

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECANICA

FLOW 2 - UM MODELO MATEMÁTICO PARA A ANÁLISE DE SISTEMAS
DE VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES

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

HÉLIO CALLADO CALDEIRA FILHO

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 1989.

FLOW 2 - UM MODELO MATEMÁTICO PARA A ANÁLISE DE SISTEMAS
DE VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES

HÉLIO CALLADO CALDEIRA FILHO

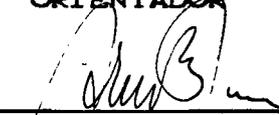
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

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



Prof. Claudio Melo, Ph.D.
ORIENTADOR



Prof. Arno Blass, Ph.D.
COORDENADOR

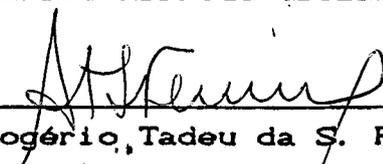
BANCA EXAMINADORA :



Prof. Claudio Melo, Ph.D.
PRESIDENTE



Prof. Carlos Alfredo Clezar, M.Sc.



Prof. Rogério Tadeu da S. Ferreira, Ph.D.

À meus pais, Hélio e Antonieta,
À minha esposa Jerusa,
e à minha filha Paula.

AGRADECIMENTOS

- Ao professor Claudio Melo pela dedicação, incentivo e orientação para cumprir os objetivos estipulados para conclusão deste trabalho.
- Ao professor Carlos Alfredo Clezar pela formação inicial, tanto acadêmica, como profissional, na área de condicionamento de ar e ventilação.
- Ao departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, pela formação.
- Ao C.N.P.Q. e C.A.P.E.S. pelo suporte financeiro.
- Ao N.R.V.A. (Núcleo de Refrigeração, Ventilação e Condicionamento de Ar) pela utilização de seus equipamentos e materiais.
- Aos demais professores e colegas que direta ou indiretamente ajudaram na realização deste trabalho.

INDICE

	Página
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE SIMBOLOS	xvi
RESUMO	xx
ABSTRACT	xxi
CAPITULO 1. INTRODUÇÃO	1
CAPITULO 2. DEFINIÇÕES BÁSICAS	
2.1. Ventilação	5
2.1.1. Ventilação natural	5
2.1.2. Ventilação forçada	6
2.1.3. Infiltração	7
2.2. Técnicas de modelação de edificações	7
2.2.1. Modelação zona única	7
2.2.2. Modelação zonas múltiplas	7
CAPITULO 3. TÉCNICAS DE CÁLCULO DISPONÍVEIS	
3.1. Técnicas empíricas	10
3.1.1. Método das trocas de ar	10
3.1.2. Regressão de dados experimentais	11
3.2. Técnicas computacionais	12
CAPITULO 4. MÉTODO PROPOSTO	
4.1. Introdução	14

4.2.	Hipóteses simplificativas	15
4.3.	Descrição matemática do modelo	16
4.3.1.	Mecanismos de fluxo	16
4.3.2.	Infiltração de ar induzida pela ação do vento	17
4.3.2.1.	Estrutura e comportamento do vento	22
4.3.2.2.	Velocidades empregadas	25
4.3.2.3.	Determinação da posição relativa entre a direção do vento e a superfície	27
4.3.2.4.	Determinação dos coeficientes de pressão	28
4.3.2.5.	Avaliação do processo sugerido pela ASHRAE para a avaliação dos coeficientes de pressão	32
4.3.3.	Infiltração de ar induzida pela ação do efeito chaminé.....	34
4.3.3.1.	Distribuição de temperatura interna uniforme	35
4.3.3.2.	Edificação com zonas verticais isoladas	38
4.3.3.3.	Edificações nas quais zonas verticais interconectadas estão a diferentes temperaturas	39
4.3.3.4.	Edificações nas quais zonas horizontais interconectadas estão a diferentes temperaturas	40
4.3.4.	Ação combinada do vento e do diferencial de temperatura	41
4.3.5.	Cálculo das pressões internas	41
4.3.6.	Efeitos do sistema de ventilação mecânica	46
4.4.	Adequação do programa para simular processos de ventilação natural	47
4.4.1.	Equação da vazão	47
4.4.2.	Aberturas com altura elevada	49
4.4.3.	Estratificação térmica linear	51

CAPITULO 5. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

5.1.	Introdução	54
5.2.	Comparação com dados experimentais	54
5.2.1.	Maugwill House	55
5.2.2.	Hudac House	60
5.2.3.	Runcorn House	66

CAPITULO 6. ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DO PROGRAMA FLOW2 AOS

	DADOS DE ENTRADA	70
6.1.	Introdução	70
6.2.	Edificações analisadas	70
6.2.1.	Edificação tipo A	70
6.2.2.	Edificação tipo B	73
6.2.3.	Edificação tipo C	75
6.3.	Efeito da diferença de temperatura entre o ar externo e interno	77
6.4.	Efeito da diferença de altura entre aberturas	77
6.5.	Efeito da variação da velocidade e do ângulo de ataque do vento	79
6.6.	Efeito da abertura das portas	80
6.7.	Comparação entre ação do vento e do efeito chaminé ...	82
6.8.	Efeito do número de divisões, considerado na análise de grandes aberturas	83
6.9.	Análise dos fluxos de ar interno em edificações com zonas múltiplas	86
6.9.1.	Efeito da velocidade do vento	86
6.9.2.	Efeito da direção do vento	86
6.9.3.	Influência do efeito chaminé	87

CAPITULO 7. DILUIÇÃO DE POLUENTES

7.1. Introdução	90
7.1.1. Fluxo tipo pistão	90
7.1.2. Mistura perfeita	91
7.1.3. Curto circuito	92
7.2. Equação geral da diluição	92
7.2.1. Solução da equação geral da diluição para zona única .	94
7.2.2. Solução da equação geral da diluição para zonas múltiplas	98

CAPITULO 8. ANÁLISE DAS CONDIÇÕES PSICROMÉTRICAS DO AR INTERNO

8.1. Modelação matemática	105
8.2. Potencialidades da modelação	108

CAPITULO 9. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

114

CAPITULO 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

116

APÊNDICES

A- Fluxograma geral	121
B- Solução do sistema de equações não lineares - método de Newton-Raphson	123
C- Solução do sistema de equações lineares	127
D- Valores orientativos para coeficientes de descarga de aberturas	130
E- Solução do sistema de equações diferenciais ordinárias - método de Runge-Kutta - Algoritmo de Gills	131
F- Psicrometria - descrição das principais equações utiliza- das no algoritmo FLOW2	133

LISTA DE TABELAS

Tabela	Descrição	Página
3.1-	Constantes para equação (3.1).	11
4.1-	Parâmetros α e Z_g para três tipos de terreno.	25
4.2-	Parâmetros experimentais de Bowen [16], utilizados no cálculo dos coeficientes de pressão.	33
5.1-	Características de fluxo de cada passagem de ar (Maugwill House).	57
5.2-	Comparação entre resultados computacionais e experimentais (Maugwill House).	58
5.3-	Relação de proteção conforme orientação do vento (Hudac House).	60
5.4-	Características de fluxo de cada passagem de ar (Hudac House).	62
5.5-	Comparação entre resultados computacionais e experimentais (Hudac House).	63
5.6-	Características de fluxo de cada passagem de ar (Runcorn House).	67
5.7-	Comparação entre resultados computacionais e experimentais (Runcorn House).	68
6.1-	Características de fluxo de cada passagem de ar (Edificação tipo A).	72

6.2- Características de fluxo de cada passagem de ar (Edificação tipo B).	73
6.3- Características de fluxo de cada passagem de ar (Edificação tipo C).	75
<hr/>	
D.1- Valores orientativos de coeficientes de descarga para grandes aberturas	130

LISTA DE FIGURAS

Tabela	Descrição	Página
1.1	Potencial da modelação matemática no processo de desenvolvimento de um sistema de ventilação.	3
1.2-	Técnicas alternativas para a estimativa das trocas de ar em edificações.	4
2.1-	Ventilação natural.	5
2.2-	Ventilação forçada.	6
2.3-	Modelação zona única	8
2.4-	Modelação zonas múltiplas	8
4.1-	Exemplos de distribuição da pressão devida à incidência do vento sobre uma edificação retangular.	
	a) Planta baixa b) Secção transversal	18
4.2-	Exemplo de fluxo de ar sobre uma edificação retangular com a direcção do vento normal à menor face.	18
4.3-	Exemplo de fluxo de ar sobre uma edificação retangular com a direcção do vento normal à maior face.	
	a) Planta baixa b) Secção transversal	19
4.4-	Fluxo de ar sobre uma edificação retangular com ângulo de incidência do vento oblíquo.	
	a) Escoamento do ar em planta baixa	
	b) Distribuição de pressões	20
4.5-	Parâmetros α e Z_g para diferentes superfícies.	23

4.6-	Perfil da velocidade média do vento sobre terrenos de diferentes rugosidades.	24
4.7-	Indexação dos lados e formação do ângulo de ataque.	27
4.8-	Ângulo de ataque e indexação das superfícies de acordo com o processo baseado no trabalho de Bowen [16].	32
4.9-	Diferenças de pressão induzidas por efeito chaminé.	
	a) $T_{int} > T_e$ b) $T_{int} < T_e$	34
4.10-	Linha neutra real e linha neutra modificada ($T_{int} > T_e$)	36
4.11-	Gradiente de pressão devido ao efeito chaminé em edificações com zonas verticais isoladas.	38
4.12-	Gradiente de pressão devido ao efeito chaminé para edificações com zonas verticais interconectadas e a diferentes temperaturas.	39
4.13-	Gradiente de pressão devido ao efeito chaminé, para zonas dispostas horizontalmente e a diferentes temperaturas.	40
4.14-	Pressão externa atuando sobre as paredes de uma edificação devida ao efeito simultâneo do vento e do efeito chaminé.	42
4.15-	Aplicação da equação (4.29) a uma edificação com zonas múltiplas.	44
4.16-	Passagem de ar única em uma abertura com altura elevada	49
4.17-	Múltiplas passagens de ar em uma abertura com altura elevada	50
5.1-	Passagens de ar (MAUGWILL HOUSE).	56
5.2-	Comparação entre resultados computacionais e experimentais. (MAUGWILL HOUSE)	59

5.3-	Passagens de ar (HUDAC HOUSE).	61
5.4-	Comparação entre resultados computacionais e experimentais. (HUDAC HOUSE)	65
5.5-	Passagens de ar (RUNCORN HOUSE).	66
5.6-	Comparação entre resultados computacionais e experimentais. (RUNCORN HOUSE)	69
<hr/>		
6.1-	Edificação tipo A.	71
6.2-	Edificação tipo B.	74
6.3-	Edificação tipo C.	76
6.4-	Vazão de ar induzida em função da diferença de temperatura entre o ar interno e externo	78
6.5-	Vazão de ar induzida em função da diferença de altura entre as aberturas inferiores e superiores.	78
6.6-	Efeito da velocidade e da direção do vento sobre a vazão de ar induzida. (edificação tipo A)	79
6.7-	Vazão de ar induzida em função da variação da velocidade e ângulo de ataque do vento.	80
6.8-	Efeito da abertura das portas na vazão de ar induzida, considerando o efeito chaminé constante. (Edificação tipo A).	81
6.9-	Comparação entre a ação do vento e do efeito chaminé.	82
6.10-	Vazão de ar induzida, em função do número de divisões na abertura de altura elevada.	84
6.11-	Variação da altura do plano neutro em função do número de divisões na abertura de altura elevada.	84

6.12- Variação da vazão de ar induzida e do posicionamento do plano neutro em função do número de divisões utilizada no cálculo da abertura com altura elevada. (Edificação tipo B).	85
6.13- Efeito da velocidade do vento sobre os fluxos de ar interno.	87
6.14- Influência da direção do vento nos fluxos de ar interno.	88
6.15- Influência do efeito chaminé sobre os fluxos de ar interno.	89
7.1- Fluxo tipo Pistão.	91
7.2- Mistura Perfeita.	91
7.3- Curto circuito.	92
7.4- Volume de controle para dedução da equação geral da diluição.	93
7.5- Variação temporal da concentração de poluentes do ar interno para uma edificação zona única. (N=1,3 trocas/hora)	97
7.6- Variação temporal da concentração de poluentes do ar interno para uma edificação zona única. (N=4,0 trocas/hora)	97
7.7- Edificação com zonas múltiplas e com concentrações de poluentes diferentes em cada zona.	100
7.8- Efeito da vazão de ar externo sobre a diluição de poluentes, em edificações com zonas múltiplas sem geração interna de poluentes.	102
7.9- Efeito da vazão de ar externo sobre a diluição de poluentes, em edificações com zonas múltiplas e com geração interna de poluentes.	103

- 7.10- Efeito da vazão de ar externo sobre a diluição de poluente, em edificações, com zonas múltiplas, sem geração interna de contaminante, e com concentrações iniciais diferentes em cada zona. 104
- 8.1- Edificação com zonas múltiplas e com umidade relativa diferente em cada zona. 107
- 8.2- Variação da umidade relativa e da temperatura do ar interno em decorrência de um ganho de calor sensível de 60 kW. 110
- 8.3- Variação da temperatura e da umidade relativa do ar interno em decorrência de trocas de calor latente com com o ar externo. 111
- 8.4- Variação da temperatura e da umidade relativa do ar interno em decorrência de uma geração de calor sensível de 30 kW na zona 1. 112
- 8.5- Variação da umidade relativa do ar interno em decorrência de uma geração de vapor d'água de $6,9 \times 10^{-3}$ kg/s. 113

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Área da abertura	m ²
A _{ef}	Área efetiva de fuga	m ²
A _x	Área da secção do fluxo de ar numa faixa horizontal	m ²
a _m	Coeficientes da equação 4.11	
C	Coeficiente de vazão	m ³ /h/Pa ⁿ
C _d	Coeficiente de descarga	
C _n	Coeficientes da equação 4.12	
C _p	Coeficiente de pressão	
C _t	Concentração de poluentes	kg/m ³
C _o	Concentração inicial	kg/m ³
DIR	Direção do vento	graus
dh	Intervalo de variação de altura da edificação	m
dm	Variação de massa	kg
F	Fator de correção para equação de Shaw (4.14)	
FI	Fator de integração para equação (7.6)	
G	Taxa total de emissão de poluentes	kg/s
GW	Geração de vapor d'água	kg _{vapor} /s
g	Aceleração local da gravidade	m/s ²
H	Entalpia do ar	kJ/kg _{ar seco}
H _a	Altura média das estruturas adjacentes	m
H _b	Altura da edificação	m
h	Altura qualquer na edificação	m
h ₁	Nível de altura 1	m
h ₂	Nível de altura 2	m
I	Taxa de infiltração de ar	h ⁻¹

k_1	Constante empírica da equação 3.1	
k_2	Constante empírica da equação 3.1	
k_3	Constante empírica da equação 3.1	
l	Número de passagens de ar numa zona	
M	Massa de ar seco	kg _{ar seco}
m	Massa de ar	kg
\dot{m}	Fluxo mássico de ar	kg/s
N	Número de trocas de ar	h^{-1}
n	Expoente de fluxo	
P	Pressão do ar	Pa
P_b	Pressão atmosférica	Pa
P_c	Pressão devida ao efeito chaminé	Pa
P_s	Pressão dinâmica do ar	Pa
P_t	Pressão total resultante numa abertura	Pa
P_v	Pressão devida ao vento num determinado ponto externo da edificação	Pa
P_1	Pressão no nível h_1	Pa
P_2	Pressão no nível h_2	Pa
Q	Vazão de ar	m^3/s ou m^3/h
Q_T	Carga térmica ambiente	kW
Q_v	Vazão de ar induzida devida ao vento	h^{-1}
Q_{vm}	Vazão de ar induzida pela ventilação mecânica	m^3/h
Q_x	Fluxo de ar através de uma faixa horizontal da porta	m^3/h
R	Constante dos gases perfeitos para o ar seco	$kJ/kg K$
S	Relação entre o comprimento perpendicular a uma determinada superfície da edificação e sua largura	
T	Temperatura do ar	K
T_{h_1}	Temperatura na altura de referência	K
t	tempo	s

V	Velocidade média do vento num dado nível	m/s
V _g	Velocidade livre	m/s
V _z	Volume da zona	m ³
V _{top}	Velocidade no topo da edificação	m/s
V _{AV}	Velocidade média num determinado andar	m/s
V _z	Velocidade média do vento numa altura, Z	m/s
W	Umidade absoluta do ar	kg _{ar seco} /kg _{vapor H₂O}
WA	Azimute de parede	graus
w	Gradiente de temperatura	K/m
Z	Altura	m
Z _g	Altura onde a velocidade livre é atingida	m
Z _{top}	Altura no topo da edificação	m
Z _{1, Z2}	Altura nas extremidades do andar	m

SIMBOLOS GREGOS

Simbolo	Descrição	Unidade
α	Constante dependente da rugosidade do solo	
α_{sh}	Fator de correção de Shaw	
ΔP	Diferença de pressão interna/externa	Pa
ΔT	Diferença de temperatura interna/externa	°C
θ	Ângulo de ataque do vento na superfície	graus
ϕ	Umidade relativa	%
ρ	Densidade do ar	kg/m ³

INDICES SUPERIORES

* Local do registro meteorológico

INDICES INFERIORES

e ar externo

exp calculado experimentalmente

flow calculado pelo algoritmo FLOW

flow2 calculado pelo algoritmo FLOW2

i i-ésima passagem de ar

int ar interno

j j-ésima zona

INDEXADORES

ad Identificador do andar da edificação

k Superfície da edificação

h variando com altura da edificação

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um modelo matemático capaz de simular processos de infiltração e/ou ventilação de ar em edificações. Para tanto o modelo leva em consideração a variação do perfil da velocidade da camada limite atmosférica em função do tipo de terreno, a direção e a velocidade do vento, as dimensões da edificação, a diferença de temperatura entre o ar interno e o externo, a estratificação da temperatura interna, etc. Tal modelo é capaz ainda de analisar o efeito da vazão de ar induzida sobre a umidade relativa, a temperatura e a concentração de poluentes no interior de um determinado ambiente.

ABSTRACT

The objective of this work is to present a numerical model to simulate air infiltration/ventilation processes in buildings. The model accounts for the nature and roughness of the surrounding terrain and the consequent atmospheric boundary layer, the wind speed and direction, the building dimensions, the temperature difference between the internal and the external air, the internal air temperature stratification, etc. The model is also able to analyse the effect of the induced air infiltration/ventilation rates on the internal air relative humidity, temperature and pollutant concentration.

1. INTRODUÇÃO

As possibilidades de ter-se edificações com condições internas fisicamente aceitáveis e obter-se uma significativa redução no consumo de energia, devido ao uso planejado de equipamentos de ventilação e de condicionamento de ar, tem sido objeto de muitos estudos. A constatação de que ambientes fisicamente confortáveis promovem um melhoramento geral na eficiência do trabalhador, juntamente com a atual crise energética tem sido fatores determinantes no desenvolvimento da área de análise térmica de edificações. Dentro deste contexto cabe ressaltar-se que a utilização de técnicas adequadas de ventilação pode contribuir, consideravelmente para a obtenção de edificações economicamente mais eficientes.

A temperatura, umidade relativa, teor de concentração de poluentes, de um determinado ambiente, são algumas das variáveis afetadas pela presença de uma vazão maior ou menor de ar externo. Tal vazão pode ser induzida por um processo, denominado infiltração, onde o ar move-se de uma maneira não controlada, através de orifícios e frestas, induzido por um diferencial de pressão, resultante da ação combinada do vento e da diferença de temperatura existente entre os meios ambientes interno e externo. Um outro processo, denominado de ventilação natural, consiste em utilizar o mesmo diferencial de pressão, em conjunto com aberturas estrategicamente colocadas. Obviamente, tais processos podem ocorrer de uma forma combinada e ainda sob a presença de um sistema de ventilação mecânica. Os processos combinados de infiltração e ventilação, acima mencionados, são na verdade a regra dominante para atender as necessidades de ventilação de uma

enorme variedade de edificações.

Atualmente encontram-se disponíveis métodos experimentais, tais como a técnica de utilização de gás traçador e os testes de pressurização, os quais permitem, respectivamente a medição da vazão de ar induzida por infiltração/ventilação e a identificação das características de vazamentos da edificação.

A utilização de tais métodos, contudo, oferece uma série de inconvenientes. Por exemplo, a utilização da técnica de gás traçador, requer que muitas medições distintas, sejam realizadas, num período relativamente extenso de tempo, com a finalidade de estabelecer-se a relação entre as taxas de renovação de ar e os parâmetros climáticos. Além, disto, as técnicas experimentais podem, obviamente, ser apenas empregadas em edificações já existentes, sendo portanto, de pouca valia na fase inicial de projeto.

Dentro deste contexto, as técnicas de modelação matemática, quando convenientemente validadas, fornecem um método rápido e eficaz, para a avaliação e análise dos processos de trocas de ar por infiltração/ventilação, tanto na fase de projeto como em edificações já existentes.

O potencial dos modelos de ventilação como elementos fundamentais no projeto de sistemas de ventilação, é apresentado na Figura 1.1. Condições tais como clima, nível de proteção e informações sobre o terreno, em combinação com detalhes de projeto, fornecem os dados de entrada para a modelação matemática. Os resultados tais como, taxas de troca de ar, movimentação do ar, demanda de energia, qualidade do ar e eficiência do sistema podem então ser analisados, viabilizando assim uma decisão entre a otimização das variáveis, sobre as

quais o projetista tem controle, e o final da análise da edificação.

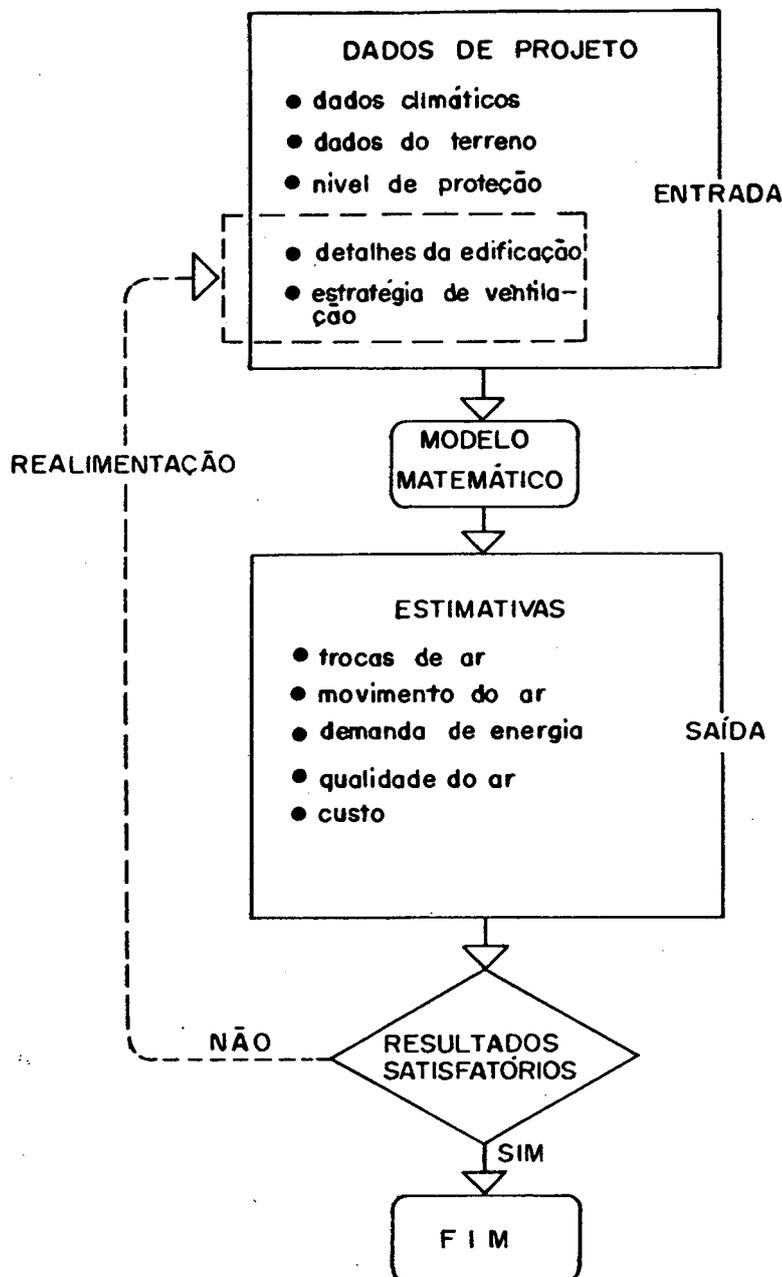


FIGURA 1.1- Potencial da modelação matemática no processo de desenvolvimento de um sistema de ventilação.

A estrutura computacional denominada FLOW2, a ser apresentada neste trabalho combina as características de vazamento de uma edificação, com dados climáticos e com dados sobre o terreno, oferecendo assim um processo alternativo para estimar-se as trocas de ar por infiltração/ventilação em edificações (Figura 1.2). Tal programa apresenta ainda, como potencialidade, o estudo da influência de tais trocas de ar sobre a umidade relativa, a temperatura e sobre o teor de poluentes no interior de um determinado ambiente.

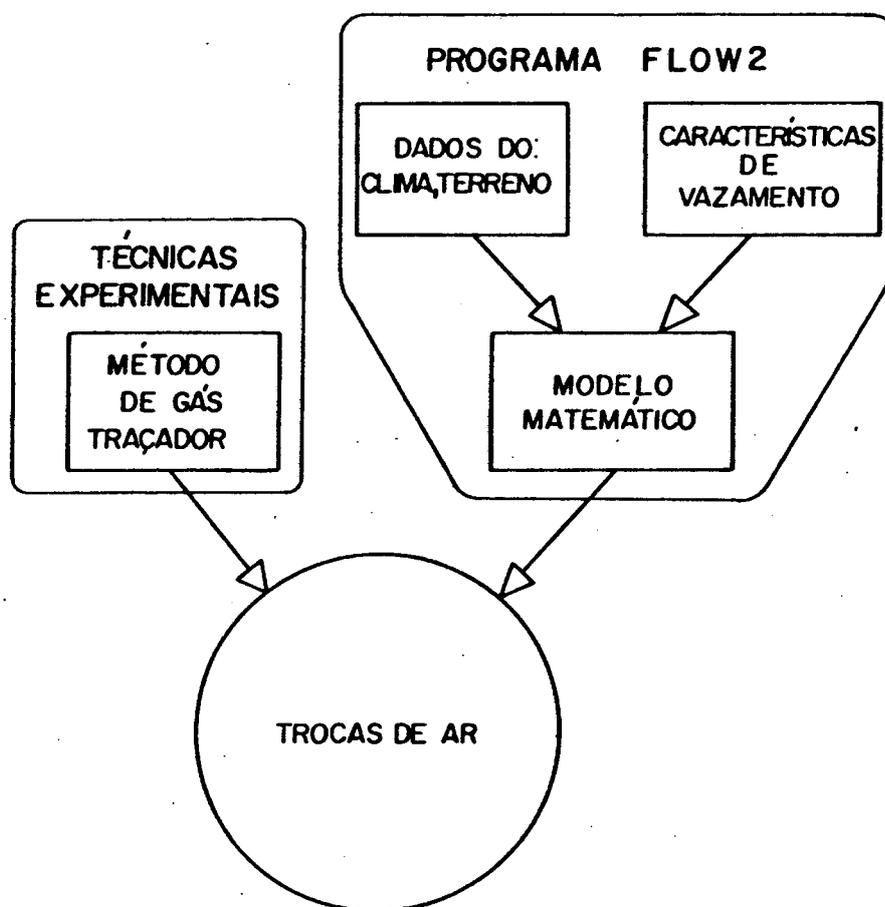


FIGURA 1.2- Técnicas alternativas para a estimativa das trocas de ar em edificações.

2. DEFINIÇÕES BÁSICAS

2.1. VENTILAÇÃO

É o processo de movimentação intencional do ar através de meios natural e/ou mecânico.

2.1.1. VENTILAÇÃO NATURAL

Segundo a ASHRAE [1], ventilação natural ou passiva é aquela induzida por pressões devidas ao vento e/ou à diferença de temperatura entre o ar interno e o externo ao ambiente. Ocorre devido à presença de janelas basculantes, portas e outras aberturas controladas pelos ocupantes. Pode ser usada eficientemente tanto para o controle da temperatura do ar ambiente como para o controle da concentração de contaminantes. A

Figura 2.1, ilustra o processo de ventilação natural, sendo empregado em um pavilhão industrial.

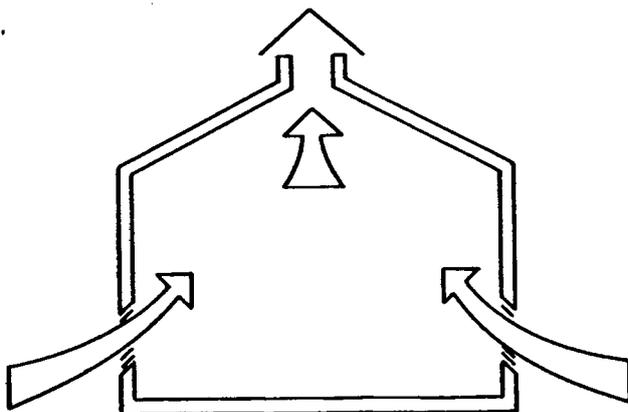


FIGURA 2.1- Ventilação natural.

A ventilação natural, embora seja um meio importante e comum de satisfazer a renovação de ar em edificações, apresenta como desvantagem inerente a dificuldade de controle das vazões de ar induzidas. Isto deve-se ao fato destas vazões dependerem de variáveis aleatórias, tais como a velocidade, a direção do vento e a temperatura do ar externo.

2.1.2. VENTILAÇÃO FORÇADA

É aquela na qual utilizam-se meios mecânicos, geralmente um ou mais ventiladores, para promover a movimentação do ar.

É denominada do tipo exaustora quando cria-se uma depressão, no ambiente a qual induz a entrada de ar pelas frestas ou aberturas da edificação.

Pode ser também do tipo insuflamento por dutos com extração pelo forro, como indicado na Figura 2.2.

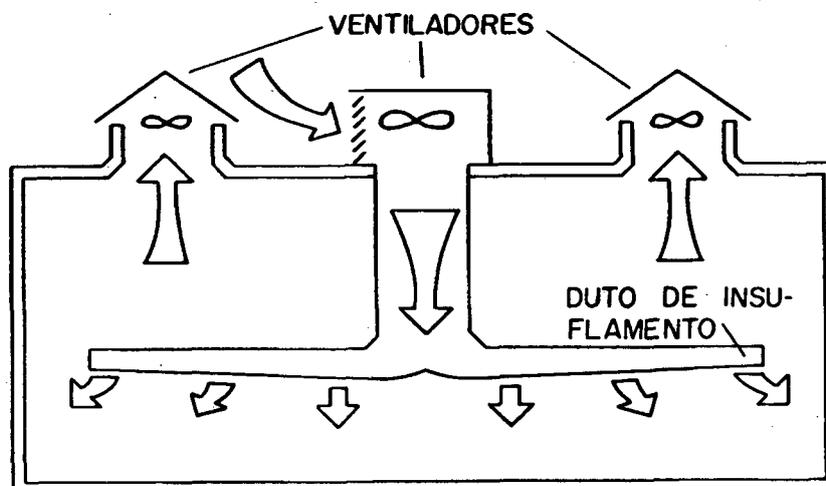


FIGURA 2.2- Ventilação forçada.

2.1.3. INFILTRAÇÃO

Segundo a ASHRAE [1], infiltração é o fluxo não controlado de ar através de frestas e/ou aberturas, induzido por um diferencial de pressão, criado pela ação do vento e/ou pela diferença de temperatura entre o ar interno e o externo.

2.2. TÉCNICAS DE MODELAÇÃO DE EDIFICAÇÕES

Ao modelar-se uma edificação, com o objetivo de estimar-se as trocas de ar devida à infiltração/ventilação do ar externo, pode-se, em função dos dados disponíveis e dos resultados requeridos, optar por uma abordagem tipo zona única ou zonas múltiplas [2].

2.2.1. MODELAÇÃO ZONA ÚNICA

Uma modelação zona única ou célula única é aquela na qual assume-se que o ar interno encontra-se bem misturado e a uma pressão uniforme. Edificações, tais como edifícios residenciais, edifícios industriais não particionados e pequenos edifícios comerciais, são geralmente modelados de acordo com esta técnica.

A Figura 2.3, ilustra a aplicação desta técnica.

2.2.2. MODELAÇÃO ZONAS MÚLTIPLAS

Uma modelação zonas múltiplas ou células múltiplas é aquela na qual o ar interno é particionado por repartições internas conforme indicado na Figura 2.4.



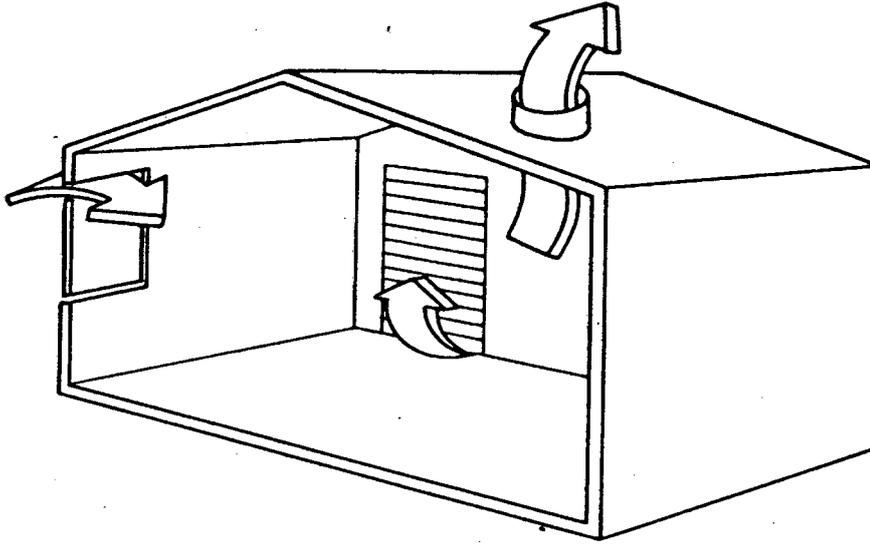


FIGURA 2.3- Modelação zona única.

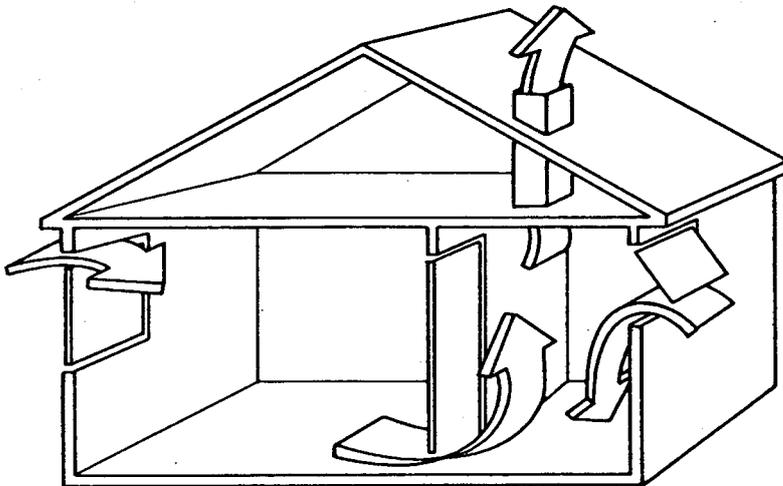


FIGURA 2.4- Modelação zonas múltiplas.

O uso da modelação por zona única acarreta grandes simplificações nos cálculos, devido à necessidade de determinar-se somente uma pressão interna. Ao contrário, na modelação por zonas múltiplas existem diversas pressões internas a serem determinadas, o que adiciona considerável complexidade ao método de solução numérica.

Quando somente os valores máximos da taxa de ventilação/infiltração forem requeridos, ou quando as portas internas forem consideradas sempre abertas, ou então quando um sistema de ventilação mecânica unir as diversas zonas, fazendo o ar circular entre as mesmas, a modelagem por única zona mostra-se com precisão suficiente.

A abordagem por zonas múltiplas, por outro lado, oferece um potencial ilimitado para a análise da distribuição do fluxo de ar por infiltração/ventilação em edificações particionadas.

A principal desvantagem desta abordagem é que a mesma requer uma quantidade substancial de dados para descrever as passagens do fluxo de ar interno (e externo), acarretando, muitas vezes, uma demanda computacional considerável.

3. TÉCNICAS DE CÁLCULO DISPONÍVEIS

A escolha da técnica de cálculo, a ser empregada para estimar as vazões de ar de infiltração/ventilação, varia de acordo com o nível de precisão requerido, com a disponibilidade de dados e com o tipo de edificação sob investigação.

De uma maneira geral, tais técnicas podem ser divididas em duas categorias. A primeira, denominada empírica, envolve a utilização de recomendações práticas ou de equações ajustadas a partir de um determinado grupo de resultados experimentais. A segunda envolve a utilização de modelos numéricos zona única ou zonas múltiplas, os quais representam uma abordagem mais realística no que tange a simulação do escoamento do ar através das frestas ou aberturas de uma edificação.

As técnicas empíricas, apesar de apresentarem uma enorme facilidade de uso, apresentam também uma pequena faixa de aplicação. As técnicas baseadas em abordagem computacionais, por outro lado, são mais versáteis mas ficam geralmente limitadas ao tempo de C.P.U. requerido e a disponibilidade e quantidade de dados necessários a serem fornecidos ao programa.

3.1. TÉCNICAS EMPÍRICAS

3.1.1. MÉTODO DAS TROCAS DE AR

Este método baseia-se na hipótese de que edificações similares, com construção normal, e sob condições atmosféricas médias apresentam/necessitam taxas similares de infiltração/ventilação. Assim, é comum encontrar-se tabelas, como por exemplo

as da referência [3], as quais fornecem os valores das taxas de ventilação, em termos do número de trocas de ar em função do tipo de edificação.

3.1.2. REGRESSÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS

Este processo baseia-se na utilização de correlações empíricas, derivadas de dados experimentais, a partir da utilização de técnicas de regressão.

Geralmente, tal correlação assume a seguinte forma:

$$I = K_1 + K_2 \Delta T + K_3 V \quad (3.1)$$

onde I é a taxa de infiltração em trocas de ar por hora, ΔT é a diferença de temperatura interna/externa em °C, V é a velocidade do vento em m/s e K_1 , K_2 e K_3 são constantes empíricas derivadas de medições em campo.

Stoecker e Jones [4], baseados no trabalho de Coblentz e Achenbach [5], fornecem os seguintes valores para os coeficientes K_1 , K_2 e K_3 :

TABELA 3.1- Constantes para equação (3.1).

qualidade da construção	k_1	k_2	k_3
boa vedação	0,15	0,007	0,010
média vedação	0,20	0,014	0,015
má vedação	0,25	0,022	0,020

Este tipo de abordagem fornece, geralmente, resultados imprecisos. Os coeficientes K_1 , K_2 e K_3 refletem tanto a influência das variáveis climáticas quanto a influência do comportamento dos ocupantes e da qualidade de construção empregada. Por isso, os valores de tais coeficientes, podem variar numa relação de 20:1 entre edificações semelhantes [1]. Tal processo é, portanto, inadequado para ser utilizado em simulações computacionais visando, por exemplo, a análise do consumo de energia em edificações.

3.2. TÉCNICAS COMPUTACIONAIS

Um estudo recente feito pelo A.I.V.C. (Air Infiltration and Ventilation Centre) [2], apresenta uma grande variedade de modelos utilizando a técnica de modelação zona única. A restrição comum a estes modelos é que os mesmos podem ser usados somente para calcular taxas de troca de ar em estruturas que possuam uma pressão interna uniforme.

De todos os modelos zona única, validados pelo A.I.V.C. [6], o modelo denominado L.B.L. (Lawrence Berkeley Laboratory-U.S.A.) [7] apresentou o melhor desempenho. Tal modelo foi desenvolvido especificamente para utilizar os resultados de testes de pressurização, previamente realizados, e possui ainda a vantagem de ser um algoritmo simples, podendo assim ser implementado numa calculadora programável ou num micro computador.

A falta de disponibilidade de um modelo, baseado na técnica de modelação de zonas múltiplas, e a dependência do modelo do LBL em relação aos testes de pressurização, originou o

desenvolvimento do programa FLOW [8]. Tal programa pode simular edificações tanto com a técnica de zona única como de zonas múltiplas e depende basicamente dos dados referentes às passagens de ar, geralmente indicados pela ASHRAE [1] ou fornecidos por fabricantes de aberturas.

Uma nova versão deste programa, incluindo uma série de características adicionais, será apresentada neste trabalho. Algumas das características desta nova versão, denominada FLOW2, são apresentadas no item a seguir.

4. MÉTODO PROPOSTO

4.1. INTRODUÇÃO

Na última década foram desenvolvidos vários modelos para calcular as taxas de infiltração de ar externo em edificações. O conhecimento preciso de tais taxas é de suma importância nos países do hemisfério Norte, onde as mesmas influem consideravelmente no consumo de energia associado à calefação dos ambientes.

Dentro deste contexto, Melo [8,9] desenvolveu um modelo denominado FLOW, também com o intuito de estimar a infiltração de ar externo em edificações. Os resultados de tal modelo foram comparados com os resultados de outros modelos e com dados experimentais [10], onde demonstrou-se a melhor confiabilidade do mesmo.

Para o Brasil, localizado no hemisfério Sul, o estudo do aproveitamento da ventilação natural em edificações, oferece um potencial para a obtenção de conforto térmico e para a redução do consumo de energia relacionado com equipamentos de ventilação e condicionamento de ar.

O método aqui apresentado propõe-se a incluir características adicionais no modelo, denominado FLOW, como forma de possibilitá-lo a:

- i) estimar as trocas de ar através de grandes aberturas;
- ii) calcular mais precisamente os coeficientes de pressão;
- iii) analisar a influência das trocas de ar no teor de poluentes em edificações;
- iv) analisar a influência das trocas de ar na variação das

condições psicrométricas do ar interno;

- v) analisar o efeito de gradientes de temperatura entre zonas adjacentes e no sentido vertical sobre as vazões de ar induzidas;

Um fluxograma geral do modelo, denominado FLOW2, o qual reúne as características anteriormente relacionadas, é apresentado no Apêndice A.

4.2. HIPÓTESES SIMPLIFICATIVAS

O algoritmo FLOW2 admite hipóteses similares àquelas empregadas em outros programas de infiltração, quais sejam:

- i) A edificação é considerada como uma série de células independentes interligadas por diferentes passagens de ar.
- ii) Cada célula possui uma pressão interna uniforme.
- iii) Cada passagem de ar possui suas próprias características de resistência ao fluxo.
- iv) A ação do vento e do diferencial de temperatura produzem pressões externas sobre cada abertura da edificação, as quais mantêm-se constantes durante o período de tempo considerado nos cálculos. Desta forma, a natureza turbulenta do vento a qual gera flutuações nos coeficientes de pressão é desprezada.
- v) A temperatura interna pode ser considerada uniforme ou então apresentar uma variação linear com a altura.
- vi) O ar interno é considerado como uma mistura homogênea.

4.3. DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO

4.3.1. MECANISMOS DE FLUXO

As forças básicas que induzem o fluxo de ar por infiltração através de frestas e orifícios nas aberturas originam-se das diferenças de pressão geradas pelo vento, pelo diferencial de temperatura e por sistemas de ventilação mecânica.

A equação básica que rege o fenômeno é a equação clássica para escoamento através de orifícios:

$$Q = C \Delta P^n \quad (4.1)$$

onde:

Q = vazão de ar (m^3/h)

C = coeficiente de vazão ($m^3/h/Pa^n$)

n = expoente do fluxo

ΔP = diferença de pressão interna/externa (Pa)

O expoente n está relacionado com o regime de escoamento, variando entre os limites de 0,5 para fluxo turbulento (altas pressões) e 1,0 para o fluxo laminar (baixas pressões). Segundo a ASHRAE [1] os valores de n , em orifícios usualmente encontrados em edificações residenciais, encontram-se na faixa de 0,5 a 0,65.

A determinação precisa do coeficiente C , assim como também do expoente n , exige a realização de testes de vazamento em cada abertura. A determinação do valor de n , por apresentar uma pequena variação, não influi, de maneira significativa, na

determinação da vazão de ar. Por outro lado, o valor de C, por apresentar uma grande faixa de variação, influi significativamente nos valores calculados para a vazão de ar.

Quando tais valores não forem disponíveis, pode-se, de uma maneira aproximada, utilizar os valores médios recomendados pela ASHRAE [11].

4.3.2. INFILTRAÇÃO DE AR INDUZIDA PELA AÇÃO DO VENTO

A ação do vento sobre uma edificação exerce uma pressão variável ao longo de suas superfícies. No caso de superfícies a barlavento, tal pressão apresenta um valor máximo no centro, e diminui para as extremidades. No caso de edificações retangulares, o fluxo de ar separa-se nas extremidades, resultando em pressões negativas ao longo dos lados. Pressões negativas também são experimentadas dentro da região oposta àquela de onde sopra o vento, denominada de sotavento, onde ocorre a formação de uma zona de recirculação. Em linhas gerais, a Figura 4.1, exemplifica uma distribuição de pressões, tipicamente encontradas em edificações retangulares.

A pressão gerada na superfície, pela ação do vento, varia de um modo complexo sobre as faces da edificação, devido principalmente à camada limite atmosférica, à presença de corpos vizinhos e às características aerodinâmicas do fluxo de ar ao redor da edificação.

Nas Figuras 4.2 a 4.4, mostra-se a influência da forma da edificação sobre o escoamento e conseqüentemente sobre o campo de pressões resultante [11].

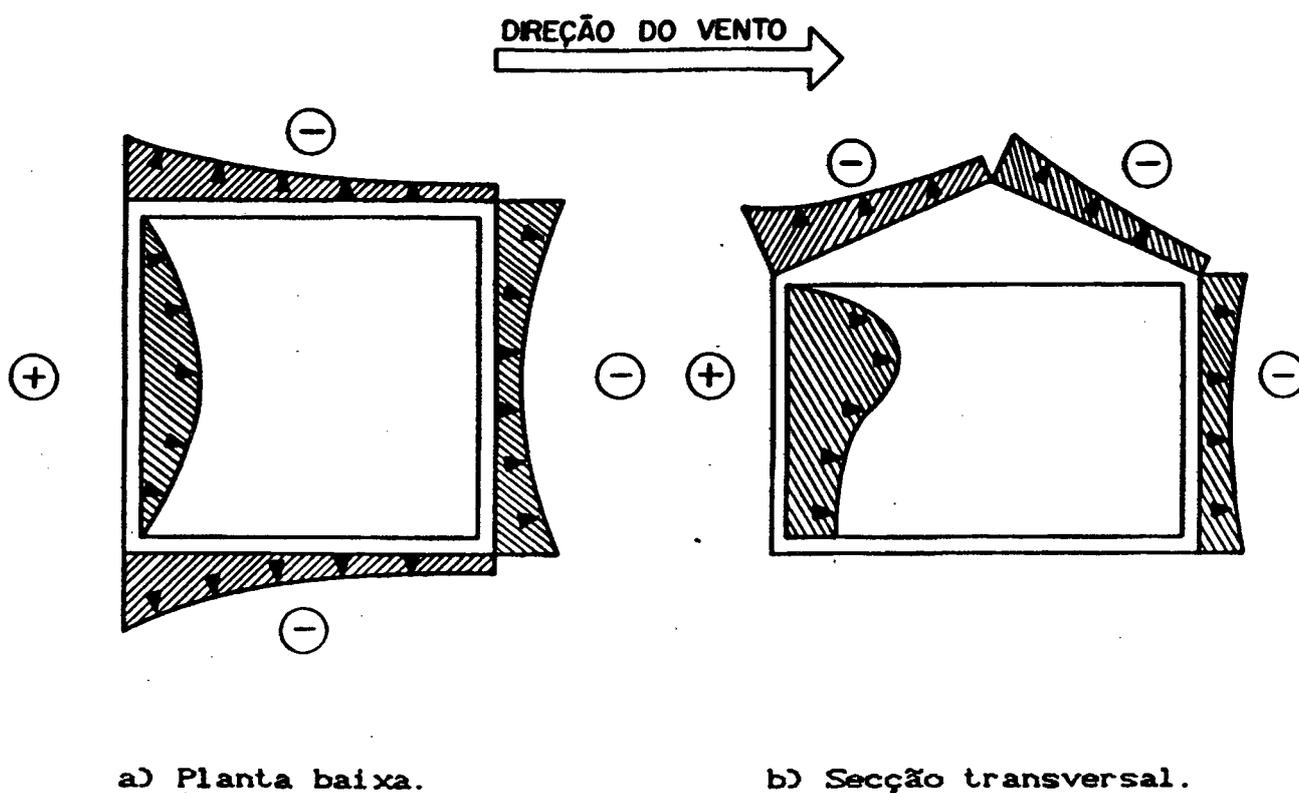


FIGURA 4.1- Exemplos de distribuição da pressão devido a incidência do vento sobre uma edificação retangular.

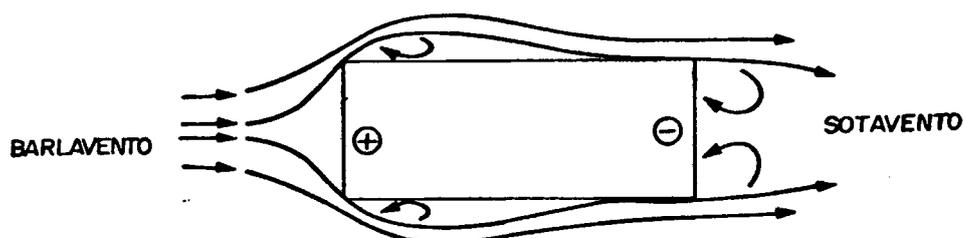
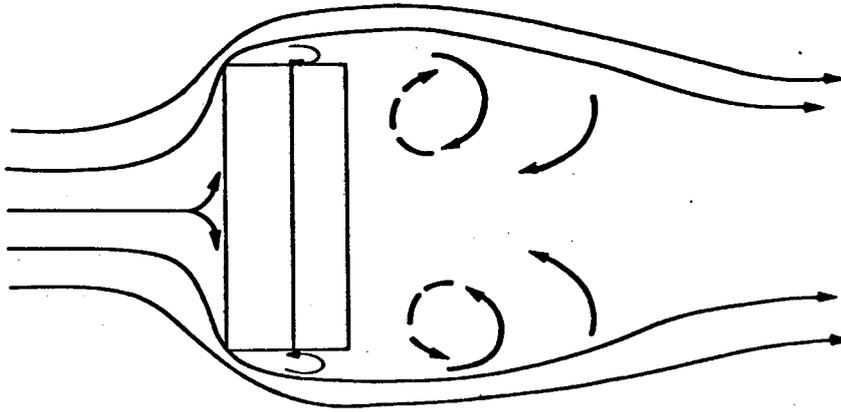
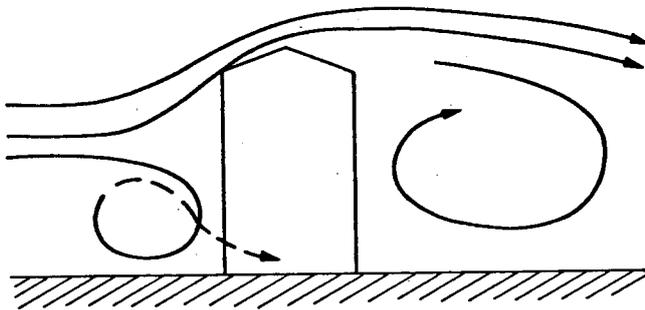


FIGURA 4.2- Exemplo de fluxo de ar sobre uma edificação retangular com a direção do vento normal à menor face.

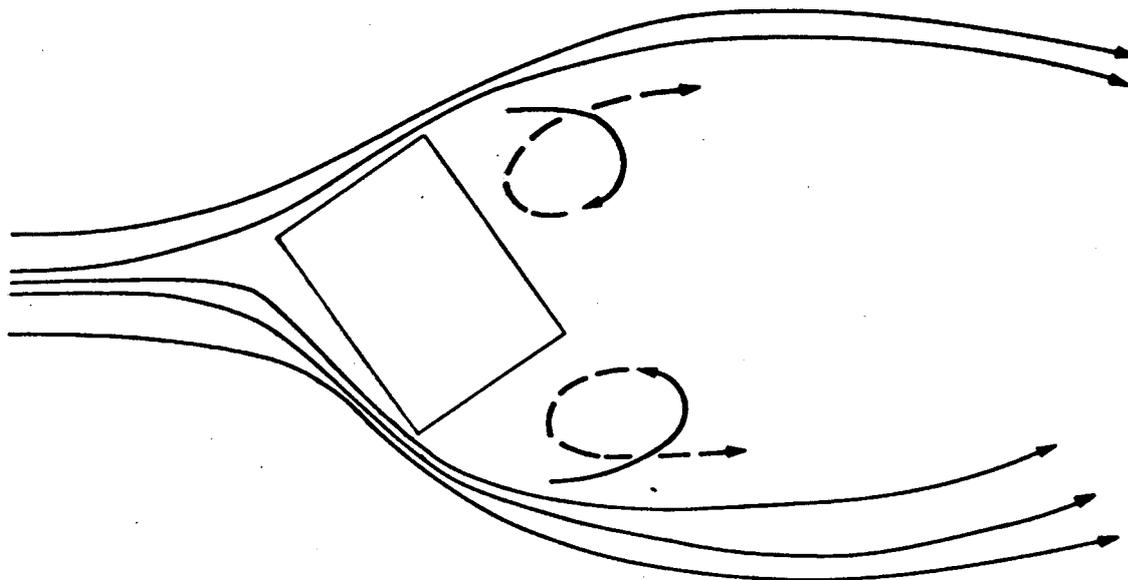


a) Planta baixa.

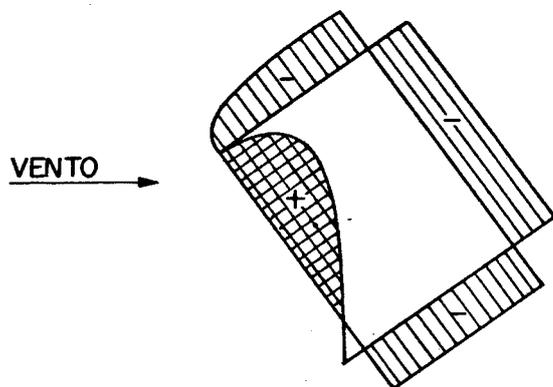


b) Secção transversal.

FIGURA 4.3- Exemplo de fluxo de ar sobre uma edificação retangular com a direção do vento normal à maior face.



a) Escoamento do ar em planta baixa.



b) Distribuição de pressões.

FIGURA 4.4- Fluxo de ar sobre uma edificação retangular com ângulo de incidência do vento oblíquo.

O ponto de estagnação do fluxo, o qual usar-se-á como a pressão de referência para cálculo dos demais pontos é dado por:

$$P_s = \rho V^2 / 2 \quad (4.2)$$

onde:

P_s = pressão dinâmica do ar (Pa)

V = velocidade média do vento num dado nível (m/s)

ρ = densidade do ar (kg/m^3)

O valor da pressão num determinado local da superfície de uma edificação é calculado corrigindo-se a equação (4.2) através do uso de um coeficiente de pressão, definido como:

$$C_p = P_v / P_s \quad (4.3)$$

onde:

C_p = coeficiente de pressão

P_v = pressão devida ao vento num determinado ponto externo da edificação (Pa)

Tal coeficiente é determinado experimentalmente, geralmente através de medições em túnel de vento utilizando-se modelos em escala reduzida.

4.3.2.1. ESTRUTURA E COMPORTAMENTO DO VENTO

A velocidade do vento, V , pode ser determinada utilizando-se os dados da estação meteorológica mais próxima, segundo o procedimento descrito por Melo [8], e apresentado a seguir.

O movimento das massas de ar (vento) sobre a superfície da Terra forma uma camada limite atmosférica. A profundidade de tal camada depende fortemente da topografia do local e da rugosidade da superfície.

Acima da camada que sofre a influência da superfície, o ar move-se puramente sob a influência do gradiente de pressão, o qual é causado pelo aquecimento diferenciado da superfície da Terra pelo Sol. A partir deste ponto, a velocidade se mantém constante e é denominada de velocidade livre, V_g .

Diversas equações tem sido sugeridas para descrever a variação da velocidade do vento com a altura. Dentre tantas, duas delas tem-se destacado, a do perfil logarítmico e a do perfil exponencial.

Entretanto, conforme observado por Counihan [12] e por Davenport [13], a aplicação do perfil logarítmico a zonas urbanas ainda não se encontra completamente equacionado. Desta forma, optou-se pelo perfil exponencial descrito matematicamente pela equação a seguir:

$$V_z / V_g = (Z/Z_g)^\alpha \quad (4.4)$$

onde:

V_z = velocidade média do vento numa altura, Z (m/s)

V_g = velocidade livre (m/s)

Z = altura (m)

Z_g = altura onde a velocidade livre é atingida (m)

α = constante dependente da rugosidade do solo

Para determinar os valores de α e Z_g para diferentes superfícies, utilizam-se as recomendações de Davenport [13], mostradas graficamente na Figura 4.5. Os perfis típicos para três tipos de terreno: área rural, área suburbana e área urbana, são mostrados na Figura 4.6., Davenport [13] sugeriu ainda, para uso prático, os valores representativos mostrados na Tabela 4.1.

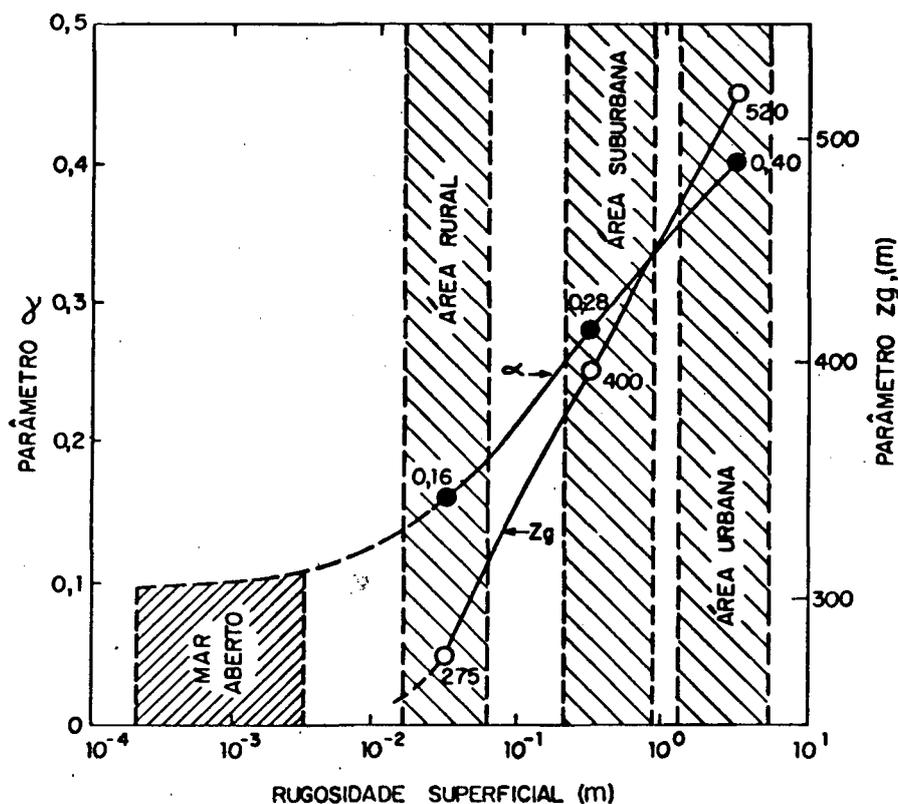


FIGURA 4.5- Parâmetros α e Z_g para diferentes superfícies.

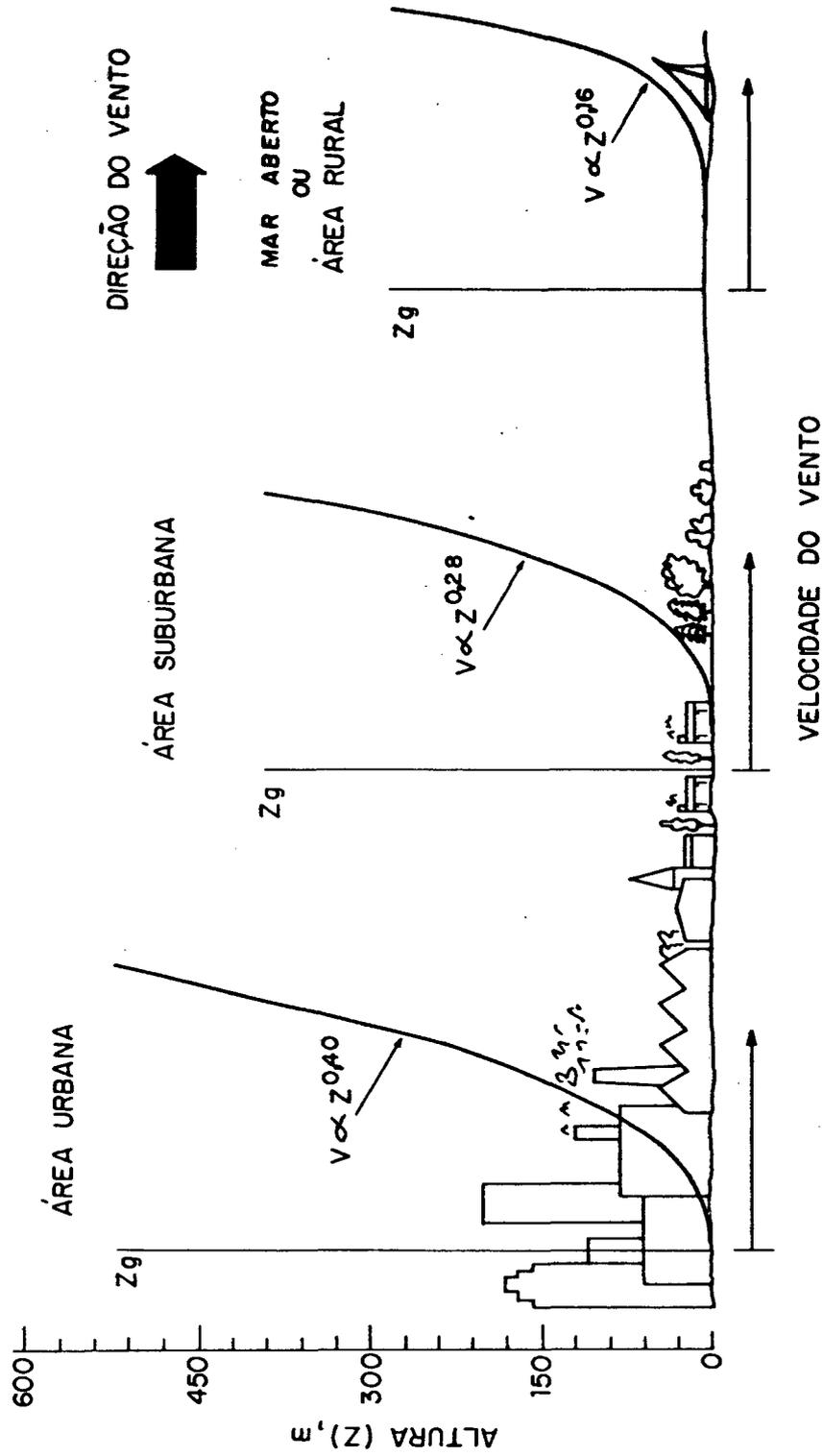


FIGURA 4.6- Perfil da velocidade média do vento sobre terrenos de diferentes rugosidades.

TABELA 4.1- Parâmetros α e Z_g para três tipos de terreno.

TIPO DE TERRENO	Z_g (m)	α
área rural	275	0,16
área suburbana	400	0,28
área urbana	500	0,40

4.3.2.2. VELOCIDADES EMPREGADAS

Medições meteorológicas são usualmente feitas em campo aberto (ex. aeroportos) enquanto que edificações residenciais e industriais são mais comumente localizados em áreas protegidas. A velocidade do vento deve, portanto ser corrigida para levar em conta o fato de que o perfil do vento varia de acordo com o tipo de terreno. Utilizando-se o perfil exponencial apresentado por Davenport [13], e assumindo-se que a velocidade livre V_g , seja independente do tipo de terreno, pode-se calcular a variação de velocidade nos diferentes tipos de terreno, de acordo com as equações a seguir.

$$V_g^* = V_z^* \left[\frac{Z_g^*}{Z^*} \right]^{\alpha^*} \quad (4.5)$$

$$V_z = V_g \left[\frac{Z}{Z_g} \right]^{\alpha} \quad (4.6)$$

onde as variáveis com o superescrito (*) referem-se ao local do registro meteorológico e as variáveis sem superescrito referem-se

ao local onde encontra-se localizada a edificação sob análise. Assim pode-se calcular, o valor da velocidade do vento no topo da edificação.

$$V_{top} = V_g^* \left[\frac{Z_{top}}{Z_g} \right]^\alpha \quad (4.7)$$

ou a velocidade média em cada andar,

$$VAV(ad) = \int_{z_1}^{z_2} V_z dZ / \int_{z_1}^{z_2} dZ \quad (4.8)$$

$$VAV(ad) = V_g^* \frac{\left[Z_2^{(\alpha+1)} - Z_1^{(\alpha+1)} \right]}{\left[Z_2^{(\alpha+1)} - Z_1^{(\alpha+1)} \right] \left[Z_g^{\alpha(\alpha+1)} \right]} \quad (4.9)$$

onde:

- V_{top} = velocidade no topo da edificação (m/s)
- $VAV(ad)$ = velocidade média num determinado andar (m/s)
- Z_{top} = altura no topo da edificação (m)
- Z_1, Z_2 = altura nas extremidades inferior e superior do andar (m)

Para edificações protegidas da ação do vento, utiliza-se a equação (4.7), na determinação dos coeficientes de pressão. Em caso contrário a equação (4.9) é empregada.

4.3.2.3. DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO RELATIVA ENTRE A DIREÇÃO DO VENTO E A SUPERFÍCIE

Cada superfície da edificação é caracterizada por um índice de acordo com sua orientação. Por convenção adotou-se, no algoritmo FLOW2, a superfície 1 como sendo aquela de maior comprimento mais próxima ao lado Sul.

O ângulo de ataque do vento, formado pela normal a superfície e pelo vetor indicando a direção do vento, é dado em função da superfície k , da edificação pela equação a seguir:

$$\theta_k = | 180 + WA_k - DIR | \quad (4.10)$$

onde:

θ_k = ângulo de ataque do vento na superfície k (graus)

WA_k = azimute de parede da superfície k (graus)

+ do Sul para o Norte na direção horária

- do Sul para o Norte na direção anti-horária

DIR = direção do vento (graus)

+ sentido horário a partir do Norte

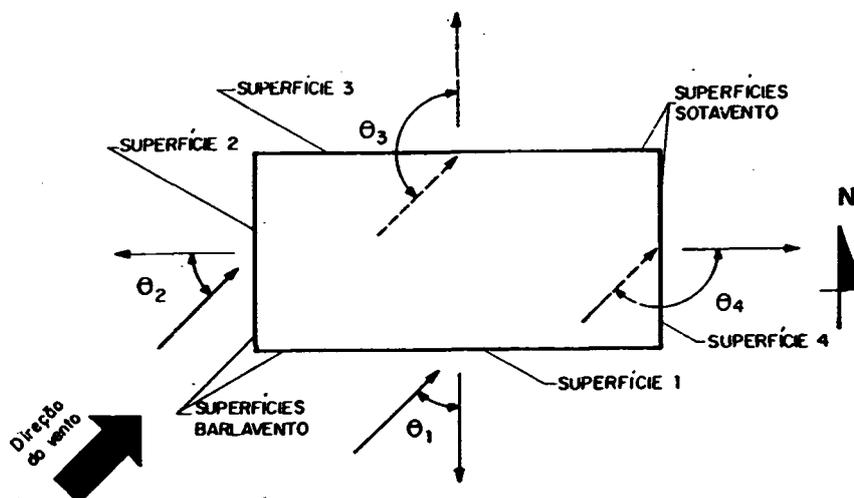


FIGURA 4.7- Indexação dos lados e formação do ângulo de ataque.

Quando o valor do ângulo de ataque, calculado pela equação (4.10) for maior do que 180 graus, torna-se necessário calcular o seu complemento, subtraindo-se o valor calculado de 360 graus.

Na Figura 4.7 exemplifica-se a indexação dos lados e a formação do ângulo de ataque.

4.3.2.4. DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE PRESSÃO

A maioria dos programas de infiltração/ventilação utiliza os coeficientes de pressão, para diferentes direções relativas do vento, especificados através de um conjunto de dados de entrada. O procedimento comum, nestes casos é selecionar estes coeficientes de normas técnicas, tais como a da referência [14]. Tais coeficientes são entretanto, adequados para o cálculo da força do vento em estruturas, representando assim apenas os valores máximos para cada face da edificação. Na prática, a distribuição de pressão em superfície não é uniforme. A diferença entre os valores médio e os extremos pode ser superior a 50 % no caso de superfícies barlavento [15]. Os coeficientes obtidos desta forma não são, portanto, adequados para serem utilizados em programas de infiltração/ventilação [6]. De acordo com Melo [8] o uso de dois diferentes processos, ambos baseados em estudos experimentais, em túnel de vento, oferece a melhor alternativa ao problema em questão.

O primeiro processo a ser apresentado baseia-se no método da análise harmônica descrito por Allen [15], e adequa-se a edificações simétricas e retangulares. Neste processo, os coeficientes de pressão, obtidos por Bowen [16] e por Akins et al. [17], foram analisados e concluiu-se que os mesmos poderiam

ser correlacionados através de uma série de Fourier, como indicado a seguir,

$$C_p(\theta_k) = a_0 + \sum_{m=1}^7 a_m \cos(m \theta_k) \quad (4.11)$$

Os coeficientes a_m são correlacionados através de uma série logarítmica da seguinte forma:

$$a_m = c_0 + c_1 \ln S + c_2 \ln^2 S + \dots + c_n \ln^n S \quad (4.12)$$

onde S é a relação entre o comprimento perpendicular a uma determinada superfície e sua largura. Os coeficientes C_n , são apresentados por Allen [15].

De acordo com Melo [9] a técnica harmónica, descrita anteriormente, adequa-se bem a edificações com pouca obstrução ao fluxo do vento. O processo sugerido por Allen [15], fornece coeficiente de pressão médios em toda uma face da edificação. Para edificações situadas em locais onde o vento não pode fluir livremente, devido à presença de obstruções nas vizinhanças, Melo [9], recomenda a utilização dos dados experimentais obtidos por Bowen [16].

Este segundo processo adequa-se a situações onde a altura média das estruturas adjacentes, H_a , está entre 16% e 100% da altura da edificação, H_b . Isto é,

$$\frac{1}{6} < \frac{H_a}{H_b} < 1 \quad (4.13)$$

Convém observar-se que, baseado nas medições de Bailey

e Vincent [18], a mínima distância para a qual o efeito das edificações adjacentes pode ser desprezado é de aproximadamente oito vezes a altura da edificação em estudo.

Bowen [16] realizou medições experimentais, em túnel de vento, colocando os modelos em uma área urbana simulada. O modelo estudado possuía uma proporção de 1/400 representando uma edificação de (30,5 x 45,7) m com altura variando de 91,4 m, 61,0 m, 30,5 m e 15,2 m.

Os valores dos coeficientes de pressão foram determinados em relação à velocidade do vento no topo da edificação. Cada coeficiente representa o valor médio ao longo da parede para uma altura particular acima do nível do solo, onde mediram-se as pressões. O experimento foi realizado para diferentes direções de vento e velocidades.

Baseado nos resultados experimentais, obtidos por Bowen [16], para um grau de proteção, $H_a/H_b=1/6$, e apresentados por Shaw [19], Melo [8] utilizou um processo de interpolação de Lagrange para avaliar os coeficientes de pressão. Para outros graus de proteção, Melo [8], utilizou um fator de correção α_{sh} sugerido por Shaw [19], e apresentado a seguir.

$$\alpha_{sh} = \frac{[Q_v]_{H_a/H_b}}{[Q_v]_{1/6}} = 1,15 \text{ EXP } [-0,85 H_a/H_b] \quad (4.14)$$

onde:

α_{sh} = fator de correção de Shaw

Q_v = taxa de trocas de ar devida ao vento (h^{-1})

Fazendo-se o expoente de fluxo n , igual a 0,65 (geralmente aceito para aberturas) e substituindo-se as equações (4.1) e (4.3) respectivamente na equação (4.14), Melo [8] obteve um fator de correção F , o qual pode ser aplicado diretamente sobre os coeficientes de pressão,

$$F = \frac{[C_p]_{Ha/Hb}}{[C_p]_{1/6}} = 1,2399 \text{ EXP } [-1,3077 \text{ Ha/Hb}] \quad (4.15)$$

Com o acesso a todos os dados experimentais obtidos por Bowen [16], desenvolveu-se um processo mais refinado para estimar os coeficientes de pressão. A Tabela 4.2 mostra a combinação de todas as variáveis utilizadas nos experimentos realizados por Bowen [16]. Para outros ângulos de ataque e relações de altura (Z/Z_{top}), utilizou-se um processo de regressão linear para avaliar-se os coeficientes de pressão. O grau de proteção Ha/Hb deve sempre ser escolhido em função de um dos quatro valores mostrados na Tabela 4.2.

Os resultados experimentais de Bowen foram obtidos, adotando-se uma única face como referência, sendo o ângulo de ataque na face 1, sempre menor ou igual a noventa (90) graus. Caso contrário, trocam-se os coeficientes da superfície 1 com os da superfície 3, adotando-se este último como o ângulo de ataque para leitura dos dados experimentais. Em seguida verifica-se o ângulo de ataque da superfície 2, o qual deverá ser maior que noventa (90) graus. Caso contrário trocam-se os valores dos coeficientes experimentais da superfície 2 com os da superfície 4. (Ver Figura 4.8)

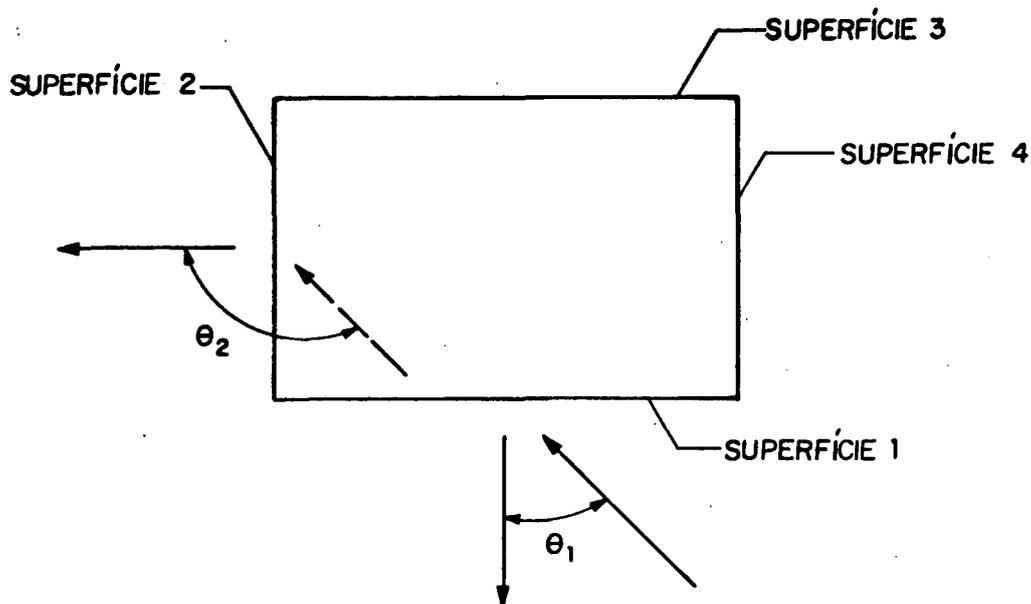


FIGURA 4.8 - Ângulo da ataque e indexação das superfícies de acordo com o processo baseado no trabalho de Bowen [16].

Em comparação à equação (4.15), o presente processo estima com maior exatidão tais coeficientes, conferindo assim maior confiabilidade aos cálculos.

4.3.2.5. AVALIAÇÃO DO PROCESSO SUGERIDO PELA ASHRAE PARA A AVALIAÇÃO DOS COEFICIENTES DE PRESSÃO

Em um recente trabalho patrocinado pela ASHRAE (American Society of Heating, Ventilation and Air Conditioning Engineers), Swami e Chandra [20], desenvolveram correlações para estimar os coeficientes de pressão em edificações. Tais correlações,

foram testadas, através de sua introdução no programa FLOW, com posterior comparação entre resultados experimentais e computacionais.

Como tal comparação revelou-se pior do que as comparações, anteriormente realizadas por Melo [8] e também devido à impossibilidade de tais correlações permitirem a avaliação dos coeficientes de pressão ao nível do teto, concluiu-se que o referido processo não contribui para aumentar o nível de confiança relacionado com a estimativa dos coeficientes de pressão.

TABELA 4.2- Parâmetros experimentais de Bowen [16], utilizados no cálculo de C_p .

MODELO DA EDIFICAÇÃO	H_a / H_b	FACE	ÂNGULO DE ATAQUE	Z / Z_{top}			
M	1/6	1	0°	0,083	0,250	0,417	0,583
			15°	0,683	0,750	0,850	0,917
				0,983	1,00		
N	1/4	2	30°	0,125	0,375	0,525	0,625
			45°	0,725	0,775	0,875	0,925
			60°	0,975	1,00		
O	1/2	3	75°	0,050	0,250	0,450	0,550
				0,750	0,850	0,950	1,00
P	1/1	4	90°	0,010	0,500	0,700	0,900
					1,00		

4.3.3. INFILTRAÇÃO-DE AR INDUZIDA PELA AÇÃO DO EFEITO CHAMINÉ

O efeito chaminé surge como resultado do diferencial de temperatura e conseqüentemente do diferencial de densidade entre o interior e o exterior da edificação. Isto cria uma diferença entre os gradientes de pressão do ar interno e externo, fazendo com que surja um diferencial de pressão vertical.

Quando a temperatura do ar interno for maior do que a do ar externo, o fluxo de ar entra através de aberturas situadas na parte mais baixa da edificação e sai através de aberturas situadas na parte mais alta (Figura 4.9-a). A direção do fluxo é reversa quando a temperatura do ar interno for menor do que a do ar externo (Fig. 4.9-b)

O nível, sobre o eixo vertical, onde a pressão interior se iguala com a pressão exterior é chamado de PLANO NEUTRO DE PRESSÃO ou ainda LINHA NEUTRA. A localização do plano neutro, na

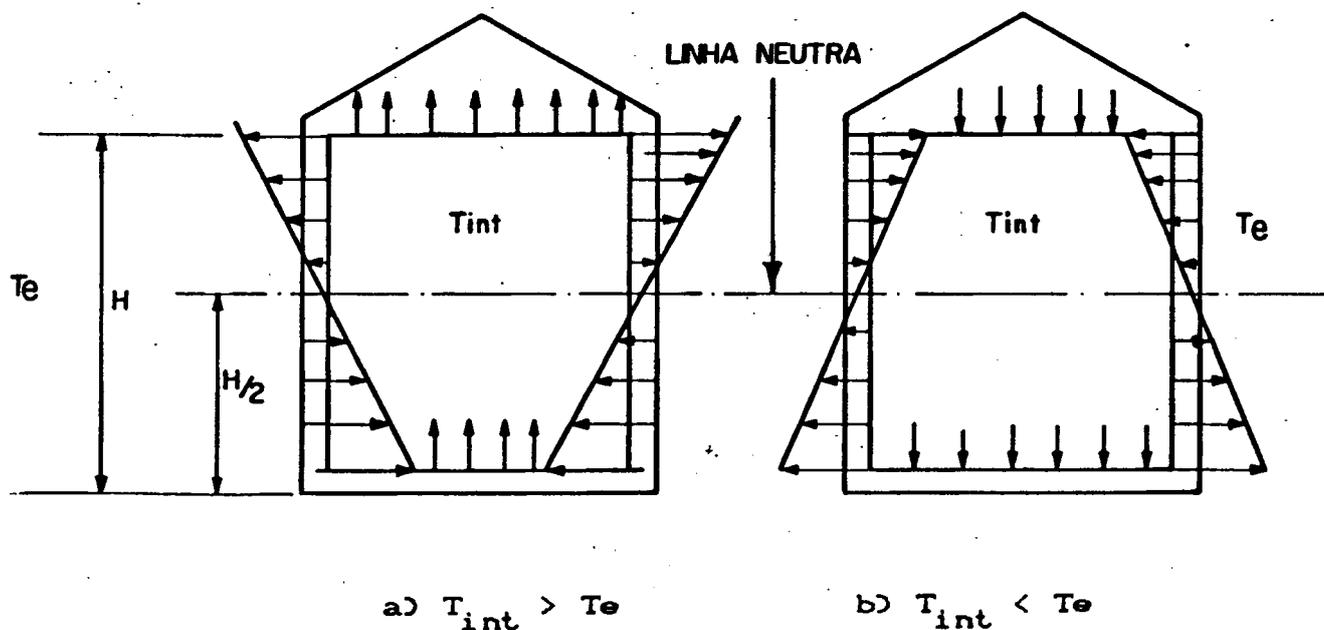


FIGURA 4.9- Diferenças de pressão induzidas por efeito chaminé.

ausência de vento, depende da distribuição de aberturas nas superfícies externas da edificação. Se esta distribuição for uniforme o plano neutro ficará localizado a meia altura da edificação, conforme indicado na Figura 4.9. Entretanto, se a passagem de ar for dominada por uma determinada abertura, o plano neutro ficará localizado mais próximo desta abertura. Na prática o nível do plano neutro é raramente conhecido com precisão.

O efeito chaminé é calculado, no programa FLOW2, sempre em relação ao nível da abertura mais baixa. Este procedimento faz com que os valores absolutos das pressões nas aberturas sejam diferentes dos valores reais, mas não afetem os diferenciais de pressão que continuarão com seus valores absolutos inalterados.

No estudo da infiltração de ar, as conseqüências e significados do efeito chaminé devem ser considerados para um número de configurações alternativas. Estas incluem:

- Distribuição de temperatura interna uniforme
- Edificações com zonas verticais isoladas
- Edificações nas quais zonas verticais interconectadas estão a diferentes temperaturas
- Edificações nas quais zonas horizontais interconectadas estão a diferentes temperaturas

4.3.3.1. DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA INTERNA UNIFORME

Para uma temperatura uniforme, a pressão do ar, P_2 , em qualquer altura, h_2 , relativa a um dado nível, h_1 , é dada por:

$$P_2 = P_1 - \rho g (h_2 - h_1) \quad (4.16)$$

onde:

P_1 = pressão no nível h_1 (Pa)

g = aceleração local da gravidade (m/s^2)

Para efeito de apresentação da equação para cálculo do diferencial de pressão criado pelo efeito chaminé, P_c , considerar-se-á uma edificação com apenas duas aberturas, de acôrdo com a Figura 4.10.

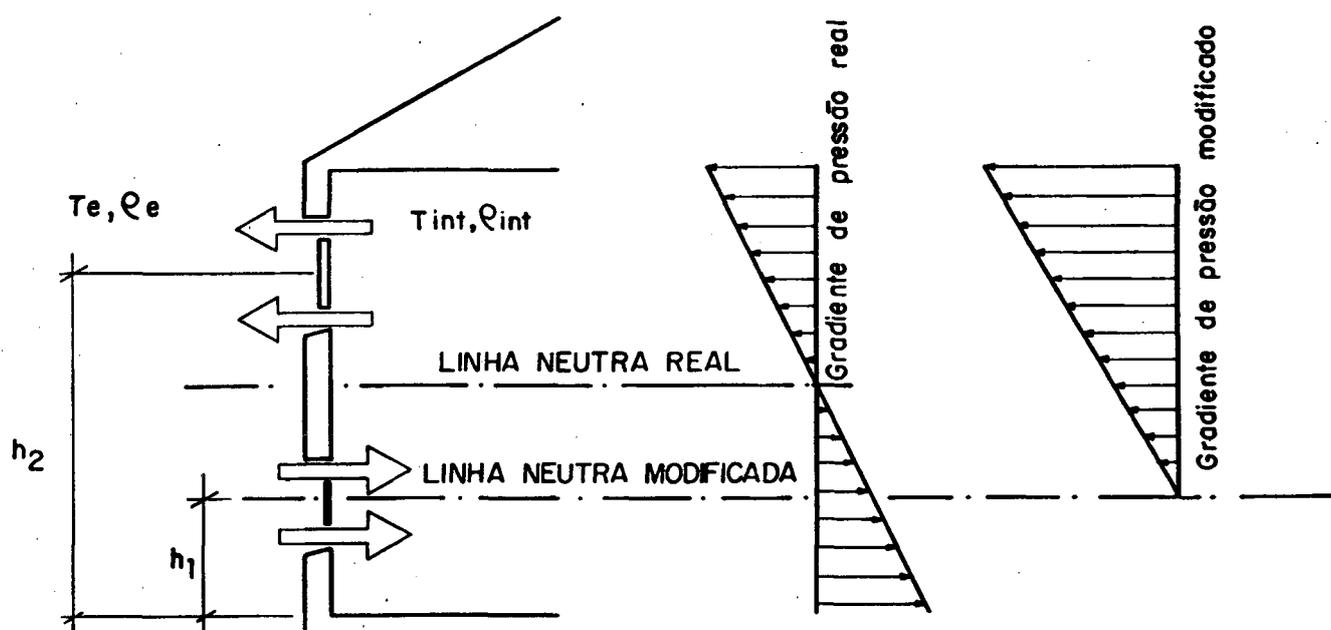


FIGURA 4.10- Linha neutra real e linha neutra modificada

($T_{int} > T_e$).

Considerando-se que numa altura qualquer,

$$P_c = P_e - P_{int} \quad (4.17)$$

e, admitindo-se h_1 , como a altura do plano de referência, obtém-se a equação a seguir, para uma altura h_2 , a partir das equações (4.16) e (4.17):

$$P_c = \left\{ -\left[\rho_e g (h_2 - h_1)\right] + \left[\rho_{int} g (h_2 - h_1)\right] \right\} \quad (4.18)$$

Admitindo-se o ar como um gás perfeito, tem-se:

$$T_e = P_b / \rho_e \cdot R \quad (4.19)$$

$$\rho_{int} = \rho_e T_e / T_{int} \quad (4.20)$$

onde P_b é a pressão atmosférica, R é a constante dos gases perfeitos para o ar seco, e os subscritos, int e e, referem-se respectivamente ao ar interno e externo.

Substituindo-se a equação (4.20) na equação (4.18) e reagrupando-se, tem-se:

$$P_c = -\rho_e g (h_2 - h_1) T_e \left[\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_{int}} \right] \quad (4.21)$$

A equação (4.22) pode então ser obtida a partir da introdução da equação (4.19) na equação (4.21).

$$P_c = \frac{-g}{R} P_b (h_2 - h_1) \left[\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_{int}} \right] \quad (4.22)$$

Substituindo-se os valores numéricos da aceleração da gravidade, g , e da constante do gás para o ar seco, R , obtém-se:

$$P_c = -0,0342 P_b (h_2 - h_1) \left[\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_{int}} \right] \quad (4.23)$$

A equação acima implica que não exista nenhuma resistência ao movimento de ar no interior da edificação.

Para edificações que apresentem, alguma restrição ao

movimento do ar, a equação acima deve ser corrigida através da multiplicação por um coeficiente de correção que pode variar entre os valores de 0 a 1. Quando não existe nenhuma restrição para o movimento do ar, tal coeficiente assume o valor da unidade. De acordo com os trabalhos experimentais de Tamura e Wilson [21], em edificações comerciais, tal valor varia entre 0,65 a 0,88.

4.3.3.2. EDIFICAÇÕES COM ZONAS VERTICAIS ISOLADAS

Neste caso, cada zona possui seu próprio plano de pressão neutro, sendo assim possível calcular a distribuição de pressão devida ao efeito chaminé sem referência às zonas adjacentes. Ver ilustração na Figura 4.11.

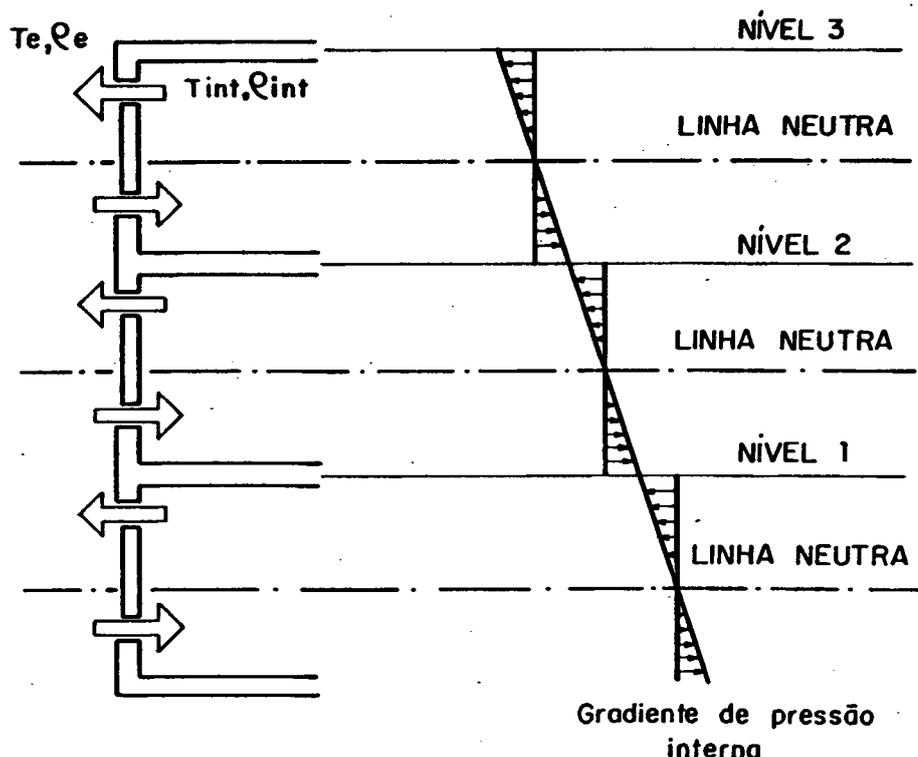


FIGURA 4.11- Gradiente de pressão devido ao efeito chaminé em edificações com zonas verticais isoladas.

4.3.3.3. EDIFICAÇÕES NAS QUAIS ZONAS VERTICAIS INTERCONECTADAS ESTÃO A DIFERENTES TEMPERATURAS

Neste caso a diferença de pressão resultante, devida ao efeito chaminé, é calculada de uma maneira similar aos itens anteriores, exceto que o gradiente de pressão varia em cada zona, de acordo com a variação da temperatura do ar na zona. (ver Figura 4.12)

Por exemplo, o gradiente de pressão em h_2 com respeito a h_1 é dado por,

$$P_c = -0,0342 P_b \left\{ [L_1 - h_1] \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_e} \right] + [h_2 - L_1] \left[\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_e} \right] \right\} \quad (4.24)$$

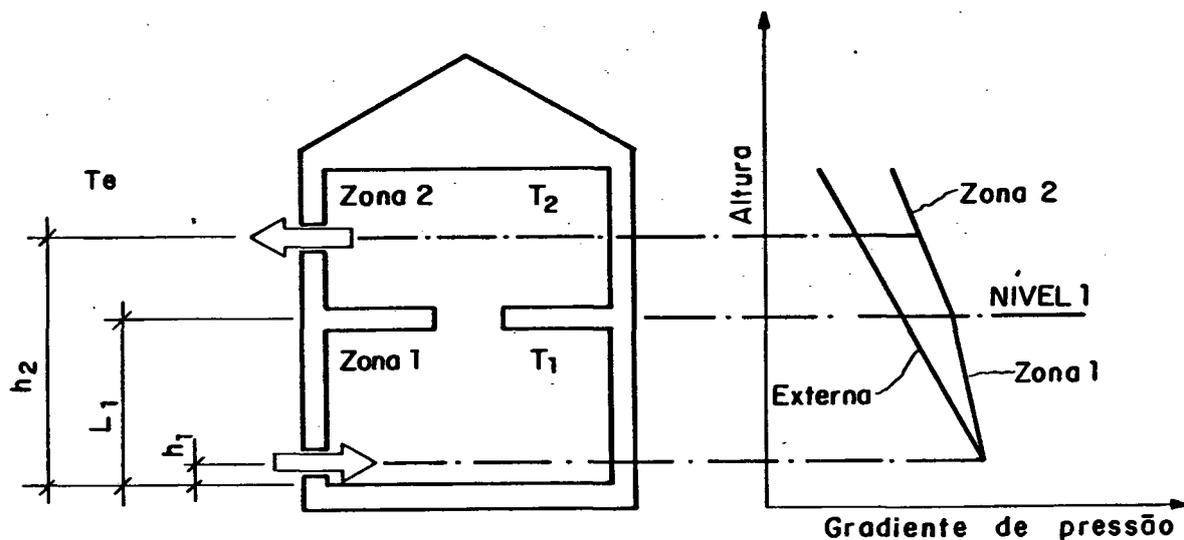


FIGURA 4.12- Gradiente de pressão devido ao efeito chaminé para edificações com zonas verticais interconectadas, e a diferentes temperaturas.

4.3.3.4. EDIFICAÇÕES NAS QUAIS ZONAS HORIZONTAIS INTERCONECTADAS ESTÃO A DIFERENTES TEMPERATURAS

O mesmo procedimento é, também, utilizado neste caso, sendo, por exemplo a diferença de pressão resultante, na altura h_5 , entre as zonas 1 e 4, relativa a um dado nível, h_1 (ver Figura 4.13) é dado por:

$$P_c = -0,0342 P_b (h_5 - h_1) \left[\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right] \quad (4.25)$$

onde:

T_2 = temperatura em cada uma das zonas verticais

T_1 = temperatura da zona 1

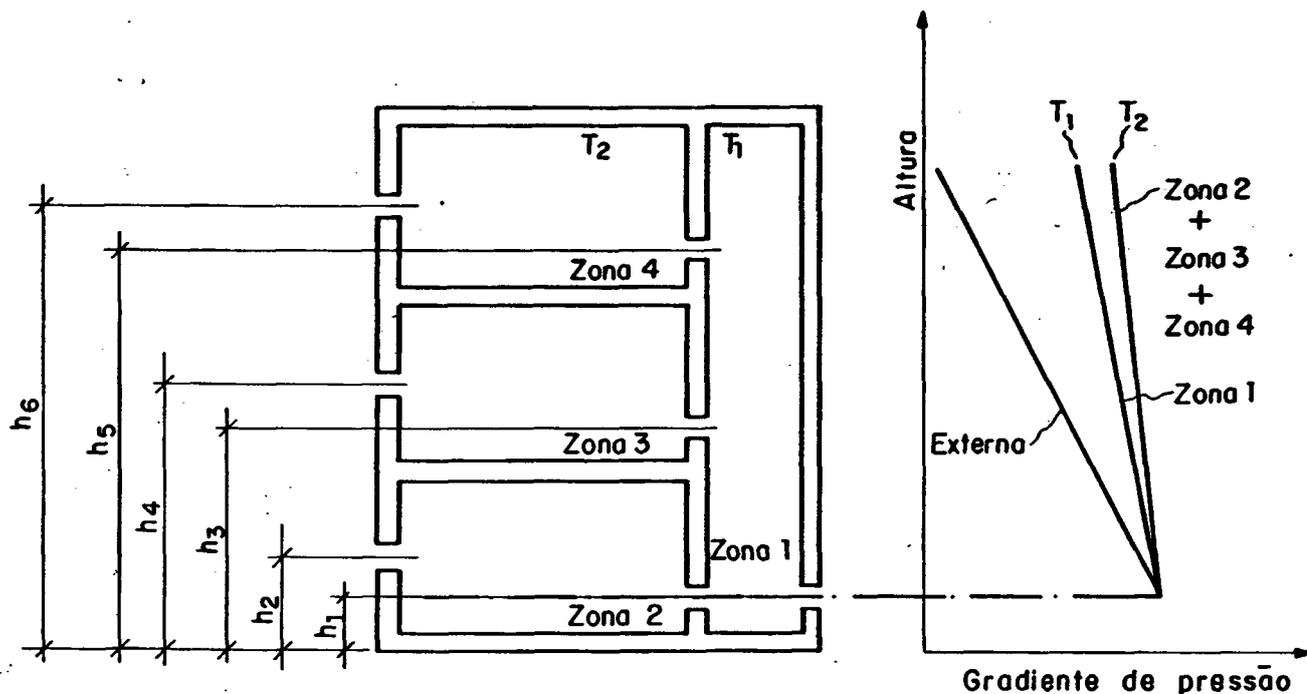


FIGURA 4.13- Gradiente de pressão devido ao efeito chaminé, para zonas dispostas horizontalmente e a diferentes temperaturas.

4.3.4. AÇÃO COMBINADA DO VENTO E DO DIFERENCIAL DE TEMPERATURA

Apesar dos efeitos do vento e do efeito chaminé terem sido considerados separadamente, as edificações, em geral, estão sujeitas simultaneamente a ambos os efeitos. As vazões de ar calculadas separadamente, devido ao efeito do vento e do efeito chaminé, não podem ser somadas diretamente para obter-se a taxa de infiltração de ar. A diferença de pressão resultante sobre a parede da edificação, em qualquer nível, pode, por outro lado, ser aproximada pela soma algébrica da diferença de pressão devido aos efeitos do vento e do efeito chaminé [2]. Assim a pressão resultante em cada abertura pode ser dada por:

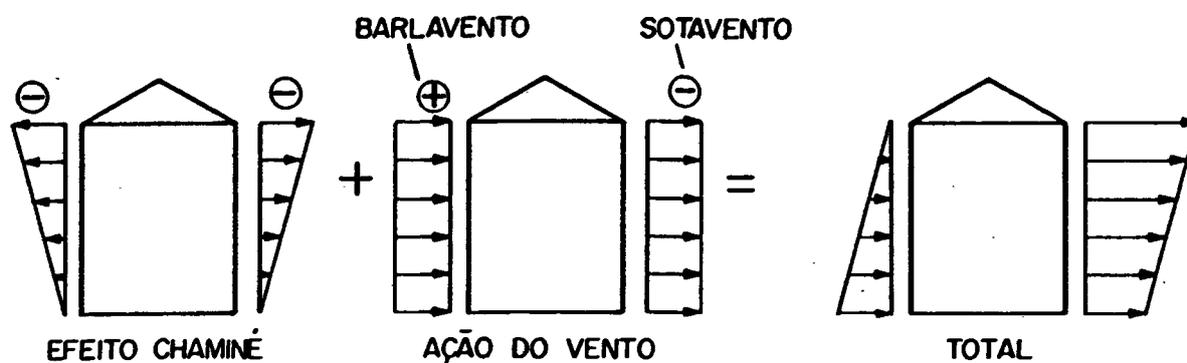
$$P_t = P_v + P_c + P_b \quad (4.26)$$

As pressões externas atuando sobre as paredes da edificação são consideradas qualitativamente, nas Figuras 4.14-a e 4.14-b, para uma edificação com distribuição uniforme de aberturas e sem significantes resistências internas ao fluxo de ar. Utiliza-se como referência para cálculo da pressão devido ao efeito chaminé, o nível da abertura mais baixa.

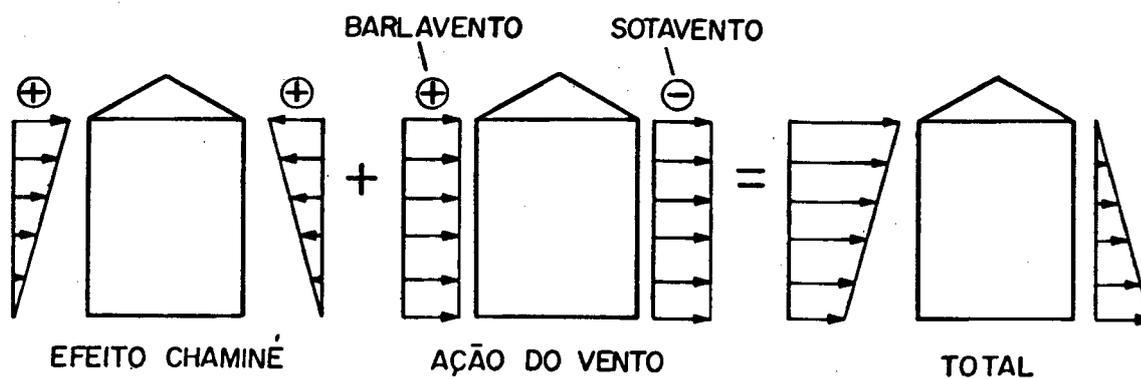
Conforme citado anteriormente o valor da pressão resultante é relativo ao nível de referência empregado, mas quando a mesma é subtraída da pressão interna, também relativa, o diferencial de pressão obtido terá o valor absoluto correto.

4.3.5. CÁLCULO DAS PRESSÕES INTERNAS

Um conceito fundamental na análise de processos de infiltração/ventilação de ar é que o ar que entra numa zona



a) Diferencial de pressão total ($T_{int} > T_e$)



b) Diferencial de pressão total ($T_{int} < T_e$)

FIGURA 4.14- Pressão externa atuando sobre as paredes de uma edificação devida ao efeito simultâneo do vento e do efeito chaminé.

desloca uma massa equivalente de ar interno para fora da mesma. Em resumo, a equação da continuidade deve ser satisfeita.

Para uma edificação com, l , passagens de ar, numa única zona, tem-se:

$$\sum_{i=1}^l \rho_i Q_i = 0 \quad (4.27)$$

onde, ρ_i , é a densidade do ar fluindo através da i -ésima passagem de ar e, Q_i , é a vazão na i -ésima passagem de ar.

A densidade do ar de infiltração, depende das condições do ar externo, enquanto que a densidade do ar de exfiltração depende das condições do ar interno. Para diferenças de temperatura, entre o ar interno e o externo, inferiores a 20°C , ρ_i pode ser simplificado da equação (4.27), já que a diferença de densidade resultante é desprezível em relação ao valor da densidade do ar [2]. Assim:

$$\sum_{i=1}^l Q_i = 0 \quad (4.28)$$

ou, de acordo com a equação (4.1),

$$\sum_{i=1}^l \pm C_{ij} |P_i - P_j|^{n_{ij}} = 0 \quad (4.29)$$

onde, l , representa o número total de passagens de ar para a zona J .

Para verificar-se o sinal da equação (4.29), o algoritmo FLOW2 compara os valores de pressão resultante em cada lado, de

cada passagem de ar, convencionando-se o seguinte:

- + \rightarrow infiltração ou movimento de ar para dentro da zona
- \rightarrow exfiltração ou movimento de ar para fora da zona

Para edificações com múltiplas-zonas, obtém-se uma equação de balanço de massa para cada zona, as quais estão interrelacionadas pelas pressões das zonas vizinhas. Conseqüentemente, precisa-se resolver simultaneamente um conjunto de equações não-lineares.

Como exemplo, considere-se a Figura 4.15.

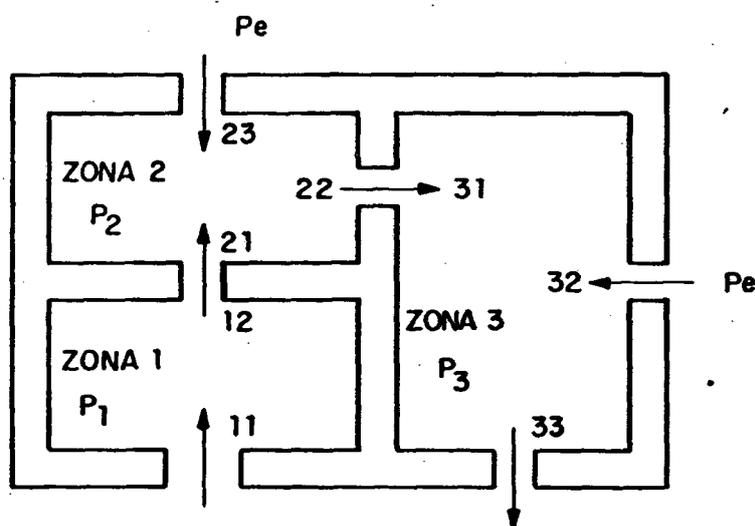


FIGURA 4.15- Aplicação da equação (4.29) a uma edificação com zonas múltiplas.

Escrevendo-se as equações de balanço de massa para cada zona desta edificação, obtém-se:

$$m_{11} + m_{12} = 0 \quad (4.30)$$

$$m_{21} + m_{22} + m_{23} = 0 \quad (4.31)$$

$$m_{31} + m_{32} + m_{33} = 0 \quad (4.32)$$

reescrevendo-se de outra forma, obtém-se:

$$B_1 = C_{11} |P_e - P_1|^n - C_{12} |P_2 - P_1|^n \quad (4.33)$$

$$B_2 = C_{21} |P_1 - P_2|^n - C_{22} |P_3 - P_2|^n + C_{23} |P_e - P_2|^n \quad (4.34)$$

$$B_3 = C_{31} |P_2 - P_3|^n + C_{32} |P_e - P_3|^n - C_{33} |P_e - P_3|^n \quad (4.35)$$

Para resolver-se tal sistema de equações, o programa FLOW2 utiliza-se do método iterativo de NEWTON-RAPHSON para múltiplas equações e incógnitas [22] (ver apêndice B). Isto faz com que as pressões internas em cada zona sejam progressivamente ajustadas até que o somatório das vazões de ar em cada zona seja menor do que um valor residual especificado.

Para simular-se edificações com muitas zonas e passagens de ar necessita-se otimizar o processo de solução do sistema de equações como forma de diminuir o tempo de computação (C.P.U.) necessário e de reduzir os requisitos de memória do computador. Para tanto utilizou-se a técnica da matriz esparsa, descrita por Stoecker [22]. Tal técnica é mostrada com detalhes no apêndice C.

Quando a solução do sistema de equações é obtido e, conseqüentemente, as pressões internas de cada zona são determinadas, pode-se, através da equação (4.1), obter-se o fluxo

de ar através de cada passagem.

A vazão de ar entrando ou saindo de cada zona é dada então pelas equações (4.36) ou (4.37), expressando-se tal vazão em m^3/s ou trocas de ar por hora, respectivamente.

$$Q(j) = \sum_{i=1}^{\ell} Q_i \quad (\text{para } Q_i > 0) \quad (4.36)$$

$$NC(j) = \frac{3.600 \ Q(j)}{V(j)} \quad (4.37)$$

onde:

$NC(j)$ = Taxa de trocas de ar na j -ésima zona (h^{-1})

$V(j)$ = Volume da j -ésima zona (m^3)

4.3.6. EFEITOS DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO MECÂNICA

A ventilação mecânica pode ser analisada em termos da vazão de ar fornecida ou extraída por ventiladores e dutos e da conseqüente variação de pressão interna.

No programa FLOW2 o efeito da pressão devido ao sistema de ventilação mecânica é calculado internamente. Em cada zona onde o sistema de ventilação mecânica está presente adiciona-se/subtrai-se na equação da continuidade, a massa de ar fornecida/extraída mecanicamente. Assim,

$$Q(j) + Q_{vm}(j) = 0 \quad (4.38)$$

onde, $Q_{vm}(j)$ corresponde à vazão de ar relacionada com o sistema de ventilação mecânica na j -ésima zona.

4.4. ADEQUAÇÃO DO PROGRAMA PARA SIMULAR PROCESSOS DE VENTILAÇÃO NATURAL

As equações apresentadas até o presente momento adequam-se principalmente à determinação da infiltração de ar em edificações, isto é, são adequadas para casos onde a passagem de ar ocorre através de orifícios e frestas. Como forma de possibilitar o programa simular processos de ventilação natural, onde são comuns a presença de aberturas de tamanho considerável, tornam-se necessárias as modificações a seguir.

4.4.1. EQUAÇÃO DA VAZÃO

Para grandes aberturas, do tipo empregado em processos de ventilação natural, o escoamento do ar tende a ser turbulento e pode ser melhor representado pela equação a seguir [2].

$$Q = C_d A \left[\frac{\Delta P}{\rho / 2} \right]^{0,5} \quad (4.39)$$

onde:

C_d = coeficiente de descarga

A = área da abertura (m^2)

Pode-se definir o produto da área da abertura, A , pelo coeficiente de descarga, C_d , como a área efetiva de fuga. O coeficiente de descarga é característico de cada tipo de

abertura. No Apêndice D, listam-se valores de C_d para os tipos de aberturas mais comuns. Assim,

$$A_{ef} = C_d A \quad (4.40)$$

Admitindo-se que $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$, e substituindo-se na equação (4.39), obtém-se:

$$Q = \frac{C_d A}{0,7745967} [\Delta P]^{0,5} \quad (4.41)$$

Multiplicando-se a equação (4.41) por 3.600, como forma de obter-se a vazão em m^3/h , obtém-se:

$$Q = 4.647,58 C_d A [\Delta P]^{0,5} \quad (4.42)$$

Comparando-se a equação (4.42) com a equação (4.1), observa-se que:

$$C = 4.647,58 C_d A \quad (4.43)$$

$$n = 0,5 \quad (4.44)$$

Portanto basta alterar-se os dados de entrada do programa calculando-se o valor de C , pela equação (4.43) e adotando-se o valor de, n , como sendo igual a 0,5. Com os valores de, C e n , assim calculados, utiliza-se a mesma estrutura computacional desenvolvida para o estudo de infiltração, e torna-se possível a simulação de processos de ventilação natural em edificações.

4.4.2. ABERTURAS COM ALTURA ELEVADA

Aberturas com alturas elevada tais como, uma porta, de carga e descarga de um galpão industrial, requerem atenção especial pois podem conter o plano de pressão neutro [2]. Não se pode simplesmente, assumir que o sentido do fluxo seja unidirecional (Fig. 4.16), uma vez que este tipo de representação seria inapropriada.

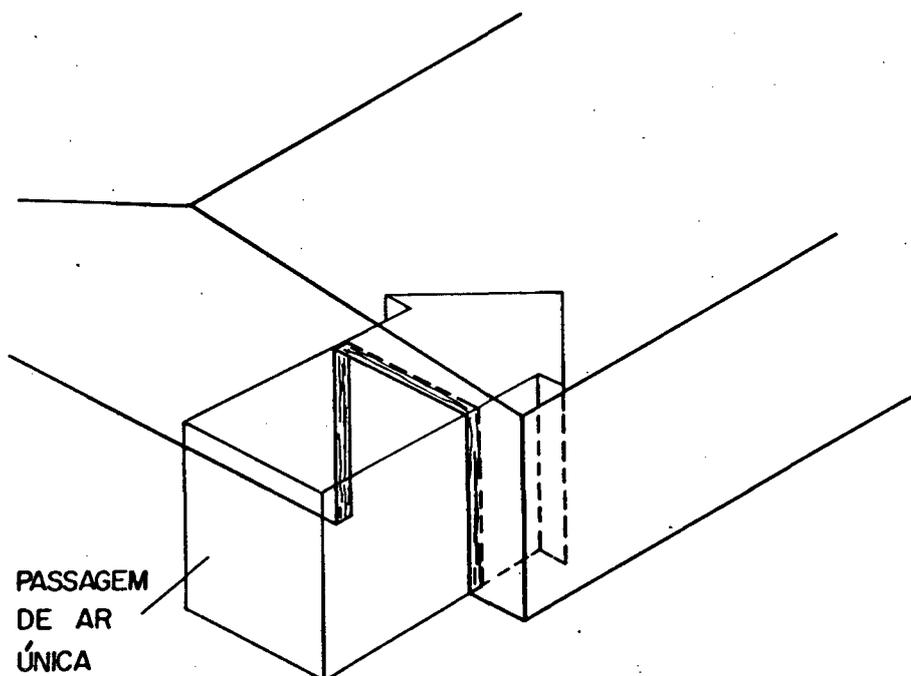


FIGURA 4.16- Passagem de ar única em uma abertura com altura elevada.

Uma solução conveniente é reescrever-se a equação (4.42) da seguinte forma,

$$Q_x = 4.647,58 \text{ Cd Ax } [\Delta P]^{0,5} \quad (4.45)$$

onde:

Q_x = fluxo de ar através de uma faixa horizontal da porta
(m^3/h)

A_x = área da seção transversal do fluxo de ar (m^2)

A equação (4.45) é então aplicada a cada faixa horizontal (passagem de ar) da seção transversal da porta, sendo cada uma tratada isoladamente, como se fosse uma abertura única (ver figura 4.17).

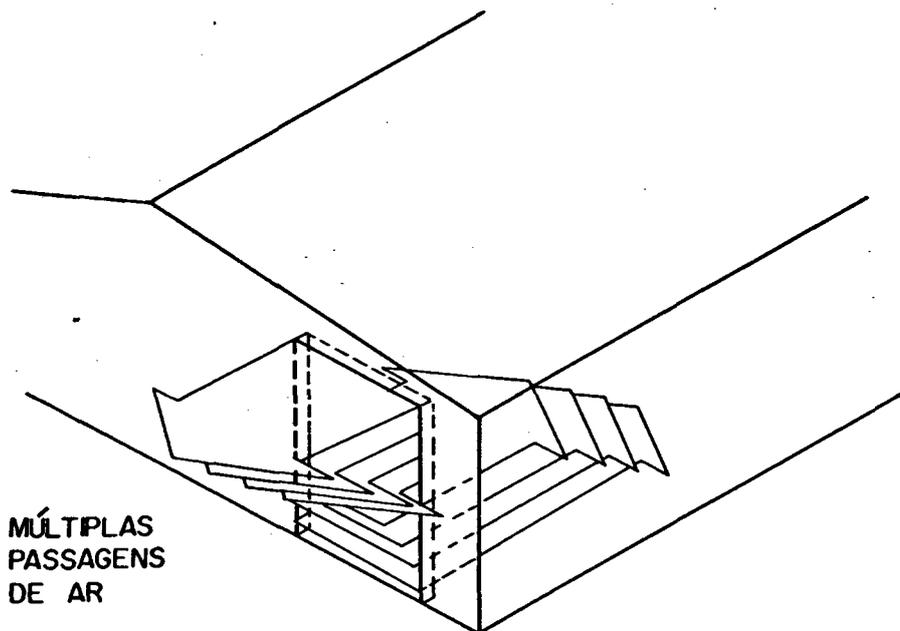


FIGURA 4.17- Múltiplas passagens de ar em uma abertura com altura elevada.

4.4.3. ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA LINEAR

Tal fenômeno é normalmente encontrado em grandes edificações industriais, onde o ar quente eleva-se para o teto, resultando numa estratificação térmica. Como a densidade do ar é uma função da temperatura, um gradiente de pressão interno não linear é criado.

Para esta condição a equação (4.16) deve ser reescrita para levar em consideração a dependência da densidade com a altura, na forma que se segue.

$$P_2 = P_1 - g \int_{h_1}^{h_2} \rho(h) dh \quad (4.46)$$

onde:

$\rho(h)$ = densidade do ar na altura h (kg/m³)

h = altura qualquer da edificação (m)

dh = intervalo de variação de altura da edificação (m)

considerando-se o ar como um gás perfeito tem-se:

$$\frac{\rho(h)}{\rho_{int}} = \frac{T_{int}}{T(h)} \quad (4.47)$$

substituindo a equação (4.47) em (4.46), obtém-se:

$$P_2 = P_1 - g \cdot \rho_{int} T_{int} \int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{T(h)} dh \quad (4.48)$$

substituindo-se a equação dos gases perfeitos na equação (4.48), obtém-se,

$$P_2 = P_1 - 0,0342 P_b \int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{T(h)} dh \quad (4.49)$$

A equação (4.49) pode ser empregada para qualquer função de T em relação a h . Para este estudo, em particular, assumir-se-á uma dependência linear da temperatura com a altura, ou seja,

$$T(h) = w h + T_{h_1} \quad (4.50)$$

onde:

w = gradiente de temperatura (K/m)

T_{h_1} = temperatura na altura de referência (K)

substituindo-se a equação (4.50) na equação (4.49) obtém-se,

$$P_2 = P_1 - 0,0342 P_b \left[\int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{(w h + T_{h_1})} \right] \quad (4.51)$$

resolvendo-se a integral por substituição, entre dois limites h_1 e h_2 , obtém-se,

$$P_{int} = P_2 = P_1 - 0,0342 \frac{P_b}{w} \left[\text{Ln} \frac{[w h_2 + T_{h_1}]}{[w h_1 + T_{h_1}]} \right] \quad (4.52)$$

Sabe-se que, externamente a pressão varia segundo a equação a seguir,

$$P_e = P_1 - \rho_e g (h_2 - h_1) \quad (4.53)$$

substituindo-se a equação (4.19) na equação (4.53), obtém-se,

$$P_e = P_1 - 0,0342 P_b \frac{1}{T_e} (h_2 - h_1) \quad (4.54)$$

Portanto a pressão resultante devida ao efeito chaminé, na altura h_2 , com relação à altura de referência h_1 , na presença de um perfil linear interno de temperatura é,

$$P_c = P_e - P_{int} \quad (4.55)$$

Substituindo-se as equações (4.52) e (4.54) na equação (4.55), obtém-se,

$$P_c = -0,0342 P_b \left\{ \frac{(h_2 - h_1)}{T_e} - \frac{1}{w} \ln \left[\frac{(c_w h_2 + T_{h_2})}{(c_w h_1 + T_{h_1})} \right] \right\} \quad (4.56)$$

5. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

5.1. INTRODUÇÃO

Uma parte importante no desenvolvimento de qualquer modelo é determinar-se os limites de sua exatidão por comparação com medições experimentais.

Dados para este tipo de comparação, correspondentes a edificações residenciais com pouca, média e bastante proteção, a ação do vento são apresentados por Liddament e Allen [6].

Para efeito de comparação, seguindo-se as recomendações do A.I.V.C., as taxas calculadas pelo modelo computacional, serão consideradas satisfatórias [6], se estiverem dentro de uma faixa de $\pm 25\%$ das taxas de infiltração medidas. Este critério de erro foi derivado com base nos possíveis erros resultantes das medições experimentais.

5.2. COMPARAÇÃO COM DADOS EXPERIMENTAIS

Todos os dados experimentais foram obtidos em edificações consideradas zona única, não existindo na bibliografia especializada até o momento um conjunto de dados experimentais confiável para edificações zonas múltiplas.

As principais características de cada edificação que serviu para validação do modelo numérico [9] e os resultados encontrados são descritos a seguir.

5.2.1. MAUGWILL HOUSE

Trata-se de uma residência, situada na Suíça, em local onde existe pouca obstrução à ação do vento. Os dados fornecidos de vazamento, característicos de janelas e portas foram usados diretamente, enquanto que a diferença entre o vazamento total dos componentes e o vazamento total da edificação foi considerada como ocorrendo ao longo das extremidades entre a junção telhado/parede.

Considerou-se a posição de tomada da velocidade do vento como sendo feita a 10 m de altura na direção Oeste. Os coeficientes de pressão foram calculados usando-se, o método da análise harmônica, já que a edificação em questão, situa-se em uma área onde o vento pode escoar livremente.

Devido a esta edificação estar situada a 600 m de altura, acima do nível do mar, a pressão atmosférica foi tomada como sendo igual a $0,94 \times 10^5$ Pa.

As passagens de ar, para esta edificação são mostradas na Figura 5.1 e as correspondentes características de vazamento, para cada passagem de ar, são apresentadas na Tabela 5.1. Nas passagens de ar 14,15, e 16, considera-se somente o efeito chaminé, desprezando-se assim os efeitos do vento, devido a proteções existentes na parte externa da edificação.

A edificação é considerada sem divisões internas como forma a aproximar-se de uma modelação zona única. Adotou-se como volume efetivo, para a determinação dos valores das taxas de infiltração, como sendo o somatório dos valores das salas onde foram realizadas as medições ($306,0 \text{ m}^3$).

Na Tabela 5.2 e Figura 5.2, mostram-se as comparações entre os resultados obtidos, utilizando-se o programa FLOW2, e os

resultados experimentais. Conforme pode-se verificar, uma boa concordância foi encontrada, estando 83% dos valores computacionais dentro da faixa de $\pm 25\%$ das medições.

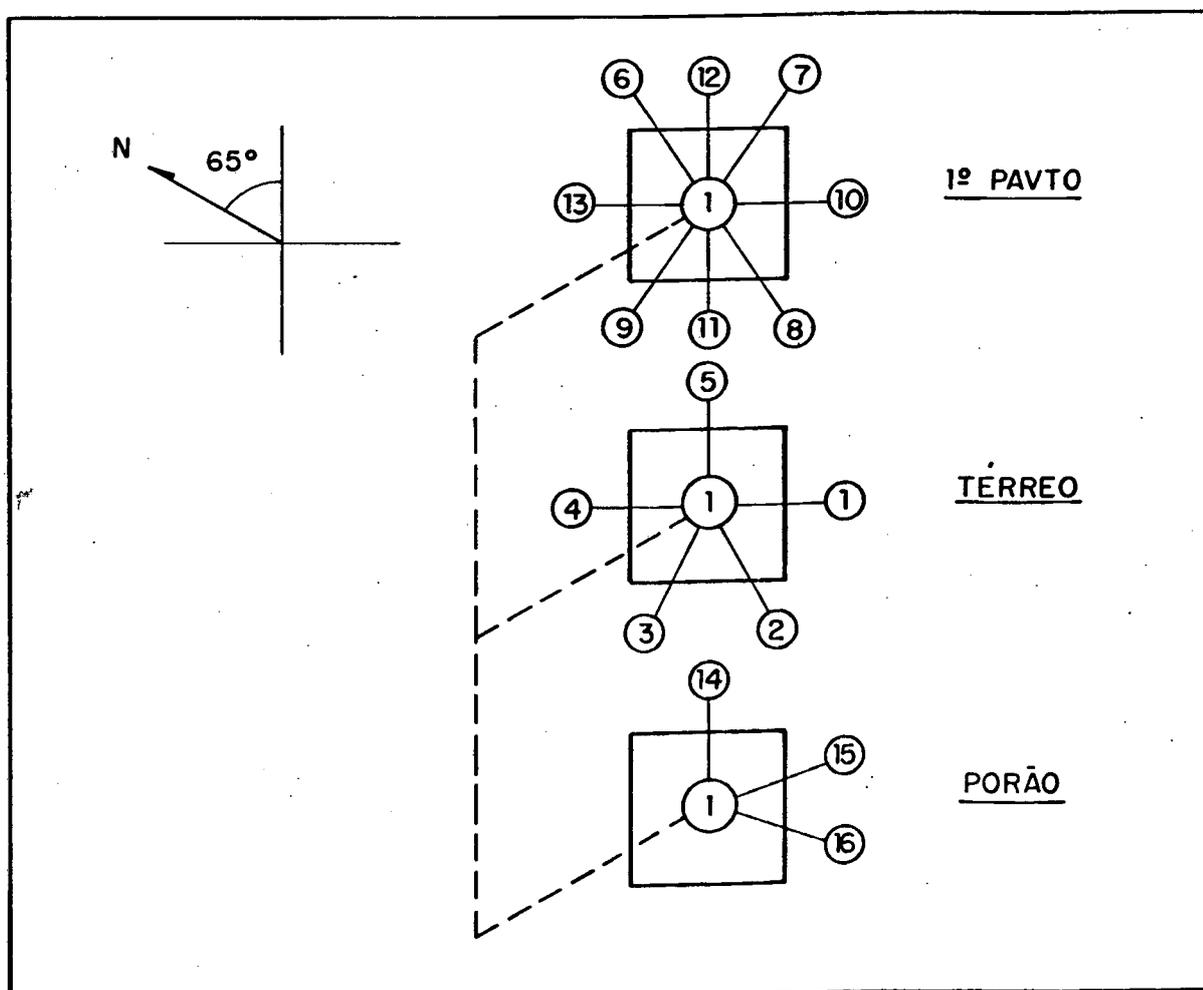


FIGURA 5.1- Passagens de ar (MAUGWILL HOUSE).

TABELA 5.1- Características de fluxo de cada passagem de ar
(MAUGWILL HOUSE).

ZONA	PASSAGEM DE AR	DESCRIÇÃO DA FUGA	C	n	H
1	1	janela sala de jantar	0,157	0,67	4,00
1	2	porta sala de estar	0,296	0,67	3,50
1	3	porta de estúdio	0,542	0,67	3,50
1	4	janela corredor	2,400	0,67	4,20
1	5	janela cozinha	0,352	0,67	4,10
1	6	janela banheiro	0,298	0,67	6,60
1	7	janela quarto E	0,299	0,67	6,60
1	8	janela suite	0,246	0,67	6,10
1	9	janela quarto O	0,249	0,67	6,10
1	10	calha S	7,310	0,67	5,00
1	11	cumeeira/telhado W	9,470	0,67	7,50
1	12	cumeeira/telhado E	9,470	0,67	7,50
1	13	calha N	7,310	0,67	5,00
1	14	WC	0,089	0,67	2,00
1	15	porta frente	5,400	0,50	0,70
1	16	janela quarto aquecedor	0,216	0,67	1,70

TABELA 5.2- Comparação entre resultados computacionais e experimentais (MAUGWILL HOUSE).

Nº TESTE	V (m/s)	DIR	T _e (°C)	T _{int} (°C)	N _{exp}	N _{flow2}	ERRO (%)
1	5,96	W	8,9	20,9	0,266	0,249	6,4
2	6,33	W	9,0	20,9	0,258	0,269	4,2
3	5,21	W	10,6	19,9	0,200	0,208	4,0
4	4,48	W	9,8	19,6	0,200	0,173	13,5
5	3,71	W	8,6	19,4	0,201	0,138	31,3
6	5,92	W	9,1	19,3	0,250	0,246	1,6
7	9,54	W	12,0	19,2	0,351	0,449	27,9
8	10,23	W	11,3	19,6	0,405	0,493	21,7
9	8,06	W	8,7	20,2	0,392	0,365	6,9
10	8,24	W	7,2	20,4	0,326	0,378	16,0
11	7,52	W	6,7	20,5	0,319	0,337	5,6
12	7,29	W	5,1	20,5	0,413	0,326	21,1
13	7,41	W	4,5	20,5	0,399	0,333	16,5
14	7,32	NW	4,4	19,9	0,395	0,349	11,6
15	6,13	W	3,5	18,9	0,315	0,263	16,5
16	5,72	W	3,5	18,8	0,353	0,241	31,7
17	5,50	W	3,3	18,6	0,274	0,229	16,4
18	5,75	NW	3,0	19,0	0,324	0,264	18,5

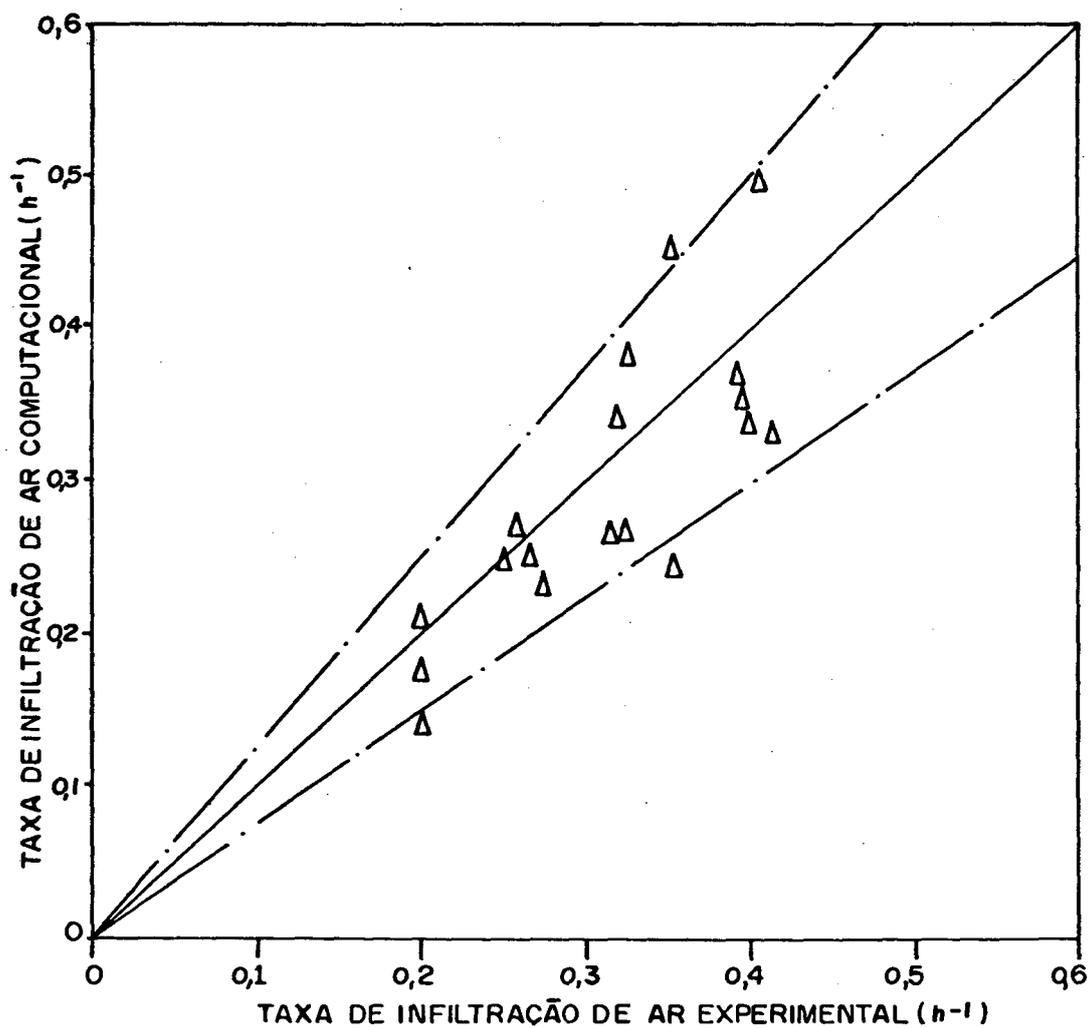


FIGURA 5.2- Comparação entre resultados computacionais e experimentais (MAUGWILL HOUSE).

5.2.2. HUDAC HOUSE

Neste caso, a distribuição dos pontos de vazamento baseou-se na hipótese de distribuição uniforme de fendas ao redor da edificação. Deste modo, o coeficiente de vazão de cada face é uma função direta da área, e é representada como, uma fenda equivalente, localizada no meio da face.

De acordo com as informações sobre o experimento, adotou-se a posição de tomada da velocidade do vento como ocorrendo a 18 m de altura, e próximo à edificação em consideração. Os coeficientes de pressão foram determinados interpolando-se os dados experimentais fornecidos por Bowen [16].

A edificação foi considerada parcialmente protegida, conforme mostra-se na Tabela 5.3.

TABELA 5.3 - Relação de proteção conforme orientação do vento (HUDAC HOUSE)

ORIENTAÇÃO DA PAREDE	RELAÇÃO DE PROTEÇÃO
N, NW, W, NE	$H_a/H_b = 1/6$
S	$H_a/H_b = 1/2$
E	$H_a/H_b = 1/1$

As passagens de ar, para esta edificação, são mostradas na Figura 5.3. e as correspondentes características de vazamentos, para cada passagem de ar, são apresentadas na Tabela 5.4. Na passagem de ar 2, desprezou-se o efeito do vento devido à mesma estar localizada no interior de uma garagem.

Do mesmo modo que o caso anterior, a edificação foi

modelada considerando-se a existência de uma zona única,

A Tabela 5.5 e a Figura 5.4. mostram comparações entre resultados computacionais e experimentais. Conforme pode ser observado 32 dos 49 valores (65 %), encontram-se dentro da faixa de $\pm 25\%$ dos valores experimentais. Os erros maiores apareceram no verão onde as taxas de infiltração são muito pequenas, ocasionando desvios maiores, tanto nas medições experimentais quanto na abordagem computacional.

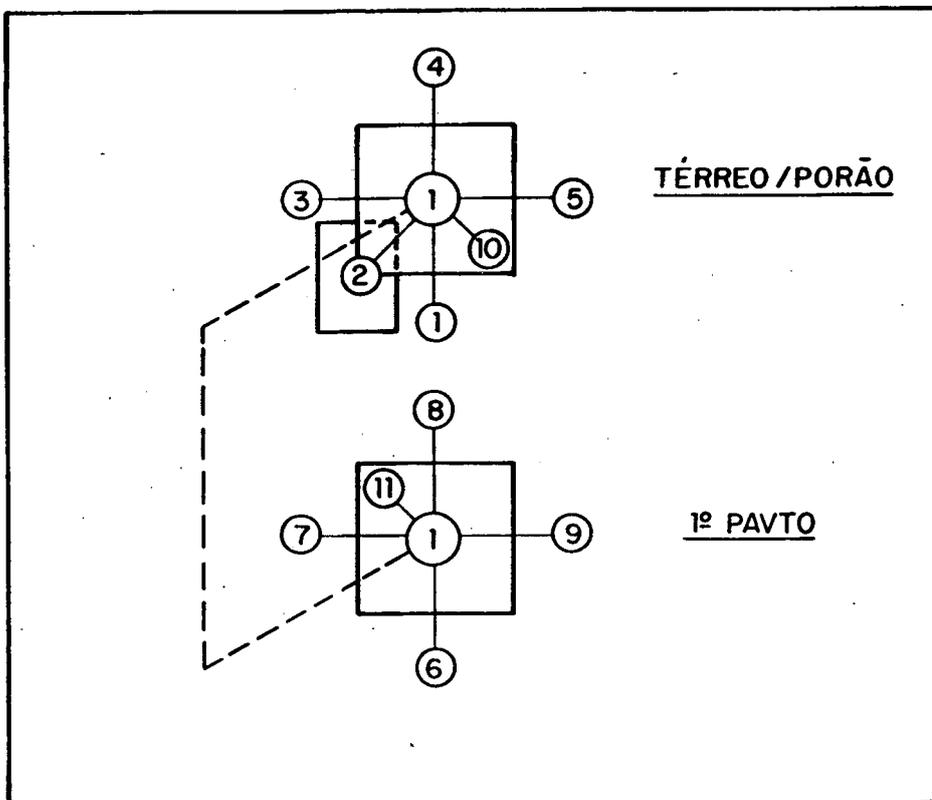


FIGURA 5.3- Passagens de ar (HUDAC HOUSE).

TABELA 5.4- Características de fluxo de cada passagem de ar
(CHUDAC HOUSE).

ZONA	PASSAGEM DE AR	DESCRIÇÃO DA FUGA	C	n	H
1	1	face frente - TERREO	4,03	0,71	1,40
1	2	garagem	4,04	0,71	1,40
1	3	face NE - TERREO	4,03	0,71	1,40
1	4	face fundos - TERREO	5,87	0,71	1,40
1	5	face SW - TERREO	5,51	0,71	1,40
1	6	face frente - 1º PAVTO	5,87	0,71	4,10
1	7	face NE - 1º PAVTO	5,11	0,71	4,10
1	8	face fundos - 1º PAVTO	5,87	0,71	4,10
1	9	face SW - 1º PAVTO	5,11	0,71	4,10
1	10	telhado - TERREO	1,48	0,71	2,60
1	11	telhado - 1º PAVTO	14,65	0,71	5,40

TABELA 5.5- Comparação entre resultados computacionais e experimentais (HUDAC HOUSE).

N° TESTE	V (m/s)	DIR	T _e (°C)	T _{int} (°C)	N _{exp}	N _{flow2}	ERRO (%)
1	7,33	N	7,5	22,0	0,258	0,245	5
2	4,83	N	4,0	22,4	0,181	0,150	17
3	1,65	N	-12,7	20,4	0,176	0,140	20
4	0,98	N	-15,6	21,8	0,178	0,152	15
5	2,82	NW	16,2	22,5	0,082	0,068	17
6	5,27	NW	15,5	22,5	0,201	0,144	28
7	8,05	NW	15,0	22,5	0,322	0,255	21
8	5,99	NW	11,3	22,5	0,268	0,177	34
9	6,39	NW	9,3	22,2	0,255	0,195	24
10	3,93	NW	-2,6	20,7	0,205	0,140	32
11	10,55	NW	-10,6	22,0	0,352	0,416	18
12	4,11	NW	-16,1	22,1	0,199	0,188	6
13	3,84	W	15,0	22,5	0,114	0,108	5
14	3,35	W	9,5	22,5	0,087	0,108	24
15	6,12	W	-3,4	23,4	0,201	0,235	17
16	4,43	W	-4,4	21,8	0,156	0,173	11
17	9,61	W	-4,7	21,0	0,201	0,390	94
18	5,63	W	-5,5	22,6	0,196	0,220	12
19	4,69	W	-7,4	22,5	0,188	0,191	2
20	5,68	W	-9,3	19,8	0,181	0,226	25
21	5,23	W	-9,6	22,6	0,201	0,214	6
22	5,99	W	-10,8	23,1	0,197	0,247	25
23	6,30	W	-12,2	21,3	0,206	0,260	26

TABELA 5.5- Continuação

24	3,84	W	-15,4	22,1	0,188	0,193	3
25	5,23	W	-18,7	21,8	0,212	0,238	12
26	5,86	W	-19,9	20,7	0,208	0,259	25
27	1,07	W	3,9	21,4	0,103	0,086	17
28	1,61	NE	-2,0	22,8	0,135	0,111	18
29	7,38	S	-0,2	22,0	0,200	0,238	19
30	6,48	S	-3,7	22,4	0,206	0,189	8
31	5,01	E	12,5	21,1	0,107	0,078	27
32	9,34	E	4,6	22,5	0,182	0,173	5
33	8,05	E	3,8	22,2	0,149	0,146	2
34	7,64	E	-1,0	22,4	0,247	0,154	38
35	8,00	E	-4,7	22,5	0,195	0,168	14
36	1,43	E	-5,6	21,0	0,148	0,117	21
37	1,16	E	-15,9	22,0	0,196	0,154	21
38	3,13	N	25,4	22,2	0,166	0,060	64
39	3,49	N	25,1	22,2	0,075	0,072	4
40	3,93	N	25,1	22,2	0,123	0,087	29
41	3,84	N	24,6	22,2	0,122	0,085	30
42	5,14	W	29,0	21,1	0,105	0,124	18
43	2,28	W	26,5	22,2	0,087	0,033	62
44	4,60	W	19,0	21,7	0,212	0,124	41
45	1,12	NE	21,5	21,7	0,073	0,016	78
46	7,09	S	26,8	22,2	0,118	0,227	92
47	6,39	S	24,5	21,9	0,120	0,196	63
48	1,74	S	24,4	22,8	0,050	0,034	32
49	2,41	S	23,6	22,5	0,080	0,051	36

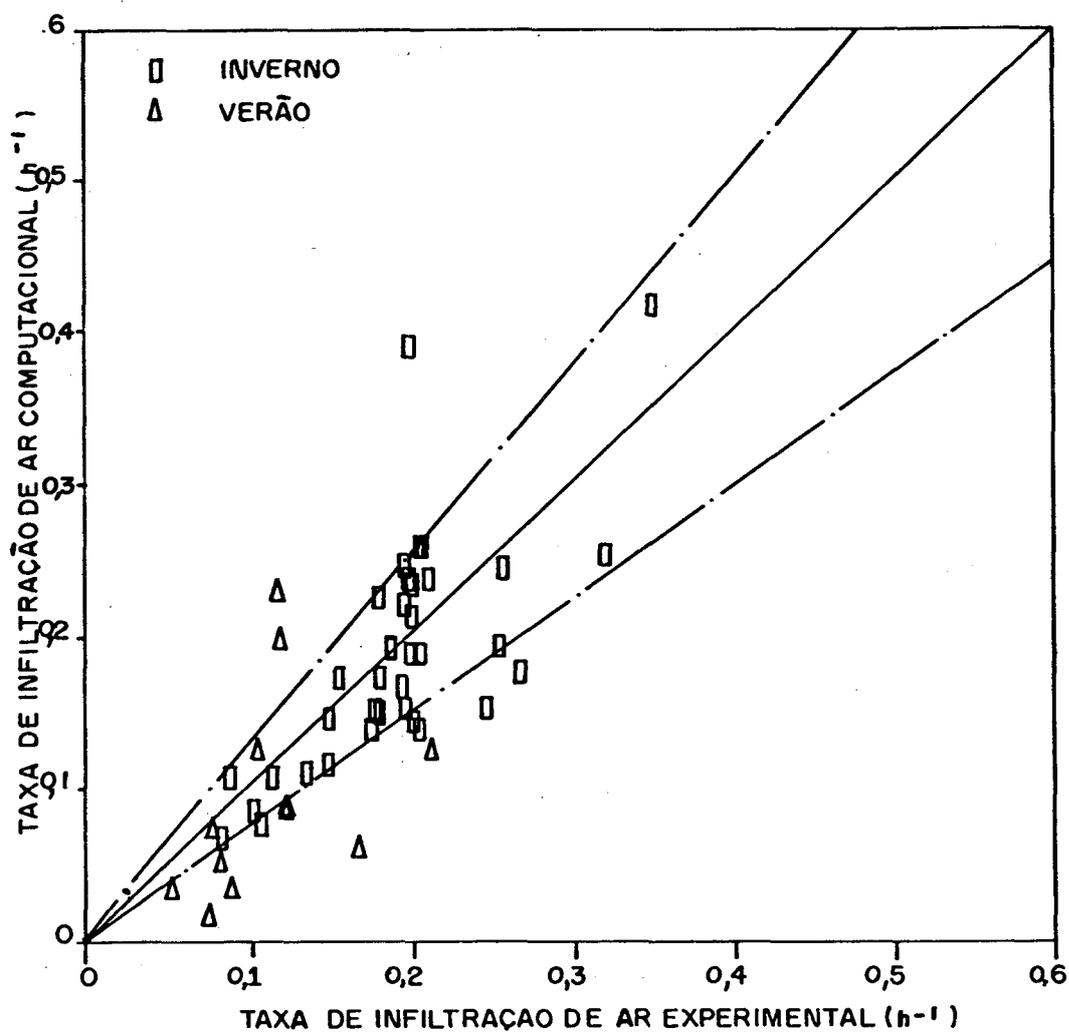


FIGURA 5.4- Comparação entre resultados computacionais e experimentais (HUDAC HOUSE).

5.2.3. RUNCORN HOUSE

Trata-se de uma edificação situada na Inglaterra em um local onde existe uma forte proteção à ação do vento. A distribuição dos pontos de vazamento, para esta edificação, foi considerada de um modo similar ao adotado para a edificação localizada na Suíça.

Considerou-se a posição de tomada da velocidade do vento como ocorrendo a 10 m de altura, e próxima à edificação em questão. Os coeficientes de pressão foram avaliados utilizando-se os dados experimentais fornecidos por Bowen [16].

As passagens de ar, para esta edificação, são mostradas na Figura 5.5 e as correspondentes características de vazamento,

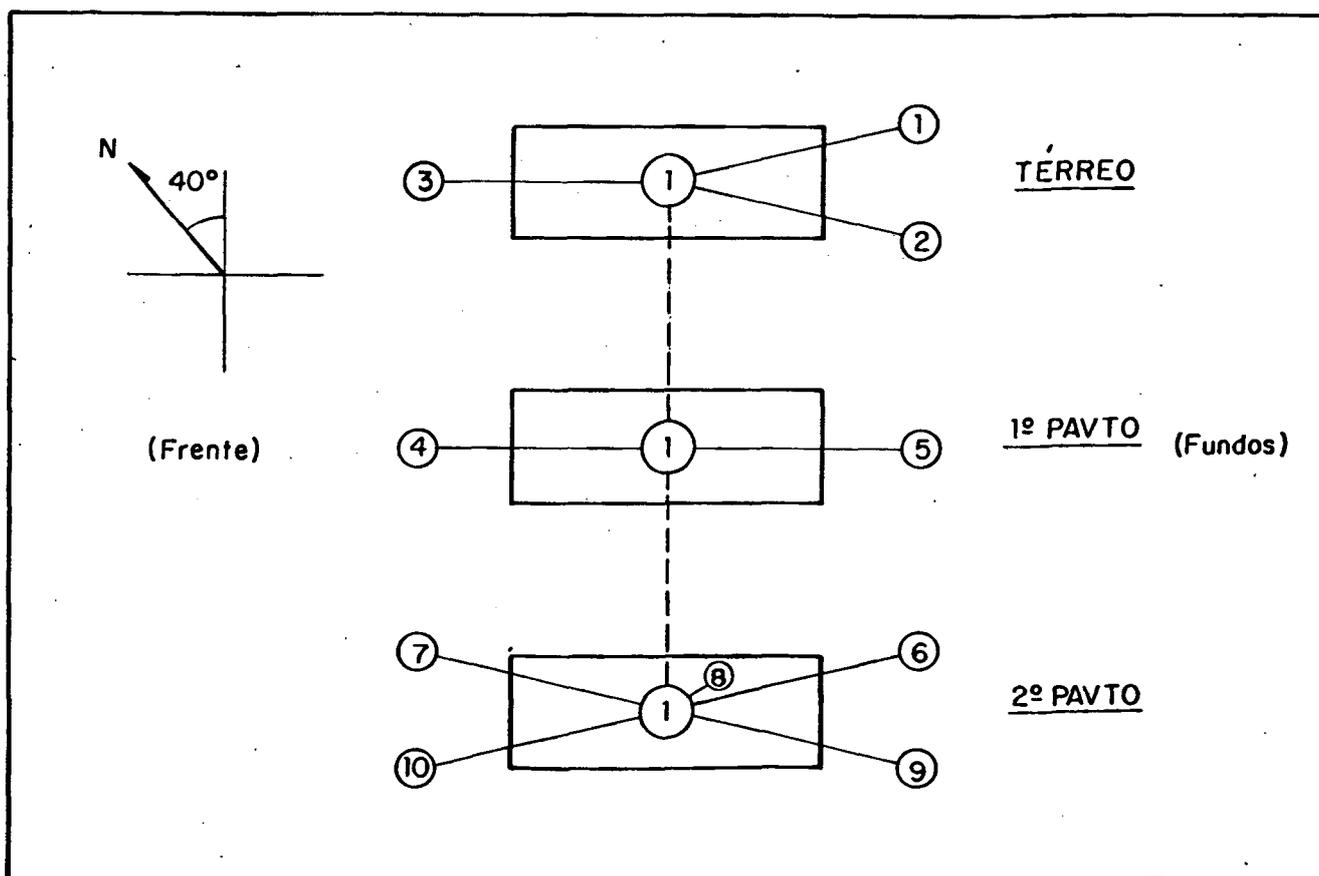


FIGURA 5.5- Passagens de ar (RUNCORN HOUSE).

para cada passagem de ar, apresentadas na Tabela 6.6. As passagens de ar 9 e 10 foram consideradas como tendo proteção externa contra a ação do vento.

Comparação entre resultados computacionais e experimentais é mostrada na Tabela 5.7 e na Figura 5.6. Conforme pode ser observado, 12 dos 15 valores (80%), localizam-se dentro da faixa de tolerância dos valores experimentais (± 25).

TABELA 5.6- Características de fluxo de cada passagem de ar (CRUNCORN HOUSE).

ZONA	PASSAGEM DE AR	DESCRIÇÃO DA FUGA	C	n	H
1	1	porta cozinha	23,04	0,57	1,00
1	2	janela cozinha	7,63	0,64	1,18
1	3	porta frente	22,61	0,56	1,00
1	4	janela quarto 1	13,36	0,60	3,55
1	5	janela	17,60	0,58	3,55
1	6	janela quarto 3	10,08	0,63	5,91
1	7	janela quarto 2	10,19	0,60	5,91
1	8	ventilação teto WC	16,60	0,73	7,10
1	9	junção telhado/parede	67,56	0,66	7,10
1	10	junção telhado/parede	67,56	0,66	7,10

TABELA 5.7- Comparação entre resultados computacionais e experimentais (RUNCORN HOUSE).

Nº TESTE	V (m/s)	DIR	T _• (°C)	T _{int} (°C)	N _{exp}	N _{flow2}	ERRO (%)
1	2,00	270	6,6	20,3	0,580	0,607	5
2	2,50	300	11,0	22,5	0,450	0,537	19
3	2,00	210	8,9	22,3	0,580	0,530	9
4	3,50	330	12,2	22,9	0,510	0,552	8
5	1,70	320	16,4	24,3	0,460	0,422	8
6	6,50	270	13,6	22,7	0,620	0,816	32
7	3,70	250	11,5	22,7	0,520	0,450	13
8	1,50	290	11,5	20,7	0,460	0,471	2
9	3,70	270	16,1	21,9	0,370	0,459	24
10	4,50	310	14,0	22,7	0,460	0,501	9
11	3,50	300	11,0	22,3	0,540	0,549	2
12	3,70	10	15,0	21,7	0,670	0,338	49
13	3,20	10	12,5	22,2	0,490	0,422	14
14	1,20	20	7,0	21,4	0,630	0,599	5
15	3,00	30	13,3	23,2	0,680	0,372	45

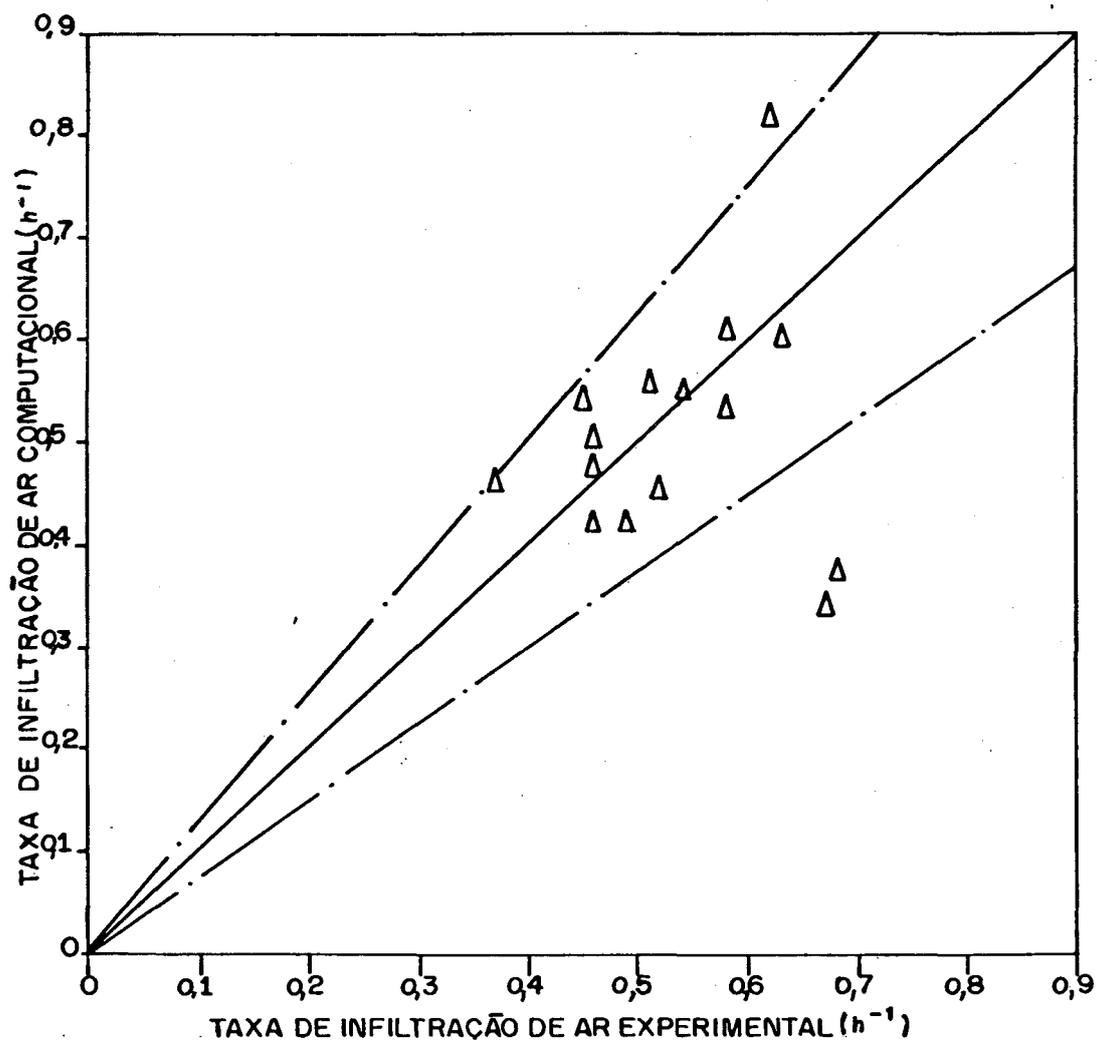


FIGURA 5.6- Comparação entre resultados computacionais e experimentais (CRUNCORN HOUSE).

6. ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DO PROGRAMA FLOW2 AOS DADOS DE ENTRADA

6.1. INTRODUÇÃO

Infelizmente, as estimativas do modelo desenvolvido, no que se refere às taxas de renovação de ar, devido à ventilação natural através de grandes aberturas, como por exemplo janelas e portas abertas, não podem ser validadas, pois não existe, na bibliografia especializada qualquer conjunto de dados experimentais que permita tal exercício de validação. Como forma de demonstrarem-se as possibilidades do programa, apresentar-se-á, a seguir uma análise da sensibilidade do programa FLOW2 aos dados de entrada.

6.2. EDIFICAÇÕES ANALISADAS

A seguir, apresentar-se-ão três edificações diferentes, especialmente idealizadas para analisar-se a sensibilidade do programa FLOW2 aos dados de entrada.

6.2.1. EDIFICAÇÃO TIPO A

Tal edificação consiste em um grande galpão, de volume interno igual a 15.300 m^3 , e com dimensões características de $100 \times 15 \times 11 \text{ m}$. Encontra-se situado numa região suburbana, cujas edificações vizinhas fornecem um grau de proteção equivalente à classe 1 ($H_a/H_b=1/6$), de acordo com o capítulo 4. Nas duas laterais da edificação existem 02 portas, para carga e descarga,

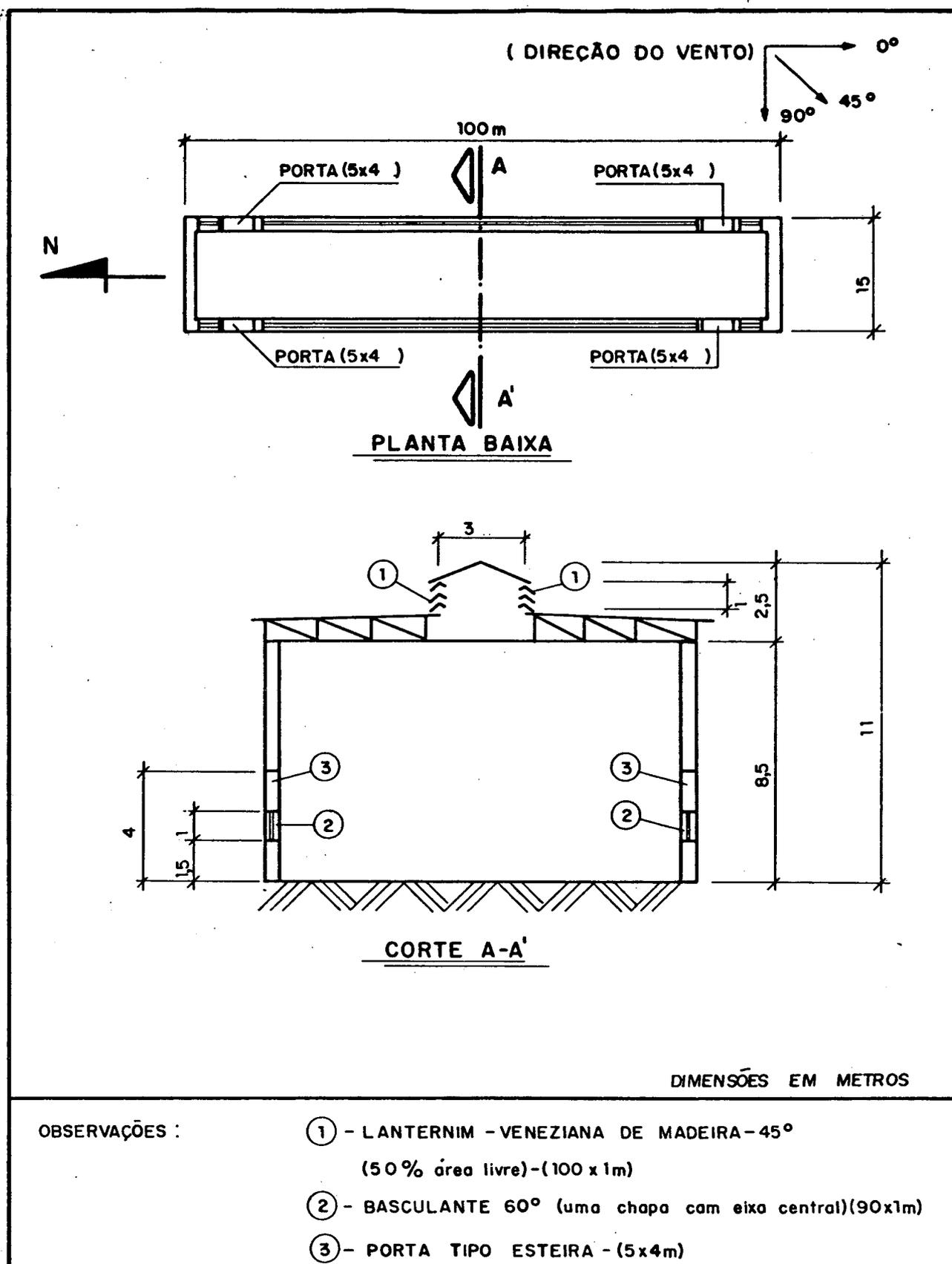


FIGURA 6.1 - Edificação tipo A.

com dimensões de 5x4 m. O projeto básico com detalhes construtivos, é mostrado detalhadamente na Figura 6.1.

As características de fluxo de cada passagem de ar são mostradas na Tabela 6.1

TABELA 6.1- Características de fluxo de cada passagem de ar (EDIFICAÇÃO TIPO A).

ZONA	PASSAGEM DE AR	DESCRIÇÃO DA FUGA	C	n	H
1	1	lanternim direito	185.903	0,50	10,5
1	2	lanternim esquerdo	185.903	0,50	10,5
1	3	basculante 60°-direito	242.604	0,50	2,0
1	4	basculante 60°-esquerdo	242.604	0,50	2,0
1	5	porta lado direito	23.052	0,50	0,5
1	6	" " "	23.052	0,50	1,5
1	7	" " "	23.052	0,50	2,5
1	8	" " "	23.052	0,50	3,5
1	9	" " "	23.052	0,50	4,5
1	10	porta lado esquerdo	23.052	0,50	0,5
1	11	" " "	23.052	0,50	1,5
1	12	" " "	23.052	0,50	2,5
1	13	" " "	23.052	0,50	3,5
1	14	" " "	23.052	0,50	4,5

Obs: Os caminhos de 05 a 14 só serão usados quando as portas forem consideradas abertas.

6.2.2. EDIFICAÇÃO TIPO B

Trata-se, tal edificação de um galpão industrial, com volume interno de 3.000 m³ e com dimensões de 30x10x10 m. O mesmo apresenta duas portas tipo esteira, as quais foram utilizadas para verificar-se a influência do número de divisões a serem consideradas na análise do fluxo de ar através de grandes aberturas. O projeto básico, com detalhes da posição das aberturas, é apresentado na Figura 6.2. As características de cada passagem de ar são mostradas na Tabela 6.2.

TABELA 6.2- Características de fluxo de cada passagem de ar.
(EDIFICAÇÃO TIPO B)

ZONA	PASSAGEM DE AR	DESCRIÇÃO DA FUGA	C	n	H
1	1	janela basc. esquerdo	185.903	0,5	10,5
1	2	janela basc. direito	185.903	0,5	10,5
1	3	porta lado esquerdo	57.630	0,5	1,25
1	4	porta lado esquerdo	57.630	0,5	3,75
1	5	porta lado direito	57.630	0,5	1,25
1	6	porta lado direito	57.630	0,5	3,75

Obs: As passagens de ar, descritas acima, aplicam-se apenas para o caso de duas divisões na abertura de grandes dimensões.

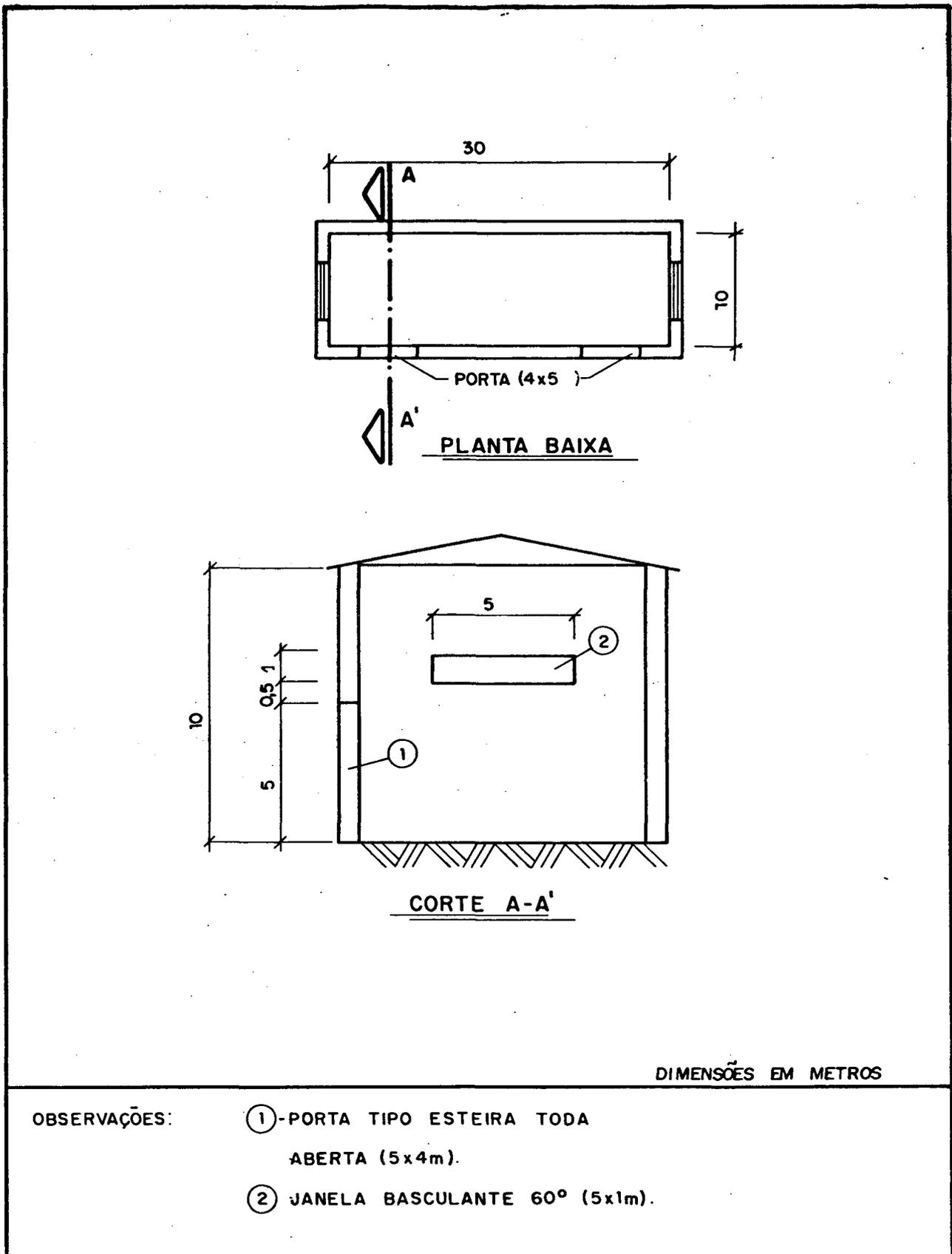


FIGURA 6.2- Edificação tipo B.

6.2.3. EDIFICAÇÃO TIPO C

Neste caso imaginou-se uma edificação comercial, com volume interno de 4200 m³, e com dimensões de (40x30x3,5)m. A mesma apresenta ainda uma porta externa mantida permanentemente aberta, e janelas basculantes posicionadas a 3 m de altura. No capítulo seguinte, utilizar-se-á esta edificação para analisar-se a variação da concentração de um determinado poluente no ar interno. O projeto básico, com detalhes construtivos, é mostrado na Figura 7.7. As características de cada passagem de ar, são mostradas na Tabela 7.1.

Conforme pode ser observado, na Figura 6.3, esta edificação é dividida em três zonas, interconectadas entre si, como forma de possibilitar a análise da influência das condições externas nos fluxos de ar internos.

TABELA 6.3- Características de fluxo de cada passagem de ar (EDIFICAÇÃO TIPO C).

ZONA	PASSAGEM DE AR	TIPO DE ABERTURA	DIMENSÕES	C	N	H
1	1	porta aberta	2,0 x2,2	12.679	0,5	1,1
1	2	janela basc.	12,0 x0,32	10.373	0,5	3,0
1	3	porta aberta	2,0 x2,2	12.679	0,5	1,1
2	1	porta aberta	2,0 x2,2	12.679	0,5	1,1
2	2	janela basc.	12,0 x0,32	10.373	0,5	3,0
2	3	guiche	1,0 x1,0	3.950	0,5	1,5
3	1	guiche	1,0 x1,0	3.950	0,5	1,5
3	2	janela basc.	12,0 x0,32	10.373	0,5	3,0

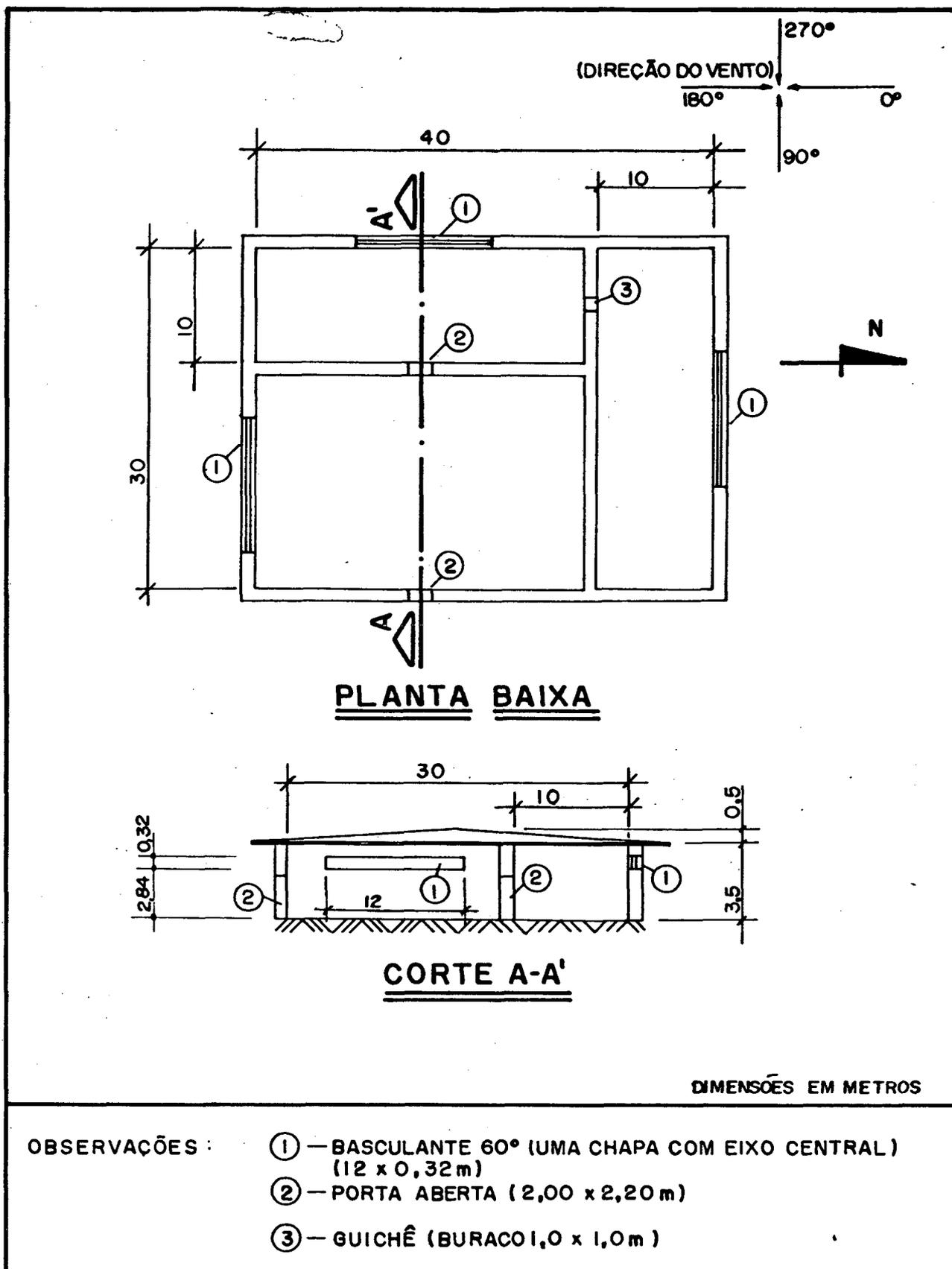


FIGURA 6.3- Edificação tipo C.

A edificação tipo C, pode também ser utilizada em uma modelação do tipo zona única, bastando para isto desconsiderarem-se as passagens de ar e divisórias internas.

6.3. EFEITO DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA ENTRE O AR EXTERNO E INTERNO

Utilizando-se a edificação tipo A e variando-se a diferença de temperatura entre o ar externo e interno, assim como também o coeficiente angular, w , do perfil linear, assumido para levar-se em consideração a estratificação da temperatura do ar interno, obtiveram-se os resultados mostrados na Figura 6.4. Neste caso, a edificação foi considerada como tendo as portas fechadas e desprezou-se também a influência do vento sobre as aberturas. Analisando-se os resultados, apresentados na Figura 6.4, verifica-se que a vazão de ar induzida é tanto maior quanto maior for a diferença entre as temperaturas do ar interno e externo, e quanto maior for a estratificação da temperatura do ar interno.

6.4. EFEITO DA DIFERENÇA DE ALTURA ENTRE ABERTURAS

Utilizando-se a edificação tipo A, e variando-se a diferença de altura entre aberturas para diversos perfis lineares de temperatura, do ar interno, pode-se verificar a variação da vazão de ar induzida. As portas foram consideradas fechadas e a influência do vento sobre a edificação foi desprezada. O diferencial de temperatura entre o ar externo e interno foi mantido no valor constante de 3°C .

Analisando-se os resultados apresentados na Figura 6.5,

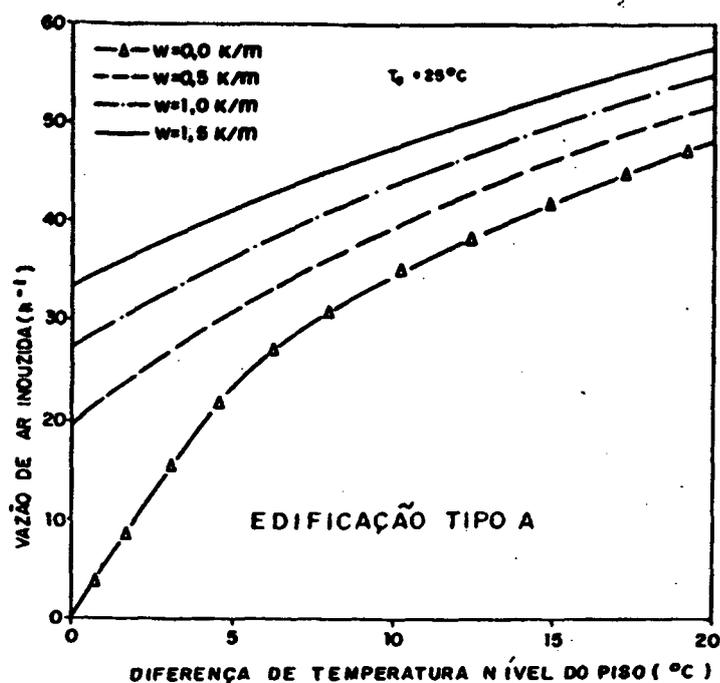


FIGURA 6.4- Vazão de ar induzida em função da diferença de temperatura entre o ar interno e externo.

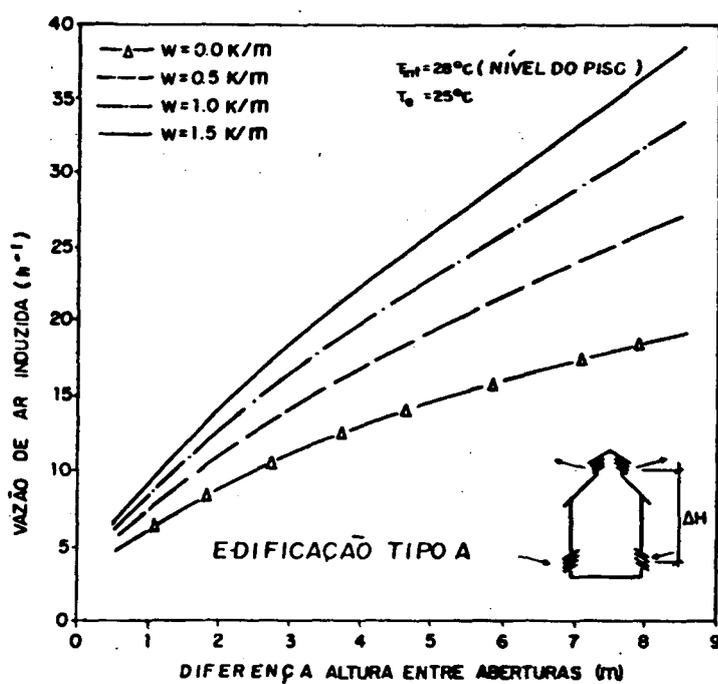


FIGURA 6.5- Vazão de ar induzida em função da diferença de altura entre as aberturas inferiores e superiores.

verifica-se que, conforme esperado, a vazão de ar induzida aumenta com o acréscimo da diferença de altura entre aberturas e com o aumento da estratificação da temperatura do ar interno.

6.5. EFEITO DA VARIAÇÃO DA VELOCIDADE E DO ÂNGULO DE ATAQUE DO VENTO

Utilizando-se a edificação tipo A e variando-se o ângulo de ataque e a velocidade do vento, pode-se verificar a variação da vazão de ar induzida na edificação. As portas foram consideradas fechadas e foi desprezado o efeito chaminé atuando sobre a edificação. Os resultados são mostrados graficamente nas Figuras 6.6 e 6.7.

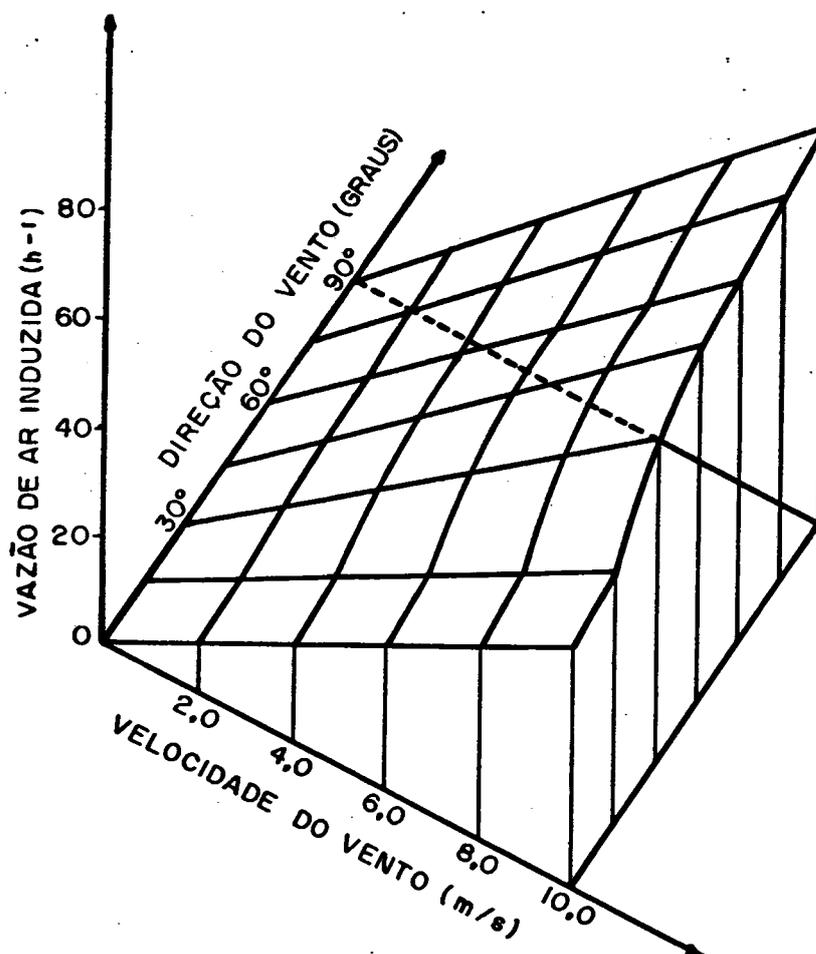


FIGURA 6.6- Efeito da velocidade e da direção do vento sobre a vazão de ar induzida. (edificação tipo A)

Analisando-se os resultados apresentados nas Figuras 6.6 e 6.7, verifica-se que a vazão de ar induzida aumenta com o acréscimo da velocidade do vento e, para o caso particular da edificação tipo A, com o acréscimo do ângulo de ataque do vento sobre a edificação.

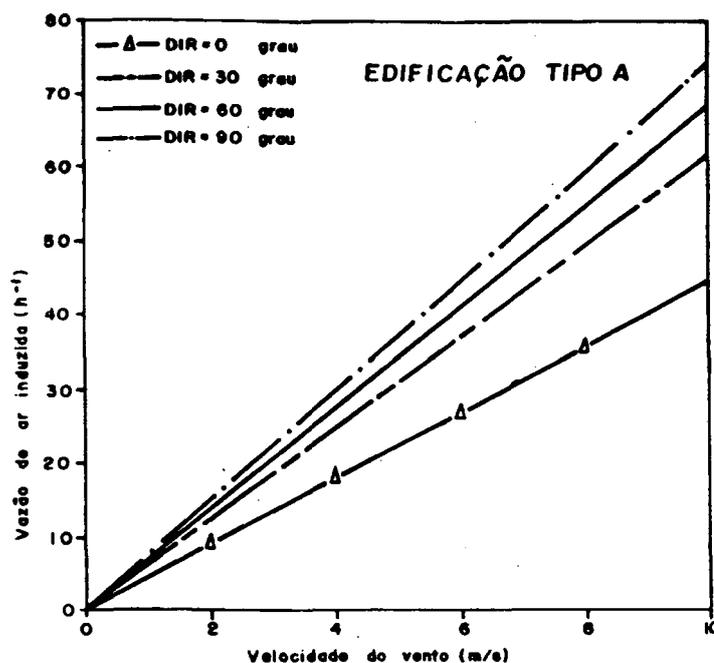


FIGURA 6.7- Vazão de ar induzida em função da variação da velocidade e ângulo de ataque do vento.

6.6. EFEITO DA ABERTURA DAS PORTAS

Utilizando-se a edificação tipo A e variando-se a velocidade e a direção do vento, pode-se verificar a influência da abertura ou não das portas na estimativa da vazão de ar induzida. O diferencial de temperatura entre o ar interno e externo foi mantido constante no valor de 3°C.

Os resultados são mostrados graficamente na Figura 6.8.

Analisando-se a Figura 6.8, verifica-se que, independentemente da direção do vento, e mantendo-se as portas abertas promove-se um aumento da vazão de ar induzida.

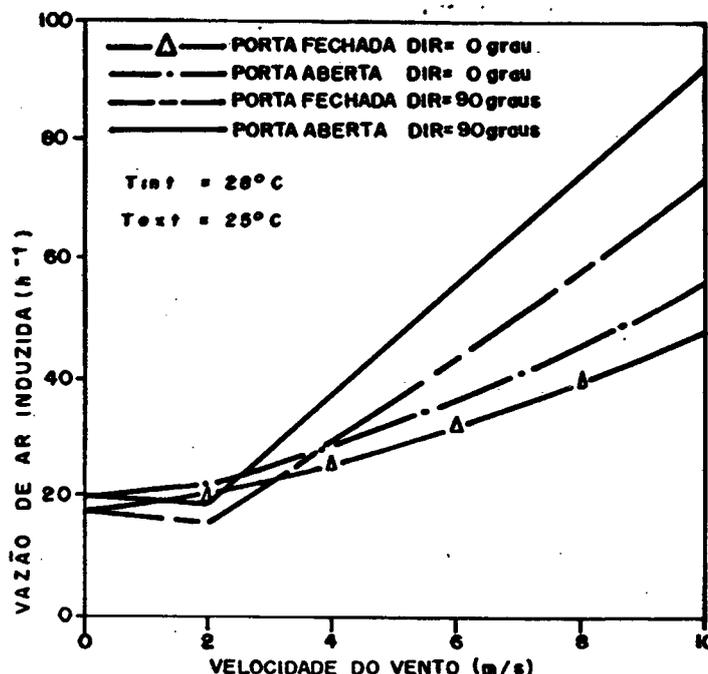


FIGURA 6.8- Efeito da abertura das portas na vazão de ar induzida, considerando o efeito chaminé constante, Edificação tipo A.

Verifica-se também, que, quando a direção do vento é de 90 graus (incidência normal às aberturas), as trocas de ar são maiores do que quando o mesmo incide lateralmente (direção igual zero graus) sobre a edificação. Isto deve-se ao fato de que com incidência lateral o diferencial de pressão, criado pelo vento, soma-se ao diferencial de pressão, criado pelo efeito chaminé, aumentando assim a vazão de ar induzida. No exemplo mostrado, para velocidades menores do que $\cong 2,5$ m/s no caso das portas abertas, e menores do que $\cong 3,1$ m/s, no caso das portas fechadas a afirmação anterior não se verifica. No caso de incidência

normal, até uma determinada velocidade, a ação do vento contrapõe-se ao efeito chaminé, reduzindo assim as trocas de ar envolvidas.

6.7. COMPARAÇÃO ENTRE AÇÃO DO VENTO E DO EFEITO CHAMINÉ

Utilizando-se a edificação tipo A e variando-se a velocidade do vento, pode-se comparar a influência do efeito chaminé e da ação do vento sobre a vazão de ar induzida. Conforme pode ser observado, na Figura 6.9, o aumento da velocidade do vento, diminui a influência do efeito chaminé sobre a vazão total de ar induzida. As portas foram consideradas abertas.

Através desta comparação fica evidenciado que as vazões de ar, criadas pela ação isolada do vento e do efeito chaminé, não

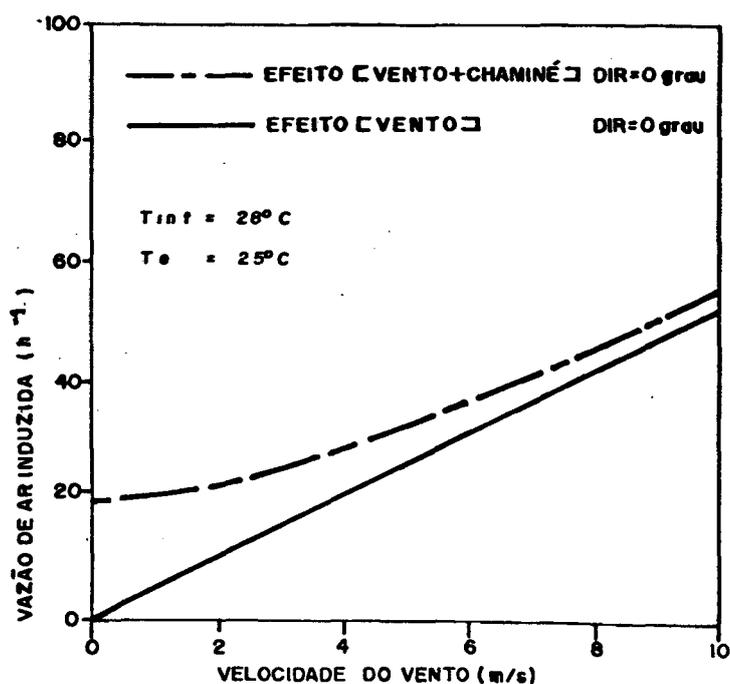


FIGURA 6.9- Comparação entre a ação do vento e do efeito chaminé.

podem ser simplesmente adicionadas como forma de obter-se a vazão total de ar induzida. A prática, geralmente aceita, e adotada neste trabalho, consiste em comporem-se as pressões resultantes, da ação do vento e do efeito chaminé, e com as mesmas calcular-se a vazão de ar total induzida na edificação.

6.8. EFEITOS DO NÚMERO DE DIVISÕES, CONSIDERADO NA ANÁLISE DE ABERTURAS COM ALTURA ELEVADA

Utilizando-se a edificação tipo B, e dividindo-se a área de cada porta em diversas passagens de ar (diversas faixas horizontais), pode-se analisar o efeito deste número de divisões sobre a vazão de ar induzida. Para tanto, tratou-se, separadamente, cada divisão como se fosse uma abertura única isolada, desprezou-se o efeito do vento, consideraram-se diversos perfis internos lineares para a estratificação da temperatura do ar interno e admitiu-se uma diferença de temperatura constante entre o ar externo e interno no valor de 3°C.

Os resultados desta análise são mostrados, graficamente, na Figura 6.10. Conforme pode ser observado na Figura 6.10, acima de 5 divisões, para todos os casos testados, a vazão de ar induzida, torna-se independente do número de divisões adotado, evidenciando-se que a posição do plano neutro ficou adequadamente determinado, o que inclusive pode ser constatado no Gráfico da Figura 6.11.

Na Figura 6.12 mostra-se, de forma esquemática, a distribuição das vazões de ar e o posicionamento do plano neutro, em função do número de divisões adotado na análise das trocas de ar em aberturas com altura elevada, mantendo-se todas as outras condições constantes.

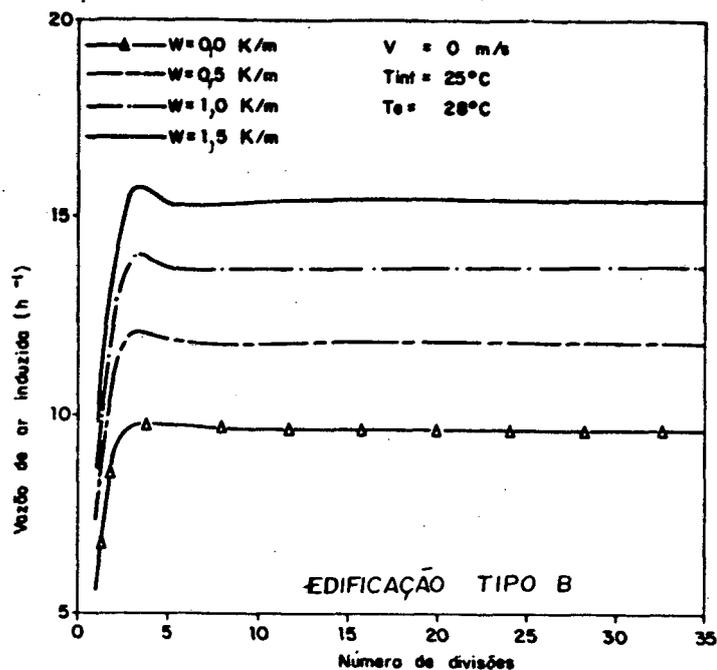


FIGURA 6.10- Vazão de ar induzida, em função do número de divisões na abertura de altura elevada.

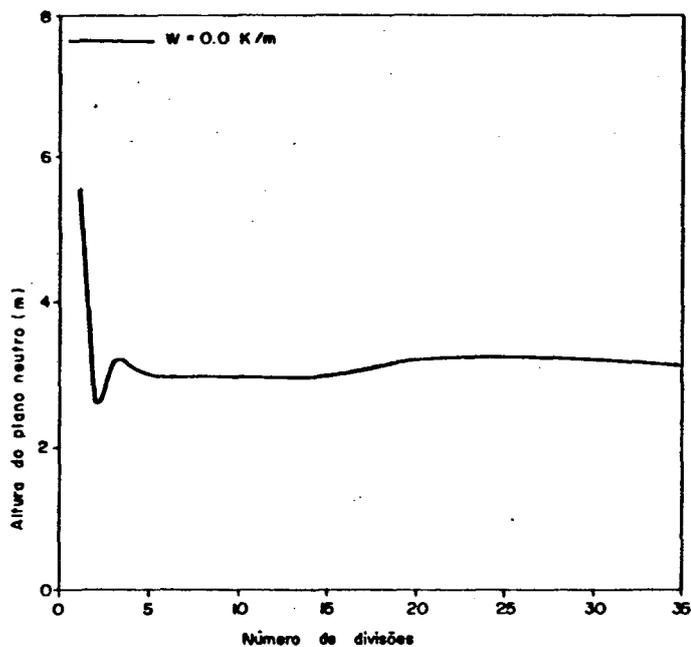


FIGURA 6.11- Variação da altura do plano neutro em função do número de divisões na abertura de altura elevada.

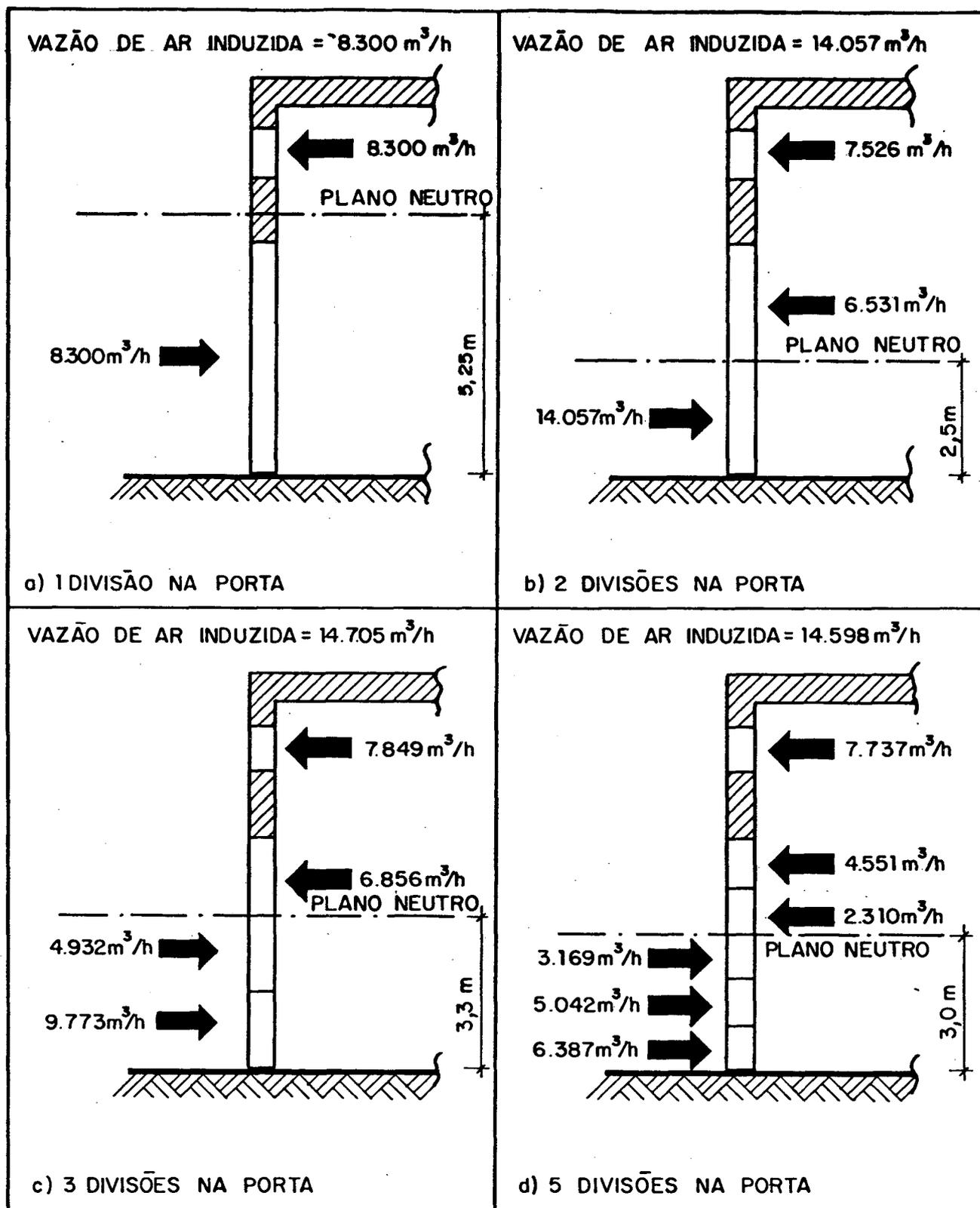


FIGURA 6.12- Variação da vazão de ar induzida e do posicionamento do plano neutro em função do número de divisões utilizada no cálculo da abertura com altura elevada. (Edificação tipo B).

6.9. ANÁLISE DOS FLUXOS DE AR INTERNO EM EDIFICAÇÕES COM ZONAS MÚLTIPLAS

Utilizando-se a edificação tipo C, a qual é dividida em três zonas internas, analisou-se o efeito da velocidade e da direção do vento e da diferença dos valores absolutos da temperatura do ar interno e do ar externo, sobre os fluxos de ar interno, com o intuito de demonstrar-se as potencialidades do programa, referentes a edificações com zonas múltiplas.

6.9.1. EFEITO DA VELOCIDADE DO VENTO

Considerando-se a diferença de temperatura entre o ar interno (25°C) e externo (28°C) num valor constante de 3°C , a direção do vento como sendo perpendicular à porta principal (zona 1) e variando-se a velocidade do vento obtém-se os resultados, indicados na Figura 6.13. Conforme pode-se observar, nesta Figura, as trocas de ar, em cada zona, são acrescidas com o aumento da velocidade do vento. Observa-se também que no caso particular da zona 2, o sentido do fluxo de ar é invertido quando a velocidade do vento cresce e o efeito dinâmico torna-se mais importante do que o efeito chaminé.

6.9.2. EFEITO DA DIREÇÃO DO VENTO

Mantendo-se todas as condições constantes, tais como velocidade do vento, o diferencial de temperatura absoluta entre o ar interno e externo, para a edificação tipo C, e variando-se apenas a direção do vento obtém-se os resultados, indicados na Figura 6.14. Tal Figura mostra claramente, as potencialidades do

programa quando aplicado a edificações com zonas múltiplas.

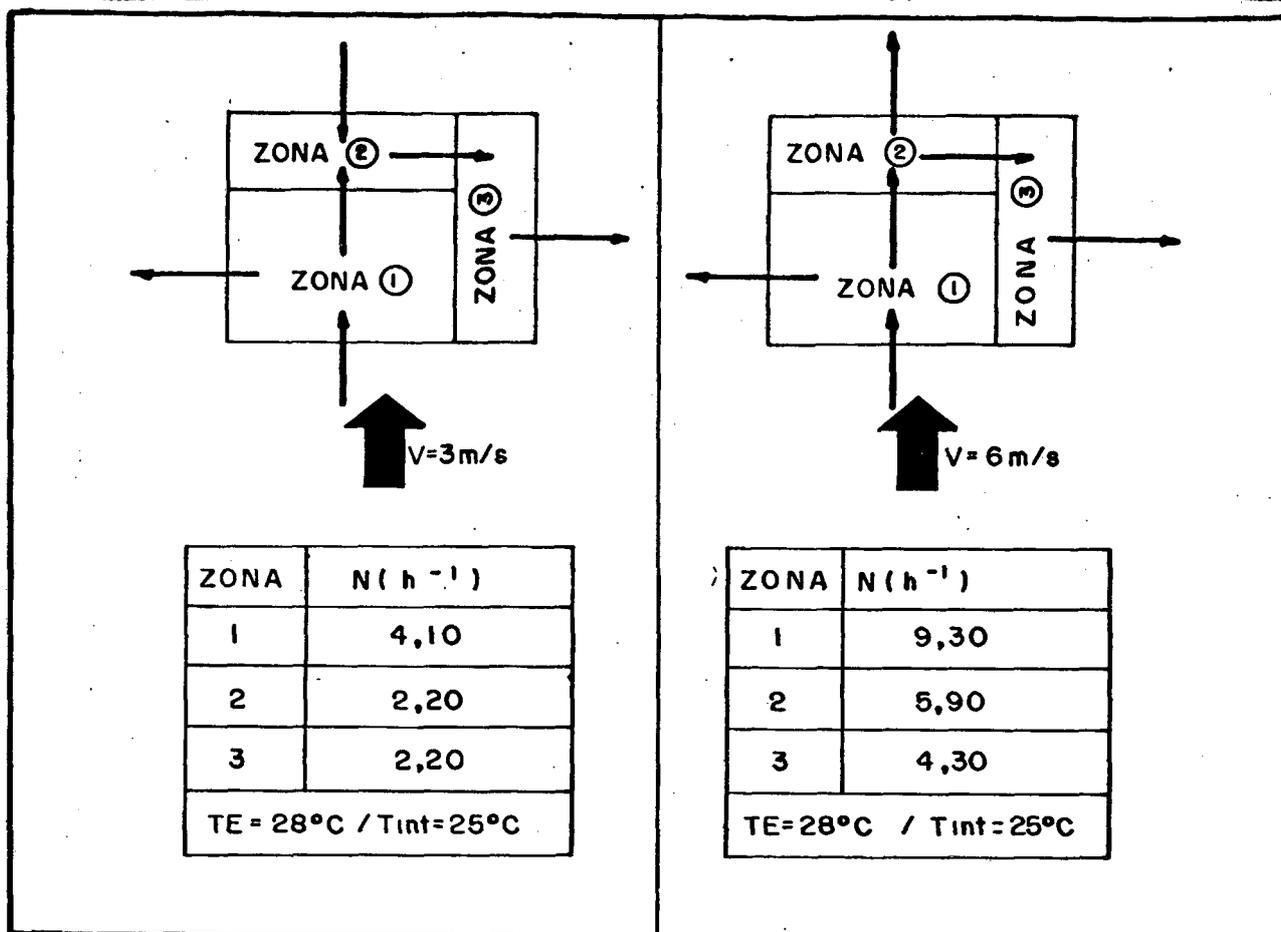


FIGURA 6.13- Efeito da velocidade do vento sobre os fluxos de ar interno.

6.9.3. INFLUÊNCIA DO EFEITO CHAMINÉ

Desconsiderando-se a ação do vento sobre a edificação, observa-se, na Figura 6.15, que o modelo desenvolvido adequa-se bem à análise dos fluxos de ar interno em edificações com zonas múltiplas, em decorrência do efeito chaminé, criado por um diferencial de temperatura entre o ar interno e externo.

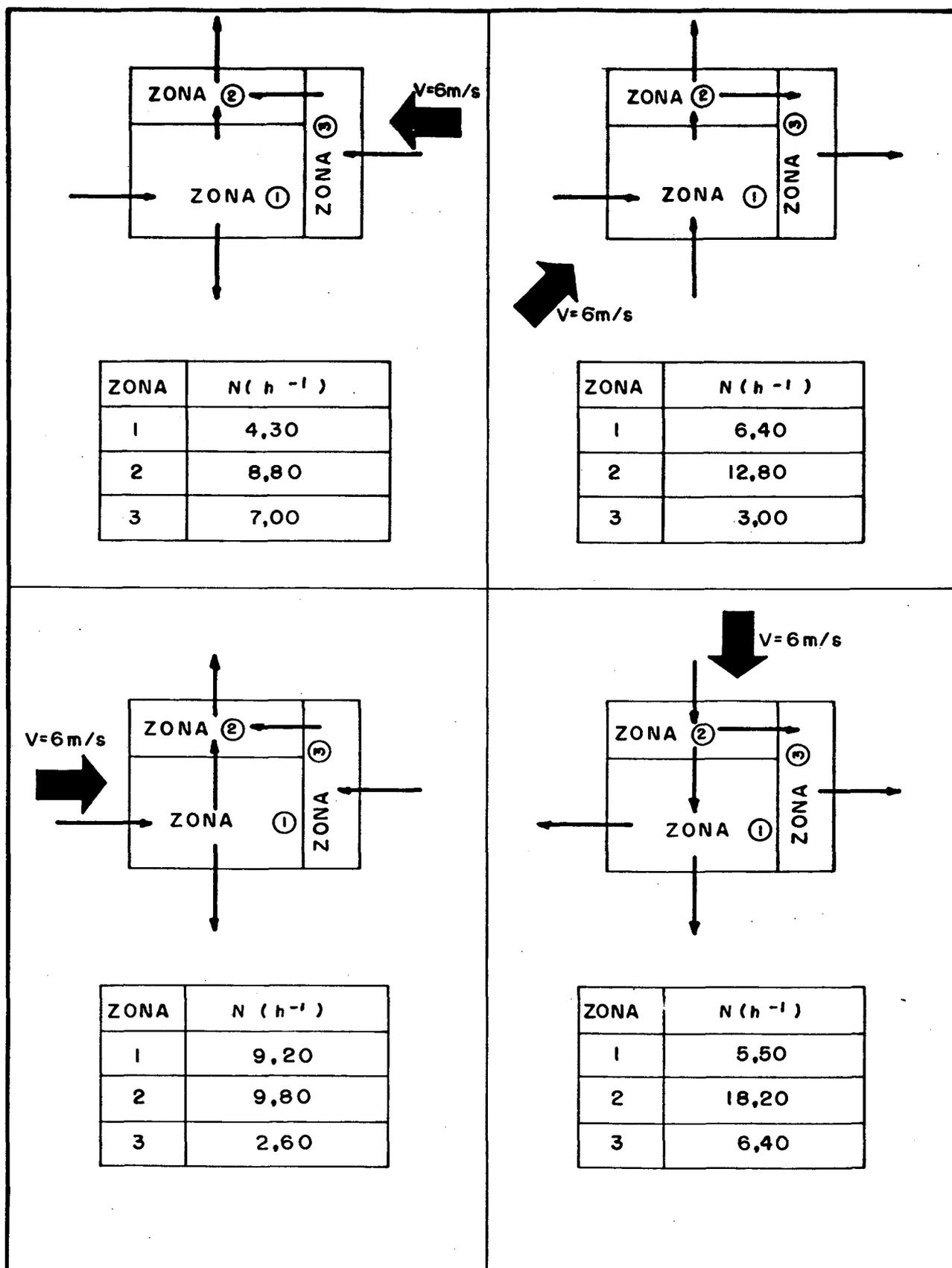


FIGURA 6.14- Influência da direção do vento nos fluxos de ar interno.

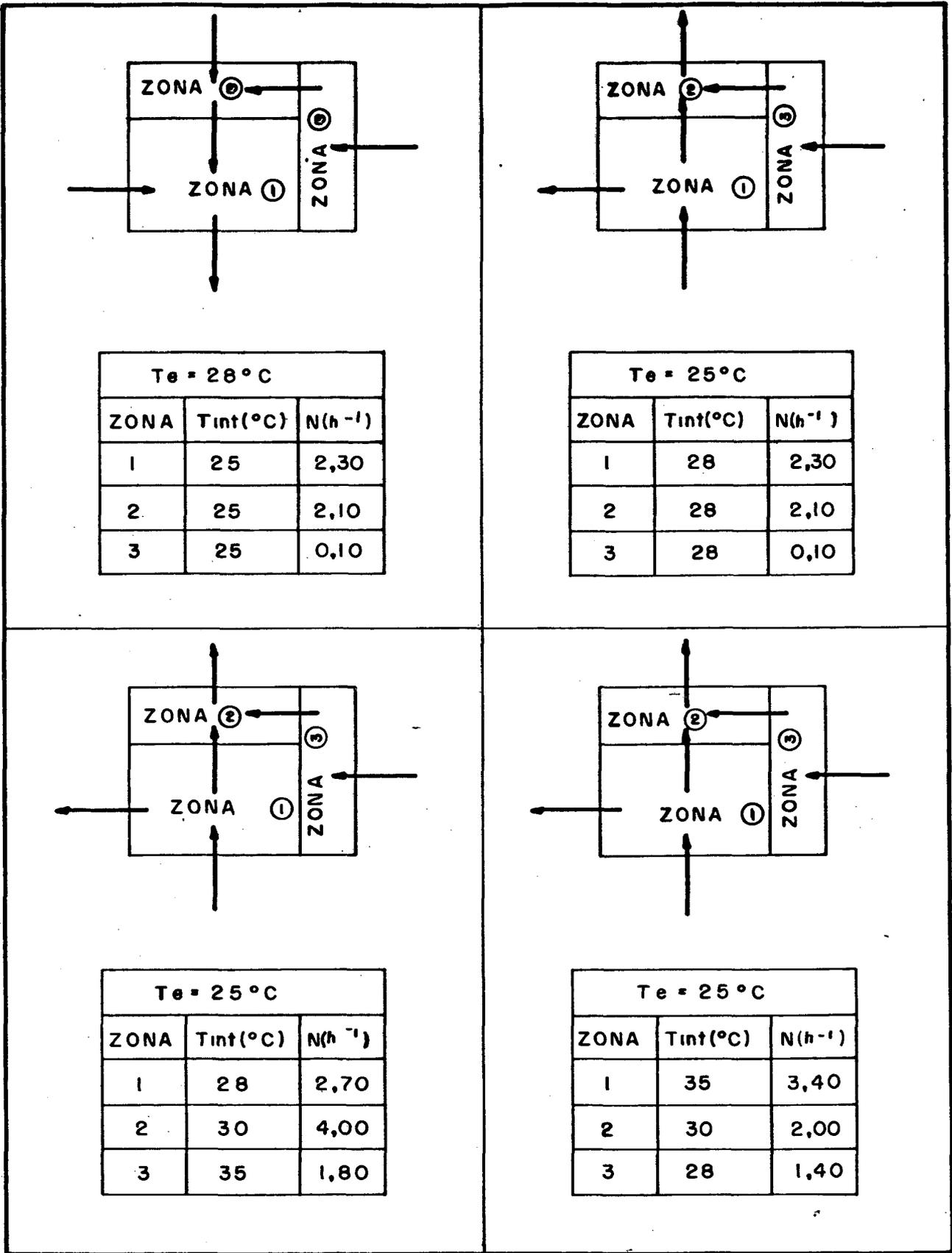


FIGURA 6.15- Influência do efeito chaminé sobre os fluxos de ar interno.

7. DILUIÇÃO DE POLUENTES

7.1. INTRODUÇÃO

Quanto maior o número de partículas, compostos orgânicos e gases nocivos que o ar contiver mais baixa será sua qualidade, e vice-versa. A qualidade do ar externo, a presença de fontes de poluição interna e o número de ocupantes afetam a qualidade do ar interno. Se o ar externo não for muito contaminado, a qualidade do ar interno pode, geralmente, ser melhorada pelo simples incremento da taxa de ventilação. A elevação da taxa de ventilação por outro lado pode acrescer muito o consumo de energia. Logo a taxa de ventilação deve ser um compromisso entre a qualidade do ar interno e o consumo de energia do sistema de ventilação forçada.

Os requisitos de ventilação são frequentemente expressos em termos de taxas de troca de ar por hora. Este tipo de abordagem implica na hipótese de que o ar entrando mistura-se uniformemente com aquele já presente na edificação.

Para melhor explicar-se esta hipótese, apresenta-se a mesma em detalhes, juntamente com duas outras situações, também possíveis de ocorrerem na prática [25].

7.1.1. FLUXO TIPO PISTÃO

É considerada a mais eficiente forma de ventilação. Sob estas condições o ar fresco desloca o ar contaminado sem uma mistura real (Figura 7.1). Num ambiente industrial tal conceito é aplicado quando se extraem poluentes por meio de coifas e ventiladores de exaustão.

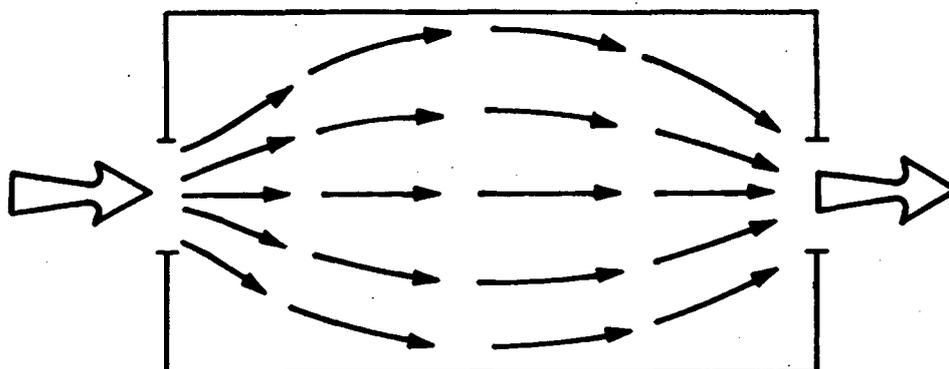


FIGURA 7.1- Fluxo tipo pistão.

7.1.2. MISTURA PERFEITA

Sob condições de mistura perfeita, o ar entrando continuamente mistura-se uniformemente com a massa de ar interno (Figura 7.2). Esta é a situação mais comum em projetos de ventilação mecânica, sendo portanto a hipótese utilizada neste trabalho.

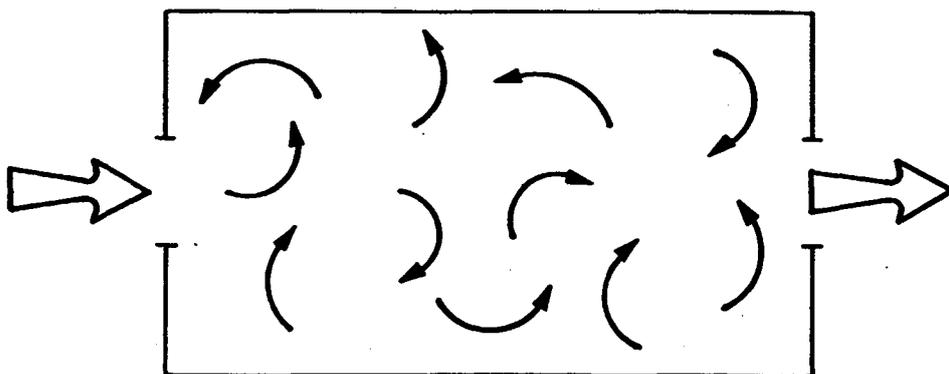


FIGURA 7.2- Mistura perfeita.

7.1.3. CURTO CIRCUITO

Está é a pior das condições de ventilação, por ser o suprimento de ar fresco completamente interceptado pelo sistema de extração sem alcançar a localização na qual a ventilação é requerida (Figura 7.3).

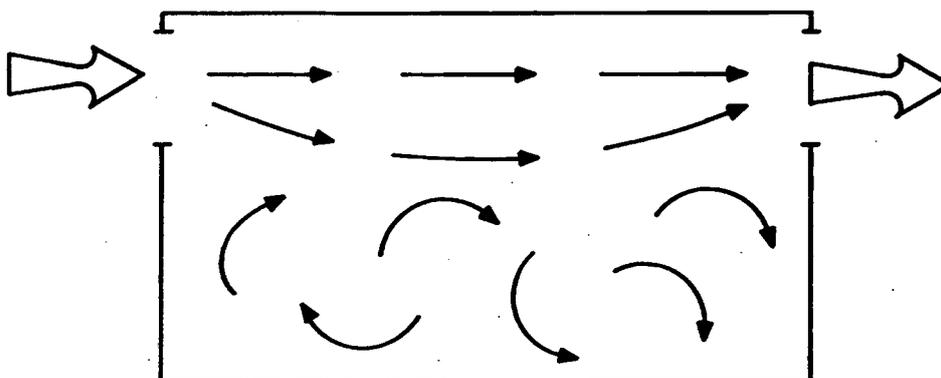


FIGURA 7.3- Curto circuito.

Deve-se ressaltar que nenhuma destas situações se aplicam isoladamente. Na realidade, o que ocorre é uma combinação destas condições, sendo as mesmas muito afetadas pela ação dos ocupantes.

7.2. EQUAÇÃO GERAL DA DILUIÇÃO

A concentração de um contaminante num ambiente (Figura 7.4) é dada em qualquer instante pela equação da continuidade.

$$\left[\frac{dm}{dt} \right] = \dot{m}_{entra} - \dot{m}_{sai} + G \quad (7.1)$$

ou

$$V_l \frac{dCt_{int}}{dt} + Q [Ct_{int} - Ct_e] = G \quad (7.2)$$

onde:

V_l	= volume da zona	(m^3)
Ct_{int}	= concentração interna de poluente	(kg/m^3)
Ct_e	= concentração externa de poluente	(kg/m^3)
Q	= vazão de ar	(m^3/s)
G	= taxa total de emissão de poluente	(kg/s)
m	= massa	(kg)
t	= tempo	(s)
\dot{m}	= fluxo de massa	(kg/s)

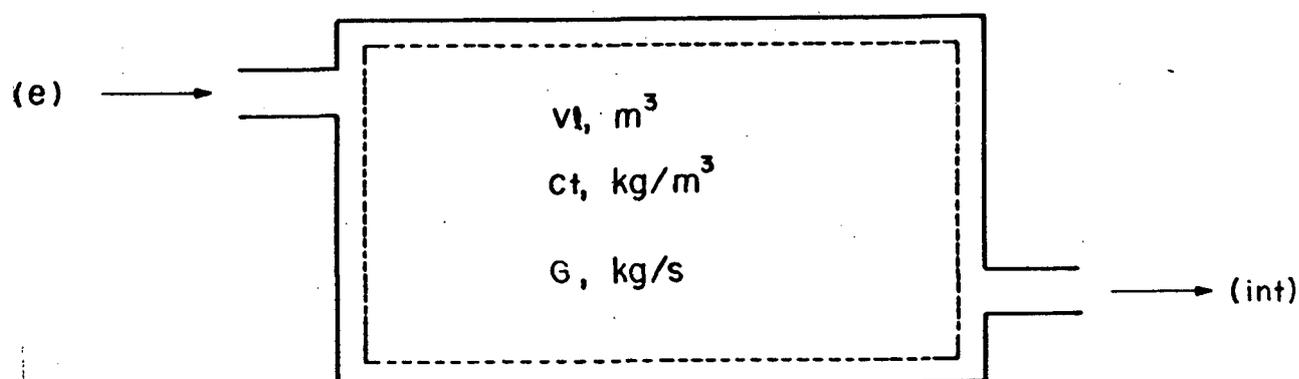


FIGURA 7.4- Volume de controle para dedução da equação geral da diluição.

7.2.1. SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO GERAL DA DILUIÇÃO PARA ZONA ÚNICA

A equação (7.2), pode ser reescrita conforme mostrado abaixo,

$$\frac{dCt_{int}}{dt} + \frac{Q}{Vl} Ct_{int} = \frac{[Q Ct_e + G]}{Vl} \quad (7.3)$$

definindo-se, N, como sendo a taxa de trocas de ar por hora,

$$N = [Q/Vl] 3600 \quad (7.4)$$

e multiplicando-se a equação (7.3) por e^{Nt} , tem-se,

$$\frac{dCt_{int}}{dt} e^{Nt} + N Ct_{int} e^{Nt} = \left[\frac{Q Ct_e + G}{Vl} \right] e^{Nt} \quad (7.5)$$

ou

$$\frac{d}{dt} [Ct_{int} e^{Nt}] = \left[\frac{Q Ct_e + G}{Vl} \right] e^{Nt} \quad (7.6)$$

Integrando-se a equação (7.6) obtém-se,

$$Ct_{int} e^{Nt} + FI = \left[\frac{Q Ct_e + G}{Vl} \right] \frac{e^{Nt}}{N} \quad (7.7)$$

Considerando-se que quando $t=0$, $Ct_{int} = Co$, obtém-se

$$FI = Ct_e + G/Q - Co \quad (7.8)$$

substituindo-se a equação (7.8) na equação (7.7) e reagrupando-se,

$$Ct_{int}(t) = [Ct_e + G/Q] [1 - e^{-Nt}] + C_o e^{-Nt} \quad (7.9)$$

A equação anterior pode apresentar quatro casos particulares, os quais são mostrados abaixo,

i) 1º CASO

- não há geração interna de contaminantes
- o ar externo está isento de contaminantes

$$Ct_{int}(t) = C_o e^{-Nt} \quad (7.10)$$

ii) 2º CASO

- o ambiente está inicialmente livre de contaminantes
- não há geração interna de contaminantes

$$Ct_{int}(t) = Ct_e (1 - e^{-Nt}) \quad (7.11)$$

iii) 3º CASO

- existe geração de contaminantes
- o ambiente está inicialmente livre de contaminantes
- o ar externo contém contaminantes

$$Ct_{int}(t) = (Ct_e + \frac{G}{Q}) (1 - e^{-Nt}) \quad (7.12)$$

iv) 4º CASO

- existe geração de contaminantes
- o ar externo contém contaminantes
- o ambiente inicialmente contém contaminantes

$$Ct_{int}(t) = \left(Ct_e + \frac{G}{Q} \right) (1 - e^{-Nt}) + C_o e^{-Nt} \quad (7.13)$$

Os quatro casos discutidos anteriormente, são mostrados para um exemplo específico na Figura 7.5, onde analisa-se a influência do sistema de ventilação sobre o teor de poluentes em um determinado ambiente. No caso em questão, a edificação tipo C, quando submetida a um diferencial de temperatura entre o ar interno (28°C) e externo de (25°C), na ausência de estratificação da temperatura interna e da ação do vento, apresentou uma vazão de ar induzida de 1,3 trocas de ar por hora. Admitindo-se esta vazão constante, ao longo do tempo, pode-se avaliar a variação da concentração de um determinado poluente, em função do tempo e em diversas condições, conforme ilustrado na Figura 7.5.

Para facilitar a interpretação dos resultados, resolveu-se trabalhar com a concentração expressa em p.p.m. (partes por milhão). Para tanto tornou-se necessário exprimir a taxa de geração de poluente, G , em m^3/s e multiplicar a relação (G/Q) , na equação (7.9) por 10^6 . Os casos analisados, na Figura 7.5, são os seguintes:

- | | | | |
|------|---------------------------|---------------------------|---|
| i) | $Ct_e = 0,$ | $C_o = 1200 \text{ ppm},$ | $G = 0,$ |
| ii) | $Ct_e = 300 \text{ ppm},$ | $C_o = 0,$ | $G = 0,$ |
| iii) | $Ct_e = 300 \text{ ppm},$ | $C_o = 0,$ | $G = 11,3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/s \text{ e}$ |
| iv) | $Ct_e = 300 \text{ ppm},$ | $C_o = 1200 \text{ ppm},$ | $G = 11,3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/s$ |

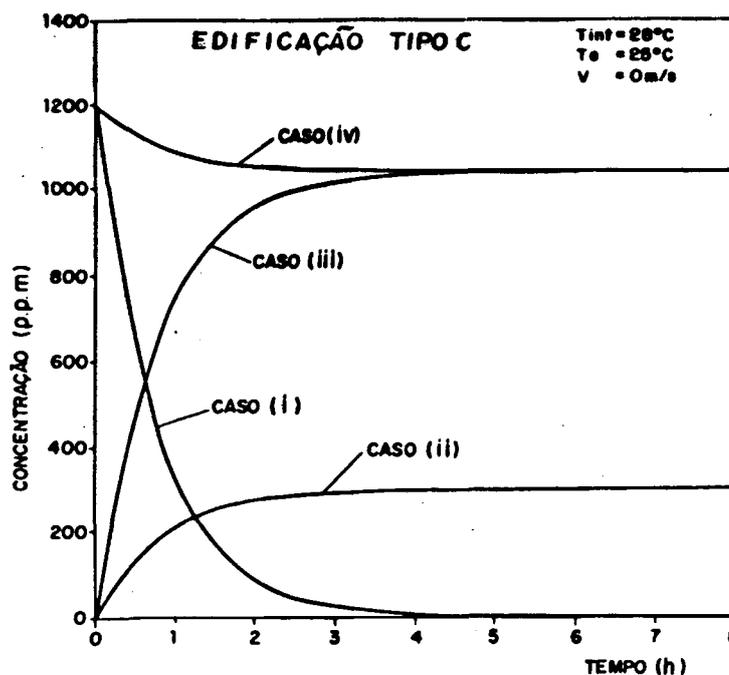


FIGURA 7.5- Variação temporal da concentração de poluentes do ar interno para uma edificação zona única. (N= 1,3 trocas/hora)

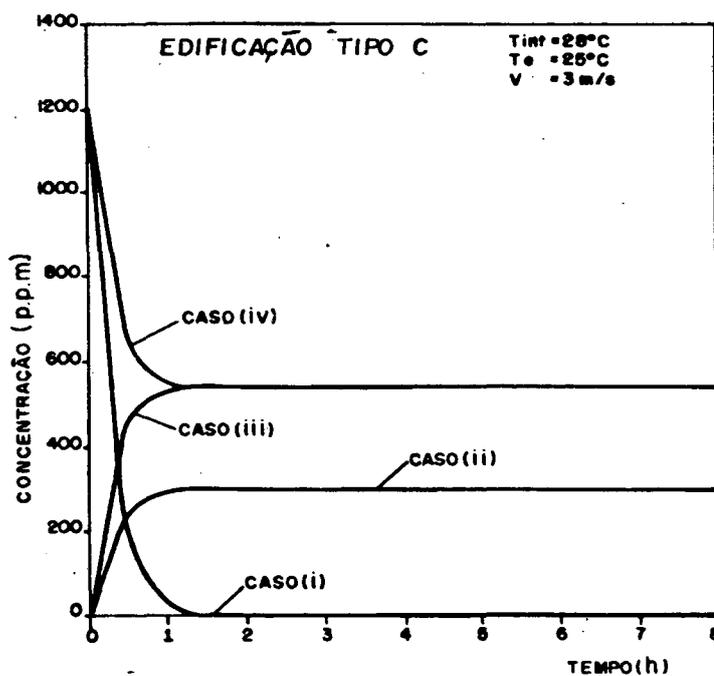


FIGURA 7.6- Variação temporal da concentração de poluentes do ar interno para uma edificação zona única. (N= 4,0 trocas/hora)

O poluente considerado é o gás carbono o qual é gerado pelas pessoas presentes no ambiente em estudo (240 pessoas x $4,72 \times 10^{-6}$ m³/pessoa s). Considerando-se a equação (7.9) e os casos apresentados anteriormente, verifica-se que a concentração com o acréscimo de tempo tende para os seguintes valores.

i) zero, ii) 300 ppm, iii) e iv) $10^6 G/Q + C_e$ (o que é igual no caso em questão a 1038 ppm)

Na Figura 7.6, mostra-se uma situação, semelhante a anterior, considerando-se a influência do vento sobre a edificação de uma forma a elevar a vazão de ar induzida para 4,0 trocas/hora. Observa-se que as concentrações limites são atingidas mais rapidamente para todos os casos. Para os casos iii) e iv), a concentração limite tende para um valor menor em razão da renovação do ar ser maior. Tal valor limite, neste exemplo específico, atinge o valor de 542 p.p.m.

7.2.2. SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO GERAL DA DILUIÇÃO PARA ZONAS MÚLTIPLAS

O procedimento a ser apresentado destina-se à avaliação da concentração de poluentes num ambiente contendo diversas zonas com concentrações iniciais que podem ser diferentes entre si.

Para tanto o fluxo de ar entre as zonas adjacentes, Q_{ij} , é avaliado inicialmente através do programa FLOW2.

Assumindo-se condições de mistura perfeita em cada zona e aplicando-se a equação da conservação da massa, obtém-se:

$$V_j \frac{dC_j}{dt} = \sum_{i=1}^L Q_{ij} C_i + G_j \quad (7.14)$$

onde:

i = i -ésima passagem de ar

j = j -ésima zona

Q_{ij} = vazão de ar através da passagem, i , para j -ésima zona (m^3/s)

G_j = taxa de geração de contaminantes na j -ésima zona (kg/s)

CC = concentração do poluente no ar adentrando ou saindo da j -ésima zona (kg/m^3)

Para analisar-se uma edificação com zonas múltiplas torna-se necessário resolver, simultaneamente, um sistema de equações diferenciais. Apenas para exemplificar, apresenta-se o conjunto de equações diferenciais inerente à edificação mostrada na Figura 7.7.

$$Vz_1 \frac{dCt_1}{dt} = Q_{11} Ct_e - Q_{12} Ct_1 - Q_{13} Ct_1 + G_1 \quad (7.15)$$

$$Vz_2 \frac{dCt_2}{dt} = +Q_{21} Ct_1 - Q_{22} Ct_2 + Q_{23} Ct_e + G_2 \quad (7.16)$$

$$Vz_3 \frac{dCt_3}{dt} = +Q_{31} Ct_2 - Q_{32} Ct_3 + Q_{33} Ct_1 + G_3 \quad (7.17)$$

A partir de um campo inicial de concentração nas zonas e de vazões pré-determinadas, resolve-se o sistema de equações apresentado através do método de Runge-Kutta (apêndice E)

O método descrito anteriormente aplica-se a um único poluente. No caso de mais de um poluente, deve-se fazer a priori uma análise para verificar-se qual deles é mais significativo.

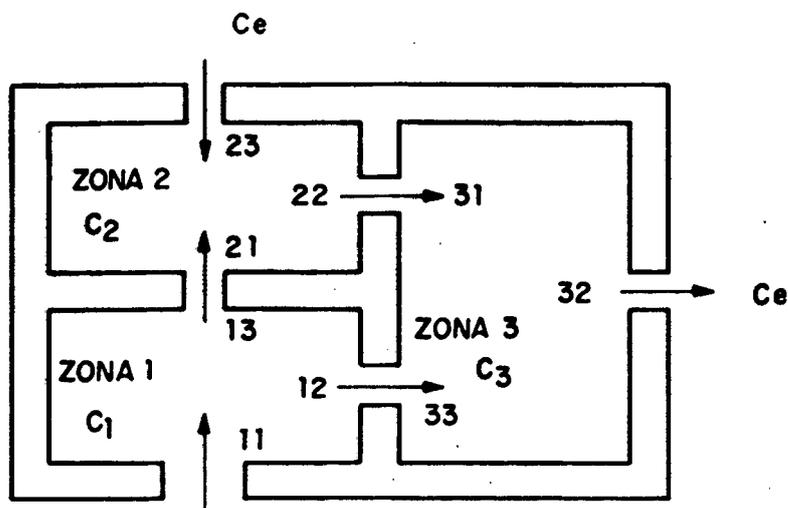


FIGURA 7.7- Edificação com zonas múltiplas e com concentrações de poluentes diferentes em cada zona.

A utilização da equação (7.14) será demonstrada através da análise das Figuras 7.8 a 7.10.

Utilizando-se a edificação tipo C, e mantendo-se constante o diferencial de temperatura entre o ar interno (28°C) e externo (25°C) e variando-se a direção e a intensidade do vento, pode-se analisar a variação da concentração de poluentes, em cada zona, em função do tempo. Em todos os casos analisados a vazão de ar externo foi considerada constante ao longo do tempo.

Na Figura 7.8 considerou-se a concentração inicial, em cada zona, como sendo igual a 1000 p.p.m., a concentração do ar externo como sendo igual a 300 p.p.m. e nenhuma geração de contaminantes no interior do ambiente. Na Figura 7.8.a, desprezou-se a ação do vento e considerou-se apenas o efeito chaminé, sendo as vazões resultantes de ar induzidas, em cada zona, indicadas na Figura em questão. Pode-se observar, na Figura 7.8.a, que as zonas que apresentam uma maior penetração de ar externo, apresentam uma redução mais rápida da concentração de poluentes.

Na Figura 7.8. b, observa-se que com o aumento da vazão de

ar induzida, devido à ação do vento sobre a edificação, ocorre uma aceleração no processo de redução de concentração interna do poluente em todas as três zonas consideradas.

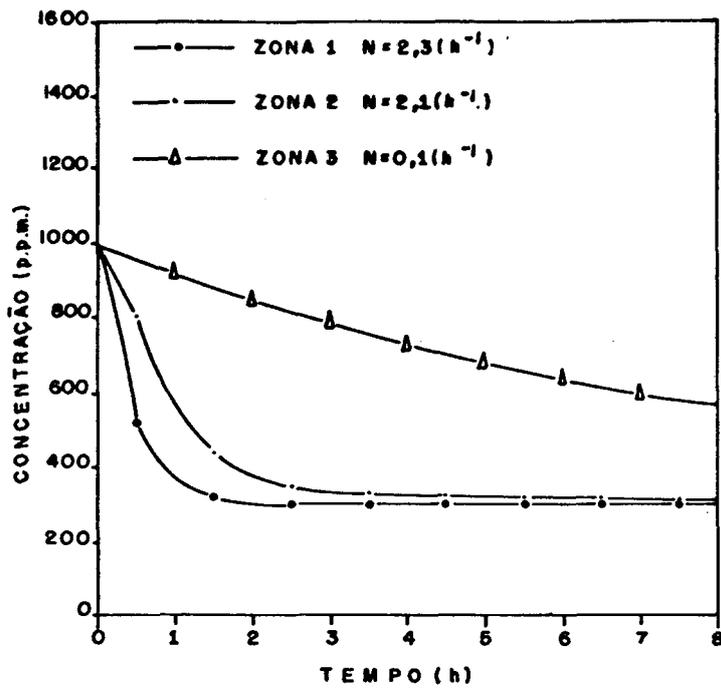
Na Figura 7.9, considera-se o ar externo com uma concentração de poluentes da ordem de 300 p.p.m., assim como também as concentrações iniciais, em cada zona.

Na Figura 7.9.a, observa-se que, devido às baixas trocas de ar externo, a concentração de poluentes, na zona 3, não é reduzida devido à existência de uma geração interna de poluente, muito maior do que o potencial de renovação do ar interno devido a penetração de ar externo. Na Figura 7.9.b, por outro lado, considerando-se a ação do vento sobre a edificação, verifica-se que todas as concentrações limites são atingidas mais rapidamente do que no caso anterior, e que as mesmas tendem para valores inferiores.

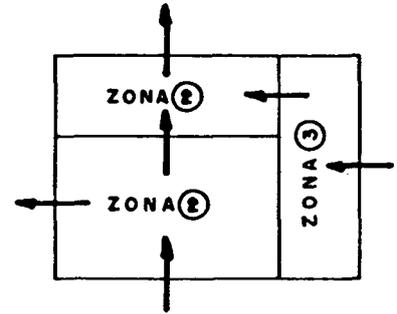
As zonas 1, 2 e 3 apresentam, respectivamente uma taxa de geração de poluentes (gás carbono) de $755,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $188 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ e $188 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, correspondentes a uma taxa de ocupação de 160, 40 e 40 pessoas.

Na Figura 7.10, considera-se a concentração do ar externo como sendo igual a 300 p.p.m. e despreza-se a geração de poluentes em cada zona. A concentração inicial em cada zona, assim como também as vazões de ar externo são indicadas na Figura em questão.

Nas Figuras 7.10.a e 7.10.b pode-se observar como a distribuição inicial de concentrações, influi sobre a taxa de redução de poluente em cada zona. Estas Figuras mostram, também, o efeito da movimentação do ar interno, a qual faz com que a concentração em uma determinada zona tenha efeito sobre a concentração resultante, em uma zona adjacente.



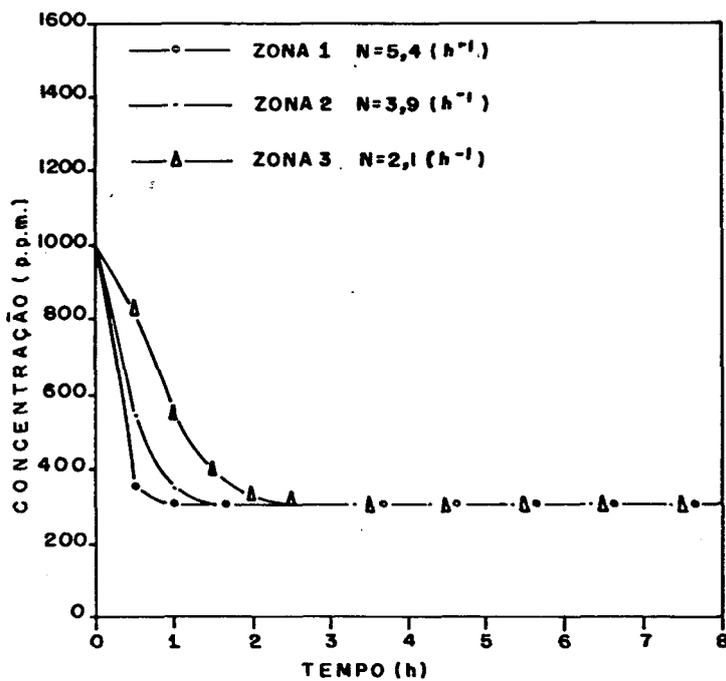
a) SEM AÇÃO DO VENTO



$T_e = 28^\circ\text{C}$

$T_{int.} = 25^\circ\text{C}$

$C_e = 300\text{ppm.}$



b) COM VELOCIDADE DO VENTO DE 3m/s

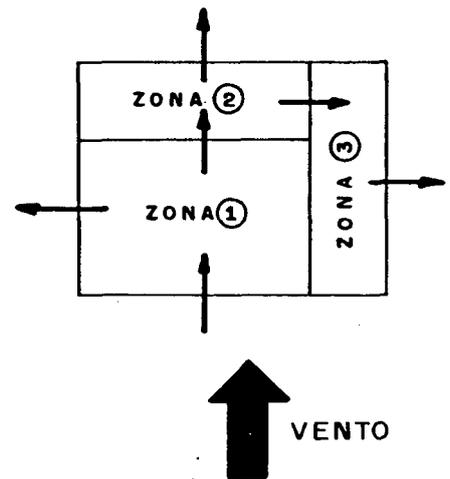
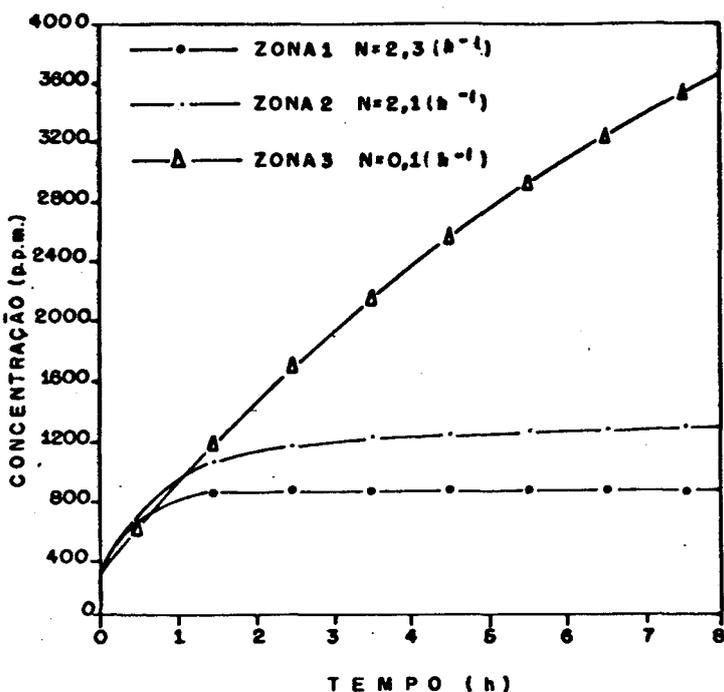
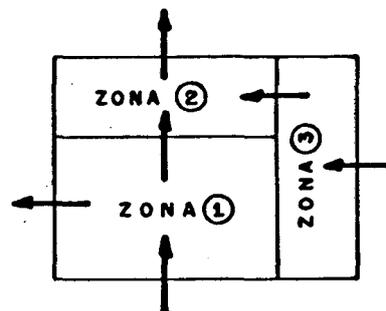


FIGURA 7.8- Efeito da vazão de ar externo sobre a diluição de poluente em edificações com zonas múltiplas e sem geração interna de poluente.



a) SEM AÇÃO DO VENTO



$T_e = 28^\circ C$

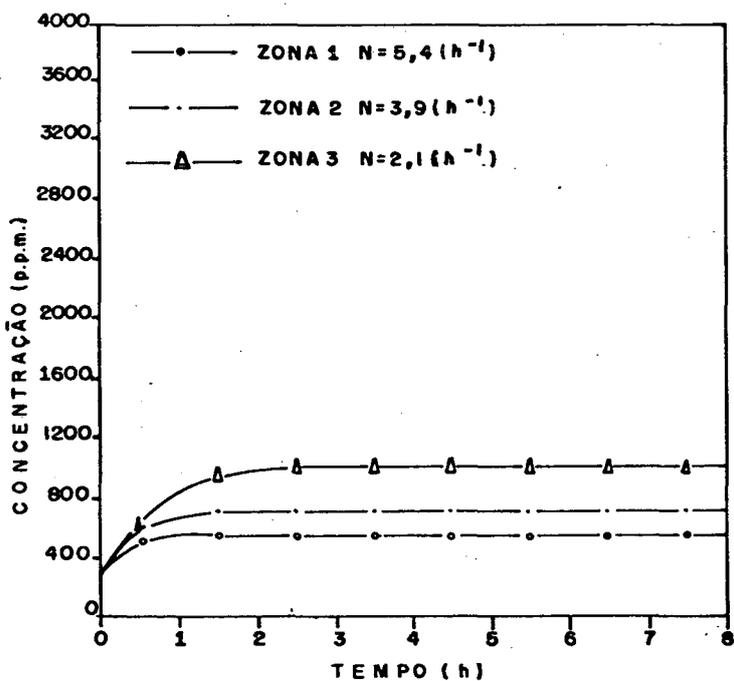
$T_{int} = 25^\circ C$

$C_e = 300 \text{ p.p.m.}$

Geração zona 1 = $755,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

Geração zona 2 = $188,8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

Geração zona 3 = $188,8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$



b) COM VELOCIDADE DO VENTO DE 3 m/s

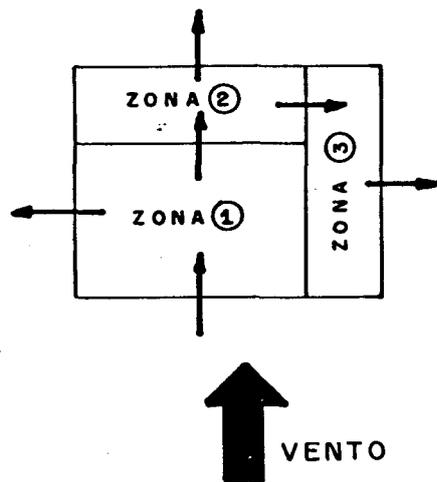
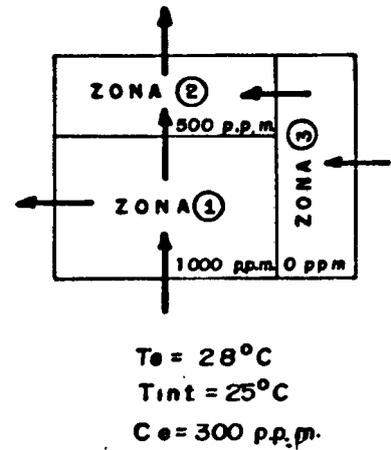
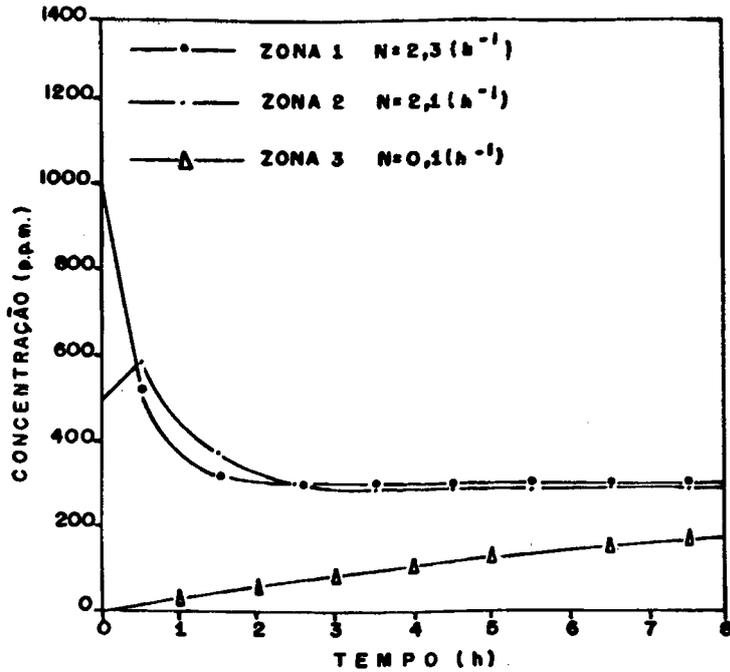
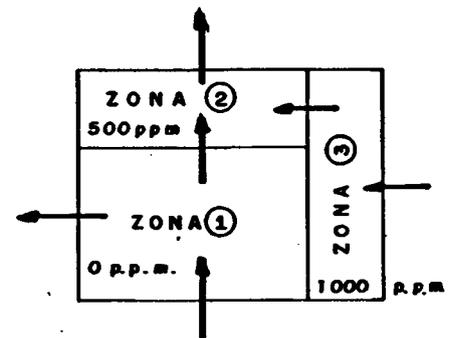
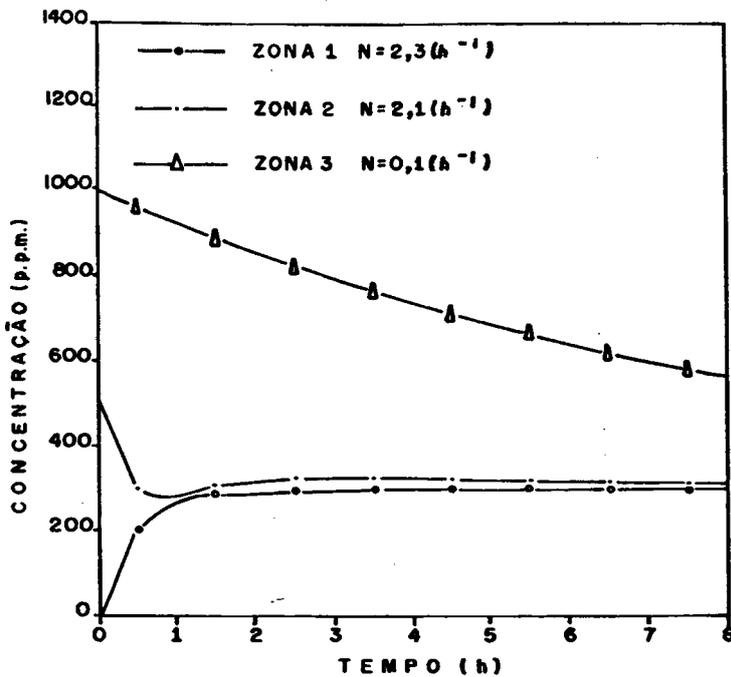


FIGURA 7.9- Efeito da vazão de ar externo sobre a diluição de poluente em edificações com zonas múltiplas e com geração interna de poluente.



a) DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES INICIAIS - 1



b) DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES INICIAIS - 2

FIGURA 7.10- Efeito da vazão de ar externo sobre a diluição de poluente, em edificações com zonas múltiplas, sem geração interna de contaminante e com concentrações iniciais diferentes em cada zona.

8. ANÁLISE DAS CONDIÇÕES PSICROMÉTRICAS DO AR INTERNO

8.1. MODELAÇÃO MATEMÁTICA

Considerando-se que a pressão interna do ambiente é, praticamente, igual à pressão atmosférica, necessita-se determinar apenas duas propriedades psicrométricas para estabelecer-se o estado do ar. Como o ar externo pode trocar calor com o interno tanto na forma sensível como latente, decidiu-se estabelecer equações que possibilitem calcular a variação temporal da umidade absoluta e da entalpia do ar interno, a partir de condições iniciais pré-estabelecidas. Com estas duas propriedades determinadas pode-se, com o auxílio da teoria básica de psicrometria (apêndice F), determinar, por exemplo, o comportamento da umidade relativa do ar interno em função do tempo.

Para determinar-se a variação da umidade absoluta, dentro das diversas zonas de uma edificação, utilizar-se-á um procedimento semelhante ao usado para determinar a diluição de contaminantes.

Desta forma, aplica-se a equação da continuidade em cada zona, e obtém-se:

$$\frac{d}{dt} (M_j W_j) = \sum_{i=1}^l \dot{m}_{ij} W_j + G W_j \quad (8.1)$$

onde:

M_j = massa de ar seco na j -ésima zona ($\text{kg}_{\text{ar seco}}$)

\dot{m}_{ij} = fluxo mássico de ar seco através da passagem i
para ou da j -ésima zona ($\text{kg}_{\text{ar seco}}/\text{s}$)

GW_j = geração de vapor d'água na j-ésima zona ($\text{kg}_{\text{vapor d'água}}/\text{s}$)

t = tempo (s)

ℓ = número de passagens de ar na j-ésima zona

W_j = umidade absoluta do ar adentrando ou saindo

da j-ésima zona ($\text{kg}_{\text{vapor d'água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$)

Para determinar-se a variação da entalpia, aplica-se a equação da energia na forma que se segue:

$$\frac{d}{dt} (M_j H_j) = \sum_{i=1}^{\ell} \dot{m}_{ij} H_j + QT_j \quad (8.2)$$

onde:

H_j = entalpia do ar adentrando ou saindo da

j-ésima zona ($\text{kJ}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$)

QT_j = carga térmica ambiente na j-ésima zona (kW)

Para determinar-se o comportamento da umidade relativa, torna-se necessário resolver, simultaneamente, as equações (8.1) e (8.2), para cada zona da edificação. A título de exemplificação apresentam-se tais equações para a edificação mostrada na Figura 8.1.

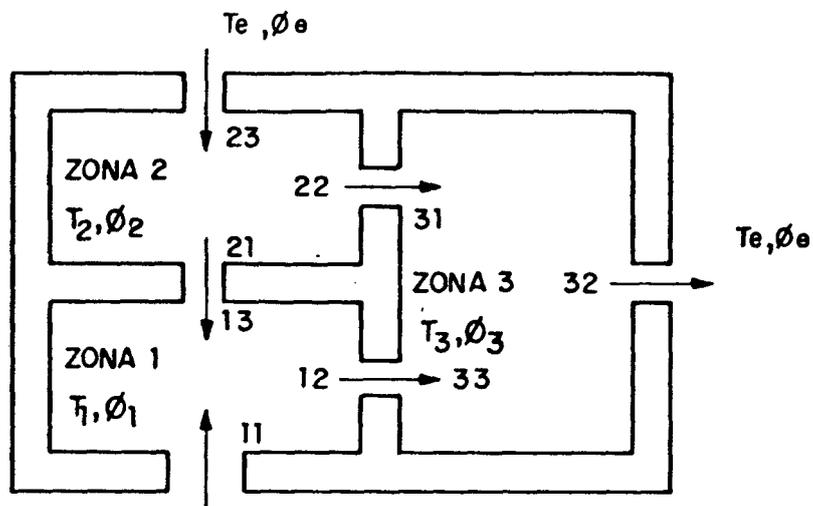


FIGURA 8.1- Edificação com zonas múltiplas e com umidade relativa diferente em cada zona.

i) Equação (8.1)

$$\frac{d}{dt}(M_1 W_1) = + \dot{m}_{11} W_{ext} - \dot{m}_{12} W_1 + \dot{m}_{13} W_2 + GW_1 \quad (8.3)$$

$$\frac{d}{dt}(M_2 W_2) = - \dot{m}_{21} W_2 - \dot{m}_{22} W_2 + \dot{m}_{23} W_{ext} + GW_2 \quad (8.4)$$

$$\frac{d}{dt}(M_3 W_3) = + \dot{m}_{31} W_2 - \dot{m}_{32} W_2 + \dot{m}_{33} W_1 + GW_3 \quad (8.5)$$

ii) Equação (8.2)

$$\frac{d}{dt}(M_1 H_1) = + \dot{m}_{11} H_{ext} - \dot{m}_{12} H_1 + \dot{m}_{13} H_2 + QT_1 \quad (8.6)$$

$$\frac{d}{dt}(M_2 H_2) = - \dot{m}_{21} H_2 - \dot{m}_{22} H_2 + \dot{m}_{23} H_{ext} + QT_2 \quad (8.7)$$

$$\frac{d}{dt}(M_3 H_3) = + \dot{m}_{31} H_2 - \dot{m}_{32} H_3 + \dot{m}_{33} H_1 + QT_3 \quad (8.8)$$

A partir das vazões em cada passagem de ar, determinada pelo programa FLOW2, e admitindo-se valores iniciais para a

temperatura e umidade relativa do ar interno e ainda assumindo-se uma taxa interna de geração de vapor d'água e de calor, pode-se determinar o comportamento temporal da umidade relativa e da temperatura desde que, também, as condições psicrométricas do ar externo sejam especificadas.

Para tanto resolve-se o conjunto de equações diferenciais, apresentado anteriormente, o que é feito no programa FLOW2, através do método de Runge-Kutta (Apêndice E).

8.2. POTENCIALIDADES DA MODELAÇÃO

Considerando-se a edificação tipo C, sem repartições internas e com uma geração interna de calor da ordem de 60 kW, pode-se verificar o efeito de tal geração sobre a temperatura e a umidade relativa do ar interno. Para tanto a Figura 8.2, ilustra o mencionado efeito quando a umidade relativa e a temperatura do ar interno e externo são mantidas nos valores iguais de, respectivamente, 50% e 25 °C. Como toda a transferência de calor ocorre somente na forma sensível, somente a temperatura do ar será alterada, sendo esta alteração tanto maior quanto menor for a taxa de penetração de ar externo. Mantendo-se constante o valor da umidade absoluta, a umidade relativa apresentará uma redução devida ao aumento da temperatura.

A Figura 8.3 ilustra, para a edificação tipo C, o comportamento da umidade relativa do ar interno, quando a transferência de calor ocorre somente na forma latente e também somente em decorrência de trocas de calor latente com o ar externo e com zonas adjacentes (geração de vapor d'água nas zonas é desprezada). Conforme pode-se observar, na Figura 8.3, devido à

maior umidade absoluta do ar externo, a umidade relativa nas zonas consideradas é aumentada do valor inicial até uma condição limite, sendo este aumento tanto mais rápido quanto maior for o número de trocas de ar apresentado pela zona em questão. Pode-se observar também que toda a umidade adentra a edificação, através da zona 1, sendo posteriormente transferida às outras zonas, devido à movimentação do ar interno.

A Figura 8.4. mostra, para a edificação tipo C, o efeito de uma geração de calor sensível, em uma determinada zona, e o conseqüente efeito sobre a umidade relativa e a temperatura do ar interno desta e das demais zonas. As trocas de ar em cada zona são as mesmas indicadas na Figura 8.3. O efeito, apresentado na Figura 8.4, é similar ao apresentado na Figura 8.2, mas, nesta oportunidade, demonstra-se a potencialidade do programa em considerar os efeitos da movimentação do ar interno, em edificações com zonas múltiplas, sobre as condições psicrométricas do ar interno.

Finalmente, a Figura 8.5, ilustra, para a edificação tipo C, e com as mesmas taxas de renovação de ar externo, utilizadas na Figura 8.3. e 8.4, o efeito de uma geração de vapor d'água, na zona 1, da ordem de $6,9 \times 10^{-3}$ kg/s. Tal geração é considerada ocorrendo associada com uma liberação de calor, QT, da ordem de 17,57 kW, correspondendo ao produto da massa de vapor d'água sendo liberada pela entalpia do vapor d'água saturado na temperatura de 25 °C. Conforme pode ser observado, a umidade relativa da zona 1 é aumentada enquanto a temperatura mantém-se constante. Este efeito é transmitido às outras zonas, devido ao movimento do ar interno.

Caso a energia associada com a geração de vapor d'água

fosse superior/inferior ao valor de 17,57 kW, ocorreria um aumento/redução da temperatura do ar interno.

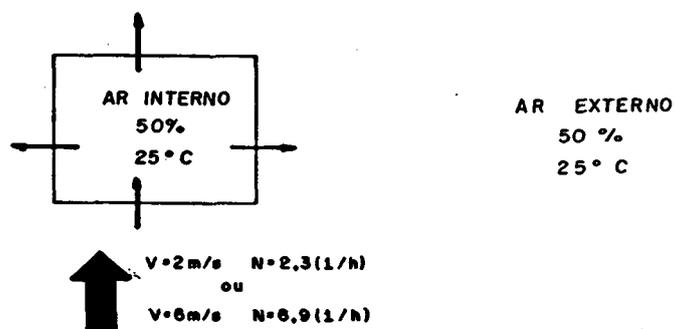
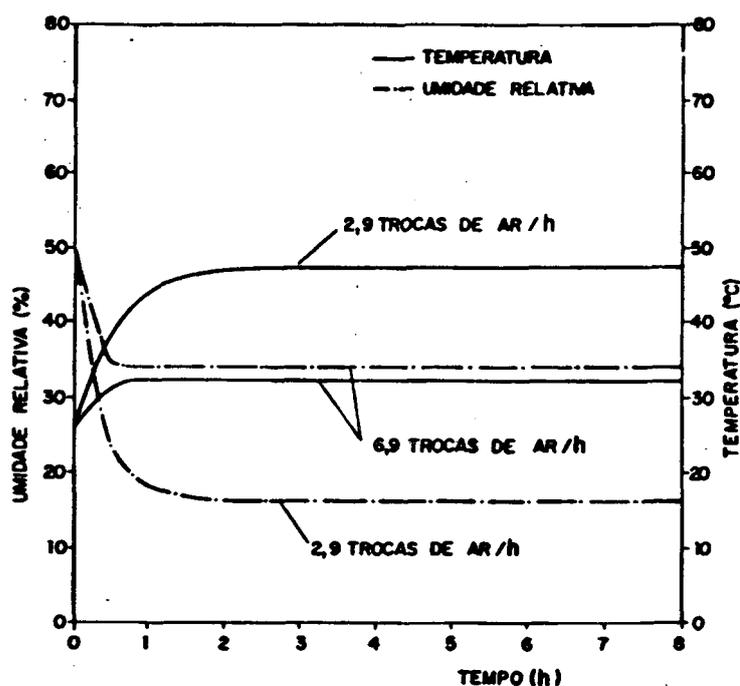


FIGURA 8.2- Variação da umidade relativa e da temperatura do ar interno em decorrência de um ganho de calor sensível de 60 kW.

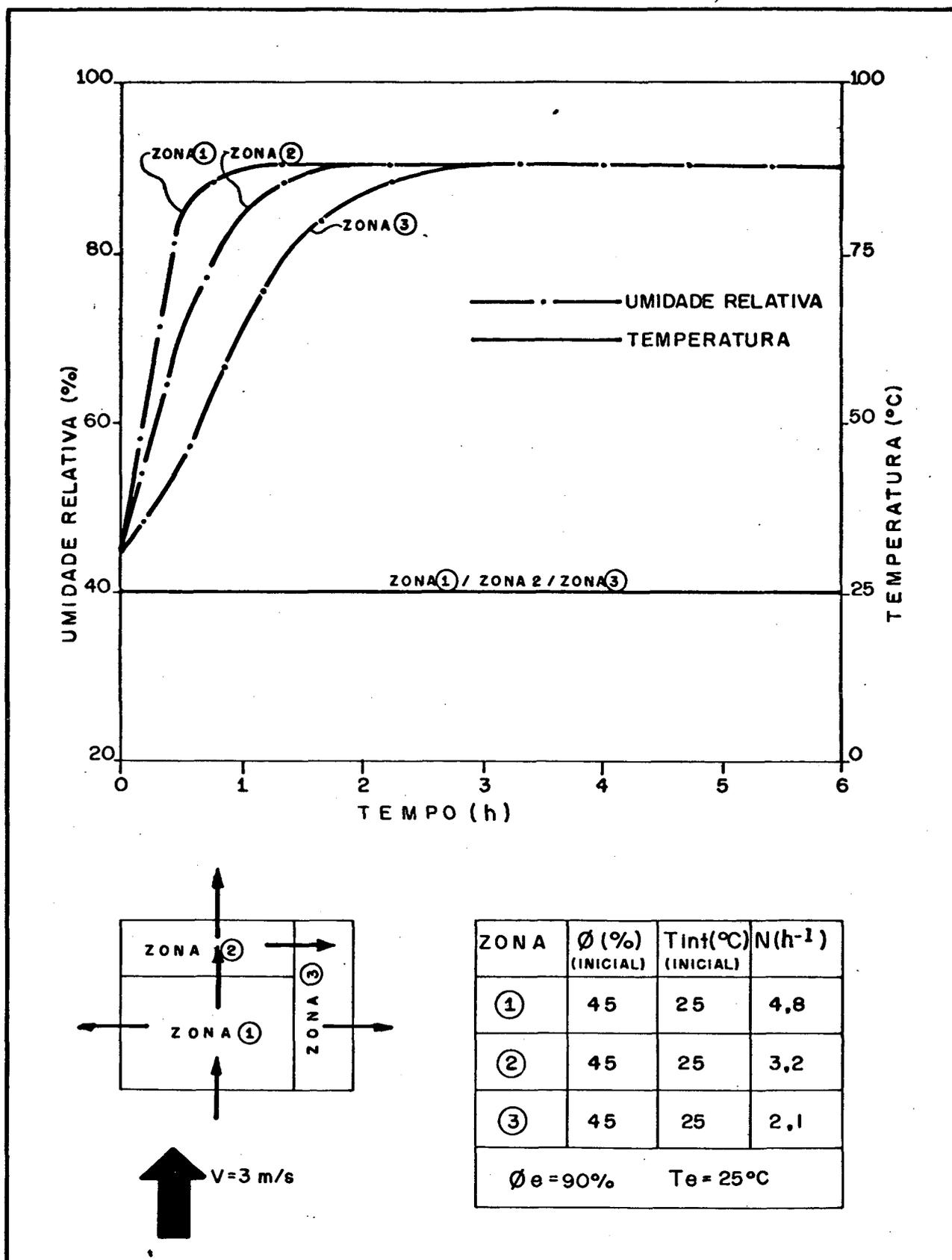


FIGURA 8.3- Variação da temperatura e da umidade relativa do ar interno em decorrência de trocas de calor latente com o ar externo.

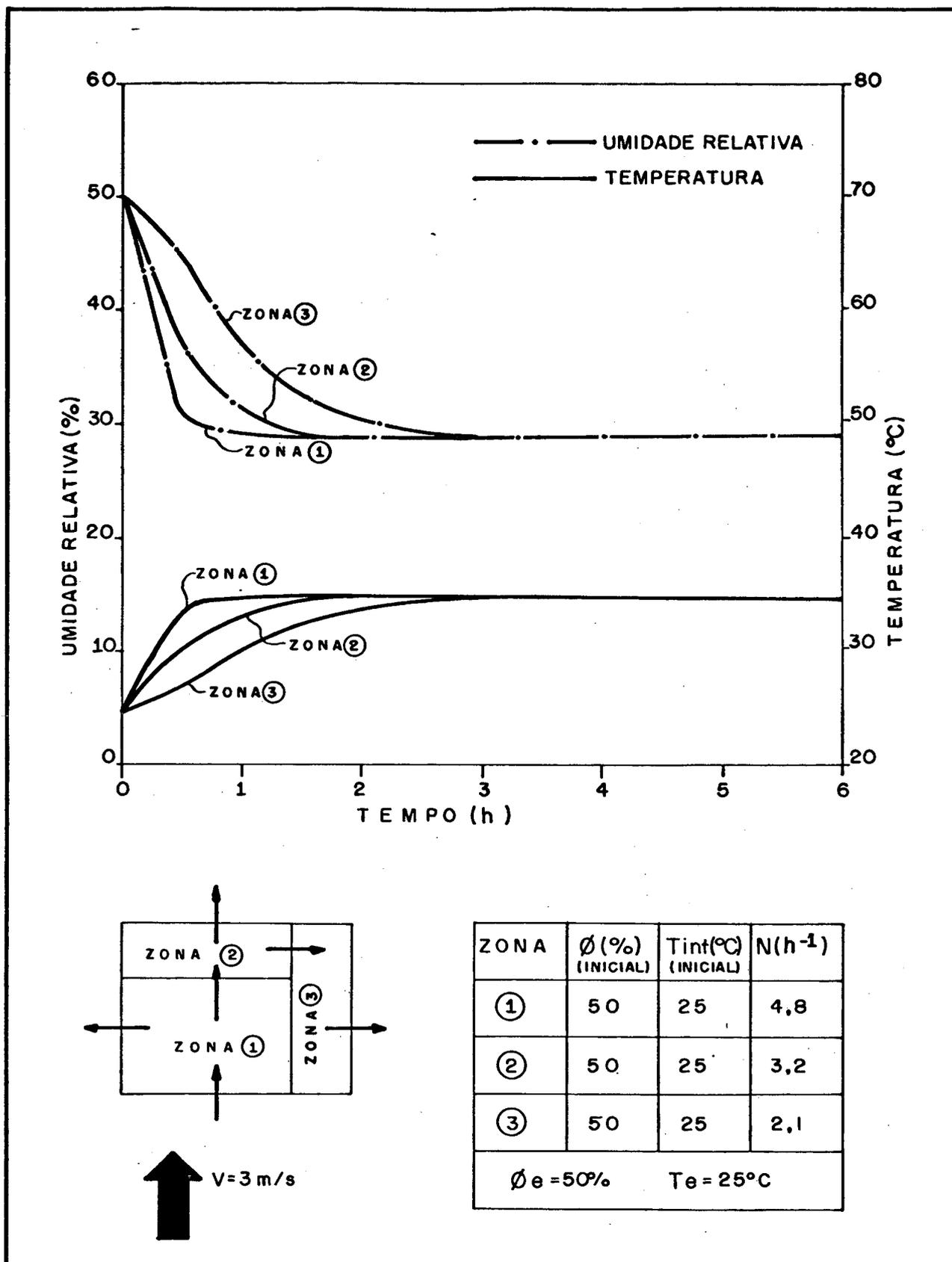


FIGURA 8.4- Variação da temperatura e da umidade relativa do ar interno em decorrência de uma geração de calor sensível de 30 kW na zona 1.

9. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente trabalho trata do desenvolvimento de um modelo matemático capaz de simular processos de infiltração/ventilação de ar em edificações. A estrutura computacional desenvolvida, denominada FLOW2, reúne várias características, geralmente não encontradas, de uma maneira simultânea, nos modelos apresentados na bibliografia especializada. Assim sendo, o programa leva em consideração o perfil da camada limite atmosférica em função do tipo de terreno, a velocidade e a direção do vento, a estratificação da temperatura interna, a diferença entre as temperaturas do ar interno e externo e as dimensões da edificação.

Como características adicionais, o programa FLOW2, pode ser empregado tanto para edificações com zona única como para edificações com zonas múltiplas assim também adequa-se à análise da variação da concentração de poluentes e das condições psicrométricas do ar interno, em função da vazão de ar externo induzida.

Em contraste com outros modelos, o presente trabalho procura calcular, internamente, os coeficientes de pressão, reduzindo assim, em muito, os graus de liberdade da simulação. Obviamente, este procedimento é, ainda, limitado, devido ao número bastante diversificado de formas arquitetônicas existentes a aos poucos dados experimentais disponíveis.

A comparação das estimativas do presente modelo, com os dados experimentais, fornecidos pelo A.I.V.C., para três conjuntos de dados padrões, revelou-se adequado. Infelizmente,

até o presente momento, não existe um banco de dados experimentais, capaz de propiciar um exercício de validação para situações de ventilação natural.

O programa FLOW2, vem a se constituir num forte instrumento de apoio para a análise do desempenho de sistemas de ventilação natural, assim como também pode ser incorporado a um programa geral de simulação de edificações, como forma de averiguar o impacto do sistema de ventilação sobre os requisitos energéticos, necessários ao sistema de condicionamento de ar.

Para melhorar a aplicabilidade e também a confiabilidade do presente modelo, sugere-se o desenvolvimento de testes experimentais em aberturas, visando-se a determinação das características de vazamento das mesmas. Ou mesmo modelar-se matematicamente os coeficientes para os diversos tipos de aberturas [30], facilitando-se assim a simulação de edificações para estudar-se o movimento do ar no interior das edificações.

10- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - ASHRAE, Handbook of Fundamentals, ASHRAE Inc., New York, 1985.
- [2] - LIDDAMENT, M.W., Air Infiltration Calculation Techniques - An Applications Guide, A.I.V.C., Old Bracknell, U.K., June 1986.
- [3] - MESQUITA, A.L.S., GUIMARÃES, F.A. e NEFUSSI, N., Engenharia de Ventilação Industrial, Editora Edgard Blücher LTDA, 1ª edição, São Paulo, 1977.
- [4] - STOECKER, W.F. e JONES, J.W., Refrigeração e Ar Condicionado, Mc Graw-Hill do Brasil, São Paulo, 1985.
- [5] - COBLENTZ, C.W. and ACHENBACH, P.R., Field Measurements of Air Infiltration in Ten Electrically-Heated Houses, ASHRAE Transactions, vol. 69, pg. 358-365, 1963.
- [6] - LIDDAMENT, M.W. and ALLEN, C., The Validation and Comparison of Mathematical Models of Air Infiltration, Air Infiltration Centre Technical Note A.I.C.-11, Old Bracknell U.K., 1983.
- [7] - SHERMAN, M.T. and GRIMMSRUD, D.T., Infiltration-Pressurization Correlation Simplified Physical Modelling, ASHRAE Transactions, vol. 86, part II, pp. 778-807, 1980.

- [8] - MELO, C., Improved Convective Heat Transfer and Air Infiltration Models for Building Thermal Simulation, Ph.D. Thesis, Cranfield Institute of Technology, Bedford, U.K., June 1985.
- ✓ [9] - MELO, C., Development and Validation of a Model for Air Infiltration Rates into Buildings, IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Florianópolis-SC, pp. 427-430, /Dezembro/1987.
- ✓ [10] - MELO, C., FLOW - An Algorithm for Calculation Air Infiltration into Buildings, ICBEM'87, Lausanne, Switzerland, pp. 5-12, 1987.
- [11] - PENWARDEN, A. D., WISE, A. F. E., Wind Environment Around Buildings, B.R.E. Report, London, 1975.
- [12] - COUNIHAN, J. , Adiabatic Atmospheric Boundary Layers: A Review and Analysis of Data from the Period 1880-1972, Atmospheric Environment, Vol 9, No. 10, pp 871-905, 1975.
- [13] - DAVENPORT, A. G., The Relationship of Wind Structure to Wind Loading, Proc. National Physical Laboratory Symposium No. 16, Wind Effects on Buildings and Structures, Vol.1, p.p. 54-111, London, 1965.
- ✓ [14] - NB-599, Forças Devidas ao Vento em Edificações, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1978.

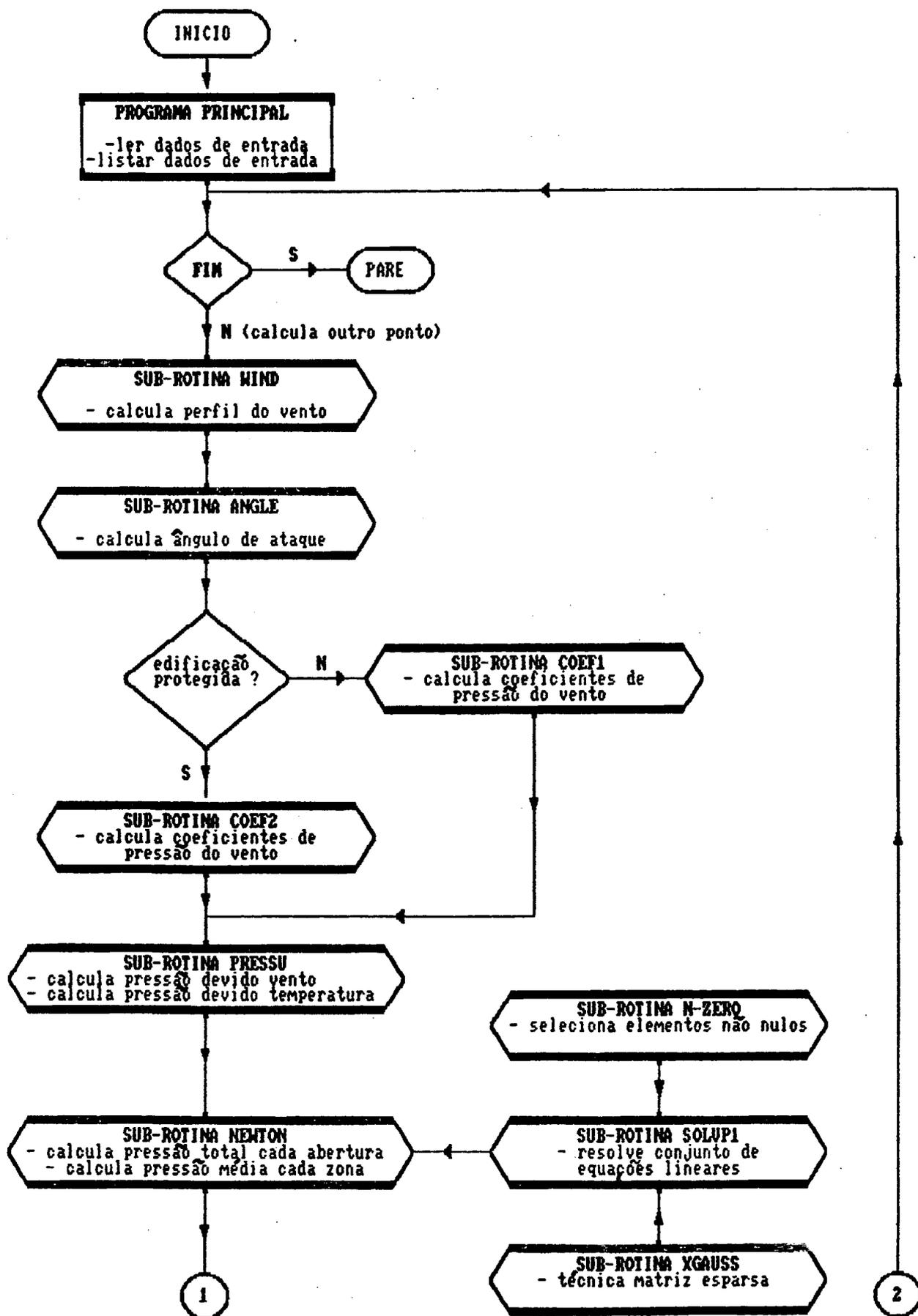
- [15]- ALLEN, C.M., Wind Pressure Data Requirements for Air Infiltration Calculation, Air Infiltration Centre Technical Note A.I.C.-13, Old Bracknell, U.K., 1984.
- [16]- BOWEN, A.J., A Wind Tunnel Investigation Using Simple Building Models to Obtain Mean Surface Wind Pressure Coefficients for Air Infiltration Estimates, National Aeronautical Establishment Report LTR LA209, N.R.C.C., Canada, 1976.
- [17]- AKINS, R.E., PETERKA, J.A., and CERMAK, J.E., Average Pressure Coefficients for Rectangular Buildings, Proc. 5th International Conference on Wind Engineering, Vol 1, pp. 369-380, Fort Collins, Colorado - USA, 8-14 July 1979.
- [18]- BAILEY, A. and VINCENT, N.D.G. Wind Pressure on Buildings Including Effects of Adjacent Buildings, Journal of the Institute of Civil Engineering, Vol I, pp. 19-20, November 1942.
- [19]- SHAW, C.Y., A Method for Predicting Air Infiltration Rates for a Tall Building Surrounded by Lower Structures of Uniform Height, ASHRAE Transactions, Vol. 85, part I, pp.72-84, 1979.
- [20]- SWAMI, M.V. and Chandra, S., Correlations for Pressure Distribution on Buildings and Calculation of Natural-Ventilation Air Flow, ASHRAE Transactions, vol. 94, Part I, pp. 243-266, 1988.

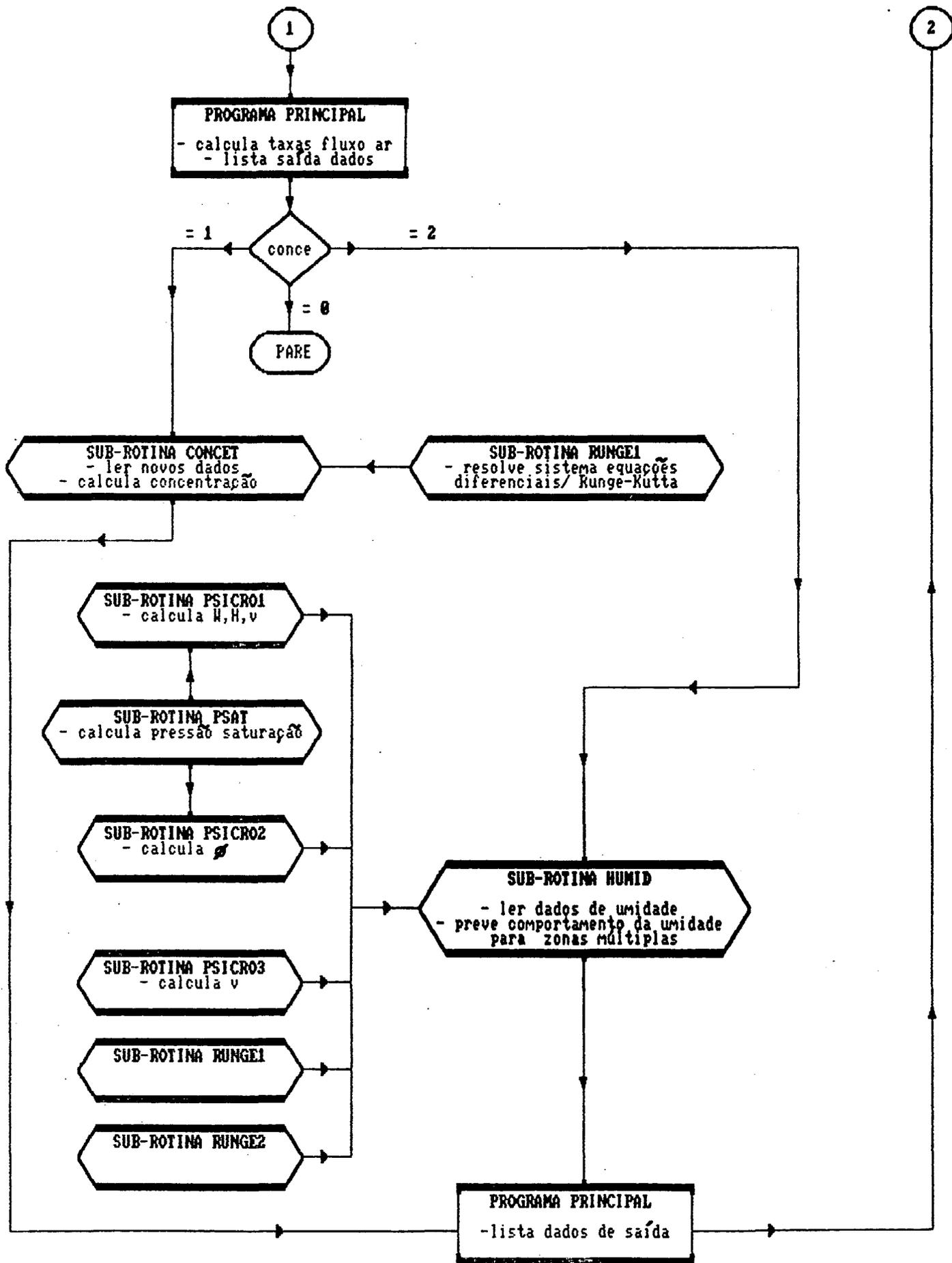
- [21]- TAMURA, G.T. and WILSON, A.G. , Pressure Differences Caused by Chimney Effect in Three High Buildings, ASHRAE Transactions, Vol 73, part II, pp. II.1.1-II.1.10, 1967.
- [22]- STOECKER, W. F., Design of Thermal Systems, 3rd Edition, Ed. Mc Graw-Hill, New York, 1989. :
- [23]- WALTON, G.N., Air Flow and Multi-Room Thermal Analysis, ASHRAE Transactions, Vol. 88, part II, pp. 78-91, 1982.
- [24]- BATURIN, V.V., Fundamentos de Ventilacion Industrial, Editorial Labor S.A., Barcelona, 1976.
- [25]- LIDDAMENT, M.W., A Review and Bibliography of Ventilation Effectiveness - Definitions, Measurement, Design and Calculation, A.I.V.C., Old Bracknell, U.K., 1987.
- [26]- S. Gill, A Process for the Step-by-Step Integration of Differential Equations in an Automatic Computing Machine, "Proc. Cambridge Phil. Soc., Vol. 47, pp. 96-108, 1951.
- [27]- WHITE, F.M., Viscous Fluid Flow, Mc Graw-Hill, Inc., New York, 1974.
- [28]- Stoecker, W.F., Principles for Air Conditioning Practice, Industrial Press, New York, 1967.
- [29]- GAGGIOLI, R.A., CHARMCHI, M. and ASLAM, S., Psychrometric Analysis for Arbitrary Dry-Gas Mixtures and Pressures Using

Microcomputers, ASHRAE Transactions, Vol. 92, part 1B, pp. 448-460, 1986.

- [30]- CHASTAIN, J.P. and COLLIVER, D.G., Computation of Discharge Coefficients for Laminar Flow in Rectangular and Circular Openings, ASHRAE Transactions, Vol. 93, part II, pp. 2259-2283, 1987.

FLOW2 - FLUXOGRAMA GERAL





APENDICE B

SOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES NÃO LINEARES

MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

Para a solução do conjunto de equações não lineares adotou-se o método de Newton-Raphson [22].

Tal método gerou soluções rápidas em diversos casos testados, porém em outros mostrou ser não convergente. A convergência foi obtida nestes casos pela escolha de um coeficiente de relaxação adequado. Tal coeficiente é diferente para cada caso, não permitindo uma padronização de seu valor [16]. O valor deve ser determinado por intuição ou mesmo por tentativas.

O sistema de equações genérico para o problema é:

$$B_1 = C_{11} (P_{11} - P_1)^{n_{11}} + C_{12} (P_{12} - P_1)^{n_{12}} + \dots + C_{1m} (P_{1m} - P_1)^{n_{1m}} \quad (B.1)$$

$$B_2 = C_{21} (P_{21} - P_2)^{n_{21}} + C_{22} (P_{22} - P_2)^{n_{22}} + \dots + C_{2m} (P_{2m} - P_2)^{n_{2m}} \quad (B.2)$$

$$\begin{array}{ccccccc} \vdots & & & & & & \\ \vdots & & & & & & \\ \vdots & & & & & & \\ \vdots & & & & & & \end{array}$$

$$B_j = C_{j1} (P_{j1} - P_j)^{n_{j1}} + C_{j2} (P_{j2} - P_j)^{n_{j2}} + \dots + C_{jm} (P_{jm} - P_j)^{n_{jm}} \quad (B.3)$$

O procedimento iterativo para resolver-se tais equações é descrito a seguir:

- a) assumir valores arbitrários para as variáveis $P_1, P_2, P_3, \dots, P_m$
- b) calcular os valores dos resíduos $B_1, B_2, B_3, \dots, B_m$
- c) calcular as derivadas parciais de todas as funções em relação a todas as variáveis. Com estes valores forma-se a matriz coeficientes $[A]_{m \times m}$

$$[A]_{m \times m} = \begin{pmatrix} \frac{\partial B_1}{\partial P_1} & \frac{\partial B_1}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial B_1}{\partial P_m} \\ \frac{\partial B_2}{\partial P_1} & \frac{\partial B_2}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial B_2}{\partial P_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial B_m}{\partial P_1} & \frac{\partial B_m}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial B_m}{\partial P_m} \end{pmatrix} \quad (\text{B.4})$$

- d) Com os valores dos resíduos monta-se a matriz residual $[B]_{m \times 1}$

$$[B]_{m \times 1} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ B_m \end{pmatrix} \quad (\text{B.5})$$

e) da expansão em série de Taylor [22], conclui-se que:

$$\begin{bmatrix} A \end{bmatrix}_{m \times m} \times \begin{bmatrix} DX \end{bmatrix}_{1 \times m} = \begin{bmatrix} B \end{bmatrix}_{1 \times m} \quad (\text{B.6})$$

ou seja,

$$\begin{bmatrix} DX \end{bmatrix}_{1 \times m} = \begin{bmatrix} P_{1,\text{anterior}} - P_{1,\text{atual}} \\ P_{2,\text{anterior}} - P_{2,\text{atual}} \\ \vdots \\ P_{m,\text{anterior}} - P_{m,\text{atual}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DX_1 \\ DX_2 \\ \vdots \\ DX_m \end{bmatrix} \quad (\text{B.7})$$

f) resolver simultaneamente, o conjunto de equações lineares (B.6) para determinar a matriz $\begin{bmatrix} DX \end{bmatrix}_1$ (ver apêndice C) .

g) calcular os novos valores de $\begin{bmatrix} P_1, P_2, P_3, \dots, P_m \end{bmatrix}$, não esquecendo quando necessário de utilizar um coeficiente de relaxação diferente de zero.

$$\left[\begin{array}{l}
 P_{1,\text{novo}} = P_{1,\text{velho}} - DX_1 \cdot (\text{coef. relaxação}) \\
 P_{2,\text{novo}} = P_{2,\text{velho}} - DX_2 \cdot (\text{coef. relaxação}) \\
 \vdots \\
 P_{m,\text{novo}} = P_{m,\text{velho}} - DX_m \cdot (\text{coef. relaxação})
 \end{array} \right. \quad (\text{B.8})$$

h) testar a convergência analisando-se o valor absoluto do resíduo $[DX]$. Se a magnitude absoluta de todos os resíduos, for menor que um determinado valor pré-estipulado, o cálculo termina. Caso contrário, volta-se ao item e, utilizando-se os valores atualizados de $P_1, P_2, P_3, \dots, P_m$.

APENDICE C

SOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES LINEARES

C.1. INTRODUÇÃO

Considerando-se a simulação de grandes edificações com múltiplas-zonas e com diversas passagens de ar e/ou para diminuir tempos computacionais e/ou para reduzir as necessidades de memória do computador, torna-se necessária a otimização do processo de solução do sistema de equações lineares.

C.2. TÉCNICA DA MATRIZ ESPARSA

Utilizou-se a técnica da "MATRIZ ESPARSA" descrita por Stoecker [22], a qual introduz melhoramentos em relação ao método tradicional de solução por "ELIMINAÇÃO GAUSSIANA".

A técnica da matriz esparsa consiste em localizar os elementos nulos na matriz coeficientes e criar uma nova matriz onde trabalha-se apenas com elementos não nulos.

O número da linha, coluna e o valor dos elementos não nulos são identificados criando-se três novas matrizes colunas a partir da análise de cada elemento da matriz coeficientes.

Para exemplificar-se considere-se o sistema de equações apresentado a seguir.

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 = 7 \\ 2x_1 - x_3 = 8 \\ 3x_2 + x_3 = 1 \end{cases} \quad (C.1)$$

Em forma de matriz as equações são :

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & -1 \\ 0 & 3 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7 \\ 8 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (C.2)$$

ou

$$[A] \cdot [X] = [B] \quad (C.3)$$

O primeiro passo é percorrer a matriz [A], linha por linha, numerando-se, seqüencialmente, cada elemento não nulo como mostrado a seguir. Chama-se o número circunscrito de designador e cria-se a matriz [C] para armazenar seus valores na seqüência. Assim, C(1)=1, C(2)=2, C(3)=2, C(4)=-1, C(5)=3 E C(6)=1.

$$\begin{array}{ccc} & \overset{1}{1} & \overset{2}{2} & & \\ 1 & & & 0 & \\ & \overset{3}{2} & & \overset{4}{-1} & \\ 2 & & 0 & & \\ & & \overset{5}{3} & \overset{6}{1} & \\ 0 & & & & \end{array} \quad (C.4)$$

A matriz $[IROW]$ por sua vez é formada com o designador do primeiro elemento não nulo em cada linha. Assim,

$$IROW(1) = 1$$

$$IROW(2) = 3$$

$$IROW(3) = 5$$

A matriz JCOL (1,I) indica o número da coluna de cada elemento não nulo. A matriz JCOL(2,I), especifica o designador do próximo elemento na linha após o primeiro elemento não nulo. Assim,

JCOL(1,1) = 1	JCOL(2,1) = 2
JCOL(1,2) = 2	JCOL(2,2) = 0
JCOL(1,3) = 1	JCOL(2,3) = 4
JCOL(1,4) = 3	JCOL(2,4) = 0
JCOL(1,5) = 2	JCOL(2,5) = 6
JCOL(1,6) = 3	JCOL(2,6) = 0

Após a sub-rotina "NZERO" ter determinado as matrizes C, IROW e JCOL, estas são utilizadas por uma outra sub-rotina, denominada "XGAUSS", a qual é uma versão modificada da eliminação gaussiana normal.

A operação promovida por XGAUSS no conjunto de equações, é a eliminação gaussiana básica, porém a maioria das operações envolvendo elementos nulos são omitidas.

A economia que provém de XGAUSS ocorre, durante a procura do maior elemento, quando apenas os valores não nulos são procurados, na troca de linhas, quando somente os elementos não nulos são movidos e também nos processos de triangulação, para produzir zeros abaixo da diagonal principal, e no processo de substituição de trás para frente, quando também apenas os elementos não nulos são considerados.

APENDICE D

VALORES ORIENTATIVOS DE COEFICIENTES DE DESCARGA PARA GRANDES ABERTURAS

Segundo Baturin [24], os valores orientativos do coeficiente de descarga para o cálculo da ventilação em grandes aberturas são descritos na Tabela D.1 .

Tabela D.1- Valores orientativos de coeficientes de descarga para grandes aberturas.

ABERTURA	Cd
Veneziana de madeira - 45° (50 % de área livre)	0,40
Basculante - 60° (uma chapa com eixo central)	0,58
Aberturas com cantos vivos ($l/D_h = 0,2$)	0,62
Aberturas com cantos arredondados ($D_h = 0,2$)	0,85
Abertura com tela estampada e persianas rotativas (80 % de área livre)	0,79

APENDICE E

SOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ORDINÁRIAS

MÉTODO DE RUNGE-KUTTA - ALGORITMO DE GILLS

E.1. INTRODUÇÃO

Para a solução do sistema de equações diferenciais ordinárias de 1^a ordem, adotou-se o método de Runge-Kutta descrito pelo algoritmo de GILLS [26].

Todo os métodos de Runge-Kutta são derivados da expansão em série de Taylor. A ordem do Runge-Kutta está diretamente associada ao número de termos necessários na série de Taylor para a mesma exatidão. O método selecionado é o de 4^o ordem, sendo o de uso mais difundido.

E.2. ALGORITMO DE GILL PARA UMA ÚNICA EQUAÇÃO DIFERENCIAL DE 1^a ORDEM

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{6} \left[k_1 + 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right) k_2 + 2 \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\right) k_3 + k_4 \right] \quad (E.1)$$

onde:

$$k_1 = f[x_i, y_i]$$

$$k_2 = f[x_i + 1/2 h, y_i + 1/2 h k_1]$$

$$k_3 = f[x_i + 1/2 h, y_i + (-1/2 + 1/\sqrt{2}) h k_1 + (1 - 1/\sqrt{2}) h k_2]$$

$$k_4 = f[x_i + h, y_i - 1/\sqrt{2} h k_2 + (1 + 1/\sqrt{2}) h k_3]$$

Na expressão anterior, y , refere-se a variável sendo integrada, enquanto que, h , refere-se ao intervalo de integração considerado.

Originalmente as constantes foram escolhidas para reduzir a memória computacional, requerida na solução de sistemas de equações de 1^a ordem. Mesmo com o avanço nos computadores, os métodos de Runge-Kutta utilizados atualmente ainda empregam as constantes de GILL [26].

E.3. EQUAÇÕES DIFERENCIAIS LINEARES SIMULTANEAS

A solução de tais sistemas não são, a princípio, mais complexos do que a solução de uma única equação de 1^a ordem. O algoritmo selecionado acima é aplicado para cada uma das equações, durante cada intervalo de tempo.

Na escolha da forma final do algoritmo, optou-se pela estrutura computacional descrita na referência [27], devida à facilidade de uso apresentada pela mesma.

APENDICE F

PSICROMETRIA

DESCRIÇÃO DAS PRINCIPAIS EQUAÇÕES UTILIZADAS NO ALGORITMO FLOW2

F.1. INTRODUÇÃO

Para calcular-se as propriedades da mistura do ar e vapor d'água, optou-se pela utilização de pequenas subrotinas específicas para cada caso. Deste modo otimizaram-se as necessidades computacionais requeridas, em termos de tempo computacional e memória de computador.

Com exceção do cálculo da pressão de saturação, todas as outras equações são apresentadas por Stoecker [28].

Abaixo são descritas as principais equações utilizadas nestas subrotinas computacionais.

F.2. PRESSÃO DE SATURAÇÃO

A pressão de saturação para água pura, pode ser calculada conforme descrito por Gaggioli [29], através das seguintes equações:

1) pressão de saturação para o gelo nos limites de temperatura de -100 °C até 0 °C :

$$\beta_{ws} = \exp \left[C_1 / \theta + C_2 + C_3 \theta + C_4 \theta^2 + C_5 \theta^3 + C_6 \theta^4 + C_7 n(\theta) \right] \quad (F.1)$$

onde:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= - 8,7664698 & C_5 &= 0,56271617 \\
 C_2 &= 16,43008815 & C_6 &= -0,16650032 \\
 C_3 &= - 6,26446777 & C_7 &= 4,1635019 \\
 C_4 &= 0,2606821
 \end{aligned}$$

ii) A pressão de saturação sobre água líquida para os limites de temperatura entre 0 °C e 350 °C :

$$\beta_{ws} = \exp \left[\frac{1}{\theta} \frac{\sum_{n=1}^5 C_n (1 - \theta)^n}{1 + C_6 (1 - \theta) + C_7 (1 - \theta)^2} - \frac{(1 - \theta)}{C_8 (1 - \theta)^2 + C_9} \right] \quad (F. 2)$$

onde:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= - 7,691234564 & C_6 &= 4,167117320 \\
 C_2 &= -26,080023696 & C_7 &= 20,97506760 \\
 C_3 &= -168,1706546 & C_8 &= 10^9 \\
 C_4 &= 64,23285504 & C_9 &= 6,0 \\
 C_5 &= -118,9646225
 \end{aligned}$$

em ambas as equações (F.1) e (F.2):

$$\beta_{ws} = \frac{P_{vs}}{P_{cr}} \quad e, \quad (F. 3)$$

$$\theta = T/T_{cr} \quad (F. 4)$$

onde:

$$P_{cr} = 22.120,0 \text{ kPa (pressão crítica)}$$

$$T_{cr} = 647,3 \text{ K (temperatura crítica)}$$

P_{vs} = pressão de saturação da água pura (Pa)

T = temperatura da mistura (K)

F.3. UMIDADE ABSOLUTA

A umidade absoluta é a relação entre a massa de vapor d'água e a massa de ar seco presente no ar atmosférico. Assumindo-se tanto o vapor d'água como o ar seco como gases perfeitos, tem-se :

$$W = \frac{\text{massa de vapor d'água}}{\text{massa de ar seco}} \quad (\text{F.5})$$

Substituindo-se as equações dos gases perfeitos para o vapor d'água e para o ar seco na equação (F.5) e reagrupando-se, obtém-se :

$$W = 0,62198 \frac{P_s}{P_b - P_s} \quad (\text{F.6})$$

onde:

P_s = pressão parcial do vapor d'água (Pa)

P_b = pressão atmosférica (Pa)

W = umidade absoluta (kg. de vapor/kg de ar seco)

F.4. UMIDADE RELATIVA

A umidade relativa ϕ , é definida como a relação entre a fração molar do vapor d'água no ar úmido e a fração molar do vapor d'água no ar saturado nas mesmas condições de temperatura e

pressão. Das relações para gases perfeitos pode-se concluir que :

$$\phi = \left[\frac{P_s}{P_{vs}} \right]_{t,p} \times 100 \quad (\text{F.7})$$

onde:

P_s = pressão parcial do vapor d'água (Pa)

ϕ = umidade relativa (%)

F.5. ENTALPIA

A entalpia de uma mistura de ar seco e vapor d'água pode ser aproximada pela soma das entalpias dos seus componentes, sendo usualmente referenciada a massa de um deles,

$$H = H_{ar} + W H_s \quad (\text{F.8})$$

Admitindo-se os seguintes estados de referência :

ar seco $\rightarrow H_{ar} = 0$ kJ/kg quando $t = 0$ °C

vapor d'água $\rightarrow H_s = 0$ kJ/kg quando líquido saturado a 0 °C

e considerando-se que, para gases perfeitos, a entalpia é função somente da temperatura, obtém-se,

$$H = C_{pa} T + W H_s \quad (\text{F.9})$$

onde:

C_{pa} = calor específico do ar seco a pressão constante

(1,0 kJ/kg K)

T = temperatura da mistura ar-vapor (K)

H_s = entalpia do vapor presente na mistura (kJ/kg)

Considerando-se que o vapor d'água contido na mistura encontre-se sempre saturado, obtém-se a seguinte equação.

$$H_s = H_s (0 \text{ } ^\circ\text{C}) + C_{ps} T \quad (\text{F.10})$$

onde:

$$H_s (0 \text{ } ^\circ\text{C}) = 2.501,3 \text{ kJ/kg}$$

$$C_{ps} = 1,805 \text{ kJ/kg K}$$

substituindo -se os valores numéricos, obtém-se :

$$H = 1,0 T + W (2.501,3 + 1,805 T) \quad (\text{F.11})$$

ou isolando-se T ,

$$T = \frac{(H - 2.501,3 W)}{(1 + 1,805 W)} \quad (\text{F.12})$$

F.6. VOLUME ESPECIFICO

A equação dos gases perfeitos é também empregada neste caso. Assim,

$$v = \frac{R T}{P_b - P_s} \quad (\text{F.13})$$

onde:

R= constante dos gases para o ar seco= 287,03 kJ/kg.K

Substituindo a equação (F.6) na equação (F.13) e reagrupando-se, obtém-se:

$$v = 287,03 T \frac{(1 + 1,608 W)}{P_s} \quad (F.14)$$

onde:

v = volume específico m³/kg