



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL DA FRAÇÃO DE
VAZIO EM ESCOAMENTOS BIFÁSICOS EM MÁQUINAS DE
COMPRESSÃO A VAPOR

CLEYDER FRANCISCO LIMA

Belo Horizonte, 11 de julho de 2008.

Cleyder Francisco Lima

**AVALIAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL DA FRAÇÃO DE
VAZIO EM ESCOAMENTOS BIFÁSICOS EM MÁQUINAS DE
COMPRESSÃO A VAPOR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Calor e Fluidos

Orientador: Prof. Ricardo Nicolau Nassar Koury

Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Brasil

Co-orientador: Prof. Luiz Machado

Institut National Des Sciences Appliquées de Lyon, INSA, França.

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2008



Universidade Federal de Minas Gerais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte – MG

Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax.: +55 31 3443-3783

AVALIAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL DA FRAÇÃO DE VAZIO EM ESCOAMENTOS BIFÁSICOS EM MÁQUINAS DE COMPRESSÃO A VAPOR

CLEYDER FRANCISCO LIMA

Dissertação defendida e aprovada em 11 de julho de 2008, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Calor e Fluidos**"

Prof. Dr. Ricardo N. N. Koury - UNICAMP – Orientador

Prof. Dr. Luiz Machado - INSA - Examinador

Prof. Dr. Antônio A. T. Maia – UFMG – Examinador

Dr. Gustavo F. de F. Maia - UFMG – Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, pela minha vida, pelas oportunidades, pelas pessoas que foram colocadas em meu caminho, pelos sucessos e pelos aprendizados. Sob sua bênção divina, sinto-me inspirado e encorajado a enfrentar todos os desafios que surgem ao longo desta vida.

Agradeço de forma muito especial aos meus amados pais, Francisco de Sales Lima e Maria do Rosário Ramos Lima. Vocês são o meu manancial inexaurível de apoio, carinho, encorajamento e amor. Minha referência de sucesso e felicidade! Obrigado por todos os princípios e valores que vocês sempre me ensinaram.

Aos meus irmãos, Clayton Clécio Lima e Cleverson Ramos Lima. Vocês são seres de luz, que irradiam regozijo! Obrigado pelo estímulo e incentivo, que me fizeram sobrepujar os obstáculos e seguir em frente.

A minha noiva, Bárbara Azevedo Forlin. Durante o período deste trabalho, o deleite dos momentos juntos infelizmente tornou-se restrito. Sua compreensão, carinho e paciência, foram fundamentais para eu chegar até aqui. Obrigado por me nutrir com amor e companheirismo.

Este trabalho não seria possível sem a ajuda e orientação dos dois grandes mestres que tive a felicidade e o prazer de conviver nesta caminhada: Prof. Dr. Luiz Machado e Prof. Dr. Ricardo Nicolau Nassar Koury. Obrigado por todo o apoio, paciência e dedicação com que me guiaram nesta jornada.

Agradeço também ao professor Antônio Maia, pela colaboração para a descrição da bancada, bem como a realização do experimento.

Agradeço ao colega Fernando Henrique Lima, por todo o auxílio durante os testes realizados neste trabalho.

Por fim, agradeço e a mim mesmo, por acreditar e perseguir um sonho, com esforço, coragem e perseverança.

A todos, meus sinceros e calorosos agradecimentos.

*“Tente me ensinar das tuas coisas
Que a vida é séria, e a guerra é dura
Mas se não puder, cale essa boca, Pedro
E deixa eu viver minha loucura”*

Raul Seixas in Meu Amigo Pedro

SUMÁRIO

NOMENCLATURA.....	08
LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE TABELAS E QUADROS.....	16
LISTA ABREVIATURAS E SIGLAS.....	18
RESUMO.....	19
1. INTRODUÇÃO.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1. Introdução.....	23
2.2. Estudo do escoamento monofásico em um tubo horizontal liso.....	23
2.2.1. Transferência de calor em escoamentos monofásicos.....	23
2.2.1.1. Correlações de convecção: tubos circulares.....	23
2.2.1.2. Correlações de convecção: tubos não circulares.....	28
2.2.1.3. Correlações da convecção: espaço anular.....	30
2.3. Estudo do escoamento bifásico em um tubo horizontal liso.....	31
2.3.1. Características do escoamento bifásico.....	31
2.3.2. Parâmetros básicos característicos.....	31
2.3.3. Configurações e padrões de escoamentos em tubos horizontais.....	35
2.3.4. Determinação da Fração de Vazio.....	41
2.3.4.1. Modelo homogêneo.....	42
2.3.4.2. Correlações dependentes do deslizamento.....	43
2.3.4.3. Correlações dependentes do parâmetro de Martinelli.....	44
2.3.4.4. Correlações dependentes do fluxo de massa.....	45
2.4. Determinação das zonas de troca de calor em um evaporador.....	47
2.5. Determinação da massa de refrigerante em sistema frigorífico – Inventário....	51
2.6. Determinação da vazão mássica teórica de frigorífico no compressor.....	52
2.7. Síntese.....	53
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
3.1. Introdução.....	54
3.2. Materiais.....	54
3.2.1. Unidade laboratorial - Bancada frigorífica.....	54

3.2.1.1. Compressor.....	56
3.2.1.2. Condensador.....	57
3.2.1.3. Sub-resfriador.....	58
3.2.1.4. Dispositivos de expansão.....	59
3.2.1.5. Evaporador.....	59
3.2.1.6. Sistema de recuperação térmica.....	60
3.2.1.7. Medidores de temperatura.....	61
3.2.1.8. Medidores de pressão.....	61
3.2.1.9. Medidor de vazão.....	62
3.2.1.10. Medidores de rotação.....	62
3.2.1.11. Sistema de aquisição de dados.....	62
3.2.1.12. Tubulação translúcida.....	62
3.2.2. Registro de imagens.....	63
3.2.3. Software para análise de dimensões.....	63
3.3. Métodos.....	64
3.4. Síntese.....	68
4. ANÁLISE DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	69
4.1. Introdução.....	69
4.2. Erro de medição.....	69
4.2.1. Erro sistemático.....	70
4.2.2. Erro aleatório.....	71
4.2.3. Erro grosseiro.....	71
4.3. Incerteza de medição.....	71
4.3.1. Avaliação da correção e incerteza expandida.....	72
4.3.1.1. Avaliação da incerteza expandida - Medições diretas.....	73
4.3.2. Avaliação da incerteza do experimento.....	76
4.4. Síntese.....	79
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	80
5.1. Introdução.....	80
5.2. Resultados.....	80
5.2.1. Apresentação dos valores - Temperatura de condensação de 45°C.....	80
5.2.2. Apresentação dos valores - Temperatura de condensação de 50°C.....	84
5.3. Discussão.....	88
5.4. Aplicação da correlação de Hughmark.....	91

5.5. Síntese.....	94
6. CONCLUSÃO.....	95
ABSTRACT.....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98
ANEXO A.....	102
ANEXO B.....	108

NOMENCLATURA

Letras Latinas

<i>A</i>	Área [m ²]
<i>a</i>	Difusidade térmica [m ² /s]
<i>Bo</i>	Número de ebulição [Adimensional]
<i>C</i>	Correção [Adimensional]
<i>Co</i>	Número de convecção [Adimensional]
<i>c</i>	Calor específico [J/kg. K]
<i>c</i>	Espaço morto do compressor [Adimensional]
<i>cp</i>	Calor específico a pressão constante [J/kg. K]
<i>D</i>	Diâmetro [m]
<i>d</i>	Diâmetro [m]
<i>db</i>	Diâmetro de descolamento das bolhas [m]
<i>E</i>	Parâmetro de Prémoli [Adimensional]
<i>e</i>	Erro de medição [Adimensional]
<i>F</i>	Fator de correção [Adimensional]
<i>F</i>	Coefficiente de troca convectivo [W/m ² . K]
<i>F</i>	Número de Froude modificado [Adimensional]
<i>Fr</i>	Número de Froude [Adimensional]
<i>F(X)</i>	Parâmetro de Tandon [Adimensional]
<i>f</i>	Fator de atrito [Adimensional]
<i>f</i>	Fator de correção [Adimensional]
<i>G</i>	Velocidade mássica [kg /s.m ²]
<i>Gz</i>	Número de Graetz [Adimensional]
<i>g</i>	Aceleração da gravidade [m/s ²]
<i>h</i>	Coefficiente convectivo [W/m ² °C]
<i>h</i>	Entalpia [J/kg]
<i>J</i>	Velocidade superficial [m/s]
<i>Ja</i>	Número de Jacob modificado [Adimensional]
<i>K</i>	Relatório de movimentação do líquido [Adimensional]

K	Parâmetro adimensional [Adimensional]
K	Relação entre fluxos de calor [Adimensional]
k	Condutividade Térmica [W/m K]
k	Fator de abrangência [Adimensional]
L	Comprimento [m]
M	Massa do fluido [kg]
\bar{M}	Massa molar do fluido em [g/mol]
MI	Média das n indicações disponíveis [Adimensional]
\dot{m}	Vazão mássica [kg/h]
Nu	Número de Nusselt [Adimensional]
n	Rotação do compressor [RPM]
n	Adimensional função do número de Prandtl [Adimensional]
P	Perímetro molhado [m]
P	Pressão [Pa]
Pr	Número de Prandtl [Adimensional]
p	Distância entre os eixos de dois tubos internos [mm]
p	Número de fontes de incerteza [Adimensional]
pe	Número de Péclet modificado [Adimensional]
Q	Vazão volumétrica [m ³ /h]
\dot{Q}	Fluxo de calor [J/kg]
q	Valor independente obtido para variável q [Adimensional]
\bar{q}	Média de k observações de q [Adimensional]
\dot{q}	Fluxo de calor superficial [W/m ²]
Ra	Rugosidade da parede [μ m]
Re	Número de Reynolds [Adimensional]
Re	Repetitividade [Adimensional]
Rm	Resultado da medição [Adimensional]
S	Fator de supressão de evaporação nucleada [Adimensional]
s	Desvio padrão experimental [Adimensional]
$s(\bar{a})$	Desvio padrão para uma média de m indicações de a [Adimensional]
T	Temperatura [K, °C]
Td	Tendência da medição [Adimensional]

T_e	Temperatura local da água [°C]
t	Coefficiente de Student [Adimensional]
u	Velocidade média [m/s]
U	Coefficiente global de troca [W/m ² °C]
U	Incerteza expandida [Adimensional]
$u(\bar{a})$	Incerteza padrão [Adimensional]
$u(G)$	Incerteza padrão combinada [Adimensional]
V	Volume interno do compressor [m ³]
V	Volume do evaporador [m ³]
\bar{V}	Velocidade média do escoamento [m/s]
VV	Valor Verdadeiro [Adimensional]
VVC	Valor Verdadeiro Convencional [Adimensional]
ν	Viscosidade dinâmica [kg/m. s]
x	Título da mistura vapor-líquido [Adimensional]
y	Parâmetro de Prémoli [Adimensional]
Z	Parâmetro de Hughmark [Adimensional]
Z	Comprimento [m]
We	Número de Weber [Adimensional]

Letras Gregas

α	Fração de vazio [Adimensional]
α	Coefficiente de troca térmica [W/m ² . K]
β	Fração volumétrica [Adimensional]
β	Ângulo [graus/rad]
γ	Deslizamento [Adimensional]
ΔI	Faixa de variação [Adimensional]
ΔT	Diferença entre a temperatura [°C]
ΔP	Diferença de pressão [PA]
δ	Espaçamento entre os tubos internos e externos [m]
ε	Adimensional função do número de Reynolds [Adimensional]
η	Rendimento [Adimensional]

λ	Condutividade térmica [W/m. K]
μ	Viscosidade dinâmica [kg/m. s]
ξ	Fator de Takamatsu. Momoki e Fujii [Adimensional]
ρ	Massas específicas [kg/m ³]
$\bar{\rho}$	Massa específica média [kg/m ³]
σ	Tensão superficial do líquido [N/m]
ϕ	Multiplicador bifásico [Adimensional]
φ	Adimensional função do número de Prandtl [Adimensional]
φ	Parâmetro Thom [Adimensional]
X	O Parâmetro de Martinelli [Adimensional]
ψ	Parâmetro de Shah [Adimensional]
Ω	Ângulo de inclinação do tubo [rad]

Subscritos

a	Aleatório
a	ar
asp	Aspiração
c	Seção transversal
c	Combinada
c	Convecção/Convectiva
$cond$	Condensação
cri	Crítico
db	Bifásico
dr	Liso e reto
e	Externo
eb	Ebulição
ebc	Ebulição convectiva
$evap$	Evaporação
ext	Externo
f	Fluido

<i>g</i>	Grosseiro
<i>h</i>	Hidráulico
<i>hom</i>	Homogêneo
<i>H</i>	Relativo e Hughmark
<i>int</i>	Interno
<i>k</i>	Associada a k-ésima
<i>k</i>	Relativo ao número de observações
<i>l</i>	Líquido
<i>lo</i>	Líquido
<i>max</i>	Máximo
<i>ml</i>	Média Logarítmica
<i>p</i>	Relativo à parede
<i>red</i>	Reduzida
<i>s</i>	Sistemático
<i>s</i>	Superfície
<i>sa</i>	Superaquecido
<i>sat</i>	Saturado
<i>sb</i>	Desaparecimento de bolhas
<i>serp</i>	Serpentina
<i>tot</i>	total
<i>v</i>	Vapor
<i>v</i>	Volumétrico
<i>vo</i>	Vapor
95	Nível de confiança de 95%

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	Diagrama de Moody. Fator de atrito para escoamento completamente desenvolvido em tubos circulares	27
FIGURA 2.2	Escoamento bifásico esquemático	32
FIGURA 2.3	Escoamento em Bolhas	36
FIGURA 2.4	Escoamento Pistonado	36
FIGURA 2.5	Escoamento Estratificado Liso	36
FIGURA 2.6	Escoamento Estratificado Ondulado	37
FIGURA 2.7	Escoamento Intermitente	37
FIGURA 2.8	Escoamento Anular	37
FIGURA 2.9	Mapa de Taitel e Dukler para os padrões de escoamento horizontal em mudança fase	40
FIGURA 2.10	Padrões de escoamento durante o processo de evaporação	41
FIGURA 2.11	Perfil de temperatura durante a troca de calor em um evaporador	47
FIGURA 3.1	Representação esquemática do banco de ensaios experimentais do Laboratório de Refrigeração do DEMEC/UFMG	55
FIGURA 3.2	Fotografia do banco de ensaios experimentais do Laboratório de Refrigeração do DEMEC/UFMG	56
FIGURA 3.3	Representação esquemática do condensador e do circuito de fluido secundário	57
FIGURA 3.4	Representação esquemática do Subresfriador do circuito de fluido secundário	58
FIGURA 3.5	Representação esquemática do Evaporador do circuito de fluido secundário	59
FIGURA 3.6	Representação esquemática do sistema de aquecimento elétrico	61
FIGURA 3.7	Registro fotográfico. Temperatura de evaporação de 10°C, condensação de 45°C e rotação de 470rpm.	64
FIGURA 3.8	Representação esquemática da seção transversal de uma tubulação	66

FIGURA 5.1	Comportamento da fração de vazio em relação à temperatura de evaporação, fixados os parâmetros de temperatura de condensação em 45°C e rotação de 470rpm	82
FIGURA 5.2	Comportamento da fração de vazio em relação à temperatura de evaporação, fixados os parâmetros de temperatura de condensação em 45°C e rotação de 600rpm	84
FIGURA 5.3	Comportamento da fração de vazio em relação à temperatura de evaporação, fixados os parâmetros de temperatura de condensação em 50°C e rotação de 470rpm.	86
FIGURA 5.4	Comportamento da fração de vazio em relação à temperatura de evaporação, fixados os parâmetros de temperatura de condensação em 50°C e rotação de 600rpm.	87
FIGURA 5.5	Varição da vazão em função da temperatura de evaporação. Temperatura de condensação 45°C.	89
FIGURA 5.6	Varição da vazão em função da temperatura de evaporação. Temperatura de condensação 50°C.	90
FIGURA 5.7	Varição do Título com o comprimento da tubulação	88
FIGURA 5.8	Varição do grau de superaquecimento em função da carga de fluido refrigerante	93
FIGURA A.1	Temperatura de evaporação de 5°C	102
FIGURA A.2	Temperatura de evaporação de 0°C	102
FIGURA A.3	Temperatura de evaporação de 5°C	103
FIGURA A.4	Temperatura de evaporação de 10°C	103
FIGURA A.5	Temperatura de evaporação de 5°C	103
FIGURA A.6	Temperatura de evaporação de 0°C	104
FIGURA A.7	Temperatura de evaporação de 5°C	104
FIGURA A.8	Temperatura de evaporação de 10°C	104
FIGURA A.9	Temperatura de evaporação de 5°C	105
FIGURA A.10	Temperatura de evaporação de 0°C	105
FIGURA A.11	Temperatura de evaporação de 5°C	105
FIGURA A.12	Temperatura de evaporação de 10°C	106
FIGURA A.13	Temperatura de evaporação de 5°C	106
FIGURA A.14	Temperatura de evaporação de 0°C	106

FIGURA A.15	Temperatura de evaporação de 5°C	107
FIGURA A.16	Temperatura de evaporação de 10°C	107

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 2.1	Número de Nusselt e fatores de atrito para escoamento laminar plenamente desenvolvido em tubos de diferentes seções transversais	29
TABELA 2.2	Valores dos parâmetros K_H e Z da correlação de Hughmark	45
TABELA 3.1	Arranjo das temperaturas de evaporação, condensação e rotação da bancada de teste	65
TABELA 4.1	Coefficiente de Student	75
TABELA 4.2	Valores base (MI) e incerteza de medição ($\Delta I_{\max} + U_{95}$) para temperatura de condensação de 50°C e rotação de 600 rpm.	76
TABELA 4.3	Valores base (MI) e incerteza de medição ($\Delta I_{\max} + U_{95}$) para temperatura de condensação de 50°C e rotação de 470 rpm.	77
TABELA 4.4	Valores base (MI) e incerteza de medição ($\Delta I_{\max} + U_{95}$) para temperatura de condensação de 45°C e rotação de 600 rpm.	77
TABELA 4.5	Valores base (MI) e incerteza de medição ($\Delta I_{\max} + U_{95}$) para temperatura de condensação de 45°C e rotação de 470 rpm.	78
TABELA 5.1	Resultados da fração de vazio calculados na temperatura de condensação de 45°C com rotação de 470rpm.	81
TABELA 5.2	Varição dos resultados da fração de vazio calculados na temperatura de condensação de 45°C com rotação de 470rpm.	81
TABELA 5.3	Resultados da fração de vazio calculados na temperatura de condensação de 45°C com rotação de 600rpm.	83
TABELA 5.4	Varição dos resultados da fração de vazio calculados na temperatura de condensação de 45°C com rotação de 600rpm.	83
TABELA 5.5	Resultados da fração de vazio calculados na temperatura de condensação de 50°C com rotação de 470rpm.	85
TABELA 5.6	Varição dos resultados da fração de vazio calculados na temperatura de condensação de 50°C com rotação de 470rpm.	85
TABELA 5.7	Resultados da fração de vazio calculados na temperatura de condensação de 50°C com rotação de 600rpm	86

TABELA 5.8	Varição dos resultados da fração de vazio calculados na temperatura de condensação de 50°C com rotação de 600rpm.	87
TABELA 5.9	Varição do grau de superaquecimento em relação à variação de massa	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica
PPGMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
INSA	Institut National Des Sciences Appliquées de Lyon
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
CEMIG	Companhia elétrica de Minas Gerais

RESUMO

O domínio do escoamento bifásico do fluido no evaporador é fundamental para o projeto e controle do sistema, permitindo gerenciar o rendimento deste trocador e de todo o sistema frigorífico. O volume de fluido em seu interior deve ser tal que no final do trocador exista somente fluido na fase vapor e, ao mesmo tempo, se consiga máxima eficiência na evaporação convectiva ao longo de sua área de troca. Uma ferramenta importante que auxilia no controle do escoamento bifásico do fluido é a determinação da fração de vazio. O conhecimento da fração de vazio em misturas bifásicas é muito importante para um completo entendimento da hidrodinâmica dos fluidos associada ao escoamento multifásico. O objetivo principal deste trabalho foi a determinação experimental da fração de vazio do fluido refrigerante R134-a em um escoamento bifásico estratificado para diferentes valores de vazão e de temperatura. A fração de vazio foi determinada através da leitura da coluna de líquido em imagens registradas do fluido refrigerante escoando através de uma seção de testes constituída por um tubo de vidro. Essa seção encontra-se na entrada de um evaporador de um banco de testes de máquinas frigoríficas, no qual a rotação do compressor, a temperatura de evaporação e de condensação e os graus de superaquecimento e de sub-resfriamento do refrigerante podem ser ajustados em vários valores. Correlações retiradas da literatura especializada foram utilizadas para calcular os valores da fração de vazio nos diferentes pontos de operação do banco experimental. Um estudo comparativo entre os valores experimentais e teóricos da fração de vazio foi realizado, e concluiu-se que a correlação de Hughmark mostrou-se a mais precisa para estimar o valor da fração de vazio, apresentado variação menor que 5% em relação aos valores experimentais. Com essa correlação, e usando um modelo simples de transferência de calor para estimar os comprimentos das zonas de escoamentos bifásicos, o inventário de refrigerante no evaporador e no condensador pode ser determinado para os diferentes pontos de operação do sistema. Assim sendo, a determinação da fração de vazio através do modelo Hughmark, e a sua aplicação para a obtenção do inventário de refrigerante, torna-se uma ferramenta poderosa para o correto carregamento de fluido frigorífico no sistema. Com este procedimento, é possível a minimização de erros quanto à carga de refrigerante, visto que um parâmetro inicial muito próximo ao necessário já será antevisto.

Palavras chaves: fração de vazio, escoamento bifásico, inventário de refrigerante.