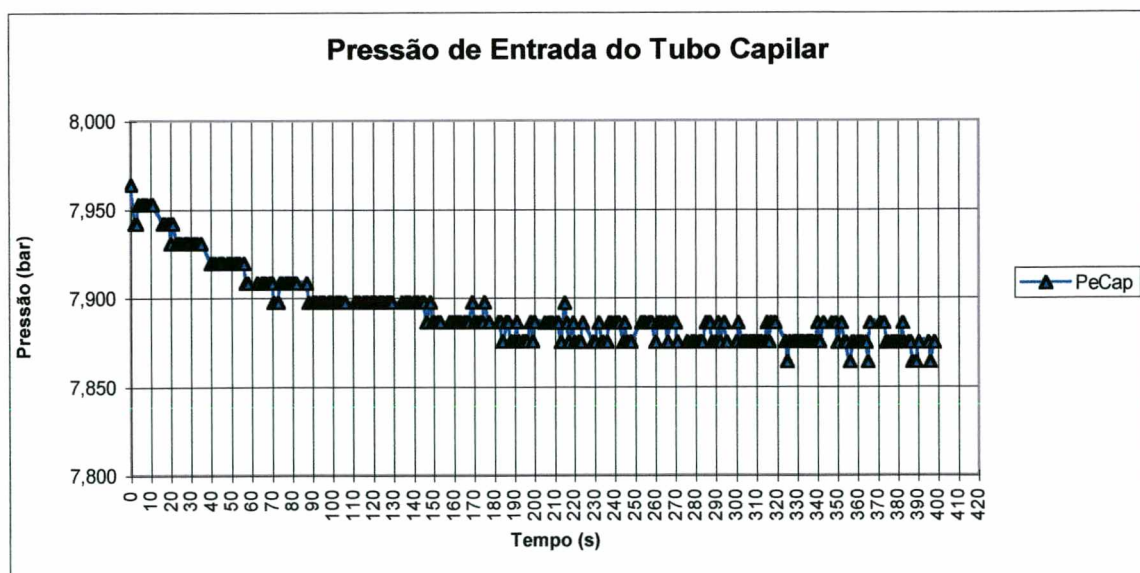


Figura XI.8 - Teste após 2ª lavagem do tubo capilar / Teste 1

Tabela XI.9 - Teste após 2ª lavagem do tubo capilar / Teste 2

Data de execução do teste: 20/11/2000  
 Diâmetro do tubo capilar: 0,600 mm  
 Comprimento do tubo capilar: 3,999 m

Varred. inicial: 1 Varred. final: 251

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	22,6	0,041	22,7	22,5	0,2
Prec (bar)	1,078	0,007	1,095	1,065	0,030
PeCap (bar)	7,906	0,018	7,972	7,882	0,090
TeCap (°C)	21,4	0,079	21,9	20,9	0,9
Tirec (°C)	24,5	0,308	25,8	24,0	1,8

Total varred: 251 Tempo Total: 395 s

Determinação da Vazão no Intervalo de Tempo Escolhido

Tempo min(s): 35 Lrec min (mm): 0,39 Varred inicial: 22  
 Tempo max(s): 394 Lrec max (mm): 218,76 Varred final: 250  
 Vazão (l/min): 2,58 Incerteza (l/min): 0,06 Pvm (bar): 0,03  
 F1 0,97  
 F2 1,07 Vazão corrigida (l/min): 2,67

Variáveis no intervalo de Tempo Escolhido

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	22,6	0,037	22,7	22,6	0,1
Prec (bar)	1,079	0,006	1,095	1,065	0,030
PeCap (bar)	7,901	0,012	7,939	7,882	0,057
TeCap (°C)	21,4	0,073	21,9	21,4	0,5
Tirec (°C)	24,4	0,119	24,7	24,0	0,7

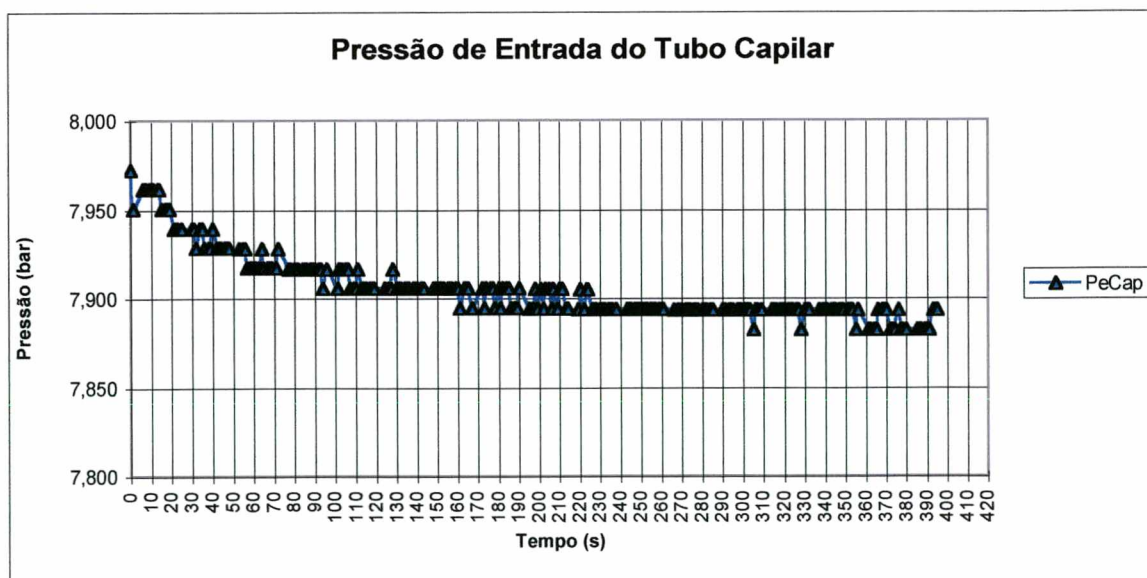


Figura XI.9 - Teste após 2ª lavagem do tubo capilar / Teste 2

Tabela XI.10 - Teste após 2ª lavagem do tubo capilar / Teste 3

Data de execução do teste: 20/11/2000  
 Diâmetro do tubo capilar: 0,600 mm  
 Comprimento do tubo capilar: 3,999 m

Varred. inicial: 1                      Varred. final: 252

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	22,9	0,034	22,9	22,8	0,1
Prec (bar)	1,079	0,007	1,096	1,064	0,032
PeCap (bar)	7,904	0,020	8,003	7,882	0,121
TeCap (°C)	21,4	0,060	21,5	20,8	0,7
Tirec (°C)	24,8	0,342	26,3	24,5	1,8

Total varred: 252                      Tempo Total: 393 s

Determinação da Vazão no Intervalo de Tempo Escolhido

Tempo min(s): 34                      Lrec min (mm): 0,44                      Varred inicial: 24  
 Tempo max(s): 392                      Lrec max (mm): 218,32                      Varred final: 251  
 Vazão (l/min): 2,58                      Incerteza (l/min): 0,06                      Pvm (bar): 0,03  
 F1                      0,97  
 F2                      1,07                      Vazão corrigida (l/min): 2,67

Variáveis no intervalo de Tempo Escolhido

	Média	Desv.Pad	Máximo	Mínimo	Dif. Max/Min
Tamb (°C)	22,9	0,031	22,9	22,8	0,1
Prec (bar)	1,080	0,006	1,096	1,064	0,032
PeCap (bar)	7,900	0,014	7,937	7,882	0,055
TeCap (°C)	21,4	0,049	21,5	21,3	0,3
Tirec (°C)	24,7	0,106	25,3	24,5	0,8

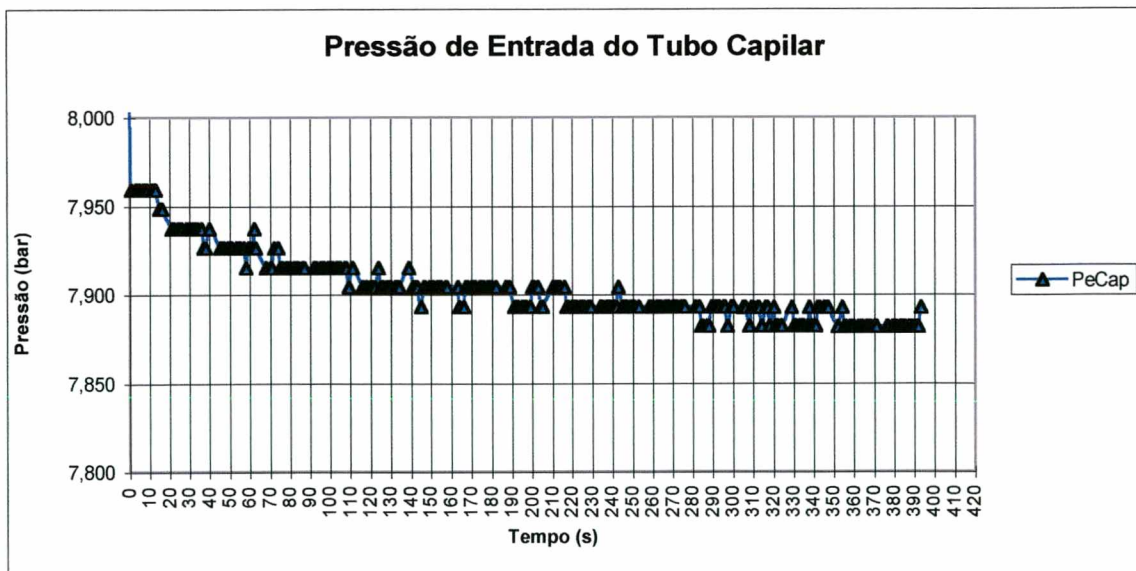


Figura XI.10 - Teste após 2ª lavagem do tubo capilar / Teste 3



## **Apêndice XII - Detalhes da Instrumentação e Montagem dos Tubos Capilares Testados**

As tabelas XII.1 a XII.4 mostram o posicionamento dos termopares instalados ao longo dos tubos capilares. A distância das soldas das conexões de entrada e saída dos tubos capilares em relação à extremidade também é mostrada neste apêndice.

**Capilar 2** - Diâmetro nominal de 0,790mm e comprimento de 3994mm

### **Montagem do tubo capilar**

Solda na conexão de entrada do tubo capilar a 80,6mm

Solda na conexão de saída do tubo capilar a 84,0mm

Tabela XII.1 - Instrumentação do Capilar 2

Cód. HP	Cód. cabos	Canal HP	Posição [mm]
Text 1	03	602	0
T01	04	603	86
T02	05	604	590
T03	06	605	1784
T04	07	606	2982
T05	08	607	3127
T06	09	608	3260
T07	10	609	3389
T08	11	610	3489
T09	12	611	3591
T10	13	612	3690
T11	14	613	3809
T12	15	614	3866
T13	16	615	3909
Tsint	18	501	3994
Tsxt	17	500	3994
Tsxtc	19	502	3994

**Capilar 3 - Diâmetro nominal de 0,570mm e comprimento de 4000mm**

**Montagem do tubo capilar**

Solda na conexão de entrada do tubo capilar a 80,7mm

Solda na conexão de saída do tubo capilar a 83,6mm

Tabela XII.2 - Instrumentação do Capilar 3

Cód. HP	Cód. cabos	Canal HP	Posição [mm]
Text 1	03	602	0
T01	04	603	83
T02	05	604	589
T03	06	605	1784
T04	07	606	2920
T05	08	607	3127
T06	09	608	3261
T07	10	609	3389
T08	11	610	3490
T09	12	611	3592
T10	13	612	3691
T11	14	613	3811
T12	15	614	3867
T13	16	615	3913
Tsint	18	501	4000
Tsext	17	500	4000
Tsextc	19	502	4000

**Capilar 4** - Diâmetro nominal de 0,570mm e comprimento de 3008mm

**Montagem do tubo capilar**

Solda na conexão de entrada do tubo capilar a 81,0mm

Solda na conexão de saída do tubo capilar a 83,0mm

Tabela XII.3 - Instrumentação do Capilar 4

Cód. HP	Cód. cabos	Canal HP	Posição [mm]
Text 1	03	602	0
T01	04	603	84
T02	05	604	653
T03	06	605	1064
T04	07	606	1658
T05	08	607	2013
T06	09	608	2207
T07	10	609	2297
T08	11	610	2457
T09	12	611	2571
T10	13	612	2697
T11	14	613	2796
T12	15	614	2842
T13	16	615	2924
Tsint	18	501	3008
Tsext	17	500	3008
Tsextc	19	502	3008

**Capilar 5 - Diâmetro nominal de 0,790mm e comprimento de 3008mm**

**Montagem do tubo capilar**

Solda na conexão de entrada do tubo capilar a 80,4mm

Solda na conexão de saída do tubo capilar a 83,3mm

Tabela XII.4 - Instrumentação do Capilar 5

Cód. HP	Cód. cabos	Canal HP	Posição [mm]
Text 1	03	602	0
T01	04	603	84
T02	05	604	646
T03	06	605	1056
T04	07	606	1650
T05	08	607	2005
T06	09	608	2199
T07	10	609	2288
T08	11	610	2448
T09	12	611	2591
T10	13	612	2688
T11	14	613	2786
T12	15	614	2827
T13	16	615	2922
Tsint	18	501	3008
Tsxt	17	500	3008
Tsxtc	19	502	3008

## **Apêndice XIII - Medição do Diâmetro Interno dos Tubos Capilares**

As tabelas XIII.1 a XIII.8 mostram a determinação do diâmetro interno dos tubos capilares 2 a 5 pelos métodos da vazão de nitrogênio e microscópio eletrônico / feixe de laser.

Tabela XIII.1 - Diâmetro do Capilar 2 / vazão de nitrogênio

Teste	Pecap [bar]	Vazão [l/min]	Incerteza [l/min]	Reynolds	$L_{\text{capilar}}$ [mm]	Diâmetro [mm]	Diâmetro médio [mm]	Incerteza [mm]
1	1,390	0,37	0,01	564,5	3994	0,88	<b>0,86</b>	<b>0,01</b>
2	1,610	0,56	0,02	879,5	3994	0,85		
3	1,830	0,77	0,02	1225,5	3994	0,84		

Tabela XIII.2 - Diâmetro do Capilar 2 (microscópio / feixe de laser)

<b>Capilar 2</b>				
	Amostra entrada		Amostra saída	
Medição do diâmetro	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 4
	C2E <sub>1</sub> [mm]	C2E <sub>3</sub> [mm]	C2S <sub>1</sub> [mm]	C2S <sub>4</sub> [mm]
1 - 0°	0,748	0,765	0,732	0,732
2 - 30°	0,750	0,761	0,743	0,735
3 - 60°	0,764	0,755	0,754	0,743
4 - 90°	0,756	0,748	0,749	0,732
5 - 120°	0,767	0,747	0,742	0,735
6 - 150°	0,747	0,748	0,739	0,742
<b>Diâmetro<sub>médio</sub> [mm]</b>	<b>0,747</b>			
<b>DP<sub>diâmetro</sub> [mm]</b>	<b>0,011</b>			
<b>l<sub>diâmetro</sub> [mm]</b>	<b>0,022</b>			



Tabela XIII.3 - Diâmetro do Capilar 3 / vazão de nitrogênio

Teste	Pecap [bar]	Vazão [l/min]	Incerteza [l/min]	Reynolds	$L_{\text{capilar}}$ [mm]	Diâmetro [mm]	Diâmetro médio [mm]	Incerteza [mm]
1	2,190	0,48	0,04	977,4	4000	0,68	0,68	0,01
2	2,390	0,57	0,03	1159,0	4000	0,68		
3	2,590	0,66	0,04	1341,1	4000	0,68		

Tabela XIII.4 - Diâmetro do Capilar 3 (microscópio / feixe de laser)

Capilar 3				
	Amostra entrada		Amostra saída	
Medição do diâmetro	Peça 1 C3E <sub>2</sub> [mm]	Peça 2 C3E <sub>3</sub> [mm]	Peça 3 C3S <sub>2</sub> [mm]	Peça 4 C3S <sub>3</sub> [mm]
1 - 0°	0,571	0,559	0,571	0,573
2 - 30°	0,577	0,544	0,567	0,581
3 - 60°	0,568	0,553	0,569	0,574
4 - 90°	0,551	0,555	0,566	0,562
5 - 120°	0,565	0,571	0,577	0,573
6 - 150°	0,565	0,563	0,568	0,588
<b>Diâmetro<sub>médio</sub> [mm]</b>	<b>0,567</b>			
<b>DP<sub>diâmetro</sub> [mm]</b>	<b>0,010</b>			
<b>l<sub>diâmetro</sub> [mm]</b>	<b>0,021</b>			



Tabela XIII.5 - Diâmetro do Capilar 4 / vazão de nitrogênio

Teste	Pecap [bar]	Vazão [l/min]	Incerteza [l/min]	Reynolds	L <sub>capilar</sub> [mm]	Diâmetro [mm]	Diâmetro médio [mm]	Incerteza [mm]
1	2,080	0,55	0,04	1132,0	3001	0,67	<b>0,66</b>	<b>0,01</b>
2	2,290	0,65	0,02	1343,5	3001	0,66		
3	2,480	0,74	0,03	1532,5	3001	0,66		

Tabela XIII.6 - Diâmetro do Capilar 4 (microscópio / feixe de laser)

Capilar 4				
	Amostra entrada		Amostra saída	
Medição do diâmetro	Peça 1 C4E <sub>2</sub> [mm]	Peça 2 C4E <sub>4</sub> [mm]	Peça 3 C4S <sub>1</sub> [mm]	Peça 4 C4S <sub>3</sub> [mm]
1 - 0°	0,581	0,576	0,584	0,580
2 - 30°	0,572	0,575	0,578	0,579
3 - 60°	0,566	0,586	0,575	0,572
4 - 90°	0,569	0,583	0,571	0,583
5 - 120°	0,576	0,575	0,580	0,583
6 - 150°	0,580	0,574	0,580	0,576
<b>Diâmetro<sub>médio</sub> [mm]</b>	<b>0,577</b>			
<b>DP<sub>diâmetro</sub> [mm]</b>	<b>0,005</b>			
<b>l<sub>diâmetro</sub> [mm]</b>	<b>0,011</b>			

Tabela XIII.7 - Diâmetro do Capilar 5 / vazão de nitrogênio

Teste	Pecap [bar]	Vazão [l/min]	Incerteza [l/min]	Reynolds	$L_{\text{capilar}}$ [mm]	Diâmetro [mm]	Diâmetro médio [mm]	Incerteza [mm]
1	1,480	0,62	0,02	985,2	3008	0,86	<b>0,85</b>	<b>0,01</b>
2	1,650	0,81	0,03	1315,9	3008	0,85		
3	1,760	0,89	0,03	1475,8	3008	0,83		

Tabela XIII.8 - Diâmetro do Capilar 5 (microscópio / feixe de laser)

Capilar 5				
	Amostra entrada		Amostra saída	
Medição do diâmetro	Peça 1 C5E <sub>3</sub> [mm]	Peça 2 C5E <sub>4</sub> [mm]	Peça 3 C5S <sub>1</sub> [mm]	Peça 4 C5S <sub>2</sub> [mm]
1 - 0°	0,748	0,742	0,761	0,757
2 - 30°	0,739	0,744	0,760	0,747
3 - 60°	0,744	0,735	0,763	0,756
4 - 90°	0,748	0,753	0,771	0,765
5 - 120°	0,740	0,732	0,760	0,766
6 - 150°	0,751	0,744	0,765	0,762
<b>Diâmetro<sub>médio</sub> [mm]</b>	<b>0,752</b>			
<b>DP<sub>diâmetro</sub> [mm]</b>	<b>0,011</b>			
<b>l<sub>diâmetro</sub> [mm]</b>	<b>0,023</b>			

## Apêndice XIV - Resultados dos Tubos Capilares da Matriz de

### Testes

As figuras XIV.1 a XIV.16 mostram resultados complementares dos testes realizados com os tubos capilares 2 a 5.

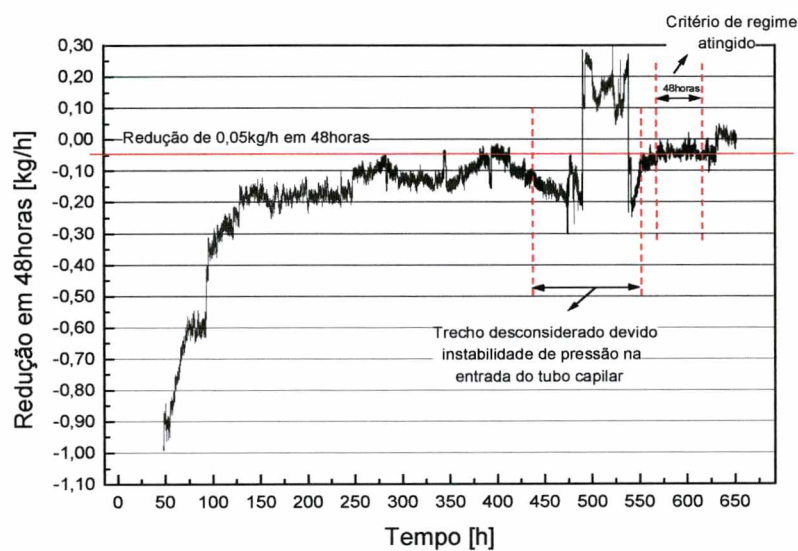


Figura XIV.1 - Critério de regime permanente / Capilar2

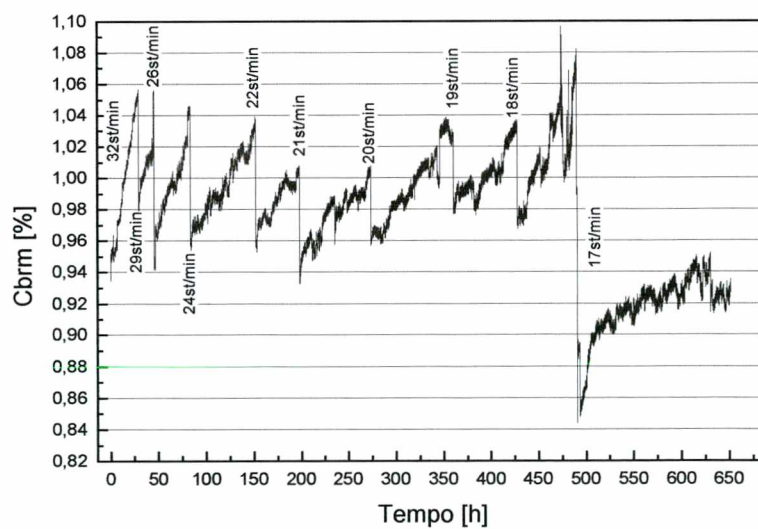


Figura XIV.2 - Concentração controlada / Capilar2

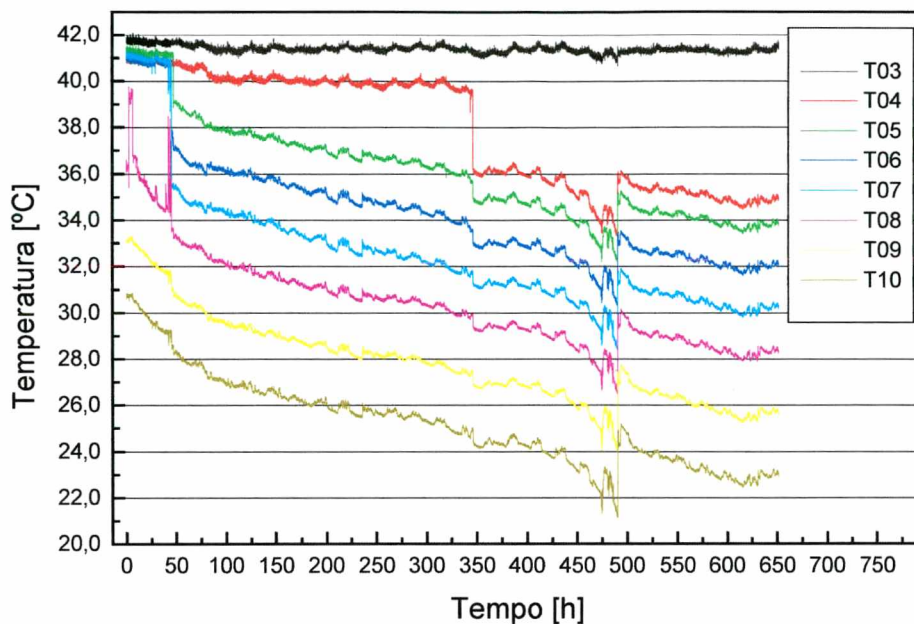


Figura XIV.3 - Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo (1) / Capilar2

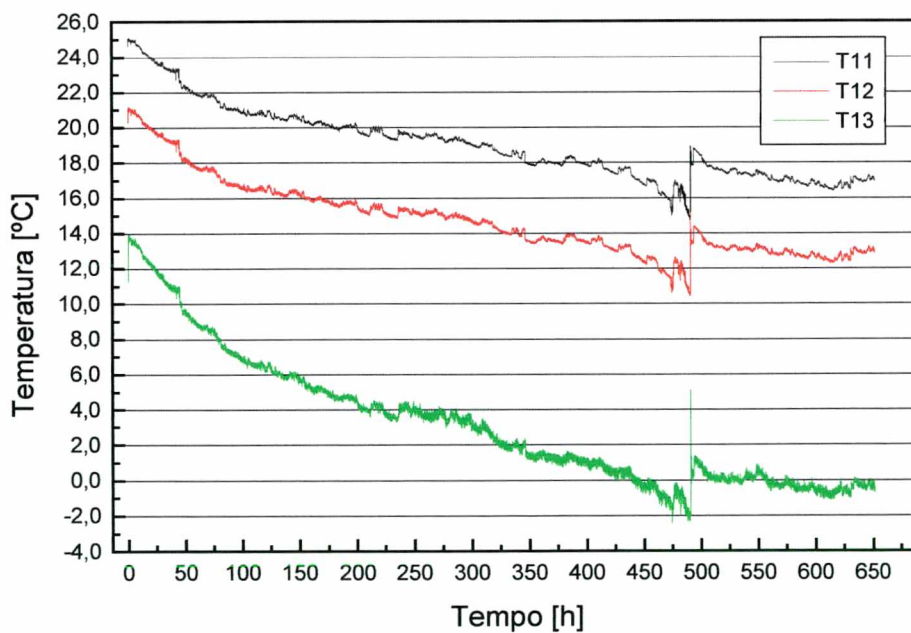


Figura XIV.4 - Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo (2) / Capilar2

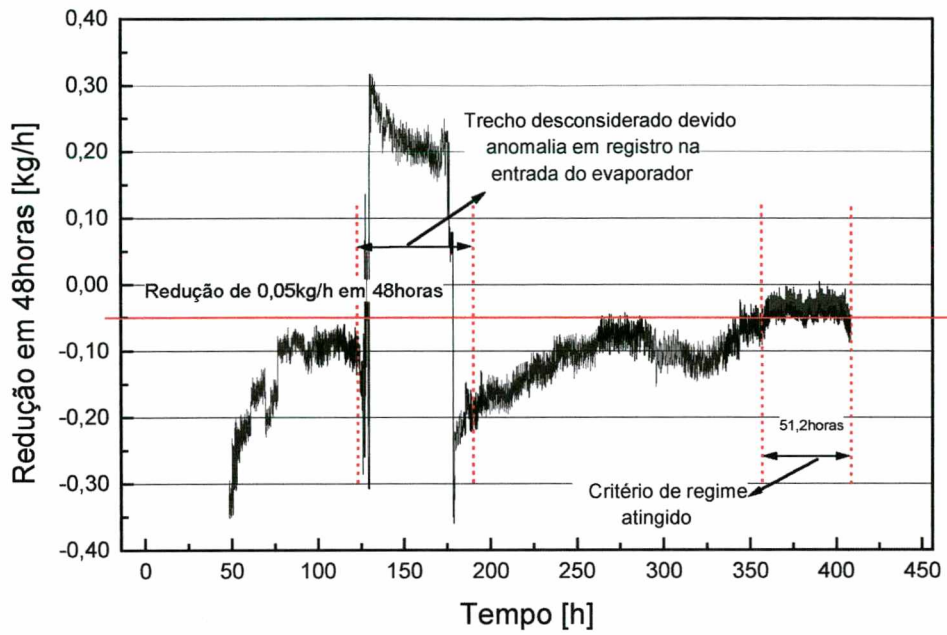


Figura XIV.5 - Critério de regime permanente / Capilar3

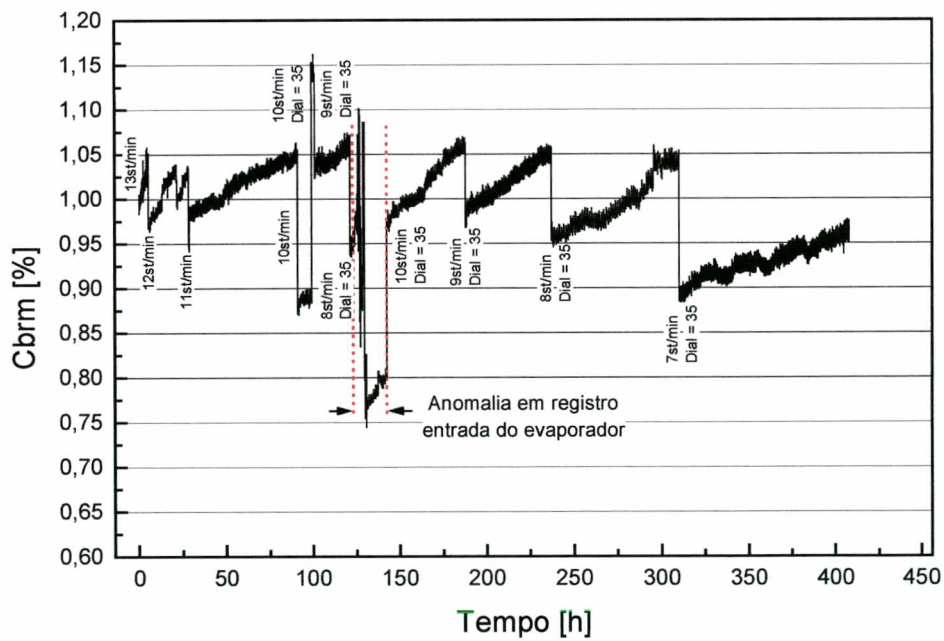


Figura XIV.6 - Concentração controlada / Capilar3



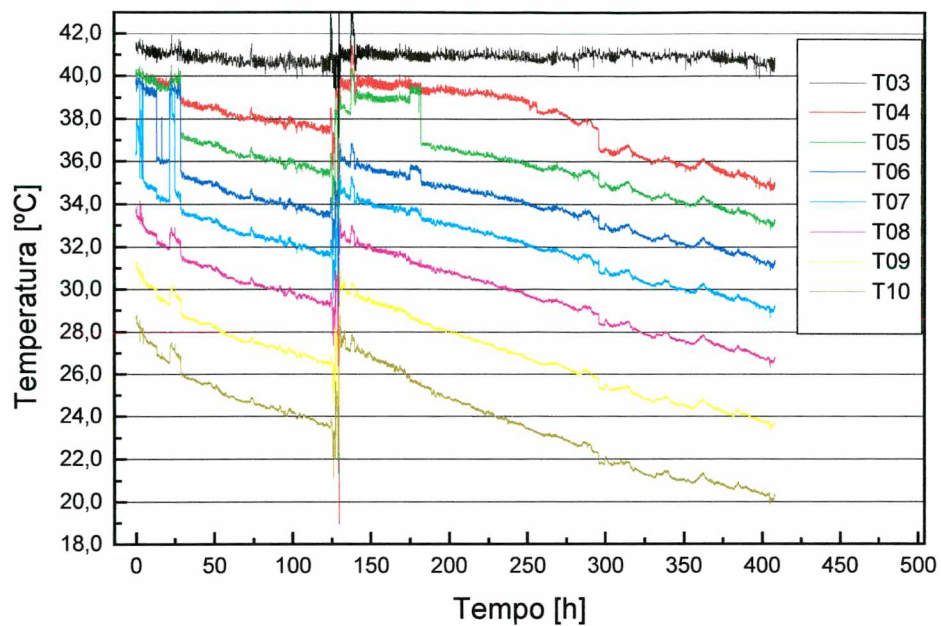


Figura XIV.7 - Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo (1) / Capilar3

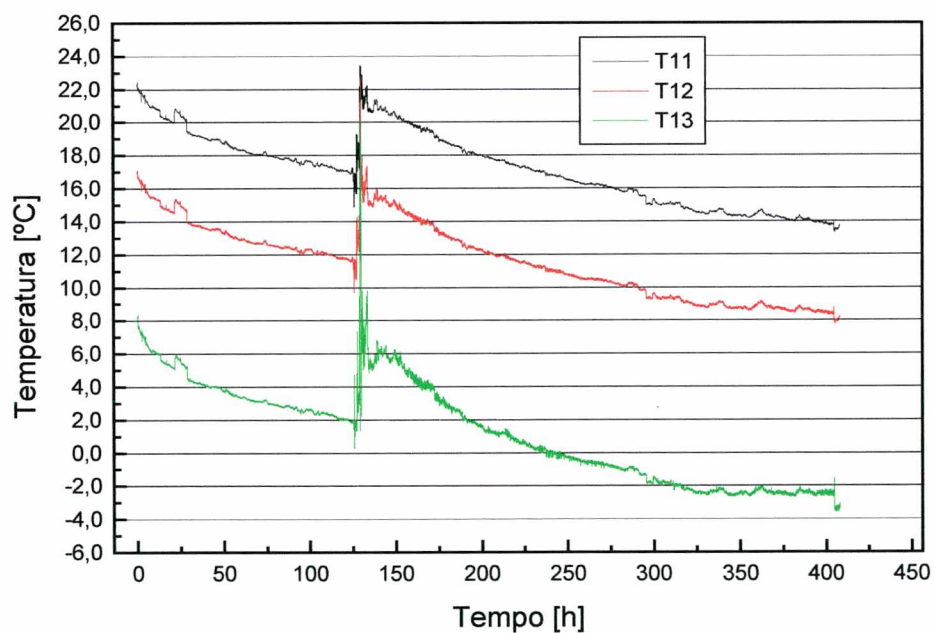


Figura XIV.8 - Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo (2) / Capilar3



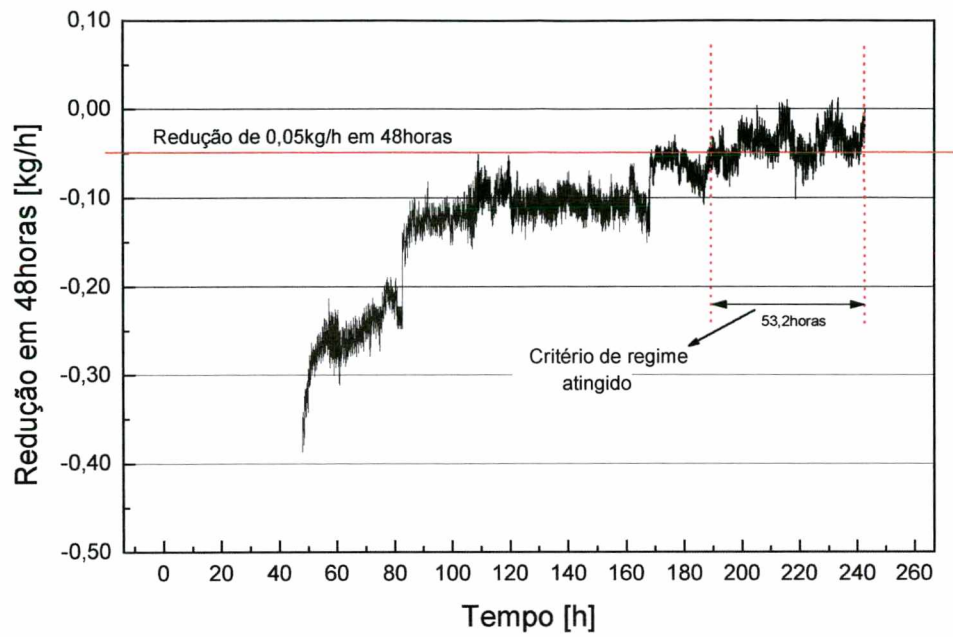


Figura XIV.9 - Critério de regime permanente / Capilar4

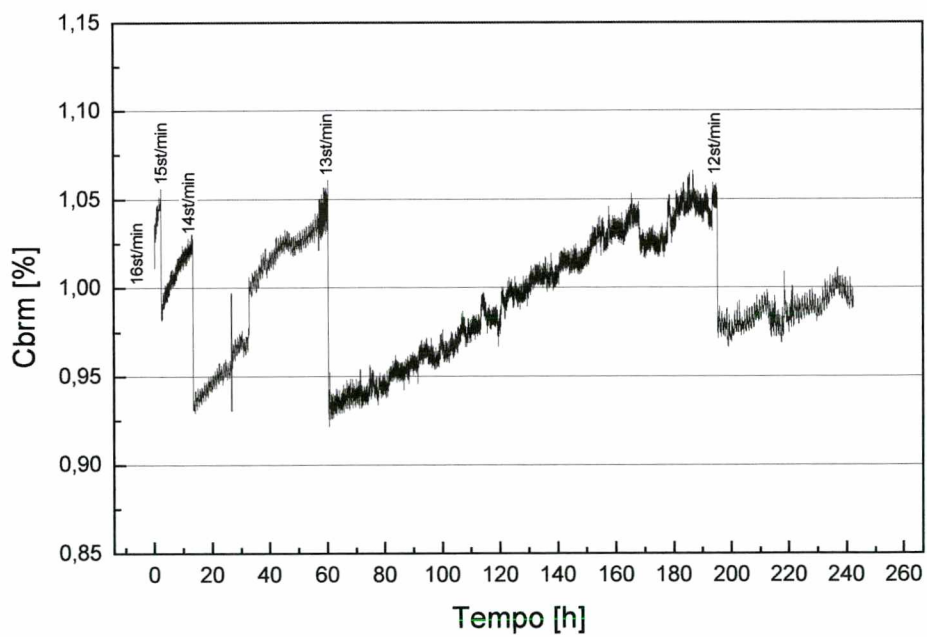


Figura XIV.10 - Concentração controlada / Capilar4

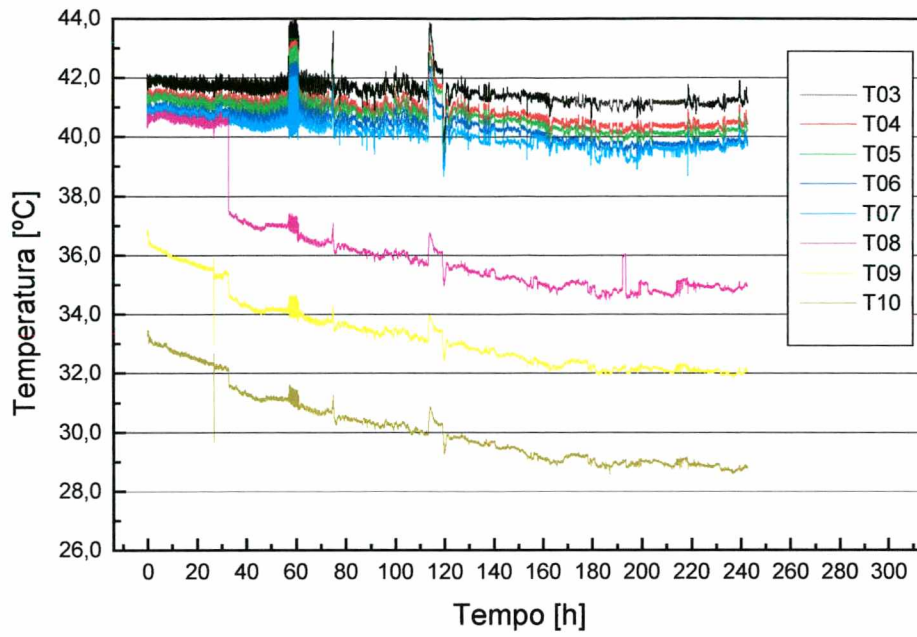


Figura XIV.11 - Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo (1) / Capilar4

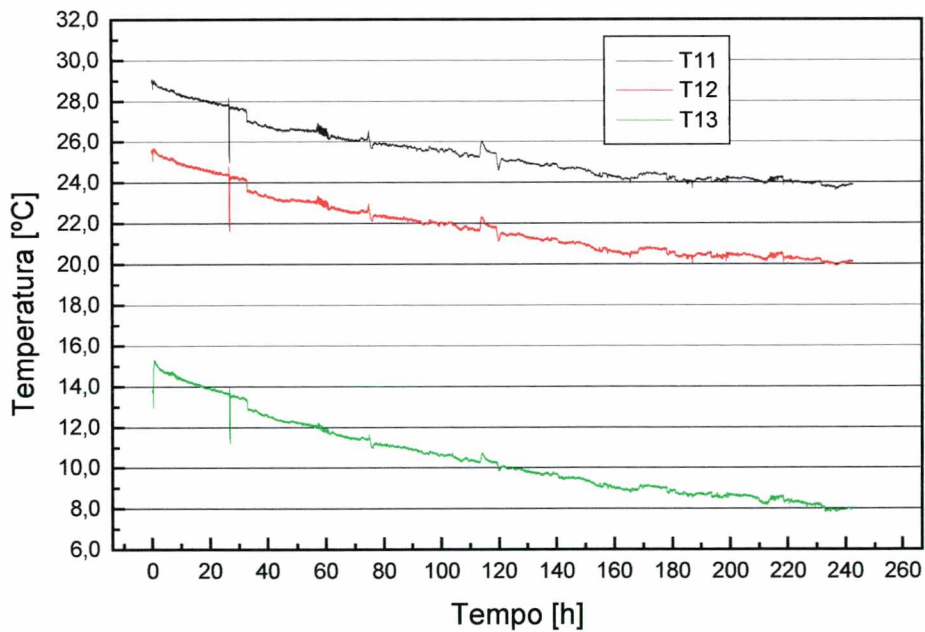


Figura XIV.12 - Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo (2) / Capilar4

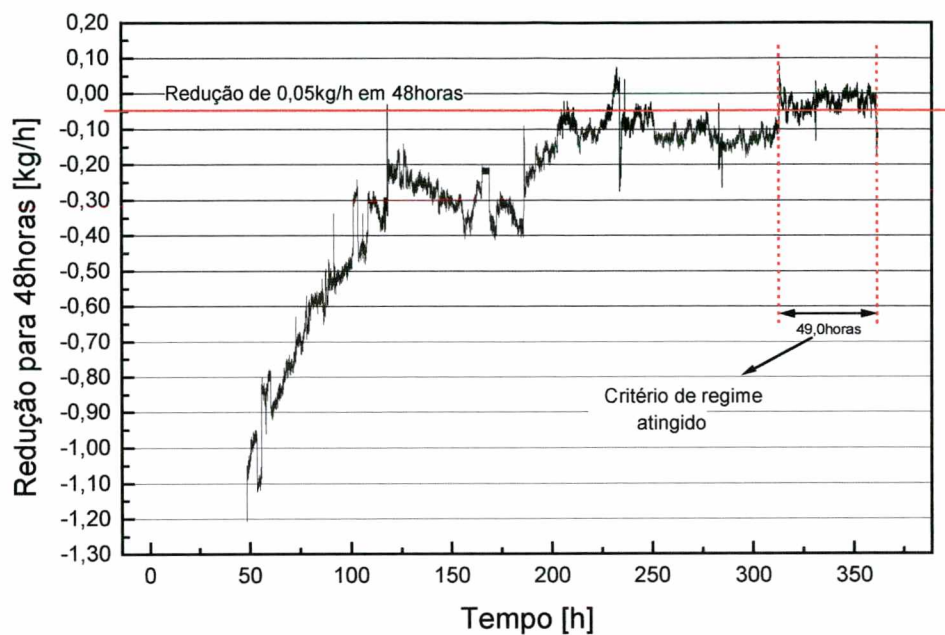


Figura XIV.13 - Critério de regime permanente / Capilar5

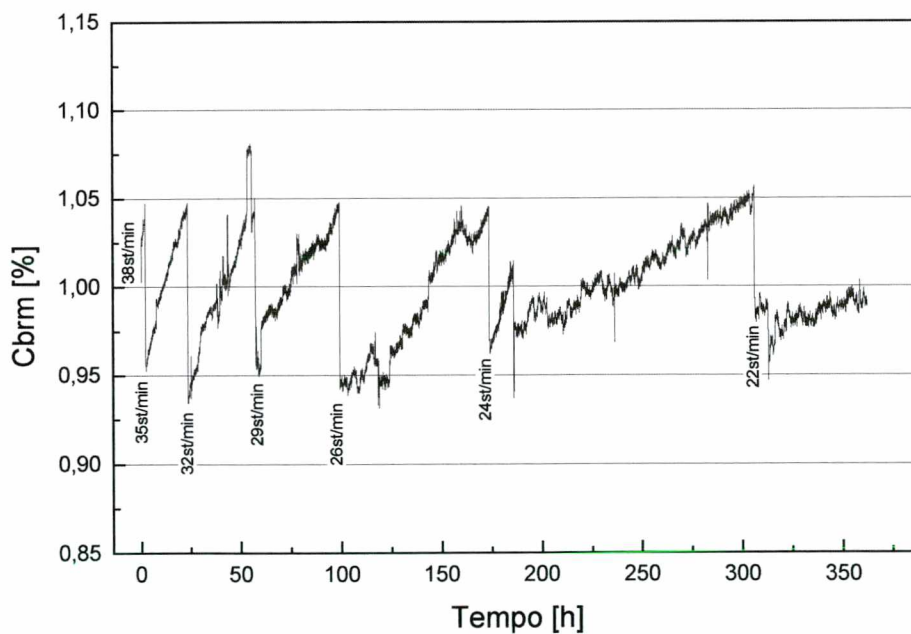


Figura XIV.14 - Concentração controlada / Capilar5

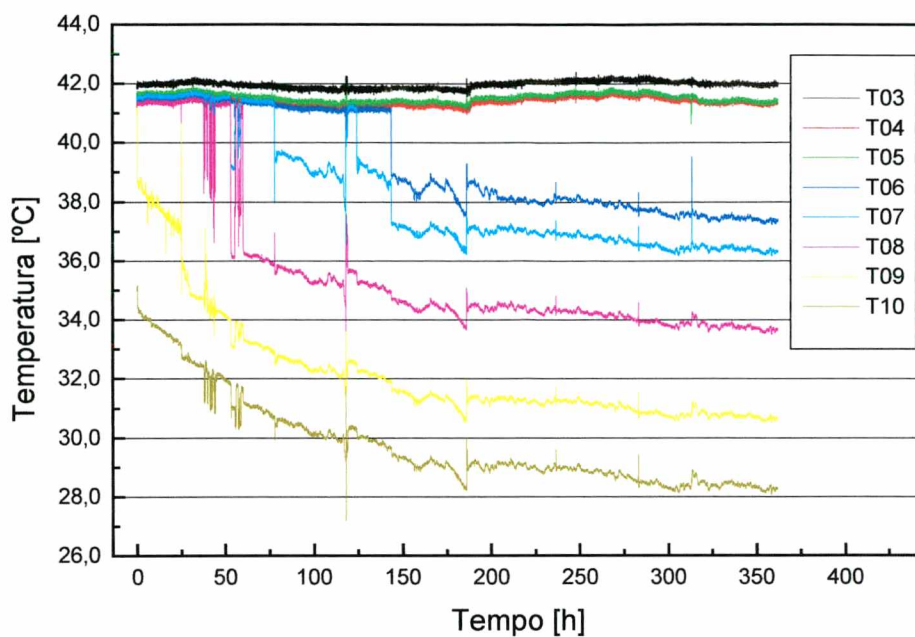


Figura XIV.15 - Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo (1) / Capilar5

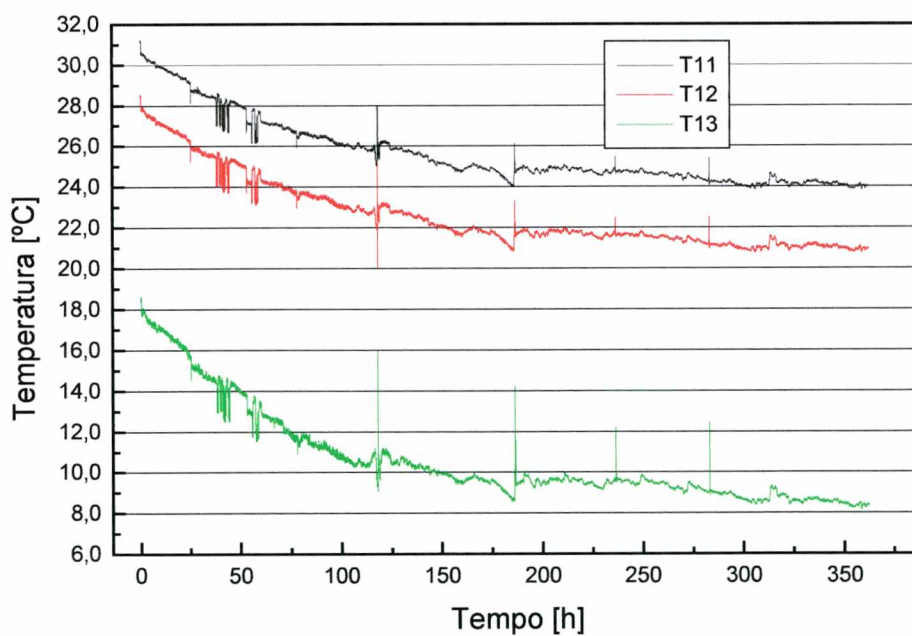


Figura XIV.16 - Evolução das temperaturas ao longo do tubo capilar no tempo (2) / Capilar5

## **Apêndice XV - Vazão de Nitrogênio através dos Tubos Capilares da Matriz de Testes**

As tabelas XV.1 a XV.4 mostram a vazão de nitrogênio através dos tubos capilares 2 a 5, sendo que a vazão foi medida originalmente para o tubo capilar limpo e na seqüência para o tubo capilar obstruído. A vazão foi também medida após as lavagens do tubo capilar com CFC11. A pressão absoluta de nitrogênio na entrada do tubo capilar foi de 7,89bar, valor este especificado pela norma ASHRAE 28 (1996).

Tabela XV.1 - Vazão de nitrogênio / Capilar 2

Vazão	Capilar limpo [l/min]	Capilar Obstruído [l/min]	Redução percentual [%]	Capilar 1ª lavagem [l/min]	Capilar 2ª lavagem [l/min]
Teste 1	5,23	4,40	<b>15,3</b>	5,23	5,26
Teste 2	5,23	4,44		5,31	5,21
Teste 3	5,24	4,45		5,29	5,28
Média	5,23±0,12	4,43±0,10		5,28±0,12	5,25±0,12

Tabela XV.2 - Vazão de nitrogênio / Capilar 3

Vazão	Capilar limpo [l/min]	Capilar Obstruído [l/min]	Redução percentual [%]	Capilar 1ª lavagem [l/min]	Capilar 2ª lavagem [l/min]
Teste 1	2,36	2,19	<b>8,5</b>	2,34	2,41
Teste 2	2,35	2,11		2,36	2,37
Teste 3	2,38	2,17		2,41	2,43
Média	2,36±0,05	2,16±0,05		2,37±0,05	2,40±0,06

Tabela XV.3 - Vazão de nitrogênio / Capilar 4

Vazão	Capilar limpo [l/min]	Capilar Obstruído [l/min]	Redução percentual [%]	Capilar 1ª lavagem [l/min]	Capilar 2ª lavagem [l/min]
Teste 1	2,75	2,32	16,3	2,81	2,85
Teste 2	2,77	2,28		2,83	2,85
Teste 3	2,77	2,34		2,84	2,83
Média	2,76±0,06	2,31±0,05		2,83±0,06	2,84±0,06

Tabela XV.4 - Vazão de nitrogênio / Capilar 5

Vazão	Capilar limpo [l/min]	Capilar Obstruído [l/min]	Redução percentual [%]	Capilar 1ª lavagem [l/min]	Capilar 2ª lavagem [l/min]
Teste 1	6,23	4,76	22,9	5,73	5,97
Teste 2	6,24	4,84		5,82	5,98
Teste 3	6,24	4,83		5,82	6,09
Média	6,24±0,14	4,81±0,11		5,79±0,13	6,01±0,14