

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

**ANÁLISE EXPERIMENTAL  
DO ESCOAMENTO DE FLUIDOS REFRIGERANTES  
EM TUBOS CAPILARES**

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

**JOAQUIM MANOEL GONÇALVES**

**FLORIANÓPOLIS, 16 DE DEZEMBRO DE 1994**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL  
DO ESCOAMENTO DE FLUIDOS REFRIGERANTES  
EM TUBOS CAPILARES**

**JOAQUIM MANOEL GONÇALVES**

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

**MESTRE EM ENGENHARIA**

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

  
Prof. **ROGÉRIO TADEU DA SILVA FERREIRA, Ph.D.**  
ORIENTADOR

  
Prof. **CLÁUDIO MELO, Ph.D.**  
CO-ORIENTADOR

  
Prof. **ANTÔNIO FÁBIO CARVALHO DA SILVA, Dr.**  
COORDENADOR DO CURSO

**BANCA EXAMINADORA**

  
Prof. **ROGÉRIO TADEU DA SILVA FERREIRA, Ph.D.**  
PRESIDENTE

  
Prof. **CLÁUDIO MELO, Ph.D.**

  
Prof. **ÁLVARO TOUBES PRATA, Ph.D.**

  
Prof. **JÚLIO CÉSAR PASSOS, Dr.**

"... I often say that when you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind; it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely, in your thoughts, advanced to the stage of Science, whatever the matter may be ..."

**Sir William Thomson**  
**(Lord Kelvin)**

**À minha esposa, Eliane,  
pelo amor, carinho e dedicação.**

---

## AGRADECIMENTOS

---

Aos professores Rogério Tadeu da Silva Ferreira e Cláudio Melo pelas orientações, exemplos e amizade tão importantes na minha formação.

À EMBRACO (Empresa Brasileira de Compressores S.A.) pelo apoio concedido. Em especial ao engenheiro Roberto Horn Pereira e ao técnico Márcio Roberto Thiessen que participaram de forma efetiva do desenvolvimento deste trabalho.

Ao engenheiro Carlos Boabaid Neto pela sua colaboração, especialmente, durante a etapa de processamento dos dados experimentais.

Ao técnico Marcelo Knies pelo entusiasmo e competência com que prestou suas contribuições ao trabalho.

Aos técnicos Milton Miguel Pedroso Seifert e Edevaldo Brandílio Reinaldo pela colaboração.

Aos colegas de trabalho do curso técnico de Refrigeração e Condicionamento de Ar da ETF/SC-UnED/SJ (Escola Técnica Federal de Santa Catarina).

Aos Cursos de Graduação e Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC, responsáveis pela minha formação acadêmica.

Aos meus pais pela dedicação à formação de seus filhos.

---

# SUMÁRIO

---

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xii
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO DOS ESTUDOS EXPERIMENTAIS JÁ REALIZADOS .....	8
3 DESCRIÇÃO DA BANCADA DE ENSAIO DE TUBOS CAPILARES (BETC).....	16
3.1 Introdução.....	16
3.2 Sistema de refrigeração da BETC.....	17
3.3 Sistema elétrico da BETC.....	20
3.4 Sistema de medição da BETC.....	22
3.5 Seção de teste da BETC.....	24
3.6 Funcionamento da BETC .....	26
4 CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO (SMs) DA BETC.....	29
4.1 Introdução.....	29
4.2 Calibração do Sistema de Medição de Temperatura (SMT).....	32
4.2.1 Introdução .....	32
4.2.2 Descrição do aparato de calibração do SMT.....	33
4.2.3 Descrição do processo de calibração do SMT.....	35
4.2.4 Cuidados observados na calibração do SMT.....	36
4.2.5 Resultados da calibração do SMT.....	37
4.2.6 Incerteza de medição do SMT.....	42
4.3 Calibração do Sistema de Medição de Pressão (SMP).....	43
4.3.1 Introdução .....	43
4.3.2 Descrição do aparato de calibração do SMP.....	44

4.3.3	Descrição do processo de calibração do SMP.....	47
4.3.4	Cuidados observados na calibração do SMP.....	47
4.3.5	Resultados da calibração do SMP.....	48
4.3.6	Incerteza de medição do SMP.....	53
4.4	Calibração do Sistema de Medição de Fluxo de Massa (SMFM).....	54
4.4.1	Introdução.....	54
4.4.2	Descrição do aparato de calibração do SMFM.....	55
4.4.3	Descrição do processo de calibração do SMFM.....	57
4.4.4	Cuidados observados na calibração do SMFM.....	59
4.4.5	Resultados da calibração do SMFM.....	60
4.4.6	Incerteza de medição do SMFM.....	66
5	MEDIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS TUBOS CAPILARES..	67
5.1	Introdução.....	67
5.2	Medição do comprimento dos tubos capilares.....	68
5.3	Medição do diâmetro interno dos tubos capilares.....	70
5.4	Medição da rugosidade da superfície interna da parede dos tubos capilares.....	72
5.5	Medição das posições de medição de temperatura e das posições de medição de pressão ao longo dos tubos capilares.....	75
5.6	Resumo das características geométricas dos tubos capilares.....	78
6	RESULTADOS.....	79
6.1	Introdução.....	79
6.2	Descrição do processo de obtenção dos pontos experimentais.....	81
6.3	Resultados das medições globais.....	83
6.4	Resultados das medições distribuídas.....	93
7	CONCLUSÃO.....	100
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102
	APÊNDICES.....	108
	APÊNDICE I Nomenclatura dos componentes dos sistemas da BETC.....	108

I.1 Nomenclatura dos componentes do sistema de refrigeração.....	108
I.2 Nomenclatura dos componentes do sistema elétrico .....	109
I.3 Nomenclatura dos componentes do sistema de medição .....	111
I.4 Nomenclatura dos elementos da seção de teste.....	111
APÊNDICE II Resultados da etapa de medições globais.....	113



---

## LISTA DE FIGURAS

---

FIGURA 1.1 - Tubo capilar .....	1
FIGURA 1.2 - Sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapores.....	2
FIGURA 1.3 - Diagrama P-h simplificado de um ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapores.....	3
FIGURA 1.4 - Condições do fluido em escoamento .....	5
FIGURA 3.1 - Vista geral da BETC .....	17
FIGURA 3.2 - Diagrama do sistema de refrigeração da BETC.....	18
FIGURA 3.3 - Diagrama do sistema elétrico da BETC.....	20
FIGURA 3.4 - Diagrama do sistema de medição da BETC.....	22
FIGURA 3.5 - Seção de teste da BETC.....	24
FIGURA 4.1 - Esquema do aparato de calibração do SMT .....	34
FIGURA 4.2 - Temperaturas do quarto ponto de calibração .....	38
FIGURA 4.3 - DDPs do quarto ponto de calibração .....	39
FIGURA 4.4 - Comparação entre a curva de calibração obtida e a padrão (ASME E 20 / IPTS-68).....	41
FIGURA 4.5 - Aparato de calibração do SMP .....	45
FIGURA 4.6 - Pressão absoluta lida pelo SMP durante um ponto de calibração .....	49
FIGURA 4.7 - Resultado da calibração do PTF3820-2.....	53
FIGURA-4.8 - Esquema do aparato de calibração do SMFM.....	56
FIGURA 4.9 - Fluxo de massa lido durante a aquisição de um ponto de calibração .....	58
FIGURA 4.10 - Resultados da primeira calibração do fluxímetro #1, processo I.....	64
FIGURA 4.11 - Resultados da segunda calibração do fluxímetro #1, processo I.....	65
FIGURA 4.12 - Resultados da calibração do fluxímetro #3, processo I .....	65
FIGURA 5.1 - Características geométricas dos tubos capilares.....	67
FIGURA 5.2 - Corpo de prova para medição do diâmetro .....	70

FIGURA 5.3 - Corpo de prova para medição da rugosidade .....	73
FIGURA 5.4 - Perfil de rugosidade.....	73
FIGURA 6.1 - Gráficos utilizados para o processamento de um teste.....	83
FIGURA 6.2 - Resultados experimentais - R12 / capilar #1 .....	87
FIGURA 6.3-Teste transiente - R134a / capilar #1 .....	88
FIGURA 6.4 - Teste transiente - R134a / capilar #1 .....	89
FIGURA 6.5- Teste para determinação da pressão crítica .....	91
FIGURA 6.6 - Influência do comprimento e do diâmetro no fluxo de massa.....	91
FIGURA 6.7 - Efeito do refrigerante no fluxo de massa .....	92
FIGURA 6.8 - Resultado das medições distribuídas e comparação com as medições globais - capilar #1 / R134a.....	94
FIGURA 6.9- Resultado das medições distribuídas e comparação com as medições globais - capilar #6 / R134a.....	95
FIGURA 6.10- Resultado das medições distribuídas e comparação com as medições globais - capilar #6 / R134a.....	95
FIGURA 6.11- Resultado típico das medições distribuídas.....	96
FIGURA 6.12 - Teste transiente com medições distribuídas .....	98
FIGURA 6.13 - Condições durante o teste transiente com medições distribuídas.....	98
FIGURA 6.14 - Perfis antes e após o salto de fluxo de massa no teste transiente.....	99
FIGURA II.1 - Resultados para o capilar #1 e R12 .....	113
FIGURA II.2 - Resultados para o capilar #2 e R12 .....	113
FIGURA II.3 - Resultados para o capilar#3 e R12 .....	114
FIGURA II.4 - Resultados para o capilar #4 e R12 .....	114
FIGURA II.5 - Resultados para o capilar #5 e R12 .....	115
FIGURA II.6 - Resultados para o capilar #6 e R12 .....	115
FIGURA II.7 - Resultados para o capilar #1 e R134a.....	116
FIGURA II.8 - Resultados para o capilar #3 e R143a.....	116
FIGURA II.9 - Resultados para o capilar #4 e R134a.....	117

FIGURA II.10 - Resultados para o capilar #6 e R134a.....	117
FIGURA II.11 - Resultados para o capilar #1 e R600a.....	118
FIGURA II.12 - Resultados para o capilar #4 e R600a.....	118

---

## LISTA DE TABELAS

---

TABELA 2.1 - Trabalhos experimentais já realizados .....	9
TABELA 4.1 - Coeficientes de Student para 95% de enquadramento .....	31
TABELA 4.2 - Pontos de calibração .....	39
TABELA 4.3 - Comparação entre as leituras do SMT e a padrão .....	41
TABELA 4.4 - Fatores multiplicativos usados na calibração do SMP .....	49
TABELA 4.5 - Valores dos coeficientes das curvas de calibração do SMP .....	51
TABELA 4.6 - Pontos de calibração do PTF3820-2 .....	52
TABELA 4.7 - Resultado final das calibrações do SMFM .....	60
TABELA 4.8 - Resultados da primeira calibração do fluxímetro #1, processo I .....	62
TABELA 4.9 - Resultados da segunda calibração do fluxímetro #1, processo I .....	63
TABELA 4.10 - Resultados da calibração do fluxímetro #3, processo I .....	63
TABELA 5.1 - Identificação dos tubos capilares .....	68
TABELA 5.2 - Comprimento dos tubos capilares .....	69
TABELA 5.3 - Diâmetro interno dos tubos capilares .....	71
TABELA 5.4 - Rugosidade da superfície interna da parede dos tubos capilares [ $\mu\text{m}$ ] .....	74
TABELA 5.5 - Resultado das medições dasPMTs e das PMPs .....	76
TABELA 5.6 - Características geométricas dos tubos capilares .....	77
TABELA 6.1 - Incertezas de medição .....	80
TABELA 6.2 - Critérios de estabilidade dos experimentos .....	82
TABELA 6.3 - Número de testes para o R12 - medição global .....	84
TABELA 6.4 - Número de testes para o R134a - medição global .....	84
TABELA 6.5 - Número de testes para o R600a (Isobutano) - medição global .....	85
TABELA 6.6 - Resultados Experimentais .....	86
TABELA 6.7 - Número de testes com medição distribuída .....	93

---

## RESUMO

---

Este trabalho consistiu na análise experimental do escoamento de fluidos refrigerantes em tubos capilares. Sua motivação deve-se à contínua necessidade de racionalização do consumo de energia em sistemas que usam tubo capilar e fluidos refrigerantes alternativos, como o R134a e o R600a. Uma bancada experimental foi desenvolvida a fim de se obter um banco de dados que possibilite o desenvolvimento e/ou a validação de modelos e/ou correlações para os fenômenos envolvidos no escoamento. São descritas as calibrações dos sistemas de medição da bancada, assim como os processos de medição empregados na avaliação das características geométricas dos tubos capilares. Testes foram realizados com três fluidos refrigerantes (R12, R134a e R600a). As incertezas de medição de todas as grandezas envolvidas são também apresentadas. Foram realizados mais de 700 testes medindo-se, além do fluxo de massa, as condições na entrada e na saída, e 189 testes medindo-se pressões e temperaturas em vários pontos ao longo do tubo capilar. O escoamento se comportou da maneira clássica e foi identificada a presença de uma região de metaestabilidade.

---

## ABSTRACT

---

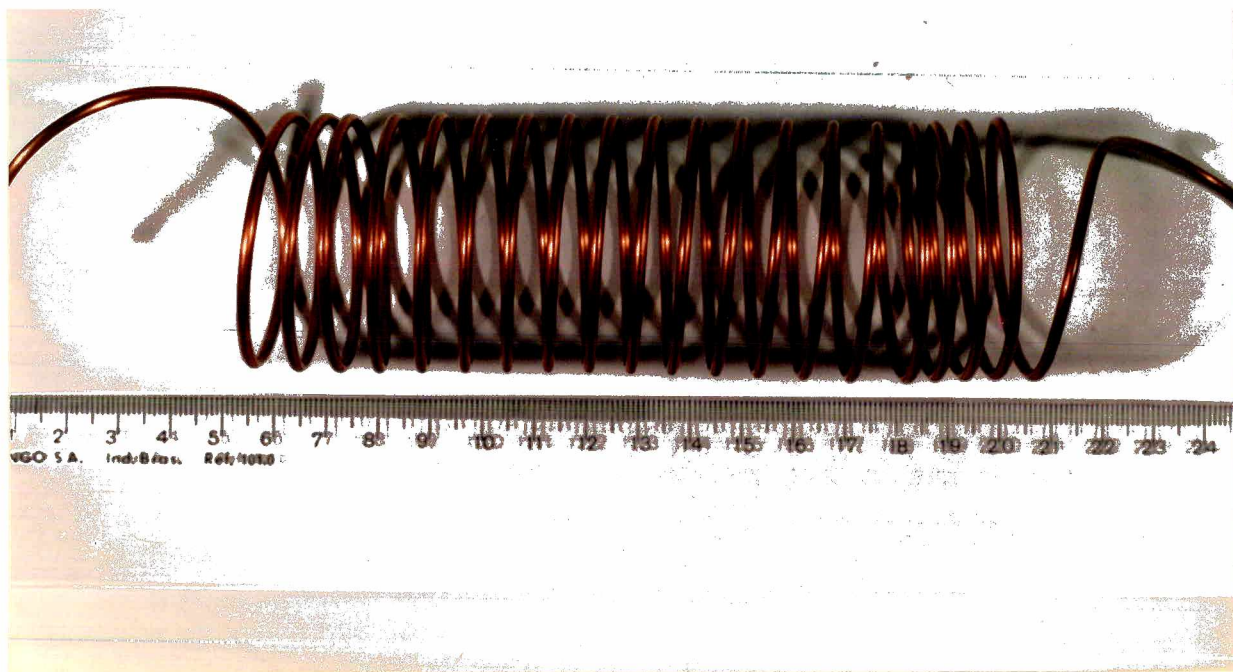
This work presents an experimental analysis of refrigerant flow through capillary tubes. One of its goals is to reduce the energy consumption of refrigeration systems, employing capillary tubes and alternative refrigerants, such as R134a and R600a. A test rig was developed to generate a reliable set of experimental data, which can be used to develop and/or validate flow models and/or correlation. The calibration processes of the test rig measurement systems are presented, together with the processes used to measure the capillary tube geometry. Tests were performed with three refrigerants (R12, R134a and R600a). The uncertainties of all the measurements are also presented. Over 700 data points taking only the inlet and exit conditions, and 189 data points taking the pressure and temperature profiles along the capillary tube, were performed. The flow behavior was the classical one. A metastable region was observed in most of the tests.

---

# 1 INTRODUÇÃO

---

O dispositivo de expansão, tipo tubo capilar, consiste em um tubo de pequeno diâmetro e comprimento relativamente grande. Apesar da denominação, seu diâmetro não possui ordem de grandeza próxima àquela normalmente associada à capilaridade. Tais tubos, normalmente de cobre, são obtidos por trefilação e possuem dimensões dentro das seguintes faixas: diâmetro de 0,5 a 2,0 mm e comprimento de 1 a 6 m. Na figura 1.1, mostra-se um tubo capilar, típico de instalações de refrigeração.



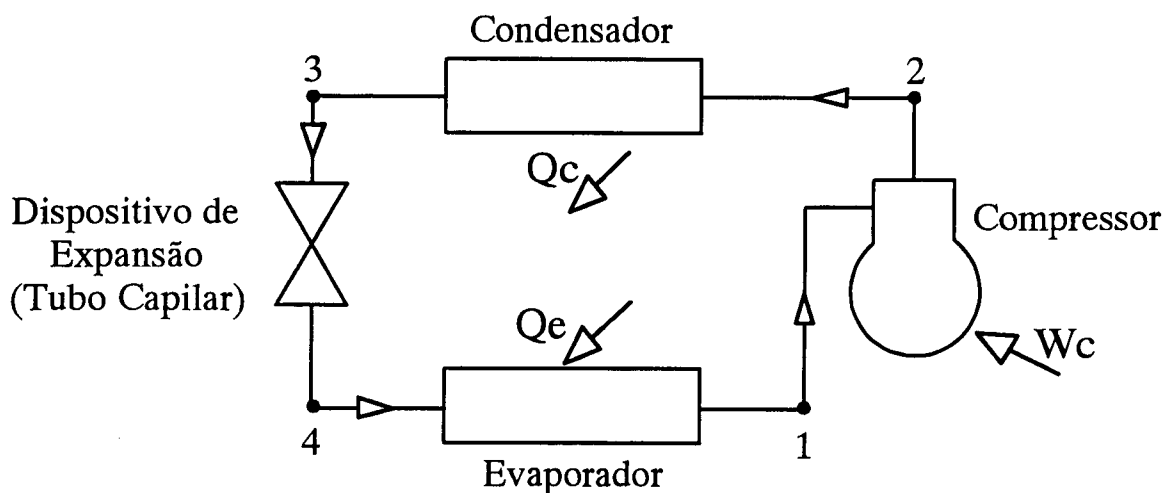
**FIGURA 1.1 - Tubo capilar**

Os tubos capilares começaram a ser utilizados no final dos anos 20. Nessa época, os sistemas de refrigeração utilizavam dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) como fluido refrigerante, o que exigia diâmetros muito pequenos e originava problemas frequentes de entupimento (Swart,1946).

Em 1931 foi desenvolvido um dos primeiros sistemas de refrigeração do tipo hermético, utilizando um tubo capilar como dispositivo de expansão (Baekstroem, 1958). Entretanto, somente no início dos anos 40, deu-se a utilização de tubos capilares em larga escala devido à introdução dos hidrocarbonetos halogenados como fluido refrigerante.

Os tubos capilares são predominantemente empregados como dispositivos de expansão em sistemas de refrigeração e de condicionamento de ar de pequeno porte. Esses sistemas (refrigeradores, freezers, condicionadores de ar, entre outros) são essenciais à sociedade moderna, possibilitando a conservação de alimentos e a obtenção de condições adequadas de conforto. Entretanto, seus fluidos refrigerantes (hidrocarbonetos halogenados) têm causado ataque à camada de ozônio e efeito estufa na atmosfera terrestre (Stolarshi, 1988). Isso levou à pesquisa de fluidos refrigerantes alternativos, ecologicamente compatíveis, cujo comportamento nos sistemas de refrigeração, incluindo tubo capilar, são de fundamental importância para permitir a racionalização do consumo de energia por parte desses sistemas.

Na figura 1.2, mostra-se um esquema simplificado de um sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapores, onde podem ser identificados seus quatro componentes básicos: compressor, condensador, dispositivo de expansão e evaporador.



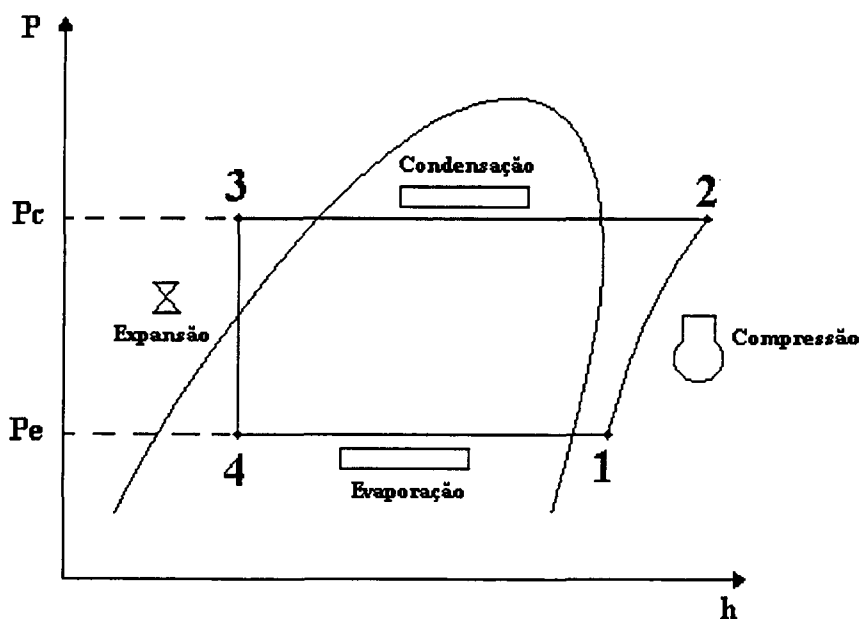
**FIGURA 1.2 - Sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapores**



O ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapores utiliza, como fluido refrigerante, um fluido volátil. O refrigerante é mantido à baixa pressão e temperatura, no evaporador, e à alta pressão e temperatura, no condensador, devido à ação contínua do compressor e do dispositivo de expansão. Desta forma, o fluido pode evaporar, no evaporador, absorvendo calor ( $Q_e$ ) de um meio à baixa temperatura e condensar, no condensador, rejeitando calor ( $Q_c$ ) para um meio à alta temperatura (Gosney, 1982).

O tubo capilar atua como elemento redutor de pressão e regulador do fluxo de massa de refrigerante.

Na figura 1.3, apresentam-se os estados termodinâmicos do refrigerante, ao longo do ciclo, em um diagrama P-h (pressão - entalpia). Os pontos indicados são referentes àqueles indicados na figura 1.2. Entre os pontos 1 e 2, o refrigerante é comprimido através da ação do compressor, indo ao condensador onde é dessuperaquecido, condensado e subresfriado (entre os pontos 2 e 3). Após o condensador, o fluido passa através do dispositivo de expansão (entre os pontos 3 e 4) tendo a sua pressão e temperatura reduzidas. Finalmente, o refrigerante penetra no evaporador onde sofre um processo de evaporação e de superaquecimento (entre os pontos 4 a 1) (Stoecker, 1985).



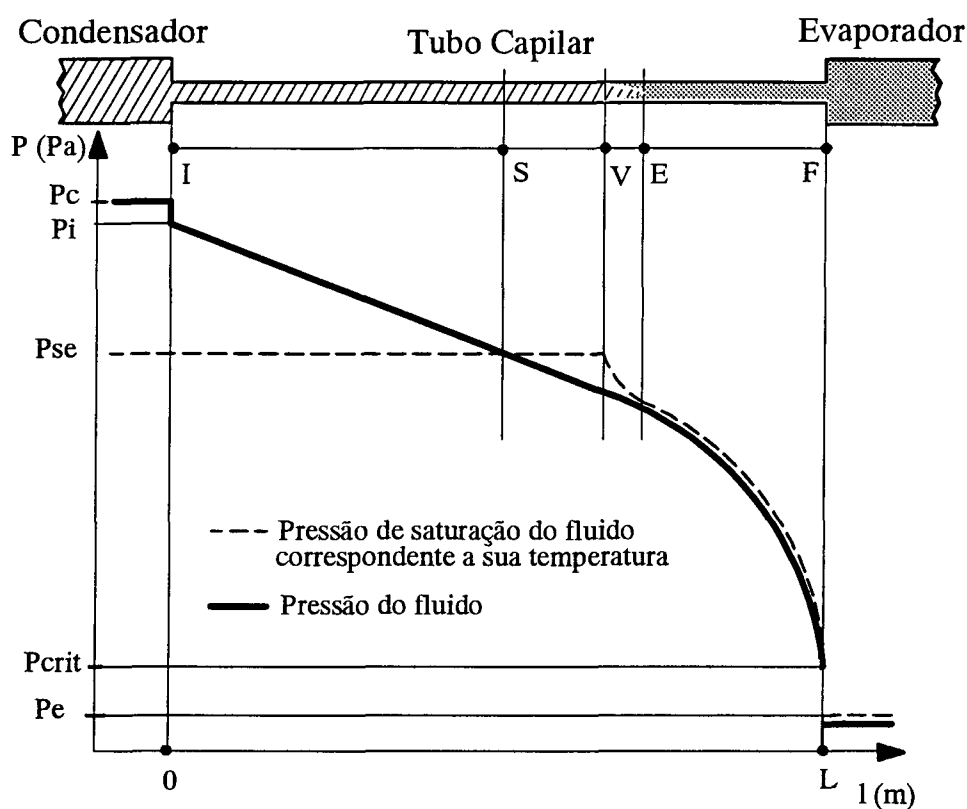
**FIGURA 1.3 - Diagrama P-h simplificado de um ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapores**

O funcionamento do sistema de refrigeração é caracterizado pelos níveis de pressão de condensação e de evaporação e pelos graus de subresfriamento e de superaquecimento. Tais parâmetros são funções do desempenho de seus componentes, das temperaturas dos ambientes de condensação e de evaporação e da carga de refrigerante.

Para melhor refletir a situação prática, o fluido refrigerante estará sempre subresfriado na entrada do tubo capilar, em todo o transcorrer deste trabalho.

Uma prática bastante comum é a colocação da linha de sucção em contato com o tubo capilar. Isso permite um melhor desempenho por parte do sistema e evita a presença de líquido na entrada do compressor. Esse arranjo, que torna o tubo capilar não adiabático, não será considerado neste trabalho.

O tubo capilar promove a redução de pressão e a conseqüente regulagem do fluxo de massa de refrigerante devido aos efeitos viscosos e à aceleração do escoamento. Na figura 1.4, apresenta-se o escoamento típico de fluido refrigerante através de um tubo capilar reto e adiabático, com líquido subresfriado na entrada. Essa figura é baseada em observações experimentais obtidas desde a década de 40. Na entrada do tubo capilar, ponto I, o fluido refrigerante encontra-se na condição de líquido subresfriado numa pressão ( $P_i$ ) levemente inferior à pressão de condensação ( $P_c$ ) devido à perda de carga localizada na entrada. Em seguida, a pressão do fluido é reduzida linearmente enquanto a pressão de saturação ( $P_{se}$ ) se mantém constante. No ponto S, o escoamento atinge condições de saturação, no entanto, o fluido não vaporiza. Inicia-se, então, uma região de líquido metaestável, até o ponto V, onde se inicia, efetivamente, o processo de vaporização. A região de metaestabilidade termina no ponto E, onde o refrigerante adquire condições de equilíbrio termodinâmico, permanecendo, assim, até o final do tubo, ponto F. A pressão nesse ponto é normalmente a pressão de bloqueio ( $P_{crit}$ ) do escoamento, caracterizando a ocorrência de escoamento bloqueado, o que provoca uma perda de carga localizada devido à expansão abrupta do escoamento e às ondas de choque, que causam, assim, a redução da pressão do fluido até a pressão de evaporação ( $P_e$ ) do sistema. Na região de escoamento bifásico, verifica-se que a tendência de redução da pressão ao longo do tubo é exponencial.



**FIGURA 1.4 - Condições do fluido em escoamento**

A região de metaestabilidade, compreendida entre os pontos S e E, é caracterizada pela presença de estados de não equilíbrio termodinâmico onde a pressão de saturação, correspondente à temperatura do fluido, é superior à pressão local do fluido. A região de metaestabilidade provoca um aumento da região de escoamento de líquido, aumentando, assim, o fluxo de massa em relação ao valor obtido, caso o escoamento não apresentasse tal região.

O escoamento crítico, também denominado escoamento bloqueado, corresponde à situação na qual o fluxo de massa, através do tubo capilar, deixa de ser função da pressão de evaporação. A pressão existente na extremidade do tubo, nessa condição, é chamada de pressão de bloqueio do escoamento. Quando a pressão de evaporação é inferior a essa pressão de bloqueio, o fluxo de massa se mantém praticamente constante. Isso ocorre porque, nessa situação,

um aumento no fluxo de massa, provocado pela redução da pressão na saída, teria de ser acompanhado pela redução da entropia do fluido, o que, no caso de escoamento adiabático, viria contrariar a segunda lei da termodinâmica.

Em situações reais de operação, os tubos capilares são submetidos a condições de funcionamento que levam ao aparecimento do escoamento bloqueado. Assim sendo, todos os testes serão realizados nessa condição. A confirmação dessa condição também será mostrada, através de experimentos.

Os tubos capilares apresentam as seguintes vantagens: i) são baratos, ii) não apresentam partes móveis, o que evita falhas e manutenção, iii) permitem a equalização das pressões do sistema durante os períodos de parada do compressor, o que minimiza o seu torque de partida e iv) permitem a operação do sistema em ciclo reverso.

As desvantagens do uso de um dispositivo de expansão tipo tubo capilar são as seguintes: i) manutenção de limites estreitos e rígidos para a carga de refrigerante no sistema, o que leva ao uso de sistemas herméticos, ii) necessidade de limpeza e desidratação rigorosas para impedir o entupimento do tubo, iii) queda de rendimento do sistema, devido à passagem de fluido refrigerante do condensador para o evaporador durante os períodos de parada do compressor, e iv) impossibilidade de se ajustar às variações de carga térmica.

As variações da carga térmica ou das condições de condensação provocam uma redução do coeficiente de performance, pois, como o tubo capilar não pode se ajustar, quem se ajusta é o sistema.

A forte influência do tubo capilar no desempenho dos sistemas de refrigeração faz com que esse componente tenha de ser adequadamente dimensionado. Uma técnica comumente usada para tal tem sido a utilização de um processo experimental do tipo tentativa e erro, denominado "cut-and-try" (cortar e tentar). Esse processo consiste na instalação do tubo capilar e na análise do desempenho do sistema, em função de variações promovidas no seu comprimento. Esse processo pode ser acelerado, estimando-se o comprimento inicial através de cartas fornecidas pela ASHRAE (1994).

Uma outra alternativa é procurar desenvolver modelos numéricos para simular o escoamento de fluido refrigerante em tubos capilares. Tais modelos são bastante versáteis e permitem, com relativa facilidade, analisar o desempenho de um dado tubo capilar, em função das condições de operação e do tipo de refrigerante. Entretanto, para que tais modelos possam gerar resultados confiáveis, eles precisam ser validados contra resultados experimentais consistentes.

Com esse objetivo em mente, desenvolveu-se uma bancada experimental que, além de gerar dados, necessários para o processo de validação, também permita a análise do escoamento. Neste trabalho serão apresentados os principais resultados de estudos experimentais prévios, a bancada experimental desenvolvida, o processo de calibração dos sistemas de medição, a caracterização geométrica dos tubos capilares ensaiados e os resultados das medições das características do escoamento com três diferentes fluidos refrigerantes (R12, R134a e R600a).

Os resultados foram obtidos em duas etapas. Na primeira, denominada medição global, mediram-se apenas as condições na entrada e na saída do tubo capilar além do fluxo de massa. Na segunda etapa, denominada medição distribuída, mediram-se, além do fluxo de massa, as condições do fluido, representadas pela pressão e temperatura locais, em vários pontos ao longo do tubo capilar.

Foi formado um banco de dados com mais de 700 pontos de medições globais e 189 pontos de medições distribuídas. Todas as grandezas apresentadas tiveram sua incerteza de medição avaliada e a pureza e a isenção de óleo do fluido refrigerante foram freqüentemente verificadas durante a realização do trabalho.

A ocorrência do escoamento bloqueado foi avaliada experimentalmente. O aparecimento da região de metaestabilidade foi comprovado pelas medições distribuídas. A realização de ensaios transientes, juntamente com as medições distribuídas, forneceu bons subsídios para o entendimento dos espalhamentos associados aos resultados obtidos nas medições globais.

Os resultados obtidos permitem, em uma etapa futura, desenvolver correlações para estimar a região de metaestabilidade, os fatores de fricção, tanto na região de escoamento de líquido como na região de escoamento bifásico, e a perda de carga na entrada do tubo capilar.

---

## 2 REVISÃO DOS ESTUDOS EXPERIMENTAIS JÁ REALIZADOS

---

A validação dos modelos computacionais que simulam o escoamento de fluido refrigerante em tubos capilares necessita de um banco de dados experimentais confiável. Tal banco deve conter, além das características geométricas dos tubos, o fluxo de massa e os estados termodinâmicos do fluido refrigerante na entrada e na saída do dispositivo de expansão, em diferentes condições de operação. Os estados termodinâmicos do fluido refrigerante ao longo do tubo capilar, obtidos através de medições de pressão e de temperatura, são também de fundamental importância, tanto para o melhor entendimento do escoamento, como para a validação e a melhoria dos modelos. Várias pesquisas já foram desenvolvidas para levantar tais dados.

Schulz (1985) apresentou uma visão do estado da arte no estudo do escoamento de fluidos refrigerantes em tubos capilares, onde são também comentados a maioria dos trabalhos de natureza experimental e teórica até então publicados. O artigo de Schulz foi dividido em vários aspectos, quais sejam: histórico, escoamento metaestável, escoamento bloqueado, fator de fricção nas regiões de escoamento de líquido e de escoamento bifásico, troca de calor entre o tubo capilar e a linha de sucção, enrolamento do tubo, presença de óleo no escoamento, projeto, instalação e influência do tubo capilar no desempenho global do sistema de refrigeração.

Na tabela 2.1, apresentam-se os principais trabalhos experimentais já realizados em tubos capilares, indicando-se as características de cada um. Os códigos, representando o tipo de abordagem empregada, significam o seguinte:

- |   |   |
|---|---|
| 1 - Condição na entrada e na saída        | 4 - Efeito do enrolamento do tubo             |
| 2 - Distribuição de temperatura e pressão | 5 - Efeito da mistura de óleo ao refrigerante |
| 3 - Escoamento crítico                    | 6 - Visualização do escoamento                |
|   | 7 - Escoamento metaestável                    |

TABELA 2.1 - Trabalhos experimentais já realizados

Autor (Ano)	Escoamento adiabático ou não adiabático	Abordagem empregada	Relações empíricas para o escoamento	Fator de fricção medido	Refrigerante usado
Swart (1946)	ambos	1,2		não	R12
Stabler (1948)	ambos	1	não	não	R12 e R22
Lathrop (1948)	adiabático	1,2		não	R12 e R22
Bolstad e Jordan (1949)	não adiabático	1,2,3,5	não	líquido e bifásico	R12
Marcy (1949)	adiabático	1 ar		não	R12 e SO <sub>2</sub>
Prosek (1953)	adiabático	1		não	ar
Whitesel (1957)	adiabático	1		não	R12 e R22
Cooper et al. (1957)	adiabático	1,3,6,7		não	R22
Ungar et al. (1963)	adiabático	1,4,5		não	R12
Mikol e Dudley (1964)	adiabático	1,2,3,6,7		líquido e bifásico	R12 e R22
Niaz e Davis (1969)	adiabático	1,2,3,7		não	R12 e R22
Scott (1976)	adiabático	1,4,7			R12
Rezk e Awn (1979)	adiabático	1,2,7	estudo paramétrico	não	R12
Koizumi e Yokoyama (1980)	adiabático	1,2,6,7	não	não	R22
Sweedyk (1981)	adiabático	1		rugosidade do tubo medida	N <sub>2</sub>
Rizza (1982)	adiabático	1	fator de fricção	líquido	R22
Pate (1982)	não adiabático	1,2,3,7	fator de fricção	líquido	R12
Maczek et al. (1983)	adiabático	1,2			R12
Kuipjers e Janssen (1983)	adiabático	1,3,7	metaestabilidade	não	R12
Kuehl (1987)	adiabático	1,4,5,7	fluxo de massa e fator de fricção	líquido	R22
Chen et al. e Li et al. ambos (1990)	adiabático	1,2	metaestabilidade	não	R12
Wijaya (1991)	adiabático	1,2 *	não	não	R12 e R134a
Dirik et al. (1994)	ambos	1,2 *	não	não	R134a
Melo et al. (1994)	adiabático	1,2,3,7	não	não	R12, R134a e R600a

(\*) somente distribuição de temperatura

Swart (1946) foi o primeiro a apresentar resultados experimentais para o escoamento de fluido refrigerante em tubos capilares. São apresentados gráficos da distribuição de pressão ao longo do tubo, onde podem ser observados um gradiente de pressão linear e um exponencial, respectivamente, nas regiões de escoamento de líquido e de escoamento bifásico. Os resultados apresentados não são, no entanto, suficientemente detalhados para permitir uma comparação com outros trabalhos mais recentes.

Stabler (1946) forneceu diagramas para seleção de tubos capilares. Tais diagramas foram obtidos empiricamente, associando a capacidade de bombeamento dos compressores à resistência dos tubos capilares para os refrigerantes R12 e R22. Entretanto, sua utilização é limitada, pois referem-se a trocadores de calor (tubo capilar-linha de sucção), sem que a geometria dessa associação seja apresentada.

Lathorp (1949) apresentou um estudo paramétrico sobre tubos capilares. Seus resultados foram mostrados na forma gráfica, relacionando fluxo de massa com diâmetro, comprimento, grau de subresfriamento na entrada e diferencial de pressão imposto ao tubo. A apresentação analítica dos resultados foi pobre, sendo fornecida apenas uma relação empírica grosseira.

Bolstad e Jordan (1948 e 1949) desenvolveram o primeiro trabalho marcante sobre escoamento de fluidos refrigerantes em tubos capilares. Eles instrumentaram um capilar com manômetros e termopares ao longo do comprimento. Os termopares foram posicionados demasiadamente afastados, o que gerou incerteza nos valores de temperatura. Isso fez com que a distribuição de temperatura se tornasse mais suave que a real, não permitindo identificar regiões de metaestabilidade.

Bolstad e Jordan determinaram os fatores de fricção, nas regiões de escoamento de líquido e de escoamento bifásico, usando tanto água como fluidos refrigerantes. Eles também estudaram o efeito da presença de óleo no fluido refrigerante, identificando um aumento do fluxo de massa de refrigerante quando misturado ao óleo. Esse aumento foi atribuído à diminuição da pressão de vaporização do fluido refrigerante, provocada pela presença do óleo, o que levaria a um aumento no comprimento da região de escoamento de líquido.



Marcy (1949) apresentou um processo de seleção de tubos capilares adiabáticos através da integração gráfica da equação para a perda de pressão por fricção proposta por Fanning. Marcy encontrou boa concordância com dados experimentais para o escoamento de R12 e SO<sub>2</sub>. Entretanto, os valores de pressão na entrada e de fluxo de massa considerados foram muito baixos, caracterizando condições de escoamento laminar, o que torna essa contribuição pouco significativa.

Prosek (1953) publicou diagramas de dimensionamento de tubos capilares adiabáticos. Nesse trabalho, o comprimento do tubo capilar é estimado em função do fluxo de massa, do diâmetro interno e da temperatura de condensação. Fatores de correção, para diferentes temperaturas de condensação e diâmetro interno, são também apresentados. Os fatores de correção para o diâmetro interno foram determinados através de testes com ar, não sendo considerados, portanto, os efeitos relativos à vaporização do refrigerante.

Whitesel (1957) apresentou um estudo teórico e experimental sobre o escoamento de R12 e R22 em tubos capilares. Seus testes experimentais foram realizados apenas com condições de saturação na entrada do tubo capilar e não foram realizadas medições de pressão e temperatura ao longo do tubo.

Cooper et al. (1957) apresentaram uma descrição detalhada dos padrões de escoamento bifásico, utilizando técnicas de visualização em um tubo capilar de vidro. Segundo eles, o escoamento bifásico é semelhante a uma névoa, aparentemente sem bolhas. Eles também verificaram que a localização do ponto de início de vaporização, no tubo capilar de vidro, variava mesmo que as demais condições fossem mantidas constantes. Essa variação podia, entretanto, ser interrompida através da inserção de um fio fino no escoamento.

Cooper et al. (1957) foram os primeiros a identificar o aparecimento de uma região de escoamento metaestável em tubos capilares. Eles mostraram o efeito do grau de subresfriamento, da pressão de entrada, do diâmetro e do comprimento do tubo na extensão dessa região. Seus resultados mostraram que o atraso no ponto de vaporização aumenta com o decréscimo do diâmetro interno, e com o aumento do comprimento, da pressão e do grau de subresfriamento na entrada. Essas observações podem ser resumidas afirmando-se que o atraso no ponto de

vaporização é uma função direta do gradiente de pressão produzido na região de escoamento de líquido subresfriado.

Ungar et al. (1963) realizaram testes com o R12, utilizando um tubo capilar com diâmetro de 0,028" (0,71 mm) com condições na entrada variando desde líquido subresfriado até mistura de líquido e vapor saturados. Eles foram os primeiros a estudar o efeito do enrolamento do tubo capilar sobre o escoamento. Ungar et al. enrolaram tubos com comprimento de 150" (3810 mm) e diâmetro de 0,028" (0,71 mm) em espiras de diâmetros iguais a 1/4" (6,35 mm) e 3/8" (9,52 mm), encontrando uma redução no fluxo de massa de até 16%. Ungar et al. verificaram, também, o efeito da concentração de óleo no refrigerante, identificando uma elevação de até 8% no fluxo de massa.

Mikol (1963) e Mikol e Dudley (1964) realizaram um estudo experimental detalhado em tubos capilares adiabáticos. Envolveram-se com um estudo de visualização do escoamento, utilizando um tubo capilar de vidro e, também, com a obtenção de dados ao longo de um tubo capilar de cobre. Mikol procurou assegurar que as tomadas de pressão não afetavam significativamente os padrões do escoamento. A investigação visual de Mikol estabeleceu a natureza dos padrões de escoamento nos tubos capilares adiabáticos.

Mikol e Dudley repetiram as observações de Cooper et al. (1957) registrando-as por meios fotográficos. Suas principais conclusões são apresentadas a seguir: i) tubos de cobre trefilados não podem ser considerados lisos na determinação do fator de fricção, ii) o escoamento através de tubos capilares obedece às mesmas equações aplicáveis a tubos de maiores diâmetros, iii) o fator de fricção na fase líquida pode ser obtido através do diagrama de Moody, iv) a metaestabilidade deve ser considerada no projeto de tubos capilares e v) o padrão de escoamento em tubos capilares pode ser descrito como um regime estável de escoamento de líquido subresfriado, seguido de uma região de escoamento de líquido metaestável e de um ponto de vaporização, o qual começa com a nucleação na parede do tubo e, posteriormente, origina uma mistura homogênea de vapor e líquido saturados.

O trabalho de Mikol e Dudley foi reforçado por Niaz e Davis (1969). Nesse caso o padrão de escoamento em névoa foi, também, identificado visualmente e o aparecimento de uma região

de escoamento metaestável ficou evidente. Eles apresentaram uma correlação para o fator de fricção na fase líquida, válida para um tubo com diâmetro de 0,068" (1,73 mm).

Erth (1969) alegou que a região de escoamento metaestável era uma anomalia produzida pelas condições de laboratório, apesar das descobertas de Cooper et al. e Mikol e Dudley. Scott (1976) testou vários tubos capilares, de diversos diâmetros e comprimentos, para estabelecer um conjunto de dados que pudesse dar origem às cartas de seleção idênticas às fornecidas pela ASHRAE(1974). Todos os seus testes utilizaram R12 em condição de escoamento adiabático. As condições de entrada foram variadas na faixa de 24 °F (13,3 °C) de grau de subresfriamento a títulos mássicos de até 19%.

Os padrões de escoamento apresentados por Cooper et al. e Mikol e Dudley foram novamente confirmados por Koizumi e Yokoyama (1980). Eles desenvolveram um estudo de visualização usando um tubo de vidro e também fizeram medições ao longo de tubos capilares de cobre e de aço inoxidável. Confirmou-se que o escoamento bifásico era homogêneo e que havia regiões de metaestabilidade.

Sweedyk (1981) estudou o procedimento de testes mais tarde padronizados pela ASHRAE (1988), para comparar o desempenho de tubos capilares. Foi observado que o fluxo de massa de nitrogênio seco em tubos de idênticas dimensões, mas provenientes de diferentes fornecedores, apresentava variações. Sweedyk mediu, então, a rugosidade de várias amostras de tubos capilares. Essas medições permitiram afirmar que a rugosidade da parede do tubo capilar varia grandemente de lote para lote e, é claro, de fornecedor para fornecedor. A incerteza na rugosidade da parede do tubo aumenta com a espessura de sua parede.

Tubos capilares não adiabáticos foram estudados por Pate (1982) e Pate e Tree (1986). Os dados obtidos por Pate foram usados para determinar o padrão do escoamento, para correlacionar os fatores de fricção nas regiões de escoamento de líquido e de escoamento bifásico e para validar um modelo computacional proposto.

Maczek et al. (1983) realizaram estudos experimentais e numéricos. Seus resultados numéricos, no entanto, não concordaram com os experimentais, levando-os a sugerir maior

esforço na obtenção de dados experimentais que subsidiassem a modelação numérica. Seus resultados experimentais indicaram, também, a presença de regiões de metaestabilidade.

Os efeitos da metaestabilidade sobre o escoamento de fluidos refrigerantes em tubos capilares foram estudados por Kuipjers e Janssen (1983). Eles assumiram um modelo de escoamento bifásico homogêneo e arbitraram o comprimento da região de metaestabilidade. Através de numerosos experimentos com tubos capilares adiabáticos, Kuipjers e Janssen tentaram correlacionar a metaestabilidade com o fluxo de massa e com o grau de subresfriamento. Eles sugeriram que a turbulência apresenta um papel importante na extensão da região de metaestabilidade.

Kuehl (1987) e Kuehl e Goldschmidt (1990) testaram vários tubos capilares, registrando o fluxo de massa e as condições na entrada e na saída. Eles verificaram que o enrolamento do tubo em espiras provoca um aumento de 5% na perda de pressão.

Chen et al. (1990) e Li et al. (1990) testaram dois tubos capilares, ambos de 1,5 m de comprimento, um com 0,66 mm e outro com 1,17 mm de diâmetro interno. Os resultados obtidos foram empregados em conjunto com a teoria clássica da nucleação, para modelar a perda de pressão na região de metaestabilidade. A correlação obtida apresentou erro de 26% em relação aos dados experimentais.

Wijaya (1991) realizou medições do fluxo de massa, das pressões na entrada e na saída, além da temperatura em vários pontos ao longo de alguns tubos capilares, utilizando R12 e R134a. Wijaya testou também o efeito da concentração de óleo no fluido refrigerante e não identificou qualquer efeito significativo.

Dirik et al. (1994) realizaram um trabalho numérico e experimental em tubos capilares adiabáticos com R134a. Seus resultados experimentais permitiram observar uma pequena região de metaestabilidade, a qual não foi considerada em seu modelo numérico.

Melo et al. (1992) propuseram um modelo numérico e apresentaram uma análise crítica, realizando comparações com dados experimentais disponíveis. Uma análise da sensibilidade do modelo em relação aos seus parâmetros básicos foi também apresentada. Esse modelo numérico,

denominado CAPILAR, foi refinado por Boabaid (1994), que o utilizou para comparação com os dados experimentais obtidos neste trabalho.

A análise de sensibilidade apresentada por Melo et al. mostrou uma grande dependência do modelo em relação às relações constitutivas e às características geométricas dos tubos capilares. Foi sugerida a realização de experimentos onde todas as variáveis fossem rigorosamente controladas, para possibilitar o entendimento do escoamento e, assim, melhorar o desempenho dos modelos existentes. Tais sugestões serviram como motivação e foram seguidas na construção de uma bancada e na realização de medições, conforme apresentado nos capítulos a seguir.

---

## 3 DESCRIÇÃO DA BANCADA DE ENSAIO DE TUBOS CAPILARES (BETC)

---

### 3.1 Introdução

A Bancada de Ensaio de Tubos Capilares (BETC) é um sistema de refrigeração instrumentado para controlar e medir as características do escoamento do fluido refrigerante através de um dispositivo de expansão tipo tubo capilar.

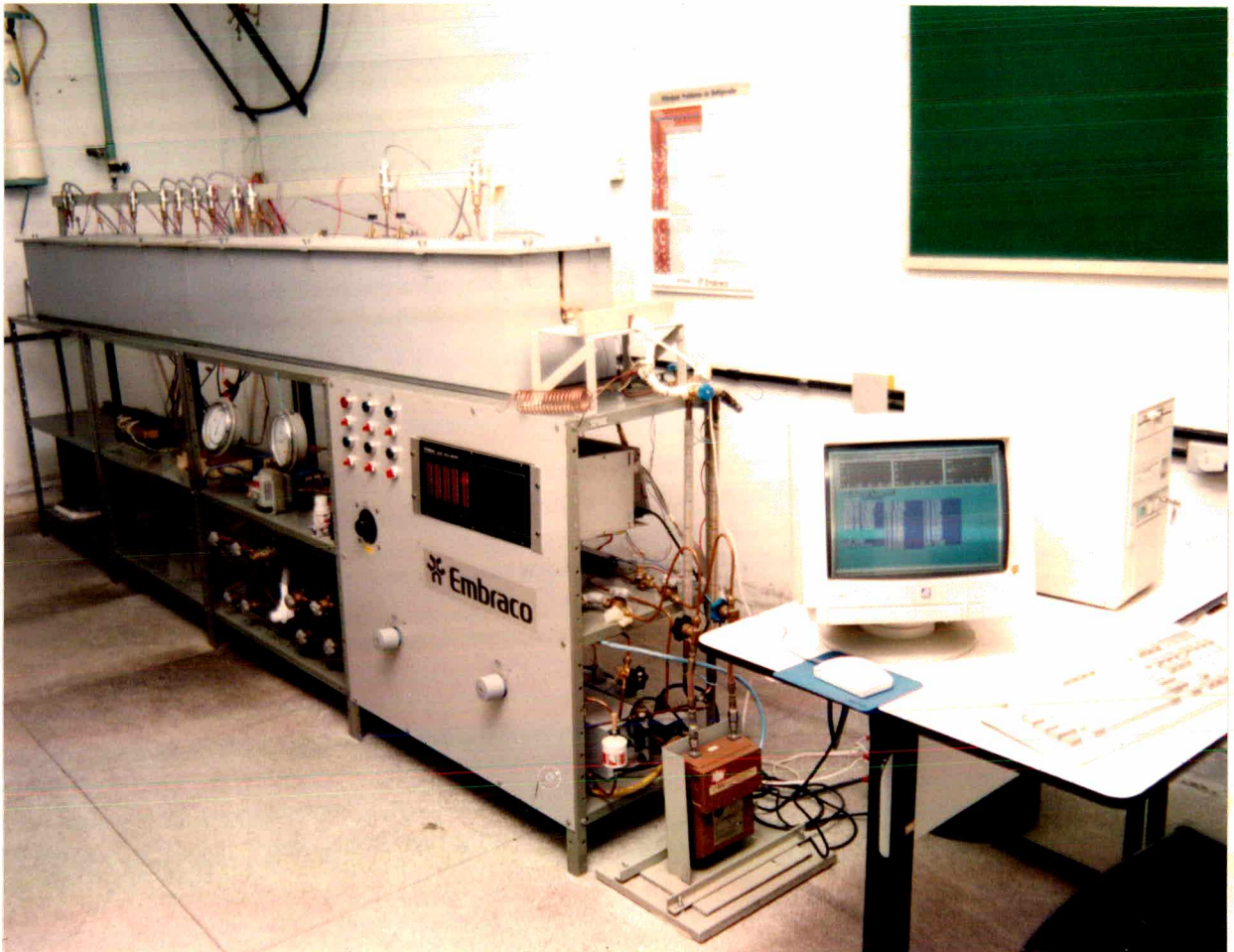
As características fundamentais do escoamento são: o fluxo de massa, os estados termodinâmicos do fluido refrigerante e as características geométricas do tubo capilar: comprimento, diâmetro e rugosidade da superfície interna. Tais características permitem descrever completamente o escoamento de um determinado fluido refrigerante puro, isento de óleo ou qualquer outra impureza, através de um tubo capilar isolado termicamente (adiabático), reto e horizontal.

Essa bancada encontra-se montada no Laboratório de Ciências Térmicas do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, numa sala climatizada, onde foram observadas as normas de segurança contra incêndio. A construção da bancada foi totalmente suportada pela EMBRACO - Empresa Brasileira de Compressores S.A.

Na figura 3.1, é apresentada uma visão geral da BETC.

A BETC compõe-se basicamente de três sistemas, quais sejam: i) Sistema de refrigeração, ii) Sistema elétrico e iii) Sistema de medição.

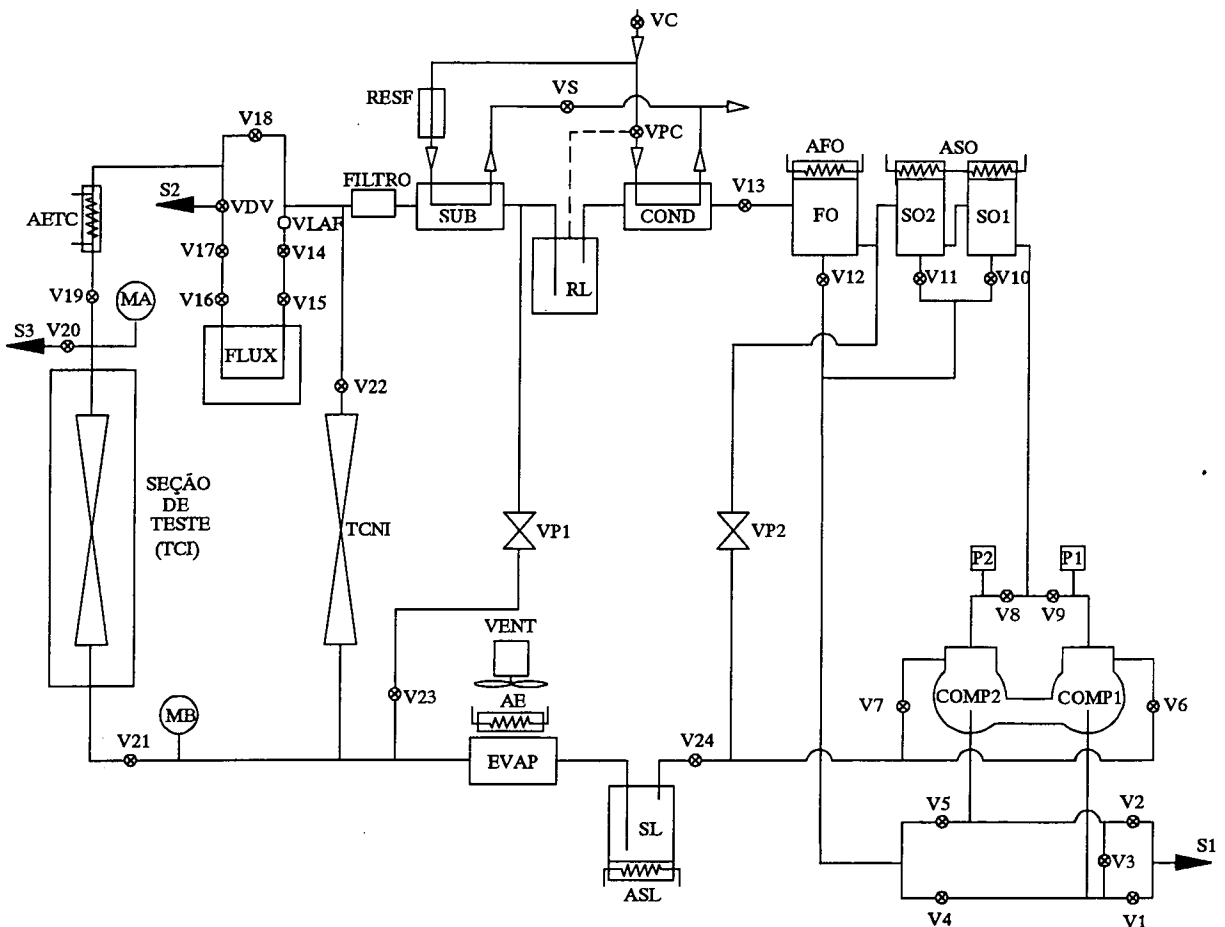
Tais sistemas serão apresentados a seguir, e ao final se fará a descrição do funcionamento da BETC.



**FIGURA 3.1 - Vista geral da BETC**

### **3.2 Sistema de refrigeração da BETC**

O diagrama do sistema de refrigeração da BETC é apresentado na figura 3.2 com seus componentes codificados. No apêndice I.1, apresenta-se a listagem dos códigos com suas respectivas denominações.



**FIGURA 3.2 - Diagrama do sistema de refrigeração da BETC**

O sistema de refrigeração da BETC é um sistema por compressão mecânica de vapores com quatro dispositivos de expansão em paralelo, quais sejam: o tubo capilar instrumentado (TCI), da seção de teste, um tubo capilar não instrumentado (TCNI) e duas válvulas de expansão pressostáticas (VP1 e VP2) que controlam a pressão de evaporação.

O tubo capilar não instrumentado (TCNI) é utilizado apenas quando se deseja interromper o fluxo de refrigerante através da seção de teste, para alguma modificação, o que evita a parada da instalação e permite uma volta mais rápida às condições de teste.

A pressão de condensação é controlada pela troca de calor no condensador através de uma válvula pilotada pela pressão de condensação (VPC). Essa válvula regula o fluxo de água através do condensador mantendo, assim, a pressão de condensação no valor desejado.



O subresfriamento na entrada do TCI é controlado pelo resfriamento fornecido pelo subresfriador (SUB) e pelo aquecimento fornecido pelo aquecedor da entrada do tubo capilar (AETC). O subresfriador produz um subresfriamento maior que o valor desejado, e o ajuste fino é obtido pela variação da tensão aplicada ao aquecedor.

Deve-se ressaltar que o controle das pressões de evaporação e de condensação e do grau de subresfriamento na entrada do tubo capilar não são totalmente independentes, tendo-se observado um certo inter-relacionamento entre eles.

Os compressores herméticos usados na BETC têm suas carcaças interligadas por um tubo de grande diâmetro ( $\varnothing \cong 2''$ ), o qual permite a equalização das pressões, evitando assim problemas com retorno de óleo para o compressor. Os compressores são protegidos por dois pressostatos (P1 e P2) que têm como valor limite a pressão de 20 bar.

A separação do óleo se faz na descarga dos compressores através de dois separadores (SO1 e SO2) e de um filtro (FO) instalados em série. Esses elementos são aquecidos através de aquecedores (ASO e AFO), facilitando, assim, o processo de separação do óleo do vapor de fluido refrigerante. Os separadores têm sistema automático de retorno do óleo, enquanto o filtro necessita de retorno manual.

A bancada apresenta várias válvulas e três conexões de serviço (S1 a S3), posicionadas estrategicamente, as quais têm como objetivo facilitar a manutenção parcial do sistema.

A válvula V18, quando aberta, permite, por exemplo, o funcionamento da bancada sem a medição de fluxo de massa durante as fases de manutenção, teste ou calibração do fluxímetro. A estanqueidade dessa válvula foi verificada através de testes de pressurização.

Os manômetros de alta (MA) e de baixa (MB) indicam, respectivamente, as pressões de condensação e de evaporação e servem apenas como referência durante a operação da bancada.

O evaporador (EVAP) assim como o separador de líquido (SL) utilizam aquecedores (AE e ASL) que evitam a formação de gelo sobre os eles.

### 3.3 Sistema elétrico da BETC

O circuito elétrico da BETC é composto de alguns equipamentos independentes (figura 3.3.a) e dos circuitos de comando (figura 3.3.b) e de força (figura 3.3.c). No apêndice I.2, apresenta-se a relação dos componentes do sistema elétrico, de acordo com os códigos indicados na figura 3.3.

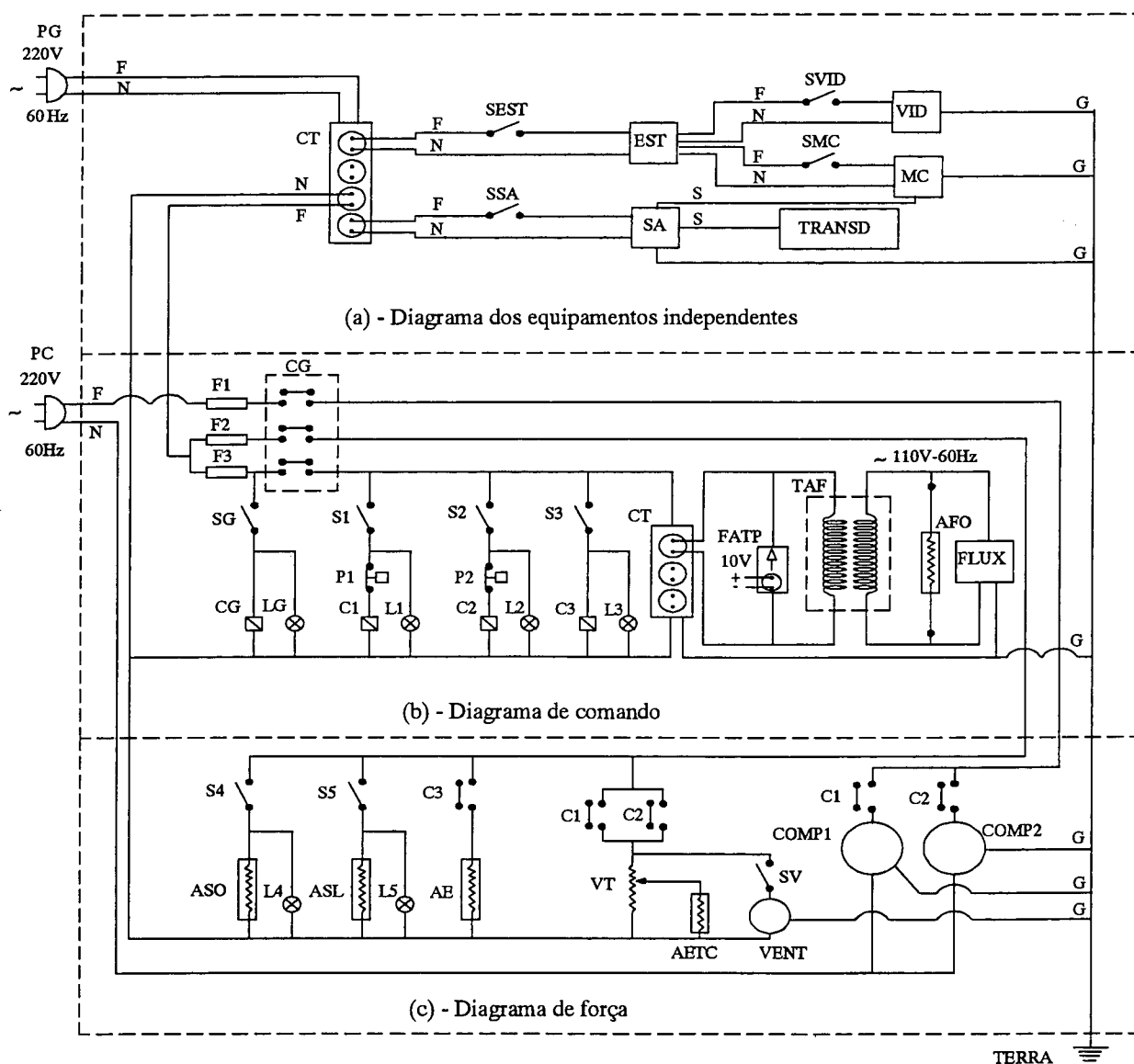


FIGURA 3.3 - Diagrama do sistema elétrico da BETC

As linhas mostradas na figura 3.3, representam a fiação que interliga os componentes elétricos da BETC as quais são dos seguintes tipos: fase(F), neutro(N), sinal(S) e terra(G).

Os elementos denominados por CT representam tomadas adicionais que podem ser usadas por outros equipamentos durante a manutenção, teste ou calibração da BETC.

Os equipamentos independentes da BETC: estabilizador de tensão (EST), microcomputador (MC), vídeo (VID) e sistema de aquisição (SA) apresentam chaves individuais (SEST, SMC, SVID e SSA), incorporadas em suas estruturas, as quais são acionadas independentemente do comando geral da bancada.

Deve-se observar a adequada ligação dos plugs (PG e PC) da bancada à tomada para não trocar a polaridade dos fios fase pelo neutro, o que pode provocar sua energização inadequada, com risco de choque elétrico ao operador e/ou curto circuito em qualquer de seus componentes.

A bancada usa quatro chaves contactoras: uma para seu acionamento geral (CG), duas para acionamento dos compressores (C1 e C2) e a outra para o acionamento do aquecedor do evaporador (C3). Chaves simples são usadas para o acionamento dos demais componentes de menor potência.

A chave contactora geral energiza todo o circuito de comando e promove a alimentação do fluxímetro, dos transdutores de pressão e do aquecedor do filtro de separação de óleo (FO).

O aquecedor da entrada do tubo capilar (AETC) e o ventilador do evaporador (VENT) são comandados pelas chaves dos compressores. O ventilador tem, também, uma chave (SV) independente e o aquecedor, um variador de tensão (VT) que pode inclusive cortar completamente sua alimentação.

Os compressores são comandados, independentemente, por chaves contactoras e protegidos por pressostatos que os desligam quando a pressão de descarga ultrapassa 20 bar.

A bancada é alimentada com energia elétrica a 220 V e 60 Hz, sendo o fluxímetro e o aquecedor do filtro de óleo alimentados por um transformador (TAF) que fornece uma tensão de 110 V. Os transdutores de pressão são alimentados por uma fonte (FATP) que fornece corrente estabilizada contínua com tensão de 10 V.

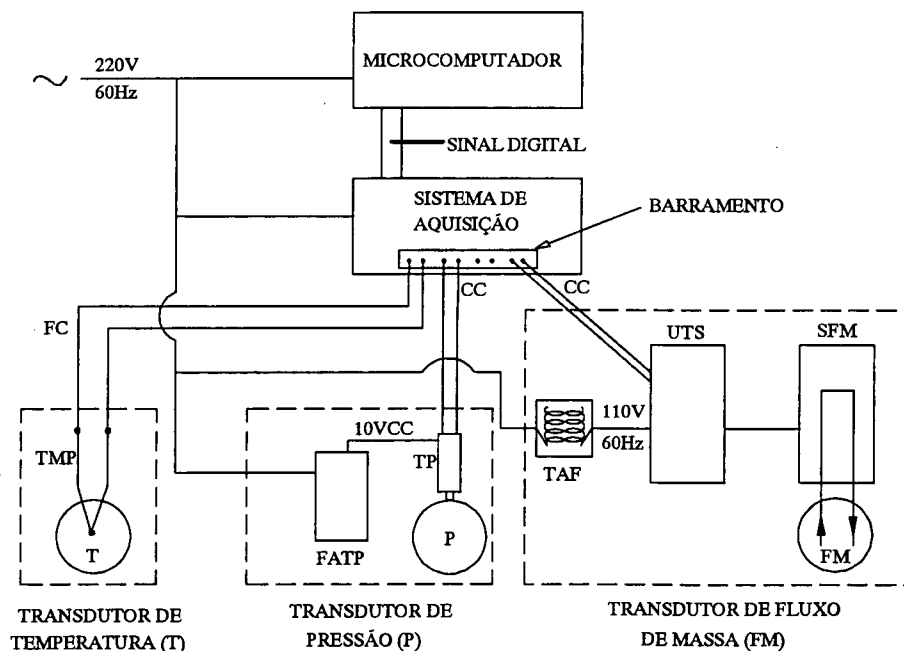
São usados fusíveis (F1, F2 e F3) tipo diazed para proteção dos circuitos de comando e de força da BETC, com as seguintes correntes limites de interrupção: F1 = 20 A, F2 = 10 A e F3 = 5 A.

### 3.4 Sistema de medição da BETC

O sistema de medição completo da BETC se subdivide em três sistemas de medição menores, quais sejam: i) Sistema de Medição de Temperatura (SMT), ii) Sistema de Medição de Pressão (SMP) e iii) Sistema de Medição de Fluxo de Massa (SMFM).

Os sistemas de medição têm seus transdutores independentes, conectados a um mesmo sistema de aquisição através de um barramento. O sistema de aquisição trata os sinais fornecidos pelos transdutores na forma de tensão elétrica analógica e os envia ao microcomputador na forma digital.

Na figura 3.4, é apresentado o sistema de medição da BETC. A descrição da codificação de seus elementos é apresentada no apêndice I.



**FIGURA 3.4 - Diagrama do sistema de medição da BETC**

A bancada utiliza um microcomputador tipo PC AT 386/40 MHz.

O sistema de aquisição é constituído do datalogger modelo DLE2, com 60 canais disponíveis para aquisição de sinais de tensão e corrente, respectivamente nas faixas de -5 a +5 V e 0 a 40 mA e numa frequência máxima de aquisição igual a 100 kHz.

O programa computacional do sistema de aquisição permite, através de uma programação simples, aplicar funções de transferência com até grau 5, além de um fator multiplicativo e/ou aditivo, sobre os sinais adquiridos. Esse permite, também, apresentar numérica e/ou graficamente as leituras na tela do microcomputador, durante as medições.

As medições de temperatura foram efetuadas com termopares (TMP) tipo T, com 0,13 mm de diâmetro, marca OMEGA.

Os termopares foram soldados por brasagem com estanho a fios de compensação (FC) tipo T (Cu-Co), bitola 24 AWG, com comprimentos de, aproximadamente, dois metros, que permitiam a sua ligação ao barramento do sistema de aquisição.

O barramento do sistema de aquisição consiste em uma barra de cobre que tem sua temperatura medida por um termistor tipo NTC 5000, fabricado pela OMEGA.

O barramento é montado dentro de uma caixa metálica com isolamento térmico, o que garante a homogeneidade de sua temperatura, cujo valor é utilizado como referência para as indicações fornecidas pelos termopares.

Os transdutores de pressão (TP) são constituídos por extensômetros (strain gauges), instalados em circuitos de ponte de Wheatstone sobre uma câmara externamente submetida a vácuo, na qual, internamente, se aplica o sinal de pressão que se quer medir. Esses transdutores fornecem, como sinal de saída, uma tensão elétrica em milivolts proporcional à pressão absoluta aplicada. São da marca HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik), modelo P3MA. A alimentação dos transdutores é feita por uma fonte (FATP) que fornece corrente estabilizada contínua com tensão de 10 V.

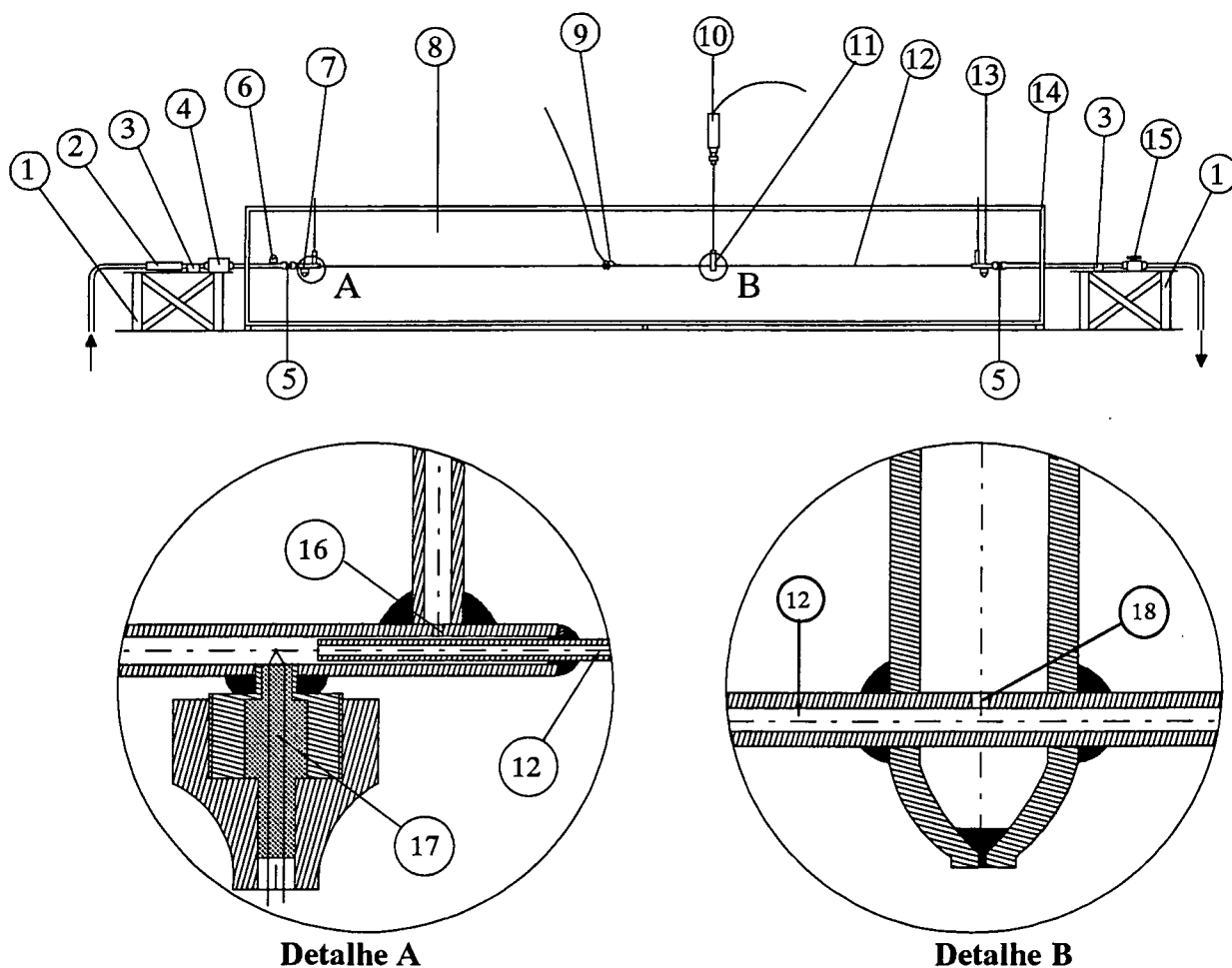
O sistema de medição de fluxo de massa (SMFM) utiliza um transdutor tipo Coriolis que fornece um sinal proporcional ao fluxo de massa a ele aplicado (Plache, 1977).

O transdutor do SMFM, denominado fluxímetro, compõe-se, basicamente, de um sensor (SFM) e de uma unidade de tratamento de sinal (UTS) alimentados por um transformador (TAF) que fornece energia elétrica a 110 V e 60 Hz. A unidade de tratamento recebe o sinal na forma de onda quadrada de tensão elétrica, caracterizado pela sua frequência proporcional ao fluxo de massa, e o converte em um sinal analógico de tensão elétrica para ser, então, enviado ao sistema de aquisição. O fluxímetro é de fabricação MICRO MOTION, modelo D6.

Os sinais do fluxímetro e dos transdutores de pressão são transmitidos ao sistema de aquisição por cabos coaxiais (CC) com aproximadamente 2 m de comprimento.

### 3.5 Seção de teste da BETC

Na figura 3.5, é apresentada a seção de teste da BETC.



**FIGURA 3.5 - Seção de teste da BETC**

No apêndice I.4, apresenta-se a denominação dos itens enumerados na figura 3.5.

O tubo capilar instrumentado (12) foi montado no interior de uma caixa de madeira (14) parcialmente desmontável, preenchida com lã de vidro (8), para propiciar um isolamento térmico que garantisse a ocorrência de escoamento adiabático ao longo do tubo capilar. Primeiramente, colocou-se sobre o tubo capilar uma camada de aproximadamente 10 cm de diâmetro de lã de vidro, fortemente compactada, e coberta com plástico, para formar uma barreira contra a umidade e, posteriormente, completou-se o enchimento da caixa, com menor compactação.

O tubo foi preso pelas extremidades por presilhas (3), sobre bases rígidas (1) que permitiam o seu tensionamento, deixando-o rígido e retilíneo. Ele foi montado entre conexões (5), facilmente desmontáveis, durante os processos de montagem, desmontagem e manutenção sem a necessidade de se promover qualquer alteração em suas conexões de entrada e saída.

Sobre a base de sustentação da entrada do capilar, dispôs-se um filtro de nylon (2) e um visor de líquido (4). O filtro impede a passagem de eventuais resíduos. O visor de líquido permite que o operador verifique a ocorrência de bolhas na entrada do tubo capilar.

As conexões de entrada (7) e de saída (13) do tubo capilar são iguais. No detalhe A, da figura 3.5, é mostrada, em corte, a conexão de entrada onde se vê a tomada de pressão (16) e a conexão do termopar (17). A tomada de pressão está localizada a 15 mm da extremidade do capilar e o termopar, instalado internamente ao escoamento, fica afastado 5 mm da extremidade do tubo.

Ao longo da superfície externa do tubo capilar, foram instalados vários termopares (9). Seu posicionamento é indicado no capítulo 5. Além dos termopares instalados internamente ao escoamento, nas conexões de entrada e de saída, foi instalado um outro (6) à montante da conexão de entrada e para cada um desses termopares instalados internamente foi colocado um outro externamente. Ao final, foram utilizadas somente as indicações dos termopares instalados sobre o tubo capilar e os montados internamente ao escoamento nas conexões de entrada e de saída; os demais serviram apenas para verificação.

Os termopares colocados na superfície externa dos tubos foram dispostos em locais previamente envernizados e envolvidos por massa térmica. Sua fixação foi feita por fita adesiva, tendo-se o cuidado de enrolá-los duas vezes ao redor do tubo para evitar o efeito aleta.

As tomadas de pressão (11) efetuadas ao longo do tubo capilar são mostradas, em corte, no detalhe B, da figura 3.5. A furação do tubo capilar (18) foi realizada por eletro-erosão com diâmetro de 0,3 mm.

Foram realizadas furações prévias em amostras que tiveram suas seções transversais cortadas, lixadas e polidas de tal forma a deixar aparente a furação, as quais foram ampliadas. Verificou-se que a qualidade do acabamento e o aparecimento de rebarbas em tais furações eram dependentes da velocidade de corte e da corrente utilizada no processo. Tais parâmetros foram otimizados para se obter furações com bom acabamento e isentas de rebarbas. As possíveis influências de tais furações serão verificadas na apresentação dos resultados, no capítulo 6.

### **3.6 Funcionamento da BETC**

O funcionamento da BETC pode ser dividido em quatro etapas, conforme descrito a seguir.

A primeira etapa consiste em acionar os seus componentes e aguardar aproximadamente quinze minutos para se atingir a estabilidade das suas condições de funcionamento.

Os componentes atuados nessa etapa são: o comando geral da bancada (SG), os compressores (S1 e S2), o aquecedor do separador de óleo (S4), a água de condensação (VC) e os componentes independentes do circuito elétrico: o estabilizador de tensão (SEST), o microcomputador (SMC) e seu vídeo (SVID) e o sistema de aquisição (SSA).

Nessa primeira etapa, pode-se também ligar os aquecedores do evaporador (S3) e do separador de líquido (S5) e a ventilação do evaporador (SV) conforme a necessidade.

Os procedimentos descritos anteriormente pressupõem que a bancada, quando desligada, permaneceu com as válvulas do sistema de refrigeração nas situações normais de funcionamento, ou seja, mantiveram-se fechadas as válvulas de serviço (VDV-via S2, V1, V2, V20), a válvula de



by-pass do fluxímetro (V18), a válvula do retorno de óleo do filtro (V12) e a válvula do capilar não instrumentado (V22), enquanto as demais válvulas permaneceram abertas.

Uma válvula que geralmente não se encontra na condição normal de funcionamento e precisa ser atuada (fechada) é a válvula de retorno de óleo do filtro (V12), por ser geralmente aberta no final dos períodos de funcionamento da BETC, para propiciar o retorno do óleo retido no filtro com a ajuda do diferencial de pressão existente entre o filtro de óleo e a carcaça dos compressores.

Ainda na etapa de ligação da BETC, acompanha-se, na tela do microcomputador, a evolução das condições de funcionamento, como forma de se decidir o momento de iniciar a segunda etapa.

A segunda etapa do funcionamento corresponde à realização do controle das condições de funcionamento. Tais controles referem-se às pressões de baixa e de alta, e ao grau de subresfriamento na entrada do tubo capilar.

A pressão de evaporação é controlada através das válvulas pressostáticas VP1 e VP2. Essas válvulas, ao serem abertas, aumentam a passagem de fluido refrigerante ao evaporador, aumentando, assim, sua pressão de evaporação. Quando as válvulas VP1 e VP2 são fechadas, atinge-se um valor mínimo da ordem de 0,5 bar.

Para se manter a pressão na saída do tubo capilar sempre abaixo da pressão de blocagem (crítica), manteve-se seu valor em torno de 1 bar.

A pressão de condensação é controlada através de uma válvula pressostática, pilotada pela pressão de condensação, que a mantém no valor desejado através da regulagem do fluxo de água que passa pelo condensador.

O controle do subresfriamento foi obtido produzindo-se um subresfriamento maior que o desejado, no subresfriador (VS), e ajustando-o através de um aquecedor disposto na entrada do tubo capilar (AETC), controlado por um variador de tensão (VT).

Realizados os procedimentos de controle, anteriormente descritos, mantinha-se a bancada funcionando por aproximadamente 1,5 horas, antes da realização dos testes em condições

estabilizadas. Após esse período inicial, a bancada requeria cerca de 15 minutos, para voltar às condições de estabilização, sempre que o grau de subresfriamento era alterado.

A terceira etapa de funcionamento, caracterizada pelas medições, é o período no qual se mantém a bancada funcionando sem se alterar seus controles, de forma a se obter um teste suficientemente estabilizado, enquanto se procede à aquisição (gravação) das grandezas medidas.

A quarta e última etapa de funcionamento da BETC consiste no seu desligamento, quando são atuados em sentido contrário os mesmos componentes acionados durante a primeira etapa. Geralmente, nessa etapa, procede-se à abertura da válvula V12 para possibilitar o retorno de óleo do filtro (FO).

---

## 4 CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO (SMs) DA BETC

---

### 4.1 Introdução

As curvas de calibração e as incertezas de medição são de fundamental importância na qualificação dos resultados experimentais obtidos (Benedict, 1976). Neste capítulo, será apresentada a calibração dos sistemas de medição (SMs), descrevendo-se os aparatos, os processos, as curvas de calibração e as incertezas de medição para os três SMs da BETC, quais sejam: i) SMT - Sistema de Medição de Temperatura, ii) SMP - Sistema de Medição de Pressão e iii) SMFM - Sistema de Medição de Fluxo de Massa.

Para eliminar as inconveniências advindas da composição dos SMs por subsistemas calibrados em separado, eles foram calibrados *in loco*, mantendo-se suas características de instalação e operação.

O pleno entendimento do funcionamento dos SMs facilita a compreensão do assunto aqui abordado, cabendo, portanto, lembrar que as suas descrições são apresentadas no capítulo 3.

As curvas de calibração dos SMs foram obtidas pelo método dos mínimos quadrados, na forma de polinômios com graus entre zero e cinco de tal forma a satisfazer as exigências do sistema de aquisição da BETC. O grau do polinômio de cada curva de calibração, em particular, foi escolhido pelo critério do menor erro padrão da estimativa (EPE), conforme a equação a seguir (ASTM, 1970).

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum (Y_{Ci} - Y_{Mi})^2}{N - (1 + P)}} \quad (4.1)$$

onde: EPE - Erro padrão da estimativa

$Y_{Ci}$  - Valor calculado pela curva de calibração no  $i$ ésimo ponto de calibração

$Y_{Mi}$  - Valor medido no  $i$ ésimo ponto de calibração

$N$  - Número de pontos de calibração

$P$  - Grau do polinômio da curva de calibração

O EPE foi também usado na caracterização da incerteza de medição causada pelo ajuste das curvas de calibração.

As incertezas de medição foram avaliadas para fornecerem um enquadramento de 95% das medições realizadas, considerando-se uma distribuição normal (gaussiana) dos resultados de tais medições (Moffat, 1988 e Taylor, 1982). Assim sendo, seu valor foi calculado através do produto do desvio padrão pelo coeficiente de Student correspondente ao número de pontos da amostra em questão e a um enquadramento de 95% dos resultados, como indicado na equação a seguir:

$$IM = DP \cdot ST \quad (4.2)$$

onde: IM - Incerteza de medição

DP - Desvio padrão

ST - Coeficiente de Student

O desvio padrão é dado pela equação a seguir (Moffat, 1988):

$$DP = \sqrt{\frac{\sum (V_i - V_m)^2}{(N - 1)}} \quad (4.3)$$

onde: DP - Desvio padrão de uma amostra com N elementos

$V_i$  - Valor da  $i$ ésima leitura da amostra

$V_m$  - Valor da média aritmética das leituras da amostra

N - Número de elementos da amostra

Na tabela 4.1, são apresentados valores de coeficientes de Student (ST) em relação ao número de pontos da amostra (N) para um enquadramento de 95%, dentro da banda estabelecida pela incerteza de medição a ser obtida (Spiegel, 1985).

**TABELA 4.1 - Coeficientes de Student para 95% de enquadramento**

Número de pontos da amostra (N)	Coefficiente de Student (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
N > 200	1,96

Quando as incertezas de medição são provenientes de diversas fontes, suas origens são consideradas como independentes uma das outras e sua composição feita pela combinação quadrática das incertezas (Moffat, 1988), como segue,

$$IMr = \sqrt{\sum IMi^2} \quad (4.4)$$

onde: IMr - Incerteza de medição resultante da combinação quadrática

IMi - Iésima incerteza de medição independente

## 4.2 Calibração do Sistema de Medição de Temperatura (SMT)

### 4.2.1 Introdução

O SMT realiza a medição de temperatura através de termopares que têm sua junta de referência estabelecida no barramento do sistema de aquisição sob condição ambiente, cuja temperatura é medida por um termistor tipo NTC. Como essa temperatura é variável, faz-se necessário o uso de uma temperatura de referência constante, para se estabelecer uma relação única e determinada (curva de calibração) entre as diferenças de potencial elétrico (DDPs) geradas pelos termopares e as diferenças de temperatura correspondentes.

Obteve-se uma temperatura de referência constante de 0 °C, convertendo-se a temperatura da junta de referência do SMT em uma DDP a partir da função inversa da curva de calibração com referência a 0 °C. Isso significa admitir a presença de um termopar fictício entre a junta de referência do SMT e a junta de referência fictícia a 0 °C. Das leis de comportamento dos termopares (ASTM, 1970), sabe-se que, se um termopar produz uma diferença de potencial DDP0, quando suas junções estão nas temperaturas T0 e T1, e uma diferença de potencial DDP1, quando suas junções estão nas temperaturas T1 e T2, ele produzirá uma diferença de potencial DDP0+DDP1, quando as junções estiverem nas temperaturas de T0 e T2. Logo, somou-se a

DDP fictícia, obtida do termopar fictício entre as temperaturas de 0 °C e a temperatura ambiente, com a DDP efetivamente produzida pelo termopar colocado entre a temperatura ambiente e a temperatura que se quer medir. A DDP resultante seria produzida por um termopar que estivesse entre a temperatura que se quer medir e 0 °C. Essa DDP é, finalmente, convertida para temperatura através da curva de calibração, com referência a 0 °C.

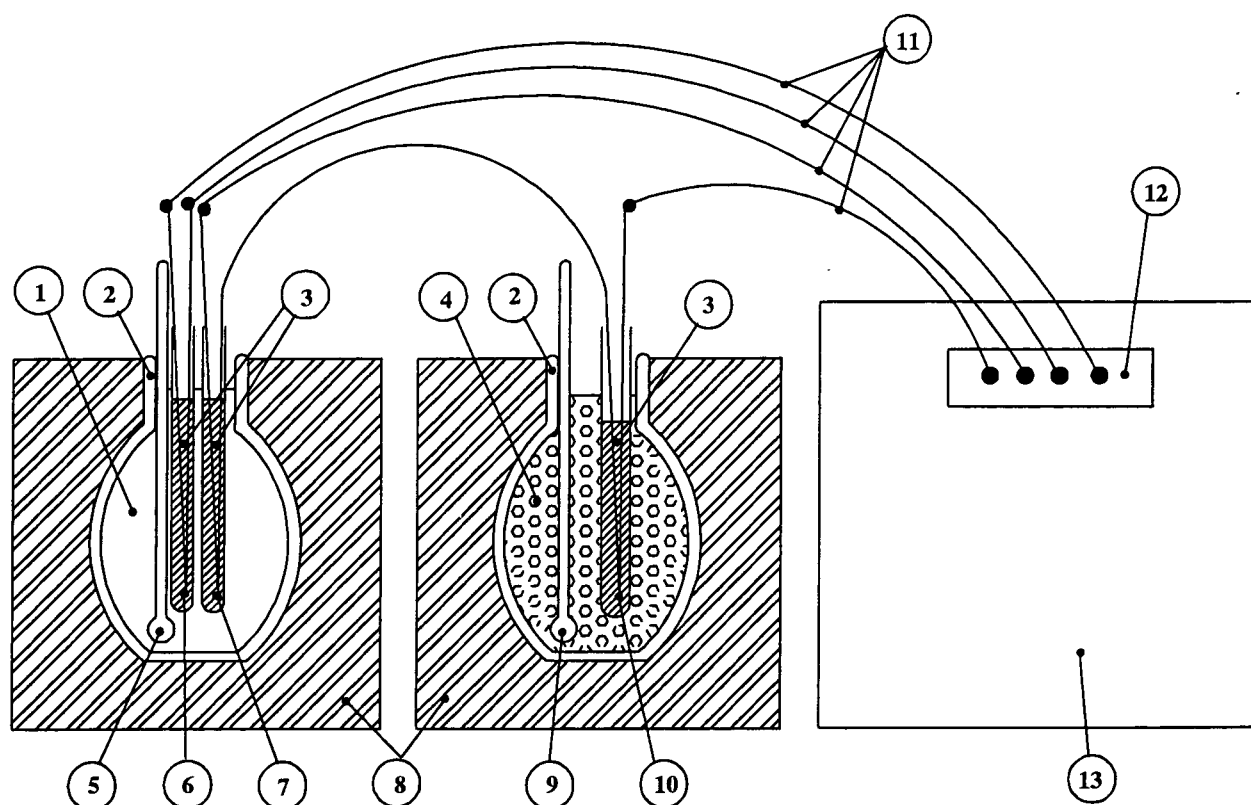
A temperatura de 0 °C foi tomada como referência em função de existirem dados padrões que possibilitam a comparação com os resultados da calibração e também em função da facilidade de se obter tal temperatura através de um banho de gelo fundente.

A calibração do SMT baseou-se, portanto, na obtenção da curva de calibração dos termopares com junta de referência a 0 °C, juntamente com sua inversa. Tais curvas foram inseridas no sistema de aquisição, seguindo o processo descrito anteriormente, a fim de possibilitar as medições de temperatura.

A seguir serão apresentadas a calibração do SMT, através de um termopar com junta de referência em banho de gelo fundente, a comparação dessa curva de calibração com a curva padrão e a verificação das medições realizadas com a curva de calibração previamente obtida através de sete termopares, também instalados no aparato de calibração, e com sua junta de referência estabelecida no barramento do SMT.

#### **4.2.2 Descrição do aparato de calibração do SMT**

O aparato de calibração do SMT era constituído por um recipiente onde um banho de água era mantido à temperatura constante. Nesse recipiente foram imersos um termômetro padrão, o termopar com junta de referência mantida num banho de gelo fundente e os termopares com junta de referência no SMT. O esquema de tal aparato é mostrado na figura 4.1.



- |  |   |
|--|---|
| 1 - Banho de água                            | 8 - Isolamento dos recipientes            |
| 2 - Recipientes                              | 9 - Termômetro do banho de gelo fundente  |
| 3 - Envólucros com óleo                      | 10 - Junta de referência em gelo fundente |
| 4 - Banho de gelo fundente                   | 11 - Fios de compensação tipo T           |
| 5 - Termômetro padrão                        | 12 - Junta de referência do SMT           |
| 6 - Termopares com referência no SMT (sete)  | 13 - Sistema de aquisição da BETC         |
| 7 - Termopar com referência em gelo fundente |   |

**FIGURA 4.1 - Esquema do aparato de calibração do SMT**

O termopar com junta de referência em gelo fundente foi usado na obtenção da curva de calibração, enquanto os outros sete termopares, com junta de referência no SMT, foram usados na verificação da adequabilidade do processo de medição de temperatura adotado.

Os recipientes possuíam um isolamento térmico adequado, o que permitia a obtenção de banhos com temperatura constante.



Foram empregados dois termômetros padrões, tipo coluna de mercúrio, marca INCOTERM, com divisão de escala de 0,1 °C, sendo um com escala de 0 a 50 °C e outro com escala de 50 a 100 °C. Esses termômetros foram aferidos pelo LabMetro-UFSC, antes da sua utilização, contra padrões certificados. Foi, também, avaliado o efeito da sua imersão parcial sobre as indicações. Os erros e efeitos de imersão encontrados foram adequadamente considerados durante sua utilização.

A temperatura do banho foi variada, misturando-se água à temperatura ambiente com água fria ( $\approx 0$  °C) ou água quente ( $\approx 100$  °C) em proporções adequadas, o que permitiu a obtenção de temperaturas na faixa de 0 a 100 °C.

O termômetro padrão foi parcialmente imerso no recipiente juntamente com os termopares, os quais foram envoltos por um pequeno tubo de plástico contendo óleo, com resistência elétrica e condutibilidade térmica altas, a fim de mantê-los eletricamente isolados uns dos outros.

Cabe lembrar que a junta de referência dos termopares, estabelecida no sistema de aquisição, é obtida através de um barramento de cobre com temperatura homogênea, obtida através de um isolamento adequado. Essa temperatura é medida através de um termistor tipo NTC.

#### **4.2.3 Descrição do processo de calibração do SMT**

O processo de calibração do SMT baseia-se nas leituras das diferenças de potencial elétrico (DDPs), fornecidas pelos termopares, e nas diferenças de temperatura que as geraram. Para tal preparou-se o sistema de aquisição a fim de ler e gravar as DDPs, juntamente com a temperatura da junta de referência do SMT e com os instantes de tempo dessas leituras. Preparou-se, ainda, um banho de gelo fundente que serviu de junta de referência a 0 °C, para um termopar, durante todo o processo de calibração.

Para a obtenção de um ponto de calibração, preparava-se um banho no qual eram colocados os termopares com junta de referência no SMT, o termopar com junta de referência em gelo

fundente e o termômetro padrão de escala adequada. Aguardavam-se, então, aproximadamente cinco minutos, para a necessária estabilização do banho e iniciava-se a aquisição dos dados.

A aquisição durava aproximadamente 20 minutos durante os quais registravam-se periodicamente a temperatura do termômetro padrão e o instante de tal leitura, promovendo-se, também, a agitação do banho com o objetivo de evitar a estratificação na sua temperatura.

Cada novo ponto de calibração foi obtido preparando-se um novo banho em uma nova temperatura, e repetindo-se o processo anterior para sete valores de temperatura ao longo da faixa de 0 a 100 °C.

#### **4.2.4 Cuidados observados na calibração do SMT**

Na calibração do SMT foram tomados alguns cuidados com o objetivo de minimizar possíveis erros, os quais encontram-se listados a seguir:

- 1) Os termômetros padrão foram aferidos e seus erros corrigidos.
- 2) A influência da imersão parcial do termômetro no banho foi verificada e seus efeitos considerados.
- 3) A temperatura ambiente foi mantida em um nível praticamente constante durante o processo de calibração.
- 4) As garrafas térmicas, utilizadas como recipientes para os banhos, receberam um isolamento adicional de lã de vidro, com o objetivo de evitar variações de temperatura durante a obtenção de um determinado ponto de calibração.
- 5) Os banhos foram agitados periodicamente, durante a obtenção dos pontos de calibração, para evitar a estratificação de temperatura.
- 6) A tampa das conexões dos termopares à junta de referência do SMT foi mantida fechada para garantir a homogeneidade da temperatura do barramento de cobre.
- 7) Todos os tempos de estabilização, necessários à obtenção de regime estacionário, foram obedecidos.

- 8) Correntes parasitas entre os termopares foram evitadas colocando-os em envólucros preenchidos com óleo.
- 9) Foram realizados testes de calibração preliminares com outro padrão, baseado em um sistema de aquisição com termistor. Tais testes apresentaram resultados semelhantes aos obtidos com o termômetro padrão. A opção pelo termômetro foi feita em função da sua maior praticidade, simplicidade e possibilidade de aferição.
- 10) Os cabos dos termopares foram mantidos afastados de campos eletromagnéticos, para evitar qualquer DDP fictícia.
- 11) A tensão de alimentação do sistema de aquisição foi monitorada com a finalidade de se verificar possíveis variações e seus conseqüentes efeitos.
- 12) O banho de gelo fundente foi preparado com gelo de água destilada, triturado e diluído em água destilada e mantido a 0 °C.
- 13) O processo de medição de temperatura empregado foi testado com sete termopares diferentes, para verificar a sua consistência.

#### **4.2.5 Resultados da calibração do SMT**

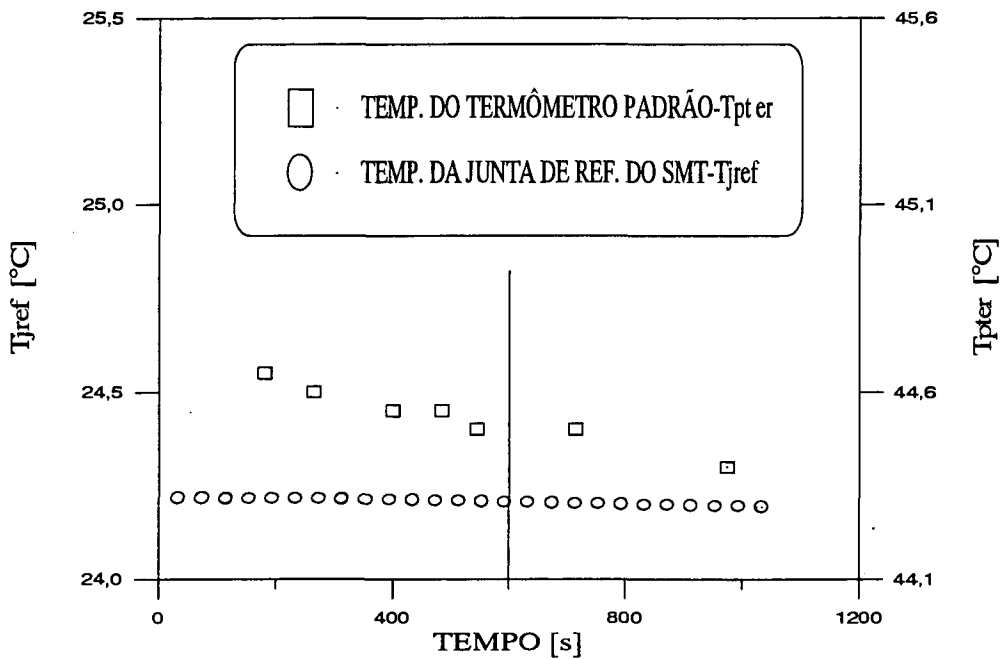
Foram levantados sete pontos de calibração para o conjunto de termopares instalados simultaneamente no aparato de calibração.

Os pontos de calibração são constituídos pela temperatura padrão lida pelo termômetro ( $T_{pter}$ ), pela temperatura da junta de referência ( $T_{jref}$ ), pela diferença de potencial gerada pelos termopares com junta de referência no SMT (DDP) e pela diferença de potencial gerada pelo termopar com junta de referência em gelo fundente (DDPg).

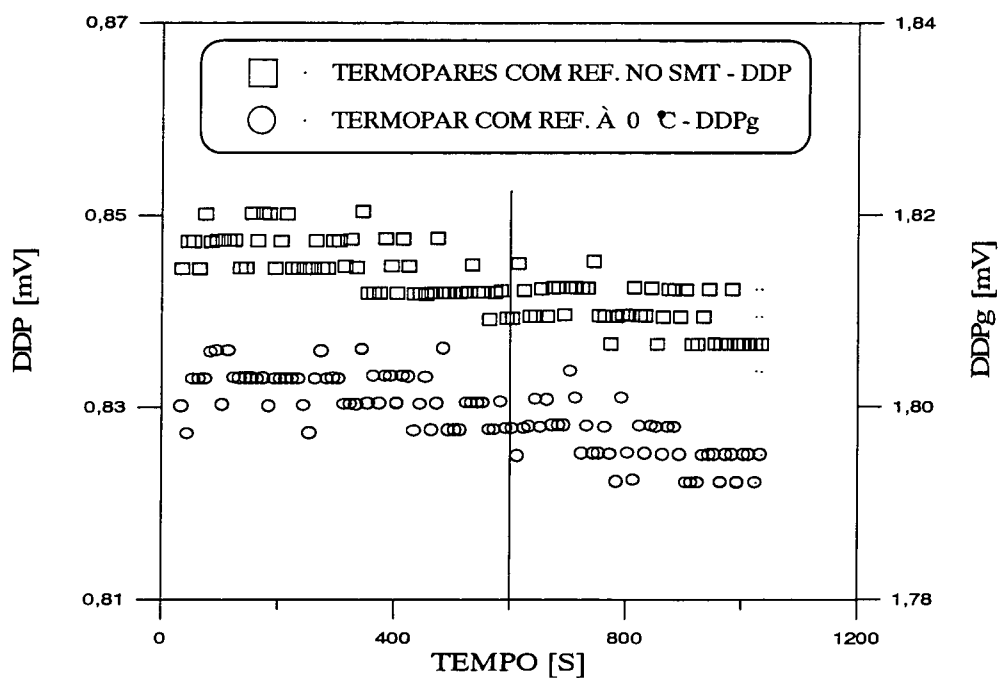
Os valores das variáveis, em cada ponto de calibração, foram obtidos através de um processo gráfico, ilustrado a seguir para o quarto ponto de calibração. Com tal procedimento, os possíveis erros, devido às pequenas variações ocorridas durante a aquisição dos pontos de calibração, foram minimizados.

Na figura 4.2, são apresentadas as leituras da temperatura da junta de referência e da temperatura padrão durante a aquisição do quarto ponto de calibração. A linha vertical representa o tempo no qual esses parâmetros foram avaliados. Pode-se observar que a temperatura da junta de referência do SMT não apresenta espalhamento. Isso se deve às pequenas variações da temperatura ambiente e à filtragem de suas leituras realizada numericamente.

Na figura 4.3, são apresentadas as diferenças de potencial geradas pelos sete termopares, com junta de referência no SMT (DDP), e as geradas pelo termopar, com junta de referência em gelo fundente (DDPg), para o mesmo ponto de calibração. A linha vertical representa o tempo no qual esses parâmetros foram avaliados.



**FIGURA 4.2 - Temperaturas do quarto ponto de calibração**



**FIGURA 4.3 - DDPs do quarto ponto de calibração**

Na tabela 4.2, são apresentados os dados referentes aos sete pontos de calibração.

**TABELA 4.2 - Pontos de calibração**

NP	T <sub>pter</sub> [°C]	T <sub>jref</sub> [°C]	DDP [mV]	DDPg [mV]
1	-0,10	24,695	-0,9697	-0,0010
2	10,30	24,390	-0,5602	0,4030
3	25,10	25,275	0,0043	1,0015
4	44,50	24,204	0,8416	1,7985
5	53,50	24,160	1,2245	2,1840
6	71,40	24,155	2,0070	2,9660
7	91,10	24,160	2,8998	3,8555

É necessário lembrar que a diferença de potencial elétrico (DDP) dos sete termopares, com junta de referência no SMT, usados para comparação (verificação), foi tomada como um valor único para os mesmos, já que apresentaram ótima concordância entre suas indicações, o que justifica, também, o uso de uma única curva de calibração para todos os termopares do SMT.

A partir dos dados da tabela anterior, obteve-se a curva de calibração com referência a 0 °C ajustando-se uma função polinomial, pelo método dos mínimos quadrados, às temperaturas ( $T_{p\text{ter}}$ ) e às diferenças de potencial ( $DDP_g$ ). A curva de calibração assim obtida e a sua inversa são dadas, respectivamente, pelas equações (4.5) e (4.6)

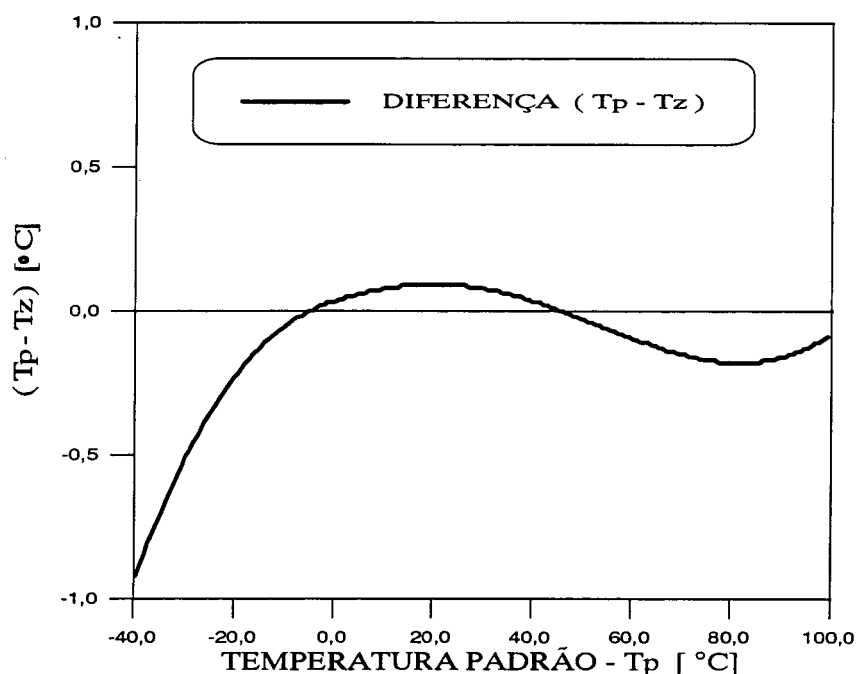
$$T_z = -0,03248 + 25,6782 \cdot DDP_z - 0,5312 \cdot DDP_z^2 \quad (4.5)$$

$$DDP_z = 0,0028260 + 0,038616 \cdot T_z + 0,000040322 \cdot T_z^2 \quad (4.6)$$

Onde:  $T_z$  - Temperatura de um termopar com junta de referência a (zero) 0°C.

$DDP_z$  - DDP de um termopar com junta de referência a (zero) 0°C.

Na figura 4.4, mostra-se uma comparação entre a curva de calibração em questão e a curva fornecida pela norma ASTM E 20 (ASTM,1981), com relação à IPTS-68 (International Practical Temperature Scale of 1968). É ilustrada a diferença entre as temperaturas fornecidas pelas duas curvas ( $T_p - T_z$ ) em relação à temperatura dada pela curva padrão ( $T_p$ ). Pode-se verificar a adequabilidade do processo de calibração empregado, particularmente para temperaturas superiores a 0 °C. Para temperaturas inferiores a 0 °C, emprega-se diretamente a curva fornecida pela norma ASTM E 20 (ASTM,1981)



**FIGURA 4.4 - Comparação entre a curva de calibração obtida e a padrão (ASME E 20 / IPTS-68)**

Na tabela 4.3, mostra-se a comparação entre a temperatura padrão, indicada pelo termômetro, e a temperatura fornecida pelo SMT, para os sete pontos de calibração. Para tanto, empregaram-se as equações (4.5) e (4.6) sobre a indicação média fornecida pelos sete termopares instalados no aparato de calibração com referência no SMT.

**TABELA 4.3 - Comparação entre as leituras do SMT e a padrão**

NP	T <sub>pter</sub> [°C]	T <sub>jref</sub> [°C]	DDP [°C]	T <sub>SMT</sub> [°C]	DIF [°C]
1	-0,10	24,695	-0,970	0,257	0,357
2	10,30	24,390	-0,560	10,367	0,067
3	25,10	25,275	0,004	25,334	0,234
4	44,50	24,204	0,842	44,532	0,032
5	53,50	24,160	1,225	53,511	0,011
6	71,40	24,155	2,007	71,459	0,059
7	91,10	24,160	2,900	91,152	0,052

As variáveis  $T_{SMT}$  e DIF referem-se, respectivamente, à temperatura indicada pelo SMT e à diferença entre  $T_{pter}$  e  $T_{SMT}$ . Essa diferença representa os erros associados à utilização da curva de calibração e ao processo de medição.

Pode-se concluir, portanto, que o processo de medição de temperatura adotado é adequado.

#### 4.2.6 Incerteza de medição do SMT

A incerteza de medição do SMT é o resultado da combinação das incertezas de cada ponto de medição, com a incerteza devida ao ajuste da curva de calibração, sendo sua combinação quadrática escrita da seguinte forma:

$$IM_{SMT} = \sqrt{IM_p^2 + IM_a^2} \quad (4.7)$$

onde:  $IM_{SMT}$  - Incerteza de medição do SMT

$IM_p$  - Incerteza de medição pontual

$IM_a$  - Incerteza de medição devido ao ajuste

A incerteza de medição de cada ponto em particular é caracterizada pelo espalhamento da indicação, em milivolts, fornecida pelos termopares, conforme mostrado na figura 4.3. Tal incerteza pode ser calculada pela equação a seguir, o que gerou um valor de  $\pm 0,15$  °C.

$$IM_p = DP \cdot ST \cdot S \quad (4.8)$$

onde:  $IM_p$  - Incerteza de medição pontual

DP - Desvio padrão (= 0,003 mV)

ST - Coeficiente de Student (= 2)

S - Sensibilidade (= 25 °C/mV)



A incerteza de medição devida ao ajuste é dada pelo erro padrão da estimativa (EPE), segundo a equação (4.1), o que forneceu um valor de:  $IMa = \pm 0,11 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Assim sendo, obtém-se para  $IM_{SMT}$  o valor de  $\pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

### **4.3 Calibração do Sistema de Medição de Pressão (SMP)**

#### **4.3.1 Introdução**

O SMP realiza medições de pressão absoluta através de transdutores que utilizam extensômetros (strain gauges). Os extensômetros sofrem variações de suas características de resposta com o tempo, exigindo, desta forma, a repetição periódica do processo de calibração.

Realizaram-se três etapas de calibração do SMP, nas quais foram mantidos tanto o aparato como o processo empregados.

Além das etapas de calibração, o SMP passou também por verificações mais freqüentes. Nesse caso, todos os transdutores eram submetidos a uma mesma pressão, fazendo-se posteriormente uma leitura simultânea. Esse processo era repetido para várias pressões, o que possibilitava verificar se algum transdutor apresentava diferença de leitura em relação à média dos demais.

Dois transdutores foram calibrados na primeira etapa de calibração, um com faixa de medição de 0 a 20 bar, utilizado para medir a pressão na entrada do tubo capilar, e outro com faixa de medição de 0 a 10 bar, usado para medir a pressão na saída.

A segunda etapa de calibração ocorreu antes do início das medições dos perfis de pressão e temperatura ao longo do tubo capilar. Nessa ocasião foram calibrados doze transdutores sendo que, em função de modificações na instalação dos transdutores e da substituição de alguns deles, durante as medições de perfis, tornou-se necessária uma terceira calibração envolvendo onze transdutores.

A calibração do SMP consistiu basicamente em se submeter os transdutores a pressões conhecidas (padrão). Os sinais por eles fornecidos foram, então, correlacionados com os valores de pressão.

### 4.3.2 Descrição do aparato de calibração do SMP

O aparato de calibração do SMP foi constituído por um barômetro e por um sistema responsável pela geração de pressão relativa, chamado máquina de peso-morto, como mostrado esquematicamente na figura 4.5. Tal aparato tem a função de submeter o SMP a diferentes pressões absolutas, como mostrado a seguir.

A máquina de peso-morto empregada possuía as seguintes características:

- Fabricante (Marca): Budenberg Gauge Co. Limited (Inglaterra)
- Número de série (Fabricante): 10334/12
- Escalas de operação: 1 a 55 bar e 10 a 550 bar
- Calibração: Rastreável aos padrões primários de acordo com certificado de calibração, número 121/92, emitido pelo IMETRO em 27/10/92.

A máquina de peso-morto baseia-se no conceito fundamental de ser a pressão a razão entre a força e a área sobre a qual esta atua perpendicularmente. Tal conceito é concretizado a partir de um conjunto cilindro e êmbolo, sendo a pressão relativa gerada calculada pela seguinte expressão:

$$P_{rel} = \frac{(M_e + M_p) \cdot g}{100000 \cdot A} \quad (4.9)$$

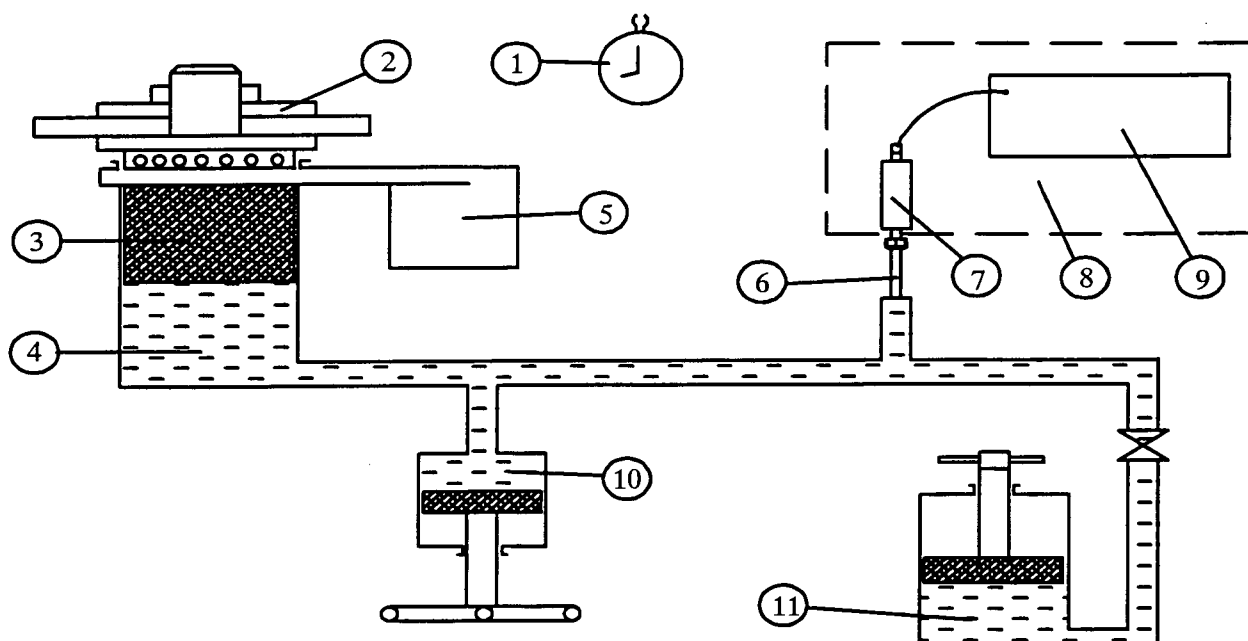
onde:  $P_{rel}$  - Pressão relativa gerada pela máquina de peso-morto [bar]

$M_e$  - Massa do êmbolo [kg]

$M_p$  - Massa padrão colocada sobre o êmbolo [kg]

$g$  - Aceleração gravitacional do local da calibração [m/s<sup>2</sup>]

$A$  - Área da secção transversal do conjunto cilindro e êmbolo [m<sup>2</sup>]



- |                        |   |
|------------------------|---|
| 1 - Barômetro          | 7 - Transdutor                          |
| 2 - Massa padrão       | 8 - Sistema de Medição de Pressão (SMP) |
| 3 - Êmbolo             | 9 - Sistema de aquisição                |
| 4 - Cilindro           | 10 - Sistema dosador                    |
| 5 - Sistema de rotação | 11 - Reservatório de óleo               |
| 6 - Conexão            |   |

**FIGURA 4.5 - Aparato de calibração do SMP**

O conjunto cilindro e êmbolo é montado verticalmente, sendo adequadamente ajustado de forma a propiciar vedação e livre movimentação entre os mesmos. Conta também com um dispositivo de rotação que faz girar o êmbolo em relação ao cilindro com o objetivo de minimizar o atrito entre eles.

Através da variação da massa, aplicada sobre o êmbolo da máquina de peso-morto, obtêm-se diferentes valores de pressão para serem utilizados como pontos de calibração.

As duas escalas de pressão da máquina de peso-morto são independentes das massas colocadas sobre o êmbolo, sendo a escala a ser empregada dependente da quantidade de óleo aplicada ao cilindro.

Durante a calibração, utilizou-se a escala baixa (1 a 55 bar), pois o cilindro foi alimentado com óleo até aparecer uma faixa azul, localizada sobre a superfície do êmbolo. A continuação da alimentação de óleo ao cilindro implicaria o uso da escala alta (10 a 550 bar) quando apareceria uma faixa vermelha sobre o êmbolo.

A área da secção transversal e a massa padrão são determinadas com incertezas convenientemente pequenas de forma a produzirem valores de pressão com incertezas suficientemente reduzidas para servirem como padrão. Tal incerteza é de  $\pm 0,03\%$  do valor da pressão gerada.

A aceleração gravitacional local foi medida pelo Observatório Nacional, em vários pontos do Campus Universitário da UFSC, apresentando o seguinte resultado:  $g = 9,791 \pm 0,001 \text{ m/s}^2$ .

Na medição da pressão atmosférica ( $P_{atm}$ ), usou-se um barômetro tipo aneróide, marca Feingerealebau Fischer, modelo W2705, com incerteza de medição igual a  $\pm 0,001$  bar. Esse equipamento foi aferido no LabMetro-UFSC, em relação a um barômetro de maior confiabilidade, quando apresentou um erro sistemático de  $+0,008$  bar, erro esse que foi compensado durante a sua utilização.

Somando-se a pressão relativa, gerada pela máquina de peso-morto, à pressão atmosférica, lida no barômetro, obteve-se a pressão absoluta que atua sobre o sistema (SMP) a calibrar. Tal pressão foi tomada como padrão ou referencial para a calibração, apresentando uma incerteza de medição de  $\pm 0,03\%$ .

### 4.3.3 Descrição do processo de calibração do SMP

Com o aparato de calibração adequadamente instalado e a máquina de peso-morto gerando a pressão máxima da faixa de medição do transdutor a calibrar, ligava-se o sistema de aquisição e aguardavam-se, no mínimo, quinze minutos para sua estabilização.

Em seguida, os pontos de calibração eram gerados através da máquina de peso-morto, colocando-se a massa padrão escolhida sobre o êmbolo e alimentando-se o cilindro com óleo a partir do sistema dosador até se alcançar a escala de pressão desejada.

Nesse ponto ligava-se o sistema de rotação e aguardavam-se aproximadamente dez segundos para acomodar quaisquer efeitos transitórios advindos do processo de carregamento e, então, iniciava-se a aquisição pelo SMP.

A aquisição de cada ponto de calibração foi feita durante três minutos. Durante esse período foram efetuadas cerca de cem leituras, para se verificar a estabilidade da pressão padrão.

Durante o processo de aquisição de cada ponto de calibração, registrou-se também a pressão atmosférica.

Foram efetuados vários pontos de calibração para cada transdutor, com valores de pressão distribuídos ao longo de toda sua faixa de medição.

### 4.3.4 Cuidados observados na calibração do SMP

Durante a calibração do SMP, foram tomados alguns cuidados com o objetivo de minimizar possíveis erros, os quais encontram-se listados a seguir:

- 1) As massas padrões foram manuseadas com cuidado, observando-se a sua limpeza e o seu posicionamento.
- 2) A máquina de peso-morto foi nivelada e a mesa de trabalho possuía uma rigidez adequada.
- 3) A tensão de alimentação dos transdutores foi monitorada para verificar sua estabilidade.

- 4) Os transdutores foram calibrados com os mesmos cabos usados durante as medições. Evitou-se também a presença de campos elétricos e magnéticos que pudessem induzir tensões elétricas fictícias ao sinal ou à alimentação dos transdutores.
- 5) Todos os pontos de calibração foram obtidos em regime permanente.
- 6) O barômetro foi aferido e seus erros corrigidos.
- 7) O efeito da coluna de óleo da conexão do transdutor à máquina de peso-morto foi considerado. Essa coluna diminui a pressão que atua sobre os transdutores em relação à pressão fornecida pela máquina de peso-morto.
- 8) A temperatura ambiente foi mantida em um nível praticamente constante.
- 9) Os transdutores não foram submetidos a pressões superiores a sua faixa de medição. Tal cuidado foi também observado durante as medições.
- 10) A histerese nas medições foi também verificada. Os resultados obtidos mostraram que esses efeitos eram desprezíveis nas medições efetuadas pelo SMP.
- 11) A tensão de alimentação do sistema de aquisição foi monitorada para se verificar a ocorrência de variações e os conseqüentes efeitos sobre as medições.

#### **4.3.5 Resultados da calibração do SMP**

Através do processo de calibração obteve-se, para cada transdutor, um conjunto de pontos de calibração formado por valores de pressão absoluta padrão ( $P_{absp}$ ) e pressão absoluta lida ( $P_{absl}$ ) pelo SMP, distribuídos ao longo de toda sua faixa de medição.

A pressão absoluta padrão foi obtida de acordo com a descrição apresentada no item anterior.

A pressão absoluta lida foi obtida aplicando-se à indicação em milivolts (mV), fornecida pelos transdutores, um fator multiplicativo conforme indicado na equação a seguir. Na tabela 4.4, são mostrados os fatores multiplicativos usados, segundo a faixa de medição dos transdutores.

$$P_{absl} = FM \cdot IMV \quad (4.10)$$

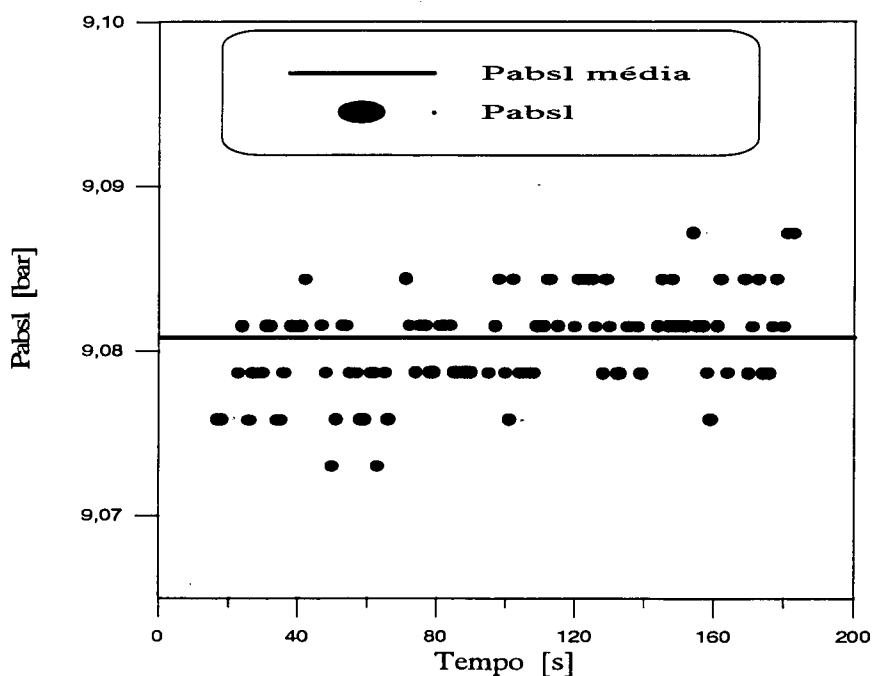
onde: FM - Fator multiplicativo [bar/mV]

IMV - Indicação do transdutor em milivolts [mV].

**TABELA 4.4 - Fatores multiplicativos usados na calibração do SMP**

Faixa de medição [bar]	Fator multiplicativo [bar/mV]
0 - 5	500
0 - 10	1000
0 - 20	2000

Durante a aquisição dos pontos de calibração, vários valores de pressão absoluta eram lidos. O valor considerado era obtido através da média aritmética desses valores. A linha horizontal, mostrada na figura 4.6, representa o valor médio considerado como a pressão absoluta correspondente a este ponto de calibração.



**FIGURA 4.6 - Pressão absoluta lida pelo SMP durante um ponto de calibração**

Através dos pares (Pabsp e Pabsl) obteve-se, para cada transdutor, uma curva de calibração através do método dos mínimos quadrados.

Na tabela 4.5, são apresentados os resultados finais das três etapas de calibração do SMP, através dos valores dos coeficientes dos polinômios das curvas de calibração dadas na forma da equação (4.11). Na primeira coluna da tabela, é apresentada a designação dos transdutores, onde os cinco primeiros caracteres representam a designação propriamente dita, os dois seguintes, o limite superior de sua faixa de medição e o último caracter, após o hífen, a etapa de calibração correspondente à curva de calibração em questão.

$$P_{cali} = C_0 + C_1 \cdot (IMV)^1 + C_2 \cdot (IMV)^2 + C_3 \cdot (IMV)^3 + C_4 \cdot (IMV)^4 + C_5 \cdot (IMV)^5 \quad (4.11)$$

onde: Pcali - Pressão obtida através da curva de calibração [bar]

Ci - Coeficientes da curva de calibração



**TABELA 4.5 - Valores dos coeficientes das curvas de calibração do SMP**

Denominação do transdutor	C0 10 <sup>2</sup> (*)	C1 10 <sup>-2</sup>	C2 10 <sup>-3</sup>	C3 10 <sup>-5</sup>	C4 10 <sup>-7</sup>	C5 10 <sup>-9</sup>
PTF3820-1	-1,21918	19,78720	-1,85232	1,40808	0,00000	0,00000
PTF2010-1	-9,43306	9,96201	-1,86393	0,95796	0,00000	0,00000
PTF4210-2	2,23333	9,53147	13,39880	-25,01130	21,28590	-6,73030
PTF4110-2	-5,94475	10,49130	-37,48800	85,96300	-86,27300	31,35230
PTF4020-2	25,27820	19,60840	0,60509	0,00000	0,00000	0,00000
PTF3920-2	17,49730	19,61970	0,55311	0,00000	0,00000	0,00000
PTF3820-2	13,70830	19,67770	0,51843	0,00000	0,00000	0,00000
PTF2010-2	-16,89280	10,89960	-50,77810	107,01700	-101,9440	35,60730
PTF1910-2	-77,34100	9,61144	6,18799	-6,86630	2,68802	0,00000
PTF1810-2	-23,31220	10,57760	-36,43750	75,93220	-71,15800	24,47050
PTF1310-2	-1,95447	9,75625	5,29380	-12,06740	113,85400	-3,80260
PTA5310-2	1,13677	9,86531	0,35726	3,48126	6,60684	0,00000
PTA5110-2	-2,25008	9,88809	-2,30903	1,62595	0,00000	0,00000
PTF4305-2	-13,12280	4,99528	-5,92809	11,97380	-6,64331	0,00000
PTF3005-2	-14,38420	4,28391	26,73170	-48,48840	39,98650	-12,32780
PTF2905-2	-12,55200	5,01862	-5,26003	11,45370	-6,76856	0,00000
PTF1910-3	-76,07198	9,50886	9,09039	-10,60780	4,32169	0,00000
PTF1810-3	-14,45142	9,49473	9,68513	-12,06430	5,18553	0,00000
PTF2010-3	-8,81619	9,75970	3,45464	-5,97980	3,07473	0,00000
PTF1310-3	59,18759	3,25645	260,0271	-474,5996	405,06330	-130,770
PTF4210-3	1,07354	9,85737	-0,68369	0,50606	0,00000	0,00000
PTA5310-3	0,64050	9,77635	3,75937	-5,73140	2,90805	0,00000
PTF4110-3	0,03064	9,64008	6,21088	-8,51700	3,99748	0,00000
PTX1320-3	18,70709	20,02433	-11,11488	15,26208	-7,03408	0,00000
PTX1220-3	142,37935	19,70006	-4,71756	11,17792	-6,07056	0,00000
PTX1120-3	34,54264	19,98688	-10,65836	15,33824	-7,15856	0,00000
PTF4020-3	24,91253	19,97246	-11,32280	16,60224	-7,68336	0,00000

(\*) Os fatores apresentados com os coeficientes dividem os valores indicados na tabela.

A seguir apresentam-se, mais detalhadamente, os resultados correspondentes à segunda calibração do transdutor PTF38, o qual tem faixa de medição de 0 a 20 bar.

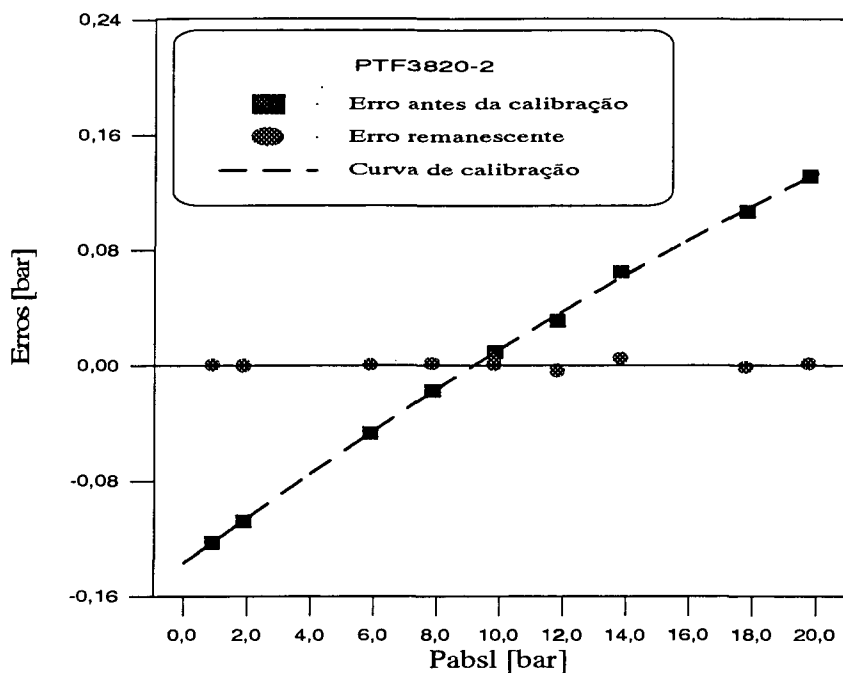
Na tabela 4.6 são apresentados os resultados dos pontos de calibração para o transdutor (PTF3820-2).

**TABELA 4.6 - Pontos de calibração do PTF3820-2**

NP [/]	Pabsp [bar]	Pabsl [bar]	Pcali [bar]	EPA [%]	EPC [%]
1	1,0093	0,8866	1,0095	-12,1530	0,0234
2	1,9776	1,8697	1,9771	-5,4567	-0,0256
3	5,9003	5,8533	5,9005	-0,7964	0,0035
4	7,8616	7,8439	7,8626	-0,2246	0,0126
5	9,8229	9,8322	9,8233	0,0941	0,0041
6	11,7843	11,8153	11,7801	0,2633	-0,0357
7	13,7456	13,8107	13,7499	0,4734	0,0313
8	17,6683	17,7749	17,6665	0,6038	-0,0099
9	19,6293	19,7607	19,6300	0,6695	0,0034

As variáveis EPA e EPC representam, respectivamente, os erros percentuais antes da calibração e depois dela.

Na figura 4.7 são apresentadas as diferenças (erros) de pressão nos pontos de calibração em função da pressão absoluta indicada.



**FIGURA 4.7 - Resultado da calibração do PTF3820-2**

#### 4.3.6 Incerteza de medição do SMP

A incerteza de medição do SMP é o resultado da combinação quadrática da incerteza de medição de cada valor de pressão com a incerteza de medição causada pelos erros do ajuste da curva de calibração, como indicado na equação a seguir:

$$IM_{SMP} = \sqrt{IM_p^2 + IM_a^2} \quad (4.12)$$

onde:  $IM_{SMP}$ - Incerteza de medição do SMP

$IM_p$ - Incerteza de medição pontual

$IM_a$ - Incerteza de medição do ajuste

A incerteza de medição pontual ( $IM_p$ ) foi obtida a partir das variações apresentadas pela leitura de uma pressão constante, fornecida pela máquina de peso-morto (ver figura 4.6). Seu

valor foi calculado pela equação (4.2), da qual obteve-se o seguinte valor máximo ao longo da calibração :  $IM_p = \pm 0,016$  bar.

A incerteza de medição do ajuste originou-se do fato da curva de calibração não ser exata, como mostrado na figura 4.7. O erro residual fornece a  $IMA$  através do erro padrão da estimativa (EPE) do ajuste e foi calculado pela equação (4.1). Assim sendo, obteve-se o seguinte valor máximo ao longo da calibração :  $IMA = \pm 0,0036$  bar.

Desta forma, através da equação (4.12), chega-se ao valor da incerteza de medição para o SMP:  $IM_{SMP} = \pm 0,02$  bar.

#### **4.4 Calibração do Sistema de Medição de Fluxo de Massa (SMFM)**

##### **4.4.1 Introdução**

O transdutor de fluxo de massa utilizado neste trabalho, denominado fluxímetro, é constituído por um sensor e por uma unidade de pré-tratamento de sinal. Durante as medições, utilizaram-se três diferentes fluxímetros, sendo seus respectivos números de série de fabricação , de acordo com a ordem cronológica de utilização, apresentados a seguir.

- 1) Fluxímetro #1 - S/N 115223
- 2) Fluxímetro #2 - S/N 115439
- 3) Fluxímetro #3 - S/N 115227

Foram utilizados dois processos distintos para a calibração do SMFM. Um desenvolvido no âmbito deste trabalho (ver item 4.4.2), denominado processo I, e outro realizado pela empresa Hirsá - Sistemas de Automação e Controle Ltda, denominado processo II.

O fluxímetro #1 foi calibrado inicialmente pelo processo I e usado durante as medições iniciais na BETC. Em função da ocorrência de variações abruptas do fluxo de massa no decorrer de sua utilização, levantou-se a hipótese de falha do SMFM, não confirmada posteriormente, o que levou à substituição desse fluxímetro e à repetição de sua calibração pelo processo I.

O fluxímetro #2 foi calibrado pelo processo II e após um período de medições na BETC apresentou problemas de funcionamento, sendo, então, enviado para manutenção.

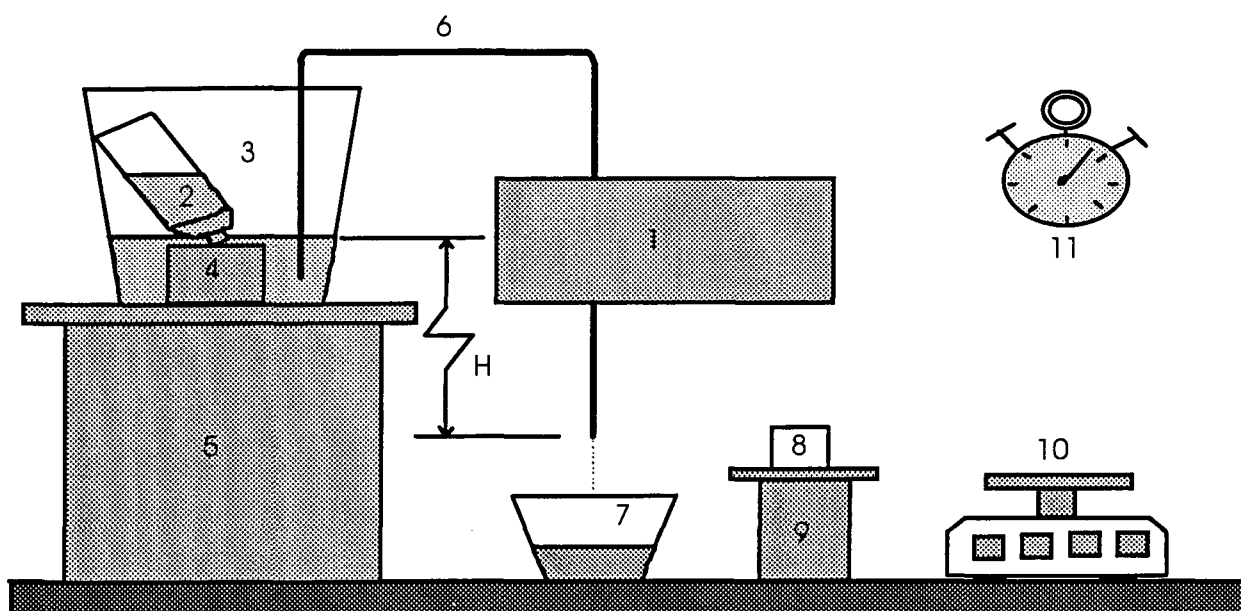
O fluxímetro #3 foi inicialmente calibrado pelo processo II e após um período de medições na BETC foi, novamente, calibrado pelo processo I.

A calibração do SMFM consistiu basicamente em fazer escoar através do fluxímetro um fluxo de massa de água constante e ajustar o fator multiplicativo aplicado ao sinal obtido de tal forma a se reproduzir o valor do fluxo de massa utilizado.

Usou-se apenas um fator multiplicativo para a curva de calibração em função da excelente linearidade da resposta do fluxímetro em relação ao fluxo de massa e da disponibilidade e facilidade de zeragem de seu sinal, quando da interrupção do escoamento, o que dispensa o uso de um fator aditivo na curva de calibração.

#### **4.4.2 Descrição do aparato de calibração do SMFM**

O aparato de calibração do SMFM foi constituído basicamente por um dispositivo que produzia um fluxo de massa de água constante através do SMFM, por uma balança e por um cronômetro a partir dos quais se obteve o valor do fluxo de massa padrão. Tal aparato é mostrado esquematicamente na figura 4.8.



- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| 1 - Sistema de medição de fluxo de massa - SMFM          | 7 - Reservatório inferior            |
| 2 - Reservatório invertido                               | 8 - Recipiente de medição            |
| 3 - Reservatório superior                                | 9 - Suporte do recipiente de medição |
| 4 - Suporte do reservatório invertido                    | 10 - Balança digital                 |
| 5 - Suporte de altura ajustável do reservatório superior | 11 - Cronômetro                      |
| 6 - Tubulação de água                                    |                                      |

**FIGURA 4.8 - Esquema do aparato de calibração do SMFM**

O fluxo de massa constante foi gerado por um dispositivo que manteve um desnível constante entre a extremidade de saída da tubulação e a superfície livre do reservatório superior, cota  $H$  na figura 4.8. O nível da superfície livre do reservatório superior foi mantido constante pela alimentação através de um reservatório invertido, controlado pela pressão atmosférica.

Os diferentes valores de fluxos de massa usados durante a calibração foram obtidos com a variação da cota  $H$  ou com a modificação da perda de carga da canalização pela alteração do comprimento ou do seu diâmetro.

A medição do tempo foi realizada por um cronômetro digital, tipo relógio de pulso, com incremento digital igual a  $0,01s$ . O processo de medição do tempo, considerando-se o tempo de resposta do operador, apresentou uma incerteza de medição ( $IM_T$ ) de  $\pm 1 s$ .

A massa foi medida por uma balança digital de precisão, marca MARTE, modelo Automarte AM5500, com incremento digital de 0,01 g, aferida com massas padrão quando confirmou-se uma incerteza de medição de duas vezes o incremento digital, ou seja,  $IM_M = \pm 0,02$  g.

A incerteza de medição do fluxo de massa padrão foi avaliada através da combinação das incertezas de medição da massa e do tempo através da equação (4.13). Para valores de massa e de tempo característicos da calibração, tal equação indicou uma incerteza de medição máxima ( $IM_{FMpadrão}$ ) de  $\pm 0,005$  kg/h, o que qualifica o fluxo de massa gerado por tal aparato como padrão diante da incerteza de medição esperada para o SMFM.

$$IM_{FMpadrão} = \sqrt{\left(\frac{\partial FM}{\partial M} IM_M\right)^2 + \left(\frac{\partial FM}{\partial T} IM_T\right)^2} \quad (4.13)$$

onde:  $IM_{FMpadrão}$  - Incerteza de medição do fluxo de massa padrão

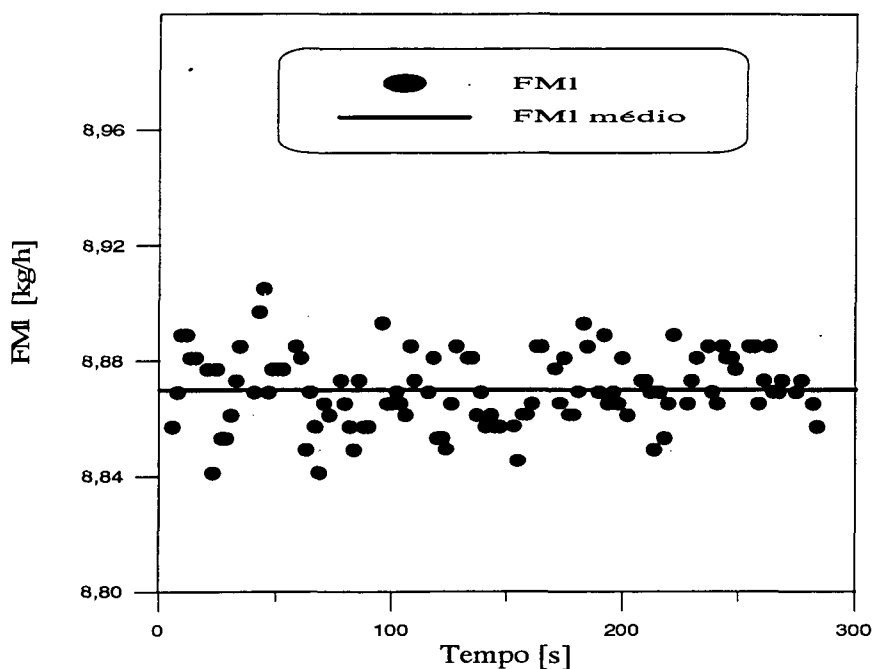
$IM_M$  - Incerteza de medição da massa escoada

$IM_T$  - Incerteza de medição do tempo de coleta

#### 4.4.3 Descrição do processo de calibração do SMFM

O fluxo de massa padrão ( $FM_p$ ) referente a um ponto de calibração foi obtido dividindo-se a massa escoada pelo tempo total de coleta.

O fluxo de massa indicado pelo SMFM ( $FMI$ ) foi obtido aplicando-se um fator multiplicativo sobre a indicação, em milivolts, fornecida pelo fluxímetro e, posteriormente, tomando-se a média dos valores observados durante o tempo de aquisição, como mostrado na figura 4.9.



**FIGURA 4.9 - Fluxo de massa lido durante a aquisição de um ponto de calibração**

A coleta de água era feita após o ajuste do aparato de calibração para fornecer o fluxo de massa desejado e após aguardar um período de aproximadamente 30 segundos, para se obter condições de regime permanente.

A coleta de água era iniciada colocando-se rapidamente o recipiente de medição embaixo do fio de água localizado na extremidade de saída da tubulação com uma das mãos, enquanto, com a outra, acionava-se o cronômetro e dava-se início à aquisição de sinais, pelo SMFM. Há que se ressaltar que o processo era realizado por um único operador, visando reduzir a incerteza de medição do tempo de coleta.

Dependendo do fluxo de massa em questão, executava-se a coleta por um período de, aproximadamente, 10 minutos ou até que se obtivesse no máximo 400 gramas de água.

O término da coleta era realizado de forma análoga ao seu início.

Com a pesagem da massa de água coletada e com todas as grandezas adequadamente registradas (gravadas) obtinha-se novo ponto de calibração.

Esse processo de calibração foi repetido para vários pontos de calibração ao longo de toda a faixa de 0 a 15 kg/h.



#### 4.4.4 Cuidados observados na calibração do SMFM

Na calibração do SMFM foram tomados alguns cuidados com o objetivo de minimizar possíveis erros, os quais encontram-se a seguir:

- 1) O fluxo de massa foi mantido no nível mais constante possível, através dos seguintes procedimentos:
  - 1.1) A altura entre a superfície livre da água no recipiente superior e a extremidade de saída da tubulação foi mantida constante.
  - 1.2) A tubulação foi mantida em completo repouso.
  - 1.3) Uma quantidade suficiente de água foi escoada antes do início da coleta para se garantir condições de regime permanente.
- 2) A massa de água escoada foi pesada adequadamente, devendo-se registrar os seguintes cuidados:
  - 2.1) O recipiente de medição estava suficientemente próximo da extremidade de saída da tubulação, para que não ocorressem respingos de água para fora.
  - 2.2) A balança foi adequadamente aferida e nivelada, sendo as medições realizadas após um período de tempo necessário para a estabilização de seus circuitos.
  - 2.3) O recipiente de pesagem foi adequadamente limpo e seco entre a coleta de cada ponto de calibração, para se pesar somente a água escoada.
- 3) A medição do tempo de coleta foi efetuada através de um único operador.
- 4) O suporte do transdutor de fluxo de massa foi montado de forma a isolá-lo das vibrações do meio.
- 5) Evitou-se a presença de bolhas de ar, escoando com a água, através da tubulação e do transdutor de fluxo de massa.
- 6) O sinal fornecido pelo fluxímetro, com o escoamento interrompido (fechado), foi freqüentemente zerado.

- 7) Os cabos e circuitos do fluxímetro foram mantidos afastados de campos elétricos e magnéticos.
- 8) A tensão de alimentação do sistema de aquisição foi monitorada, para se verificar a ocorrência de variações e os conseqüentes efeitos sobre as medições.

#### 4.4.5 Resultados da calibração do SMFM

Nesta seção são apresentados os resultados das três etapas de calibração realizadas pelo processo aqui descrito, denominado processo I. Cabe lembrar que na calibração realizada pela empresa Hirsra, denominado processo II, foi modificado o fator de ganho do fluxímetro a partir dos resultados obtidos durante a calibração. Isso foi feito através de chaves existentes na unidade de pré- tratamento de sinal, fazendo com que os fluxímetros assim calibrados não precisassem de fator multiplicativo corretivo sobre suas indicações.

Na tabela 4.7, são apresentados os resultados finais das calibrações para todos os fluxímetros e processos utilizados, em termos do fator multiplicativo corretivo (C), utilizado sobre as indicações (I) dos fluxímetros no sistema de aquisição para a medição de fluxo de massa (FM) na BETC, conforme a equação a seguir:

$$FM = C \cdot I \quad (4.14)$$

**TABELA 4.7 - Resultado final das calibrações do SMFM**

Fluxímetro	Processo	Fator Multiplicativo (C)
#1	I	1,027
#1	I	1,027
#3	I	0,992
#2	II	1,000 (*)
#3	II	1,000 (*)

(\*) Ajustado através da unidade de pré-tratamento de sinal do fluxímetro (Processo II)

A seguir são apresentados, em tabelas e gráficos, os resultados dos pontos de calibração das duas etapas de calibração realizadas para o fluxímetro #1 e da etapa de calibração realizada para o fluxímetro #3, pelo processo I.

Nas tabelas 4.8, 4.9 e 4.10, são apresentados os valores dos pontos de calibração para cada fluxímetro calibrado pelo processo I, onde:

FMp - Fluxo de massa padrão gerado pelo aparato de calibração

FMI - Fluxo de massa lido pelo SMFM a calibrar

ERRO - Erro percentual do FMI em relação ao FMp, dado pela equação a seguir:

$$\text{ERRO} = \frac{100 \cdot (\text{FMI} - \text{FMp})}{\text{FMp}} \quad (4.15)$$

**TABELA 4.8 - Resultados da primeira calibração do fluxímetro #1, processo I**

NP	FMI [kg/h]	FMp [kg/h]	ERRO [%]
01	5,6983	5,7157	-3,40
02	5,7189	5,7374	-3,20
03	7,9567	8,1749	-2,67
04	5,4545	5,6111	-2,80
05	5,4218	5,5687	-2,64
06	5,7684	5,9248	-2,64
07	5,7141	5,8613	-2,51
08	5,7119	5,8668	-2,64
09	5,7214	5,8766	-2,64
10	5,7567	5,9064	-2,53
11	7,8369	8,0386	-2,51
12	7,8472	7,9990	-1,90
13	7,8416	8,0629	-2,74
14	2,3748	2,4358	-2,50
15	2,3676	2,4302	-2,58
16	5,6362	5,7817	-2,52
17	5,5785	5,7211	-2,49
18	7,8395	8,0578	-2,71
19	7,7650	7,9873	-2,78
20	7,3820	7,5650	-2,42
21	5,6299	5,7780	-2,56
22	2,1916	2,2555	-2,83
23	2,1711	2,2218	-2,28
24	1,0645	1,0985	-3,10
25	3,1979	3,2889	-2,77
26	4,3676	4,4796	-2,50
27	6,7489	6,9324	-2,65
28	1,1559	1,1918	-3,01
29	3,2389	3,3355	-2,90

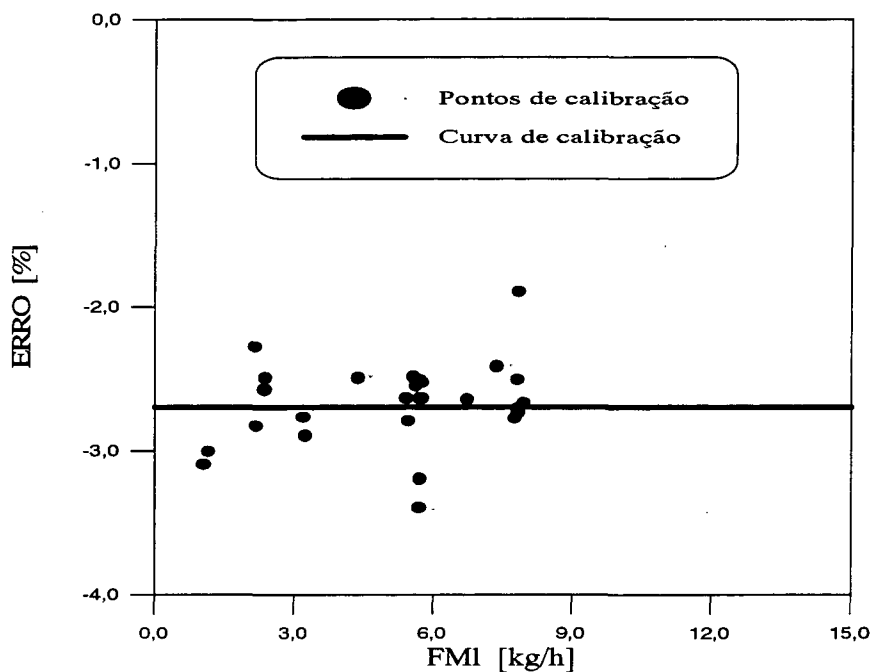
**TABELA 4.9 - Resultados da segunda calibração do fluxímetro #1, processo I**

NP	FMI [kg/h]	FMp [kg/h]	ERRO [%]
01	2,2487	2,3079	-2,56
02	2,2304	2,2906	-2,62
03	3,5956	3,6862	-2,45
04	3,5800	3,6705	-2,47
05	4,7106	4,8125	-2,10
06	4,6834	4,7953	-2,33
07	6,7898	6,9592	-2,43
08	6,7934	6,9674	-2,49
09	8,8318	9,1150	-3,10
10	8,9039	9,1182	-2,35
11	8,9425	9,1094	-1,83
12	9,6194	9,8364	-2,20
13	9,6116	9,8615	-2,53
14	13,5715	13,9718	-2,86
15	13,5801	13,9759	-2,83
16	13,9196	14,3048	-2,69
17	12,1997	12,5660	-2,91
18	12,2366	12,5767	-2,70
19	11,6073	11,9235	-2,65
20	11,5801	11,9077	-2,75

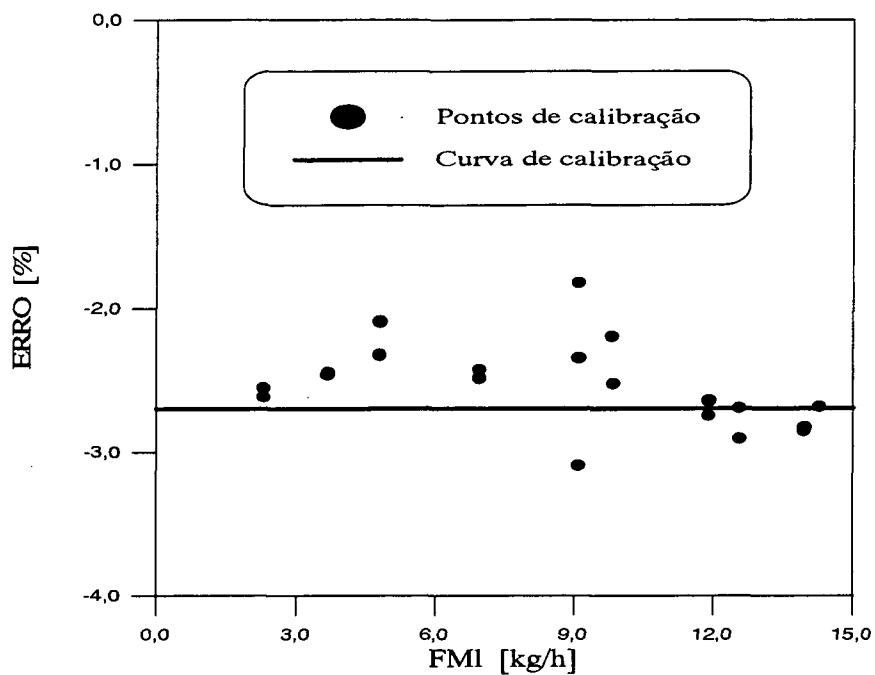
**TABELA 4.10 - Resultados da calibração do fluxímetro #3, processo I**

NP	FMI [kg/h]	FMp [kg/h]	ERRO [%]
01	2,6707	2,6447	+0,98
02	4,6714	4,6512	+0,43
03	6,5640	6,4974	+1,02
04	6,8245	6,7585	+0,98
05	8,2680	8,1805	+1,07
06	9,1660	9,1079	+0,64

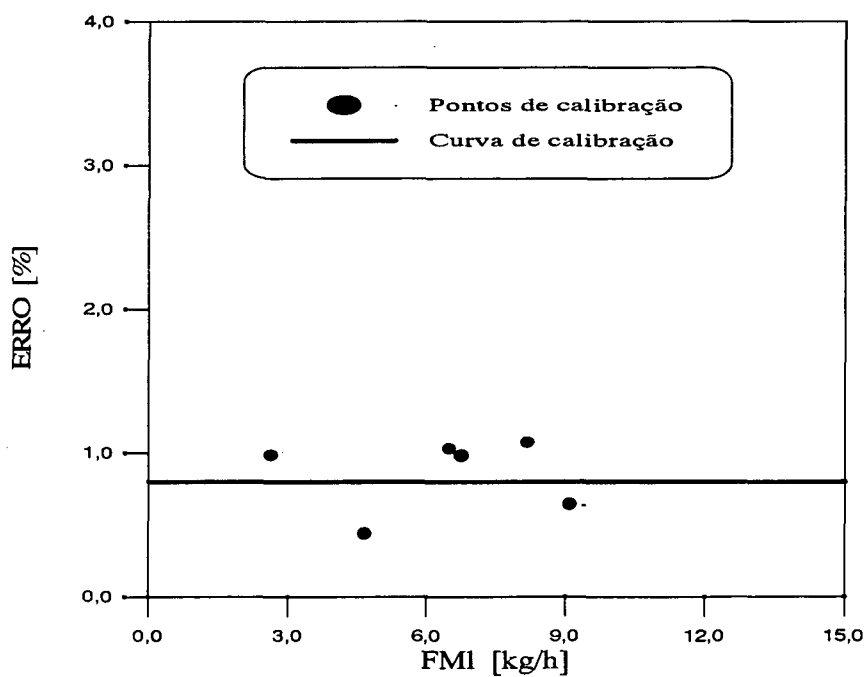
Nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12, são apresentados, em forma gráfica, os resultados mostrados, respectivamente, nas tabelas 4.8, 4.9 e 4.10. As linhas horizontais representam a correção imposta pelo fator multiplicativo obtido na calibração (curva de calibração).



**FIGURA 4.10 - Resultados da primeira calibração do fluxímetro #1, processo I**



**FIGURA 4.11 - Resultados da segunda calibração do fluxímetro #1, processo I**



**FIGURA 4.12 - Resultados da calibração do fluxímetro #3, processo I**

#### 4.4.6 Incerteza de medição do SMFM

A incerteza de medição do SMFM foi obtida de forma análoga à descrita para o SMP, logo:

$$IM_{SMFM} = \sqrt{IM_p^2 + IM_a^2} \quad (4.16)$$

onde:  $IM_{SMFM}$ -Incerteza de medição do SMFM

$IM_p$ - Incerteza de medição pontual

$IM_a$ - Incerteza de medição do ajuste

A incerteza de medição pontual ( $IM_p$ ) foi obtida a partir das variações apresentadas pela leitura de um fluxo de massa constante, fornecido pelo aparato de calibração (ver figura 4.9). Seu valor foi calculado pela equação (4.2), da qual obteve-se o seguinte valor máximo ao longo da calibração:  $IM_p = \pm 0,0256 \text{ kg/h}$

A incerteza de medição do ajuste origina-se do fato da curva de calibração não representar exatamente os fluxos de massa, como mostrado nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12. A presença de um erro residual fornece a  $IM_a$  através do erro padrão da estimativa (EPE) do ajuste, calculado pela equação (4.1), da qual obteve-se o seguinte valor máximo ao longo da calibração:

$$IM_a = \pm 0,0137 \text{ kg/h.}$$

Desta forma, através da equação (4.16) chega-se ao valor da incerteza de medição para o SMFM:  $IM_{SMFM} = \pm 0,03 \text{ kg/h.}$



## 5 MEDIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS TUBOS CAPILARES

### 5.1 Introdução

A obtenção de um banco de dados para o escoamento de fluido refrigerante em tubos capilares necessita, além das condições do escoamento, tais como: fluxo de massa, pressões e temperaturas do fluido refrigerante, da determinação das características geométricas dos tubos capilares nos quais tais dados foram obtidos. Sendo, também, de grande importância o conhecimento das incertezas de medição dessas características.

As características geométricas dos tubos capilares, de acordo com o esquema mostrado na figura 5.1, são: comprimento ( $C$ ), diâmetro interno ( $D$ ) e rugosidade absoluta da superfície interna ( $R$ ). Além disso, é também de interesse a localização das posições de medição de temperatura (PMT) e das posições de medição de pressão (PMP) ao longo do tubo. Neste capítulo, apresentar-se-ão os processos empregados na medição dessas características, bem como suas incertezas de medição.

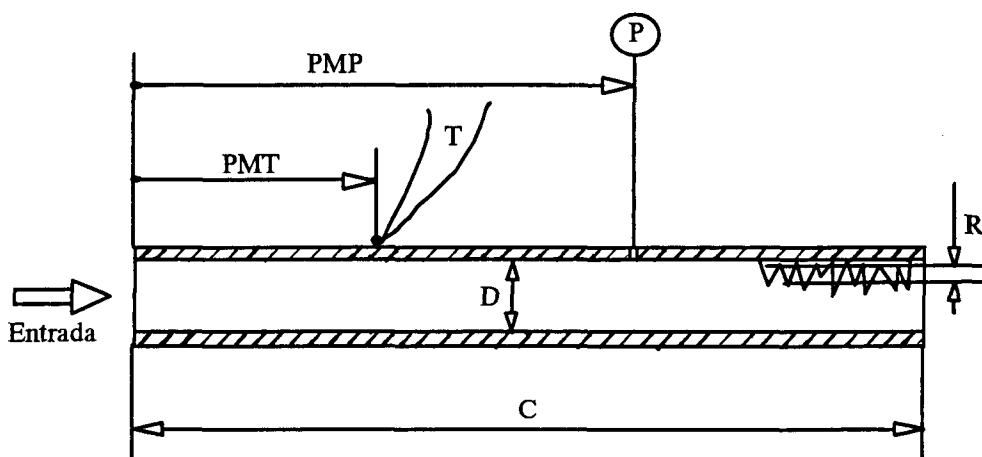


FIGURA 5.1 - Características geométricas dos tubos capilares

Foram ensaiados seis tubos capilares cujos comprimentos e diâmetros internos nominais encontram-se indicados na tabela 5.1. Os tubos foram numerados de 1 a 6 para facilitar a sua identificação ao longo deste trabalho.

**TABELA 5.1 - Identificação dos tubos capilares**

Tubo capilar	Comprimento nominal [m]	Diâmetro nominal [mm]
# 1	3	0,7
# 2	3	0,8
# 3	3	1,0
# 4	2	0,7
# 5	2	0,8
# 6	2	1,0

Os comprimentos e diâmetros nominais apresentados na tabela 5.1 são apenas referenciais. Esses foram avaliados grosseiramente, servindo apenas como valores indicativos, o que se comprovará posteriormente.

A escolha das características geométricas, para os tubos capilares a serem testados, foi feita levando-se em consideração os valores típicos usados em sistemas de refrigeração doméstica.

## 5.2 Medição do comprimento dos tubos capilares

Para se medir o comprimento real dos tubos capilares, em condições de retilinearidade, similares às apresentadas quando da sua instalação na BETC, esses foram presos entre dois suportes rígidos, e em seguida, tensionados com uma intensidade também similar a da sua instalação na BETC. Esse processo não permitia o acesso às extremidades do tubo capilar, pois

essas se encontravam no interior das conexões, que por sua vez estavam presas às garras tensionadoras.

Para se obter o comprimento total do tubo, foram efetuadas marcações próximas as suas extremidades, antes da soldagem das conexões de entrada e saída. Tais marcações situaram-se a 100 mm das extremidades. O comprimento total do tubo foi então obtido com soma de 200 mm ao comprimento medido entre tais marcações.

A medição do comprimento, entre as marcações, foi realizada com uma escala flexível (trena), marca Stanley, com divisão de escala igual a 1 mm sendo o comprimento de 100 mm, das marcações em relação às extremidades, avaliado através de um paquímetro.

Na tabela 5.2, são apresentados os resultados finais das medições do comprimento para os seis capilares ensaiados na BETC.

**TABELA 5.2 - Comprimento dos tubos capilares**

Tubo capilar	Comprimento [mm]
# 1	2926
# 2	3027
# 3	3020
# 4	2009
# 5	1993
# 6	2030

A incerteza de medição do comprimento (IML) é de duas vezes a divisão de escala do instrumento de medição, ou seja,  $IML = \pm 2$  mm. Tal incerteza é grande em termos absolutos devido à instrumentação e à metodologia usada, haja vista a dificuldade de se repetirem as condições de tensionamento do tubo. Essa incerteza é, entretanto, suficientemente pequena em termos relativos, representando uma incerteza de medição da ordem de  $\pm 0,1\%$  para os comprimentos medidos.

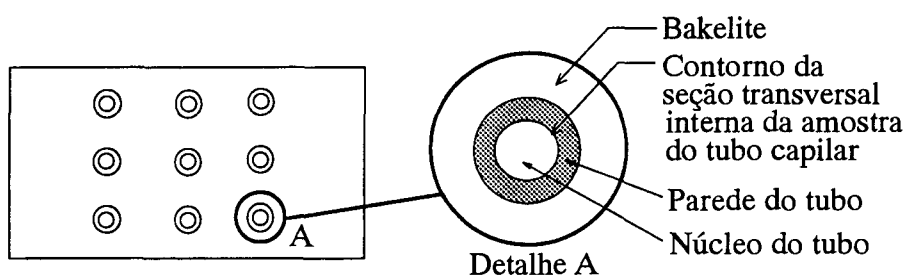
### 5.3 Medição do diâmetro interno dos tubos capilares

A medição do diâmetro interno dos tubos capilares foi obtida a partir da equação (5.1), tomando-se a média das áreas das seções transversais internas de diversas amostras dos tubos capilares de mesmo diâmetro nominal. Dessa forma o diâmetro (D) obtido é equivalente ao de uma seção transversal interna perfeitamente circular, e de mesma área que a área média medida ( $A_m$ ).

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A_m}{\pi}} \quad (5.1)$$

A medição da área da seção transversal interna dos tubos foi obtida por um processo ótico-computacional no qual foi utilizado um analisador de imagens (Image Analysis System), marca Buehler, modelo OMNIMET II. Esse equipamento amplia a imagem da seção transversal em 50 vezes e computa diretamente a sua área.

As seções transversais foram preparadas embutindo-se pequenas amostras de tubo em resina de bakelite, como mostrado na figura a seguir.



**FIGURA 5.2 - Corpo de prova para a medição do diâmetro**

Em seguida, as amostras foram lixadas, numa politriz, com lixas numeradas na seguinte ordem: 120 - 220 - 320 - 400 - 600. Após a última lixa, executou-se um polimento com alumina.

Durante o processo de lixamento e polimento, cuidou-se para não deformar as bordas dos tubos.

Foram usadas três amostras de cada diâmetro nominal ensaiado na BETC, perfazendo assim um total de nove amostras. As amostras foram tomadas das extremidades dos tubos capilares ensaiados na BETC, o que garante a validade dos valores obtidos para os capilares em questão.

As amostras dos tubos foram adequadamente posicionadas durante o embutimento, para terem seus eixos perpendiculares à superfície das seções dos tubos e, desta forma, representarem, efetivamente, suas seções transversais.

Realizaram-se nove medições de área para cada amostra, totalizando vinte e sete medições para cada diâmetro. Os resultados dessas medições são apresentados na tabela 5.3, através da área média, do seu desvio padrão, e do diâmetro equivalente, calculado pela equação (5.1).

**TABELA 5.3 - Diâmetro interno dos tubos capilares**

Diâmetro nominal [mm]	0,7	0,8	1,0
Área média [mm <sup>2</sup> ]	0,4717	0,5506	0,8589
Desvio padrão [mm <sup>2</sup> ]	0,0122	0,0085	0,0070
Diâmetro equivalente [mm]	0,78	0,84	1,04

A incerteza de medição do diâmetro é causada pela sua variação ao longo do comprimento do tubo e pela incerteza inerente ao processo e ao sistema de medição adotados.

O valor da incerteza de medição do diâmetro (IMD) foi calculado através da equação (5.2).

$$IM_D = S \cdot DP \cdot ST \quad (5.2)$$

onde: S - Fator de sensibilidade (taxa de variação) do diâmetro em relação à área, ou seja:

$$S = \partial D / \partial A = \frac{1}{\sqrt{\pi A}}$$

DP - Desvio padrão das 27 medições de área realizadas para cada diâmetro (tabela 5.3).

ST - Fator de Student (enquadramento=95%, número de elementos da amostra=27, ST=2)

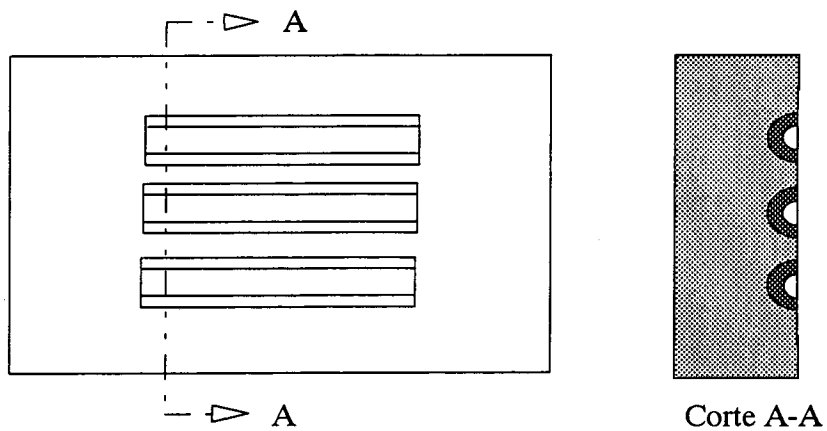
Partindo-se dessas considerações, chega-se ao valor de incerteza de medição característico para os diâmetro medidos:  $IM_D = \pm 0,02 \text{ mm}$ .

#### **5.4 Medição da rugosidade da superfície interna da parede dos tubos capilares**

A rugosidade da parede interna dos tubos capilares foi obtida deslizando-se o apalpador de um rugosímetro sobre a superfície da parede interna dos tubos. Para tal foi necessário construir corpos de prova para expor adequadamente a superfície da parede interna dos tubos e permitir sua fixação durante o deslizamento do apalpador.

Os corpos de prova foram confeccionados embutindo-se amostras dos extremos dos tubos capilares, com comprimentos de aproximadamente 20 mm, em resina de bakelite. Esse embutimento produziu blocos de bakelite na forma de paralelepípedos com as seguintes dimensões aproximadas: 40 X 20 X 15 mm.

Em cada bloco (corpo de prova) foram embutidas, no sentido longitudinal, três amostras de tubo, os quais foram posteriormente polidos numa politriz, de acordo com o processo descrito no item anterior. Ao final desse processo, obtiveram-se corpos de prova como o apresentado na figura 5.3.

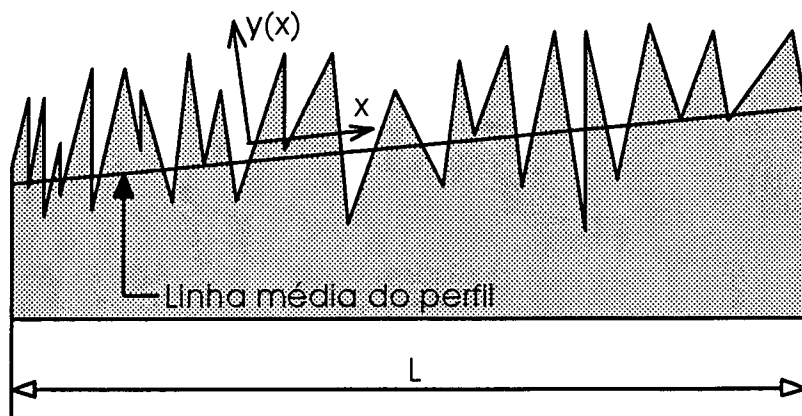


**FIGURA 5.3 - Corpo de prova para a medição da rugosidade**

As rebarbas remanescentes nas amostras foram retiradas com agulha de cabeça fina, cuidando-se para não provocar riscos na superfície.

O rugosímetro utilizado nas medições era do tipo Form Talysurf 120 e empregava um apalpador tipo agulha de diamante 112/200.

As amostras foram, ainda, examinadas através de um microscópio, com ampliação de 100 vezes, após as etapas de lixamento e de medição, para se verificar a ocorrência de riscos na superfície.



**FIGURA 5.4 - Perfil de rugosidade**

Neste trabalho, seguiram-se as recomendações da norma inglesa B.S. 1134 (1988), sendo, então, a rugosidade (R) obtida pela média aritmética do módulo das distâncias do contorno do perfil de rugosidade à linha média do mesmo ( $|y(x)|$ ), ao longo do comprimento de avaliação ( $0 < x < L$ ,  $L=4,0$  mm). A maneira adotada é a de aplicação universal podendo ser expressa matematicamente pela seguinte expressão:

$$R = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (5.3)$$

Foram produzidas seis amostras para cada diâmetro nominal, sendo os resultados das medições apresentados na tabela 5.4. Os espaços em vazio, nessa tabela, referem-se às amostras que apresentaram riscos, devido ao processo de polimento e/ou de medição.

**TABELA 5.4 - Rugosidade da superfície interna da parede dos tubos capilares [ $\mu\text{m}$ ]**

Diâmetro nominal [mm]	Número da amostra						Rugosidade média	Desvio padrão
	1	2	3	4	5	6		
0,7		0,72	0,74		0,87	0,66	0,75	0,08
0,8	0,56	0,63	0,58	0,66	0,47	0,66	0,59	0,07
1,0	0,69	0,81	0,68		0,67	0,73	0,72	0,05

A incerteza de medição da rugosidade é causada pela sua variação ao longo do comprimento do tubo e pela incerteza inerente ao processo e ao sistema de medição adotados. Através de um processo semelhante ao realizado para o diâmetro obteve-se o seguinte resultado característico para as rugosidades medidas:  $IMR = \pm 0,10 \mu\text{m}$ .



### **5.5 Medição das posições de medição de temperatura e das posições de medição de pressão ao longo dos tubos capilares**

As posições de medição de temperatura (PMTs) e as posições de medição de pressão (PMPs), ao longo dos tubos, foram obtidas por um processo semelhante ao adotado para a medição do comprimento, ou seja, fazendo-se a medição de suas posições a partir da marcação próxima à extremidade de entrada do tubo e somando-se os 100 mm correspondentes ao afastamento desta à extremidade de entrada do tubo.

Somente os capilares #1 e #6 foram submetidos à etapa de medições distribuídas, sendo as suas PMTs e PMPs dadas, respectivamente nas tabelas 5.5 e 5.6, onde as denominações significam o seguinte:

PMTE - Posição da medição de temperatura na entrada

PMTi - Posição do iésimo ponto de medição de temperatura

PMTS - Posição da medição de temperatura na saída

PMPE - Posição da medição de pressão na entrada

PMPi - Posição da iésima tomada de pressão ao longo do tubo capilar

PMPS - Posição da medição de pressão na saída

**TABELA 5.5 - Posições de Medição de Temperatura (PMTs)**

Denominação	Posição [m]	
	Capilar #1	Capilar #6
PMT E	0,000	0,000
PMT01	0,060	0,074
PMT02	0,355	0,084
PMT03	0,755	0,289
PMT04	0,765	0,517
PMT05	1,035	0,527
PMT06	1,045	0,618
PMT07	1,176	0,714
PMT08	1,186	0,524
PMT09	1,248	0,834
PMT10	1,317	0,844
PMT11	1,327	0,912
PMT12	1,391	0,922
PMT13	1,459	1,009
PMT14	1,469	1,019
PMT15	1,538	1,109
PMT16	1,600	1,119
PMT17	1,610	1,205
PMT18	1,676	1,215
PMT19	1,741	1,304
PMT20	1,751	1,314
PMT21	1,817	1,396
PMT22	1,883	1,496
PMT23	1,893	1,506
PMT24	2,023	1,599
PMT25	2,165	1,694
PMT26	2,175	1,704
PMT27	2,319	1,767
PMT28	2,446	1,818
PMT29	2,456	1,891
PMT30	2,603	1,901
PMT31	2,727	1,935
PMT32	2,737	1,945
PMT33	2,868	2,005
PMT S	2,926	2,030

**TABELA 5.6 - Posições de Medição de Pressão (PMPs)**

Denominação	Posição [m]	
	Capilar #1	Capilar #6
PMPE	0,000	0,000
PMP01	0,055	0,079
PMP02	0,760	0,523
PMP03	1,040	0,719
PMP04	1,181	0,839
PMP05	1,322	0,917
PMP06	1,464	1,014
PMP07	1,605	1,114
PMP08	1,746	1,210
PMP09	1,888	1,309
PMP10	2,170	1,501
PMP11	2,451	1,700
PMP12	2,732	1,896
PMP13	2,873	1,940
PMPS	2,926	2,030

As incertezas de medição das PMTs e das PMPs são as mesmas da medição do comprimento dos tubos capilares, já que se usou o mesmo processo de medição. Desta forma, chega-se a uma incerteza de medição de  $\pm 2$  mm para o posicionamento dos PMTs e PMPs.

### 5.6 Resumo das características geométricas dos tubos capilares.

Na tabela 5.10, são apresentados, resumidamente, os valores encontrados para comprimento, diâmetro interno e rugosidade absoluta da superfície interna dos tubos capilares ensaiados na BETC. São também apresentadas todas as incertezas de medição correspondentes.

**TABELA 5.6 - Características geométricas dos tubos capilares**

Característica geométrica	Tubo capilar						Incerteza de medição
	# 1	#2	# 3	# 4	# 5	# 6	
Comprimento [mm]	2926	3027	3020	2009	1993	2030	± 2
Diâmetro [mm]	0,78	0,84	1,04	0,78	0,84	1,04	± 0,02
Rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]	0,75	0,59	0,72	0,75	0,59	0,72	± 0,10

---

## 6 RESULTADOS

---

### 6.1 Introdução

Após a descrição da bancada, dos processos de calibração dos sistemas de medição e da caracterização geométrica dos tubos capilares apresentar-se-ão, neste capítulo, os resultados dos experimentos realizados.

As medições foram realizadas em duas etapas. A primeira consistiu na medição dos estados termodinâmicos do refrigerante apenas na entrada e na saída do tubo capilar e foi denominada de medição global. A segunda consistiu na medição dos estados termodinâmicos do refrigerante em várias pontos ao longo do tubo, sendo denominada de medição distribuída. Após a realização dos testes com um dado tubo capilar, os resultados obtidos foram analisados e, em seguida, foram aferidos os sistemas de medição, antes de se iniciar os testes com o próximo tubo capilar.

Salvo citação em contrário, todos os testes foram realizados em regime permanente, sendo os tubos capilares submetidos à condição de líquido subresfriado na entrada e escoamento crítico (bloqueado).

Os testes foram considerados estáveis (regime permanente) quando determinadas condições, descritas a seguir, foram mantidas.

Todos os testes foram realizados na presença de escoamento bloqueado. Tal condição foi comprovada, tanto através de processos computacionais como experimentais.

A isenção de óleo no escoamento foi garantida por dois separadores e por um filtro de óleo, instalados em série na descarga dos compressores. Tal condição foi verificada através da lavagem de um tubo capilar com clorofórmio, após uma série de medições. A solução obtida foi, então, vaporizada e seus resíduos analisados e quantificados. Tal análise indicou a presença de 9,8 mg de resíduos solúveis e 0,6 mg de resíduos insolúveis. Esses resíduos foram então submetidos a uma análise cromatográfica e apresentaram bandas características de óleo mineral e óleo ester.

Um procedimento menos rigoroso, porém, realizado mais freqüentemente, foi a inspeção visual das conexões de entrada e de saída dos tubos capilares durante as operações de montagem e desmontagem. Em ambos os casos, a presença de óleo no escoamento foi considerada desprezível.

A determinação do grau de pureza do fluido refrigerante foi verificada através da cromatografia de amostras de fluido, tanto na fase líquida como na fase gasosa. Em todos os testes o refrigerante apresentou um grau de pureza superior a 99,9% em volume.

Os resultados apresentados neste capítulo, juntamente com as características geométricas dos tubos capilares, formam o banco de dados experimentais, finalidade principal deste trabalho. É importante lembrar que todas as grandezas que compõem o banco de dados tiveram suas incertezas de medição determinadas, as quais encontram-se indicadas na tabela 6.1.

**TABELA 6.1 - Incertezas de medição**

Grandeza	Incerteza de medição
Comprimento / posição	$\pm 2$ mm
Diâmetro interno	$\pm 0,02$ mm
Rugosidade da parede interna	$\pm 0,10$ $\mu$ m
Temperatura	$\pm 0,2$ °C
Pressão	$\pm 0,02$ bar
Fluxo de massa	$\pm 0,03$ kg/h

Apresentar-se-á, inicialmente, a descrição da metodologia de obtenção dos pontos experimentais e o seu processamento. Em seguida os resultados finais, para as duas etapas de medição, serão apresentados e analisados.

## 6.2 Descrição do processo de obtenção dos pontos experimentais

Os pontos experimentais correspondem aos valores das grandezas, lidos e arquivados pelo sistema de medição da BETC, ao longo de um teste. Mesmo realizando-se testes em condições estabilizadas ocorreram pequenas variações nos parâmetros de interesse, em função das características dinâmicas de funcionamento do sistema de refrigeração. Os pontos experimentais foram então obtidos, estabelecendo-se critérios de máxima variação das grandezas num determinado intervalo de tempo.

Para obtenção de um ponto experimental, a bancada era controlada até se atingirem as condições desejadas, quando, então, procedia-se à aquisição computacional dos dados, os quais eram posteriormente processados. O controle da bancada, para a obtenção das condições desejadas, é descrito, em detalhe, no capítulo 3 (seção 3.6).

Para se obter condições de funcionamento, suficientemente estabilizadas, era necessário aguardar 15 minutos após a variação do grau de subresfriamento. Entretanto, no início da operação da bancada ou após a variação da pressão na entrada do tubo capilar, o tempo necessário para a estabilização das condições era da ordem de uma a duas horas.

A bancada era colocada em operação, ajustada uma pressão na entrada do tubo capilar e realizados vários testes ao longo do dia, procedendo-se apenas a modificações no grau de subresfriamento. Isso permitia minimizar os tempos de estabilização e, conseqüentemente, aumentar o número de testes realizados.

O tempo de duração dos testes foi bastante variado. Procedeu-se a testes com até três horas de duração, mas a maior parte teve duração entre 20 e 30 minutos.

Os testes foram processados utilizando-se arquivos gravados pelo sistema de aquisição da BETC. O programa empregado arranja o arquivo de dados, calcula as características do teste, (média, desvio padrão, valores máximos e mínimos de cada grandeza), gera gráficos das variáveis em função do tempo e correlaciona as diversas grandezas.

O grau de subresfriamento na entrada foi o único dado calculado durante o processamento. Isto se fez computando-se a diferença entre a temperatura efetivamente lida e a temperatura de saturação, correspondente à pressão na entrada.

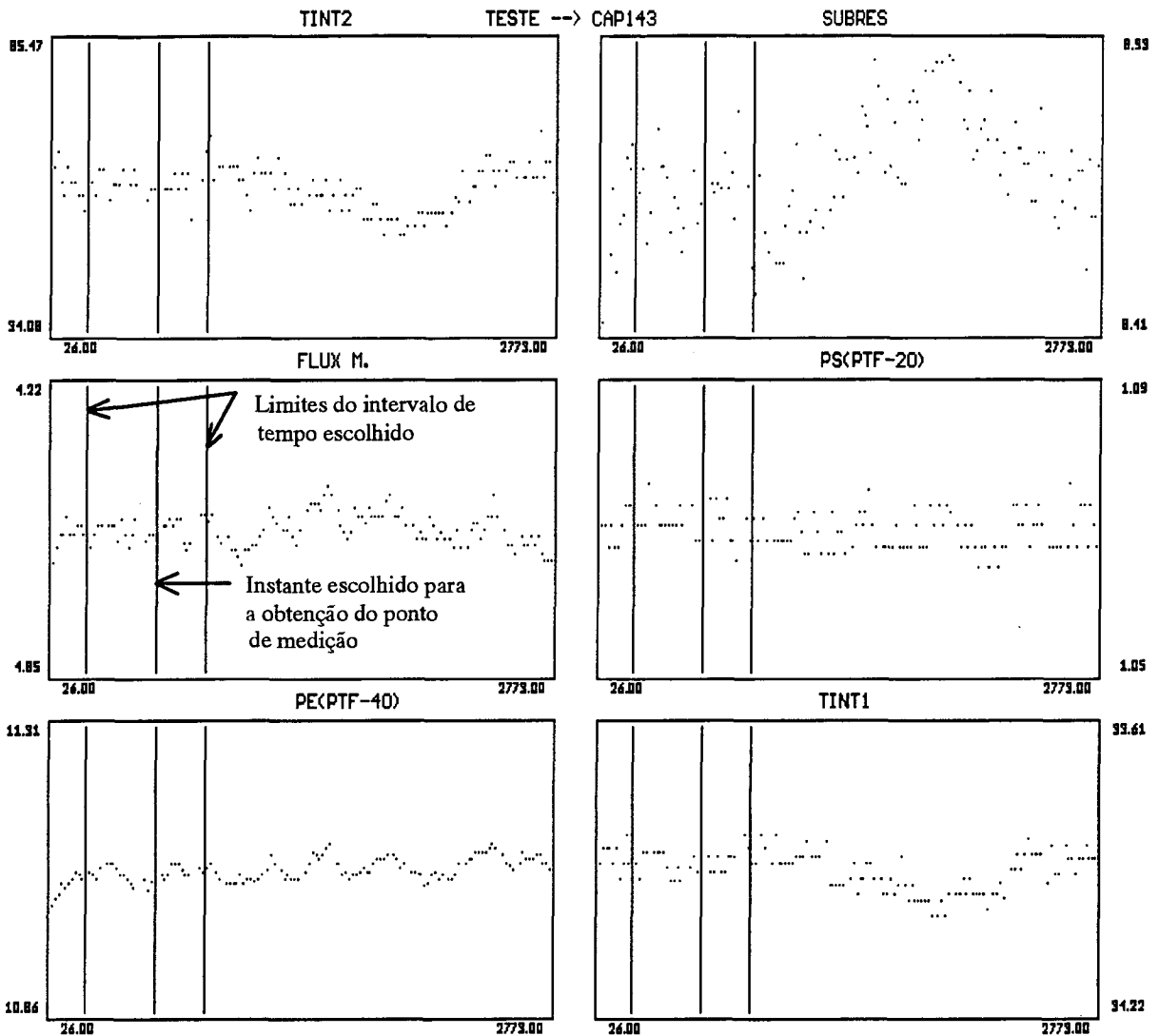
O processamento dos dados consistiu em se escolher, graficamente, intervalos de tempo ao longo do teste com no mínimo cinco minutos. Durante esse intervalo de tempo, os critérios citados na tabela 6.2, a seguir, tinham de ser observados.

**TABELA 6.2 - Critérios de estabilidade dos experimentos**

Grandeza	Varição máxima em 5 minutos
Temperatura na entrada	0,4 °C
Pressão na entrada	0,2 bar
Fluxo de massa	0,1 kg/s
Grau de subresfriamento	1,0 °C

A escolha do referido intervalo de tempo era feita através do posicionamento de duas barras verticais, em seis gráficos que continham as variáveis de interesse, como mostrado na figura 6.1. Em uma outra tela podia-se observar, numericamente, a alteração das variáveis no intervalo escolhido. A mudança de tela era simples, facilitando bastante o processamento dos testes. As barras verticais podiam, também, ser facilmente movimentadas na tela, até se encontrar um intervalo de tempo que satisfizesse os critérios estabelecidos. O ponto experimental era então obtido, localizando-se uma terceira barra vertical na região média do intervalo selecionado, e procedendo-se à média aritmética dos valores contidos num intervalo de tempo de um minuto em torno dessa barra.





**FIGURA 6.1 - Gráficos utilizados para o processamento de um teste**

### 6.3 Resultados das medições globais

As medições globais compreendem o fluxo de massa e os estados termodinâmicos do refrigerante na entrada e na saída dos tubos capilares. Na entrada do tubo, o estado termodinâmico do fluido foi avaliado através da sua pressão e do seu grau de subresfriamento. Na saída, como consequência da expansão sofrida pelo fluido ao longo do tubo capilar, tinha-se

sempre uma mistura de líquido e vapor saturados, sendo o estado termodinâmico determinado somente através da pressão.

Nessa etapa de medição foram considerados três diferentes fluidos refrigerantes, quais sejam: R12, R134a, R600a, com os quais se obteve um total de 714 pontos. Nas tabelas 6.3, 6.4 e 6.5 mostram-se, respectivamente, a distribuição do número de testes em função da pressão de entrada e do tubo capilar, para os refrigerantes R12, R134a e R600a. Em cada pressão foram realizados testes com diferentes valores de graus de subresfriamento na entrada.

**TABELA 6.3 - Número de testes para o R12 - medição global**

Tubo capilar	Pressão na entrada [bar]				Total
	9	11	14	18	
# 1	11	15	15	10	51
# 2	11	11	13	8	43
# 3	7	8	9	12	36
# 4	9	23	14	8	54
# 5	24	11	17	7	59
# 6	13	9	11	5	38
Total	75	77	79	50	281

**TABELA 6.4 - Número de testes para o R134a - medição global**

Tubo capilar	Pressão na entrada [bar]			Total
	9	11	14	
# 1	30	35	22	87
# 3	X	21	31	52
# 4	15	16	23	54
# 6	X	27	24	51
Total	45	99	100	244

**TABELA 6.5 - Número de testes para o R600a (Isobutano) - medição global**

Tubo capilar	Pressão na entrada [bar]			Total
	7	9	11	
# 1	24	17	62	103
# 4	31	36	19	86
Total	55	53	81	189

A pressão na entrada dos tubos capilares, durante os testes, foi ajustada para se aproximar, ao máximo dos valores indicados nas tabelas 6.3, 6.4 e 6.5, os quais são apenas referenciais. O X na tabela 6.4 indica que não foram realizados testes naquela condição.

Na escolha das condições a serem testadas e do número de pontos a serem obtidos, foram considerados os seguintes aspectos: i) aplicações típicas dos tubos capilares (geometria, condições na entrada e fluido refrigerante), ii) análise comparativa dos resultados e iii) limite de tempo para a execução deste trabalho.

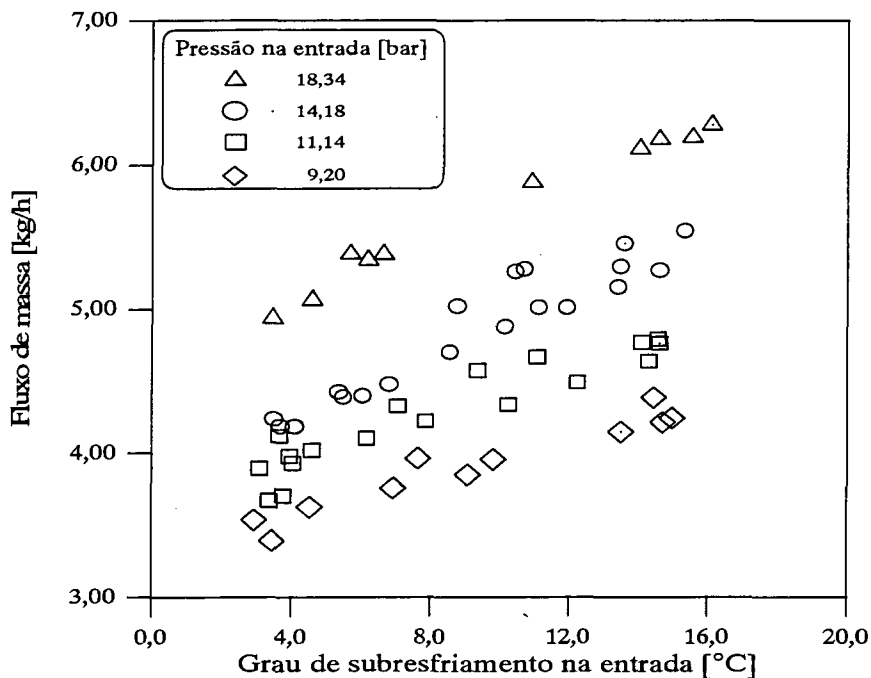
Os testes foram realizados, em cada pressão de entrada, com graus de subresfriamento variando entre 2 e 15 °C. Graus de subresfriamento, na faixa de 0 a 2 °C não foram considerados devido às dificuldades de se evitar a presença de bolhas na entrada do tubo capilar.

Os resultados experimentais são apresentados, em detalhes, por Melo et al. (1993). Nesse trabalho são apresentadas tabelas, semelhantes à tabela 6.6, onde as letras C, H e I, no nome dos testes, identificam respectivamente, os fluidos R12, R134a e R600a.

**TABELA 6.6 - Resultados experimentais**

Número do teste	Nome do teste	Pressão na entrada [bar]	Fluxo de massa [kg/h]	Grau de sub-resfriamento na entrada [°C]	Pressão na saída [bar]
1	C10903A	9,20	3,39	3,4	0,97
2	C10905A	9,20	3,96	7,6	0,99
3	C10909A	9,20	3,95	9,8	1,00
1	H10902A	9,21	3,02	1,5	0,99
2	H10903A	9,26	3,33	2,6	1,06
3	H10903B	9,27	3,10	1,7	1,05
1	I10703A	7,23	2,34	4,3	1,02
2	I10703B	7,22	2,00	4,2	0,97
3	I10704A	7,26	2,02	4,8	0,97

Como as condições na saída do tubo não influenciam o escoamento, já que todos os testes foram realizados em condições de bloqueio (escoamento crítico), os resultados podem ser apresentados sem incluir tais condições. Na figura 6.2, é mostrado o fluxo de massa de R12 através do capilar #1, em função do grau de subresfriamento e da pressão na entrada. Figuras semelhantes a essa que permitem uma apresentação resumida e qualitativa dos resultados, são apresentadas no apêndice II, para cada fluido e tubo capilar considerados.



**FIGURA 6.2 - Resultados experimentais - R12 / capilar #1**

Na apresentação dos resultados para o R12, a pressão na entrada do tubo capilar apresenta um valor único, como indicado na figura 6.2 e nas figuras II.1 a II.6. Entretanto, na apresentação dos resultados para o R134a e R600a, como se pode verificar nas figuras II.7 a II.12, indicou-se uma faixa de valores para cada patamar de pressão na entrada. Isso se deu em virtude dos testes realizados com os fluidos R134a e R600a terem apresentado maior dificuldade de estabilização. Tal procedimento permitiu, entretanto, a construção de figuras semelhantes à figura 6.2.

Os resultados obtidos, mostrados através de gráficos no apêndice II, apresentaram um considerável espalhamento do fluxo de massa, para as mesmas condições de operação. Esse espalhamento era inesperado, principalmente quando se consideram as pequenas incertezas de medição estabelecidas e o fato do fluxo de massa no escoamento crítico (bloqueado) ser função somente das condições na entrada. Esse espalhamento foi estudado, quando então observou-se a ocorrência de variações abruptas no fluxo de massa, em alguns ensaios estabilizados, o que originava fluxos de massa diferentes para as mesmas condições de entrada. Isto desencadeou, num período inicial, a reavaliação intensiva e detalhada dos sistemas de medição da BETC, principalmente do sistema de medição de fluxo de massa. Posteriormente, verificou-se que tais variações (saltos) provocavam a variação da pressão na saída, o que eliminou qualquer dúvida em

relação às medições e concretizou a ocorrência dos saltos no fluxo de massa, já que duas grandezas, obtidas de forma distinta, indicavam a ocorrência de um mesmo fenômeno.

Deve-se observar que as variações na pressão de saída são consequência e não causa dos saltos de fluxo de massa, já que o escoamento é crítico e a condição na saída não afeta o fluxo de massa. A pressão na saída cresce com o aumento do fluxo de massa através do tubo capilar porque o deslocamento volumétrico dos compressores da BETC é constante. Para aumentar o fluxo de massa através dos compressores, e assim manter o sistema em equilíbrio, a pressão de sucção deve aumentar.

A ocorrência dos saltos no fluxo de massa foram mais freqüentes e melhor evidenciados em testes transientes, onde o grau de subresfriamento era variado continuamente, enquanto se mantinha a pressão constante. A figura 6.3 mostra os resultados de um teste transiente onde se evidenciam os saltos de fluxo de massa que caracterizam o espalhamento observado nos resultados finais apresentados. O comportamento temporal do fluxo de massa e das condições na entrada e na saída do tubo capilar no teste, ilustrado na figura 6.3, é mostrado na figura 6.4 onde se pode verificar que os saltos no fluxo de massa não são acompanhados por variações nas condições de entrada, mas influenciam levemente a pressão de saída.

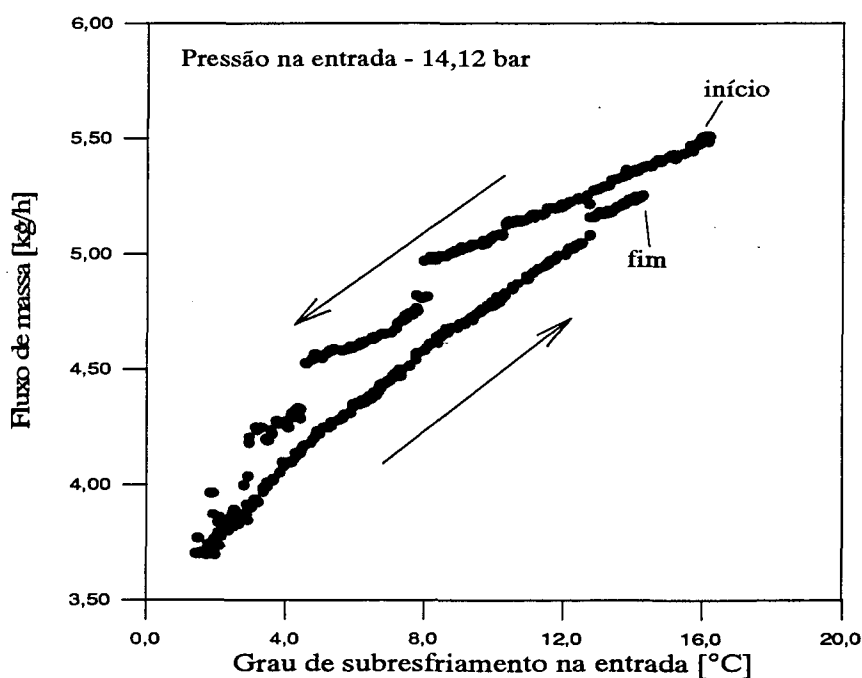
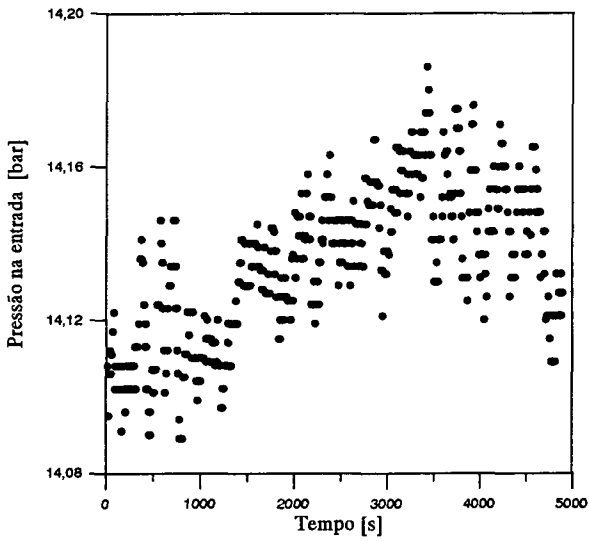
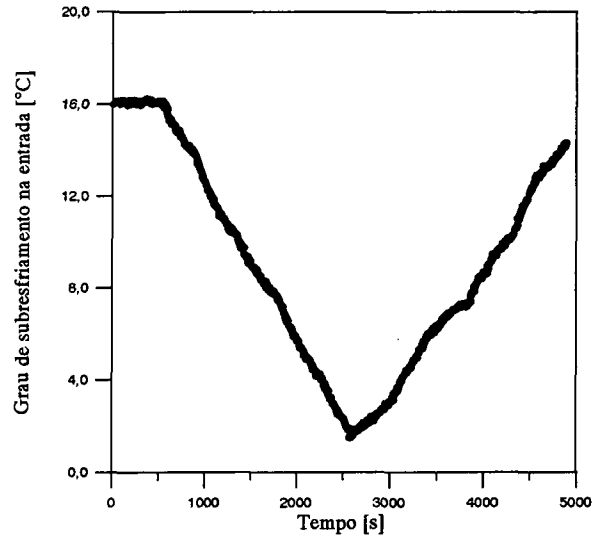


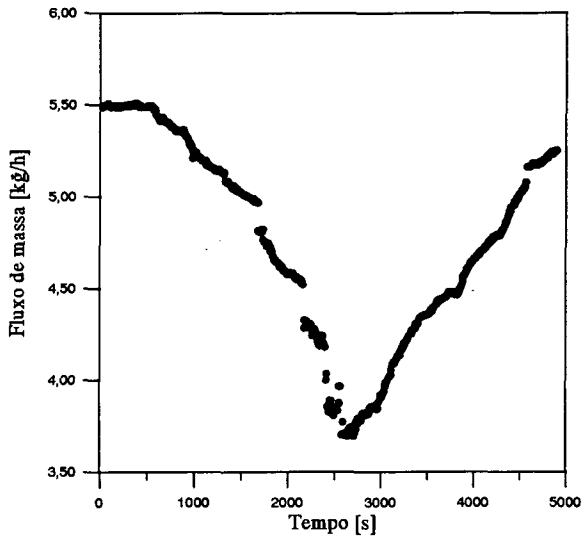
FIGURA 6.3-Teste transiente - R134a / capilar #1



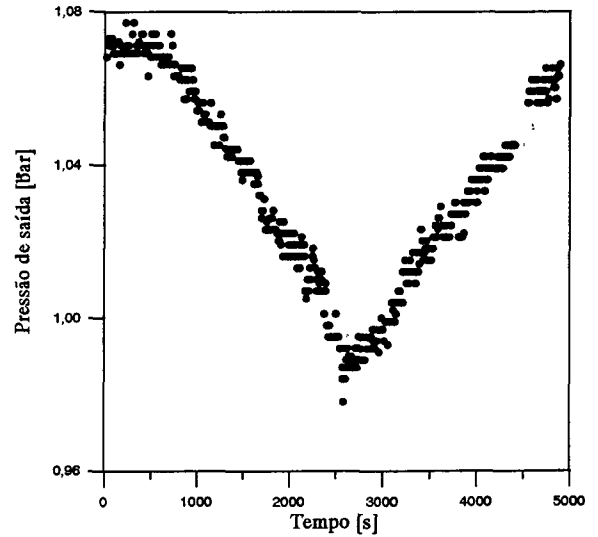
(a)



(b)



(c)



(d)

**FIGURA 6.4 - Teste transiente - R134a / capilar #1**

O resultado do teste transiente representa o que ocorre durante o período de ajuste dos pontos experimentais quando se varia o grau de subresfriamento e, em alguns casos, também, a pressão de entrada. Dessa forma, verifica-se que, dependendo do momento quando se cessa a

atuação dos controles para se obter o teste estabilizado, pode-se obter valores diferentes de fluxo de massa. Isso, em parte, explica o espalhamento observado.

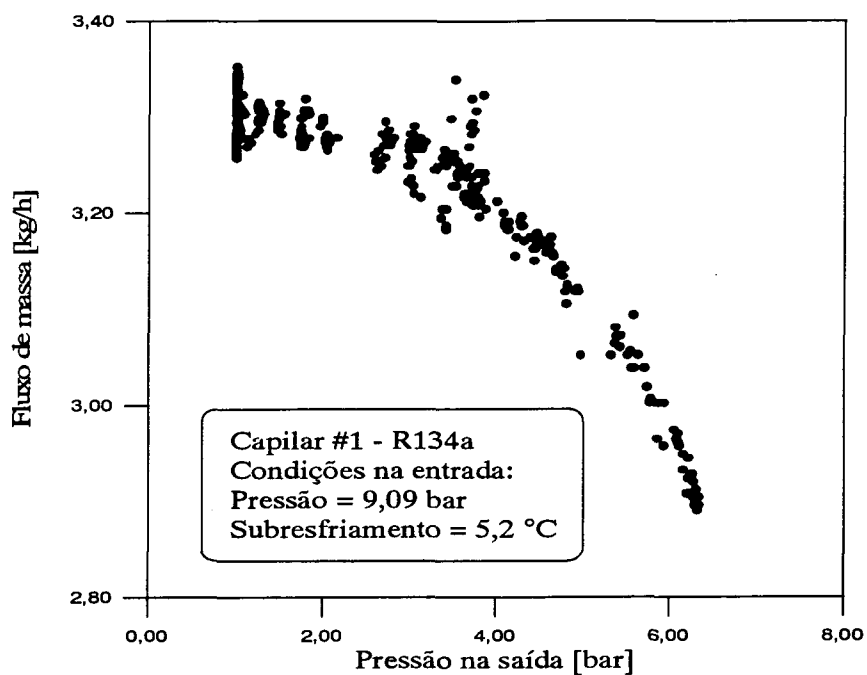
Pode-se observar, também, na figura 6.3, diferentes tendências de variação do fluxo de massa com o grau de subresfriamento em diferentes intervalos de tempo. Isso pode levar a diferentes fluxos de massa para uma mesma condição na entrada, quando se cessa a atuação nos controles durante a fase de ajuste das condições de funcionamento. Essa fase de ajuste precede todos os testes estabilizados e é análoga ao teste transiente aqui apresentado.

Tais variações nas características de restrição do tubo capilar são responsáveis pelos espalhamentos identificados e devem estar relacionadas à variação do comprimento da região de escoamento de líquido devido à presença de metaestabilidade no escoamento. Isso será investigado, com maiores detalhes na fase de medições distribuídas, as quais serão apresentadas posteriormente.

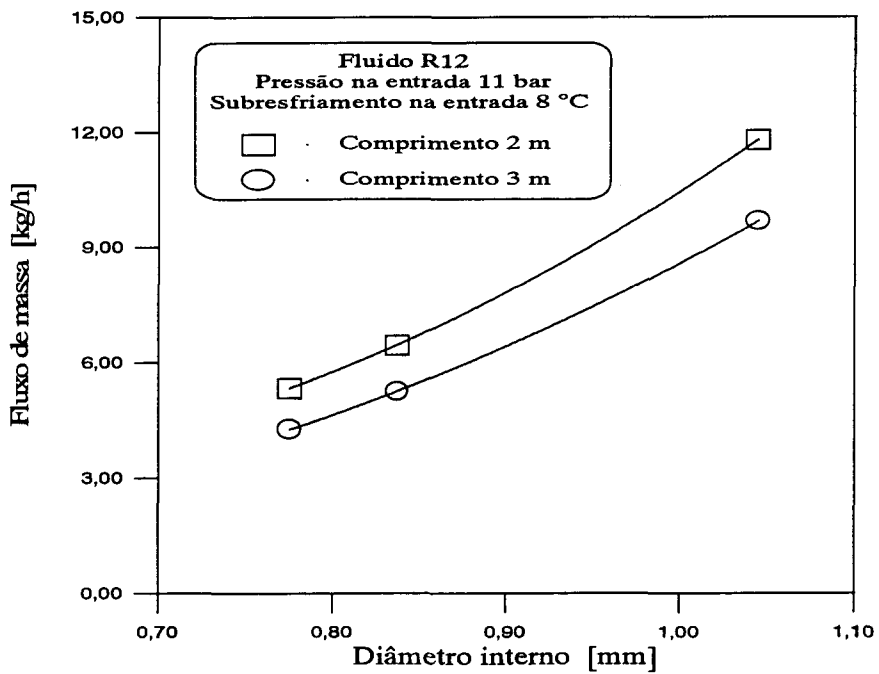
Com o objetivo de se determinar a pressão de bloqueio, foram realizados testes variando-se somente a pressão na saída, utilizando a válvula localizada logo após a câmara de saída do tubo capilar para, dessa forma, não alterar a pressão de sucção do sistema de refrigeração e, conseqüentemente, as demais condições de funcionamento. Isso possibilitou variar somente a pressão na saída do tubo capilar sem alterar suas condições na entrada e observar o efeito sobre o fluxo de massa. Na figura 6.5, pode-se verificar que o fluxo de massa mantém-se praticamente constante até atingir a pressão crítica na saída do tubo capilar. Desse ponto em diante, o aumento na pressão de saída provocou uma diminuição no fluxo de massa. Esses testes serviram para comprovar que todos os experimentos foram realizados em condições de escoamento bloqueado.

Os resultados das medições globais, apresentados no apêndice II, mostram que o fluxo de massa tem um comportamento crescente com a pressão e com o grau de subresfriamento na entrada. O comportamento quanto ao diâmetro e ao comprimento do tubo é mostrado na figura 6.6.



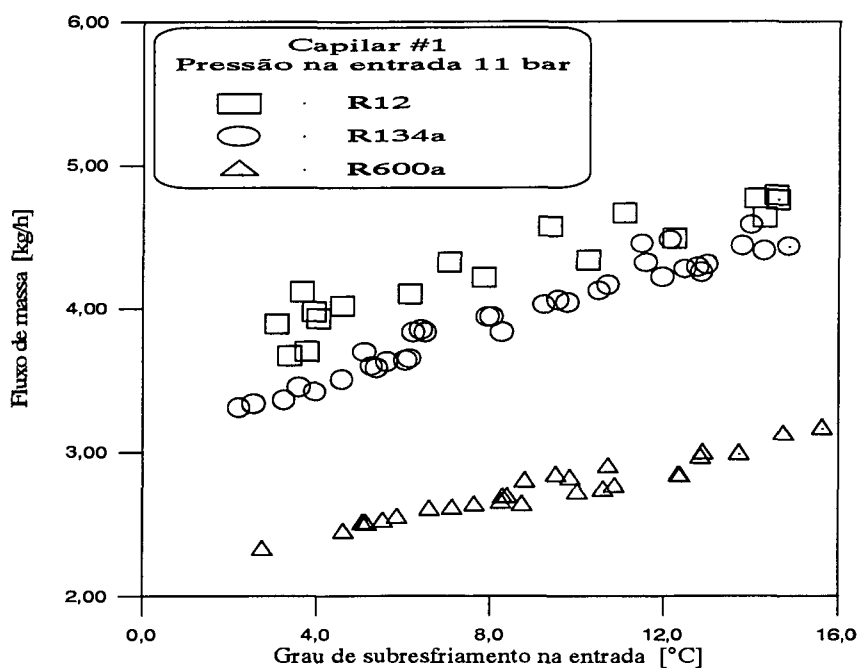


**FIGURA 6.5- Teste para a determinação da pressão de bloqueio**



**FIGURA 6.6 - Influência do comprimento e do diâmetro no fluxo de massa**

Os capilares #1 e #4 foram testados na pressão de 11 e 9 bar, em vários graus de subresfriamento e com os três fluidos refrigerantes utilizados neste trabalho, R12, R134a e R600a. Na figura 6.7, é apresentada uma comparação envolvendo os três refrigerantes, para o capilar #1 e para a pressão de 11 bar. Pode-se verificar que o fluxo de massa de R134a é levemente inferior ao de R12 e que ocorre uma redução da ordem de 25% para o de R600a. Essa tendência foi mantida nos demais ensaios realizados.



**FIGURA 6.7 - Efeito do refrigerante no fluxo de massa**

Os resultados das medições globais, apresentados nesta seção, permitem, também, a validação de modelos computacionais. Tal validação fica, obviamente, comprometida pelo espalhamento dos resultados experimentais. Outro inconveniente no uso das medições globais na validação de modelos numéricos é a falta de informações experimentais mais detalhadas sobre o escoamento que permitiria avaliar qual o ponto falho da modelação que possa estar provocando possíveis discordâncias entre os resultados experimentais e computacionais.

Mesmo diante das dificuldades anteriormente levantadas, os resultados dessa etapa de medição foram utilizados por Boabaid (1994) para a validação do modelo computacional CAPILAR (Melo et al.,1990). Essa comparação mostrou também um espalhamento da diferença entre os resultados experimentais e computacionais. Isso mostrou que o modelo numérico CAPILAR é representativo do comportamento básico do escoamento, faltando-lhe, porém, a habilidade de interpretar os espalhamentos verificados no resultado experimental. Pode-se, assim, levantar a hipótese de que o espalhamento das diferenças entre os resultados computacionais e experimentais ocorre devido, principalmente, ao fato do modelo não considerar as causas de tais espalhamentos nos resultados experimentais.

Com o objetivo de melhor compreender o escoamento e, assim, poder explicar o espalhamento observado, decidiu-se realizar uma etapa de medições distribuídas, onde a pressão e temperatura do refrigerante são monitoradas ao longo do comprimento do tubo capilar.

#### 6.4 Resultados das medições distribuídas

Nessa etapa, utilizou-se o fluido refrigerante R134a e os tubos capilares #1 e #6, já testados na etapa das medições globais. Na tabela 6.7, indica-se o número de testes realizados com cada tubo capilar e com cada pressão na entrada. Para cada pressão na entrada, o grau de subresfriamento foi variado entre 2 e 16 °C, dando origem a um total de 189 pontos. As situações indicadas com X, na tabela, não foram testadas. A escolha dos parâmetros dos testes, nessa etapa de medições, tais como tubo capilar, fluido refrigerante e condições na entrada, seguiu os mesmos critérios apresentados na etapa das medições globais.

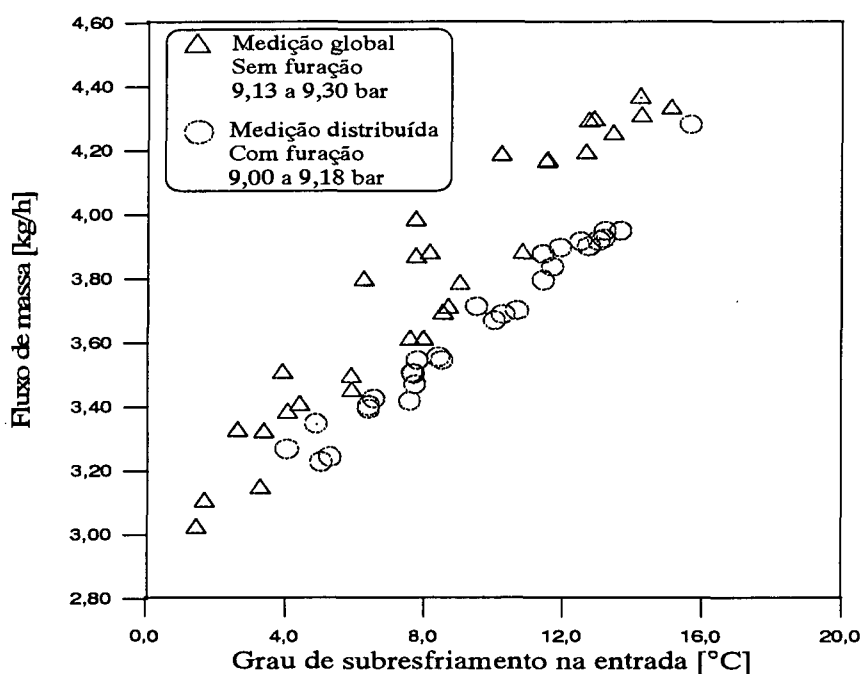
**TABELA 6.7 - Número de testes com medição distribuída**

Tubo capilar	Pressão na entrada [bar]			Total
	9	11	14	
# 1	55	X	X	55
# 6	X	53	81	134
Total	55	53	81	189

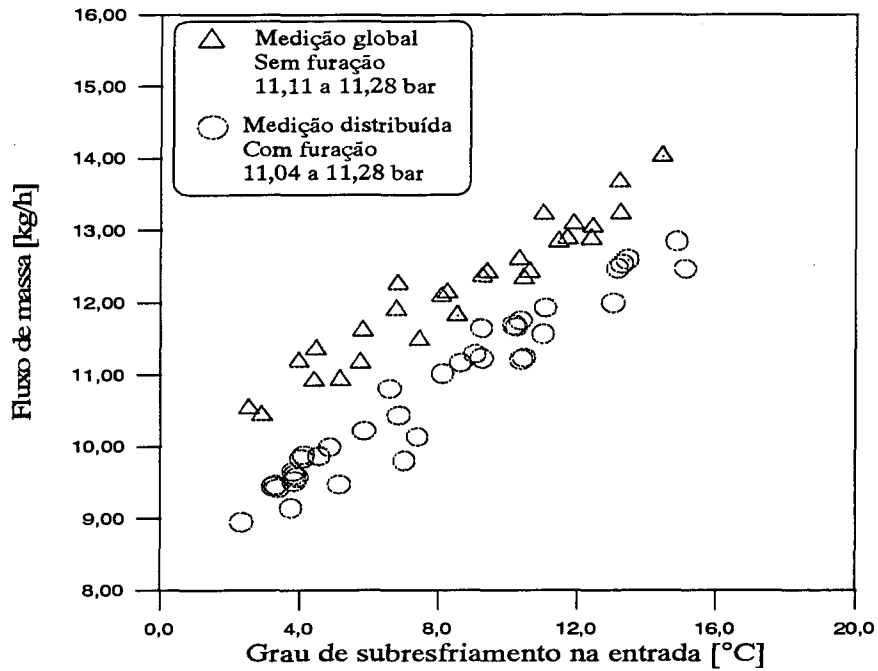
Dependendo do caso, cada teste envolve aproximadamente 50 dados. Dessa forma, para possibilitar a apresentação em uma forma resumida qualitativa dos resultados, serão utilizados gráficos dos perfis de temperatura e pressão ao longo do tubo capilar. Todos os resultados são, no entanto, apresentados detalhadamente por Melo et al. (1994).

As posições das medições de temperatura e de pressão ao longo dos tubos capilares foram fornecidas no capítulo 5 (seção 5.5) e constituem informação complementar aos resultados das medições distribuídas. Incluindo as medições na entrada e na saída, foram medidas 35 temperaturas e 11 pressões ao longo do tubo capilar #1 e 35 temperaturas e 13 pressões ao longo do tubo capilar #6.

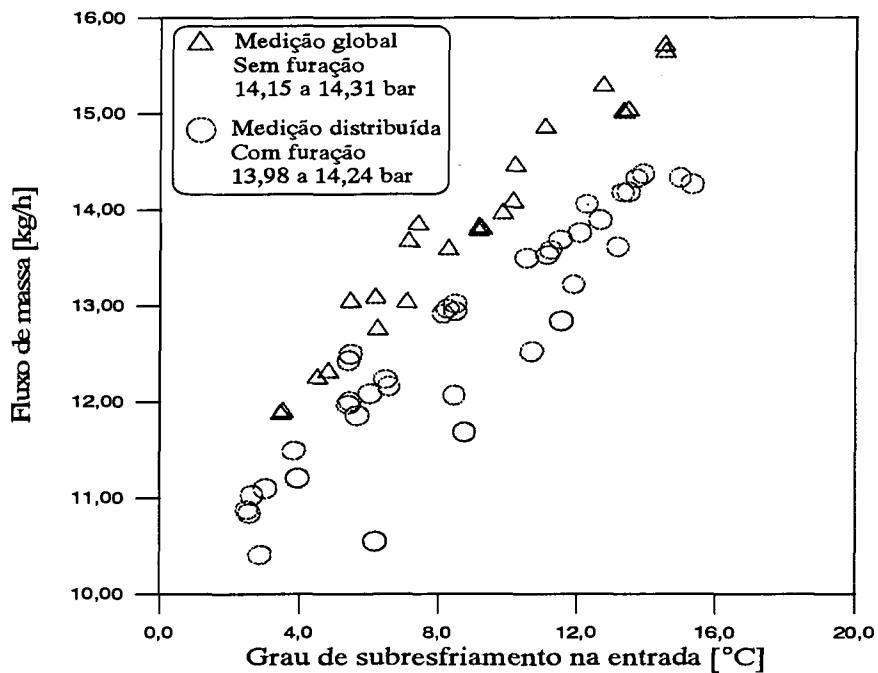
Antes de se passar para a apresentação dos resultados das medições distribuídas, apresentar-se-á uma comparação entre os resultados obtidos, de forma global, antes e após as furações dos tubos. Tais resultados são mostrados nas figuras 6.8 a 6.10 e indicam uma diminuição do fluxo de massa decorrente das furações, caracterizando, assim, a ocorrência de influência das furações para tomada de pressão sobre o escoamento.



**FIGURA 6.8 - Resultado das medições distribuídas e comparação com as medições globais - capilar #1 / R134a**



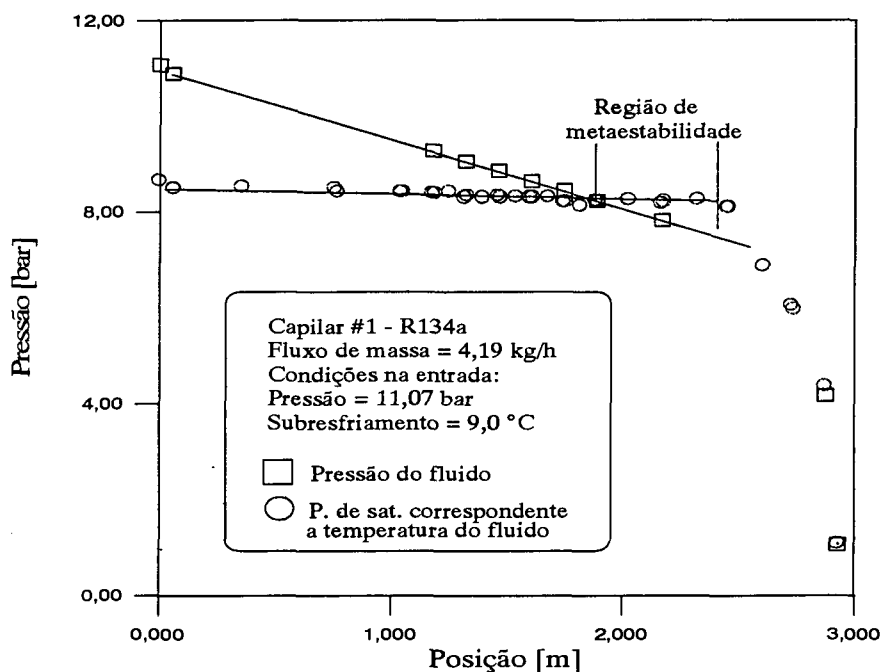
**FIGURA 6.9- Resultado das medições distribuídas e comparação com as medições globais - capilar #6 / R134a**



**FIGURA 6.10- Resultado das medições distribuídas e comparação com as medições globais - capilar #6 / R134a**

Na figura 6.11, apresenta-se um resultado típico das medições distribuídas. Tal figura mostra a pressão do fluido e a pressão de saturação correspondente a sua temperatura em vários pontos ao longo do tubo capilar. Pode-se identificar a perda de carga localizada na entrada, a região de redução linear de pressão, correspondente à região de escoamento de líquido, e uma região, com taxa de redução da pressão crescente, correspondente à região de escoamento bifásico. A região de metaestabilidade, indicada na figura 6.11, teve sua ocorrência variável ao longo dos vários testes realizados nas mesmas condições na entrada. Isso permitiu associar essa região com o fluxo de massa e explicar o espalhamento observado.

Na região final do tubo, os pontos de pressão e temperatura são coincidentes, indicando a presença de uma mistura de líquido e vapor saturado em equilíbrio termodinâmico.



**FIGURA 6.11- Resultado típico das medições distribuídas**

O espalhamento do fluxo de massa, nas mesmas condições na entrada, como mostrado nas figuras 6.8 a 6.10, foi novamente observado em testes estabilizados. Continuaram, entretanto, mais freqüentes em testes transientes, os quais, na verdade, são uma etapa anterior e obrigatória na realização de qualquer teste estabilizado.

Na figura 6.12, mostra-se o fluxo de massa em função do grau de subresfriamento em um teste transiente, onde se pode verificar a ocorrência de um espalhamento do fluxo de massa para um mesmo valor de subresfriamento. A pressão na entrada foi mantida constante na faixa de  $\pm 0,5\%$  de seu valor médio (11,12 bar) durante esse teste. Os diferentes símbolos dessa figura representam diferentes intervalos de tempo, como mostrado nas figuras 6.13a e 6.13b, que apresentam respectivamente o comportamento do fluxo de massa e do grau de subresfriamento em função do tempo. Pode-se verificar a ocorrência de um salto no fluxo de massa, em um determinado instante, o qual não é acompanhado de uma variação semelhante no grau de subresfriamento. As linhas verticais mostradas nestes gráficos representam os dois instantes nos quais são apresentados os perfis mostrados nas figuras 6.14a e 6.14b, respectivamente, antes e após o salto. Os perfis permitem verificar que, para as mesmas condições na entrada, ocorre um fluxo de massa maior devido à presença de uma maior região de metaestabilidade no escoamento.

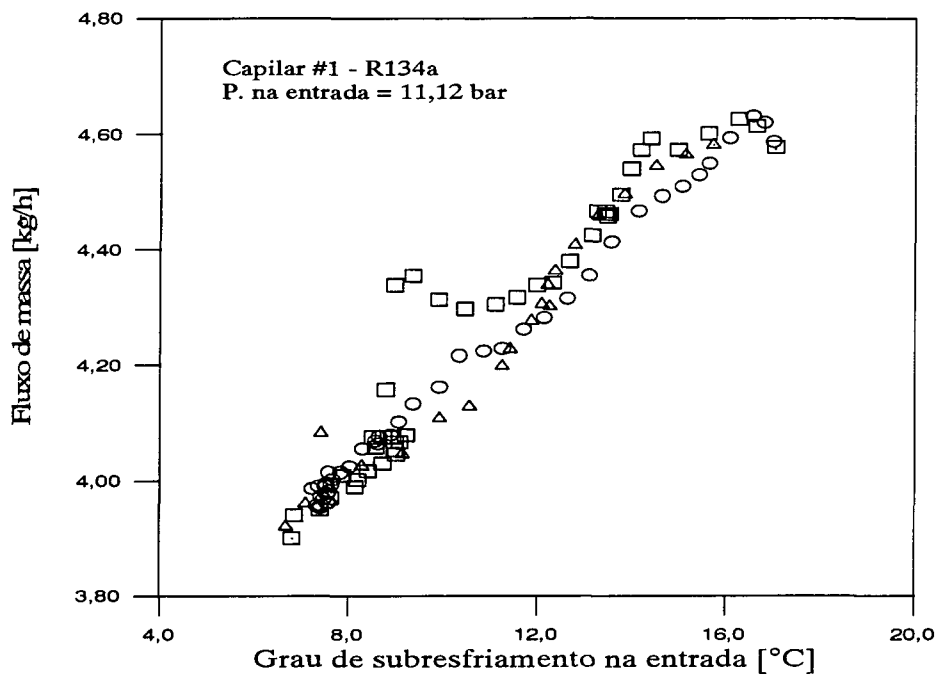
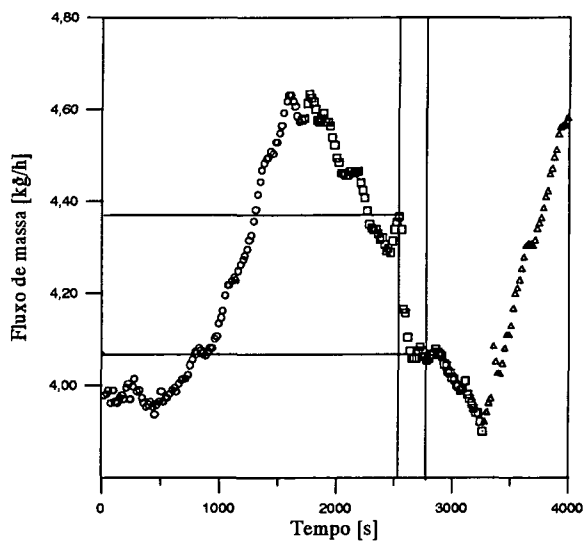
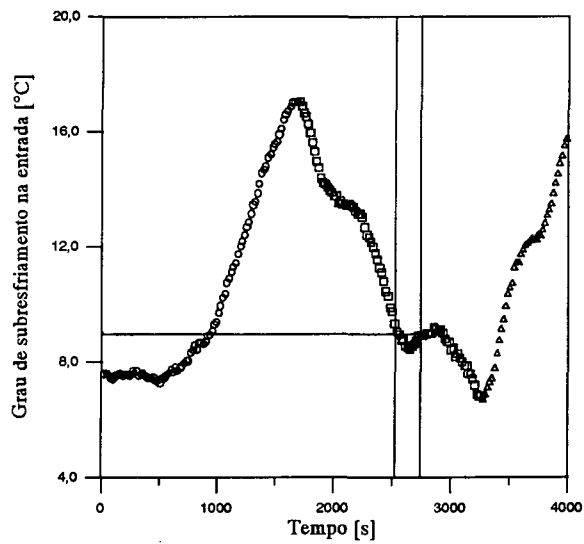


FIGURA 6.12 - Teste transiente com medições distribuídas



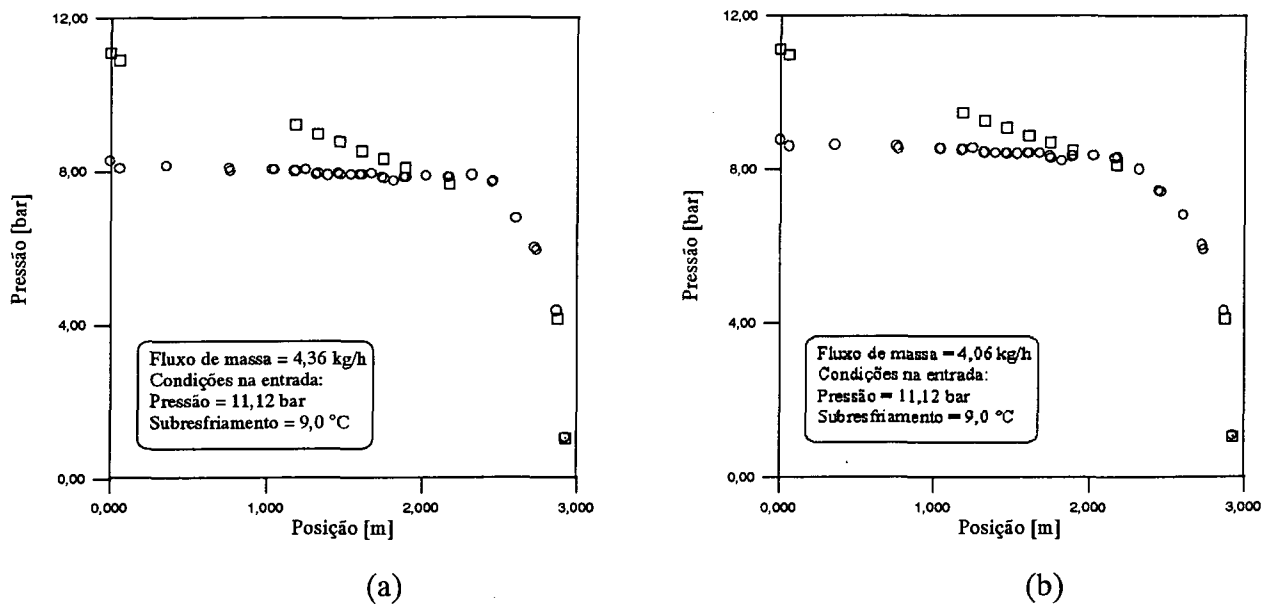
(a)



(b)

FIGURA 6.13 - Condições durante o teste transiente com medições distribuídas





**FIGURA 6.14 - Perfis antes e após o salto de fluxo de massa no teste transiente**

As medições distribuídas permitiram comprovar a existência da região de metaestabilidade no escoamento de fluido refrigerante em tubos capilares e que a extensão de tal região é variável para as mesmas condições na entrada, o que origina diferentes valores de fluxo de massa. Foi também possível verificar que as furações realizadas nos tubos, para medição das pressões, causam uma diminuição no fluxo de massa. Recomenda-se, portanto, minimizar o número e o diâmetro das tomadas de pressão, já que essas afetam o escoamento.

---

## 7 CONCLUSÃO

---

Este trabalho consistiu numa análise experimental do escoamento de fluidos refrigerantes em tubos capilares. Desenvolveu-se uma bancada experimental, bem como calibraram-se os seus sistemas de medição. Tal bancada permitiu a obtenção de uma grande quantidade de dados experimentais que estão possibilitando o desenvolvimento e a validação de modelos computacionais.

Foi gerado um extenso banco de dados utilizando-se tubos capilares com comprimento, diâmetro e rugosidade da parede interna medidos e com suas incertezas de medição determinadas. As demais grandezas medidas, também, tiveram suas incertezas de medição determinadas, o que qualifica as informações fornecidas.

O banco de dados foi obtido para o escoamento adiabático, bloqueado e em regime permanente de fluido refrigerante puro e isento de óleo. Os tubos capilares eram retos e horizontais. Foram realizadas duas etapas de medição, sempre empregando líquido subresfriado na entrada. Na primeira etapa foi medido o fluxo de massa e as condições na entrada e na saída, para seis tubos capilares e três fluidos refrigerantes (R12, R134a, e R600a) em diferentes condições na entrada, perfazendo um total de mais de 700 pontos experimentais. Na segunda etapa foi medido o fluxo de massa e as condições do fluido refrigerante em vários pontos ao longo de dois dos tubos já testados na etapa anterior, para o R134a e com diferentes condições na entrada, totalizando 189 pontos experimentais.

O banco de dados fornecido permite a modelação e a correlação de vários aspectos do escoamento, tais como a perda de carga localizada na entrada dos tubos, os fatores de fricção nas regiões de escoamento de líquido e de escoamento bifásico e a extensão da região de escoamento metaestável.

Os resultados experimentais permitem analisar o escoamento de fluidos refrigerantes em tubos capilares em função dos seus parâmetros básicos, ou seja, condição na entrada, geometria do tubo e fluido refrigerante. Em relação às condições na entrada, verificou-se que o fluxo de

massa cresce tanto com a pressão como com o grau de subresfriamento. Comprovou-se, também, que o fluxo de massa aumenta com o aumento do diâmetro e com a redução do comprimento. A rugosidade da parede interna do tubo não foi mantida como parâmetro independente na análise experimental e seus efeitos não puderam ser avaliados. Os refrigerantes R12 e R134a apresentaram um comportamento similar enquanto que o R600a apresentou uma redução da ordem de 25% no fluxo de massa, nas mesmas condições de operação.

Foi confirmada a ocorrência da região de metaestabilidade no escoamento. A extensão dessa região é variável, o que provoca valores também variáveis de fluxo de massa, nas mesmas condições de operação. As alterações bruscas na extensão da região de metaestabilidade foram detectadas com mais intensidade nos testes transientes, embora tenham ocorrido também em testes estabilizados.

As medições de pressão ao longo do tubo foram realizadas através de tomadas de pressão. Os tubos ensaiados foram os mesmos de etapas anteriores, quando não havia tomadas de pressão. As tomadas de pressão provocam uma redução no fluxo de massa, o que indica um aumento na resistência ao escoamento. Tal fato necessita de um maior esforço analítico e/ou experimental para minimizar tal influência em trabalhos futuros.

Realizaram-se medições variando-se apenas a pressão na saída do tubo, quando se confirmou a ocorrência de escoamento crítico (bloqueado) e avaliou-se a pressão crítica do escoamento.

Como trabalhos futuros sugere-se o seguinte: i) tubo capilar formando um trocador de calor com a linha de sucção, ii) tubo capilar enrolado helicoidalmente e iii) óleo misturado ao fluido refrigerante em certas concentrações.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Manual on the use of thermocouples in temperature measurement*, STP 470B. Philadelphia, 1970.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. *1994 ASHRAE Refrigeration Handbook (SI)*. Atlanta : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., 1994. Chapter 44, p. 44.21-44.30.

BAECKSTROEM, M. "Calculation of capillary tubes for throttling (german)". *Kaeltetechnik*, vol.10, n. 9, p. 283-289, 1958.

BENEDICT, R. P. *Fundamentals of temperature, pressure and flow measurements*. 2.ed. Philadelphia : John Wiley & Sons, [1976?].

BOABAID NETO, C. *Análise numérica do desempenho de tubos capilares adiabáticos*. Florianópolis, 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.

BOLSTAD, N. M.; JORDAN, R. C. "Theory and use of the capillary tube expansion device". *Refrigerating Engineering*, December, v. 56, n. 6, p. 519, 1948.

\_\_\_\_\_. "Theory and use of the capillary tube expansion device, part II, nonadiabatic flow". *Refrigerating Engineering*, June, p.572-583, 1949.

BRITISH STANDARD B. S. 1134: Part 1: *Assessment of surface texture. Part 1. Methods and instrumentation.* 1988.

CHEN, Z. H.; LI, R. Y.; LIN, S.; CHEN, Z. Y. "A correlation for metastable flow of refrigerant 12 through capillary tubes". *ASHRAE Transactions*, v. 96, part I, p. 550-554, 1990.

COOPER, L.; CHU, C. K.; BRISKEN, W. R. "Simple selection method for capillaries derived from physical flow conditions". *Refrigerating Engineering*, July, v.65, n. 7, p.37, 1957.

DIRIK, E.; INAN C.; TANES, M. Y. "Numerical and experimental studies on adiabatic and nonadiabatic capillary tubes" *Proc. 1994 International Refrigeration Conference at Purdue*, July, p. 365, 1994.

ERTH, R. A. *Two-phase flow in refrigeration capillary tubes: analysis and prediction.* 1969. Ph.D. thesis - Purdue University.

GOSNEY, W. B. *Principles of refrigeration.* Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1982.

KOIZUMI, H.; YOKOYAMA, K. "Characteristics of refrigerant flow in a capillary tube". *ASHRAE Transactions*, v. 86, part 2, p.19-27, 1980.

KUEHL, S. J. *Study validation and improvement of a model for sizing a capillary tube for air-conditioning/heat pump system.* 1987. M.S.M.E thesis - Purdue University.

\_\_\_\_; GOLDSCHMIDT, V. W. "Transient response of fixed-area refrigerant expansion devices". *ASHRAE Transactions*, part 1, v. 96, p. 743-747, 1990.

- KUIPJERS, L. J. M.; JANSEN, M. J. P. "Influence of thermal non-equilibrium on capillary tube mass flow". *Proceedings of the XVth International Congress of Refrigeration, Commission B2*, Paris, p. 307-315, 1983.
- LATHROP, H. F. "Application and characteristics of capillary tubes". *Refrigerating Engineering*, v. 56, n.2, p. 1-33, 1948.
- LI, R. Y.; LIN, S.; CHEN, Z. Y. e CHEN, Z. H. "Metaestable flow of R12 through capillary tubes", *International Journal of Refrigeration*, v. 13, p. 181-186, 1990
- LUNARDI, M. A. *Avaliação da rugosidade interna de tubos capilares*. Relatório da EMBRACO, Joinville, 1993.
- MACZEK, K. ; KROLICKI, Z.; SOCHANECKA, E. "Model of throttling capillary tube with metastable process". *Proceedings of the XVth International Congress of Refrigeration, Commission B2*, Paris, p.154-161, 1983.
- MARCY, G. P. "Pressure drop with change of phase in a capillary tube". *Refrigerating Engineering*, v.57, n. 1, p. 53-57, 1949.
- MELO, C.; NEGRÃO, C.O.R. *Simulação numérica de tubos capilares utilizados como dispositivo de expansão em sistemas de refrigeração*. II Encontro Nacional de Ciências Térmicas - ENCIT 88, Águas de Lindóia, São Paulo, p. 221-224.
- MELO, C. *Modelação de tubos capilares: uma análise crítica*. Monografia, UFSC, Florianópolis, março, 1992.

MELO, C.; FERREIRA, R. T. S.; PEREIRA, R. H. "Modeling adiabatic capillary tubes: a critical analysis". *Proceedings of the International Refrigeration Conference - Energy, Efficiency and New Refrigerants*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, v.I, p.113-122, 1992.

MELO, C.; FERREIRA, R.T.S.; BOABAID NETO, C.; GONÇALVES, J. M.; WOLFF, I.; KNIES, M. *Análise do desempenho de tubos capilares - parte I*. Relatório de pesquisa Convênio EMBRACO/FEESC/EMC/UFSC, Florianópolis, dezembro, 1993.

MELO, C.; FERREIRA, R.T.S.; BOABAID NETO, C.; GONÇALVES, J. M.; KNIES, M. *Análise do desempenho de tubos capilares - parte II*. Relatório de pesquisa Convênio EMBRACO/FEESC/EMC/UFSC, Florianópolis, dezembro, 1994.

MIKOL, E. P. "Adiabatic single and two-phase flow in small bore tubes". *ASHRAE Journal*, v. 57, n. 11, p.75-86, 1963.

\_\_\_\_\_; DUDLEY, J. C. "A visual and photographic study of the inception of vaporization in adiabatic flow". *Transactions of the ASME, series D: Journal of Basic Engineering*, June, p. 257-264, 1964.

MOFFAT, R. J. "Describing the uncertainties in experimental results". *Experimental Thermal and Fluid Science*, New York, n. 1, p. 3-17, 1988.

PATE, M. B. *A theoretical and experimental analysis of capillary tube-suction line heat exchangers*. 1982. Ph.D. thesis - Purdue University.

\_\_\_\_\_; TREE, D. R. "Two-phase flow in a adiabatic capillary tube". International Institute of Refrigeration, Purdue University, *Preprints - IIR Commissions B1*, p.29-40, 1986.

- PLACHE, K. O. "Colriolis/ gyrosopic flow meter". *Winter annual meeting, Research Committee on Fluid Meters of ASME*, 1977.
- PROSEK, J. R. "A practical method of selecting capillary tubes". *Refrigerating Engineering*, p.644-647, 1953.
- REZK, A.; AWN, A. "Investigation on flow R-12 through capillary tubes". *XVth International Congress of Refrigeration, Venice, Proceedings v. II*, p. 443-452, 1979.
- RIZZA, J. J. "Numerical solution to transonic two-phase capillary tube flow". *Journal of Energy*, v. 6, n. 4, p. 285-288, 1982.
- SCHULZ, T. C. "State of the art: the capillary tube for, and in, vapor compression systems", *ASHRAE Transactions*, part 1A, v. 91, p. 92-105, 1985.
- SCOTT, T. C. *Flashing refrigerant flow in small bore tubes*. 1976. Ph.D. thesis - University of Michigan.
- SPIEGEL, M. R. *Estatística*. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1985.
- STABLER, L. A. "Theory and use of a capillary tube for liquid refrigerant control". *Refrigerating Engineering*, January, p. 55, 1948.
- STOECKER, W. F.; JONES, J. W. *Refrigeração e ar condicionado*, São Paulo : McGraw-Hill do Brasil, 1985.



STOLARSHI, R. S. "The Antarctic ozone hole". *Scientific American*, v. 258, n. 1, p. 20-26, 1988.

SWART, R. H. "Capillary tube heat exchangers". *Refrigerating Engineering*, September, p.42,1946.

SWEEDYK, J. M. "Capillary tubes - their standarization and use". *ASHRAE Transactions*, v.87, part 1, p. 1069-1076, 1981.

TAYLOR, J. R. *Introduction to error analysis*. University Science Books, Oxford University Preess, 1982.

UNGAR, E. W.; STEIN, R .A.; BOYD, R. S.; BECK, W. D. "Analysis of the potentialities of using analog computers in the development of residential refrigeration (phase I) ". *Report to Whirlpool Corporation*, Battelle Memorial Institute, Columbus, Ohio, 1960.

WHITESEL, H. A. "Capillary two-phase flow". *Refrigerating Engineering*, v.65, n. 4, April, p. 42, 1957a.

\_\_\_\_\_. "Capillary two-phase flow, part II". *Refrigerating Engineering*, v.65, n. 9, September, p. 35, 1957b.

WIJAYA, H. "An experimental evaluation of adiabatic capillary tube performance for HFC-134a and CFC-12". *International CFC and Halon Alternatives Conference*, Baltimore, Maryland, USA, p. 474-483, 1991.

---

# APÊNDICES

---

## APÊNDICE I Nomenclatura dos componentes dos sistemas da BETC

### I.1 Nomenclatura dos componentes do sistema de refrigeração

COMP1 e COMP2 - Compressores alternativos herméticos interligados

V1 a V24 - Válvulas tipo diafragma

P1 e P2 - Pressostatos de alta

S1 a S3 - Conexões de serviço tipo engate rápido

SO1 e SO2 - Separadores de óleo com retorno automático

ASO - Aquecedor dos separadores de óleo tipo resistência elétrica, na forma de chicote

FO - Filtro de óleo com retorno manual

AFO - Aquecedor do filtro de óleo tipo resistência elétrica, na forma de chicote

VP1 e VP2 - Válvulas de expansão pressostática

COND - Condensador a água, duplo tubo, contracorrente

RL - Reservatório de líquido

SUB - Subresfriador a água, duplo tubo, contracorrente

RESF - Resfriador da água do subresfriador

VC - Válvula tipo gaveta da água de condensação

VS - Válvula tipo agulha de controle da água para o subresfriador

VPC - Válvula pressostática de controle da água para o condensador

FILTRO - Filtro de fluido refrigerante com secante (desidratante)

TCNI - Tubo capilar não instrumentado

TCI - Tubo capilar instrumentado (seção de teste)

VLAFF - Visor de líquido antes do fluxímetro

FLUX - Fluxímetro (sensor de fluxo de massa)

VDV - Válvula de duas vias

AETC - Aquecedor da entrada do tubo capilar tipo resistência elétrica, na forma de chicote

MA - Manômetro de alta pressão tipo bourdon

MB - Manômetro de baixa pressão tipo bourdon

VENT - Ventilador do evaporador

AE - Aquecedor do evaporador tipo resistência elétrica aletada

EVAP - Evaporador tipo colméia

SL - Sepador de líquido

ASL - Aquecedor do separador de líquido tipo resistência elétrica na forma de chicote

## **I.2 Nomenclatura dos componentes do sistema elétrico**

PG - Plug da alimentação geral da bancada (soquete, borne, conector)

PC - Plug da alimentação dos compressores

F - Fio fase

N - Fio neutro

G - Fio terra

F - Cabo tipo coaxial para sinal

CT- Conjunto de tomadas

SEST - Chave do estabilizador de tensão

EST - Estabilizador de tensão

SVID - Chave do vídeo do microcomputador

VID - Vídeo do microcomputador

SMC - Chave do microcomputador

MC - Microcomputador

SSA - Chave do sistema de aquisição

SA - Sistema de aquisição

TRANSD - Transdutores de temperatura, pressão e fluxo de massa

F1 a F3 - Fusíveis

CG - Contactor do comando geral (chave)

SG - Chave do comando geral

LG - Lâmpada sinalizadora do comando geral

C1 e C2 - Contactores dos compressores

S1 e S2 - Chaves dos compressores

L1 e L2 - Lâmpadas sinalizadoras dos compressores

C3 - Contactor do aquecedor do evaporador

S3 - Chave do aquecedor do evaporador

L3 - Lâmpada sinalizadora do aquecedor do evaporador

P1 e P2 - Pressostatos

FATP - Fonte de alimentação dos transdutores de pressão

TAF - Transformador para alimentação do fluxímetro

FLUX - Fluxímetro (Sensor e unidade de tratamento de sinal)

S4 - Chave do aquecedor do separador de óleo

L4 - Lâmpada sinalizadora do aquecedor do separador de óleo

S5 - Chave do aquecedor do separador de líquido

L5 - Lâmpada sinalizadora do aquecedor do separador de líquido

ASO - Aquecedor do separador de óleo

AFO - Aquecedor do filtro de óleo

ASL - Aquecedor do separador de líquido

AE - Aquecedor do evaporador

AETC - Aquecedor da entrada do tubo capilar

VT - Variador de tensão

VENT - Ventilador do evaporador

SV - Chave do ventilador do evaporador

COMP1 e COMP2 - Compressores

TERRA - Aterramento elétrico da BETC

### **I.3 Nomenclatura dos componentes do sistema de medição**

TMP - Termopar

FC - Fio de compensação

TP - Transdutor de pressão

FATP - Fonte de alimentação dos transdutores de pressão

CC - Cabo coaxial

SFM - Sensor de fluxo de massa

UTS - Unidade de tratamento de sinal

TAF - Transformador para a alimentação do fluxímetro

### **I.4 Nomenclatura dos elementos da seção de teste**

1 - Suporte do tubo capilar

2 - Filtro de nylon

3 - Prendedor tensionador

4 - Visor de líquido

5 - Conexão para troca do tubo capilar

6 - Conexão adicional para termopar interno ao escoamento

7 - Conexão da entrada do tubo capilar

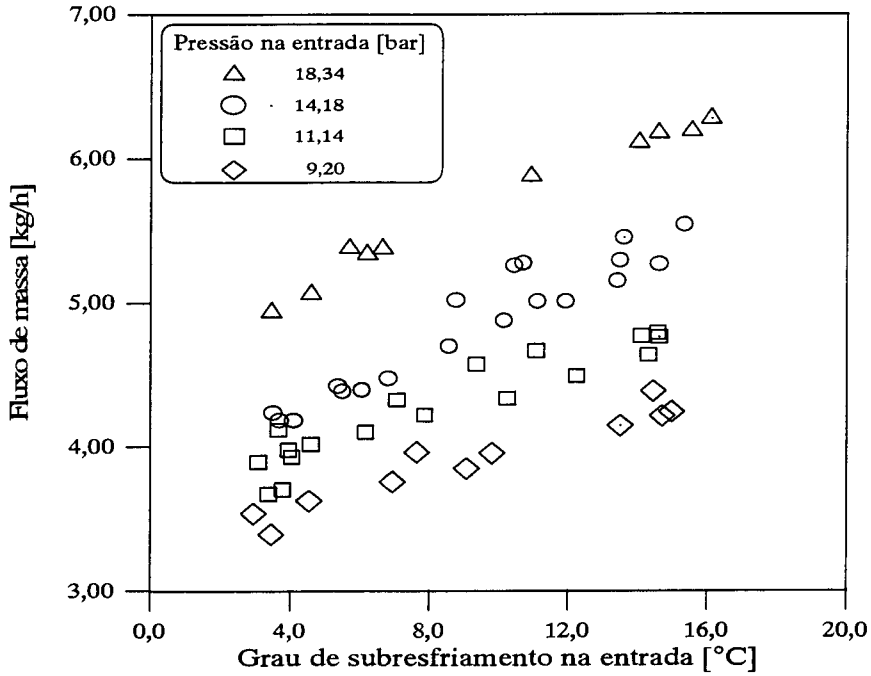
8 - Isolamento do tubo capilar (lã de vidro)

9 - Termopar sobre o tubo capilar

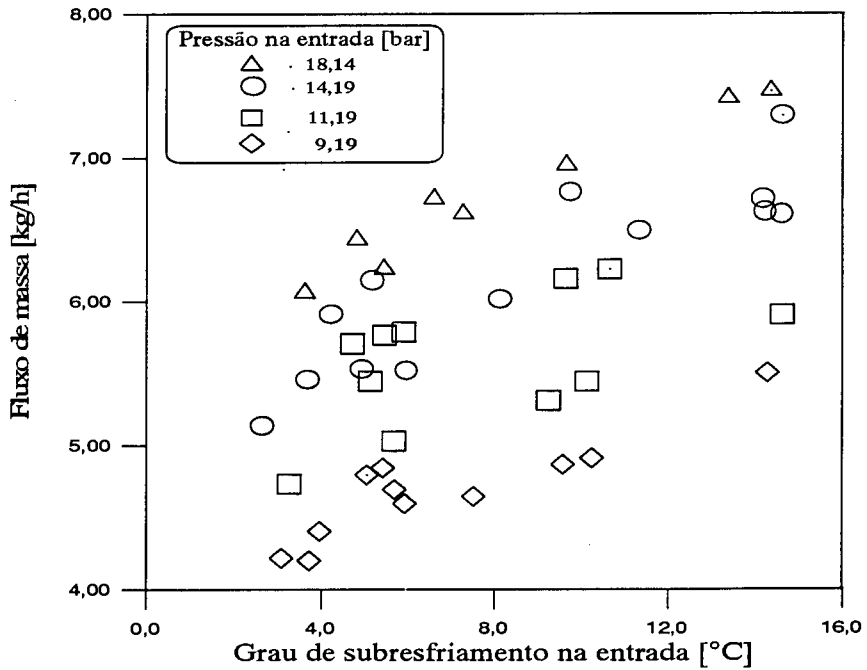
10 - Transdutor de pressão

- 11 - Tomada de pressão no tubo capilar
- 12 - Tubo capilar
- 13 - Conexão da saída do tubo capilar
- 14 - Caixa de madeira da seção de teste (3300X300X300 mm)
- 15 - Válvula da saída da seção de teste V21
- 16 - Tomada de pressão nas conexões de entrada e saída
- 17 - Conexão para instalação de termopar internamente ao escoamento
- 18 - Furação para tomada de pressão no tubo capilar

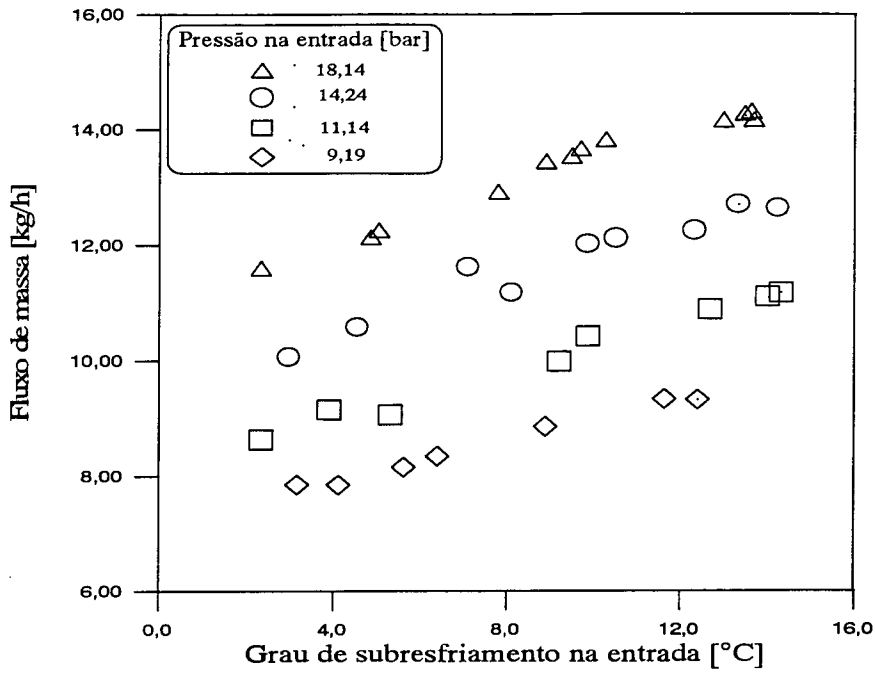
**APÊNDICE II Resultados da etapa de medições globais**



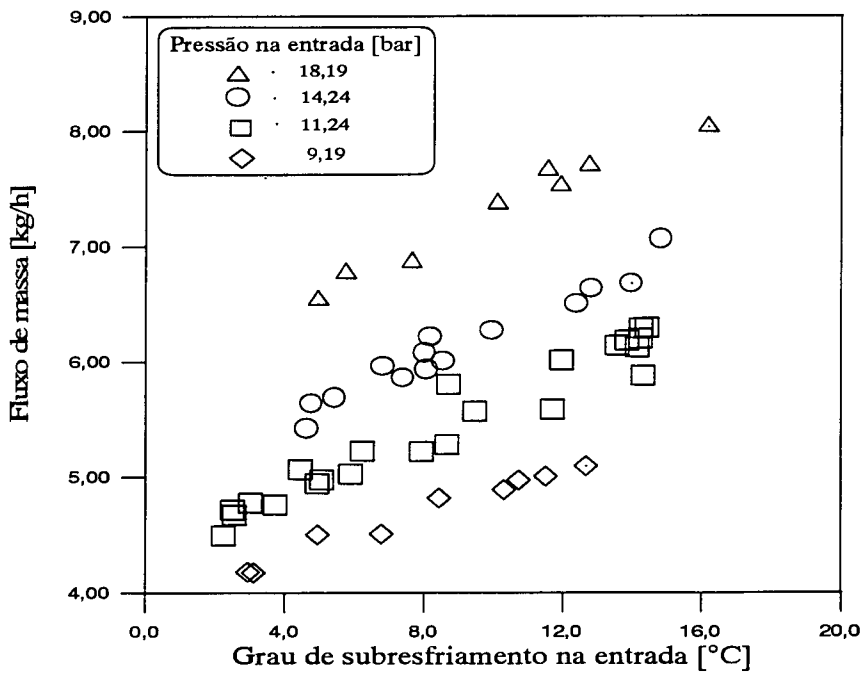
**FIGURA II.1 - Resultados para o capilar #1 e R12**



**FIGURA II.2 - Resultados para o capilar #2 e R12**

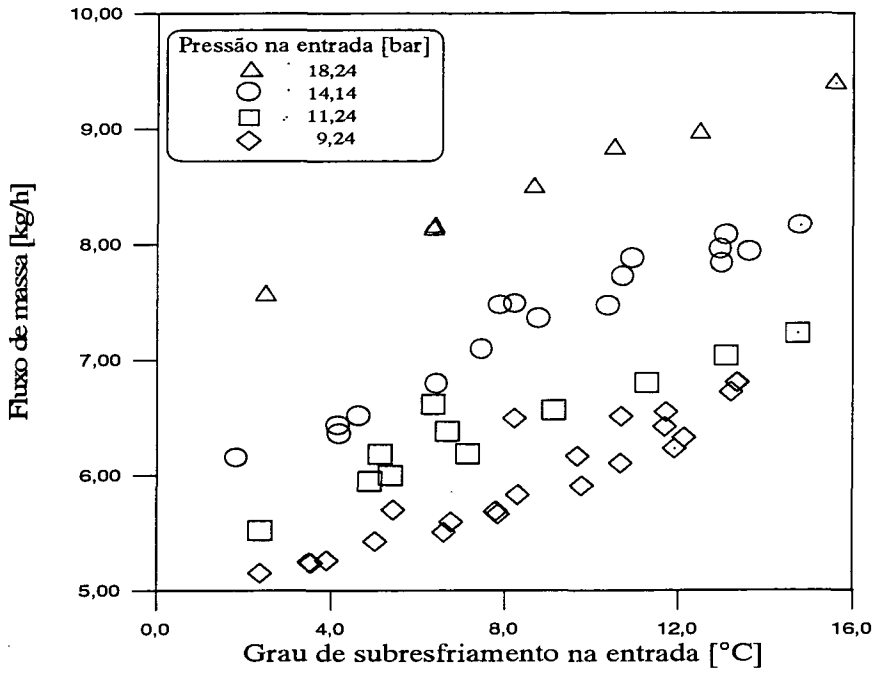


**FIGURA II.3 - Resultados para o capilar #3 e R12**

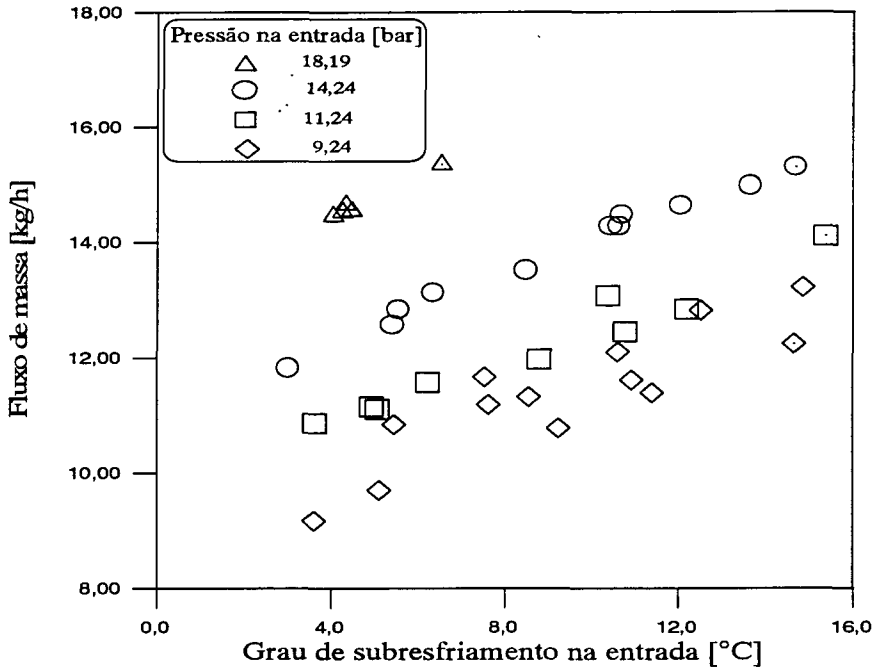


**FIGURA II.4 - Resultados para o capilar #4 e R12**

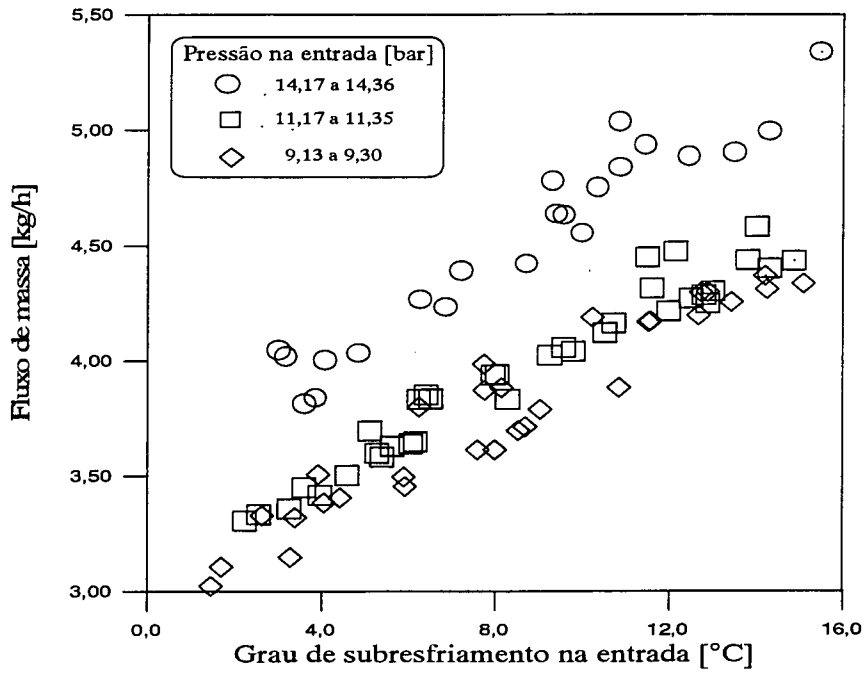




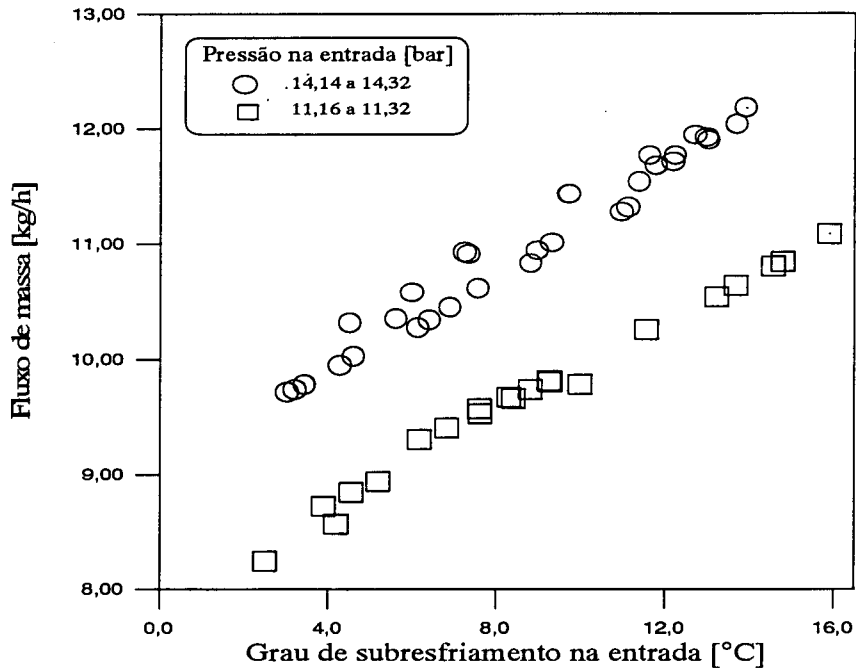
**FIGURA II.5 - Resultados para o capilar #5 e R12**



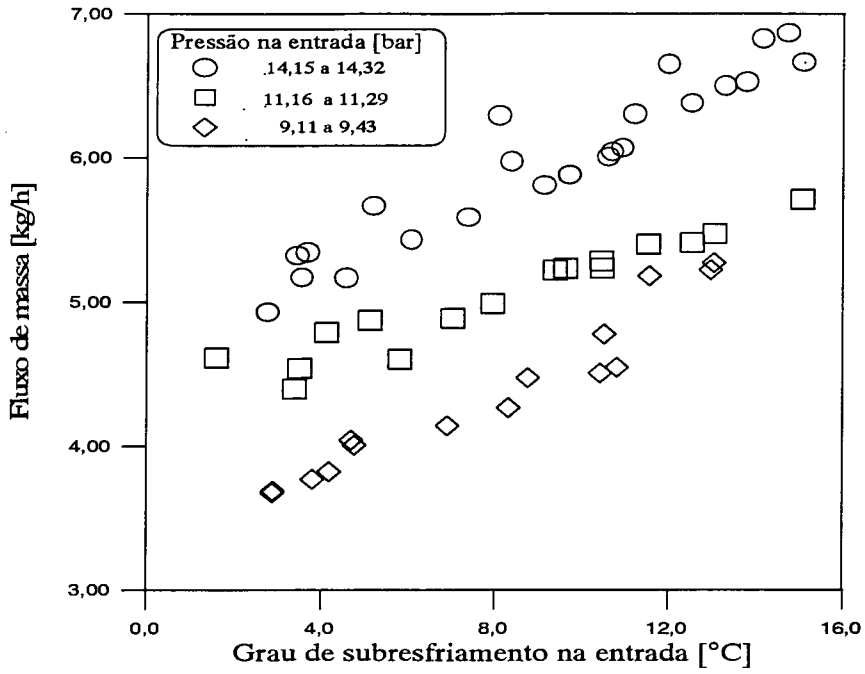
**FIGURA II.6 - Resultados para o capilar #6 e R12**



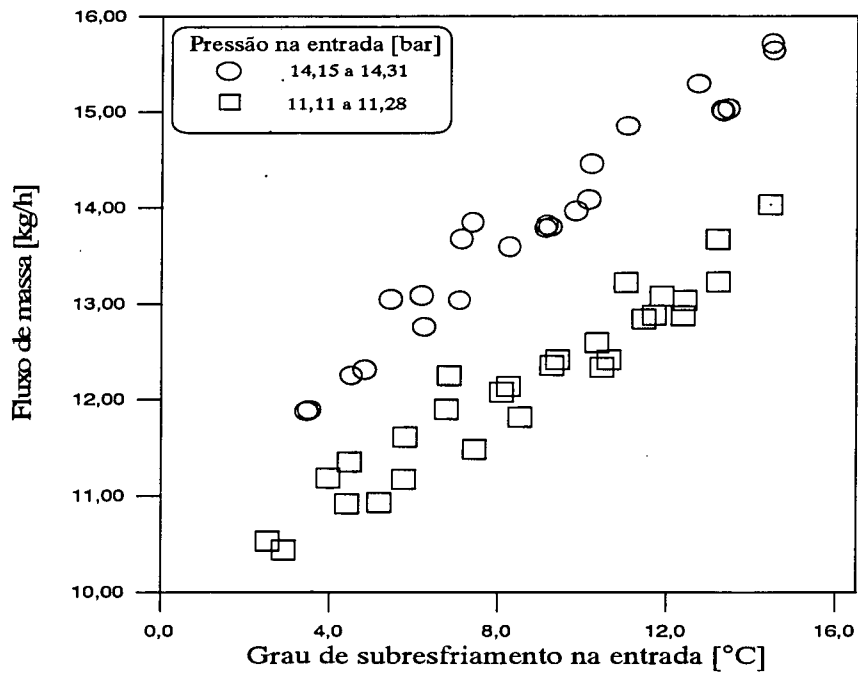
**FIGURA II.7 - Resultados para o capilar #1 e R134a**



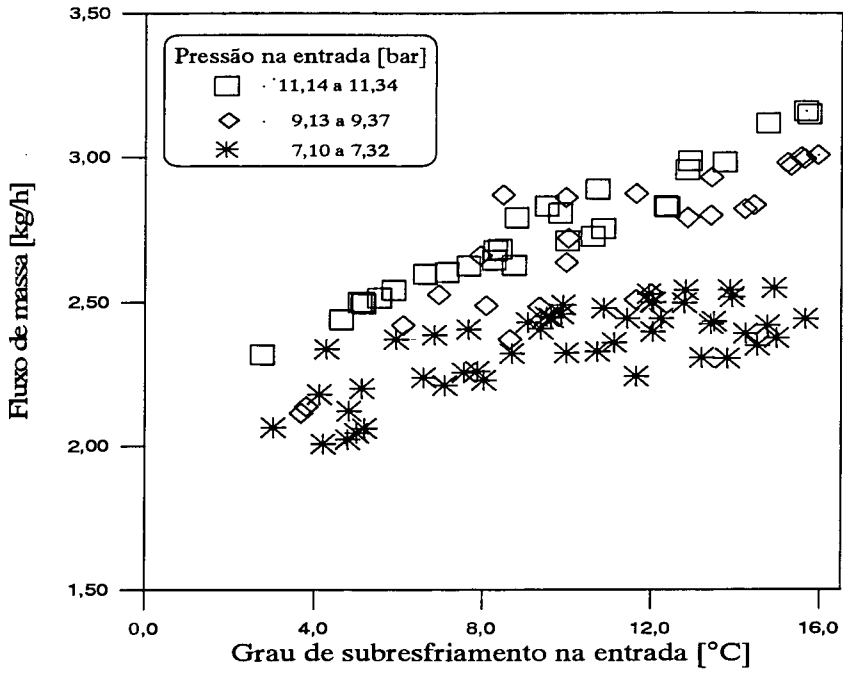
**FIGURA II.8 - Resultados para o capilar #3 e R134a**



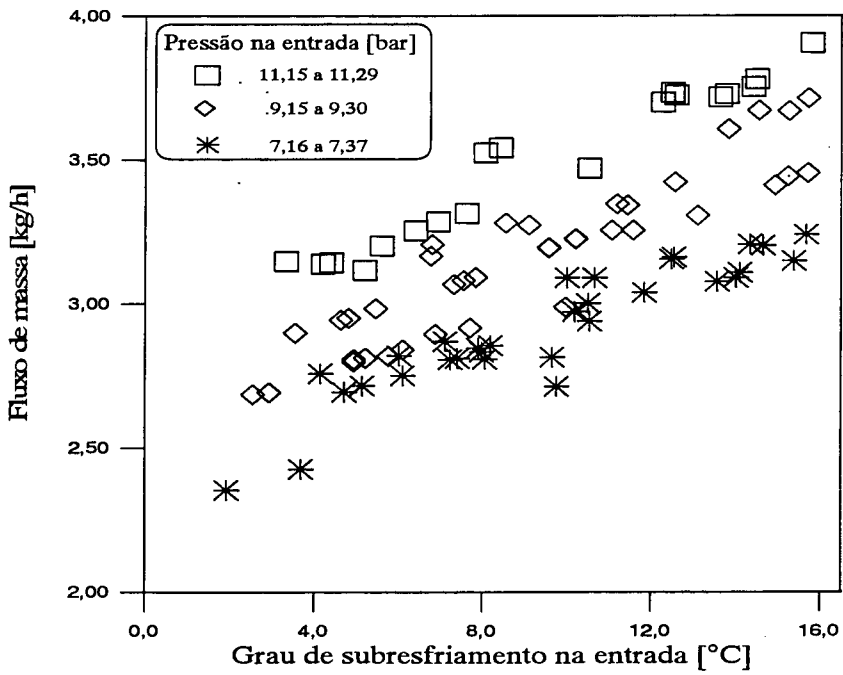
**FIGURA II.9 - Resultados para o capilar #4 e R134a**



**FIGURA II.10 - Resultados para o capilar #6 e R134a**



**FIGURA II.11 - Resultados para o capilar #1 e R600a**



**FIGURA II.12 - Resultados para o capilar #4 e R600a**