



UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA  
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

# MODELAÇÃO MATEMÁTICA E EXPERIMENTAL DE CÂMARAS FRIGORÍFICAS DE VEÍCULOS

**Rui António Pitarma Sabino Cunha Ferreira**

(Mestre em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica

**Orientador:** Doutora Maria da Graça Martins da Silva Carvalho

**Júri:**

**Presidente:** Reitor da Universidade Técnica de Lisboa

**Vogais:** Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas

Doutor José Carlos Fernandes Pereira

Doutor Júlio Martins Montalvão e Silva

Doutor Luis Carlos Carrilho Gonçalves

Doutor Ramiro Joaquim de Jesus Neves

Doutor Luis Manuel de Carvalho Gato

**Abril de 1998**

# Índice

Resumo.....	iii
Abstract.....	v
Agradecimento .....	vii
Índice.....	ix
Lista de tabelas .....	xiii
Lista de figuras .....	xv
Lista de fotografias .....	xvii
Nomenclatura.....	xix
 CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	 1
1.1 - Perspectiva geral .....	2
1.2 - O problema em estudo e sua relevância .....	13
1.3 - Revisão bibliográfica.....	15
1.3.1 - Trabalhos experimentais.....	15
1.3.2 - Trabalhos numéricos.....	24
1.4 - Objectivos e contribuição da tese.....	32
1.5 - Visão geral da organização da tese.....	35
 CAPÍTULO 2 - MODELO MATEMÁTICO .....	 37
2.1 - Equações iniciais.....	37
2.1.1 - Equações de conservação simplificadas .....	37
2.1.2 - Equações auxiliares .....	39
2.2 - Modelação da turbulência.....	41
2.2.1 - Equações para escoamento turbulento.....	41
2.2.2 - Modelos de turbulência .....	43
2.2.3 - Modelo de turbulência k- $\epsilon$ .....	49
2.3 - Leis de parede.....	53
2.4 - Nota conclusiva.....	57
 CAPÍTULO 3 - MODELO NUMÉRICO .....	 59
3.1 - Equação geral de transporte .....	59
3.2 - Discretização das equações .....	61
3.3 - O algoritmo SIMPLE .....	64

3.4 - Pormenores computacionais .....	68
3.4.1 - Resolução das equações às diferenças finitas .....	68
3.4.2 - Estabilidade e convergência .....	69
3.5 - Modelação de câmaras de convecção forçada .....	72
3.5.1 - Introdução .....	72
3.5.2 - Modelação em regime não estacionário .....	73
3.5.3 - Transferência de calor nos produtos .....	75
3.6 - Nota conclusiva .....	76
 CAPÍTULO 4 - MODELO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO .....	79
4.1 - Modelo experimental .....	79
4.1.1 - Análise dimensional e semelhança .....	80
4.1.2 - Caracterização construtiva e funcional .....	86
4.2 - Equipamento laboratorial auxiliar .....	91
4.2.1 - Instalação de condicionamento de ar .....	91
4.2.2 - Banho termostático e placas de refrigeração .....	95
4.2.3 - Simulador de carga térmica .....	95
4.2.4 - Sistema de posicionamento de sensores .....	96
4.3 - Instrumentação de medida .....	97
4.3.1 - Sistema de medição do campo de temperatura .....	97
4.3.2 - Sistema de medição do caudal .....	99
4.3.3 - Sistema de medição do campo de velocidade .....	101
4.4 - Visualização do escoamento .....	111
4.4.1 - Modelo experimental de convecção natural .....	112
4.4.2 - Modelo experimental de convecção forçada .....	113
4.5 - Nota conclusiva .....	114
<i>Fotografias de instalações laboratoriais e equipamentos</i> .....	115
 CAPÍTULO 5 - VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL .....	123
5.1 - Simulação numérica do modelo experimental .....	123
5.1.1 - Configuração de estudo .....	124
5.1.2 - Condições de fronteira .....	125
5.1.3 - Pormenores computacionais .....	129
5.2 - Resultados e discussão .....	136
5.2.1 - Descrição do escoamento .....	136
5.2.2 - Estudo comparativo .....	151
5.3 - Nota conclusiva .....	162
<i>Fotografias de resultados do estudo de visualização</i> .....	163

CAPÍTULO 6 - MODELAÇÃO DE ESCOAMENTOS EM CÂMARAS FRIGORÍFICAS DE VEÍCULOS LONGOS .....	167
6.1 - Relevância prática da modelação .....	167
6.2 - Apresentação do problema.....	168
6.2.1 - Introdução.....	168
6.2.2 - Caracterização dos casos de estudo .....	172
6.2.3 - Resumo das condições de fronteira.....	174
6.2.4 - Pormenores computacionais.....	175
6.3 - Resultados e discussão.....	176
6.3.1 - Sistemas de distribuição de ar .....	177
6.3.2 - Câmara de paredes finas.....	209
6.4 - Conclusão.....	222
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO .....	225
7.1 - Contribuição do trabalho.....	225
7.2 - Sugestões para trabalho futuro.....	229
Referências .....	231