

Luís Manuel dos Santos e Silva

MELHORIA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE
ELEMENTOS PARA ALVENARIA DA ENVOLVENTE

APLICAÇÃO A BLOCOS DE ARGILA EXPANDIDA

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

FACULDADE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Ao meu Pai

AGRADECIMENTOS

Ao terminar este trabalho tenho de agradecer a todos aqueles que de forma directa ou indirecta contribuíram para a sua realização.

Em primeiro lugar destaco todo o empenho, apoio, dedicação e compreensão prestada durante todo o trabalho pelo Professor Hipólito José Campos de Sousa e da Professora Luísa Maria Pimenta Abreu Costa Sousa, que agradeço.

Agradeço a todos os Professores da Licenciatura e Especialização em Reabilitação do Património Edificado, que contribuíram de forma decisiva para a minha formação académica, realçando o Professor Matos Fernandes.

Este trabalho só foi possível pela colaboração da empresa MAXIT – Tecnologias para a Construção, Reabilitação e Ambiente SA, integrada num projecto de I&D designado por OPTMAPS – Optimização Térmica e Mecânica de Alvenarias em Pano Simples; Este projecto visa a concepção de um bloco de betão leve para alvenaria exterior de edifícios em pano simples, capaz de por si só satisfazer às exigências do novo RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios, assegurando em simultâneo as demais características espectáveis das paredes exteriores de um edifício.

Também não posso deixar de agradecer todo o apoio e dedicação prestada pelo Eng. Fontes Melo.

Quero agradecer a toda a administração da empresa SOCOPUL-SOCIEDADE DE CONSTRUÇÕES E OBRAS, S.A. pela colaboração e tolerância demonstrada, e em particular ao Sr. Eng. João Monteiro pelo seu apoio, orientação e a confiança demonstrada na minha carreira profissional ao qual manifesto particular gratidão e apreço.

Gostaria também de agradecer a todos os meus colegas de trabalho e em particular ao Eng. José Valério, Eng. Heitor Pinheiro, Eng. Nuno Monteiro, Sr. Luís Cardoso e ao Sr. José Pinto pela sua amizade.

À memória do meu Pai que embora tenha partido precocemente desde cedo me transmitiu valores e princípios que me ajudam na realização dos meus objectivos, o meu reconhecimento e saudade.

Por fim agradeço a minha Mãe, ao meu Irmão e à minha Namorada todo o apoio, atenção e amizade presentes durante a elaboração deste trabalho.

MELHORIA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ELEMENTOS PARA ALVENARIA DA ENVOLVENTE

APLICAÇÃO A BLOCOS DE ARGILA EXPANDIDA

Luís Manuel dos Santos e Silva

Dissertação apresentada para efeito de prestação de provas de Mestrado em Engenharia Civil, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, sob a supervisão do Professor Hipólito José Campos de Sousa.

Resumo

As envolventes dos edifícios são preponderantes no comportamento das construções, assistindo-se ao longo dos anos a uma evolução do modo de execução das paredes exteriores com o uso de novos materiais, novas técnicas e novas exigências para as mesmas; além disso a parcela no custo final dos edifícios é elevada, sendo um dos elementos com maior incidência de patologias ao longo da vida útil dos edifícios.

O desenvolvimento das sociedades trouxe novos hábitos realçando-se a manutenção das condições térmicas do interior dos edifícios e a consequente instalação de aparelhos de climatização. Estes conduzem ao aumento do consumo de energia e emissões dos gases com efeito estufa, originando a promulgação de nova regulamentação no âmbito das características térmicas dos edifícios.

Atendendo a todas estas preocupações procurou-se neste trabalho realizar uma descrição dos requisitos a que as paredes deverão satisfazer. Dá-se especial relevo ao estudo do comportamento térmico das alvenarias, e ao desenvolvimento de uma solução em pano simples constituída por blocos de alvenaria de betão de argila expandida.

Efectuou-se a análise, caracterização e descrição dos fenómenos de transmissão de calor em paredes, de modo a obter-se uma melhoria no comportamento térmico actuando na forma, dimensões e topologia dos blocos de betão leve. O programa comercial Abaqus foi utilizado para a simulação numérica do coeficiente de transmissão térmica das soluções desenvolvidas.

O objectivo deste estudo é desenvolver uma solução, em pano simples, capaz de satisfazer os valores de referência do *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*, sem onerar o custo de construção com aplicação de isolamento térmico complementar.

IMPROVEMENT OF THERMAL BEHAVIOUR OF MASONRY ELEMENTS

LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE WITH EXPANDED CLAY

APPLICATION

Luis Manuel Santos Silva

Thesis submitted for satisfaction of the requirements for Master degree in Civil Engineering of the Faculty of Engineering, University of Porto under the supervision of Prof. Hipólito Campos de Sousa

Abstract

Masonry is a common building component with good durability and low cost and maintenance. Masonry enclosures subjected to environment conditions have a considerable economic weight in building construction cost, and they are also important when considering thermal and structural behaviour.

From an economical and environmental conservation point of view, it is more beneficial to design buildings with high thermal insulation characteristics than the currently followed practice in construction of buildings. This will result in long-term benefit of reducing the cost of cooling as well as reducing the pollution of the environment due to heavy use of fuel.

The increasing use of hollow masonry blocks made with lightweight concrete demands a study of the topology of these blocks, namely the form, dimensions and distribution of voids in order to obtain a block with a good thermal performance. In this work the thermal behaviour is performed by the commercial code ABAQUS

The aim of this study is to find an economic single leaf wall with good thermal performance reducing the heat loss in buildings through the envelope, according to thermal normative requests.

ÍNDICE**CAPÍTULO 1****1- EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DAS PAREDES 21****CAPÍTULO 2****2-EXIGÊNCIAS TÉRMICAS REGULAMENTARES 29****2.1- OBJECTIVOS DA REGULAMENTAÇÃO 29****2.2- EXIGÊNCIAS DO RCCTE PARA AS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DAS PAREDES..... 31****CAPÍTULO 3****3-EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS E CONDICIONALISMOS DE PAREDES DE PANO
ÚNICO 37****3.1- INTRODUÇÃO 37****3.2-EXIGÊNCIAS MECÂNICAS 37****3.3-COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO 43****3.4-ESTANQUIDADE À ÁGUA. 48****3.5-COMPORTAMENTO AO RUÍDO 53****3.6-SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS..... 58****CAPÍTULO 4****4- ISOLAMENTO TÉRMICO E TRANSMISSÃO DE CALOR..... 63****4.1-ISOLAMENTO TÉRMICO 63**

4.2- TRANSMISSÃO DE CALOR	65
4.3 - TRANSMISSÃO DE CALOR POR RADIAÇÃO TÉRMICA.....	67
4.3.1- CORPO NEGRO.....	70
4.3.2- LEIS DE CORPO NEGRO	72
4.3.3- INTENSIDADE DE RADIAÇÃO	75
4.3.4- RELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE E POTÊNCIA EMISSIVA.....	77
4.3.5- IRRADIAÇÃO	80
4.3.6- PROPRIEDADES DA RADIAÇÃO	81
4.3.7- COMPORTAMENTO DE CORPOS REAIS À RADIAÇÃO INCIDENTE.....	82
4.3.8- LEI DE KIRCHHOFF	84
4.3.9- INTERACÇÃO ENTRE CORPOS.....	85
4.3.10- TROCAS RADIANTES ENTRE SUPERFÍCIES CINZAS	90
4.3.11- ALVÉOLOS.....	95
4.4- TRANSMISSÃO DE CALOR POR CONVECÇÃO.....	102
4.4.1- CONVECÇÃO NATURAL.....	104
4.4.2- CONCEITOS BÁSICOS	105
4.4.3- DEFINIÇÃO DA CONVECÇÃO.....	106
4.4.4- ALVÉOLOS.....	110
4.4.5- FÓRMULAS EMPÍRICAS.....	112
4.5- TRANSMISSÃO DE CALOR POR CONDUÇÃO	114
4.5.1- ANÁLISE DIFERENCIAL DA CONDUÇÃO TÉRMICA.....	116
4.5.2- ANALOGIA ELÉCTRICA.....	120

CAPÍTULO 5

5-TRANSMISSÃO DE CALOR EM BLOCOS DE ALVENARIA.	125
--	------------

CAPÍTULO 6

6 – CARACTERÍSTICAS DO BETÃO LEVE E SEUS AGREGADOS.	133
6.1-DEFINIÇÃO DE BETÃO LEVE.....	133
6.2- ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	134
6.3-ENQUADRAMENTO NORMATIVO	135
6.4- CARACTERÍSTICAS.....	137
6.5- PROPRIEDADES PRINCIPAIS DO BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA	139
6.6- CARACTERÍSTICAS DO BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA USADO NO FABRICO DE BLOCOS	142

CAPÍTULO 7

7- MODELAÇÃO NUMÉRICO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS ALVÉOLOS EM ELEMENTOS DE ALVENARIA	147
7.1- INTRODUÇÃO	147
7.2- MODELAÇÃO DA CONVECÇÃO E CONDUÇÃO EM ALVÉOLOS	148
7.3- MODELAÇÃO DA RADIAÇÃO EM ALVÉOLOS.....	152

CAPÍTULO 8

8- ESTUDO DE SOLUÇÕES	157
8.1- DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA.....	157
8.1.1 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA COMERCIAL ABAQUS	157
8.2 – SOLUÇÕES TRADICIONAIS	159
8.3 – OPTIMIZAÇÃO.....	162
8.3.1- Características genéricas das soluções analisadas	162
8.3.2- Blocos com alvéolos descentrados com rotura de junta centrada	166
8.3.3- Blocos com alvéolos centrados sem rotura de junta centrada	172
8.3.4- Blocos com secções transversais complementares.....	177
8.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	184
REFERÊNCIAS.....	186

ANEXOS I

I.1- BLOCONOVO.INP.....	193
I.2- LEITURAB3.PY.....	195

I.3- PARAMETROSB.DAT	196
-----------------------------------	------------

I.4- DADOSBETAO.DAT	196
----------------------------------	------------

ANEXO II

II.1- CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA POR RADIAÇÃO.....	199
--	------------

II.2- CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA POR CONVECÇÃO.....	200
---	------------

II.3- CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA EQUIVALENTE.....	202
---	------------

II.4- COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA E CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS BLOCOS.....	204
---	------------

ÍNDICE DE IMAGENS

CAPÍTULO 1

FIG. 1.1 - SOLUÇÕES TRADICIONAIS DE PAREDES	24
---	----

CAPÍTULO 3

FIG. 3.1 - VARIAÇÃO DIÁRIA DA TEMPERATURA INTERIOR DOS EDIFÍCIOS COM A SUA INÉRCIA	46
--	----

CAPÍTULO 4

FIG. 4.1 – VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO ELECTROMAGNÉTICA COM O COMPRIMENTO DE ONDA	69
FIG. 4.2 – SIMULAÇÃO DE CORPO NEGRO.....	71
FIG. 4.3 – VARIAÇÃO DO PODER EMISSIVO COM O COMPRIMENTO DE ONDA.....	73
FIG. 4.4 – IRRADIAÇÃO DE UMA SUPERFÍCIE.....	75
FIG. 4.5 – IRRADIAÇÃO DE UMA SUPERFÍCIE NO ESPAÇO	76
FIG. 4.6 – SUPERFÍCIE HEMISFÉRICA/SUPERFÍCIE RADIANTE	78
FIG. 4.7 – ENERGIA IRRADIANTE INCIDENTE	79
FIG. 4.8 – COMPORTAMENTO DOS CORPOS À RADIAÇÃO INCIDENTE	83
FIG. 4.9 – EQUILÍBRIO ENTRE CORPOS NEGROS.....	84
FIG. 4.10 – FACTORES DE FORMA ENTRE SUPERFÍCIES PARALELAS.....	89
FIG. 4.11 – FACTORES DE FORMA ENTRE SUPERFÍCIES ADJACENTES.....	90
FIG.4.12 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA E VELOCIDADE DE UM FLUIDO NA VIZINHANÇA DE UMA PLACA VERTICAL AQUECIDA ESTÁTICA	104
FIG. 4.13 – COEFICIENTE DE VISCOSIDADE DINÂMICA.....	105
FIG. 4.14 – FORÇAS ACTUANTES NUM ELEMENTO DE FLUIDO EM FLUXO DE CONVECÇÃO NATURAL.....	107
FIG. 4.15 – CAVIDADE	111
FIG. 4.16 – CONVECÇÃO EM CAVIDADES	112
FIG. 4.17 – CONDUÇÃO UNIDIRECCIONAL EM PLACA PLANA	115
FIG. 4.18 – CONDUÇÃO NUMA FATIA DE ESPESSURA INFINITESIMAL.....	117
FIG. 4.19 – CONDUÇÃO EM PLACA PLANA COM CONVECÇÃO NA SUPERFÍCIE 2.....	118
FIG.4.20 – CONDUÇÃO EM PLACA COMPOSTA.....	120

CAPÍTULO 5

FIG. 5.1 – SECÇÃO TRANSVERSAL TIPO DE UM BLOCO.	126
FIG. 5.2 – TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM ALVÉOLOS	127
FIG. 5.3 – SECÇÃO TRANSVERSAL DE UM BLOCO COM OS ALVÉOLOS MELHORADOS TERMICAMENTE.....	129

CAPÍTULO 7

FIG. 7.1 – VARIAÇÃO DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DO AR COM A TEMPERATURA	149
FIG. 7.2 – VARIAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA DO AR COM A TEMPERATURA.....	150
FIG. 7.3 – VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE EXPANSÃO COM A TEMPERATURA	150
FIG. 7.4 – VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE DINÂMICA COM A TEMPERATURA.....	151
FIG. 7.5 – VARIAÇÃO DO NÚMERO DE <i>PRANDTL</i> COM A TEMPERATURA.....	151
FIG. 7.6 – ALGORITMO DE CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA POR CONVECÇÃO EM ALVÉOLOS.....	152
FIG. 7.7 – ALGORITMO DE CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA POR RADIAÇÃO EM ALVÉOLOS	154

CAPÍTULO 8

FIG.8.1 - SECÇÃO TRANSVERSAL DO BLOCO UTILIZADO PARA A VALIDAÇÃO DO PROGRAMA <i>ABAQUS</i>	158
FIG. 8.2 – VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA E PESO COM A ESPESSURA.....	160
FIG. 8.3 – VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA COM A PERCENTAGEM DE FURAÇÃO (BLOCOS COM ROTURA DE JUNTA).....	169
FIG. 8.4 – VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA COM O NÚMERO E DISPOSIÇÃO DAS CAMADAS DE ALVÉOLOS (BLOCOS COM ROTURA DE JUNTA).....	170
FIG. 8.5 – VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA COM A PERCENTAGEM DE FURAÇÃO (BLOCOS SEM ROTURA DE JUNTA).....	175
FIG. 8.6 – VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA COM O NÚMERO E DISPOSIÇÃO DAS CAMADAS DE ALVÉOLOS (BLOCOS SEM ROTURA DE JUNTA).....	176
FIG. 8.7 – VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA COM A DISPOSIÇÃO DOS ALVÉOLOS E O USO DE ROTURA DE JUNTA (TRÊS CAMADAS DE ALVÉOLOS VERTICAIS)	181

FIG. 8.8 – VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA COM O TIPO DE ROTURA DE JUNTA (ONZE CAMADAS DE ALVÉOLOS HORIZONTAIS DESCENTRADOS)	183
--	-----

ÍNDICE DE QUADROS

CAPÍTULO 2

QUADRO 2.1 - COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA MÁXIMOS ADMISSÍVEIS E DE REFERÊNCIA DE ELEMENTOS OPACOS	32
QUADRO 2.2 - COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA MÁXIMOS ADMISSÍVEIS E DE REFERÊNCIA DE ELEMENTOS OPACOS (INVERNO - RCCTE REVOGADO)	33
QUADRO 2.3 - RAZÕES ENTRE OS COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA MÁXIMOS ADMISSÍVEIS E DE REFERÊNCIA DE ELEMENTOS OPACOS DADOS PELO ACTUAL REGULAMENTO E PELO ANTERIOR (INVERNO).....	33

CAPÍTULO 3

QUADRO 3.1 - VALORES CARACTERÍSTICOS DAS DEFORMAÇÕES PARA DIVERSOS TIPOS DE UNIDADES DE ALVENARIAS CONFORME <i>EUROCÓDIGO 6</i> [10]	41
QUADRO 3.2 - INÉRCIA TÉRMICA DAS CONSTRUÇÕES SEGUNDO O <i>RCCTE</i>	45
QUADRO 3.3 – ESPESSURA MÍNIMAS DE PAREDES DE BLOCOS DE BETÃO EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO SEGUNDO AS <i>NORMAS BRITÂNICAS</i>	52
QUADRO 3.4 – CATEGORIA DE EXPOSIÇÃO ATMOSFÉRICA	53
QUADRO 3.5 – VALORES CRÍTICOS DE RUÍDO RECOMENDADOS PELA <i>OMS</i>	55
QUADRO 3.6 – ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO ENTRE O EXTERIOR E AS ZONAS DE ESTAR DA HABITAÇÃO	57
QUADRO 3.7 – ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO PARA EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO	57

CAPÍTULO 4

QUADRO 4.1 – ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	68
--	----

CAPÍTULO 6

QUADRO 6.1 – CLASSIFICAÇÃO DOS BETÕES LEVES QUANTO À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PELA <i>NP EN206-1</i>	136
--	-----

QUADRO 6.2 – CLASSIFICAÇÃO DOS BETÕES LEVES QUANTO À MASSA VOLÚMICA PELA NP EN206-1	137
QUADRO 6.3 – CLASSIFICAÇÃO DE BETÕES SEGUNDO A RILEM	137
QUADRO 6.4 – CORRELAÇÃO ENTRE A MASSA VOLÚMICA E A CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DOS BETÕES.....	140

CAPÍTULO 7

QUADRO 7.1 – VALORES DOS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO AR.....	149
--	-----

CAPÍTULO 8

QUADRO 8.1 – CARACTERÍSTICAS HABITUAIS DOS TIJOLOS CERÂMICOS.....	159
QUADRO 8.2 – CARACTERÍSTICAS HABITUAIS DOS BLOCOS DE BETÃO CORRENTES.....	161
QUADRO 8.3 – CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DO BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA CONFORME A NORMA EN1745 E A ITE 50	165
QUADRO 8.4 – CARACTERÍSTICAS DAS SOLUÇÕES ESTUDADAS PARA ALVÉOLOS DESCENTRADOS.....	166
QUADRO 8.5 – CARACTERÍSTICAS DAS SOLUÇÕES ESTUDADAS PARA ALVÉOLOS CENTRADOS	172
QUADRO 8.6 – CARACTERÍSTICAS DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS ESTUDADAS	178
QUADRO 8.7 – CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS REBOCOS INTERIORES.....	184

SIMBOLOGIA

1) ABREVIATURAS

REBAP	Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado
REAE	Regulamento de Estruturas de Aço para Edifícios
ANIPC	Associação Nacional das Industrias de Produtos de Cimento
ANIPB	Associação Nacional dos Industriais de Prefabricação em Betão
LECA	Argila Expandida
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
EC2	Eurocódigo 2
EC6	Eurocódigo 6
RGEU	Regulamento Geral das Edificações Urbanas
EN	Norma Europeia
RSA	Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes
OMS	Organização Mundial de Saúde

RGR	Regulamento Geral de Ruído
RSCIEH	Regulamento de Segurança Contra Incêndios em Edifícios de Habitação
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires d'Essai de Matériaux
ITE 28	Coeficientes de transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios
ITE 50	Coeficientes de transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios – versão actualizada

2) SIMBOLOS

Símbolos gerais

U	Coeficiente de transmissão térmica do elemento da envolvente	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
I_1, I_2, I_3	Zonas climatéricas de referência, Inverno	
RA	Região Autónoma da Madeira e Açores	
$U_{equi.}$	Coeficiente de transmissão térmica equivalente	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
R_{si}	Resistência térmica superficial interior	$m^2 \cdot ^\circ C/W$
R_{se}	Resistência térmica superficial exterior	$m^2 \cdot ^\circ C/W$

Exigências Funcionais

Φ_∞	Coeficiente de fluência a tempo infinito	
$\varepsilon_{c\infty}$	Extensão por fluência, a tempo infinito	‰
ε_{el}	Extensão elástica	‰
E	Módulo de elasticidade	MPa
I	Inércia térmica	kg/m^2
I	Índice de chuva incidente	m^2/s
$D_{2m,n}$	Isolamento sonoro a sons de condução aéreos, normalizado	dB
D_n	Isolamento sonoro a sons de condução aéreos, normalizado	dB

CF Corta fogo

Radiação

λ	Comprimento de onda	m
ν	Frequência	s ⁻¹
c	Velocidade da luz (3x10 ⁸)	m/s
ρ	Reflectida	
τ	Transmitida	
α	Absorvida	
G_b	Irradiação do corpo negro	W/m ²
E_b	Poder emissivo total	W/m ²
$E_{b\lambda}$	Poder emissivo monocromático de um corpo negro	W/m ²
T	Temperatura absoluta do corpo	K
$E_{b\lambda max}$	Potência emissiva máxima do corpo negro	W/m ²
σ	Constante de <i>Stefan-Boltzman</i> (5,67x10 ⁻⁸)	W/m ² .K ⁴
I	Intensidade de radiação	W/sr
r	Raio	m
l	Comprimento, geral	m
A_n	Área normal	m ²
w	Ângulo sólido	sr
θ, ϕ	Coordenadas esféricas	rad
q_R	Taxa de fluxo de calor por radiação	W
I_λ	Intensidade por unidade de comprimento de onda	W/sr μ m

q	Taxa de fluxo de calor	W
I_b	Intensidade de radiação de uma superfície negra	W/m ² sr
G	Irradiação incidente sobre a unidade de superfície na unidade de tempo	W/m ²
G_λ	Irradiação espectral incidente sobre a unidade de superfície na unidade de tempo	W/m ² μm
ε	Emissividade por radiação	
F_{2-1}	Factor de forma geométrico para a radiação de um corpo negro a outro	
J	Radiosidade	W/m ²
R_ε	Resistência térmica à transmissão de calor por radiação	K/W
R_{12}	Resistência térmica geométrica	
$R_{\text{equi.}}$	Resistência térmica equivalente	K/W
hr	Coeficiente de transmissão térmica por radiação	W/m ² K

Convecção

δ	Espessura da camada limite	m
$u(y)$	Velocidade média temporal na direcção y	m/s
T_s	Temperatura da superfície	K
hc	Coeficiente médio de transmissão térmica por convecção	W/m ² °C
μ	Viscosidade dinâmica	N.s/m ²
ν	Viscosidade cinemática	m ² /s

τ	Tensão de cisalhamento	N/m ²
F	Força	N
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
gc	Factor de conversão dimensional	1,0 kg m/N s ²
Γ_x	Força do corpo por massa unitária	N/kg
p	Pressão estática	N/m ²
β	Coefficiente de expansão térmica	1/K
ρ	Massa volúmica	kg/m ³
α	Difusibilidade térmica	m ² /s
λ	Condutibilidade térmica do material	W/m.°C
T	Temperatura	°C
Q_x	Fluxo segundo x	W
q_x	Densidade de fluxo segundo x	W/m ²
K	Coefficiente de transmissão térmica por condução	W/m ² °C
h_e	Coefficiente de transmissão de calor superficial	W/m ² °C
R	Resistência térmica	°C m ² /W

Números

Re	Número de <i>Reynolds</i>	$\frac{U_{\infty} \times L}{\nu}$
Pr	Número de <i>Prandtl</i>	$\frac{\nu}{\alpha}$
Gr	Número de <i>Grashof</i>	$\frac{g \times \beta \times (T - T_{\infty}) \times L^3}{\nu^2}$
Nu	Número de <i>Nusselt</i>	$\frac{\bar{h}c \times L}{K}$

Ra	Número de <i>Raleigh</i>	$\frac{g \times \beta \times (T - T_{\infty}) \times L^3}{\nu \times \alpha}$
------	--------------------------	---

CAPITULO 1

EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DAS PAREDES

1- EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DAS PAREDES

A construção de abrigos é uma necessidade do homem desde os primórdios da sua existência. Primeiro abrigou-se em cavernas, evoluindo para a construção de pequenos edifícios até à construção de grandes edificações.

O uso de alvenarias para a construção de abrigos é uma das tecnologias mais antigas. As primeiras alvenarias foram de pedra surgindo mais tarde entre 9000 a 7000 A.C. alvenarias de tijolo de barro seco ao sol.

Em Portugal não existe uma história de alvenarias, assumindo estas sempre uma vertente regional, ao longo dos tempos foram utilizadas alvenarias de pedra, de blocos de adobe e tijolos cerâmicos e paredes moldadas “in situ”.

O uso de paredes de alvenaria de pedra assume um factor regional importante, sendo no norte estas construções à base de alvenaria de granito, enquanto na zona centro as paredes de pedra são predominantemente de calcário. Existem ainda muitos casos de alvenarias de base xisto.

Apesar de não haver uma história clara do uso de alvenarias em Portugal, as soluções utilizadas ao longo de muitos anos tornaram-se tradicionais, não tendo em geral associados patologias recorrentes.

A industrialização das sociedades levou, no sector da construção, ao aparecimento e desenvolvimento de estruturas de aço e betão, a partir de meados do século XIX, sendo as alvenarias relegadas para um papel secundário, perdendo o papel de estrutura resistente.

O desenvolvimento dos novos materiais mais resistentes levou à adopção de estruturas mais esbeltas e de maior porte, originando em países como a Alemanha, França e Reino Unido a introdução no princípio do século XX, de regulamentos de

apoio à concepção que se foram alastrando aos outros países. Em Portugal também foram publicados vários regulamentos para Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado [6] e também para Estruturas de Aço para Edifícios, relegando para um segundo plano as alvenarias resistentes para as quais não havia enquadramento regulamentar.

Na actualidade o conhecimento técnico encontra-se muito concentrado nas estruturas de betão e aço, assumindo o estudo de alvenarias resistentes um papel secundário nos programas académicos [4].

Em Portugal tem-se assistido, nos últimos 50 anos, a um grande volume de construção de edifícios, acompanhado pela utilização de novas técnicas construtivas, muitas das vezes sem o cuidado de estudar “à priori” o seu comportamento.

Com a necessidade de construir rápido, a baixo custo e desprezando a função resistente das paredes, abandonou-se a utilização de paredes de pedra espessas passando a utilizar-se paredes em muitos casos em pano simples, em tijolo de 0,22 m de espessura.

Para se obter paredes leves, de fácil execução e custos baixos, adoptaram-se elementos de alvenaria de tijolo de furação horizontal, com elevada percentagem de furação com a consequente redução da resistência mecânica. A utilização desta solução permitiu aumentar a eficiência térmica das paredes, aligeirar a construção, diminuir custos e reduzir prazos de construção.

O emprego desta solução em pano simples acabou por ser reduzido uma vez que apresenta problemas de fissuração das paredes, devido à pouca resistência mecânica dos elementos de alvenaria, e também à existência de infiltração de água.

Para a resolução destas dificuldades a utilização da parede dupla é generalizada, aproximadamente a partir da década de 70 pretendendo-se assim resolver o problema de infiltração de água e aumentar a eficiência térmica, devido à introdução de uma caixa de

ar entre os dois panos de parede designado. Esta solução mantém-se até aos nossos dias, sofrendo vários desenvolvimentos.

Inicialmente as paredes eram muitas vezes compostas por dois panos de tijolo de 11, ocorrendo com frequência humidade no rodapé das paredes. Esta patologia procurou ser resolvida com a introdução de uma meia cana na parte inferior da caixa de ar complementada por orifícios de drenagem para o exterior, o que permitia a drenagem de condensados e ventilação da caixa de ar.

Com o aumento das exigências térmicas da envolvente dos edifícios surgiu um novo elemento, materializado pela colocação no interior da caixa de ar de isolamento térmico e aumentando assim eficiência térmica das paredes. A introdução deste novo elemento reduz a inércia térmica, pois para esta só contribui o pano que se encontra pelo interior do isolamento.

Para a aumentar a inércia térmica tornou-se frequente a utilização de paredes compostas por um pano exterior em tijolo de 11 e o interior de 15. Nesta solução foi frequente o aparecimento de fissuras no pano exterior. A fissuração do pano exterior ficou a dever-se à falta de resistência mecânica das alvenarias para suportarem as amplitudes térmicas a que estavam sujeitas.

Para minimizar este problema inverteu-se o posicionamento dos panos de parede, solução que se tem mantido até hoje, sendo vulgar a sua utilização.

A concepção de uma parede dupla é actualmente uma solução considerada tradicional e conhecida. O seu emprego visa a execução de paredes duplas de simples preenchimento, pouco resistentes do ponto de vista mecânico. No entanto esta solução apresenta dificuldade na resolução de pontos singulares, como sejam as pontes térmicas, a ligação com elementos da estrutura, onerosas, dado necessitarem de uma grande carga de mão-de-obra, pelo que com frequência são executadas sem grandes cuidados.

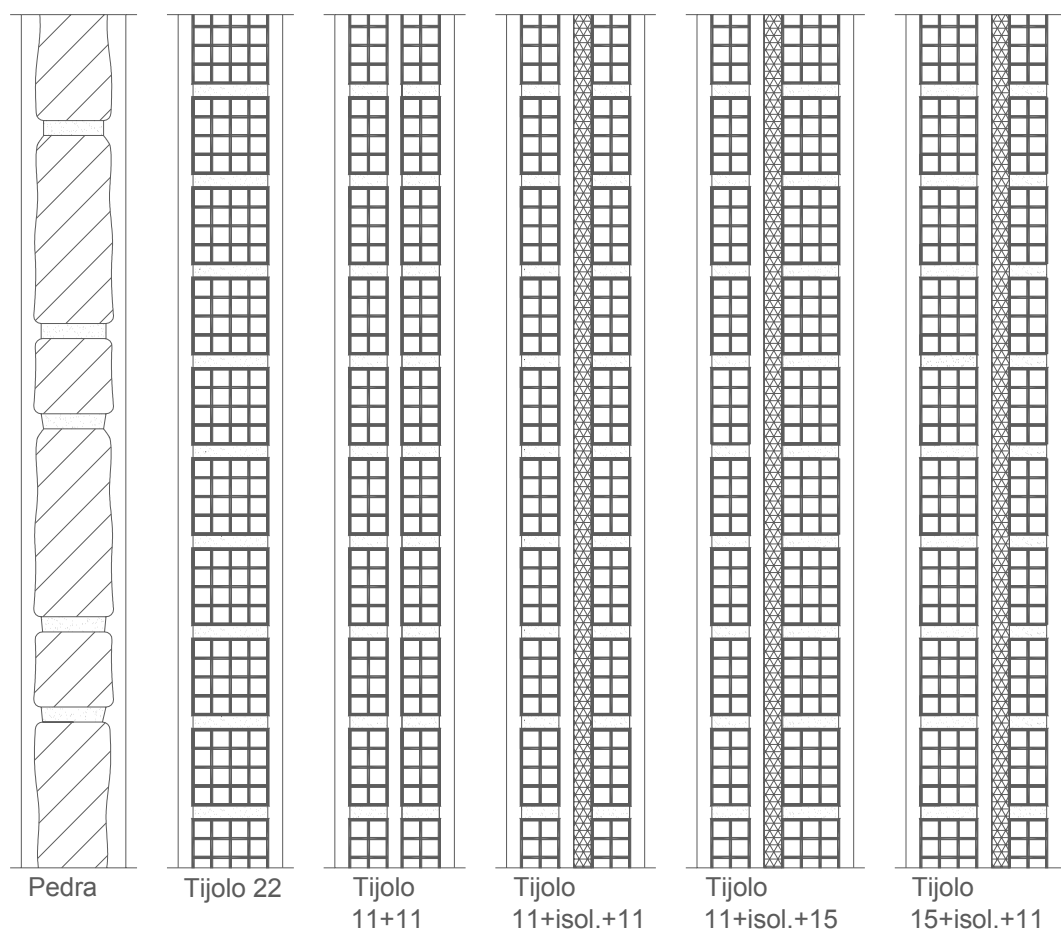


Fig. 1.1 - Soluções tradicionais de paredes

Uma outra solução que assume alguma expressão é a utilização de isolamento térmico pelo exterior, permitindo um isolamento contínuo de toda a envolvente.

No trabalho que vamos desenvolver não iremos tratar de paredes duplas, no entanto era incontornável realizar esta referência, pois actualmente a utilização dessa solução assume grande relevância. O uso de paredes de pano simples tem uma expressão marginal, estando confinado a pequenos nichos de mercado que não assumem grande relevância.

A utilização de paredes de pano simples ocorre sobretudo na construção de pavilhões industriais, centros comerciais, parques de estacionamento, sendo o seu uso na construção de edifícios de habitação praticamente residual.

A generalidade das alvenarias são à base de tijolos cerâmicos de furação horizontal, no entanto existem outros materiais no mercado com blocos de betão:

- de agregados leves, (argila expandida);
- celular autoclavado;
- de agregados correntes;
- de agregados correntes splitados.

Segundo a ex-ANIPC actual ANIPB, *Associação Nacional dos Industriais de Prefabricação em Betão*, a produção de blocos de agregados correntes iniciou-se com alguma expressão durante a década de 70, executada em pequenas unidades industriais, com uma certa mecanização das fases de moldagem e mistura do betão, sendo as restantes fases realizadas com o uso de métodos pouco mecanizados. A década de 70 representou assim um forte período de industrialização e desenvolvimento do processo produtivo de blocos surgindo também a produção de elementos em betão leve. A forma dos blocos produzidos reflectia as formas europeias de onde eram originárias as máquinas e moldes utilizados para produção nas fábricas [4].

Durante a década de 80 ocorreu uma certa estagnação do sector, com dificuldades em afirmar os seus produtos no mercado, não acompanhando o desenvolvimento do mercado e não conseguindo corresponder às novas exigências.

Na década de 90 o sector caracteriza-se por ser constituído por pequenas empresas, possuindo algumas empresas algum controlo de produção. O número de produtos homologados é muito escasso.

Nesta década inicia-se o emprego do bloco de betão celular autoclavado, tendo-se reactivado uma unidade industrial, que no entanto não conseguiu implantar-se de forma sólida no mercado, tendo fechado sensivelmente a meio da década de 90. Neste período, em paralelo, um grande grupo internacional de produção de argila expandida “LECA®” instala-se em Portugal, iniciando a produção do agregado leve mais utilizado

em todo o mundo e dinamizando um mercado deprimido; uma das formas de acentuar o consumo do agregado leve *LECA* foi o seu emprego em blocos de betão leve.

As preocupações térmicas, que começaram a fazer parte da construção com a publicação do *RCCTE* [7], foram também um factor que contribuiu para a decadência do uso de blocos de betão de agregados correntes que eram poucos eficientes termicamente.

O uso de elementos de betão de agregados leves permitiu melhorar significativamente as características térmicas, diminuir o peso das unidades, o esforço no assentamento, apresentando mesmo assim uma boa resposta sob o ponto de vista de resistência mecânica.

Em Portugal nunca foi desenvolvida documentação para o fabrico de elementos de blocos de betão, estando esta falha actualmente colmatado pela Norma Europeia EN771 [9].

O desenvolvimento do *Eurocódigo 6 (EC6)* [10] veio incentivar o desenvolvimento de soluções de paredes em blocos.

Neste trabalho iremos tratar apenas de blocos produzidos com argila expandida, dado que a empresa *LECA*[®] agora *Maxit* produz actualmente argila expandida em Portugal, e está também ligada a um conjunto de indústrias de produção de blocos de agregados leves de argila expandida.

Assim o desenvolvimento e implementação no mercado de soluções de alvenaria de blocos de betão de agregados leves passa pelo desenvolvimento de elementos com geometria e topologia (número, dimensão e distribuição dos alvéolos) que permita a execução de paredes de pano simples que cumprem as exigências regulamentares e se tornem atractivas para o mercado.

CAPITULO 2

EXIGÊNCIAS TÉRMICAS REGULAMENTARES

CAPÍTULO 2

EXIGÊNCIAS TÉRMICAS REGULAMENTARES

ÍNDICE

2.1- OBJECTIVOS DA REGULAMENTAÇÃO

2.2- EXIGÊNCIAS DO RCCTE PARA AS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DAS PAREDES

2-EXIGÊNCIAS TÉRMICAS REGULAMENTARES

2.1- OBJECTIVOS DA REGULAMENTAÇÃO

A envolvente exterior dos edifícios é objecto crescente de preocupações. Uma destas preocupações respeita às características térmicas dos elementos que constituem a envolvente.

Em Portugal, o primeiro grande passo para a melhoria do comportamento térmico da envolvente dos edifícios e em particular da parte opaca (paredes), foi a publicação do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (*RCCTE*) em 6 de Fevereiro de 1990 [8].

A publicação deste regulamento visava a melhoria do comportamento térmico dos edifícios, higiene e conforto térmico. Uma outra preocupação do regulamento era o desenvolvimento e adopção de soluções arquitectónicas e tecnológicas que conduzissem à diminuição do consumo de energia dos edifícios, procurando incentivar o uso de energias renováveis.

O regulamento dividia o país em zonas climáticas, estabelecendo coeficientes térmicos de referência e limites máximos para os mesmos.

Actualmente foi promulgado um novo regulamento com a mesma designação, que revoga o anterior, tendo também por objectivo dar um contributo na regulamentação e melhoria do comportamento dos edifícios [7].

O primeiro *RCCTE* [8] conduziu a adopção de soluções tecnológicas na construção de edifícios que se tornaram vulgares, como a aplicação de isolamento térmico nas paredes e coberturas, a utilização de caixilharia de melhor qualidade, entre outras situações comuns actualmente.

Uma outra tendência que se tem acentuado é a instalação de equipamentos para manutenção das condições ambientais e aquecimento dos espaços interiores. A instalação deste tipo de aparelhos conduz a um consumo de energia efectiva, contribuindo para o aumento da emissão de gases com efeito de estufa.

Torna-se premente a redução da factura energética dos nossos edifícios de modo a reduzir as necessidades energéticas das nossas sociedades, convergindo com os critérios de Quioto e com a *Directiva Europeia 2002/91/CE* que regulamenta o desempenho energético dos edifícios [11].

Além disso a factura energética assume uma importância económica relevante, dado a escalada no custo crescente do petróleo nos mercados internacionais.

Retomando novamente as implicações de índole tecnológica, teremos também de referir que a aplicação de novos sistemas construtivos conduziu à criação de novos problemas nomeadamente:

- falta de ventilação dos espaços interiores;
- condensações em pontos singulares superficiais;
- problemas de estabilidade estrutural das paredes;
- condensações internas nos materiais.

Os quatro pontos atrás descritos resultaram também em parte das preocupações térmicas das novas construções, que consciencializaram a sociedade para a necessidade da diminuição da factura energética. Esta preocupação conduziu à utilização de caixilharias de melhor qualidade, caracterizada por utilização de vidro duplo, perfis com corte térmico, elevada inércia dos perfis e estanquidade das janelas, conseguindo-se uma permeabilidade e coeficiente de transmissão térmica baixa.

A redução da permeabilidade diminui a ventilação natural, conduzindo assim à ocorrência frequente de condensações superficiais e internas nos materiais.

A preocupação revelada pelo *RCCTE* [8] com as perdas de energia concentradas, designadas por pontes térmicas, motivou a recomendação de várias soluções para alterar essas pontes térmicas. Essas recomendações conduziram a problemas de estabilidade estrutural das paredes.

O novo regulamento *RCCTE* [7] mantém a filosofia do regulamento anterior, dividindo o país em seis zonas. Tal como o anterior aplica-se na fase de licenciamento, de modo a valorizar o comportamento térmico dos edifícios de habitação, logo na fase de concepção das soluções arquitectónicas e construtivas.

Uma diferença significativa do actual regulamento é a actualização dos valores de referência dos requisitos específicos no regulamento ser periódica e realizada pelos Ministérios que tutelam o sector.

2.2- EXIGÊNCIAS DO RCCTE PARA AS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DAS PAREDES

O novo regulamento [7] quantifica as perdas térmicas por condução através da envolvente de forma semelhante ao anterior, considerando três zonas climáticas tanto para o verão como para o Inverno.

As condições de referência para a análise térmica dos edifícios são 20 °C para a temperatura interior na estação de aquecimento e 25°C para a estação de arrefecimento.

O cálculo das perdas térmicas é semelhante ao anterior, considerando as perdas pela envolvente exterior, interior, envidraçados e renovação de ar; apresenta no entanto algumas diferenças que se irá referir sem grande profundidade, nomeadamente o cálculo das perdas térmicas concentradas e dos elementos em contacto com o terreno, o factor de obstrução dos envidraçados e a obrigatoriedade recorrente da instalação de colectores solares nos edifícios.

Uma outra novidade constante no actual *RCCTE* [7] é o cálculo de energia necessária para a produção de águas quentes.

O actual *RCCTE* preconiza uma série de pormenores construtivos para as pontes térmicas e elementos em contacto com o solo. Tal como no anterior o actual regulamento define valores máximos e de referência para as características térmicas das paredes. Os valores de referência permitem, juntamente com verificação de outros parâmetros, a dispensa a verificação detalhada do *RCCTE* [7]. No quadro seguinte apresenta-se o conjunto de valores referidos.

Quadro 2.1 - Coeficiente de transmissão térmica máximos admissíveis e de referência de elementos opacos ($U\text{-W/m}^2\text{°C}$)

Elemento da envolvente	Zona climática						
	I ₁		I ₂		I ₃		RA
	Max.	Ref.	Max.	Ref.	Max.	Ref.	Ref.
Zonas opacas verticais exteriores	1,8	0,7	1,6	0,6	1,45	0,5	1,4
Zonas opacas verticais interiores	2	1,4	2	1,2	1,9	1	2

RA – Regiões autónomas da Madeira e Açores, apenas para edificações na zona I₁.

O anterior *RCCTE* [8] revogado também definia valores máximos e de referência para o coeficiente de transmissão térmica, conforme se apresenta no quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Coeficiente de transmissão térmica máximos admissíveis e de referência de elementos opacos (Inverno - RCCTE revogado)
(U-W/m²°C)

Elemento da envolvente	Zona climática					
	I ₁		I ₂		I ₃	
	Max.	Ref.	Max.	Ref.	Max.	Ref.
Zonas opacas verticais exteriores	1,8	1,4	1,6	1,2	1,45	0,95
Zonas opacas verticais interiores	2	1,4	2	1,2	1,9	0,95

Realizando a comparação entre os valores do actual regulamento e anterior regulamentação obtemos os valores representados no quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Razões entre os coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis e de referência de elementos opacos dados pelo actual regulamento e pelo anterior
(Inverno)
(U-W/m²°C)

Elemento da envolvente	Zona climática					
	I ₁		I ₂		I ₃	
	Max.	Ref.	Max.	Ref.	Max.	Ref.
Zonas opacas verticais exteriores	1	0,5	1	0,5	1	0,5
Zonas opacas verticais interiores	1	1	1	1	1	1

Podemos assim concluir que o actual regulamento mantém os valores máximos admissíveis para o coeficiente de transmissão térmica, reduzindo em 50% os valores de referência.

CAPITULO 3

EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS E CONDICIONALISMO DE PAREDES DE PANO ÚNICO

CAPITULO 3

EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS E CONDICIONALISMOS DE PAREDES DE PANO ÚNICO

INDICE

3.1- INTRODUÇÃO

3.2-EXIGÊNCIAS MECÂNICAS

3.3-COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO

3.4-ESTANQUIDADE Á ÁGUA

3.5-COMPORTAMENTO AO RUÍDO

3.6-SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS

3-EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS E CONDICIONALISMOS DE PAREDES DE PANO ÚNICO

3.1- INTRODUÇÃO

Pretende-se neste capítulo referir de forma sucinta as principais exigências a levar em conta nas paredes exteriores de pano simples. Iremos descrever de forma resumida, cada uma das exigências seguintes:

- comportamento mecânico;
- conforto higrotérmico;
- estanquidade á água;
- isolamento ao ruído;
- segurança contra incêndios;
- sustentabilidade dos edifícios.

Embora se analise cada uma das exigências de forma isolada, estas terão sempre de ser consideradas de forma conjunta de modo a obter uma solução tecnicamente equilibrada.

O grupo de exigências atrás referidas não é mais que um conjunto de características que procuram congregar todo um conjunto de exigências, de modo a cumprir o objectivo para o qual as alvenarias foram concebidas.

3.2-EXIGÊNCIAS MECÂNICAS

Quando nos referimos às exigências mecânicas estamos a referir a necessidade das paredes manterem a sua integridade, conjunta e local, quando sujeitas às acções de índole mecânica.

a)- ESTABILIDADE A CARGAS VERTICAIS E HORIZONTAIS

A estabilidade de uma parede é a capacidade de resistir às cargas a que estará sujeita, em termos de estados limites último e de utilização.

Na análise da estabilidade de paredes teremos de fazer a distinção entre paredes resistentes e paredes de preenchimento. As paredes resistentes terão de resistir a acções verticais e horizontais. A execução de paredes resistentes envolve cálculos específicos, sendo o *Eurocódigo 6 (EC6)* [10] o documento que regulamenta o dimensionamento e cálculo destas estruturas.

O referido *EC6* [10] constitui uma ferramenta importante no auxílio aos técnicos no uso de alvenarias resistentes, especificando modelos de cálculo e regras básicas a cumprir. Segundo este documento a espessura mínima das paredes resistentes é de 150 mm, não permitindo paredes com esbelteza superior a 20.

O *Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU)* [12] refere espessuras mínimas a respeitar nas paredes, considerando elementos de alvenaria de pedra ou de tijolo cerâmico maciço. Define um conjunto de soluções nos artº25 a 28, considerando como dimensão mínima para paredes de fachada 0,28 m admitindo espessuras inferiores desde que devidamente justificadas, não especificando qualquer método de cálculo.

As alvenarias de preenchimento são um caso particular, assemelhando-se a paredes de contraventamento, tendo sempre de resistir ao seu peso próprio e dos respectivos revestimentos e ainda às acções que actuam directamente sobre estas paredes, como é o caso do vento. Segundo o *EC6* [10] a espessura mínima de uma parede é de 100mm, não podendo a esbelteza ser superior a 20.

b)- ACÇÃO DO VENTO

A acção do vento caracteriza-se por uma acção horizontal, podendo ser quantificada e caracterizada com a aplicação do *RSA* [13].

A tensão induzida pelo vento nas paredes pode ser bastante gravosa, estando a sua intensidade directamente relacionada com a altura da construção.

A determinação da resistência da alvenaria à acção do vento pode ser quantificada através da aplicação do *EC6* [10], considerando um elemento à flexão simplesmente apoiado nas extremidades.

Segundo a norma francesa *DTU20.1* [14] em paredes com esbelteza inferior a 15 o cálculo específico da resistência ao vento pode ser dispensado.

A resistência da parede à acção do vento depende muito da ligação da parede nas suas extremidades e das relações de continuidade.

c)- ACÇÃO DOS SISMOS

A acção sísmica trata-se de uma acção dinâmica, resultante de movimentos vibratórios da terra, introduzindo cargas horizontais e verticais nas estruturas. Para quantificação desta acção aplica-se o *RSA* [13] ou o *Eurocódigo 8* [15], variando a sua intensidade com a localização da estrutura no território nacional. As estruturas deverão assim possuir resistência suficiente de modo a que a estrutura mantenha a sua integridade sob acção de um sismo.

Nas alvenarias de preenchimento considera-se que a carga resultante da acção sísmica é absorvida pela estrutura resistente, desprezando-se o contributo das alvenarias.

O dimensionamento das alvenarias à acção sísmica deverá ser executada segundo o *Eurocódigo 6* [10].

d)- VARIAÇÕES DIMENSIONAIS

As alvenarias, tal como muitos dos materiais, sofrem variações dimensionais ao longo da sua vida útil, que resultam de vários factores como a seguir se descreve:

- variações térmicas;
- variações do teor de humidade;
- deformação estrutural;
- deformações de fundações;
- Instabilidade dimensional dos elementos.

Todos estes factores conduzem a alterações nas dimensões das alvenarias; estas variações dimensionais, quando impedidas, conduzem a esforços nas alvenarias que podem ser superiores à capacidade resistente. As alvenarias de preenchimento tradicionais utilizadas no nosso país têm em muitas situações os movimentos impedidos, dado estarem confinadas por vigas e pilares.

Para absorver estes movimentos podemos prever nas paredes juntas de dilatação capazes de minimizar os esforços.

No quadro 3.1 apresenta-se os valores característicos para as deformações dos elementos de alvenaria preconizado no *EC6* [10].

Quadro 3.1 - Valores característicos das deformações para diversos tipos de unidades de alvenarias conforme *Eurocódigo 6*[10]

Tipo de unidade de alvenaria	Coeficiente de fluência a tempo infinito (ver nota 1) Φ_{∞}		Dilatação provocada pela humidade ou retracção a tempo infinito (ver nota 2) mm/m		Coeficiente de dilatação térmica $10^{-6}/K$	
	Gama	Valor de cálculo	Gama	Valor de cálculo	Gama	Valor de cálculo
Cerâmicas	0,5 a 1,5	1,0	-0,2 a +1,0	(ver nota 3)	4 a 8	6
Sílica-calcáreas	1,0 a 2,0	1,5	-0,4 a -0,1	-0,2	7 a 11	9
Betão de inertes correntes e pedra artificial	1,0 a 2,0	1,5	-0,6 a -0,1	-0,2	6 a 12	10
Betão de inertes leves	1,0 a 3,0	2,0	-1,0 a -0,2	-0,4 (ver nota 4) a -0,2 (ver nota 5)	8 a 12	10
Betão celular autoclavado	1,0 a 2,5	1,5	-0,4 a +0,2	-0,2	7 a 9	8
Pedra natural	(ver nota 6)	0	-0,4 a +0,7	+0,1	3 a 12	7
Notas: 1 – O coeficiente de fluência a tempo infinito $\Phi_{\infty} = \epsilon_{\infty} / \epsilon_{el}$, onde ϵ_{∞} é a extensão por fluência a tempo infinito e $\epsilon_{el} = \sigma / E$. 2- Os valores negativos da expansão devido à humidade ou retracção a tempo infinito indica encurtamento e os valores positivos indicam alongamento. 3- Os valores dependem do tipo de material em questão pelo que não é possível definir um valor de cálculo único. 4- O valor indicado é válido para inertes de pedra-pomes e de argila expandida. 5- O valor indicado é válido para outros inertes leves, que não pedra-pomes ou argila expandida. 6- Os valores são habitualmente muito baixos.						

A norma *DTU20.1* [14] propõe a execução de juntas de dilatação estabelecendo os seguintes critérios:

- alvenarias resistentes: distancia máxima de 20 m para paredes em locais secos e de grandes amplitudes térmicas, podendo aumentar esta distancia para 35m em zonas temperadas e húmidas.

- alvenarias de preenchimento: distância máxima entre 20 e 35 m para zonas secas e com grandes amplitudes térmicas, e 30 a 35 m em zonas temperadas e húmidas.

Quando as paredes possuem elementos particularmente sensíveis à variação da temperatura deve-se reduzir a distância entre juntas para 8 a 15m.

Uma outra orientação é dada pela *Norma Britânica BS5628* [16], que fixa para paredes em tijolo confinadas por pilares e vigas a distância máxima entre juntas igual a 15m, devendo reduzir-se a distância quando as paredes em causa podem sofrer contrações e expansões durante a sua vida útil superiores a 1mm.

Considera-se que a larguras das juntas, em milímetros, seja superior a 30% da distância, em metros, entre juntas.

Para paredes de blocos a distância deverá ser inferior a 6 m, não podendo esta ser igual ou superior ao dobro da altura da parede.

Convém referir que a distância entre juntas e a largura das mesmas estão relacionadas com as características dos elementos das paredes, reflectindo sempre uma vertente relacionada com a amplitude térmica. Além disso as dilatações das paredes estão relacionadas com a localização, orientação e cor do seu revestimento.

São referidos em seguida os locais das paredes onde é recomendado prever juntas:

- a intersecção com paredes e pilares;
- a intersecção com portas e janelas;
- a mudança de altura ou espessura das paredes;
- rebaixas na espessura das paredes;
- juntas de dilatação da estrutura.

3.3-COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO

As paredes das nossas construções devem apresentar características térmicas capazes de contribuir para a sensação de conforto dos seus utilizadores. No capítulo 2 já referimos as características térmicas que terão de possuir.

A sensação de conforto dos utilizadores depende da temperatura, humidade relativa, temperatura superficial das paredes e velocidade do ar. As características térmicas das paredes encontram-se regulamentadas no *RCCTE* [7], assunto já abordado no capítulo 2.

Um aspecto importante das paredes é a sua temperatura superficial, uma vez que temperaturas muito baixas podem provocar condensações e consequente formação de bolores. Temperaturas superficiais baixas conduzem ao desconforto dos utilizadores, provocado pelas trocas de calor por radiação quando nos aproximamos das paredes.

As paredes deverão apresentar alguma uniformidade da temperatura na sua superfície; segundo a *ISO7730* [2], a assimetria das superfícies verticais frias, deverá ser inferior a 10°C (medida num plano vertical 0,60m acima do pavimento). Esta condicionante obriga a que as caixilharias, principalmente os envidraçados, tenham de possuir características térmicas melhoradas.

Outros aspectos que podem contribuir para a assimetria da temperatura superficial são as designadas pontes térmicas, locais de descontinuidade da composição da parede devido à inserção de elementos estruturais ou outros, provocando alterações nas características térmicas da parede. Estes locais terão de ser objecto de tratamento térmico com a adopção de medidas que melhorem as suas características térmicas, como por exemplo forras de produtos isolantes.

Outro factor importante que não podemos deixar de referir é a inércia térmica das paredes, tendo um papel muito importante no comportamento térmico das nossas construções. Apesar de no cálculo das características térmicas das paredes considerarmos regime permanente, adoptando-se valores médios para a temperatura interior e exterior, na realidade tal não ocorre. A inércia térmica traduz o desfasamento entre a temperatura no exterior da construção e a que se verifica no interior desta.

A variação da temperatura interior ao longo do dia depende de diversos factores conforme a seguir se refere:

- temperatura exterior;
- ganhos de calor interno (por exemplo durante os períodos de utilização de fogão ou outro equipamentos);
- insolação (variação dia-noite, orientação do sol, período de nebulosidade passageira).

A variação da temperatura interior com os factores atrás descritos depende da inércia térmica, ou seja, quanto maior for a inércia térmica menor será a variação da temperatura interior.

Segundo *Hipólito Sousa* [2], a inércia térmica divide-se em inércia de transmissão e de absorção:

- a inércia de transmissão caracteriza a capacidade de uma parede de retardar a oscilação da temperatura interior, ou seja retardar o aumento da temperatura interior

devido ao aumento do exterior. Esta inércia aumenta com a espessura da parede e diminui com a difusibilidade.

- a inércia de absorção caracteriza o comportamento das paredes com a variação da temperatura interior dos edifícios, quanto maior for a inércia térmica das paredes menor será a variação da temperatura interior. Por exemplo os ganhos solares pelos envidraçados que podem conduzir a um aumento brusco da temperatura interior, podem ser atenuados pela inércia da parede.

O *RCCTE* [7] caracteriza as construções quanto à sua inércia em três classes conforme representado no quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Inércia térmica das construções segundo o *RCCTE*

Classe de inércia	Massa superficial útil por metro quadrado de área de pavimento (kg/m^2)
Fraca	$I < 150$
Média	$150 \leq I \leq 400$
Forte	$I > 400$

Na generalidade as casas portuguesas são do tipo de inércia forte. A inércia das nossas construções é responsável pelo desfasamento verificado entre a temperatura exterior e interior, contribuindo também de forma clara para atenuar os valores máximos de temperaturas.

Nos edifícios de inércia forte o desfasamento verificado entre a temperatura máxima exterior e a máxima interior é significativo, e consequentemente as paredes restituem energia calorífica nas horas em que as temperaturas exteriores tendem a diminuir.

Nos edifícios de inércia fraca o desfasamento entre as temperaturas exterior e interior é muito reduzido; um exemplo de uma construção de inércia fraca são os módulos usados nos estaleiros de obra para as instalações sociais.

Este comportamento pode ser apresentado graficamente como na figura 3.1.

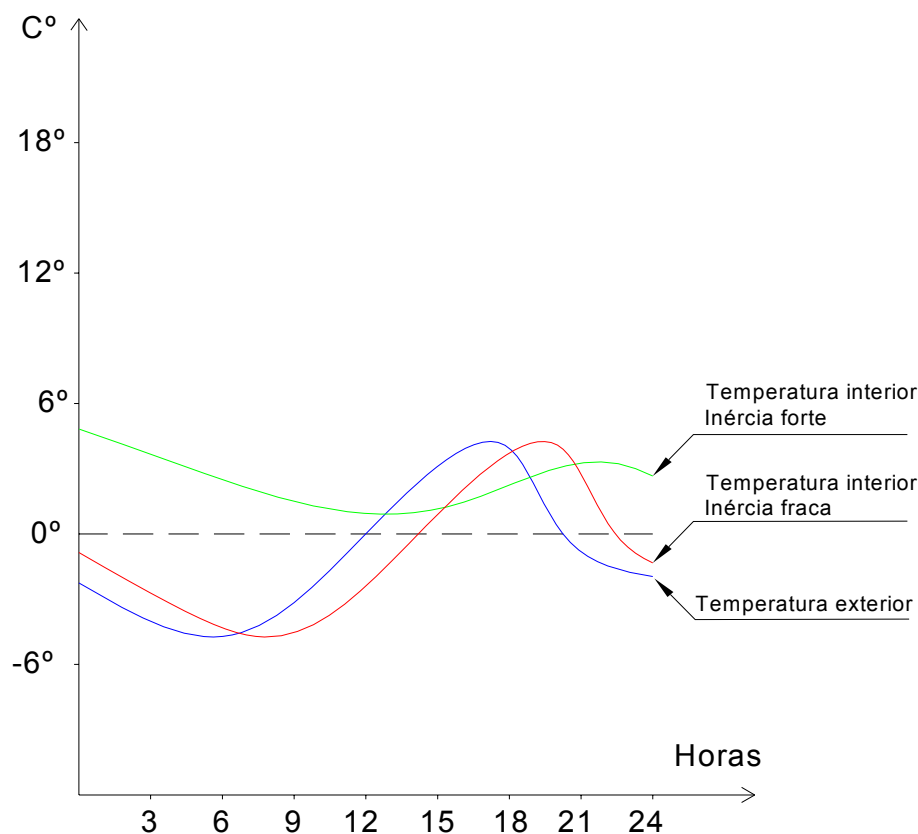


Fig. 3.1 - Variação diária da temperatura interior dos edifícios com a sua inércia

A) -IMPORTÂNCIA DA INÉRCIA TÉRMICA NO COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS PAREDES

A ponderação da inércia térmica das paredes resulta do facto de analisarmos em regra o comportamento térmico das paredes em regime permanente, enquanto na realidade as nossas paredes estão sujeitas ao regime variável, resultante da sazonalidade das temperaturas exteriores.

A inércia térmica encontra-se relacionada com o calor específico dos materiais constituintes das paredes (quantidade de calor necessário para a elevação de 1°C da temperatura da unidade de massa de um material).

A densidade dos materiais está directamente relacionada com a capacidade de absorver energia calorífica, desta forma os materiais mais densos acumulam maior quantidade de calor. Assim as paredes de betão ou tijolo acumulam calor, libertando-o de forma lenta. A libertação de calor dos materiais para o exterior depende da difusibilidade, que é tanto maior quanto maior for o seu peso próprio, calor específico e menor a sua condutibilidade térmica. Os materiais isolantes exibem baixa inércia térmica.

Em suma a inércia térmica das paredes funciona como mola térmica, amortecendo os pontos máximos da temperatura, permitindo realizar uma gestão da energia térmica. Assim a capacidade de absorver a energia térmica, conduz a que durante o dia as paredes vão aquecendo, aproveitando os ganhos solares, libertando o calor nas horas em que a temperatura tende a diminuir.

Existe actualmente sistemas de aquecimento eléctricos do tipo intermitente, tendo por base de funcionamento o aquecimento das habitações nos períodos em que a tarifa eléctrica é mais baixa (durante a noite), coincidindo este período com as temperaturas mais baixas. Os dispositivos de aquecimento possuem sistemas de acumulação de calor (material denso), ou seja têm uma inércia térmica própria que acumula calor durante o seu período de funcionamento, libertando-o nos períodos em que estão desligados. Não será difícil concluir que a capacidade de acumular calor das paredes (inércia térmica) contribui para um funcionamento melhorado desta solução de aquecimento.

Podemos assim concluir que é importante construir habitações com forte inércia térmica, obtendo-se um conforto térmico melhor, diminuindo as amplitudes térmicas, conseguindo assim redução da factura energética através de uma gestão térmica mais eficaz.

B) -INÉRCIA HÍGRICA

A inércia higríca das paredes reflecte a higroscopicidade das paredes, principalmente dos revestimentos das mesmas. A higroscopicidade de um material é a capacidade de adsorver humidade quando a humidade do ar for elevada, ou libertar quando a humidade do ar for baixa.

Esta propriedade depende assim não dos elementos de alvenaria que compõem a parede mas sim do seu revestimento. Desta forma os revestimentos das paredes deverão possuir uma certa inércia higríca, funcionando como reguladores do teor de humidade do interior das habitações. Este funcionamento contribui para um abaixamento dos níveis máximos de humidade, reduzindo assim os riscos de condensações superficiais.

O uso de pinturas com característica pára-vapor anula este efeito dos revestimentos, e por outro lado a existência de sais no interior dos revestimentos pode conduzir ao aparecimento de manchas com cristalização dos sais e consequente degradação dos revestimentos. Um teor elevado de humidade relativa nos revestimentos (cerca de 90%) origina o aparecimento de bolores, que após germinarem necessitam só de um teor de humidade relativa de 70% para se manter.

3.4-ESTANQUIDADE À ÁGUA.

A estanquidade das paredes à água é a capacidade de as paredes impedirem a infiltração da água do exterior para o interior; a infiltração da água na parede e a sua permanência prolongada no interior prejudica o seu desempenho.

A capacidade das paredes para desempenhar esta função depende dos elementos de alvenaria, revestimentos utilizados, métodos construtivos, pormenores arquitectónicos e da severidade de exposição onde a parede se localiza.

A composição das paredes e modo de execução das mesmas, tem sofrido nos últimos anos muitas mudanças conforme já escrito no capítulo 1. Estas alterações têm conduzido a que muitas das soluções adoptadas não garantam a estanquidade à água, devido ao uso de materiais que não tem a qualidade requerida, ou em que a sua aplicação não é correcta.

A adopção de soluções arquitectónicas menos convencionais, com o uso de paredes com grandes áreas e sem qualquer saliência que impeça a circulação da água ao longo das fachadas em construções de edifícios de grande porte, contribui para a diminuição da estanquidade das paredes.

As fachadas tradicionais, em edifícios de pequeno porte, possuem em geral áreas pequenas, havendo o hábito de prever elementos salientes ao longo da fachada de modo a seccionar as paredes, obtendo-se áreas mais pequenas, impedindo assim a água de circular ao longo das fachadas.

A exposição das paredes assume um papel fundamental, já que a quantidade de água e o modo como esta actua na parede, dita o modo como a parede permite impedir ou não a infiltração da água.

De modo a compreendermos como a água se infiltra ao longo das paredes, iremos descrever os fenómenos físicos que poderão estar presentes:

- gravidade;
- energia cinética das gotas da chuva;
- pressão de vento;
- capilaridade.

A força de gravidade que actua em todos os corpos com massa também se faz sentir na água que se encontra na superfície das paredes, e que faz com que no caso de paredes com fissuras superiores a 0,5 mm a água se infiltre.

A energia cinética das gotas corresponde à energia que a água armazena ao longo do seu percurso, energia esta que poderá ser suficiente para conseguir infiltrar-se na parede. Esta energia só é suficiente para fissuras compreendidas entre 4 e 5 mm, uma vez que para dimensões inferiores a água não consegue infiltrar-se.

A acção do vento nas superfícies das fachadas funciona como uma força de pressão, desta forma o filme de água sobre as fachadas encontra-se sobre pressão, facilitando a infiltração. Esta ocorre para fissuras superiores a 0,1 mm.

A capilaridade dos materiais está associado a todos aqueles que tem vazios no seu interior, apresentando capacidade para absorver água. A capilaridade depende dos vazios no interior materiais, mas não varia proporcionalmente com o volume dos vazios, uma vez que depende da porosidade e porometria dos materiais. A absorção da água pelas pressões capilares é tanto maior quanto mais finos forem os poros.

A humificação das paredes produz não só patologias, como manchas acompanhadas de bolores, eflorescências e criptoflorescências, mas também conduz a uma menor eficiência térmica da parede. Desta forma como as paredes de alvenaria de blocos de betão de argila expandida, não garantem só por si a estanquidade à água, terão de ser complementadas com um revestimento adequado para evitar a infiltração da água.

Os revestimentos exteriores das paredes, terão de possuir um conjunto de características específicas capazes de garantir o bom desempenho da parede. As características terão de ser capazes de responder às exigências resultantes das condições físicas a que a parede está exposta, nomeadamente:

- intensidade e frequência da chuva;
- intensidade, frequência e direcção do vento;
- simultaneidade de chuva e do vento;
- orientação da parede objecto do vento.

As condições físicas a que estão expostas as paredes encontram-se caracterizadas na publicação “*Compilação de Dados Climáticos Directamente Ligados aos Problemas da Humidade*” [2]. Um dos factores utilizado nesta caracterização é o índice de chuva incidente, que depende da localização da habitação, e dos valores médios mensais de precipitação e de vento, e está dividido em quatro níveis conforme a seguir se apresenta:

$I < 3$ – Exposição fraca

$3 < I < 5$ – Exposição moderada

$5 < I < 7$ – Exposição média

$I > 7$ – Exposição severa

Onde I representa o índice de chuva incidente (m^2/s) definido como “ Produto dos valores médios de precipitação (m), pela velocidade do vento (m/s) para cada direcção considerada”. Uma unidade de chuva incidente corresponde aproximadamente a 200 l/m^2 de água da chuva em superfícies horizontal.

Para além da precipitação incidente, teremos de considerar a acção do vento nas fachadas. Para quantificação da acção do vento poderemos recorrer ao *RSA* [12].

Para garantia da estanquidade das paredes temos que escolher um revestimento que possua as características mínimas capazes de resistir às condições a que estão submetidas.

Como já vimos atrás para além do revestimento é necessário ter outros cuidados, como conceber paredes que não promovam o escoamento da água através do seu paramento, e realizar uma construção cuidada das paredes com o uso de materiais e técnicas de execução correctas.

A influência da espessura da parede na sua estanquidade é também importante. As *Normas Britânicas* definem as espessuras mínimas das paredes para diversos

materiais e condições de precipitação. Neste trabalho iremos só apresentar as exigências para blocos de betão apresentadas no quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Espessura mínimas de paredes de blocos de betão em função das condições de exposição segundo as *Normas Britânicas*

Categoria de exposição	Espessura mínima da parede, excluindo a espessura dos rebocos		
	Rebocadas (betão denso)	Rebocadas (betão de agregados leves ou betão celular autoclavado)	Não rebocadas
Muito severa	Não recomendadas, usar um revestimento de elevada estanquidade.		
Severa	250 mm	215 mm	Não recomendado
Moderada/severa	215 mm	190 mm	Não recomendado
Abrigada/Moderada	190 mm	140 mm	440 mm
Abrigada	90 mm	90 mm	328 mm
Muito abrigada	90 mm	90 mm	190 mm

Segundo as mesmas normas a categoria de exposição é definida em função da quantidade chuva incidente na parede no período de chuva mais gravoso em causa, durante um período de três anos, conforme se apresenta no quadro 3.4.

Não é habitual o emprego de paredes de blocos de betão, à vista, sem qualquer tipo de revestimento, usando-se habitualmente rebocos hidráulicos ou revestimentos metálicos em instalações industriais. O que se comprova pelo quadro 3.3 em que as paredes de blocos não revestidas só são aceitáveis em zonas severidade de exposição limitada e mesmo assim com espessuras consideráveis.

Quadro 3.4 – Categoria de exposição atmosférica

Categoria de exposição	Índice de chuva incidente persistente (l/m ²)
Muito severa	98 ou superior
Severa	68-123
Moderada/Severa	46-85
Abrigada/Moderada	29-58
Abrigada	19-37
Muito abrigada	24 ou menos

Em suma, deveremos sempre prever a aplicação de revestimentos que impeçam a infiltração de água, seleccionados de acordo com a chuva incidente. O uso de paredes sem qualquer tipo de revestimento, só deverá ser usado em locais muito abrigados.

3.5-COMPORTAMENTO AO RUÍDO

O comportamento ao ruído da envolvente das construções constitui uma preocupação crescente, dado o nível elevado de ruído a que estão expostas as nossas habitações.

A exposição ao ruído provoca alterações no sistema nervoso, estando estas alterações directamente relacionadas com o nível de ruído [20].

Estes efeitos podem manifestar-se pela diminuição do rendimento escolar, profissional, acidentes de trabalho, ou de tráfego, ou mesmo uma sensação de incómodo, revelando as pessoas expostas ao ruído intranquilidade, inquietude, desassossego, depressão, ansiedade e falta de concentração.

Para termos uma noção da interferência do ruído nas nossas vidas analisemos a dificuldade na comunicação entre pessoas. Um conversa entre duas pessoas distanciadas

entre si de cerca de um metro, produz um nível sonoro compreendido entre 50 a 55 dB; porém se estão sujeitas a ruído de fundo terão de aumentar o nível sonoro de modo a produzir um som 15 dB superior ao nível sonoro do ruído de fundo. O aumento do nível sonoro pode ser tal que obrigue a que as pessoas, para poderem comunicar, entre si, tenham de gritar, conseguindo assim produzir um som com um nível sonoro compreendido entre 75 a 80 dB. Conclui-se assim que para um nível sonoro de ruído de fundo superior a 65dB é impossível estabelecer uma conversa entre pessoas e a partir dos 35 a 40 dB provoca dificuldades na comunicação.

Outros dos efeitos negativos é durante o sono, provocando dificuldades de dormir, interrupções e diminuição da qualidade do sono; as dificuldades fazem-se sentir a partir de 30 dB podendo, a partir dos 45 dB, provocar o despertar e interrupções do sono.

Em Portugal estima-se que 19% da população está sujeita a níveis de ruído superiores a 65 dB, que em Lisboa e Porto esta percentagem ascende a 50% e 24% respectivamente. Em termos Europeus calcula-se que 25% da população está muito afectadas e 40% sente-se incomodada.

Existem também fenómenos de insensibilidade ao ruído, que pode ser por perda de audição ou então por adaptação do cérebro ao ruído, o que faz com que não nos apercebamos do ruído.

No quadro 3.5 apresentam-se os valores críticos de ruído recomendados pela Organização Mundial de Saúde.

A preocupação crescente da nossa sociedade em relação ao ruído deu origem em Portugal ao aparecimento de um *Regulamento Geral Sobre o Ruído, publicado em 1987 (RGR)*, mantendo-se em vigor durante 15 anos. Após 15 anos verificou-se a necessidade de adequar este diploma à evolução sofrida no ramo da construção civil, tendo sido publicado um novo *Decreto-Lei n.º 129/2002* [21].

Quadro 3.5 – Valores críticos de ruído recomendados pela OMS

Para valores superiores	Início dos efeitos nocivos
30	Dificuldade em conciliar o sono Perda de qualidade do sono
40	Dificuldade na comunicação verbal
45	Provável interrupção do sono
50	Incomodo diurno moderado
55	Incomodo diurno forte
65	Comunicação verbal extremamente difícil
75	Perda de audição a longo prazo
110-140	Perda de audição a curto prazo

A publicação de regulamentação específica para o ruído veio sensibilizar a comunidade técnica para o problema, constituindo assim mais uma preocupação na concepção das edificações.

Para se compreender o comportamento das edificações ao ruído teremos de compreender o modo como este se transmite de um local para outro. O som transmite-se de duas formas, por via aérea e por transmissão pelos elementos que separam os locais.

Os sons transmitidos pelos elementos de separação entre locais, resultam da vibração dos elementos, provocada por pancadas nestes. Estes sons são designados por sons de percussão, sendo característica a sua transmissão nos pavimentos.

Os sons aéreos transmitem-se por forma directa, através dos elementos de separação dos locais, ou por forma marginal, que ocorre por elementos marginais, secundários ao elemento principal de separação entre locais.

Na análise do comportamento de uma parede a transmissão aérea directa é condicionante, sendo a massa da parede o factor principal na capacidade de isolamento; a duplicação da massa da parede provoca uma diminuição de 6 dB do nível sonoro. Um outro aspecto importante no comportamento é a qualidade de execução da parede, com

juntas devidamente executadas e a ausência de fissuras na parede. Os elementos inseridos nas paredes têm também um papel importante no comportamento, sendo as caixas de estores, janelas, portas e aberturas para ventilação dos espaços responsáveis por uma parte importante do som transmitido para o interior das habitações.

Desta forma a análise do comportamento de uma parede à transmissão de sons aéreos, terá de ser analisado no conjunto dos vários elementos que a compõem.

Em termos regulamentares encontra-se definido o índice de isolamento sonoro a sons aéreos, variando conforme a localização do elemento na habitação. A regulamentação define valores padrões normalizados para o isolamento sonoro de sons de condução conforme a seguir descrito [21]:

- $D_{2m,n}$ (isolamento sonoro a sons de condução aérea, normalizado):

'' diferença entre o nível médio de pressão sonora exterior, medido a 2 m da fachada do edifício ($L_{1,2m}$), e o nível de pressão sonora medido no local de recepção (L_2), corrigido da influência da área de absorção sonora equivalente do compartimento receptor ''.

- D_n (isolamento sonoro a sons de condução aérea, normalizado):

'' diferença entre o nível médio de pressão sonora medido no compartimento emissor (L_1) produzido por uma ou mais fontes sonoras, e o nível médio de pressão sonora medido no compartimento receptor (L_2), corrigido da influência da área de absorção sonora equivalente do compartimento receptor ''.

O primeiro índice de isolamento sonoro entre o exterior e as zonas de estar da habitação deverá respeitar os valores apresentados no quadro 3.6.

Quadro 3.6 – Índice de isolamento sonoro entre o exterior e as zonas de estar da habitação

Local	$D_{2m,n}$ (dB)
Zonas mistas	≥ 33
Zonas sensíveis	≥ 28

A classificação de zona mista ou sensível é definida em conformidade com o estipulado no *Decreto-Lei n.º 292/2000*.

No quadro 3.7 a seguir apresenta-se um conjunto de valores para o segundo índice de isolamento sonoro descrito anteriormente para edifícios de habitação, D_n :

Quadro 3.7 – Índice de isolamento sonoro para edifícios de habitação

Local	D_n (dB)
Entre uma fogo (emissão) e quartos ou zonas de estar de outro fogo (receptora).	≥ 50
Entre locais de circulação comuns de um edifício (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (recepção).	≥ 48
Entre caminhos de circulação vertical comum (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (recepção), quando o edifício tiver ascensores	≥ 40
Entre garagens de estacionamento automóvel (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (recepção).	≥ 50
Entre locais destinados a comércio, indústria, serviços ou diversões (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (recepção).	≥ 58

Os blocos de agregados de argila expandida apresentam um bom comportamento ao isolamento aos ruídos de condução aérea, sendo actualmente um material muito usado para a produção de elementos de alvenaria para a construção de barreiras acústicas.

Segundo um fabricante nacional de blocos de argila expandida o índice de isolamento sonoro de um elemento de alvenaria com 0,32 m de espessura é de 50 dB, o que cumpre os mínimos exigidos pelo regulamento, com excepção dos locais confinantes com comércio, indústrias, serviços ou diversões. Para estes locais, com o aumento da espessura dos elementos e a colocação de revestimentos em ambas as faces dever-se-á também conseguir cumprir o regulamento para todas as situações previstas.

3.6-SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS

As paredes nas nossas habitações terão de possuir características capazes de exibir um comportamento satisfatório quando em presença de um incêndio. Este comportamento traduz-se pela capacidade de impedir a propagação das chamas, fumos, aumento de temperatura, mantendo a integridade física.

Estas características visam uma diminuição do número de ocorrências, feridos, vítimas, prejuízos materiais e patrimoniais, ambientais e de natureza social, resultantes de incêndios nas construções.

As exigências relativas à segurança contra incêndio das construções encontram-se legisladas no nosso país pelo *Regulamento de Segurança Contra Incêndios em Edifícios de Habitação (RSCIEH)* [22].

A análise dos elementos quando em presença de um incêndio, consiste na verificação da reacção ao fogo através da análise da não combustibilidade, inflamabilidade, velocidade de propagação das chamas e resistência mecânica ao fogo.

As paredes de alvenaria em elementos de argila expandida, exibem um comportamento ao fogo superior ao de qualquer solução tradicional conforme será descrito no capítulo 6, sendo da classe de reacção ao fogo M0. Existem já no mercado unidades de alvenaria com um comportamento ao fogo de elevado desempenho, encontrando-se elementos com dimensões 40x32x20 com um comportamento ao fogo CF240; para um elemento com dimensões 50x12x20 teremos um comportamento ao fogo CF120. Em termos regulamentares as exigências dependem do local onde se insere o elemento e do papel que lhe é atribuído, podendo ter exigência desde CF60 a CF120. Podemos assim concluir que uma solução de elementos de alvenaria de argila expandida não terá, em geral, dificuldades em assegurar as exigências de segurança contra incêndios.

CAPITULO 4

ISOLAMENTO TÉRMICO E TRANSMISSÃO DE CALOR

CAPITULO 4

ISOLAMENTO TÉRMICO E TRANSMISSÃO DE CALOR

INDICE

4.1-ISOLAMENTO TÉRMICO

4.2- TRANSMISSÃO DE CALOR

4.3 - TRANSMISSÃO DE CALOR POR RADIAÇÃO TÉRMICA

4.3.1- CORPO NEGRO

4.3.2- LEIS DE CORPO NEGRO

4.3.3- INTENSIDADE DE RADIAÇÃO

4.3.4- RELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE E POTÊNCIA EMISSIVA

4.3.5- IRRADIAÇÃO

4.3.6- PROPRIEDADES DA RADIAÇÃO

4.3.7- COMPORTAMENTO DE CORPOS REAIS À RADIAÇÃO INCIDENTE

4.3.8- LEI DE KIRCHHOFF

4.3.9- INTERACÇÃO ENTRE CORPOS

4.3.10- TROCAS RADIANTES ENTRE SUPERFÍCIES CINZAS

4.3.11- ALVÉOLOS

4.4- TRANSMISSÃO DE CALOR POR CONVECÇÃO

4.4.1- CONVECÇÃO NATURAL

4.4.2- CONCEITOS BÁSICOS

4.4.3- DEFINIÇÃO DA CONVECÇÃO

4.4.4- ALVÉOLOS

4.4.5- FÓRMULAS EMPÍRICAS

4.5- TRANSMISSÃO DE CALOR POR CONDUÇÃO

4.5.1- ANÁLISE DIFERENCIAL DA CONDUÇÃO TÉRMICA

4.5.2- ANALOGIA ELÉCTRICA

4- ISOLAMENTO TÉRMICO E TRANSMISSÃO DE CALOR

4.1-ISOLAMENTO TÉRMICO

Quando nos referimos a isolamento térmico rapidamente associamos a ideia a materiais com baixa condutibilidade térmica. Esta associação decorre do facto de sempre que referimos isolamento térmico temos em mente a necessidade de perder ou ganhar energia sobre a forma de calor.

Na construção procuramos reduzir a troca de energia entre o interior e o exterior da edificação, recorrendo em muitos casos a materiais isolantes térmicos.

Materiais isolantes são materiais porosos, cuja elevada resistência térmica se baseia na baixa condutibilidade térmica do ar contido nos seus vazios. Quanto menor for a densidade do material e maior o número de poros, menor é a sua condutibilidade térmica.

Um material é considerado isolante térmico segundo o *RCCTE* [7] quando exibir uma condutibilidade térmica inferior a $0,065 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Os materiais com estas características apresentam por regra um baixo peso específico, possuindo uma quantidade significativa de vazios na sua estrutura [23].

Para obtenção de um material isolante teremos de aprovisionar ar ou outro gás no seu interior, sendo a condutibilidade térmica inversamente proporcional à quantidade de vazios do material. A transmissão do calor nos espaços vazios ocorre segundo três fenómenos, radiação, convecção e condução conforme será descrito neste capítulo.

A condutibilidade térmica dos materiais não assume valores absolutos, sendo os factores mais condicionantes os seguintes:

- temperatura;
- pressão;
- humidade.

Um outro factor a considerar é a perda de características isolantes com a idade devido ao envelhecimento dos materiais; por exemplo estima-se que os isolantes à base de poliuretano ou poliestireno perdem entre 20% e 50% das suas propriedades isolantes no primeiro ano de vida.

Os materiais isolantes são divididos segundo *Frank Kreith e Mark S. Bohn* [24] em três grupos:

- fibrosos – materiais de estrutura fibrosa, constituídos por filamentos de pequeno diâmetro e baixa densidade. Comercialmente podem aparecer moldados em painéis ou em rolos, podendo também aparecer a granel, e são utilizados para preencher espaços vazios. Os materiais isolantes mais correntes no mercado com estas características são a lã mineral e a fibra de vidro.
- celulares – materiais de estrutura celular aberta ou fechada, caracterizados pela baixa densidade, capacidade calorífica e resistência à compressão significativa. Estes tipos de materiais são comercializados em painéis rígidos ou flexíveis, podendo também ser utilizados em forma de espuma aplicados “in situ”. São exemplos de materiais com este tipo de estrutura o poliuretano e o poliestireno expandido.
- granulares – materiais de estrutura granular constituídos por “flocos ou partículas de materiais inorgânicos unidos em formatos preestabelecidos, ou utilizados na forma de pós”. São exemplos de produtos comerciais deste tipo o pó de perlite, a sílica diatomácea e a vermiculite.

Os materiais usados em Portugal [23] são essencialmente do tipo fibroso ou celular, com o uso generalizado do poliestireno extrudido, materiais de poliuretano, lã de vidro e rocha.

Podemos concluir que o aprovisionamento de ar no interior dos materiais é essencial para diminuir a condutibilidade térmica dos materiais, devido à baixa condutibilidade do ar. É precisamente este conceito que está na base da melhoria significativa do comportamento térmico das paredes duplas, através da interposição de uma camada de ar entre os panos de parede, o mesmo acontecendo com a utilização de blocos de betão leve com furação vertical.

4.2- TRANSMISSÃO DE CALOR

A determinação das características térmicas das alvenarias que constituem as envolventes das nossas construções constitui um objectivo do trabalho aqui desenvolvido.

A preocupação com o comportamento térmico dos edifícios constata-se desde da antiguidade, com o uso de soluções que permitiam diminuir as trocas de calor interior/exterior reduzindo as amplitudes térmicas no interior das construções. Um exemplo desta preocupação é o que se verifica no sul do país, com a pintura das construções tradicionais de branco de modo a reduzir a absorção da radiação térmica.

Para a determinação e compreensão do fenómeno de transferência será necessário compreender o processo pelo qual este ocorre, recorrendo à termodinâmica, ramo da ciência que estuda estes fenómenos.

Relembrando a primeira lei da termodinâmica “a energia não pode ser criada nem destruída, somente modificada de uma para outra forma”, todos os processos de transferência de calor envolvem transmissão e transformação de energia.

Para solucionar os problemas de transferência de calor em engenharia a termodinâmica revela-se insuficiente, dado que a termodinâmica clássica trata de sistemas numa visão macroscópica não permitindo aproximações na determinação das variáveis, fazendo a análise de sistemas em estado estacionário, realizando um balanço entre a mudança de energia e o trabalho realizado, e não considerando o fluxo de energia por unidade tempo.

As engenharias ditas tradicionais envolvem sempre problemas de transferência de calor, sendo fácil encontrar várias publicações sobre o tema. A transmissão de calor está relacionada com a necessidade de perder ou reter energia; um exemplo é o desenvolvimento do transformador eléctrico onde se tem em consideração a capacidade deste poder trocar calor, de modo a não aumentar excessivamente a sua temperatura, colocando em causa o seu funcionamento. Nos elementos da envolvente dos nossos edifícios a preocupação é reduzir as amplitudes térmicas no interior com o menor custo possível.

O cálculo da transmissão de calor em engenharia envolve a definição de certas premissas no seu desenvolvimento, já que a transmissão de calor envolve transformações nas características térmicas dos materiais, sendo um exemplo a condutibilidade térmica dos materiais que depende da temperatura. A consideração de todas as transformações, de modo a descrever de forma rigorosa o processo, implicaria uma complexidade na determinação da transferência de calor que tornaria muito difícil a sua determinação.

Para o cálculo aqui desenvolvido iremos considerar o regime permanente, sendo as características dos materiais determinadas para uma temperatura média entre o interior e o exterior.

Com estas aproximações consegue-se um rigor nos valores obtidos aceitável.

Sempre que falámos de transmissão de calor estamos a referir a troca de energia entre dois sistemas que se encontram a temperaturas diferentes, gerando um gradiente de temperaturas. Quando nos referimos à troca de calor estamos perante três fenómenos:

- radiação;
- convecção;
- condução.

Estes três fenómenos são a forma possível pela qual se pode transmitir o calor e por regra actuam em conjunto.

Iremos estudar cada um dos fenómenos em separado e no final realizaremos o seu estudo conjunto.

4.3 - TRANSMISSÃO DE CALOR POR RADIAÇÃO TÉRMICA

A radiação térmica é uma forma de troca de calor, e consiste na energia térmica emitida por um corpo a uma temperatura finita; é comum a todos os corpos e está associada à emissão de ondas electromagnética por parte dos corpos.

A radiação propaga-se no vácuo a uma velocidade igual à da luz $c = 3 \times 10^8$ m/s regida pela seguinte fórmula:

$$c = \lambda \cdot \nu$$

Sendo:

- λ = comprimento de onda, m;
- ν = frequência, s^{-1} .

O espectro electromagnético traduz a distribuição da radiação electromagnética em função da energia, frequência ou comprimento de onda.

Os limites apresentados no quadro 4.1 podem sofrer alterações, servindo os intervalos como referência.

Para o estudo aqui desenvolvido só nos interessa a radiação térmica, que é a radiação electromagnética.

Quadro 4.1 – Espectro electromagnético

	Comprimento de onda (m)	Comprimento de onda (μm)
Raios cósmicos	$<10^{-11}$	$<10^{-5}$
Raios x	10^{-11} a 10^{-8}	10^{-5} a 10^{-2}
Ultravioleta	10^{-8} a 10^{-7}	10^{-2} a 10^{-1}
Radiação térmica	10^{-7} a 10^{-4}	10^{-1} a 10^2
Luz visível	$3,5 \times 10^{-7}$ a $7,8 \times 10^{-7}$	0,35 a 0,78
Infravermelho	$7,8 \times 10^{-7}$ a 10^{-4}	0,78 a 100
Ondas de rádio e tv	10^{-1}	10^5

A radiação electromagnética situa-se no intervalo de comprimento de onda entre 10^{-7} e 10^{-4} , conforme se pode ver na figura 4.1.

Como já foi referido anteriormente a radiação térmica propaga-se com um certo comprimento de onda e frequência, sendo esta propagação dificultada ou impedida pelos corpos sólidos, líquidos e gasosos.

Assim a radiação ao encontrar uma superfície pode ser reflectida (ρ), transmitida (τ) ou absorvida (α), sendo que a soma dos três efeitos terá de ser igual à unidade.

$$\rho + \tau + \alpha = 1$$

Assim quando $\tau = 0$ estamos perante um corpo classificado como opaco, e para $\tau = 1$ perante um corpo perfeitamente transparente.

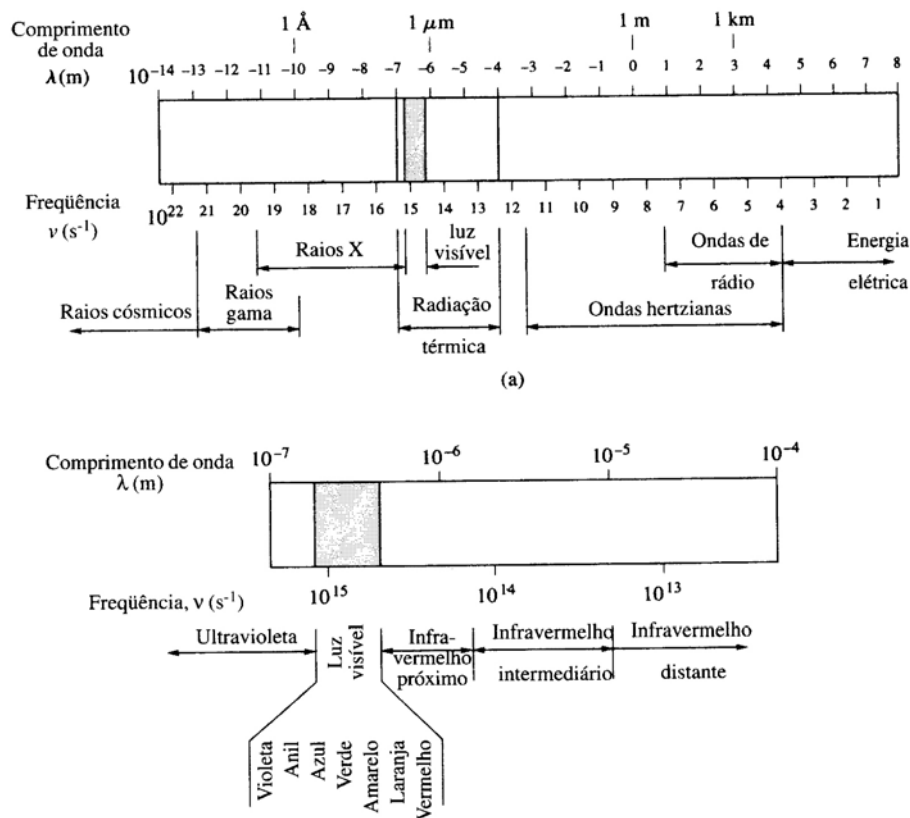


Fig. 4.1 – Variação da radiação electromagnética com o comprimento de onda

Nos corpos opacos, que são aqueles que nos interessam, o fenómeno de emissão de energia térmica é essencialmente um fenómeno superficial, pelo que a radiação absorvida acontece numa camada com uma espessura de poucos μm .

Por exemplo numa chapa de aço polido esta camada tem menos de $1 \mu\text{m}$, sendo a emissão de radiação originária nesta camada, ou seja essencialmente um fenómeno superficial.

Quando temos um corpo com $\rho = 1$ diz-se que o corpo é um reflector perfeito.

A reflexão é classificada por especular, quando o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. Quando o feixe incidente incide de forma uniforme e a reflexão é feita em todas as direcções, classifica-se como reflexão difusa.

Temos de referir que na realidade não existem corpos perfeitamente difusos, dado que não há nenhum corpo com comportamento perfeitamente difuso em toda a gama de comprimento de onda.

Os factores ρ , τ , α não assumem valores absolutos, antes pelo contrário, eles variam com os seguintes factores:

- frequência da radiação;
- ângulo de incidência;
- características da superfície.

4.3.1- CORPO NEGRO

Corpo negro é um corpo que absorve toda a radiação que nele incide, ou seja, nenhuma luz o atravessa nem é reflectida.

A designação de corpo negro refere-se a um corpo ideal, que se caracteriza por emitir e absorver a máxima quantidade de radiação disponível, para qualquer comprimento de onda ($\rho = 0$, $\tau = 0$).

Também é importante definir corpo branco, por se caracterizar por reflectir toda a radiação incidente $\rho = 1$.

Como foi referido atrás o corpo negro não existe na realidade ou seja, não se encontra nenhum corpo em que $\alpha = 1$; a idealização de corpo negro é efectuada para alguns estudos em laboratório, usando para isto uma esfera oca cujas paredes internas são mantidas a uma temperatura constante.

Se executarmos um pequeno orifício na esfera e fizermos incidir um feixe de luz através deste, este irá incidir na parede sendo parte absorvida e outra parte reflectida, repetindo-se este fenómeno inúmeras vezes até que o feixe possa atingir o orifício.

Dado o ciclo de absorção/reflexão enfraquece de tal modo o feixe de energia que é desprezável quando este atinge novamente o orifício.

Existem substâncias que podem ser considerados corpos negros como é o caso do negro de fumo em que $\alpha \approx 1$.

Na figura 4.2 apresenta-se a simulação do comportamento de um corpo.

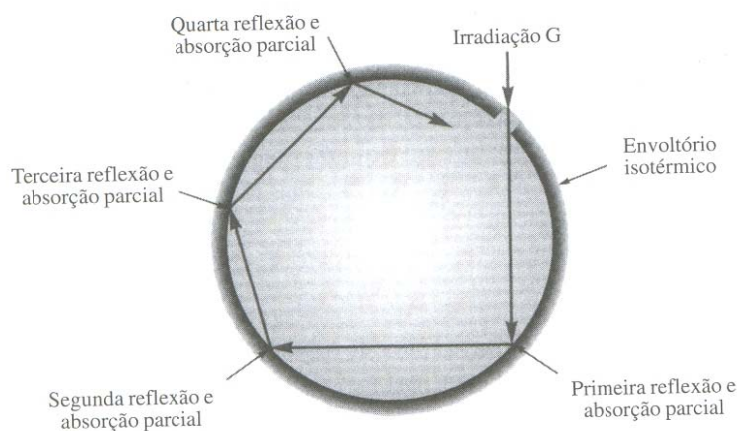


Fig. 4.2 – Simulação de corpo negro

Vamos agora supor que teremos dentro da nossa cavidade um corpo negro à mesma temperatura das paredes da cavidade e que ambos se encontram a temperatura constante.

Neste caso temos o corpo a receber e a emitir radiação, ou seja, de modo a manter o equilíbrio a taxa de emissão de radiação pelo corpo deve ser igual à taxa de irradiação (Energia que incide num corpo); caso contrário seria posto em causa o equilíbrio do sistema, violando assim a segunda lei da termodinâmica.

Se consideramos a irradiação do corpo negro G_b e a radiação E_b teremos que $G_b = E_b$. O estudo do corpo negro é importante para se poder compreender o fenómeno da radiação térmica de uma superfície.

4.3.2- LEIS DE CORPO NEGRO

A energia radiante espectral por unidade de tempo e área emitida por um corpo negro, com comprimento de onda λ na faixa de comprimento de onda $d\lambda$ é representada por $E_{b\lambda} d\lambda$, sendo $E_{b\lambda}$ o poder emissivo monocromático de corpo negro.

O poder emissivo é dependente do comprimento de onda. A relação entre o poder emissivo e o comprimento de onda, desenvolvido por *Max Planck* [23] em 1900 na sua teoria quântica, é traduzida pela expressão seguinte:

$$E_{b\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \times (e^{C_2 / \lambda \times T} - 1)} \quad (4.1)$$

Sendo:

- $E_{b\lambda}$ = potência emissiva monocromática de um corpo á temperatura absoluta T , W/m^3 (BTU/h ft² μ).
- λ = comprimento de onda, m(μ)
- T = temperatura absoluta do corpo, K
- C_1 = primeira constante de radiação = $3,7415 \times 10^{-16} W m^2$
- C_2 = segunda constante de radiação, $1,4388 \times 10^{-2} mK$

O poder emissivo de um corpo para várias temperaturas é representado no gráfico da figura 4.3 dependendo de duas variáveis λ , T .

Da análise do gráfico pode-se observar que a radiação é máxima para um intervalo de comprimento de onda $[0,2;50] \mu m$.

Uma outra conclusão que se pode retirar desta análise é que o poder emissivo aumenta com a temperatura, sendo que o $E_{b\lambda max}$ é atingido para comprimentos de onda baixos.

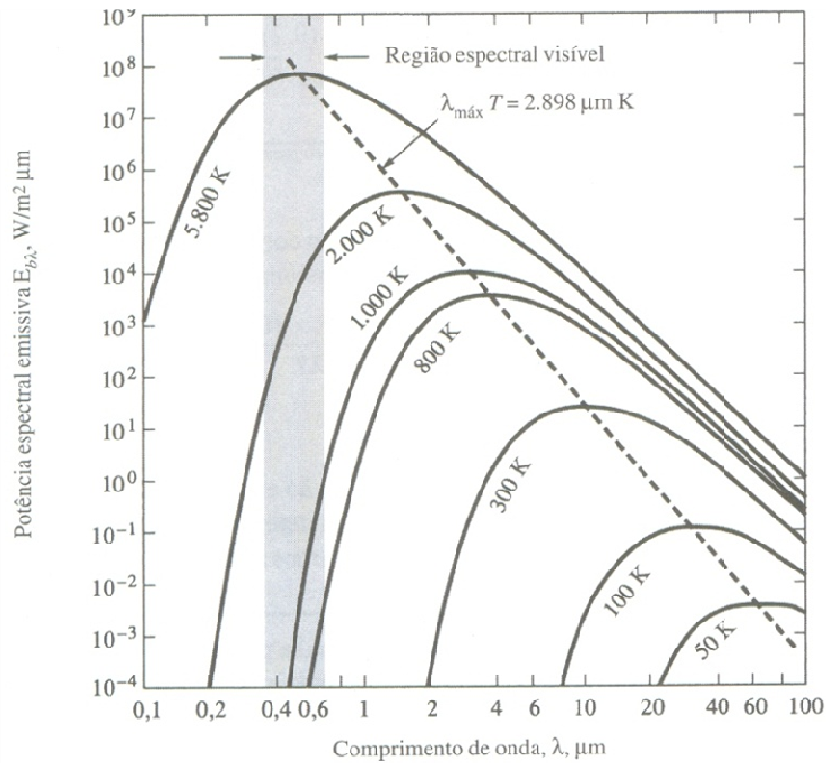


Fig. 4.3 – Variação do poder emissivo com o comprimento de onda

O comprimento de onda λ_{max} , correspondente ao valor máximo de $E_{b\lambda}$ considerando a temperatura absoluta, é dado pela chamada de *lei de deslocamento proposta por Wien*, antes mesmo do trabalho desenvolvido por *Max Planck*. Derivando a lei de *Max Planck*, de forma a obter-se o valor máximo de $E_{b\lambda}$, ou seja [24]:

$$\frac{dE_{b\lambda}}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left[\frac{C_1}{\lambda^5 \times (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \right]_{T=const.} = 0 \quad (4.2)$$

Da resolução da expressão resulta:

$$\lambda_{max} T = 2,898 \times 10^{-3} mK \quad (4.3)$$

Com foi referido anteriormente a radiação térmica acontece para comprimentos de onda entre $[0,4;0,7] \mu m$, correspondendo à zona sombreado no gráfico.

Da análise da relação comprimento de onda com a temperatura, pode-se, para certos metais, como é caso do ferro, ter uma ideia da sua temperatura através da observação da cor que este exhibe, por exemplo o ferro a 800 K exhibe uma cor vermelha escuro.

Recordando o referido anteriormente, o poder emissivo total por unidade de área por unidade de tempo de um corpo negro determina-se pela lei de *Stefan-Boltzmanm*:

$$E_b(T) = \frac{qR}{A} = \sigma \times T^4 \quad (4.4)$$

Se analisarmos a figura 4.3, podemos concluir que a potência emissiva total de um corpo negro para uma determinada temperatura é igual à área delimitada pela curva correspondente. Pode-se assim concluir que a potência emissiva total é igual ao integral da equação que rege a curva dada por:

$$\int_0^{\infty} E_{b\lambda} \times d\lambda = \sigma \times T^4 = E_b \quad (4.5)$$

Substituindo $E_{b\lambda}$ pela lei de *Max Planck* [24] encontra-se a constante de *Stefan-Boltzman*:

$$\sigma = \left(\frac{\pi}{C_2} \right)^4 \times \frac{C_1}{15} = 5,67 \times 10^{-8} W / m^2 K^4 \quad (4.6)$$

Pela lei de *Stefan-Boltzmanm* 4.4, conclui-se que para uma temperatura ambiente de 300K a radiação térmica para um corpo negro é cerca de 460W/m²; este é aproximadamente um décimo da energia transferida por convecção de um liquido, mesmo para valores de coeficientes de transmissão de calor por convecção a temperaturas baixas, como por exemplo para um coeficiente igual a 100 W/m² considerando a temperatura de 50 K. Para baixas temperaturas a troca de energia

térmica por radiação pode ser desprezável, mas com o aumento de temperatura a parcela de transmissão de calor por radiação aumenta com a quarta potência, aumentando assim o seu contributo na transmissão de calor.

4.3.3- INTENSIDADE DE RADIAÇÃO

Até agora estudamos o poder emissivo das superfícies sem referir a interacção entre corpos.

O conceito de intensidade de radiação assume particular importância para o estudo da troca de calor entre duas superfícies.

Um corpo emite uma quantidade de radiação (I) em determinada direcção que é interceptada por outro corpo.

Para o estudo da intensidade de radiação, teremos de considerar a direcção e o espaço dentro do qual o corpo irradia.

A figura 4.4 representa a radiação de um corpo com um ângulo plano diferencial $d\alpha$.

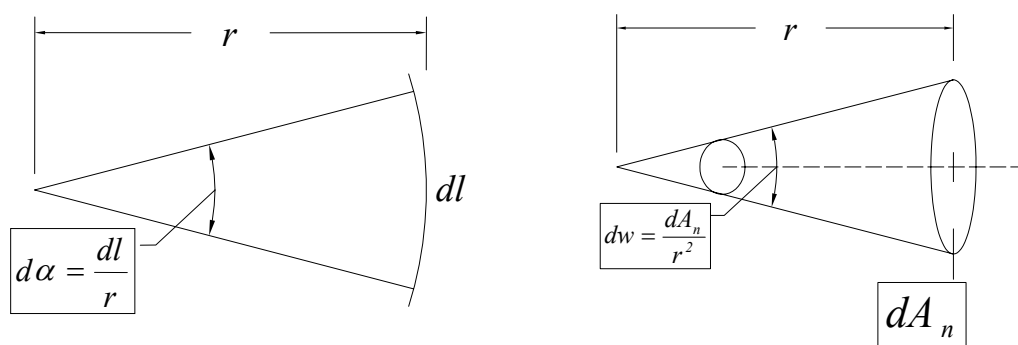


Fig. 4.4 – Irradiação de uma superfície

O ângulo sólido $d\omega$ é igual à razão entre a área dA_n sobre uma esfera e o quadrado do raio da esfera:

$$dW = \frac{dA_n}{R^2} \quad (4.7)$$

A quantidade de calor trocada por radiação por unidade de área de superfície que emana de um corpo em determinada direcção pode ser calculada considerando um elemento na superfície de um hemisfério construído em torno da superfície radiante.

Se consideramos o raio da superfície do hemisfério igual à unidade, a superfície será igual a 2π e ângulo sólido $d\omega$ é dado por $d\omega = dA_n$. Este resultado pode ser utilizado para definir simultaneamente a direcção e o espaço dentro do qual se propaga a radiação a partir de um corpo.

A intensidade de radiação representada por $I(\theta, \phi)$, é igual à energia emitida por unidade de área da superfície emissora, função da direcção θ, ϕ , por unidade de tempo e dentro de um ângulo sólido $d\omega$ centrado e direccionado segundo os ângulos θ, ϕ , conforme representado na figura seguinte.

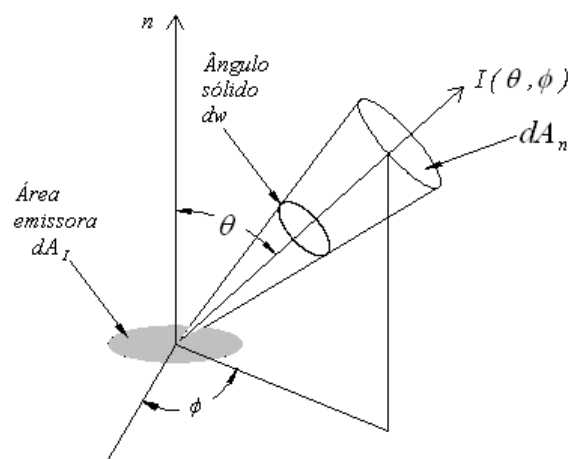


Fig. 4.5 – Irradiação de uma superfície no espaço

Segundo *Frank Kreith e Mark S.Bohn* [24] a área na qual a energia é medida deve ser normal à direcção de emissão sendo dado por:

$$dA_n = r \times d\theta \times r \times \sin\phi \quad (4.8)$$

e consequentemente o ângulo sólido é dado por:

$$dw = \sin\theta \times d\theta \times d\phi \quad (4.9)$$

Podemos constatar na figura anterior que a área projectada de emissão é $dA_I \cos\theta$, e relembrando a definição de $I(\theta, \phi)$, podemos assim escrever:

$$I_b(\theta, \phi) = \frac{dq_R}{dA_I \times \cos\theta \times dw} \quad (4.10)$$

sendo dq_R o fluxo de radiação emitida por dA_I e que passa através de dA_n .

4.3.4- RELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE E POTÊNCIA EMISSIVA

Vamos agora relacionar a intensidade de radiação com a potência emissiva, sendo esta última de maior importância nos próximos capítulos.

Vamos assim considerar uma superfície hemisférica que interceptará todos os raios emitidos pela superfície colocada no seu interior, a potência emissiva é a soma de todos os raios emitidos pela superfície e que passam na superfície hemisférica.

Como vimos anteriormente a intensidade de energia emitida é função do fluxo de energia dq_R que deixa a superfície:

$$I_b(\theta, \phi) = \frac{dq_R}{dA_I \times \cos\theta \times dw} \Leftrightarrow \frac{dq_R}{dA_I} = I_b(\theta, \phi) \times \cos\theta \times dw \quad (4.11)$$

Na figura 4.6 está representada a superfície hemisférica e a superfície radiante.

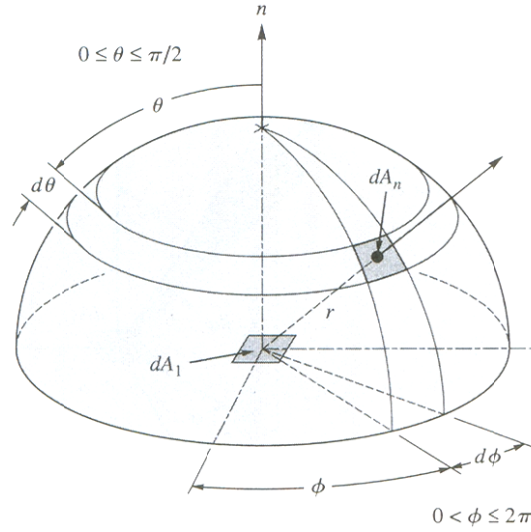


Fig. 4.6 – Superfície hemisférica/Superfície radiante

Se substituirmos o ângulo sólido dw pela equação anteriormente referida (4.9):

$$dw = \sin\theta \times d\theta \times d\phi$$

e integrarmos a equação 4.11 em toda a superfície do hemisfério conforme *Frank Kreith e Mark S.Bohn* [24] obtemos a soma de todos os raios resultando a potência emissiva:

$$\left(\frac{q}{A}\right)_R = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_b(\theta, \phi) \times \cos\theta \times \sin\theta \times d\theta \times d\phi \quad (4.12)$$

Para integrarmos a expressão 4.12 teremos de conhecer a lei de variação da intensidade com (θ, ϕ) ; a intensidade da radiação não é variável de forma considerável com a direcção ϕ , o mesmo acontecendo com a direcção θ . Tratando-se de corpos negros que são completamente difusos, ou seja a intensidade de radiação também não varia com a direcção θ , podendo assim concluir-se que a intensidade de radiação a partir de uma superfície negra é independente da direcção, o que está em conformidade com a lei do *cosseno de Lambert* [24]. Sendo assim que a integração da equação 4.12 (potência emissiva de um corpo negro) é igual a:

$$\left(\frac{q}{A}\right) = E_b = \pi \times I_b \quad (4.13)$$

Podemos assim concluir que para uma superfície negra o poder emissivo é igual ao produto de π pela intensidade.

Esta solução é válida para qualquer superfície desde que esteja em conformidade com a lei do *coseno de Lambert*.

O conceito de intensidade total, ou seja potência emissiva, é válido para todo espectro de comprimento de onda e para radiação monocromática.

A relação entre intensidade total e monocromática I_λ é dada por:

$$I(\theta, \phi) = \int_0^\infty I_\lambda(\phi, \theta) \times d\lambda \quad (4.14)$$

Se a superfície irradia de forma difusa, então como I_λ é uniforme em todas as direcções o poder emissivo monocromático é dado por:

$$E_\lambda = \pi \times I_\lambda \quad (4.15)$$

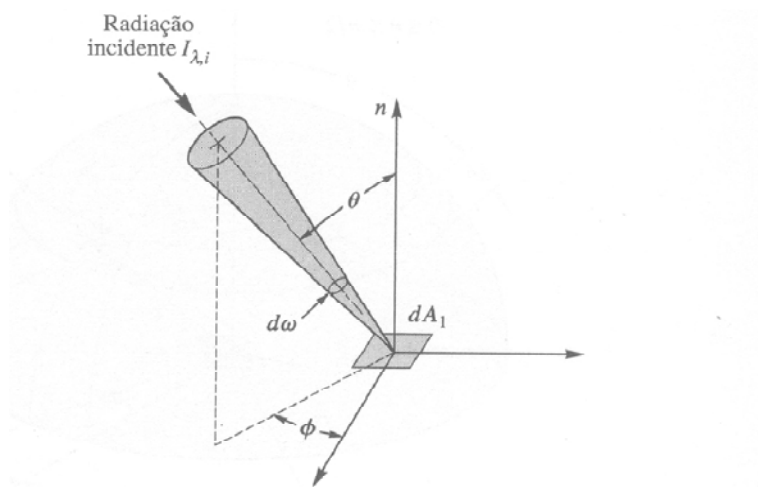


Fig. 4.7 – Energia irradiante incidente

4.3.5- IRRADIAÇÃO

A irradiação é a energia total que incide num corpo.

No estudo da transmissão de calor necessitamos não só de saber a radiação emitida, mas também a radiação recebida por uma superfície. A radiação incidente resulta da emissão e reflexão de outras superfícies com distribuição direccional e espectral específica.

A análise e quantificação da intensidade espectral incidente $I_{\lambda,i}$ efectua-se de forma análoga à radiação espectral.

Por definição intensidade espectral incidente $I_{\lambda,i}$ é:

“ Taxa na qual a energia radiante com comprimento de onda λ incide na direcção (θ, ϕ) por unidade de área da superfície de interceptação normal a essa direcção, por ângulo sólido unitário em torno da direcção (θ, ϕ) , por intervalo de comprimento de onda unitário $d\lambda$ em λ ” [24].

Irradiação é representada por G e representa o somatório de toda a radiação incidente sobre uma superfície.

A irradiação espectral G_λ é definida como o fluxo de radiação monocromático no comprimento de onda λ , incidente sobre uma superfície por unidade de área dessa mesma superfície:

$$G_\lambda = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi) \times \cos \theta \times \sin \theta \times d\theta \times d\phi \quad (4.16)$$

Sendo $\sin\theta \times d\theta \times d\phi$ o ângulo sólido dw . O factor $\cos\theta$ resulta de G_λ ser um fluxo relativo a uma área real da superfície, enquanto $I_{\lambda,i}$ é caracterizado em termos de área projectada.

A irradiação total é o somatório da irradiação espectral em todo o domínio de comprimento de onda:

$$G_\lambda = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi) \times \cos\theta \times \sin\theta \times d\theta \times d\phi \times d\lambda \quad (4.17)$$

Se estivermos a tratar de corpos difusos, ou seja a superfície em estudo está a ser irradiada de forma difusa, logo independente da direcção teremos:

$$G = \pi I_i \quad (4.18)$$

4.3.6- PROPRIEDADES DA RADIAÇÃO

Até agora estudamos só corpos negros que como se referiu são uma idealização, sendo importante o seu estudo para compreensão dos fenómenos de radiação.

Na realidade os corpos não são negros, conduzindo a análises mais complexas.

No estudo de corpos reais os corpos são caracterizados pela:

- emissividade;
- absorvidade;
- transmissividade.

São características importantes para o estudo do comportamento dos corpos, definindo a capacidade de emissão, absorção e transmissão.

As propriedades dos corpos dependem da temperatura, comprimento de onda e direcção.

As propriedades relacionadas com o comprimento de onda são definidas como propriedades monocromáticas, as relacionadas com a direcção angular são chamadas propriedades direccionais.

O estudo de corpos reais conduz geralmente a análises muito complexas dada a variação das características das superfícies.

Para a maioria dos estudos e trabalhos desenvolvidos em engenharia recorre-se a propriedades totais, obtendo cálculos com uma precisão considerável; será este o método utilizado neste trabalho.

4.3.7- COMPORTAMENTO DE CORPOS REAIS À RADIAÇÃO INCIDENTE

Os corpos negros, como foi possível constatar, possuem poder de absorção e de emissão máximo $\alpha = 1$, $\varepsilon = 1$. Nos corpos reais isto não se verifica, tendo-se em causa três fenómenos: a reflectividade ρ , definida como o quociente entre a radiação reflectida e a incidente, a absorvidade α , definida como o quociente entre a radiação absorvida e a incidente no corpo e por último a transmissividade τ , definida como o quociente entre a radiação transmitida e a incidente no corpo.

Na figura 4.8 representam-se os três modos de comportamento da radiação incidente sobre uma superfície.

Sendo G o fluxo de radiação incidente, se fizermos o equilíbrio energético obtemos:

$$\alpha G + \tau G + \rho G = G \quad (4.19)$$

Quando o corpo em causa é opaco a transmissão é igual a zero $\tau = 0$, ficando:

$$\alpha G + \rho G = G \quad (4.20)$$

Se o corpo for um reflector perfeito $\rho = 1$ temos:

$$\rho G = G \quad (4.21)$$

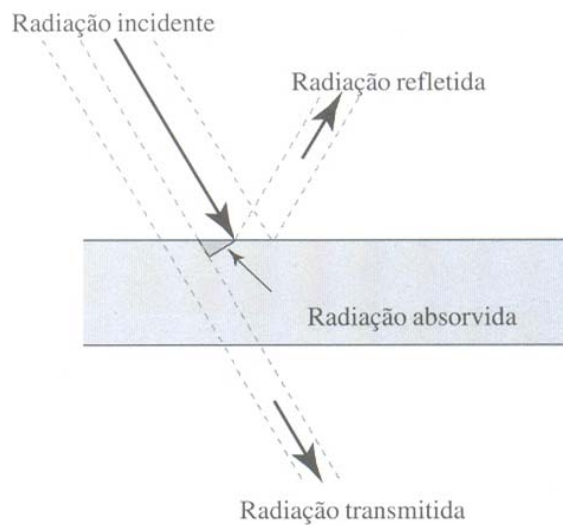


Fig. 4.8 – Comportamento dos corpos à radiação incidente

As propriedades atrás referidas estão relacionadas com a radiação incidente.

Agora vamos falar da radiação emitida pelo corpo, ou seja monocromática.

Anteriormente vimos que a emissão de radiação de um corpo negro é dado pela lei de *Stefan-Boltzmann*, mas como foi referido estes corpos possuem a capacidade de emissão máxima, logo radiação de um corpo real será menor.

Vamos assim definir emissividade esférica total, ϵ , de um corpo que é igual ao quociente entre a emissão real de um corpo e a emissão deste corpo no caso de ser negro:

$$\varepsilon = \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{E(T)}{\sigma \times T^4} \quad (4.22)$$

Este quociente assume valores compreendidos entre zero e um.

4.3.8- LEI DE KIRCHHOFF

A *lei de Kirchhoff* refere-se a corpos opacos e será de grande relevância neste trabalho.

Quando estamos perante corpos negros a transmissividade do corpo $\tau = 0$, logo a expressão $\alpha + \tau + \rho = 1$ fica reduzida a $\alpha + \rho = 1$.

Vamos agora considerar um corpo no interior de um invólucro, em cujo interior há vácuo e em que as paredes se comportam como um corpo negro.

Se o sistema se encontrar em equilíbrio térmico a radiação que é emitida pelo corpo terá de ser igual à que este recebe de modo a manter o equilíbrio térmico.

Na figura seguinte representa-se este equilíbrio:

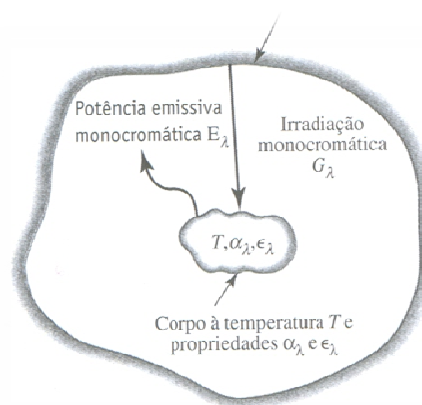


Fig. 4.9 – Equilíbrio entre corpos negros

Pode-se assim concluir que $\alpha = \epsilon$ e $\rho = 0$ (corpo negro).

Esta lei só é válida para corpos negros e se ambos os corpos se encontrarem à mesma temperatura.

Podemos constatar que esta lei possui pouca utilidade prática dado os corpos reais não serem negros e os estudos normalmente não envolverem corpos à mesma temperatura.

Contudo esta lei pode ser aplicada para corpos reais desde que os corpos em jogo se encontrem a temperaturas da mesma ordem de grandeza, conduzindo esta aproximação a um erro pequeno na análise.

Esta simplificação não pode ser efectuada quando estamos perante fenómenos de radiação solar.

Como no desenvolvimento deste trabalho as várias faces dos alvéolos dos blocos de alvenaria se encontram a temperaturas da mesma ordem de grandeza, esta lei terá aplicação e será de grande utilidade [24].

4.3.9- INTERACÇÃO ENTRE CORPOS

Conforme já se referiu a transmissão de calor entre corpos por radiação monocromática é a única que não necessita que haja um contacto entre corpos.

Neste parágrafo vamos estudar a troca de calor entre dois corpos; apesar de ser afectada pelo meio envolvente, ou seja o ar, podemos desprezar o seu efeito uma vez que só é importante quando estamos perante temperaturas muito altas, onde pode ocorrer a ionização e dissolução de certos componentes do ar. No ar envolvente os gases monoatómicos e grande parte dos diatómicos são transparentes.

A interacção entre dois corpos é regida pelo chamado “Factor de forma”. Por definição factor de forma de radiação “A fracção da radiação distribuída de forma

difusa que deixa a superfície A_i e alcança a superfície A_j "; o factor de forma de radiação é representado por F_{i-j} [24].

O poder emissivo das superfícies:

$$\begin{aligned}S_1 &= E_{b1} \times A_1 \\S_2 &= E_{b2} \times A_2\end{aligned}$$

A radiação emitida por A_1 que atinge A_2 :

$$q_{1-2} = E_{b1} \times A_1 \times F_{1-2}$$

A radiação emitida por A_2 que atinge A_1 :

$$q_{2-1} = E_{b2} \times A_2 \times F_{2-1}$$

Num situação de equilíbrio e admitindo ambos os corpos á mesma temperatura, a energia trocada por ambas as superfícies deve ser igual, o que leva ao teorema da reciprocidade:

$$\begin{aligned}E_{b1} &= E_{b2} \\A_1 \times F_{1-2} &= A_2 \times F_{2-1} \\F_{1-2} &= \frac{A_2}{A_1} \times F_{2-1}\end{aligned}\tag{4.23}$$

Esta equação é valida dado que a área e o factor de forma são características geométricas não dependendo da temperatura dos corpos.

Se consideremos os corpos a temperatura diferentes temos:

$$A_1 \times F_{1-2} \times (E_{b1} - E_{b2}) = A_2 \times F_{2-1} \times (E_{b2} - E_{b1}) \quad (4.24)$$

A lei da reciprocidade é particularmente importante no tratamento das trocas de energia entre dois corpos, uma vez que conhecendo um dos factores de forma pode-se determinar o outro com o uso deste teorema.

A determinação dos factores de forma envolve equações complexas.

Em seguida apresenta-se de uma forma sucinta o modo de determinação dos factores de forma.

Dadas duas superfícies A_1 e A_2 , vamos estudar o fluxo que sai da superfície A_1 e atinge a superfície A_2 .

Se tivermos uma superfície infinitesimal dA_1 e dA_2 separadas por uma distância r , como já referimos anteriormente, a taxa que deixa dA_1 e atinge dA_2 é:

$$dq_{1-2} = I_1 \times \cos\theta_1 \times dA_1 \times dw_{1-2} \quad (4.25)$$

Sendo:

- I_1 = intensidade de radiação a partir de dA_1
- $\cos\theta_1 \times dA_1$ = projecção do elemento de área dA_1 como visto a partir de dA_2
- dw_{1-2} = ângulo sólido compreendido pela área receptora dA_2 em relação ao ponto central de dA_1 .

O ângulo sólido dw_{1-2} , é igual à projecção da superfície receptora na direcção da superfície incidente, dividido pelo quadrado da distância entre ambos:

$$dw_{1-2} = \cos \theta_2 \times \frac{dA_2}{R^2} \quad (4.26)$$

$$E_\lambda = \pi \times I_\lambda \quad (4.27)$$

Substituindo as duas expressões anteriores 4.26 e 4.27 na equação 4.25 obtemos:

$$dq_{1-2} = E_{b1} \times dA_1 \left(\frac{\cos \theta_1 \times \cos \theta_2 \times dA_2}{\pi \times R^2} \right) \quad (4.28)$$

onde o termo entre parênteses representa a fracção de radiação emitida por A_1 que é recebido por A_2 .

Por analogia podemos escrever o fluxo entre A_2 e A_1 :

$$dq_{2-1} = E_{b2} \times dA_2 \left(\frac{\cos \theta_2 \times \cos \theta_1 \times dA_1}{\pi \times R^2} \right) \quad (4.29)$$

A taxa de troca de calor entre as superfícies é:

$$dq_{1-2} = (E_{b1} - E_{b2}) \times \left(\frac{\cos \theta_1 \times \cos \theta_2 \times dA_1 \times dA_2}{\pi \times R^2} \right) \quad (4.30)$$

Integrando a equação anterior no domínio A_1 e A_2 :

$$F_{1-2} = \frac{q_{1-2}}{E_{b1} \times A_1}$$

onde

$$q_{1-2} = (E_{b1} - E_{b2}) \int_{A_1} \int_{A_2} \left(\frac{\cos \theta_1 \times \cos \theta_2 \times dA_2 \times dA_1}{\pi \times R^2} \right) \quad (4.31)$$

O integral duplo não é mais que $A_1 \times F_{1-2}$.

Como já se referiu a determinação dos factores de forma envolve cálculos complexos; neste estudo vamos apresentar os factores de forma para dois casos desenvolvidos por *Washington Braga Filho* [25], para superfícies rectangulares paralelas e outra para superfícies adjacentes.

Para o estudo de alvéolos rectangulares serão suficientes estas duas expressões.

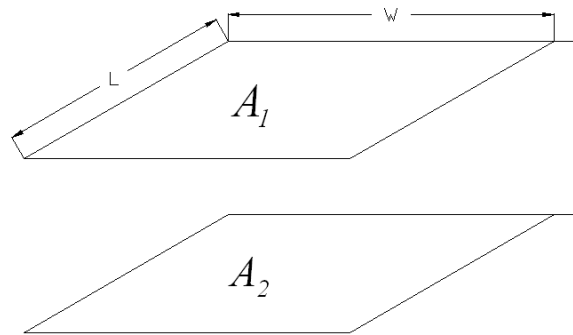


Fig. 4.10 – Factores de forma entre superfícies paralelas

$$F_{A1-A2} \times \left(\frac{\Pi \times Y}{2} \right) = \ln \left[\frac{(1+x^2) \times (1+y^2)}{1+x^2+y^2} \right]^{1/2} + y \times \sqrt{1+x^2} \times \tan^{-1} \left(\frac{y}{\sqrt{1+x^2}} \right) +$$

$$x \times \sqrt{1+y^2} \times \tan^{-1} \left(\frac{x}{\sqrt{1+y^2}} \right) - y \times \tan^{-1} y - x \times \tan^{-1} x$$

Sendo:

- $x =$ comprimento dos planos horizontais/distância entre planos $= w / D$
- $y =$ Largura dos planos verticais/distância entre planos $= L / D$

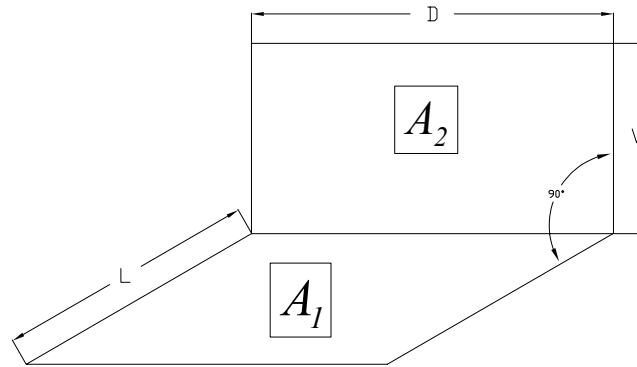


Fig. 4.11 – Factores de forma entre superfícies adjacentes

$$F_{A1-A2} \times (\Pi \times y) = \frac{1}{4} \times \left[\ln \left(\frac{(1+x^2) \times (1+y^2)}{1+z} \right) + y^2 \times \ln \left(\frac{y^2 \times (1+z)}{(1+y^2) \times z} \right) + x^2 \times \ln \left(\frac{x^2 \times (1+z)}{(1+x^2) \times z} \right) \right] +$$

$$y \times \tan^{-1} \left(\frac{1}{y} \right) + x \times \tan^{-1} \left(\frac{1}{x} \right) - \sqrt{z} \times \tan^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{z}} \right)$$

Sendo:

- x = comprimento dos planos horizontais/distância entre planos = w / D
- y = Largura dos planos verticais/distância entre planos = L / D

$$z = x^2 + y^2$$

Como já vimos a lei da reciprocidade iremos agora analisar o que acontece numa cavidade fechada, em que a soma dos factores de forma de uma superfície com todas as outras que compõe a cavidade terá de ser igual à unidade:

$$F_{1-1} + F_{1-2} + F_{1-3} + F_{1-4} + F_{1-N} = 1$$

4.3.10- TROCAS RADIANTES ENTRE SUPERFÍCIES CINZAS

Iremos agora estudar a troca de energia entre superfícies cinzas, que como já referimos atrás são aquelas que revelam maior interesse no âmbito do trabalho que estamos a desenvolver.

A troca de radiação entre superfícies cinzas revela uma maior complexidade quando comparadas com corpos negros. Os corpos negros exibem absorção e emissão máxima, sendo a reflectividade e transmissibilidade nulas, sendo de maior complexidade no estudo destas superfícies o factor de forma entre superfícies.

Os corpos cinza apresentam algumas características importantes para o estudo como a emissividade constante ε_λ , superfícies difusas e corpos opacos, ou seja transmissibilidade nula.

Para simplificar o estudo vamos considerar a troca entre uma superfície cinza e uma superfície negra.

Vamos também definir o conceito de radiosidade J e irradiação G .

A radiosidade J é a quantidade de energia radiativa que deixa a superfície:

$$J = \text{energia reflectida} + \text{energia transmitida} + \text{energia emitida} \quad (4.32)$$

No caso de corpos cinza:

$$J = \text{energia reflectida} + \text{energia emitida} \quad (4.33)$$

Onde a irradiação G é a energia que incide num corpo. O balanço de energia de uma superfície resume-se a $J-G$. Assim se $J-G > 0$, o nosso corpo está a perder energia. Se $J-G < 0$ o corpo está a aumentar a sua energia. No nosso caso específico vamos considerar $J > G$

$$\begin{aligned} \frac{q_i}{A} &= J - G \\ J &= E_b \times \varepsilon + \rho \times G \end{aligned} \quad (4.34)$$

e resolvendo a equação em ordem a G fica:

$$G = \frac{(J - \varepsilon \times E_b)}{\rho} \quad (4.35)$$

Assim podemos escrever:

$$\begin{aligned} \frac{q_i}{A} &= J - \frac{(J - \varepsilon \times E_b)}{\rho} \\ \Leftrightarrow \\ \frac{q_i}{A} &= \frac{J \times (\rho - 1) + \varepsilon \times E_b}{\rho} \end{aligned} \quad (4.36)$$

Usando a *lei de Kirchhoff*:

$$\begin{aligned} \rho + \varepsilon &= 1 \Leftrightarrow \rho = 1 - \varepsilon \\ \Leftrightarrow \\ \frac{q_i}{A} &= \frac{J \times (1 - \varepsilon - 1) + \varepsilon \times E_b}{1 - \varepsilon} \\ \Leftrightarrow \\ \frac{q_i}{A} &= \frac{-\varepsilon \times J + \varepsilon \times E_b}{1 - \varepsilon} \\ \Leftrightarrow \\ \frac{q_i}{A} &= \frac{\varepsilon \times (E_b - J)}{1 - \varepsilon} \\ \Leftrightarrow \\ \frac{q_i}{A} &= \frac{(E_b - J)}{\frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon}} \\ \Leftrightarrow \\ q_i &= \frac{E_b - J}{\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon \times A}} \end{aligned} \quad (4.37)$$

Fazendo a analogia com um circuito eléctrico, considerando o numerador como potencial térmico, o denominador como resistência à radiação e o fluxo como corrente:

A resistência R_e designa-se por resistência superficial, devido às características superficiais.

Uma particularidade dos corpos negros é o facto da resistência R_c ser nula, devido à reflectividade destes corpos ser nula.

[illegible]

Se estivermos perante a troca de energia entre duas superfícies negras formando uma cavidade, o estudo da troca de energia entre ambos é dado por:

Em denominador teremos a resistência R_{I2} , resistência comum a todos os corpos, dependendo da geometria dos corpos e da posição de um relativamente aos outros.

Considerando agora duas superfícies cinza formando uma cavidade, podemos introduzir também o factor de forma entre as duas superfícies.

4.3.11- ALVÉOLOS

Até agora foi efectuado uma análise genérica da troca de calor por radiação, de modo a introduzir a problemática do fluxo de calor por radiação monocromática.

Neste capítulo iremos abordar o tratamento de alvéolos, de modo a compreender o contributo da troca de calor por radiação para o comportamento térmico de elementos de alvenaria.

De modo a compreender o equilíbrio num alvéolo iremos começar por estudar alvéolos constituídos por corpos negros; a energia incidente na superfície i é dado por $A_i \times G_i$:

$$A_i \times G_i = E_a \times A_a \times F_{a-i} + E_b \times A_b \times F_{b-i} + \dots + E_n \times A_n \times F_{n-i}$$

Se estudarmos o equilíbrio na superfície i , podemos concluir que a energia incidente é:

$$A_i \times G_i = \sum_{j=1}^N E_{b_j} \times A_j \times F_{j-i}$$

Relembrando a lei da reciprocidade anteriormente referida teremos:

$$A_i \times F_{i-j} = A_j \times F_{j-i}$$

Logo o fluxo numa parede aleatória do alvéolo é:

$$q_i = A_i \times (E_{b_i} - G_i)$$

$$q_i = A_i \times \left[E_{b_i} - \sum_{j=1}^i E_{b_j} \times F_{i-j} \right]$$

O termo $A_i \times E_{b_i}$ representa a emissividade da superfície; se relembramos que a soma dos vários factores de forma é igual á unidade podemos concluir que:

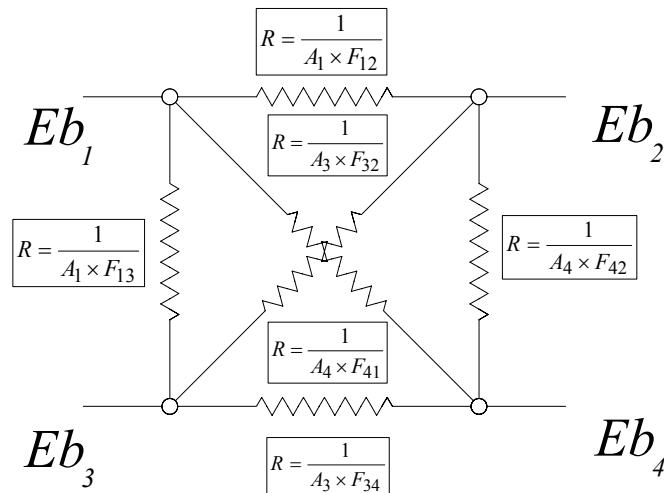
$$\begin{aligned} \text{para } \sum_{j=1}^N F_{i-j} &= 1 \quad \text{vem} \\ A_i \times E_{b_i} &= \sum_{j=1}^N F_{i-j} \times E_{b_j} \times A_j \end{aligned} \quad (4.42)$$

Podemos então escrever o fluxo de calor da superfície através da seguinte expressão:

$$\begin{aligned} q_i &= A_i \times (E_{b_i} - G_i) \\ q_i &= \sum_{j=1}^N (E_{b_i} - E_{b_j}) \times A_i \times F_{i-j} \end{aligned} \quad (4.43)$$

Podemos concluir que a troca de energia de uma superfície é calculada pelo somatório do produto das diferenças na potência emissiva pelos vários factores de forma.

Se representarmos sob a forma de circuito fechado constituído por quatro superfícies teremos:



Se fizermos o equilíbrio para a superfície 1 teremos:

$$q_i = A_1 \times E_{b1} - \frac{E_{b2}}{R_{21}} - \frac{E_{b3}}{R_{31}} - \frac{E_{b4}}{R_{41}}$$

Nota: as equações agora desenvolvidas consideram a temperatura das superfícies constantes e conhecidas, sendo a determinação da troca de calor entre as superfícies imediata.

Também podemos determinar a temperatura de uma superfície conhecendo o fluxo de calor, bastando para isso resolver o sistema em ordem à temperatura já que a emissividade depende da temperatura. No entanto no nosso estudo só iremos abordar casos em que conhecemos a temperatura, pretendendo sempre determinar o fluxo de calor.

O estudo de alvéolos constituído por superfícies cinzas é os que mostram relevância para este estudo já que os alvéolos dos elementos de alvenaria são considerados superfícies cinzas.

O tratamento de alvéolos constituídos por superfícies cinzas é semelhante ao das superfícies negras.

Vamos relembrar a equação desenvolvida atrás para a troca de calor entre superfícies cinzas:

$$q_i = \frac{E_{bi} - J_i}{R_{equi.}} \quad (4.44)$$

Nota: podemos considerar uma superfície negra quando esta apresenta uma absorvidade igual ou superior a 0.9, não se introduzindo um erro grosseiro.

Relembrando alguns conceitos já referidos anteriormente:

J_i = radiosidade, W/m^2 ;

G_i = irradiação ou radiação por unidade de tempo incidente sobre uma unidade de área d , W/m^2 ;

E_{bi} = potência emissiva do corpo negro, W/m^2 ;

ρ_i = reflectividade;

ε_i = emissividade.

$$J_i = \rho_i \times G_i + \varepsilon_i \times E_{bi} \quad (4.45)$$

Da análise da equação da troca de calor podemos concluir que a dificuldade resulta da quantificação da radiosidade.

A determinação do parâmetro J implica a resolução de um sistema de equações em número igual ao das superfícies.

O fluxo de calor que se estabelece na superfície A_i pode ser calculado como sendo o balanço entre a irradiação de todas as superfícies que podem ser vistas pela superfície, e a radiação da superfície de A_i .

A irradiação sobre a superfície A_i é:

$$A_1 \times G_1 = J_1 \times A_1 \times F_{1-i} + J_2 \times A_2 \times F_{2-i} + \dots + J_n \times A_n \times F_{n-i} \quad (4.46)$$

Relembrando a reciprocidade dos factores de forma:

$$\begin{aligned} A_1 \times F_{1-i} &= A_i \times F_{i-1} \\ A_2 \times F_{2-i} &= A_i \times F_{i-2} \end{aligned}$$

Podemos assim escrever de forma mais compacta:

$$G_i = \sum_{j=1}^N J_j \times F_{i-j}$$

Fazendo agora o balanço energético para uma superfície:

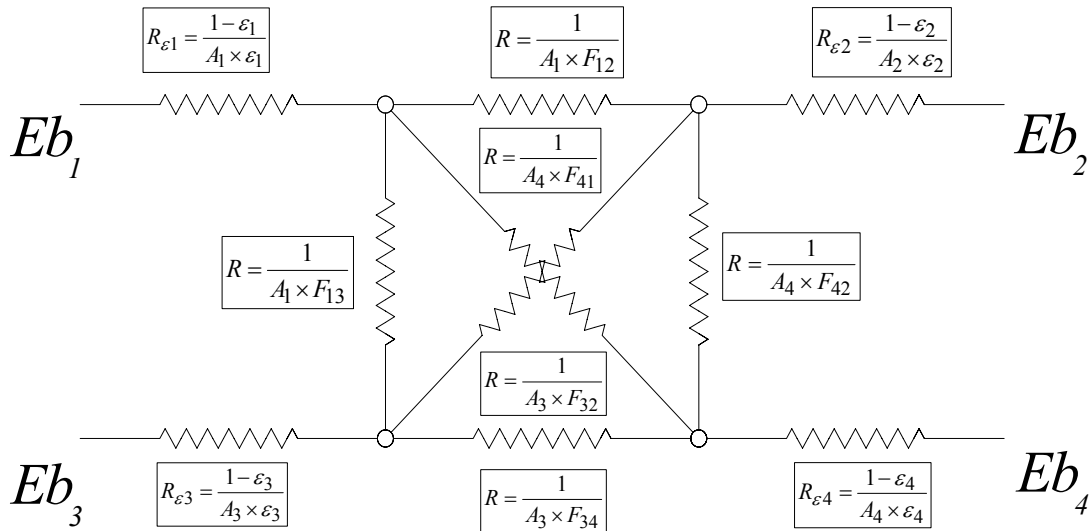
$$q_i = A_i \times J_i - A_i \times \sum_{j=1}^N J_j F_{i-j}$$

$$q_i = A_i \times \left[J_i - \sum_{j=1}^N J_j \times F_{i-j} \right]$$

Assim podemos escrever uma equação para cada superfície obtendo um sistema de N equações, igual ao número de superfícies.

Para se compreender melhor o sistema vamos representar a analogia eléctrica de um alvéolo com quatro superfícies.

A troca de calor para um corpo com quatro superfícies representa-se de forma idêntica à troca de calor entre dois corpos cinzentos já apresentada anteriormente.



Escrevendo agora as equações para quatro superfícies:

$$nó1: \frac{A_1 \times \varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} \times (E_{b1} - J_1) = A_1 \times J_1 - J_2 \times A_1 \times F_{12} - J_3 \times A_1 \times F_{13} - J_4 \times A_1 \times F_{14}$$

$$nó2: \frac{A_2 \times \varepsilon_2}{1 - \varepsilon_2} \times (E_{b2} - J_2) = A_2 \times J_2 - J_1 \times A_2 \times F_{21} - J_3 \times A_2 \times F_{23} - J_4 \times A_2 \times F_{24}$$

$$nó3: \frac{A_3 \times \varepsilon_3}{1 - \varepsilon_3} \times (E_{b3} - J_3) = A_3 \times J_3 - J_1 \times A_3 \times F_{31} - J_2 \times A_3 \times F_{32} - J_4 \times A_3 \times F_{34}$$

$$nó4: \frac{A_4 \times \varepsilon_4}{1 - \varepsilon_4} \times (E_{b4} - J_4) = A_4 \times J_4 - J_1 \times A_4 \times F_{41} - J_2 \times A_4 \times F_{42} - J_3 \times A_4 \times F_{43}$$

No desenvolvimento do sistema de equações anterior tivemos presente a relação de reciprocidade dos factores de forma:

$$A_1 \times F_{1-i} = A_i \times F_{i-1}$$

$$A_2 \times F_{2-i} = A_i \times F_{i-2}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$nó1: \frac{\varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} \times (E_{b1} - J_1) = J_1 - J_2 \times F_{12} - J_3 \times F_{13} - J_4 \times F_{14}$$

$$nó2: \frac{\varepsilon_2}{1 - \varepsilon_2} \times (E_{b2} - J_2) = J_2 - J_1 \times F_{21} - J_3 \times F_{23} - J_4 \times F_{24}$$

$$nó3: \frac{\varepsilon_3}{1 - \varepsilon_3} \times (E_{b3} - J_3) = J_3 - J_1 \times F_{31} - J_2 \times F_{32} - J_4 \times F_{34}$$

$$nó4: \frac{\varepsilon_4}{1 - \varepsilon_4} \times (E_{b4} - J_4) = J_4 - J_1 \times F_{41} - J_2 \times F_{42} - J_3 \times F_{43}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$nó1: \frac{\varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} \times E_{b1} = J_1 + \frac{\varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} \times J_1 - J_2 \times F_{12} - J_3 \times F_{13} - J_4 \times F_{14}$$

$$nó2: \frac{\varepsilon_2}{1 - \varepsilon_2} \times E_{b2} = J_2 + \frac{\varepsilon_2}{1 - \varepsilon_2} \times J_2 - J_1 \times F_{21} - J_3 \times F_{23} - J_4 \times F_{24}$$

$$nó3: \frac{\varepsilon_3}{1 - \varepsilon_3} \times E_{b3} = J_3 + \frac{\varepsilon_3}{1 - \varepsilon_3} \times J_3 - J_1 \times F_{31} - J_2 \times F_{32} - J_4 \times F_{34}$$

$$nó4: \frac{\varepsilon_4}{1-\varepsilon_4} \times E_{b4} = J_4 + \frac{\varepsilon_4}{1-\varepsilon_4} \times J_4 - J_1 \times F_{41} - J_2 \times F_{42} - J_3 \times F_{43}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$nó1: \frac{\varepsilon_1}{1-\varepsilon_1} \times E_{b1} = \left(1 + \frac{\varepsilon_1}{1-\varepsilon_1}\right) \times J_1 + J_2 \times (-F_{12}) + J_3 \times (-F_{13}) + J_4 \times (-F_{14})$$

$$nó2: \frac{\varepsilon_2}{1-\varepsilon_2} \times E_{b2} = \left(1 + \frac{\varepsilon_2}{1-\varepsilon_2}\right) \times J_2 + J_1 \times (-F_{21}) + J_3 \times (-F_{23}) + J_4 \times (-F_{24})$$

$$nó3: \frac{\varepsilon_3}{1-\varepsilon_3} \times E_{b3} = \left(1 + \frac{\varepsilon_3}{1-\varepsilon_3}\right) \times J_3 + J_1 \times (-F_{31}) + J_2 \times (-F_{32}) + J_4 \times (-F_{34})$$

$$nó4: \frac{\varepsilon_4}{1-\varepsilon_4} \times E_{b4} = \left(1 + \frac{\varepsilon_4}{1-\varepsilon_4}\right) \times J_4 + J_1 \times (-F_{41}) + J_2 \times (-F_{42}) + J_3 \times (-F_{43})$$

Do desenvolvimento do sistema de equações chegamos a uma sistema de quatro equações a quatro incógnitas que se pode representar sobre a forma matricial da seguinte forma.

$$C_1 = a_{11}J_1 + a_{12}J_2 + a_{13}J_3 + a_{14}J_4$$

$$C_2 = a_{22}J_2 + a_{21}J_1 + a_{23}J_3 + a_{24}J_4$$

$$C_3 = a_{33}J_3 + a_{31}J_1 + a_{32}J_2 + a_{34}J_4$$

$$C_4 = a_{44}J_4 + a_{41}J_1 + a_{42}J_2 + a_{43}J_3$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ J_4 \end{bmatrix}$$

Para cálculo do coeficiente de transmissão térmica teremos de determinar a radiosidade (J) da superfície em estudo.

Relembrando a equação 4.38, e após termos desenvolvido o sistema de equações para o cálculo da radiosidade, conseguimos assim determinar o coeficiente de transmissão térmica hr resultante das trocas por radiação, conforme a seguir se mostra:

$$q_r = \frac{A_i \times \varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} \times (E_{bi} - J_i)$$

Por outro lado o fluxo de calor é igual a:

$$q_r = hr \times Ar \times (T_1 - T_2)$$

obtendo-se assim para o coeficiente de transmissão térmica por radiação o valor dado por:

$$hr = \frac{q_r}{Ar \times (T_1 - T_2)}$$

A determinação do coeficiente de transmissão térmica, motivado pelas trocas térmicas por radiação será calculada com o uso de uma pequena ferramenta informática desenvolvida com o auxílio da folha de cálculo *Excel*.

4.4- TRANSMISSÃO DE CALOR POR CONVECÇÃO

A transferência de calor por convecção resulta do movimento das moléculas de um fluido.

A caracterização do movimento de um fluido está regida pela lei que rege o escoamento de um fluido. No nosso estudo o fluido tratado é o ar.

A convecção pode ser forçada ou natural. É forçada quando existe um mecanismo exterior que provoca o movimento do fluido; é considerada natural quando o movimento é originado pela diferença de temperatura entre o fluido e uma superfície.

No estudo que iremos desenvolver vamos só referir à convecção natural, sendo este o fenómeno que se verifica em alvéolos.

O movimento do fluido na convecção natural envolve velocidades geralmente baixas para diferenças de temperaturas usuais.

A velocidade do fluido dá origem a um perfil de velocidades característico. Para exemplificação vamos considerar uma superfície plana vertical a uma temperatura superior à do fluido que a rodeia.

Se analisarmos o perfil de velocidades verificamos que a velocidade junto da superfície é nula devido à viscosidade do fluido, sendo também nula a uma distância suficientemente grande da superfície para não se fazer notar a influência da temperatura da superfície, uma vez que a condução de calor na camada em movimento do fluido dá-se por condução.

O diagrama de velocidades que se forma está representado na figura 4.12

A camada limite $\delta_{(x)}$ é uma camada muito fina de fluido que está em movimento, conforme representado na figura 4.12.

Pela análise desta camada verificamos que esta vai aumentando com a distância ao bordo inferior, concluindo assim que o coeficiente de transmissão de calor também varia ao longo da superfície.

De modo a simplificar o problema iremos trabalhar com o coeficiente de transmissão de calor médio para toda a superfície.

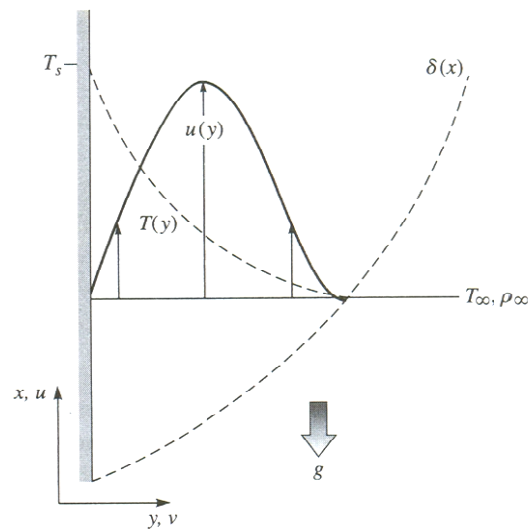


Fig. 4.12 – Variação da temperatura e velocidade de um fluido na vizinhança de uma placa vertical aquecida estática

4.4.1- CONVECÇÃO NATURAL

A convecção natural ocorre sempre que existe uma diferença de temperatura entre uma superfície e o fluido, sendo o movimento das partículas do fluido ascendente quando a temperatura da superfície é superior à do fluido, sendo descendente quando a temperatura do fluido é superior ao da superfície.

O movimento do fluido resulta da variação da temperatura do fluido na vizinhança da superfície, originando uma variação na densidade do fluido.

A transferência de calor por convecção natural é representada pelo coeficiente h_c , que é denominado por coeficiente de transmissão de calor por convecção natural. A troca de calor por convecção natural é muito inferior à que se verifica na convecção forçada.

A convecção natural revela-se importante na transmissão de calor em muitos casos do nosso dia-a-dia, como por exemplo, em vidros duplos, paredes duplas, arrefecimento de transformadores.

4.4.2- CONCEITOS BÁSICOS

Como referimos anteriormente a transmissão de calor por convecção resulta do movimento do fluido ar.

Se consideramos um fluido em movimento sobre uma placa plana, podemos observar uma certa resistência ao movimento do fluido junto da placa, devido ao atrito entre as partículas do fluido e a placa plana.

A resistência ao movimento dos fluidos não é uniforme para todos os fluidos, existindo fluidos que apresentam maior resistência ao movimento em relação a outros como é o caso de um óleo lubrificante em relação à água. Esta diferença resulta de uma característica designada por viscosidade dinâmica, μ .

A interpretação deste parâmetro e sua determinação pode ser realizada considerando uma porção de fluido entre duas placas planas paradas. Se em determinado momento uma das placas se movimenta sobre a actuação de uma força $\vec{F}$ a uma velocidade constante, verifica-se neste caso que o fluido junto da placa que se encontra em movimento se desloca com a mesma velocidade da placa, enquanto o fluido que se encontra junto da placa imóvel permanece parado [26].

A imagem a seguir apresentada exemplifica o comportamento de um fluido entre duas placas.

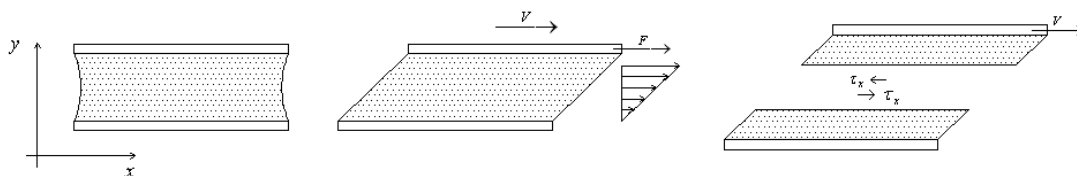


Fig. 4.13 – Coeficiente de viscosidade dinâmica

Torna-se intuitivo que o fluido que se encontra no interior das placas terá uma velocidade intermédia conforme o perfil apresentado na figura 4.13.

Uma conclusão que se tira é que o fluido se desloca em camadas a velocidades diferentes, havendo assim uma transmissão de movimento entre camadas, provocada por uma força de corte τ .

Outra conclusão que se pode tirar é que a camada de fluido junto das placas não apresenta movimento em relação à placa adjacente, ou seja existe uma camada de fluido aderente à placa.

O movimento do fluido é provocado pelas forças de corte no interior do fluido, havendo um gradiente de velocidades segundo a direcção normal ao movimento do fluido, sendo tanto maior quanto maiores as forças de corte. Estas duas grandezas estão relacionadas e são proporcionais, relacionando-se pela seguinte expressão:

$$\tau_x = \mu \frac{dv_x}{dy}$$

A constante de proporcionalidade μ entre o gradiente de velocidades e a tensão de corte é chamada de viscosidade dinâmica sendo expressa em Ns/m^2 ; é uma característica particular de cada fluido e varia com a temperatura do fluido.

4.4.3- DEFINIÇÃO DA CONVECÇÃO

Se consideramos um fluido (ar) em repouso, colocando-se um corpo sólido plano na vertical com desenvolvimento infinito no interior do fluido a uma temperatura diferente da do fluido, gera-se assim uma transmissão de calor entre o ar e o corpo por convecção e observa-se movimento das partículas.

O movimento das partículas é originado por fenómenos internos, devido à variação da temperatura e consequente variação da densidade do fluido. O movimento das partículas ocorre de forma ordenada provocando corrente de fluido a uma determinada velocidade.

As forças actuantes no movimento do fluido devido ao gradiente de temperaturas estabelecido são forças de impulso, de pressão e de atrito. A força resultante num elemento de volume $dx \, dy \, dz$ em contacto com o corpo é representado da seguinte forma, figura 4.14.

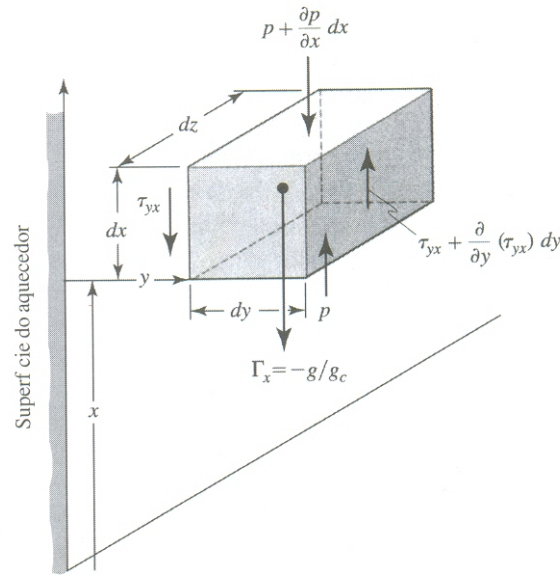


Fig. 4.14 – Forças actuantes num elemento de fluido em fluxo de convecção natural

1- Forças devido ao gradiente de pressão

$$p \times dydz - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dydz = \frac{\partial p}{\partial x} (dx dy dz)$$

2- Forças actuantes sobre o corpo, $\Gamma_x \times \rho(dx dy dz)$, sendo $\Gamma_x = -g / g_c$, sendo g_c a constante gravitacional igual a 1 kg.m/N.s^2 no sistema S.I.

3- Forças de tensão de corte (cisalhamento) devido à viscosidade.

$$(-\tau_{yx}) dx dz + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) dx dz$$

A interpretação matemática do fenómeno encontra-se demonstrada em vários livros de mecânica de fluidos, caindo fora deste estudo a demonstração da equação a seguir apresentada e que caracteriza o movimento para a convecção natural [24]:

$$\mu \frac{\partial \mu}{\partial x} + \nu \frac{\partial \mu}{\partial y} = g \times \beta \times (T - T_{\infty}) + \nu \frac{\partial^2 \mu}{\partial y^2}$$

Esta equação considera algumas premissas:

- pressão constante;
- densidade dependente só da temperatura;
- gás com comportamento ao de um gás ideal, $\rho = p / RT$.

Tendo as variáveis o seguinte significado:

- g = aceleração da gravidade;
- β = coeficiente de expansão;
- $(T - T_{\infty})$ = diferença de temperatura;
- ν = viscosidade cinemática;
- α = difusibilidade térmica.

Na análise da transferência de calor por convecção o problema base é a determinação dos coeficientes de convecção locais h_c , a partir dos quais é possível determinar um coeficiente global médio.

A determinação deste parâmetro depende de inúmeras variáveis como referimos na equação anteriormente apresentada.

Neste estudo iremos optar pela análise dimensional, usando grupos adimensionais independentes de modo a obtermos relações que descrevam com algum rigor o fenómeno físico.

Teremos assim relação do tipo:

$$hc = f(g_1, g_2, \dots, g_n)$$

Em que os coeficientes g_i representam variáveis independentes entre si.

Realizando agora a analogia adimensional teremos:

$$1 = \frac{hc}{f(g_1, g_2, \dots, g_n)}$$

A convecção natural pode ser expressa com uso de três grupos dimensionais:

$$F(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3) = 0$$

Podendo-se escrever também:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3)$$

Da análise dimensional do fenómeno conforme expresso em textos da especialidade é possível caracterizar o fenómeno através de três grupos adimensionais:

$$Nu = Nu(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3)$$

$$\Pi_1 = \frac{U_\infty \times L}{\nu} \rightarrow n^\circ Reynolds$$

$$\Pi_2 = \frac{\nu}{\alpha} \rightarrow n^\circ Prandtl$$

$$\Pi_3 = \frac{g \times \beta \times (T - T_\infty) \times L^3}{\nu^2} \rightarrow n^\circ Grashof$$

Onde:

- U_{∞} = velocidade característica;
- L = comprimento característico;
- g = aceleração da gravidade;
- β = coeficiente de expansão;
- $(T - T_{\infty})$ = diferença de temperatura;
- ν = viscosidade cinemática;
- α = difusibilidade térmica.

Nu é chamado nº de *Nusselt* que é:

$$Nu = \frac{\bar{h}c \times L}{K}$$

onde K é a condutibilidade térmica do fluido.

A utilização do nº de *Reynolds* não faz sentido na convecção natural, já que a velocidade é baixa, pelo que o nº de *Nusselt* passa a ser dado pela expressão:

$$Nu = \phi(Gr) \times \psi(Pr)$$

Ao produto do nº de *Grashof* pelo nº de *Prandtl* chama-se número de *Rayleigh*:

$$Nu = \phi(Ra)$$

4.4.4- ALVÉOLOS

A transferência de calor por convecção em alvéolos é um caso particular de um fenómeno de convecção.

Na realidade este fenómeno é responsável pela transferência de calor em janelas de vidro duplo, colectores solares, paredes duplas e no caso deste estudo em alvéolos de elementos de alvenaria.

Vamos considerar uma cavidade formada por seis faces considerando as partes laterais, superfície superior e inferior isoladas, uma vez que no estudo de um elemento de alvenaria inserido num pano de parede o fluxo de calor na direcção do plano da parede pode ser desprezado relativamente ao fluxo de calor ocorre no sentido normal ao plano da parede, logo a aproximação das superfícies envolventes serem consideradas isoladas é verosímil.

Se as paredes estiverem suficientemente afastadas irão formar-se duas correntes de fluido, uma descendente e outra ascendente, sendo ascendente na superfície a uma temperatura superior ao do fluido e descendente na face a uma temperatura inferior.

Se as superfícies estiverem muito próximas uma da outra as camadas limites interceptam-se não se formando uma corrente, ocorrendo correntes isoladas e sub-regiões, sendo a transmissão de calor neste caso por condução através do fluido.

Segundo estudos de *Hollands e Koniak* [24], para valores do numero de *Grashof* menores que 8000, a transmissão de calor dá-se por condução, levando à conclusão que não tem significado números de *Nusselt* inferiores a 1.

Na figura 4.16 apresentam-se duas figuras esquemáticas das situações descritas.

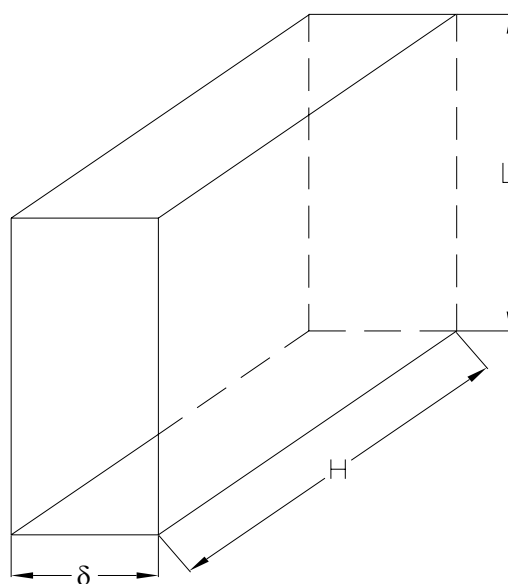


Fig. 4.15 – Cavidade

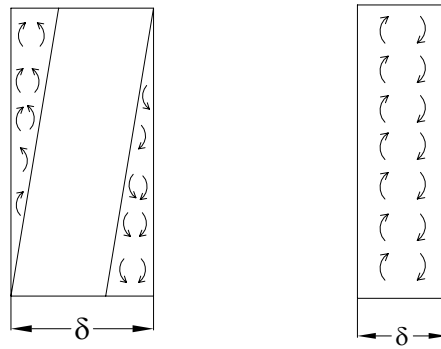


Fig. 4.16 – Convecção em cavidades

4.4.5- FÓRMULAS EMPÍRICAS

Para avaliação do fluxo de calor por convecção é normal recorrermos a fórmulas empíricas, através de correlações do tipo $Nu = \phi(Ra)$.

As correlações resultam de várias experiências em laboratórios, correlacionando os resultados obtidos por análise dimensional.

O comprimento característico em alvéolos é a distância entre as superfícies opostas. As características do fluido deverão ser determinadas para uma temperatura igual à média aritmética entre a temperatura das superfícies.

Apresentam-se várias correlações para diversas geometrias e condições de aplicação; as fórmulas apresentadas aparecem em várias publicações, estando publicadas na bibliografia “*Principio de transferência de calor*” [24]:

$$1) \overline{Nu}_\delta = 0,22 \times \left(\frac{L}{\delta} \right)^{-1/4} \times \left(\frac{Pr}{0,2 + Pr} \times Ra_\delta \right)^{0,28}$$

No intervalo

$$2 < \frac{L}{\delta} < 10; Pr < 10; Ra_\delta < 10^{10}$$

$$2) \overline{Nu}_\delta = 0,18 \times \left(\frac{Pr}{0,2 + Pr} Ra_\delta \right)^{0,29}$$

No intervalo

$$1 < \frac{L}{\delta} < 2; 10^{-3} < Pr < 10^5; 10^3 < \frac{Ra_\delta \times Pr}{0,2 + Pr}$$

$$3) \overline{Nu}_\delta = 0,42 \times Ra_\delta^{0,25} \times \frac{Pr^{0,012}}{\left(\frac{L}{\delta} \right)^{0,3}}$$

No intervalo

$$10 < \frac{L}{\delta} < 40; 1 < Pr < 2 \times 10^4; 10^4 < Ra_\delta < 10^7$$

$$4) \overline{Nu}_\delta = 0,46 \times Ra_\delta^{0,23}$$

No intervalo

$$10^6 < Ra < 10^9; 1 < \frac{L}{\delta} < 40; 1 < Pr < 20$$

Segundo *Hipólito Sousa* [1]:

$$Nu = 0,258 \times Ra^{0,248} \times \left(\frac{L}{\delta} \right)^{-0,20}$$

No intervalo

$$\frac{L}{\delta} \geq 3; Ra_\delta < 3 \times 10^4$$

As fórmulas anteriormente apresentadas são válidas para alvéolos constituídas por superfícies opostas verticais.

O número de *Nusselt* obtido, refere-se a um número médio, obtendo-se assim um coeficiente de transmissão de calor médio.

4.5- TRANSMISSÃO DE CALOR POR CONDUÇÃO

Como é do conhecimento geral a condução é um dos três processos de transmissão de calor, que ocorre sempre que existe um gradiente de temperaturas entre dois pontos.

A transmissão de calor por condução ocorre através da matéria, segundo mecanismos submicroscópicos complexos, nos quais os átomos interagem entre si provocando colisões elásticas e inelásticas de modo a propagar a energia das zonas mais quentes para as mais frias e restabelecer o equilíbrio térmico. Sendo assim a transferência de calor por condução ocorre em sólidos, líquidos e gases.

Este modo de transferência de calor é regido pela chamada *lei de Fourier*, “segundo o qual a quantidade de calor que passa através de uma área A, normal à direcção do fluxo calorífico, por unidade de tempo, é proporcional ao produto da área pelo gradiente térmico”.

$$Q_x = -\lambda \times A \times \frac{\partial T}{\partial x}$$

ou

$$q_x = -\lambda \times \frac{\partial T}{\partial x}$$

Sendo:

T = Temperatura (°C);

λ = Condutibilidade térmica do material (W/m.°C);

Q_x = Fluxo segundo x (W);

q_x = Densidade de fluxo segundo x (W/m²).

Vamos considerar uma placa vertical com dimensões suficientes para se considerar a dimensão da placa no seu plano infinita em relação à sua espessura.

Se considerarmos a placa inicialmente a uma temperatura uniforme e em determinado momento colocarmos uma fonte de energia junto de uma das faces da placa, produzindo uma intensidade de energia calorífica constante e provocando o aumento de temperatura nessa face.

A temperatura desta face vai aumentando gradualmente até atingir uma temperatura constante, uma vez que a temperatura ambiental na face oposta à fonte de energia é constante; é intuitivo que nesta face a temperatura também irá aumentar.

Este sistema de condução unidireccional está representado graficamente na figura 4.17.

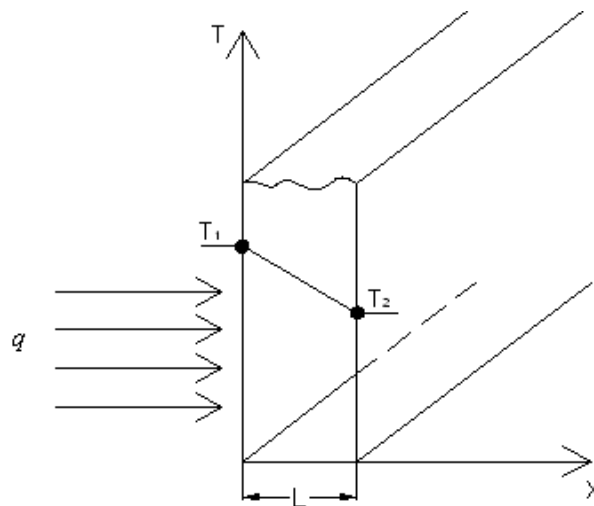


Fig. 4.17 – Condução unidireccional em placa plana

Quando a temperatura em ambas as faces permanece constante, significa que a temperatura estabilizou, estando o sistema em regime estacionário ou permanente.

O fluxo de calor na placa é dado pela *lei de Fourier*:

$$q_x = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{L} (w / m^2)$$

λ é a chamada condutibilidade térmica, e é uma característica do material da placa que depende do teor de humidade do material e do nível de temperaturas em causa.

O fluxo de calor na placa é directamente proporcional à condutibilidade térmica.

Nos problemas correntes usa-se não a condutibilidade térmica, mas sim a condutância térmica dada pela seguinte expressão:

$$K = \frac{\lambda}{L}$$

Considerando agora uma secção da placa com área A , a quantidade de calor que atravessa esta área é dada por:

$$q_x = K \times A \times (T_1 - T_2)$$

A unidade de fluxo de calor no sistema internacional é o Watt, estando associado a uma direcção.

4.5.1- ANÁLISE DIFERENCIAL DA CONDUÇÃO TÉRMICA

No caso de uma parede de alvenaria o fluxo de calor acontece na direcção normal à parede, podendo-se desprezar o fluxo na direcção do plano da parede, o que corresponde a considerar o fluxo unidireccional.

Vamos considerar agora uma fatia de espessura dx no interior da nossa parede:

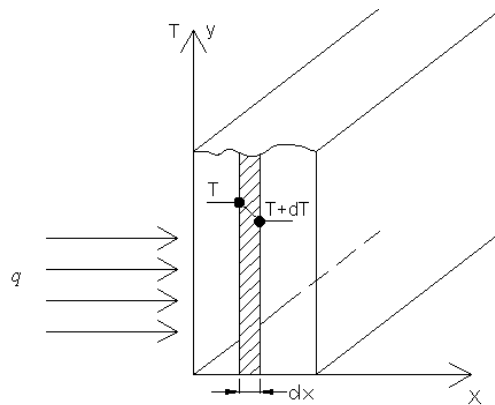


Fig. 4.18 – Condução numa fatia de espessura infinitesimal

O fluxo de calor dado pela lei *Fourier* para a condução unidireccional em regime estacionário é dado por:

$$q_x = \lambda \times \frac{T - (T + dT)}{dx}$$

ou seja

$$q_x = -\lambda \times \frac{dT}{dx}$$

O sinal negativo resulta do facto do incremento da temperatura ser negativo. Considerando agora os limites $x = 0$ e $x = L$ correspondendo a $T = T_1$ e $T = T_2$, e integrando a expressão anterior dentro dos limites obtemos:

$$q_x \times dx = \lambda \times dT$$

$$\int_0^L q_x dx = -\int_{T_1}^{T_2} \lambda dT$$

$$q_x \int_0^L dx = -\lambda \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$q_x (L - 0) = -\lambda (T_2 - T_1)$$

$$q_x = -\lambda \frac{(T_2 - T_1)}{L}$$

$$q_x = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{L}$$

Se considerarmos que do lado oposto à aplicação da fonte de calor que ocorre troca de calor por convecção para o ar, com coeficiente de convecção h_e , o sistema fica assim representado:

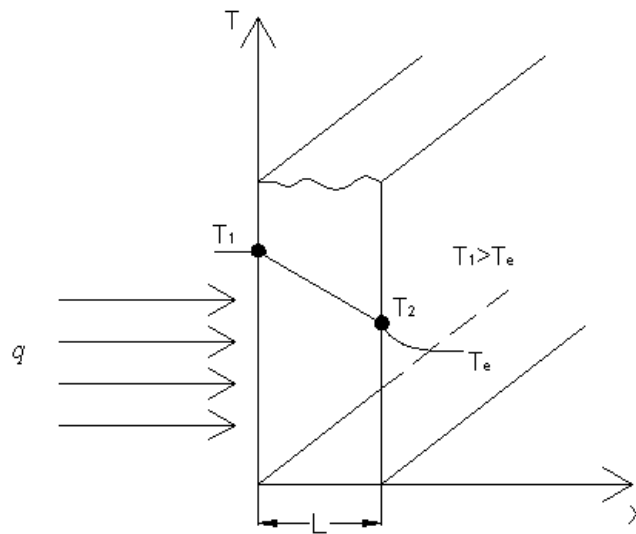


Fig. 4.19 – Condução em placa plana com convecção na superfície 2

Se definirmos as condições fronteira para o sistema fica:

$$x = 0 ; T = T_1$$

$$x=L ; q_x = h_e \times (T_2 - T_e) \Leftrightarrow T_2 = \frac{q_x}{h_e} + T_e$$

onde T_e representa a temperatura exterior, temperatura T_2 não é conhecida e o fluxo q_x é constante uma vez que estamos a considerar regime estacionário.

Rescrevendo as equações diferenciais obtemos:

$$q_x \times \int_0^L dx = -\lambda \times \int_{T_1}^{Te + \frac{q_x}{he}} dT$$

$$q_x (L - 0) = -\lambda (Te + \frac{q_x}{he} - T_1)$$

$$q_x L = -\lambda (Te + \frac{q_x}{he} - T_1)$$

$$q_x L = -\lambda \frac{q_x}{he} + \lambda (T_1 - Te)$$

$$q_x L + \lambda \frac{q_x}{he} = \lambda (T_1 - Te)$$

$$\frac{q_x L}{\lambda} + \frac{q_x}{he} = (T_1 - Te)$$

$$q_x (\frac{L}{\lambda} + \frac{1}{he}) = (T_1 - Te)$$

$$q_x = \frac{(T_1 - Te)}{(\frac{L}{\lambda} + \frac{1}{he})}$$

Se considerarmos

$$U = \frac{1}{(\frac{L}{\lambda} + \frac{1}{he})}$$

O fluxo de calor na direcção x é dado por:

$$q_x = U \times (T_1 - Te)$$

Ao factor U designa-se por coeficiente global de transmissão de calor equivalente, que traduz a resistência ao fluxo de calor do sistema. No *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)* [7] chama-se ao factor U coeficiente de transmissão térmica do elemento da envolvente.

Na prática recorre-se não ao valor de U, mas sim ao seu inverso, designado por resistência térmica equivalente do sistema e representado pela letra R.

Consideremos a analogia de uma parede de alvenaria composta por dois materiais diferentes com configuração representada na figura 4.20.

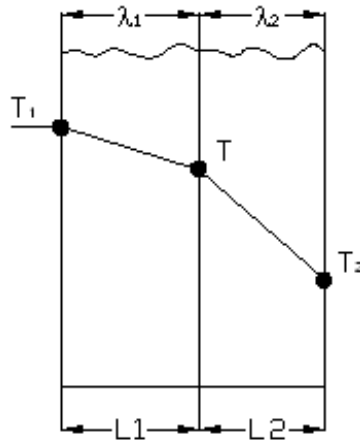


Fig. 4.20 – Condução em placa composta

Se calcularmos a resistência térmica equivalente obtêm-se:

$$R = \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2}$$

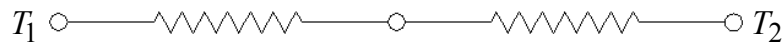
sendo o correspondente fluxo de calor dado por:

$$q_x = \frac{1}{R}(T_1 - T_2)$$

4.5.2- ANALOGIA ELÉCTRICA

Uma forma de interpretação da transmissão de calor é a sua comparação com um circuito eléctrico, considerando a diferença de temperatura como um potencial, e a dificuldade à transmissão de calor como a resistência.

Se fizermos a representação do sistema da figura 4.20 sobre a forma de circuito eléctrico como representado a seguir:



The diagram shows a thermal circuit with two resistors in series. The first resistor is connected to temperature \$T_1\$ and the second to \$T_2\$. Below the diagram, the formulas for thermal resistance and heat flux are given:

$$R_1 = \frac{L_1}{\lambda_1} \qquad R_2 = \frac{L_2}{\lambda_2}$$

$$q_x = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{eq}} \Leftrightarrow q_x = \frac{(T_1 - T_2)}{R_1 + R_2}$$

O cálculo para paredes compostas constituídas por vários materiais sobrepostos é efectuado de igual modo, resultando o cálculo da resistência do sistema:

$$R = \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{L_n}{\lambda_n}$$

O cálculo da resistência térmica de uma parede é o caso particular de um sistema constituído por várias camadas de materiais com características térmicas diferentes.

O cálculo da resistência térmica de placas compostas por várias camadas de materiais diferentes conduz a resultados desfasados da realidade exibidos pela placa. Esta diferença resulta das condições de contacto entre as diversas camadas de materiais ou seja na superfície de interface dos materiais, dependendo da tensão de contacto entre os materiais e da forma como as duas faces se interligam.

Esta resistência adicional resulta da existência de uma lâmina de fluido entre as duas interfaces, conduzindo a uma diferença de temperaturas entre as duas faces, podendo desprezar-se a sua influência quando as interfaces estão em contacto perfeito.

À resistência térmica adicional chama-se resistência de contacto e pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$R_i = \frac{\Delta T_i}{\frac{q}{A}}$$

Esta resistência pode ser desprezada quando se trata de materiais isolantes, dado o seu valor ser pequeno quando comparado com a resistência total; no entanto quando se trata de metais a sua contribuição é importante.

No caso das paredes pode-se desprezar a resistência de contacto uma vez que o contacto nas interfaces entre o revestimento e a alvenaria é perfeito; na transição com o material de isolamento pelas razões atrás descritas também é razoável não se considerar.

CAPITULO 5

TRANSMISSÃO DE CALOR EM BLOCOS DE ALVENARIA

5-TRANSMISSÃO DE CALOR EM BLOCOS DE ALVENARIA.

Os blocos usados para a construção de paredes de alvenaria são tradicionalmente constituídos por uma parte homogénea e outra de espaços de ar, os alvéolos. A introdução dos espaços de ar tem essencialmente três objectivos:

- económico;
- diminuição do peso;
- melhoria do comportamento térmico dos elementos.

O objectivo económico está relacionado com a diminuição do custo de fabrico dos blocos, já que diminuí a quantidade de material necessário para o fabrico do bloco.

A diminuição do peso dos blocos também é um objectivo económico porque reduz a carga a transportar, permite a execução de elementos de maior dimensão com um peso compatível com o seu manuseamento em obra, aumentando assim o rendimento de execução de alvenaria.

A melhoria do comportamento térmico é a vertente que iremos explorar no presente trabalho, não descorando no entanto as outras duas condicionantes.

A introdução de espaços de ar no interior dos blocos de alvenaria está directamente relacionada com a diminuição do coeficiente de transmissão térmica. Conforme foi explicado no capítulo 4 sobre o princípio de funcionamento de um isolante térmico, podemos idealizar elementos de alvenaria como a ampliação da estrutura de um isolante térmico.

Na figura 5.1 apresenta-se um corte transversal de um elemento de alvenaria.

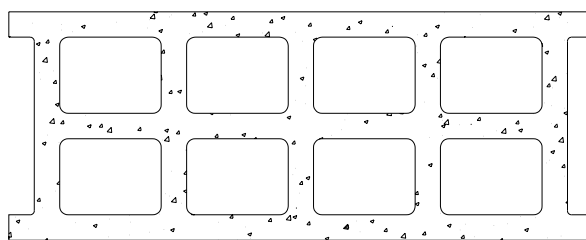


Fig. 5.1 – Secção transversal tipo de um bloco

Analisando-se a transferência de calor no bloco concluímos que para melhorar o comportamento térmico podemos actuar em dois pontos:

- melhoria das características do material do elemento;
- introdução de camadas de alvéolos.

A melhoria do material do elemento pode ser efectuada com o uso de materiais com características térmicas melhoradas, como é o caso de betão de agregados leves (argila expandida) que será estudado no presente trabalho. O betão de agregados leves de argila expandida é um material termicamente melhorado, apresentando uma massa volumica cerca de duas vezes inferior ao betão de agregados correntes.

A introdução de camadas de ar também permite uma diminuição significativa do coeficiente de transmissão térmica.

Na definição do número de camadas e espessura das mesmas, teremos de ter em atenção as condicionantes tecnológicas do fabrico, directamente relacionadas com as dimensões dos alvéolos e dos elementos de alvenaria. Uma outra condicionante é a resistência mecânica dos elementos que terá de ser tal que não ponha em causa o comportamento mecânico das alvenarias.

Para a definição das espessuras dos alvéolos teremos de pensar no modo como se dá transmissão de calor no alvéolo, como já foi referido no capítulo 4.

A transferência de calor em alvéolos é um exemplo de transferência de calor combinado, ou seja temos mais do que um mecanismo de transferência de calor a actuar. Assim podemos ter em simultâneo convecção e radiação, ou condução e radiação.

No capítulo 4 tratamos os fenómenos de transferência de calor em separado; na realidade estes aparecem em conjunto, como é o caso da transferência de calor de uma parede para o ar exterior em que temos troca por convecção e radiação, ao passo no interior da parede, considerando-a maciça, a transferência de calor ocorre por condução. Um outro exemplo vulgar de transferência de calor combinado é o que ocorre nas janelas de vidro duplo onde que temos radiação e convecção ou radiação e condução.

Os parâmetros usados para representar a transferência de calor são:

h_c = Coeficiente de transmissão de calor por convecção;

h_r = Coeficiente de transmissão de calor por radiação;

K = Coeficiente de transmissão térmica.

Nos blocos a transferência de calor ocorre por condução nos septos, nos alvéolos por radiação e convecção ou condução. Na figura 5.2 representa-se esquematicamente a transferência de calor num alvéolo.

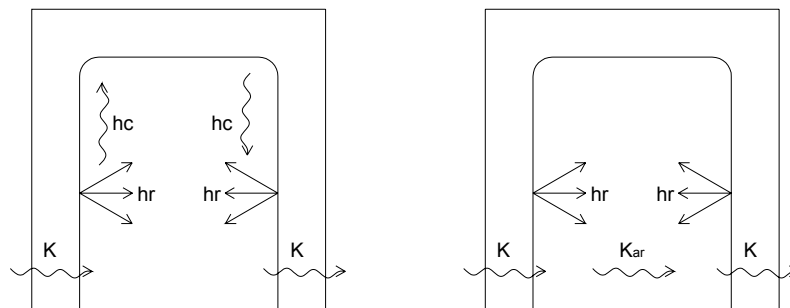


Fig. 5.2 – Transferência de calor em alvéolos

O coeficiente de transmissão térmica equivalente através do alvéolo (espaço de ar) é resultante da soma dos coeficientes de transmissão térmica dos fenómenos em jogo no processo ou seja:

- radiação+convecção: $U_{equi.} = hr + hc$

- radiação+condução: $U_{equi.} = hr + K$

Uma forma de diminuir a transferência de calor através de um elemento de alvenaria é actuar nos mecanismos de transmissão de calor dos alvéolos.

Analisando os fenómenos em separado começamos pela convecção e condução, que se dá pela transmissão de calor através das moléculas do ar. Se nós pensarmos que este fenómeno só o corre porque existe massa, podemos rapidamente concluir que uma forma de suprimir esta contribuição é a criação de vácuo no alvéolo.

Ao contrário da condução e convecção, a radiação não é possível eliminar, apenas conseguindo diminuir de forma considerável.

Para diminuir a transmissão de calor por radiação pode-se colocar materiais com características reflectoras, como por exemplo utilizando chapas metálicas de baixa emitância, que reflectem a energia de volta à origem.

Um exemplo de isolamento actuando directamente na transmissão de calor em cavidades é da garrafa térmica, em que é colocada uma câmara de ar entre o interior e o exterior, estando a cavidade em vácuo e as paredes revestidas com um material de elevada reflexão.

Esta actuação num elemento de alvenaria é de elevada complexidade, sendo no entanto possível diminuir a transmissão por radiação através do revestimento da superfície com um material reflector.

Um exemplo seria fabricar elementos de alvenaria substituindo os alvéolos por cavidades constituídas por elementos em vácuo com paredes revestidas com material de elevada reflexão conforme a figura a seguinte:

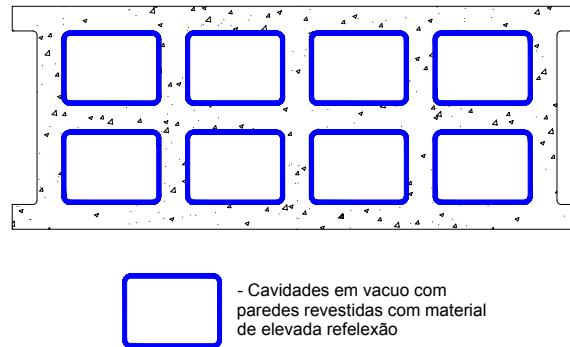


Fig. 5.3 – Secção transversal de um bloco com os alvéolos melhorados termicamente

A concepção de um bloco com estas características poderá ser uma solução a ensaiar na modelação com vista à melhoria do comportamento térmico de blocos de betão de agregados leve a realizar no presente trabalho.

Após esta análise sumária da transferência de calor em blocos de alvenaria podemos quantificá-la, considerando a contribuição do alvéolo mais a transferência de calor através dos septos do bloco de alvenaria, calculando a resistência térmica equivalente.

$$R_{equi.} = \frac{1}{U_{equi.} + k}$$

Podendo calcular também o coeficiente de transmissão térmica equivalente:

$$U = \frac{I}{R}$$

Com a determinação do coeficiente de transmissão térmica do elemento de alvenaria, podemos então avaliar as suas características térmicas, utilizando o seu valor para o cálculo da resistência térmica de paredes de alvenaria

CAPITULO 6

CARACTERÍSTICAS DO BETÃO LEVE E SEUS AGREGADOS

CAPÍTULO 6

CARACTERÍSTICAS DO BETÃO LEVE E SEUS AGREGADOS

ÍNDICE

6.1-DEFINIÇÃO DE BETÃO LEVE

6.2- ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

6.3-ENQUADRAMENTO NORMATIVO

6.4- CARACTERÍSTICAS

6.5- PROPRIEDADES PRINCIPAIS DO BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA

6.6- CARACTERÍSTICAS DO BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA USADO NO FABRICO DE BLOCOS

6 – CARACTERÍSTICAS DO BETÃO LEVE E SEUS AGREGADOS.

6.1-DEFINIÇÃO DE BETÃO LEVE

Define-se betão leve como um produto com massa volúmica e condutibilidade térmica inferior à revelada pelos betões normais.

Para a obtenção de betão leve usa-se por norma agregados de baixa massa volúmica como é o caso da argila expandida, conseguindo-se assim aprovisionar uma grande quantidade de ar no interior do produto. Existem outras formas de aprovisionar ar no interior da estrutura que passo a descrever:

- betão obtido por reacção química (betão celular) - o aprovisionamento do ar no interior da estrutura é obtido por reacção química entre os agregados e o ligante, provocando a produção de pequenas bolhas de ar. A composição deste betão é caracterizada pelo uso de areias de sílica e ligante mineral, aproximando-se a sua composição de uma argamassa por não possuir agregados grossos. O principal objectivo destes betões é o isolamento térmico;
- betão celular obtido por acção física – betões em que a estrutura se aproxima da anterior, sendo as bolhas de ar produzidas devido à adição de substâncias espumantes na sua composição; estes betões têm a mesma utilização dos anteriores;
- betão semi-cavernoso – resulta da falta de compactação do betão, existindo no interior da estrutura do betão o ar retido durante a amassadura; estes betões destinam-se à melhoria do isolamento térmico;
- betão cavernoso – betão constituído por um agregado de granulometria descontínua do tipo leve ou não. Neste tipo de betão suprime-se a parte fina,

usando-se só agregados grossos e ligante assemelhando-se ao betão betuminoso drenante usado nas nossas auto-estradas; estes betões destinam-se a ser usados para isolamentos ou estrutura-isolante;

- betão compacto de inertes leves – betão com composição análoga aos normais, com a diferença que parte ou totalidade dos agregados foram substituídos por agregados leves. Estes betões podem ser usados com função isolante e/ou estrutural. Em Portugal a pala do Pavilhão de Portugal no Parque das Nações encontra-se executada com betão leve.

6.2- ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

A utilização de agregados leves na produção de betão leve para a construção de edifícios é bastante remota; um dos exemplos é o Panteão de Roma datado de 120 D.C.

O grande desenvolvimento da utilização de betões leves encontra-se no século XX, com a construção de obras de grande envergadura e complexidade como é exemplo a ponte sobre o Rio Salhus na Noruega. Trata-se de uma ponte flutuante com 1246 m de comprimento, suportada por 10 pontões flutuantes concebidos em betão leve. Outro exemplo é a construção de plataformas petrolíferas no mar do norte, tendo também sido fabricados durante a primeira guerra mundial alguns navios com elevado sucesso [27, 30].

Distingue-se entre betões leves com agregados de origem natural ou artificial. Os betões leves de agregados naturais conheceram grande utilização a partir de 1950 na Europa, Estados Unidos e EX-URSS. Os agregados mais comuns para este tipo de betões são a pedra-pomes e a pozolana [1].

Neste trabalho iremos limitar-nos a betões leves de agregados artificiais, mais especificamente argila expandida, já que é o agregado mais usado em Portugal, com excepção da região autónoma dos Açores onde se poderá usar escórias vulcânicas.

A produção de argila expandida surge nos anos 20, tendo sido esta tecnologia desenvolvida em 1918 pelo americano *Hayde*, com um processo de expansão e cozedura da argila em forno rotativo. Esta tecnologia chegou até aos nossos dias com apenas algumas pequenas alterações.

O fabrico em escala industrial ocorreu em 1928 aplicado à construção de edifícios, pontes e barcos, com grande desenvolvimento nos Estados Unidos e EX-URSS. Para este desenvolvimento muito contribuiu a escassez de agregados naturais em várias zonas destes países. Em termos europeus a utilização de argila expandida ocorreu após a segunda guerra mundial, surgindo nos anos 60 várias empresas produtoras de argila expandida em diferentes países.

Em termos nacionais a utilização de argila expandida encontra-se ligado à instalação em 1970 de uma unidade fabril produtora deste tipo de agregados.

Esta empresa suspendeu a sua actividade durante alguns anos, passando o mercado nacional a ser abastecido na sua generalidade a partir da importação de Espanha.

Este encerramento acarretou também uma diminuição do consumo deste tipo de agregado.

A produção nacional de argila expandida retomou em 1990 com a instalação nacional de uma unidade fabril com a designação nacional *LECA Portugal* e inserida num grande grupo mundial “*Aken Exclay*”.

6.3-ENQUADRAMENTO NORMATIVO

Em termos nacionais o betão leve encontra-se enquadrado na Norma *NP EN206-1* [28], definindo betão leve como sendo:

“ Betão com massa volúmica, após secagem em estufa superior ou igual a 800kg/m^3 mas não excedendo 2000 kg/m^3 . Este betão é produzido utilizando parcial ou totalmente agregado leve.”

Segundo a Norma *NP EN206-1* [28], os betões leves classificam-se segundo dois critérios, o primeiro relativo à resistência à compressão conforme apresentado no quadro 6.1.

O segundo critério refere-se à massa volúmica conforme quadro 6.2.

Quadro 6.1 – Classificação dos betões leves quanto à resistência à compressão pela *NP EN206-1*

Classe de resistência à compressão	Resistência característica mínima em cilindros (N/mm^2)	Resistência característica mínima em cubos (N/mm^2)
LC8/9	8	9
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC30/33	30	33
LC35/38	35	38
LC40/44	40	44
LC45/50	45	50
LC50/55	50	55
LC55/60	55	60
LC60/66	60	66
LC70/77	70	77
LC80/88	80	88

Quadro 6.2 – Classificação dos betões leves quanto à massa volúmica pela *NP EN206-1*

Classe de massa volúmica	D1,0	D1,2	D1,4	D1,6	D1,8	D2,0
Massa volúmica (kg/m ³)	≥800 e ≤1000	>1000 e ≤1200	>1200 e ≤1400	>1400 e ≤1600	>1600 e ≤1800	>1800 e ≤2000

Uma outra forma de classificar os betões, apresentada no quadro 6.3, é a proposta pelas recomendações da *Rilem* em que também se considera a condutibilidade térmica do betão [29].

Quadro 6.3 – Classificação de betões segundo a *Rilem*

Classe funcional	I	II	II
Tipo de betão	B. Estrutural	B. Estrutural e de isolamento térmico	B. de isolamento térmico.
Massa volúmica seca(kg/m ³)	<2000	N. Estabelecida	N. Estabelecida
Resistência á compressão (MPa)	>15	>3,5	>0,5
Condutibilidade térmica (W/ m°C)		<0,75	<0,3

6.4- CARACTERÍSTICAS

Como já foi referido atrás trata-se de betões de baixa peso específico, podendo ser usados como betão estrutural, como material de isolamento, como material de preenchimento ou ainda como uma função combinada estrutural/isolante.

Em termos estruturais a sua utilização é pouco vulgar em Portugal, conhecendo-se como grande obra a pala do Pavilhão de Portugal no Parque das Nações.

Em Portugal o betão tem sido muito utilizado na indústria de artefactos de betão, no fabrico de blocos e de elementos para execução de lajes. Uma outra utilização é como material de enchimento de modo a aligeirar elementos na execução de coberturas, assumindo função de isolamento e conformação.

Os agregados utilizados mais frequentemente em Portugal para o fabrico de betão leve são de argila expandida, sendo também o material utilizado na produção de blocos. Este agregado é obtido pela cozedura de argilas expansivas, ocorrendo a expansão da argila para uma gama de temperaturas entre 1200°C e 1300°C; os grânulos são modelados antes da cozedura.

As características dos grânulos dividem-se em características geométricas, com relevância para a dimensão dos grãos, e características físicas onde são avaliados os seguintes aspectos:

- aspecto da superfície e textura;
- massa volúmica aparente seca;
- massa volúmica aparente húmida;
- massa volúmica real;
- massa volúmica absoluta da matéria;
- percentagem total de vazios dos grãos;
- absorção de água;
- condutibilidade térmica.

Um outro aspecto importante é as características mecânicas, assumindo particular importância na resistência dos betões leves de argila expandida, dado que a rotura dá-se geralmente pelos agregados, o que corresponde a dizer que a resistência mecânica de betão está directamente relacionada com a resistência do agregado. Esta

caracteriza-se pela determinação da resistência dos grãos da estrutura interna e do módulo de deformação dos grãos.

Por fim teremos de analisar as características químicas dos agregados, que por regra se comportam quimicamente como inertes; no entanto podem conter substâncias que não o sendo inertes reagem quimicamente como por exemplo a incrustação de cal viva que reage com a água usada na produção, provocando crateras na superfície do betão.

6.5- PROPRIEDADES PRINCIPAIS DO BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA

Neste capítulo iremos falar de modo resumido das principais propriedades do betão leve de argila expandida.

Quando nos referimos a betões estruturais no dia-a-dia, referimos uma resistência mecânica (“compressão”) e uma classe de protecção da estrutura. Nos betões leves, para além destas propriedades prescrevemos também a condutibilidade térmica, estando directamente correlacionada com a massa volúmica.

A massa volúmica é uma das propriedades mais importantes neste tipo de betões, dividindo-se os betões leves em dois grandes grupos, os estruturais e os com fim de isolamento térmico.

Esta distinção é importante desde logo para se definir a composição dos betões, dado que na sua composição pode-se adicionar areias naturais.

Assim, na composição dos betões leves com fim estruturais usa-se areia natural obtendo-se misturas com granulometrias contínuas, massas volúmicas e resistências superiores. Quando se tem como objectivo o isolamento térmico, utiliza-se uma dosagem de ligante baixa, não utilizando areia na constituição. Estes tipos de betões têm granulometria descontínua e uma grande percentagem de ar.

Dada esta correlação entre a condutibilidade térmica e massa volúmica, encontram-se publicadas tabelas que relacionam estas duas grandezas (ITE28) [31].

Quadro 6.4 – Correlação entre a massa volúmica e a condutibilidade térmica dos betões

Betão	Massa volúmica aparente (kg/m ³)	Condutibilidade térmica útil – λ (W/m.°C)
- Dosagem de cimento $\geq 300\text{kg/m}^3$ - Massa volúmica aparente dos agregados $\geq 350\text{kg/m}^3$	1600-1800	1,05
	1400-1600	0,85
	1200-1400	0,70
	1000-1200	0,46
- Dosagem de cimento $\leq 250\text{kg/m}^3$ (e massa volúmica aparente dos agregados $\leq 350\text{kg/m}^3$ no caso de betões com massa volúmica $\leq 600\text{kg/m}^3$)	800-1000	0,33
	600-800	0,25
	≤ 600	0,20

Na determinação da condutibilidade térmica, tal como na generalidade dos materiais é relevante o teor de humidade. Para os betões leves de argila expandida o teor de humidade de equilíbrio depende da dosagem de ligante, sendo habitual considerar 5% para betões com dosagem de ligante superior a 300kg/m^3 e 3% para os casos em que esta é inferior a 250kg/m^3 .

No que concerne à resistência mecânica considera-se a resistência à compressão como propriedade de maior relevância, já que a rotura ocorre neste tipo de betões pelo agregado, enquanto nos betões normais se dá pela matriz areia/cimento. Como referido anteriormente os betões leves estruturais possuem na sua constituição areias, dependendo a resistência à compressão da resistência da argila expandida, da quantidade de cimento, da incorporação de areias e da quantidade de água.

Uma outra característica distinta tem a ver com a obtenção da resistência à compressão mais cedo nestes betões que nos normais, decorrendo este facto das suas características térmicas que dificultam a perda do calor de hidratação e como consequência o aumento da temperatura da massa. No que toca à resistência final e como já referido anteriormente, está limitada pela resistência da argila expandida.

Um outro aspecto importante de realçar tem a ver com as características elásticas dos betões de argila expandida, revelando um módulo de elasticidade inferior aos normais, tornando-o um material mais elástico, suportando assim uma maior gama de deformações sem fissurar.

Outro aspecto importante é a variação dimensional dos betões, relacionada com a retracção que se dá devido à perda de água durante a cura.

A retracção nos betões normais é normalmente um processo rápido, dependendo sempre das condições de cura, mas nos betões leves de argila expandida esta retracção é mais lenta.

Isto acontece porque a água que o betão perde é compensada pela libertação de água pela argila expandida.

Por fim vamos referir o comportamento acústico, reacção ao fogo e durabilidade. Os betões de argila expandida com texturas superficiais compactas apresentam um comportamento acústico superior aos betões normais. Relativamente à reacção ao fogo trata-se de um material da classe M0 [1, 4].

Por último a durabilidade do betão é extremamente importante, dado condicionar irremediavelmente a durabilidade das estruturas. Tal como nos betões normais a durabilidade está relacionada com a quantidade de ligante, relação água /cimento, compacidade, propriedades dos inertes e principalmente com as condições de cura.

Os betões de argila expandida são por regra mais sensíveis ao ataque químico e físico, consequência da estrutura porosa dos seus agregados, que facilita a capacidade de se deixarem atravessar por líquidos e gases, sendo que sob o ponto de vista físico são sempre mais sensíveis pela baixa resistência dos seus agregados.

Os betões de argila expandida apresentam um bom comportamento ao gelo-degelo, uma vez que a sua estrutura porosa permite a expansão da água durante o processo de solidificação sem danificar a estrutura interna do betão.

6.6- CARACTERÍSTICAS DO BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA USADO NO FABRICO DE BLOCOS

Os betões usados na produção de blocos, possuem diferenças significativas em relação aos betões normais. Os betões usados no fabrico de blocos de argila expandida com características térmicas melhoradas, são do tipo cavernoso de modo a obter-se baixa densidade e condutibilidade térmica.

Na composição destes betões reduz-se ao máximo a fracção fina de cimento e a relação água/cimento, de modo a obter uma consistência tipo terra húmida que facilita a moldagem dos blocos.

Para além dos aspectos referidos atrás, a produção industrializada de blocos tem também em atenção vários aspectos como a dimensão máxima do agregado que terá de ser compatível com a espessura dos septos e a rentabilização da produção com a diminuição do tempo de moldagem dos elementos; também se pretende assegurar uma correcta composição do betão e equilíbrio dos teores de humidade dos inertes.

Uma outra vertente importante no fabrico de blocos é o processo de cura dos elementos. Este processo de cura pode ser natural, ou seja os elementos são colocados em câmaras onde poderão permanecer entre 24 e 36 horas, não possuindo estas câmaras nenhum dispositivo para acelerar a cura.

O processo agora descrito é usado em pequenas indústrias. Na produção actual com fabrico intensivo, como é o caso da generalidade da indústria de pré-fabricados, recorre-se a câmaras com dispositivo próprios de modo a diminuir o tempo de cura com o aumento dos ciclos de cura, obtendo-se tempos de cura que oscilam entre 8 a 16 horas.

O processo utilizado consiste no aquecimento das câmaras através da injeção de vapor de água livre saturada a uma pressão de 0,1 a 1 MPa.

Após o fabrico dos blocos e tal como nos tijolos cerâmicos, vulgarmente usados na nossa construção, teremos de analisar o comportamento dimensional dos elementos. A estabilidade dimensional dos blocos é importante para o comportamento das paredes de alvenaria; a variação dimensional dos blocos dá-se devido à retracção do betão, tendo de se garantir que os elementos estão em equilíbrio. Nos blocos de argila expandida a retracção é mais prolongada, pelo que, o período entre o fabrico e aplicação terá de ser suficientemente grande de modo a garantir a estabilidade dimensional.

**MODELAÇÃO NUMÉRICO DAS CARACTERÍSTICAS
TÉRMICAS DOS ALVÉOLOS EM ELEMENTOS DE ALVENARIA**

CAPITULO 7

MODELAÇÃO NUMÉRICO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS ALVÉOLOS EM ELEMENTOS DE ALVENARIA

INDICE

7.1- INTRODUÇÃO

7.2- MODELAÇÃO DA CONVECÇÃO E CONDUÇÃO EM ALVÉOLOS

7.3- MODELAÇÃO DA RADIAÇÃO EM ALVÉOLOS

7- MODELAÇÃO NUMÉRICO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS ALVÉOLOS EM ELEMENTOS DE ALVENARIA

7.1- INTRODUÇÃO

Um dos pontos principais desenvolvidos neste trabalho foi a compreensão do modo de transmissão de calor em alvéolos, conducente à determinação das características térmicas dos elementos para alvenaria.

Assim após o estudo apresentado no capítulo 5, procederemos à modelação e simulação do comportamento térmico de elementos de alvenaria. Para a modelação é necessário efectuar a determinação das características térmicas dos alvéolos, operação que envolve cálculos complexos e bastantes morosos.

A determinação dos parâmetros térmicos foi realizada com o uso da folha de cálculo *Excel* que permite a determinação de valores com precisão e rapidez.

A construção da folha de cálculo foi efectuada em dois módulos distintos, um para a contribuição da convecção e condução e o outro para a contribuição da radiação térmica, de forma a obter-se o coeficiente de transmissão térmico global.

7.2- MODELAÇÃO DA CONVECÇÃO E CONDUÇÃO EM ALVÉOLOS

Para determinação da contribuição da convecção é necessário contabilizar vários parâmetros como constatado anteriormente, que variam com a temperatura do ar no interior do alvéolo:

- coeficiente de expansão térmica (β);
- viscosidade dinâmica (μ);
- massa volúmica (ρ);
- condutibilidade térmica (λ);
- número *Prandtl* (Pr).

Como o valor das variáveis são função da temperatura do ar, sabendo que a temperatura do ar no interior dos alvéolos não é uniforme foi necessário estabelecer um critério para a determinação desta. O critério estabelecido foi a consideração da temperatura média das faces do elemento de alvenaria; com este critério as variáveis atrás referidas foram calculadas usando valores tabelados em publicações.

Os valores tabelados estão normalmente determinados para intervalos de temperaturas espaçados de 10°C, sendo necessário determinar uma lei de aproximação. Os valores tabelados usados são os apresentados no quadro 7.1.

A determinação das leis de aproximação foi conseguida com o uso de regressões matemáticas, experimentando para cada variável vários tipos de regressões de modo a poder-se analisar qual a que melhor se adapta. As regressões experimentadas foram:

- exponencial;
- polinomial;
- linear;
- logarítmica.

Quadro 7.1 – Valores dos parâmetros característicos do ar

Características do ar						
T (°C)	ρ (kg/m ³)	c (J/kg K)	λ (W/mK)	μ (N.s/m ²)x10 ⁶	β (K ⁻¹)x10 ³	Pr
-10	1,3414	1,0056	23,29	16,71		0,721
0	1,2923	1,0057	24,08	17,2	3,66	0,718
10	1,2467	1,0058	24,87	17,69		0,716
20	1,2042	1,0061	25,64	18,17	3,41	0,713
30	1,1644	1,0064	26,01	18,65		0,712
40	1,1273	1,0068	27,1	19,11	3,19	0,710
50	1,0924	1,0074	27,81	19,57		0,709
60	1,0596	1,0080	28,52	20,03	3	0,708

A adopção de regressões apresenta uma óptima aproximação aos valores conseguindo-se obter valores aceitáveis. As expressões utilizadas são as que aparecem nos gráficos, tendo sido introduzidas na folha de cálculo para a determinação automática dos valores das diferentes variáveis.

Da análise resultou a adopção das leis de aproximação apresentadas nos gráficos das figuras 7.1 a 7.5.

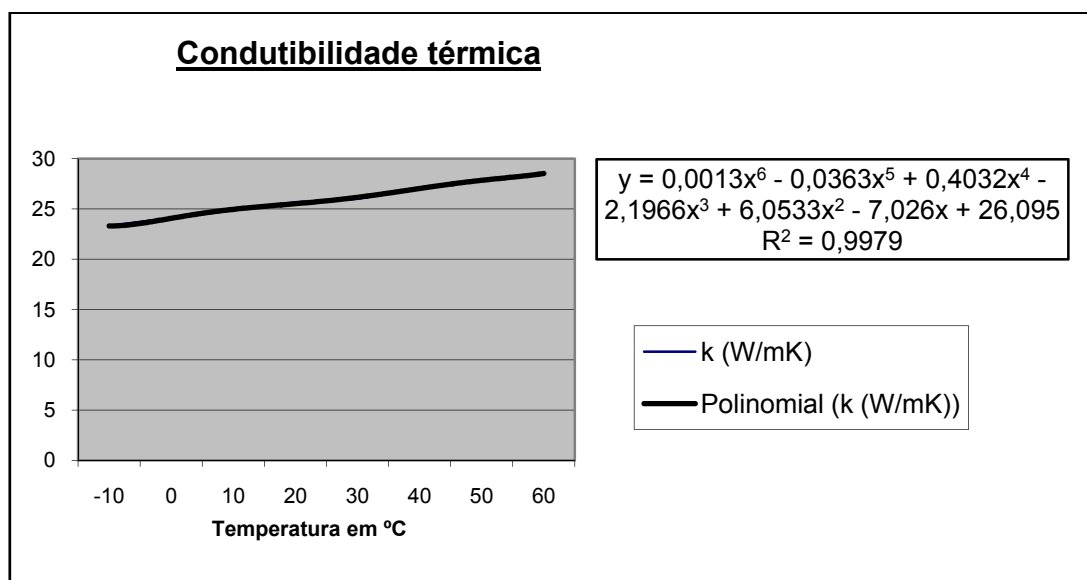


Fig. 7.1 – Variação da condutibilidade térmica do ar com a temperatura

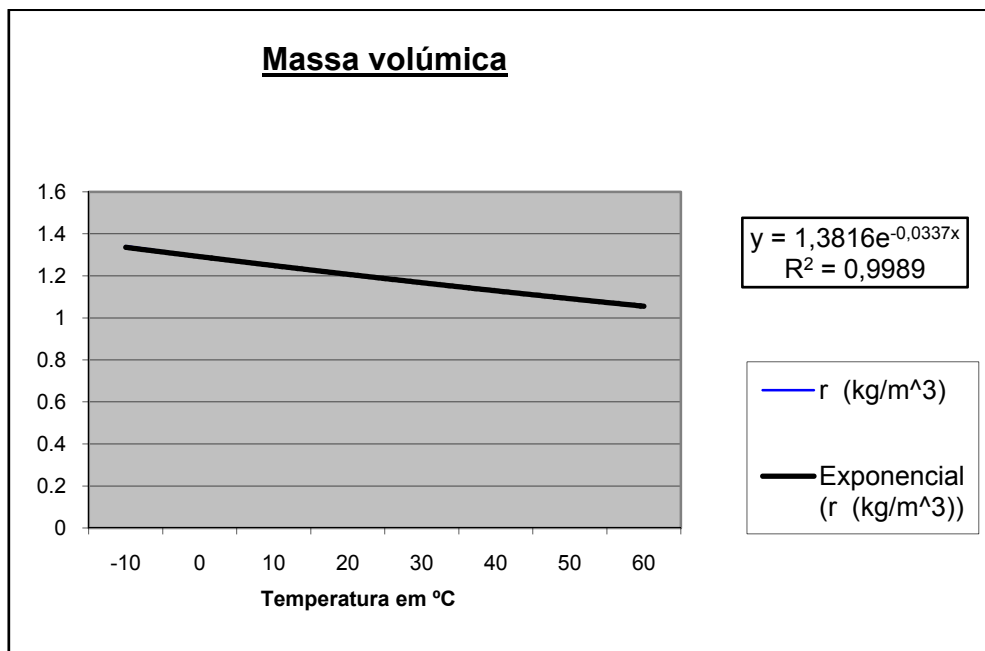


Fig. 7.2 – Variação da massa volúmica do ar com a temperatura

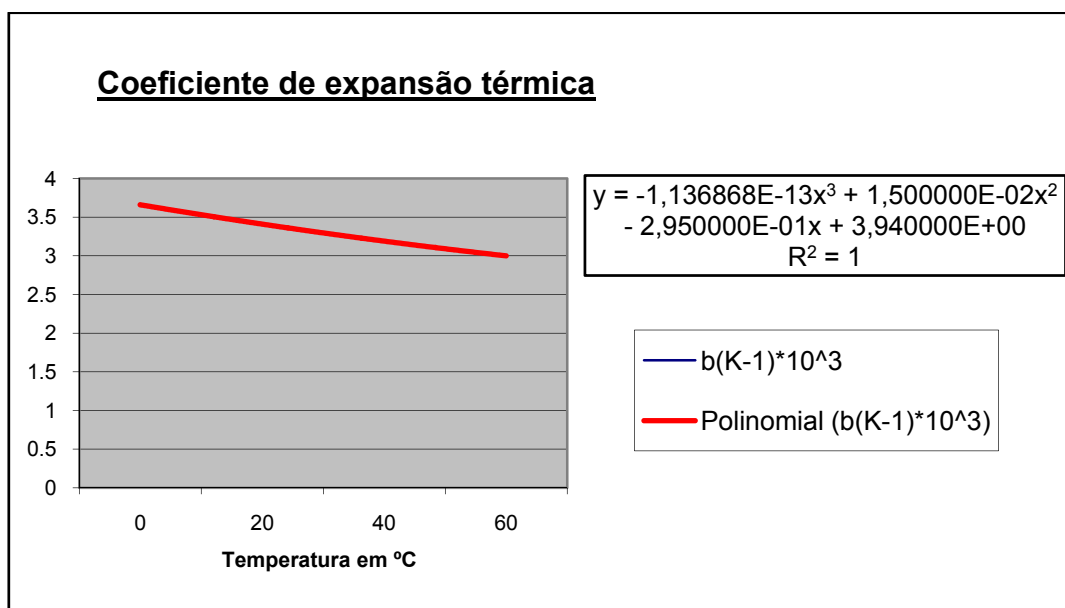


Fig. 7.3 – Variação do coeficiente de expansão com a temperatura

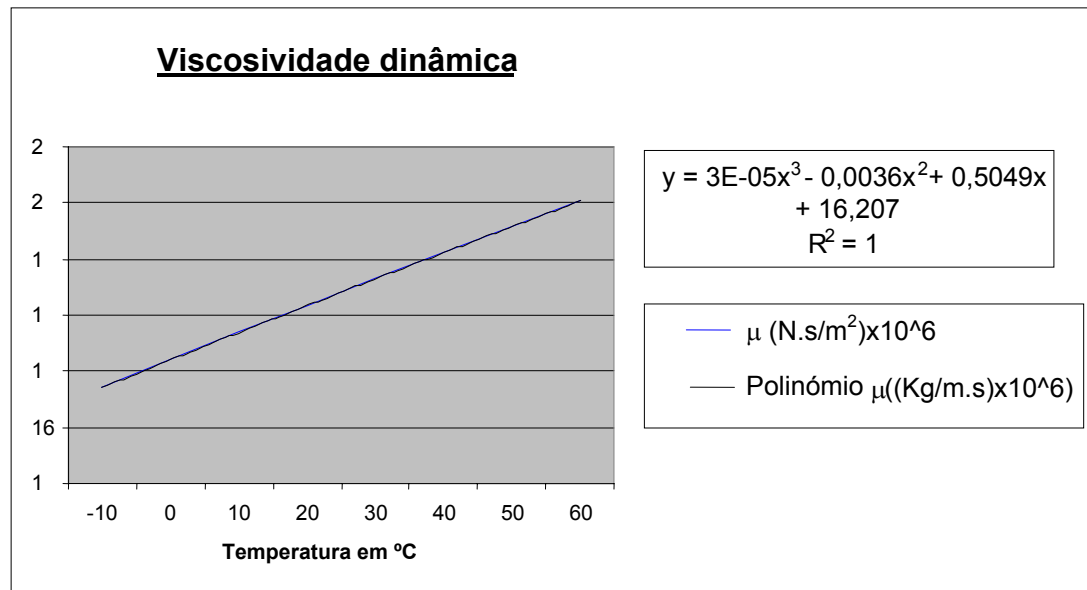
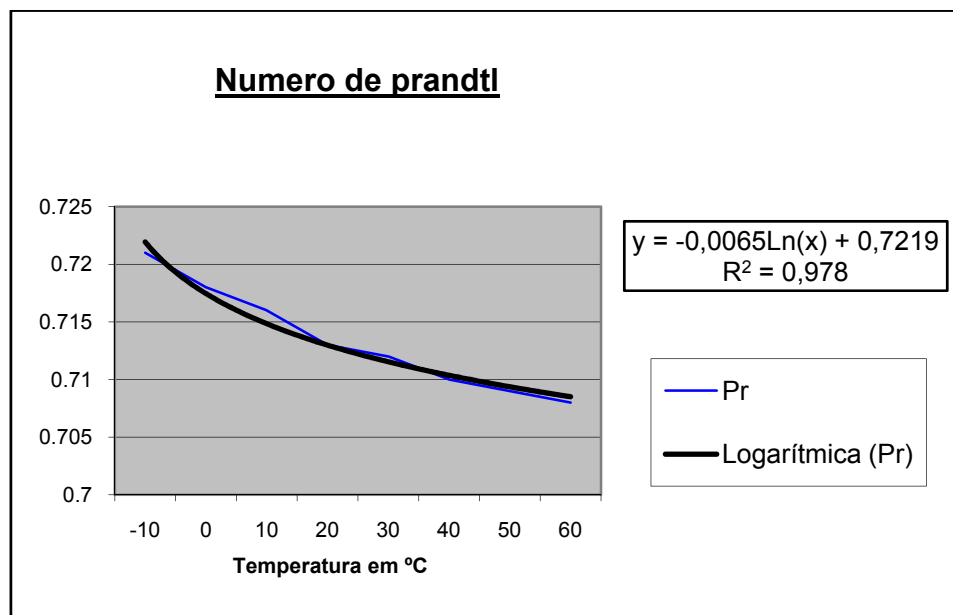


Fig. 7.4 – Variação da viscosidade dinâmica com a temperatura

Fig. 7.5 – Variação do número de *Prandtl* com a temperatura

Iremos apresentar agora o algoritmo de cálculo de modo a compreender a determinação do coeficiente de transmissão térmica.

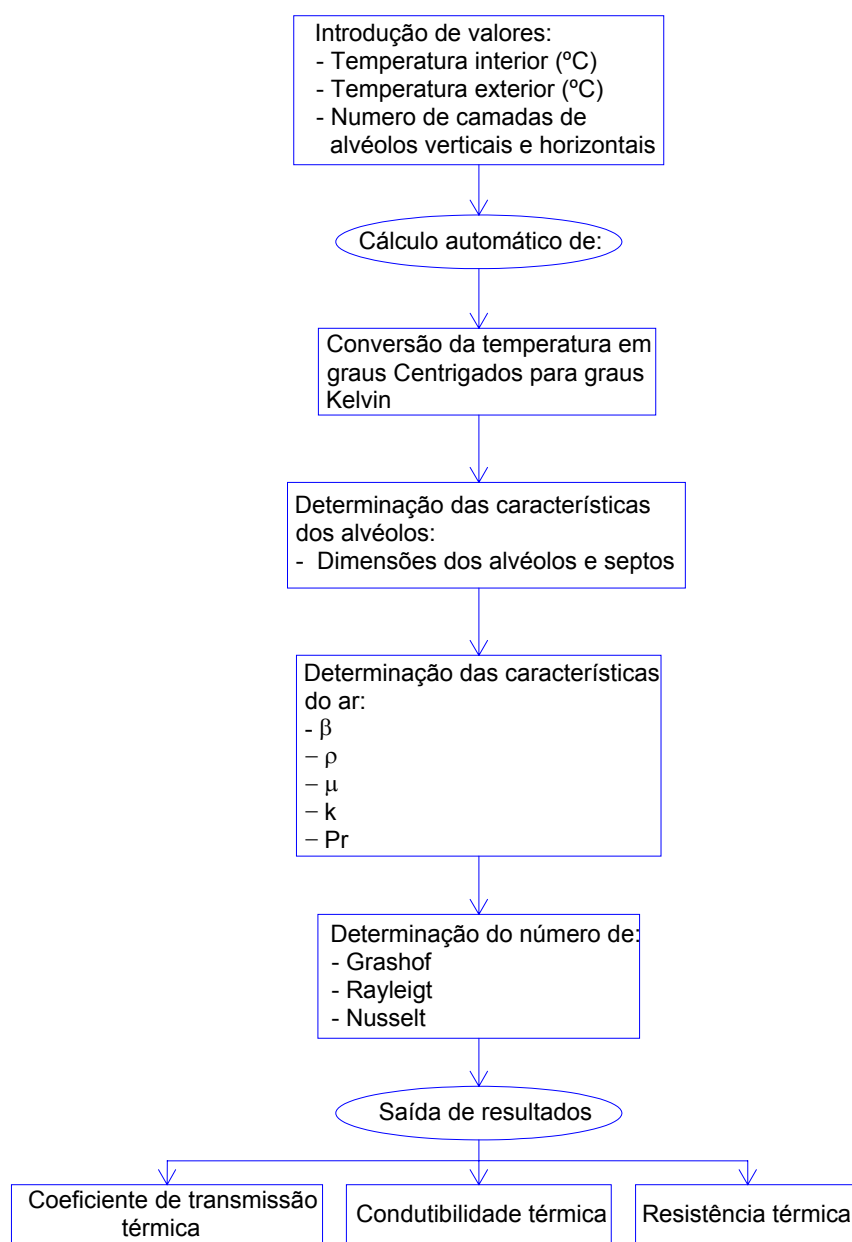


Fig. 7.6 – Algoritmo de cálculo do coeficiente de transmissão térmica por convecção em alvéolos

7.3- MODELAÇÃO DA RADIAÇÃO EM ALVÉOLOS

A determinação da radiação térmica na transmissão de calor nos alvéolos foi também elaborada com o auxílio de folha de cálculo automático.

Os parâmetros envolvidos na radiação variam com a temperatura e com as características geométricas, sendo necessário determinar os seguintes parâmetros:

- factores de forma;
- potência emissiva.

Também neste caso foi necessário adoptar algumas premissas para o cálculo da temperatura média das faces exteriores dos elementos de alvenaria; para a determinação dos factores de forma considerou-se as paredes dos alvéolos com um desenvolvimento infinito, desprezando-se a contribuição dos topos. A marginalização da contribuição dos topos dos alvéolos resulta do facto de estarmos a trabalhar com o fluxo de calor unidireccional.

Para o cálculo da potência emissiva é necessário considerar a constante de *Stefan-Boltzmann* que assume um valor constante igual a $5,675\text{E-}08 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$; para a emissividade das paredes utilizamos o valor preconizado na Norma *ISO 6946:1996* [32].

A determinação dos factores de forma é mais trabalhosa já que envolve expressões complexas, apresentadas no capítulo 4.

A rotina de cálculo descrita anteriormente tem como objectivo a determinação do fluxo de calor causado pela radiação térmica através de uma superfície, o que implica determinar a radiosidade desta, que conduz à resolução de sistemas de equações conforme descrito no capítulo 4. A resolução de sistemas em folha de cálculo é complexa, tendo-se formulado o problema na forma matricial e aplicado o teorema de *Green* para determinar a radiosidade da superfície em estudo.

Na posse do valor do fluxo de calor determina-se o coeficiente de transmissão térmica e a resistência térmica do alvéolo correspondente ao fenómeno de radiação nos alvéolos.

Na figura 7.7 apresenta-se o algoritmo que sintetiza a rotina de cálculo.

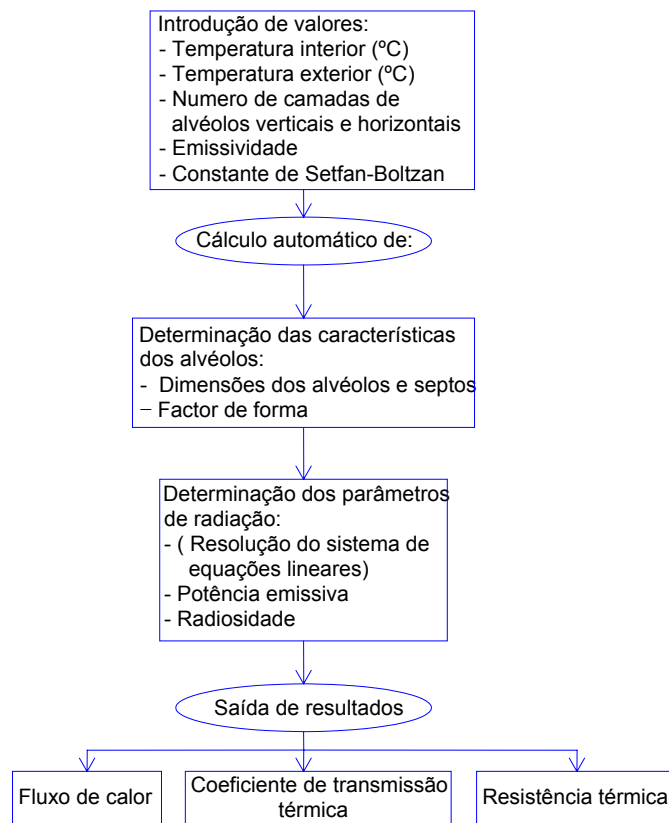


Fig. 7.7 – Algoritmo de cálculo do coeficiente de transmissão térmica por radiação em alvéolos

CAPITULO 8

ESTUDO DE SOLUÇÕES

CAPITULO 8

ESTUDO DE SOLUÇÕES

INDICE

8.1- DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA

8.1.1 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA COMERCIAL ABAQUS

8.2 – SOLUÇÕES TRADICIONAIS

8.3 – OPTIMIZAÇÃO

8.3.1- Características genéricas das soluções analisadas

8.3.2- Blocos com alvéolos descentrados com rotura de junta centrada

8.3.3- Blocos com alvéolos centrados sem rotura de junta centrada

8.3.4- Blocos com secções transversais complementares

8.4 – CONSIDERAÇÃO FINAIS

8- ESTUDO DE SOLUÇÕES

8.1- DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA

A quantificação das características térmicas foi efectuada com o uso do programa *ABAQUS*, que utiliza o método de elementos finitos para a determinação do coeficiente de transmissão térmica.

Para criar o ficheiro de dados “bloconovo.INP”, utilizou-se um programa em linguagem Fortran, “generarnovo.For” que gera a malha de elementos finitos, a partir do conhecimento do número de camadas horizontais e verticais de alvéolos, e da espessura dos septos [33].

Para estabelecer a interacção entre o programa generarnovo.For e o programa comercial *ABAQUS* desenvolvido em linguagem C foi necessário utilizar scripts em linguagem *PYTHON* e *PERL* [33].

O valor do coeficiente de transmissão térmica dos alvéolos é determinado com o uso de folha de cálculo conforme descrito no capítulo 7.

8.1.1 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA COMERCIAL ABAQUS

A validação do programa comercial utilizado é feita de acordo com a Norma *EN 1745* [34] segundo a qual a discrepância entre os resultados referenciados e os obtidos deve ser menor que 2%.

Foi efectuada uma análise térmica bidimensional do bloco de betão leve com 0.25 m de comprimento e 0.30m de espessura conforme geometria representada na figura 8.1.

Para a definição das condições fronteira a temperatura ambiente interior e exterior e em conformidade com o previsto no *RCCTE* foram consideradas constantes e iguais a 20°C e 0°C respectivamente. Considerou-se a transferência de calor por radiação e convecção nas superfícies exterior e interior do revestimento, admitindo os valores referenciados na norma para essas resistências térmicas superficiais iguais a $R_{si} = 0.13 \text{ m}^2\cdot\text{°C}/\text{W}$ e $R_{se} = 0.04 \text{ m}^2\cdot\text{°C}/\text{W}$ respectivamente. Adoptou-se para condutibilidade térmica do reboco da parede $\lambda_{\text{argamassa}} = 1.15 \text{ W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$ e para a condutibilidade térmica do betão $\lambda_{\text{betão}} = 0,35 \text{ W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$.

As dimensões, a resistência térmica e o coeficiente de transmissão térmica equivalente dos vazios estão representados na figura 8.1.

Resistência térmica e coeficiente de condutibilidade térmico equivalente dos vazios

$$0.0142 \times 0.0475 \text{ m} \quad R = 0.1731 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$\lambda_{\text{equi}} = 0.082 \text{ W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$$

$$0.0142 \times 0.0177 \text{ m} \quad R = 0.1920 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$\lambda_{\text{equi}} = 0.074 \text{ W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$$

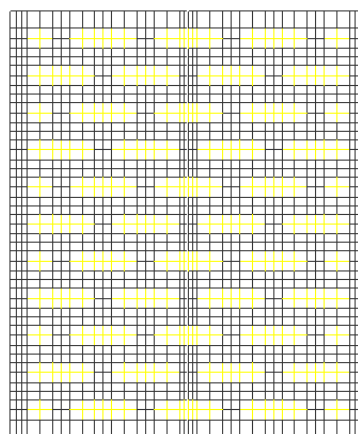


Fig. 8.1 - Secção transversal do bloco utilizado para a validação do programa *ABAQUS*

Para este bloco obteve-se um coeficiente de transmissão térmica igual a $U = 0.5699 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ sendo o valor correspondente dado pela norma *EN 1745* igual a $U = 0.5656 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$. Uma vez que o erro obtido pelo programa comercial *ABAQUS* é inferior a 1% considera-se satisfatória a simulação efectuada.

Com o uso do programa *ABAQUS*, e de folha de cálculo para a determinação do coeficiente de transmissão térmica dos alvéolos descrita no capítulo anterior podemos calcular as características térmicas de um elemento de alvenaria.

8.2 – SOLUÇÕES TRADICIONAIS

As peças habitualmente empregues na construção são tijolos cerâmicos, encontrando-se normalizados, possuindo em média as características apresentadas no quadro 8.1.

Quadro 8.1 – Características habituais dos tijolos cerâmicos

Características geométricas (comp. x alt. x esp.)	Peso médio Aproximado (kg)	Percentagem de furação (%)	Coefficiente de transmissão térmica (ITE28) (W/m ² .°C)
 30x20x7	3,1	60%	2,83
 30x20x11	4,3	66%	2,42
 30x20x15	6,0	65%	1,95
 30x20x22	8,0	68%	1,51

Os valores do coeficiente de transmissão térmica apresentados no quadro 8.1 incluem um reboco de argamassas bastardas com 2,5 cm de espessura em ambas as faces e as resistências superficiais interior e exterior respectivamente iguais a $R_{si}=0,04 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{W}$ e $R_{se}=0,13 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{W}$.

Da análise do gráfico representado na figura 8.2 concluímos que a variação do coeficiente de transmissão térmica e do peso dos tijolos é praticamente linear com a espessura. Como seria de esperar a utilização de paredes de pano simples em tijolo de 22 está longe de cumprir as exigências do *RCCTE* [7], apresentado um valor três vezes superior ao de referência.

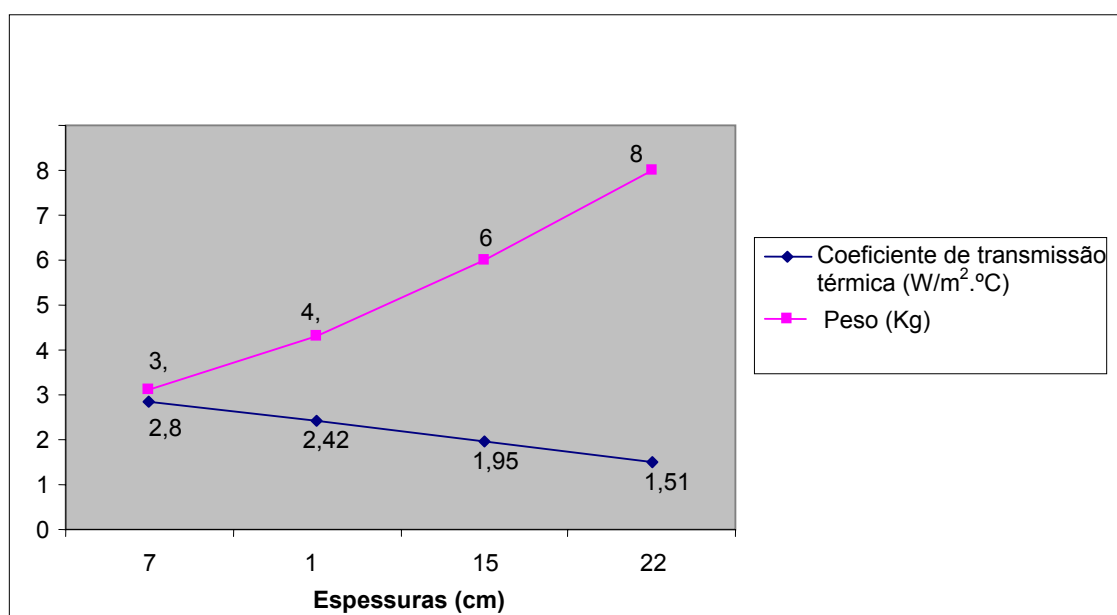
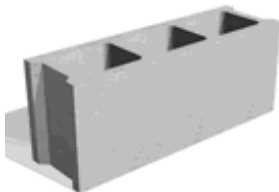
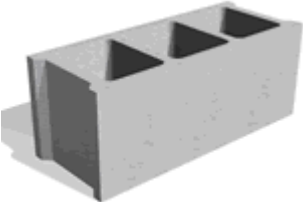
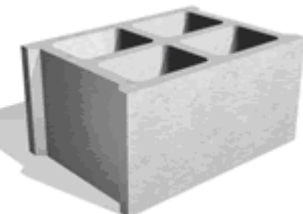


Fig. 8.2 – Variação do coeficiente de transmissão térmica e peso com a espessura

Tradicionalmente os blocos de betão normal são pouco utilizados para a execução de paredes exteriores, dado o seu mau comportamento térmico. Estes têm a vantagem de ter uma elevada resistência mecânica, bom comportamento ao fogo e ao ruído. A sua utilização na construção de paredes exteriores exige a utilização de um isolamento térmico complementar. Para melhor perceber estas características apresenta-se no quadro 8.2 os valores de referência retirados de publicações e tabelas de fabricantes.

Quadro 8.2 – Características habituais dos blocos de betão correntes

Características geométricas usuais (comp. x alt. x esp.)	Peso médio Aproximado (kg)	Coefficiente de transmissão térmica (ITE28-W/m ² .°C)
 40x20x20	16	2,5
 40x20x25	20	2,4
 40x20x30	25	2,3

Os valores do coeficiente de transmissão térmica apresentados incluem um reboco de argamassas bastardas em ambas as faces.

A execução de paredes de blocos de agregados normais não apresenta qualquer vantagem do ponto de vista energético.

8.3 – OPTIMIZAÇÃO

8.3.1- Características genéricas das soluções analisadas

Neste trabalho a optimização dos elementos de alvenaria tem como objectivo obter blocos com características térmicas melhoradas, de modo a permitir cumprir exigências regulamentares do *RCCTE* [7] e aumentar a eficiência energética das habitações.

Conforme já referimos para obtermos esta melhoria poderemos usar materiais na constituição dos elementos com características térmicas melhoradas e ou alterar a geometria de modo a obter um melhor comportamento.

O material usado neste trabalho na constituição dos elementos foi o betão leve de argila expandida conforme referido anteriormente.

Para a simulação considerou-se um elemento com reboco de argamassas bastardas em ambas faces com uma espessura de 0,02 m, juntas horizontais e verticais de argamassa de cimento com 0,01 m de espessura. A utilização do reboco exterior tem como objectivo impedir a infiltração da água; o revestimento interior torna-se necessário para proporcionar um aspecto melhorado.

As dimensões dos elementos dependem de factores regulamentares e funcionais como já referido nos capítulos 2 e 3, bem como, de vários factores tecnológicos relacionadas com a produção em fábrica.

Ponderando todos estes factores e após indicações da empresa *LECA* relativas às condicionantes de fabrico, foram adoptadas as dimensão de 350x400x190 mm, com uma espessura mínima dos septos igual a 18 mm e a dos fundos cegos igual a 5mm.

Para a definição da topologia da secção transversal utilizou-se uma malha composta por fiadas horizontais de alvéolos em número compreendido entre 5 e 11, sendo o número de fiadas verticais entre 3 e 5 fiadas. O número de camadas de alvéolos horizontais foi limitado a 11, por razões geométricas associadas à sua execução. As juntas verticais entre elementos são contínuas ou descontínuas, podendo possuir corte térmico no seu interior, materializado com um alvéolo no centro da junta.

Relativamente a factores de execução em obra o objectivo é aumentar a rentabilidade, sendo benéfico o uso de elementos de grandes dimensões, desde que o peso seja inferior a um valor máximo estipulado de acordo com exigências de manuseamento.

Neste trabalho efectuou-se a análise de blocos para alvenaria com dimensões modulares de 400 mm para o comprimento (incluindo juntas verticais de 0,01 m) e de 190 mm para a altura, a espessura dos blocos é igual a 350 mm, acrescida de 0,02 m de revestimento por reboco em ambas as faces.

Na simulação do processo de transferência de calor o bloco é discretizado por elementos sólidos lineares de 4 nós (DC2D4 da livraria do *ABAQUS* [5]).

Para a definição das condições fronteira as temperaturas ambiente interior e exterior, em conformidade com o previsto no *RCCTE*, foram consideradas constantes e iguais a 20°C e 0°C respectivamente. Também se considerou a transferência de calor por radiação e convecção nas superfícies exterior e interior do revestimento, admitindo os valores habituais para essas resistências térmicas superficiais, iguais a $R_{si} = 0.13 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ e $R_{se} = 0.04 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ na superfície interior e exterior respectivamente. Adoptou-se para condutibilidade térmica do reboco da parede o valor $\lambda_{\text{argamassa}} = 1.15 \text{ W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$.

A condutibilidade térmica do betão é uma propriedade característica, que depende de uma série de factores tais como:

- temperatura;
- massa volúmica;
- teor de humidade.

Como as amplitudes térmicas das habitações são relativamente pequenas admitindo-se que no máximo esta atinge 50°C [23], pode desprezar-se a influência da temperatura. Para além deste factor temos a massa volúmica e o teor de humidade, que ao contrário da temperatura é decisivo no valor exibido. A contribuição da massa volúmica para o aumento da condutibilidade térmica foi referida no ponto 6.5. O teor de humidade de equilíbrio do betão leve depende do meio onde está inserido e da dosagem de cimento conforme já referido no ponto 6.5.

Para a selecção do valor a usar no cálculo do coeficiente de transmissão térmica do bloco, tivemos em atenção os valores referidos na Norma *EN1745* [34], e nas Informações Científicas e Técnicas de Edifícios do *LNEC*, *ITE28* [31] e *ITE50* [35]. A *EN1745* determina a condutibilidade térmica para uma temperatura média de 10 °C com o material seco, propondo-se a correcção da condutibilidade térmica com o teor de humidade que terá o material, referindo também que deverá ser usado sempre que possível valores referidos em publicações nacionais. A *ITE 28* e *50*, sendo a segunda uma actualização do primeiro, consideram valores convencionais em situação ambiental normal, referindo que os valores tabelados se encontram por excesso.

Como os betões usados para a produção de blocos de argila expandia tem uma massa volúmica normalmente situada entre 1000 a 1200 kg/m³, os documentos referidos no parágrafo anterior consideram os valores apresentados no quadro 8.3 para a condutibilidade térmica.

Os valores atrás referidos são convencionais, podendo sempre usar-se outros valores conforme referido pelo *ITE 50* [35], devendo estes possuir marcação *CE*, ou

uma apreciação técnica idónea ou ainda ser objecto de certificação por entidade reconhecida.

Quadro 8.3 – Condutibilidade térmica do betão de argila expandida conforme a Norma EN1745 e a ITE 50

Massa volúmica (kg/m ³)	Condutibilidade térmica útil – λ (W/m.°C)	
	EN1745	ITE 50
1000	0,32	0,36
1200	0,41	0,46

O valor considerada para a condutibilidade térmica do betão foi $\lambda_{\text{betão}} = 0,35$ W/m.°C, que é um valor que se enquadra nos valores apresentados na *EN1745*, apesar de ser inferior aos referidos na *ITE 50*; considerámos que será possível desenvolver um betão termicamente mais eficiente, não colocando em causa a resistência mecânica dos blocos.

O coeficiente de transmissão térmica dos blocos foi obtido a partir da expressão:

$$U = \frac{Fl}{\Delta T \times \frac{1}{2}L} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})]$$

Onde Fl é igual ao somatório dos fluxos de calor nodais obtidos pelo programa *ABAQUS*, $\Delta T = 20^\circ \text{C}$ é igual à diferença de temperatura entre as superfícies interior e exterior e L representa o comprimento do bloco.

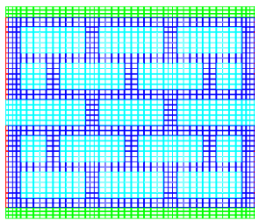
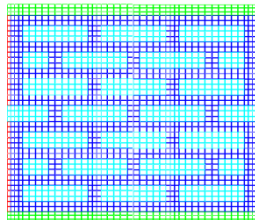
8.3.2- Blocos com alvéolos descentrados com rotura de junta centrada

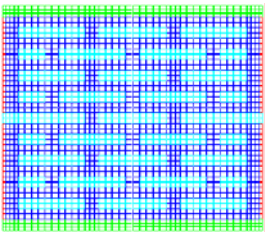
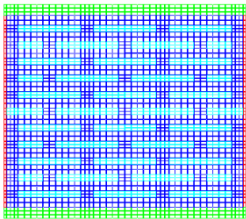
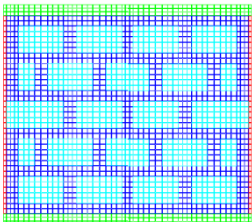
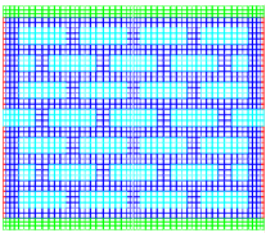
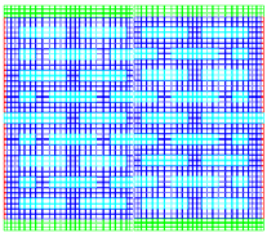
8.3.2.1- Simulação numérica

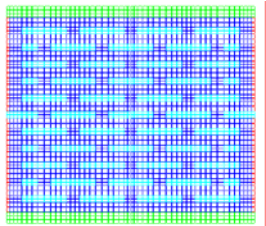
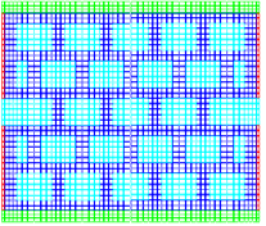
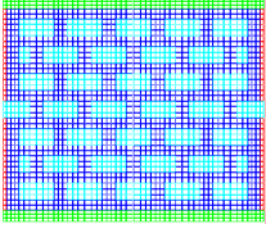
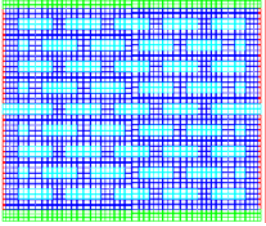
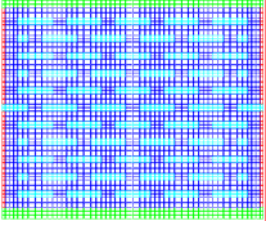
Este primeiro estudo foi efectuado num conjunto de doze simulações, onde foi calculado o coeficiente de transmissão térmica das diversas soluções conforme anexo nºII. Neste primeiro conjunto de geometrias estudadas considerou-se alvéolos descentrados e a utilização de juntas verticais com rotura de junta. A utilização de rotura de junta vertical evita o aparecimento de uma junta contínua com elevada condutibilidade térmica.

No quadro 8.4 apresenta-se um resumo das características das soluções estudadas e o correspondente coeficiente de transmissão térmica.

Quadro 8.4 – Características das soluções estudadas para alvéolos descentrados

Características geométricas (comp. x alt. x esp.)	Peso por unidade (kg)	Percentagem de furação (%)	Coeficiente de transmissão térmica (W/m ² .C)
 <i>Solução 1A</i>	14,32	53,19%	0,717
 <i>Solução 2A</i>	16,95	44,59%	0,615

 <i>Solução 3A</i>	19,3	36,91%	0,572
 <i>Solução 4A</i>	21,51	29,68%	0,547
 <i>Solução 5A</i>	15,04	50,83%	0,722
 <i>Solução 6A</i>	17,45	42,96%	0,632
 <i>Solução 7A</i>	19,65	35,76%	0,585

 <i>Solução 8A</i>	21,75	28,90%	0,571
 <i>Solução 9A</i>	15,88	48,09%	0,713
 <i>Solução 10A</i>	18,1	40,83%	0,631
 <i>Solução 11A</i>	20,15	34,13%	0,610
 <i>Solução 12A</i>	22,12	27,69%	0,589

8.3.2.2 – Análise de resultados

Para análise dos resultados obtidos construiu-se um gráfico de modo a facilitar a visualização e análise da variação do coeficiente de transmissão térmica.

O primeiro gráfico mostra a variação do coeficiente de transmissão térmica com a percentagem de furação.

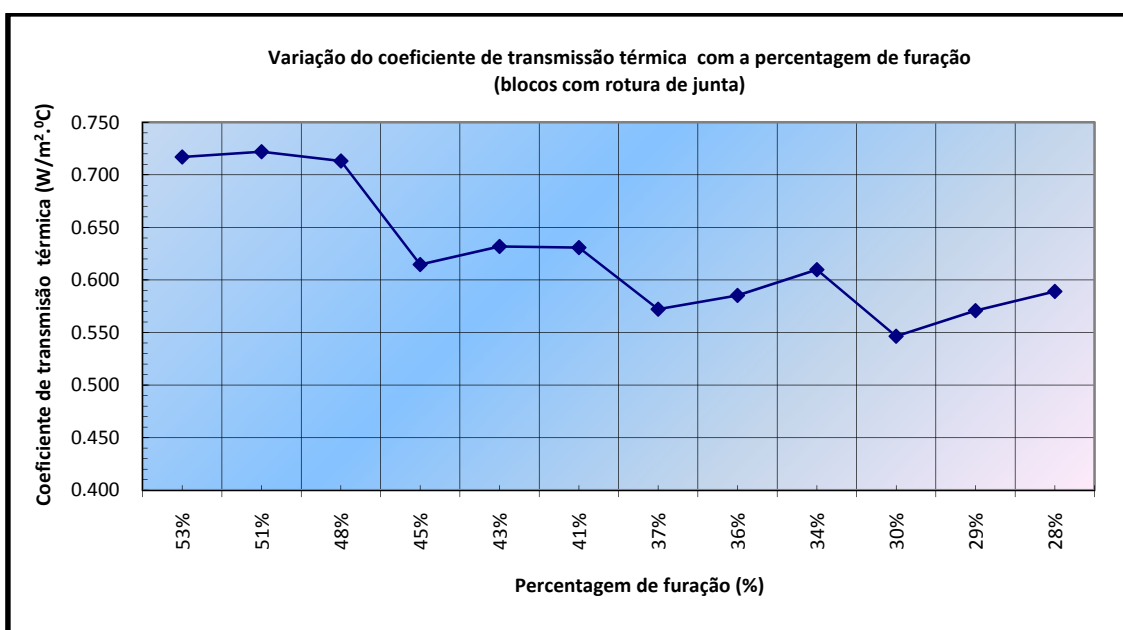


Fig. 8.3 – Variação do coeficiente de transmissão térmica com a percentagem de furação (blocos com rotura de junta)

Da análise do gráfico podemos referir os vários pontos de inflexão, que revelam que o coeficiente de transmissão térmica depende da quantidade de ar retido nos alvéolos mas também da disposição dos alvéolos e número de camadas verticais e horizontais.

Pode-se observar que uma grande percentagem de furação não corresponde necessariamente a um baixo coeficiente de transmissão térmica. Verifica-se um abaixamento do coeficiente de transmissão térmica com a diminuição da percentagem de furação e aumento do número de camadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo,

conseguindo-se o menor coeficiente de transmissão térmica para uma percentagem de furação de 30%, ponto a partir do qual o coeficiente de transmissão térmica tende a aumentar.

Após estas primeiras conclusões vamos continuar a análise de resultados, com a observação da variação do coeficiente de transmissão térmica com o número de camadas horizontais e verticais de alvéolos.

Para a realização de uma análise mais detalhada da solução estudada realizou-se o gráfico apresentado na figura 8.4 representativo da variação do coeficiente de transmissão térmica, com o número de camadas horizontais e verticais de alvéolos.

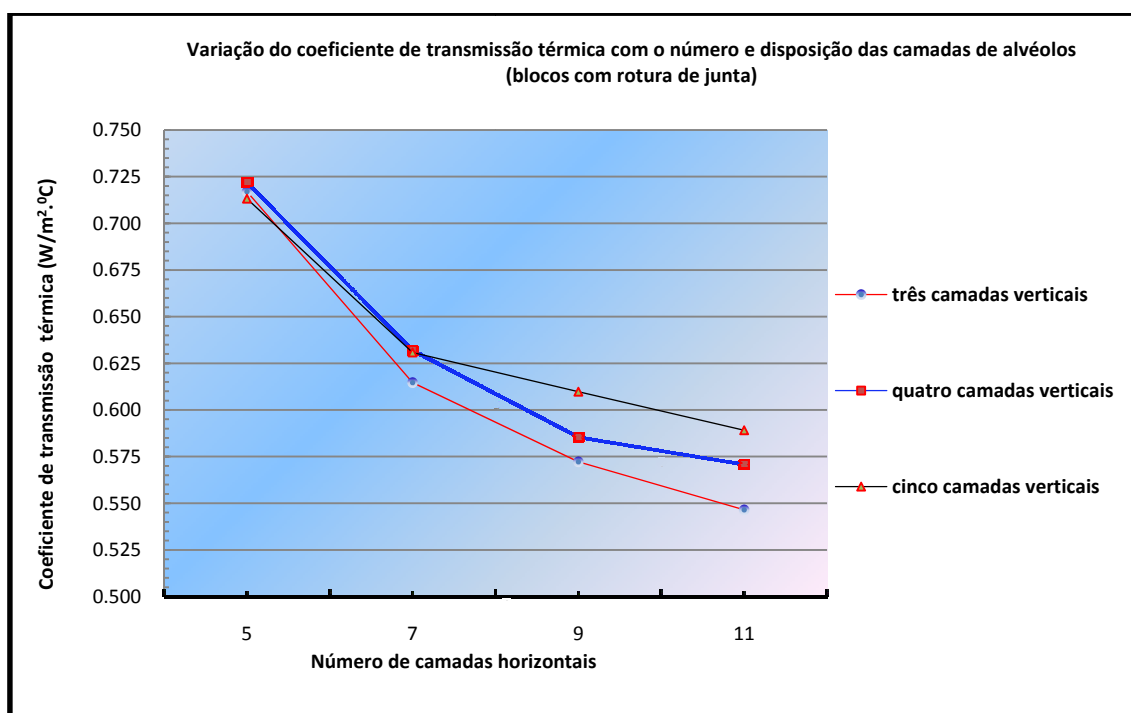


Fig. 8.4 – Variação do coeficiente de transmissão térmica com o número e disposição das camadas de alvéolos (blocos com rotura de junta)

Da análise do gráfico verifica-se que há uma variação do coeficiente de transmissão térmica com o número de camadas de alvéolos horizontais.

Verifica-se também que a um maior número de camadas horizontais de alvéolos corresponde um menor coeficiente de transmissão térmica, tendo uma variação inversa no caso de um maior número de camadas verticais de alvéolos.

A solução que exhibe um menor valor do coeficiente de transmissão térmica é a solução 4A com 11 camadas horizontais de alvéolos e 3 verticais, apresentando um coeficiente de transmissão térmica de $0,547\text{W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$.

O conjunto das soluções com 11 camadas de alvéolos horizontais exhibe os menores coeficientes de transmissão térmica, aumentando com o número de camadas verticais de alvéolos. A solução 12A evidencia que o aumento do número de camadas verticais prejudica o coeficiente de transmissão térmica.

A solução com coeficiente de transmissão térmica mais elevado é a solução 1A, que é, a solução com 5 camadas de alvéolos horizontais e três verticais. O conjunto das soluções com 5 camadas horizontais possui coeficientes de transmissão térmica mais elevados, estando em conformidade com o referido atrás.

Existe uma diferença significativa no comportamento das soluções com cinco camadas horizontais de alvéolos relativamente às soluções com 11 camadas. Enquanto na solução com 11 camadas de alvéolos horizontais o coeficiente de transmissão térmica menor corresponde à solução com menor número de camadas de alvéolos verticais, no caso da solução com 5 regista-se o contrário. Este comportamento pode ser observado no gráfico pela intersecção da curva correspondente a cinco camadas verticais com as curvas de 3 e 4 camadas, concluindo-se assim que dimensões elevadas de alvéolos revelam um comportamento térmico inferior ao próprio betão leve.

Em termos de percentagem de furação a solução que apresenta um melhor comportamento térmico em relação a todas as outras possui uma percentagem de furação 29,7 com um peso de 21,51kg e a solução com pior comportamento térmico possui uma percentagem de furação de 53,2 e um peso de 14,32kg.

Como já se referiu o coeficiente de transmissão térmica varia com o número de camadas verticais de alvéolos, comparando a solução 4A com a 12A verifica-se que existe uma diminuição de 7,7% no coeficiente de transmissão térmica para um acréscimo de peso de 2,9% logo mais onerosa do ponto de vista económico. A solução 12A possui um maior número de septos verticais o que faz com que seja uma solução com melhor resistência mecânica.

Podemos concluir que os blocos com maior número de camadas horizontais de alvéolos e menor número de camadas verticais possuem em geral uma maior eficiência térmica.

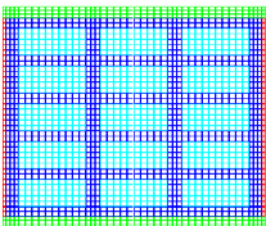
8.3.3- Blocos com alvéolos centrados sem rotura de junta centrada

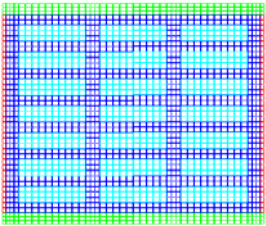
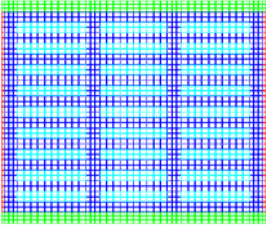
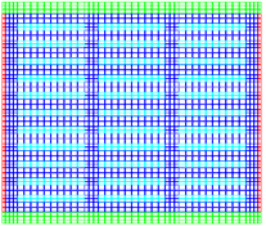
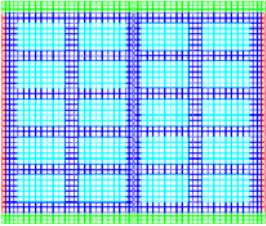
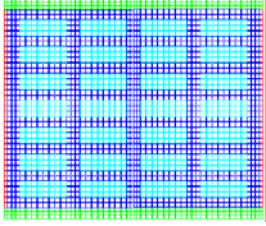
8.3.3.1- Simulação numérica

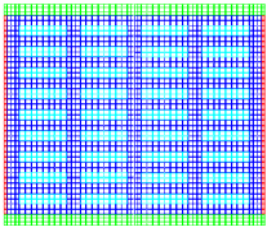
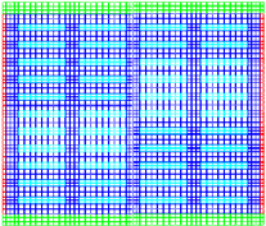
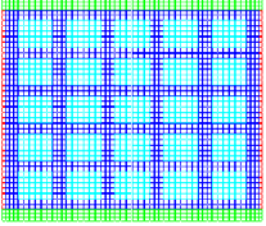
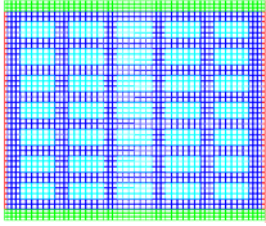
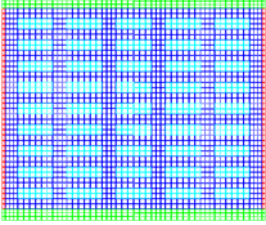
O conjunto de soluções agora analisado tem a mesma matriz utilizada nas soluções anteriores, ou seja, o mesmo de camadas de alvéolos verticais e horizontais. Porém nesta análise não se considera rotura de junta e os alvéolos estão alinhados.

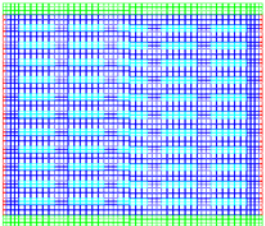
No quadro 8.5 apresenta-se um resumo das características das soluções estudadas.

Quadro 8.5 – Características das soluções estudadas para alvéolos centrados

Características geométricas (comp. x alt. x esp.)	Peso por unidade (kg)	Percentagem de furação (%)	Coeficiente de transmissão térmica (W/m ² .°C)
 Solução 1B	13,48	55,93%	0,722

 <i>Solução 2B</i>	15,85	48,19%	0,632
 <i>Solução 3B</i>	18,21	40,47%	0,590
 <i>Solução 4B</i>	20,58	32,72%	0,565
 <i>Solução 5B</i>	14,50	52,60%	0,733
 <i>Solução 6B</i>	16,71	45,37%	0,651

 <i>Solução 7B</i>	18,91	38,18%	0,602
 <i>Solução 8B</i>	21,12	30,96%	0,592
 <i>Solução 9B</i>	15,52	49,26%	0,720
 <i>Solução 10B</i>	17,57	42,56%	0,650
 <i>Solução 11B</i>	19,61	35,89%	0,627

 Solução 12B	21,66	29,19%	0,609
--	-------	--------	-------

8.3.3.2 – Análise de resultados

Para aferir a influência da rotura de junta e da disposição dos alvéolos, procederemos de forma análoga á anterior com a execução de gráficos similares aos apresentados.

O gráfico apresentado na figura 8.5 possui um aspecto idêntico ao anterior, figura 8.4, tendo pontos de inflexão e um comportamento similar no modo de evolução do coeficiente de transmissão térmica com a percentagem de furação. Mantém-se válido o observado para as soluções anteriores.

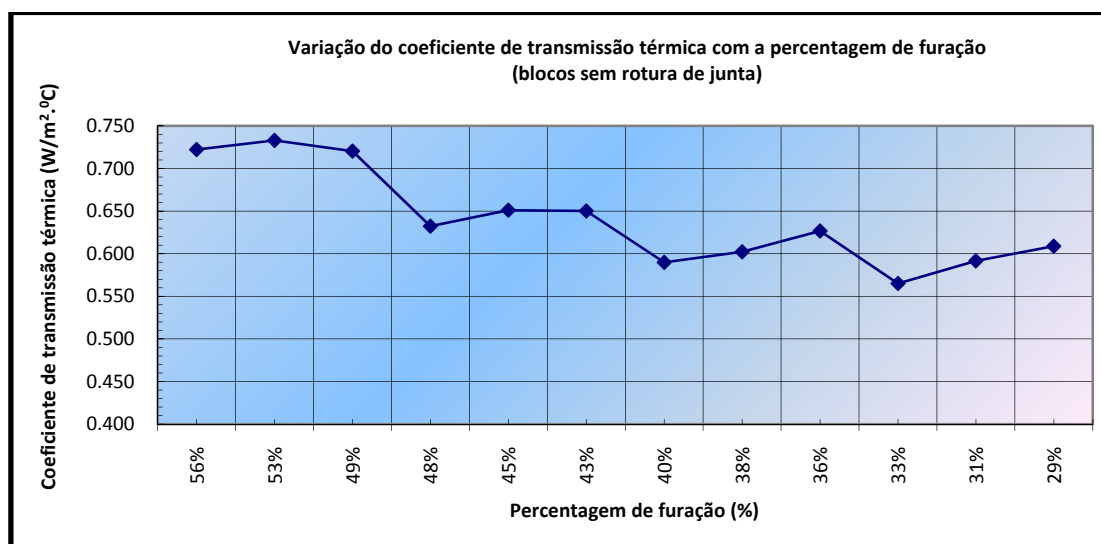


Fig. 8.5 – Variação do coeficiente de transmissão térmica com a percentagem de furação (blocos sem rotura de junta)

Continuando esta aferição vamos elaborar um gráfico representando a variação do coeficiente de transmissão térmica com a variação do número de camadas de alvéolos horizontais e verticais, conforme já anteriormente realizado para a solução com alvéolos descentrados.

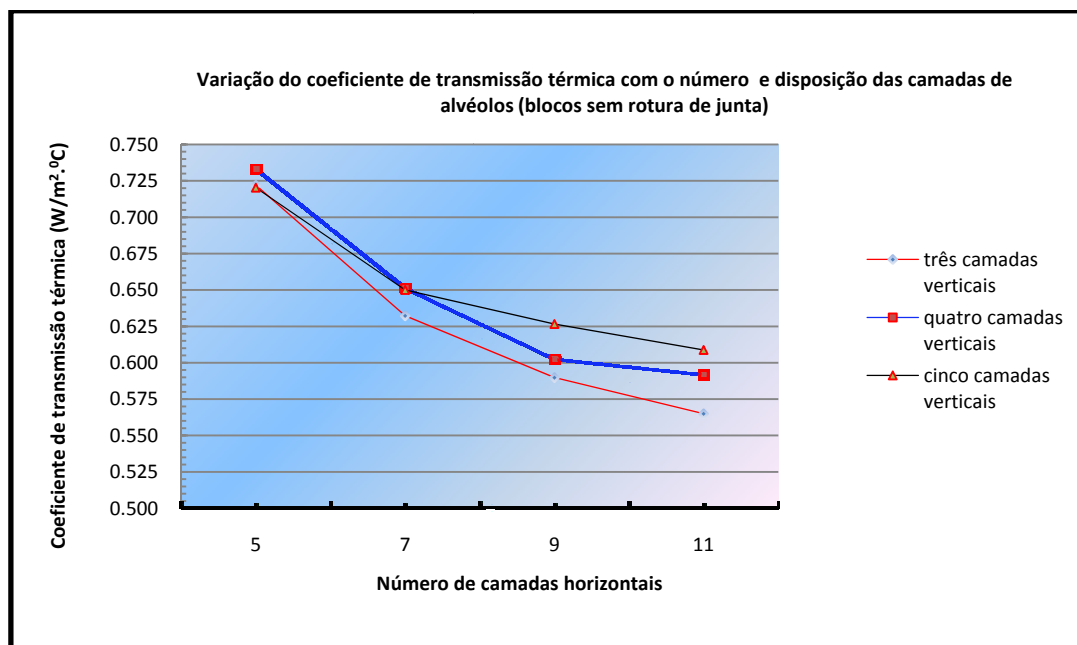


Fig. 8.6 – Variação do coeficiente de transmissão térmica com o número e disposição das camadas de alvéolos (blocos sem rotura de junta)

A variação do coeficiente de transmissão térmica com o número e disposição das camadas de alvéolos assume um comportamento muito próximo do verificado nas soluções anteriores.

Verifica-se uma diminuição do coeficiente de transmissão térmica com o aumento do número de camadas horizontais de alvéolos e aumento com o número de camadas verticais de alvéolos.

A solução que exhibe um melhor coeficiente de transmissão térmica é a solução 4B com 11 camadas horizontais de alvéolos e 3 verticais, apresentando um coeficiente de transmissão térmica de $0,565 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Esta solução é semelhante à 4A, exibindo um

pior comportamento térmico cerca 3,4 %, por outro lado, esta é mais leve cerca de 4,5% sendo assim mais económica.

Quando à solução com o coeficiente de transmissão térmica mais elevado é a 5B, com cinco camadas horizontais de alvéolos e quatro verticais, possuindo um coeficiente de transmissão térmico de $0,733\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$. O comportamento, para o caso das soluções de menor eficiência térmica, é semelhante ao estudo anterior, não havendo uma variação proporcional com o número de camadas horizontais e verticais de alvéolos; a pior solução continua a ser a que possui um maior número de camadas de alvéolos verticais (12B), embora com uma diferença de 0,27% relativamente à solução 1B.

Podemos concluir que para ambas as situações a uma melhor eficiência térmica corresponde um maior número de camadas horizontais de alvéolos e a um número de camadas verticais.

Concluimos também que o uso de rotura de junta e alvéolos descentrados aumenta a eficiência térmica, sendo uma solução mais onerosa dado a maior massa dos blocos.

8.3.4- Blocos com secções transversais complementares

8.3.4.1- Simulação numérica

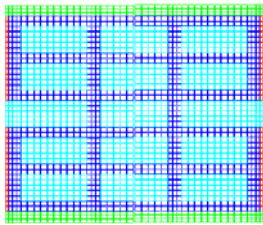
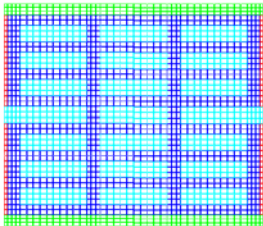
Todas as soluções estudadas até agora possuem coeficientes de transmissão térmica superiores a $0,5\text{W}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2$, valor de referência do *RCCTE* para a zona climática mais desfavorável.

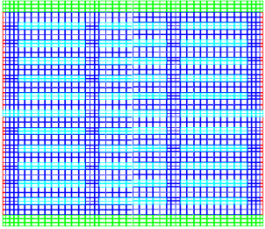
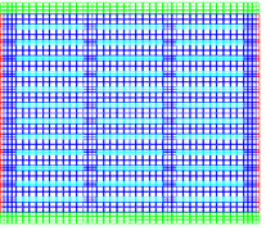
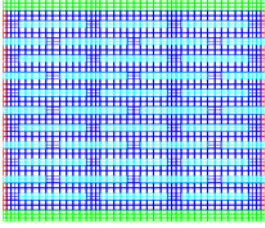
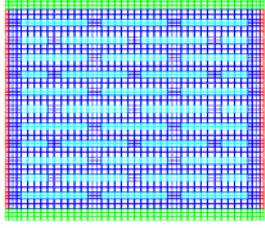
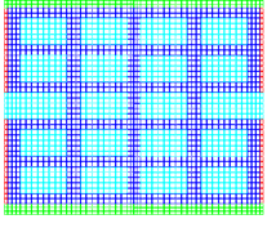
Como o objectivo seria conceber uma solução com um coeficiente de transmissão térmica igual ou inferior ao preconizado no *RCCTE*, iremos estudar um conjunto de soluções alternativas às anteriores.

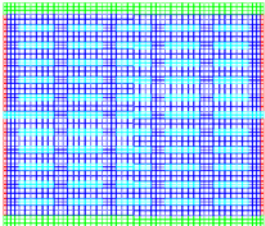
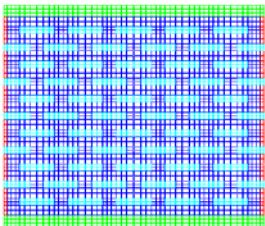
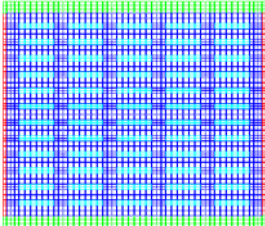
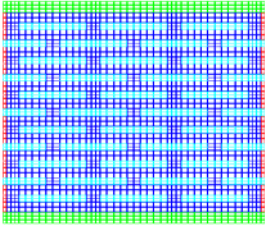
Para a concepção da disposição dos alvéolos partiremos das soluções anteriores e introduziremos pequenas alterações tendo como base os comportamentos verificados, nomeadamente a introdução de múltiplas roturas de junta, a introdução de mais uma camada horizontal de alvéolos, e a colocação de uma camada horizontal central de alvéolos com características diferentes na solução 11C. Também se considera a utilização de outro tipo de reboco interior.

Efectuou-se assim um conjunto de onze simulações conforme apresentado no quadro 8.6.

Quadro 8.6 – Características das soluções alternativas estudadas

Características geométricas (comp. x alt. x esp.)	Peso por unidade (kg)	Percentagem de furação (%)	Coefficiente de transmissão térmica (W/m ² .°C)
 <i>Solução 1C</i>	13,11	57,15%	0,716
 <i>Solução 2C</i>	15,62	48,93%	0,617

 <i>Solução 3C</i>	20,49	33,00%	0,548
 <i>Solução 4C</i>	21,77	28,85%	0,562
 <i>Solução 5C</i>	21,15	30,86%	0,502
 <i>Solução 6C</i>	21,59	29,41%	0,564
 <i>Solução 7C</i>	14,13	53,81%	0,722

 <i>Solução 8C</i>	21,57	29,48%	0,593
 <i>Solução 9C</i>	21,77	28,85%	0,562
 <i>Solução 10C</i>	22,68	25,85%	0,616
 <i>Solução 11C</i>	21,15	30,86%	0,499

8.3.4.2 – Análise de resultados

Como já observado as soluções com melhor comportamento térmico são as que possuem maior número de camadas horizontais de alvéolos e menor número de camadas verticais. Para se conseguir verificar a influência da rotura de junta no comportamento térmico dos blocos realizamos o gráfico representado na figura 8.7.

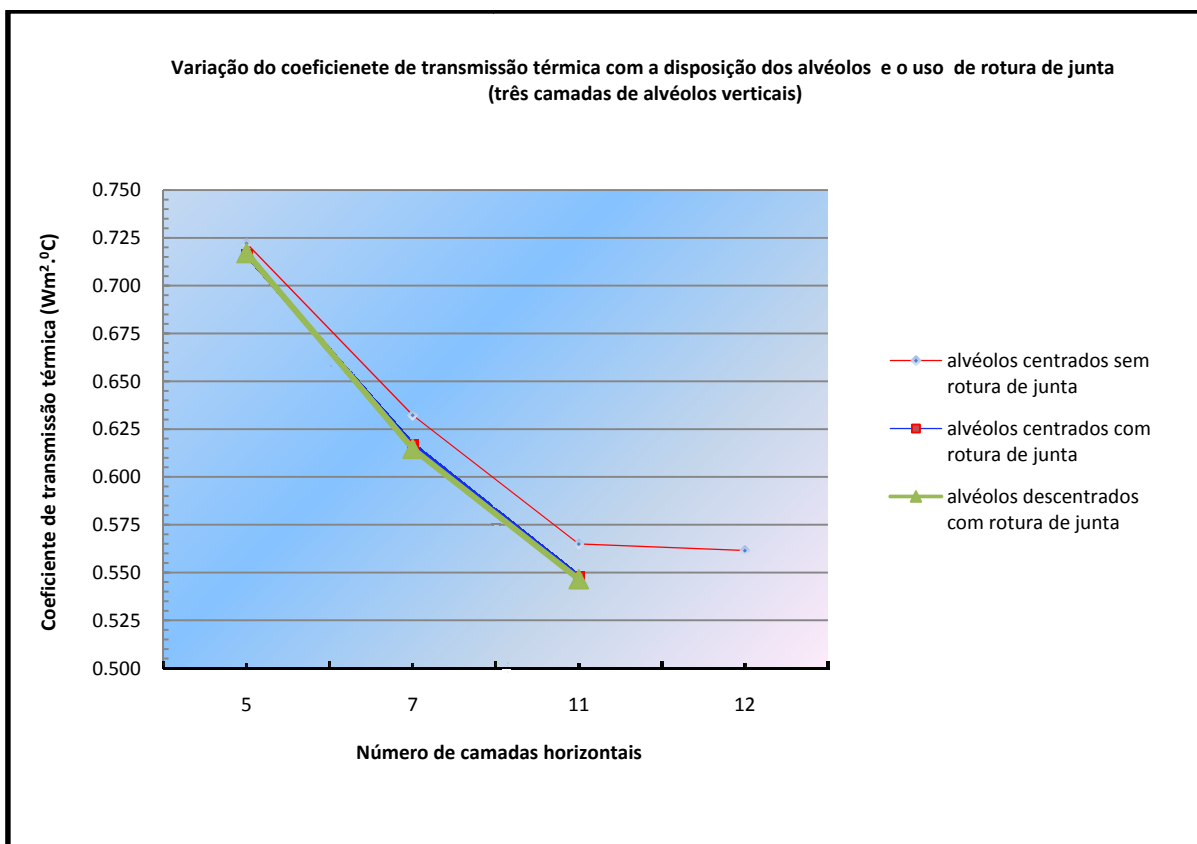


Fig. 8.7 – Variação do coeficiente de transmissão térmica com a disposição dos alvéolos e o uso de rotura de junta (três camadas de alvéolos verticais)

Da análise do gráfico verifica-se um comportamento quase linear do coeficiente de transmissão térmica, observando que as soluções com rotura de junta têm um comportamento térmico superior.

A solução 3C com três camadas verticais e onze horizontais de alvéolos, apresenta coeficiente de transmissão térmica de $0,548 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, menor que a solução semelhante 4B. Em termos percentuais temos uma redução de cerca de 3%, sendo a massa dos blocos praticamente iguais.

No gráfico encontra-se a variação do coeficiente de transmissão térmica dos blocos com o recurso a rotura de junta centrada para o caso de alvéolos centrados e descentrados; as curvas estão praticamente sobrepostas o que reflecte a proximidade

existente no comportamento térmico das soluções. A solução 3C possui um coeficiente de transmissão térmica superior à solução 4A cerca de 0,2%, que pode ser desprezada dado a sua ordem de grandeza.

Em suma pode-se afirmar que a presença de rotura de junta é benéfica para a redução do coeficiente de transmissão térmica, assim como, a colocação dos alvéolos descentrados, embora menos relevante.

Uma outra solução analisada é um bloco com doze camadas horizontais de alvéolos e três verticais, solução 4C, revelando um comportamento térmico superior à solução 4B que apresenta um coeficiente de transmissão térmica cerca de 0,5% inferior. A ordem de grandeza da diferencia é diminuta, deduzindo-se assim que o aumento do número de camadas de alvéolos horizontais para além das onze, sem aumento da espessura do bloco implica uma redução insignificante do coeficiente de transmissão térmica, mas por outro lado acarreta um aumento de 5,8% na massa do bloco.

Até agora analisaram-se diversas soluções com rotura de junta centrada, iremos agora observar o caso de múltiplas roturas de junta conforme preconizado nas soluções 5C e 9C, como apresentado na figura 8.8.

Teremos de realçar o facto de a solução 5C possuir um coeficiente de transmissão térmica de $0,502\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, praticamente igual ao valor de referência máximo do *RCCTE*, sendo a diferencia de 0,4%.

Analisando o comportamento das soluções apresentadas no gráfico, rapidamente concluímos que, a utilização de multiplas roturas de junta melhora a eficácia térmica dos blocos traduzida numa diminuição do coeficiente de transmissão térmica de 8,2%, bem como do peso do bloco em cerca de 1,8%.

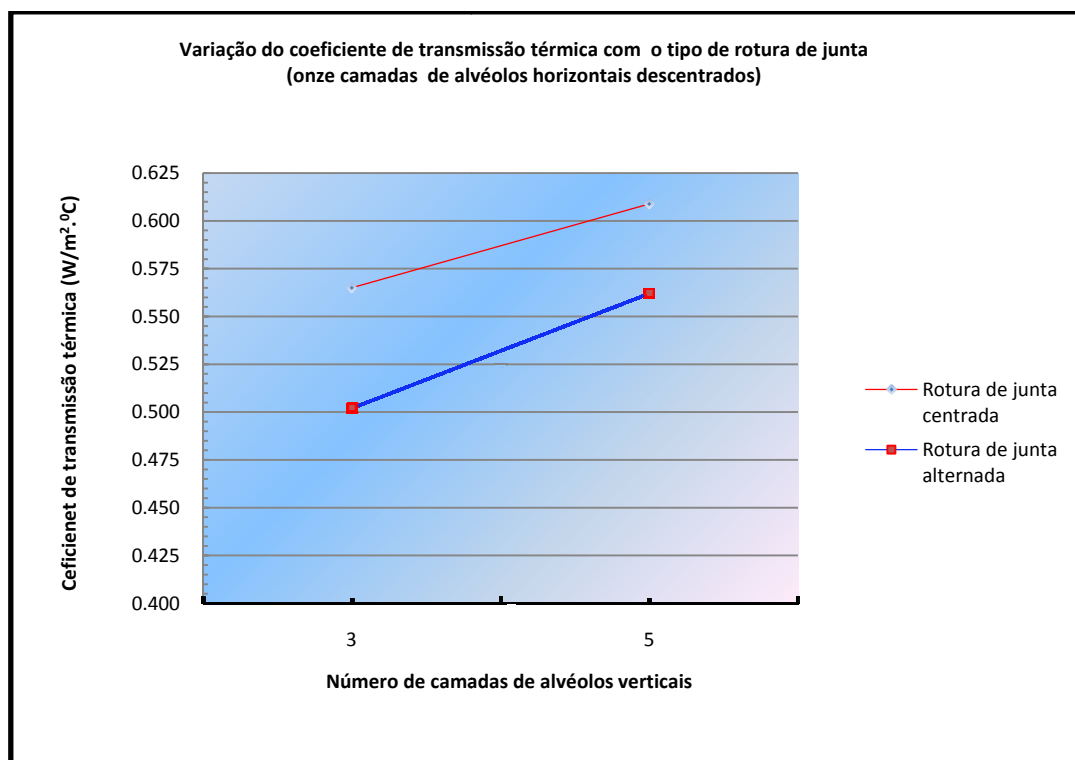


Fig. 8.8 – Variação do coeficiente de transmissão térmica com o tipo de rotura de junta (onze camadas de alvéolos horizontais descentrados)

Outra solução analisada, possui uma camada central horizontal de alvéolos com características diferentes, conforme foi discutido no ponto nº5. Considera-se o revestimento interior dos alvéolos com placas de alumínio, que lhe conferem um menor coeficiente de transmissão térmica devido á elevada reflexão do alumínio, conduzindo assim a uma menor transmissão térmica por radiação. Esta solução apresenta uma geometria semelhante à 4C, possuindo uma maior eficácia térmica que em termos percentuais se traduz numa redução do coeficiente de transmissão térmica de 11,2 %, com um valor inferior ao de referência do *RCCTE*.

Retomando as restantes soluções, observa-se que a solução 5C é que apresenta um melhor comportamento térmico, com um coeficiente de transmissão térmica muito próximo do pretendido. Para melhorar a sua eficiência iremos considerar um reboco interior diferente do considerado até agora; a argamassa bastarda é substituída por estuque projectado, solução comum em edifícios de habitação.

Quadro 8.7 – Características térmicas dos rebocos interiores

Materiais	Condutibilidade térmica (w/m.°C)	Resistência térmica (w/m ² .°C)	Incremento da resistência térmica (w/m ² .°C)
Argamassa bastarda (e=0,02m)	1,15	1,74x10 ⁻²	2,26x10 ⁻²
Estuque projectado (e=0,02m)	0,5	0,04	

Transpondo este aumento da resistência térmica para a solução 5C, obtemos um coeficiente de transmissão térmica de 0,496 w/m².°C, ou seja, inferior ao valor pretendido.

8.4 – Considerações Finais

No estudo desenvolvido neste trabalho procurou-se definir a forma de transmissão de calor nos blocos de alvenaria, de modo poder-se desenvolver uma secção transversal tipo capaz de satisfazer a legislação vigente.

Após análise das várias secções apresentadas neste capítulo, constata-se que se poderá desenvolver elementos de alvenaria de blocos de betão de argila expandida, com um desempenho térmico melhorado capaz de corresponder às exigências actuais das paredes.

O desenvolvimento de betões com baixa condutibilidade térmica e o uso de secções transversais com maior número de camadas horizontais de alvéolos, permitirá o desenvolvimento de soluções de paredes em pano simples com elevado desempenho térmico, tendo-se de se acautelar o desempenho mecânico das paredes, e complementar com elementos que solucionem as eventuais perdas térmicas concentradas nomeadamente a inserção de elementos estruturais.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

- 1 - SOUSA, Hipólito José Campos de - Melhoria do comportamento térmico e mecânico das alvenarias por actuação na geometria dos elementos: aplicação a blocos de betão de argila expandida. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996. Tese de doutoramento.
- 2 - ALVES, S. ; SOUSA, H. - **Paredes exteriores de edifícios em pano simples**. Porto: LIDEL (LIDEL – Edições Técnicas), 2003
- 3 - Instituto de Soldadura e Qualidade. (1996) – **Térmica dos Edifícios**. Lisboa
- 4 - LOURENÇO, Paulo; SOUSA, Hipólito. Editores Literários – SEMINÁRIO SOBRE PAREDES, Porto, 2002- Situação Actual e Novas Tecnologias: Actas. Porto: Fundação Dr. A. Cupertino de Miranda, 2002.
- 5 - FREITAS, Vasco Peixoto; ABRANTES, Vítor. Editores Literários - ENCONTRO NACIONAL SOBRE PATOLOGIAS E REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS, 1, Porto, 2003 – Actas. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- 6 - REBA – **Regulamento de Estruturas de Betão Armado**, Decreto-Lei n.º47 723/67, de 20 de Maio.
- 7 - RCCTE – **Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios**, Decreto-Lei n.º80/2006, de 4 de Abril.

-
- 8 - RCCTE – **Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios**, Decreto-Lei n.º40/90, de 6 de Fevereiro.
 - 9 - CEN – EN771-3. 2003 – **Specification for masonry units – Aggregate Concrete Masonry Units (Dense and Light-Weight Aggregates)**. Brussels, CEN, 2003.
 - 10 - CEN – Eurocódigo 6 – **Projecto de Estruturas de Alvenarias. Parte 1.1-** Regras gerais para edifícios. CEN, ENV 1996.1.1, 1995.
 - 11 - Directiva 2002/91/CE – **Parlamento Europeu e do Conselho - Relativa ao desempenho energético dos edifícios**. Bruxelas, 16 de Dezembro de 2002.
 - 12 - RGEU – **Regulamento Geral Das Edificações Urbanas**, Decreto-Lei n.º38 382/51, de 7 de Agosto.
 - 13 - RSA – **Regulamento de Segurança e Acções Para Estruturas de Edifícios e Pontes**, Decreto-Lei n.º 235/80, de 31 de Maio.
 - 14 - CSTB - DTU n.º20.1 – **Parois et Murs en Maçonnerie de Petits Eléments –** Document Technique Unifié. Règles de calcul et dispositions constructives minimales. Paris, CSTB, 1985.
 - 15 - CEN-Eurocódigo 8 - **Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1 -** General rules, seismic actions and rules for buildings. CEN, ENV 1998.1.1, 2003.
 - 16 - BSI – BS5628: Part 2 – **Use of Masonry. Part 2 – Structural Use of Reinforced and Prestressed Masonry**. London, BSI, 1985.

- 17 - FREITAS, V.; P. PINTO, P. S. – **Permeabilidade ao vapor de materiais de construção - Condensações internas:** Nota de Informação Técnica – NIT ° 002. 2ª Edição. Laboratório de Física das Construções, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1998.
- 18 - PAIVA, J. Vasconcelos – **Compilação de dados climáticos directamente ligados aos problemas da humidade:** Curso de especialização 117 – 69/70, LNEC, 1970.
- 19 - BSI – BS5628: Part 3 – **British Standard Code of Practice for Use of Masonry.** Part 3 – Materials and Components Design and Workmanship. London, BSI, 1985.
- 20 - ASSOCIAÇÃO DE MUNICIPIOS DE ÉVORA – **RUÍDO**, Efeitos nocivos do ruído:http://www.amde.pt/pagegen.asp?SYS_PAGE_ID=452227, AMDE, 23 de Agosto de 2007.
- 21 - RGR - **Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios.** Decreto-Lei nº129/2002, de 11 de Maio.
- 22 - RSCIEH – **Regulamento de Segurança Contra Incêndios em Edifícios de Habitação**, Decreto-Lei n.º64/1990, de 21 de Fevereiro.
- 23 - FREITAS, V. P.; PINTO, M. – **Metodologia para a selecção exigencial de isolamentos térmicos:** Nota de Informação Técnica – NIT ° 001. 2ª Edição. Laboratório de Física das Construções, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1997.

-
- 24 - KREITH, Frank.; BOHN, Mark S. – **Principio de transferência de calor**. Tradução de All Tasks; Revisão técnica Flávio Maron e Maria Teresa Castilho Mansor. São Paulo, Pioneira Thomson Learning, 2003.
- 25 - FILHO, Washington Braga – **Transmissão de Calor**. São Paulo, Thomson Learning, 2004.
- 26 - MIMOSO, J.M. – **TRANSMISSÃO DE CALOR**, Bases Teóricas para Aplicação à Térmica de Edifícios, ITE 14. Lisboa, LNEC, 1987.
- 27 - MELO, A. - Caracterização de Betão Leves Vibrocomprimidos com Agregados Leves de Argila Expandida. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000. Tese de mestrado.
- 28 - NP EN206-1. 2007, Betão – **Especificação, desempenho, produção e conformidade**. Lisboa, IPQ, 2007.
- 29 - RILEM – **Classification fonctionnelle des bétons légers**. Recommandation de la RILEM LC2. RILEM, Octobre 1978.
- 30 - NEVES, S.; COUTINHO, J.; SILVA, B.- ENCONTRO NACIONAL BETÃO ESTRUTURAL, PORTO, 2004- Betão leve estrutural usando agregados de argila expandida. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.
- 31 - PINA DOS SANTOS, C.A.; PAIVA, J.V. – **Coefficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios**, ITE28. Lisboa, LNEC, 1990.

- 32 - ISO – ISO6946. 1996 – **Building components and building elements – thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method**. Genève, ISO, 1996.
- 33 - SOUSA, Luisa; CASTRO, Catarina; ANTÓNIO, Carlos; SOUSA, Hipólito - 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICS AND MATERIALS IN DESIGN , PORTO, 2006 - A 3D study for thermal optimization of masonry units. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
- 34 - CEN – TC 125 - EN1745. 2002 – **Masonry and Masonry products – Methods for Determining Design Thermal Values**. Brussels, CEN, 2002.
- 35 - PINA DOS SANTOS, C.A.; MATIAS, Luís – **Coefficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios - versão actualizada**, ITE50. Lisboa, LNEC, 2006.

ANEXO I

FICHEIROS DE ENTRADA DE DADOS E CRIAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

ANEXO I

FICHEIROS DE ENTRADA DE DADOS E CRIAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

INDICE

I.1- BLOCONOVO.INP

I.2- LEITURAB3.PY

I.3- PARAMETROSB.DAT

I.4- DADOSBETAO.DAT

I.1- BLOCONOVO.INP

```

*HEADING
Thermal analysis
Steady State
Bloco maciço de cimento com reboco e junta (0.25 x0.29)
**
**
*INCLUDE, INPUT=parametrosB.dat
*NODE, NSET=all, INPUT=BLOCOS.INN
*ELEMENT,TYPE=DC2D4
1, 1, 2, 52, 51
152, 152, 153, 203, 202
*ELGEN
1, <iney>, 50, 50
**
*ELGEN,ELSET=reboco
1, <inex>, 1, 1
51, <inex>, 1, 1
101, <inex>,1, 1
<inea>, <inex>, 1, 1
<ineb>, <inex>, 1, 1
<ine>, <inex>, 1, 1
*ELGEN, ELSET=junta
151, <ineya>, 50, 50
*ELGEN, ELSET=bloco
152, <inexa>, 1, 1, <ineya>, 50, 50
**
*ELEMENT, TYPE=DC2D4, ELSET=vazios, INPUT=blocos.iew
*ELEMENT, TYPE=DC2D4, ELSET=roturadejunta, INPUT=roturajunta.iew
*ELEMENT, TYPE=DC2D4, ELSET=juntadese, INPUT=juntades.iew
**
*SOLID SECTION, ELSET=junta, MATERIAL=JUNTAS
*MATERIAL, NAME=juntas
*CONDUCTIVITY
1.15
*SOLID SECTION, ELSET=reboco, MATERIAL=REBOCOS
*MATERIAL, NAME=REBOCOS
*CONDUCTIVITY
1.15
*SOLID SECTION, ELSET=bloco, MATERIAL=CIMENTO
*MATERIAL, NAME=CIMENTO
*CONDUCTIVITY
<BETAO>
*SOLID SECTION, ELSET=vazios, MATERIAL=furos
*MATERIAL, NAME=furos

```

```

*CONDUCTIVITY
<vazio>
*SOLID SECTION, ELSET=roturadejunta, MATERIAL=roturajunta
*MATERIAL, NAME=roturajunta
*CONDUCTIVITY
<vaziorotura>
*SOLID SECTION, ELSET=juntadese, MATERIAL=juntadesencontrada
*MATERIAL, NAME=juntadesencontrada
*CONDUCTIVITY
<vaziodes>
**
**
*ELSET, ELSET=interior, GENERATE
<ine>, <inet>, 1
*ELSET, ELSET=exterior, GENERATE
1, <inex>, 1
**
*SURFACE, NAME=supinterior, TYPE=ELEMENT
interior, S3
*SURFACE, NAME=supexterior, TYPE=ELEMENT
exterior, S1
**
**
*PHYSICAL CONSTANTS, ABSOLUTE ZERO=-273.15
**
*INITIAL CONDITIONS, TYPE=TEMPERATURE
all,20
**
**
**
*STEP, INC=50
*HEAT TRANSFER, STEADY STATE
**
**
*film
interior, F3, 20, 7.62
exterior, F1, 0, 25
**
*NODE FILE
NT
RFLE
**NODE PRINT, NSET=ALL, FREQ=50
**NT11, RFLE
**
**EL PRINT
** TEMP, HFL
** FILM

```

```
**NFLUX
**OUTPUT,FIELD
**ELEMENT OUTPUT
** TEMP
**
**NODE OUTPUT
NT
CFL
RFLE
**
**
**END STEP
```

I.2- LEITURAB3.PY

```
#Leitura do ficheiro de dados dadosv
dadosfile=open('DADOSB2.DAT')
auxfile=open('parametrosB.dat','w')
auxfile.write('*PARAMETER\n')
#i=1
#print int(i)
x=dadosfile.readline()
x=float(x)
auxfile.write('nex= %.3e' % x)
auxfile.write('\n')
x=dadosfile.readline()
x=float(x)
auxfile.write('ney= %.3e' % x)
auxfile.write('\n')
x=dadosfile.readline()
x=float(x)
auxfile.write('BETAO= %.3e' % x)
auxfile.write('\n')
x=dadosfile.readline()
x=float(x)
auxfile.write('vazio= %.3e' % x)
auxfile.write('\n')
x=dadosfile.readline()
x=float(x)
auxfile.write('vaziorotura= %.3e' % x)
auxfile.write('\n')
x=dadosfile.readline()
x=float(x)
auxfile.write('vaziodes= %.3e' % x)
auxfile.write('\n')
#
```

```
auxfile.write('inex=int(nex)\n')
auxfile.write('iney=int(ney)\n')
auxfile.write('ine=int(1+(iney-1)*50)\n')
auxfile.write('inea=int(ine-100)\n')
auxfile.write('ineb=int(ine-50)\n')
auxfile.write('ineya=int(iney-6)\n')
auxfile.write('inexa=int(inex-1)\n')
auxfile.write('inet=int(ine+inex-1)\n')
#
auxfile.close()
dadosfile.close()
```

I.3- PARAMETROSB.DAT

```
*PARAMETER
nex= 2.500e+001
ney= 4.300e+001
BETAO= 3.500e-001
vazio= 1.368e-001
vaziorotura= 1.596e-001
vaziodes= 1.512e-001
inex=int(nex)
iney=int(ney)
ine=int(1+(iney-1)*50)
inea=int(ine-100)
ineb=int(ine-50)
ineya=int(iney-6)
inexa=int(inex-1)
inet=int(ine+inex-1)
```

I.4- DADOSBETAO.DAT

```
4
6
1
2
1.8986300000000E-002
2.1041090000000E-002
1.813698000000E-002
1.877495000000E-002
0.35
```

ANEXO II

FICHEIROS CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DOS ALVÉOLOS (SOLUÇÃO A)

ANEXO II

FICHEIROS CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DOS ALVÉOLOS (SOLUÇÃO A)

INDICE

II.1- Cálculo do coeficiente de transmissão térmica por radiação

II.2- Cálculo do coeficiente de transmissão térmica por convecção

II.3- Cálculo do coeficiente de transmissão térmica equivalente

II.4- Coeficiente de transmissão térmica e características geométricas dos blocos

II.1- Cálculo do coeficiente de transmissão térmica por radiação

D	L	H	T1 (°C)	T2 (°C)	ε	σ	F12	F13	F14	F21	F23	F24	F31	F32	F34	F41	F42	F43	Eb1i	Eb2i	Eb3i	Eb4i	Ji (W/m ²)	Qi (w/m ²)	hr (w/m ² °C)	Rrad (m ² °C/W)
0,048	0,185	0,109	20	0	0,9	5,68E-08	0,651	0,175	0,175	0,651	0,175	0,175	0,394	0,394	0,211	0,394	0,394	0,211	377,20	284,32	328,30	328,30	369,91	65,54	3,28	0,31
0,048	0,185	0,046	20	0	0,9	5,68E-08	0,397	0,301	0,301	0,397	0,301	0,301	0,284	0,284	0,431	0,284	0,284	0,431	377,20	284,32	328,30	328,30	370,81	57,48	2,87	0,35
0,048	0,185	0,069	20	0	0,9	5,68E-08	0,519	0,241	0,241	0,519	0,241	0,241	0,341	0,341	0,317	0,341	0,341	0,317	377,20	284,32	328,30	328,30	370,38	61,38	3,07	0,33
0,029	0,185	0,029	20	0	0,9	5,68E-08	0,414	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,414	377,20	284,32	328,30	328,30	370,75	58,03	2,90	0,34
0,029	0,185	0,049	20	0	0,9	5,68E-08	0,564	0,218	0,218	0,564	0,218	0,218	0,361	0,361	0,279	0,361	0,361	0,279	377,20	284,32	328,30	328,30	370,22	62,82	3,14	0,32
0,029	0,185	0,063	20	0	0,9	5,68E-08	0,635	0,182	0,182	0,635	0,182	0,182	0,388	0,388	0,223	0,388	0,388	0,223	377,20	284,32	328,30	328,30	369,97	65,05	3,25	0,31
0,019	0,185	0,019	20	0	0,9	5,68E-08	0,414	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,414	377,20	284,32	328,30	328,30	370,75	58,03	2,90	0,34
0,019	0,185	0,049	20	0	0,9	5,68E-08	0,685	0,158	0,158	0,685	0,158	0,158	0,406	0,406	0,187	0,406	0,406	0,187	377,20	284,32	328,30	328,30	369,80	66,58	3,33	0,30
0,019	0,185	0,063	20	0	0,9	5,68E-08	0,743	0,128	0,128	0,743	0,128	0,128	0,426	0,426	0,147	0,426	0,426	0,147	377,20	284,32	328,30	328,30	369,60	68,37	3,42	0,29
0,012	0,185	0,012	20	0	0,9	5,68E-08	0,414	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,414	377,20	284,32	328,30	328,30	370,75	58,03	2,90	0,34
0,012	0,185	0,049	20	0	0,9	5,68E-08	0,781	0,110	0,110	0,781	0,110	0,110	0,438	0,438	0,123	0,438	0,438	0,123	377,20	284,32	328,30	328,30	369,47	69,51	3,48	0,29
0,012	0,185	0,063	20	0	0,9	5,68E-08	0,824	0,088	0,088	0,824	0,088	0,088	0,452	0,452	0,096	0,452	0,452	0,096	377,20	284,32	328,30	328,30	369,33	70,82	3,54	0,28
0,048	0,185	0,048	20	0	0,9	5,68E-08	0,414	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,414	377,20	284,32	328,30	328,30	370,75	58,03	2,90	0,34
0,048	0,185	0,032	20	0	0,9	5,68E-08	0,301	0,350	0,350	0,301	0,350	0,350	0,231	0,231	0,538	0,231	0,231	0,538	377,20	284,32	328,30	328,30	371,16	54,29	2,71	0,37
0,048	0,185	0,046	20	0	0,9	5,68E-08	0,399	0,300	0,300	0,399	0,300	0,300	0,285	0,285	0,429	0,285	0,285	0,429	377,20	284,32	328,30	328,30	370,80	57,54	2,88	0,35
0,029	0,185	0,029	20	0	0,9	5,68E-08	0,414	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,414	377,20	284,32	328,30	328,30	370,75	58,03	2,90	0,34
0,029	0,185	0,032	20	0	0,9	5,68E-08	0,439	0,281	0,281	0,439	0,281	0,281	0,305	0,305	0,390	0,305	0,305	0,390	377,20	284,32	328,30	328,30	370,66	58,83	2,94	0,34
0,029	0,185	0,046	20	0	0,9	5,68E-08	0,547	0,226	0,226	0,547	0,226	0,226	0,354	0,354	0,293	0,354	0,354	0,293	377,20	284,32	328,30	328,30	370,27	62,30	3,11	0,32
0,019	0,185	0,019	20	0	0,9	5,68E-08	0,414	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,414	377,20	284,32	328,30	328,30	370,75	58,03	2,90	0,34
0,019	0,185	0,032	20	0	0,9	5,68E-08	0,571	0,215	0,215	0,571	0,215	0,215	0,363	0,363	0,273	0,363	0,363	0,273	377,20	284,32	328,30	328,30	370,19	63,04	3,15	0,32
0,019	0,185	0,046	20	0	0,9	5,68E-08	0,670	0,165	0,165	0,670	0,165	0,165	0,401	0,401	0,197	0,401	0,401	0,197	377,20	284,32	328,30	328,30	369,85	66,14	3,31	0,30
0,012	0,185	0,012	20	0	0,9	5,68E-08	0,414	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,414	377,20	284,32	328,30	328,30	370,75	58,03	2,90	0,34
0,012	0,185	0,032	20	0	0,9	5,68E-08	0,689	0,155	0,155	0,689	0,155	0,155	0,408	0,408	0,184	0,408	0,408	0,184	377,20	284,32	328,30	328,30	369,78	66,73	3,34	0,30
0,012	0,185	0,046	20	0	0,9	5,68E-08	0,770	0,115	0,115	0,770	0,115	0,115	0,435	0,435	0,130	0,435	0,435	0,130	377,20	284,32	328,30	328,30	369,51	69,18	3,46	0,29
0,048	0,185	0,048	20	0	0,9	5,68E-08	0,414	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,414	377,20	284,32	328,30	328,30	370,75	58,03	2,90	0,34
0,048	0,185	0,022	20	0	0,9	5,68E-08	0,217	0,392	0,392	0,217	0,392	0,392	0,178	0,178	0,644	0,178	0,178	0,644	377,20	284,32	328,30	328,30	371,48	51,48	2,57	0,39

0,048	0,185	0,036	20	0	0,9	5,68E-08	0,331	0,334	0,334	0,331	0,334	0,334	0,249	0,249	0,502	0,249	0,249	0,502	377,20	284,32	328,30	328,30	371,05	55,30	2,77	0,36
0,029	0,185	0,029	20	0	0,9	5,68E-08	0,414	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,414	377,20	284,32	328,30	328,30	370,75	58,03	2,90	0,34
0,029	0,185	0,022	20	0	0,9	5,68E-08	0,332	0,334	0,334	0,332	0,334	0,334	0,250	0,250	0,501	0,250	0,250	0,501	377,20	284,32	328,30	328,30	371,05	55,35	2,77	0,36
0,029	0,185	0,036	20	0	0,9	5,68E-08	0,474	0,263	0,263	0,474	0,263	0,263	0,322	0,322	0,357	0,322	0,322	0,357	377,20	284,32	328,30	328,30	370,53	59,96	3,00	0,33
0,019	0,185	0,019	20	0	0,9	5,68E-08	0,414	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,293	0,293	0,414	0,293	0,293	0,414	377,20	284,32	328,30	328,30	370,75	58,03	2,90	0,34
0,019	0,185	0,022	20	0	0,9	5,68E-08	0,459	0,270	0,270	0,459	0,270	0,270	0,315	0,315	0,370	0,315	0,315	0,370	377,20	284,32	328,30	328,30	370,59	59,49	2,97	0,34
0,019	0,185	0,036	20	0	0,9	5,68E-08	0,605	0,198	0,198	0,605	0,198	0,198	0,377	0,377	0,246	0,377	0,377	0,246	377,20	284,32	328,30	328,30	370,07	64,10	3,20	0,31

II.2- Cálculo do coeficiente de transmissão térmica por convecção

Dimensões			Características do ar										Temp. placas em °C						Coef. de troca de calor por convecção	Cond térmica	Resistência
D	L	H	Te-adm.	Te-adm.	β	ρ	μ	κ	Pr	Trans. coord	Trans. coord	T1	T2	Gr.	GrxPr	Regime	Nu	hc (W/m²°C)	λ equi. (W/m°C)	Rconv (m²°C/W)	
0,05	0,19	0,11	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	3,91E+05	2,80E+05	Laminar	4,92	2,539	0,123	0,394	
0,05	0,19	0,05	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	3,91E+05	2,80E+05	Laminar	4,92	2,539	0,123	0,394	
0,05	0,19	0,07	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	3,91E+05	2,80E+05	Laminar	4,92	2,539	0,123	0,394	
0,03	0,19	0,03	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	8,80E+04	6,29E+04	Laminar	2,86	2,427	0,071	0,412	
0,03	0,19	0,05	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	8,80E+04	6,29E+04	Laminar	2,86	2,427	0,071	0,412	
0,03	0,19	0,06	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	8,80E+04	6,29E+04	Laminar	2,86	2,427	0,071	0,412	
0,02	0,19	0,02	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	2,33E+04	1,66E+04	Laminar	1,76	2,332	0,044	0,429	
0,02	0,19	0,05	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	2,33E+04	1,66E+04	Laminar	1,76	2,332	0,044	0,429	
0,02	0,19	0,06	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	2,33E+04	1,66E+04	Laminar	1,76	2,332	0,044	0,429	
0,01	0,19	0,01	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	6,24E+03	4,46E+03	Laminar	1,20	2,467	0,030	0,405	
0,01	0,19	0,05	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	6,24E+03	4,46E+03	Laminar	1,20	2,467	0,030	0,405	
0,01	0,19	0,06	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	6,24E+03	4,46E+03	Laminar	1,20	2,467	0,030	0,405	
0,05	0,19	0,05	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	3,91E+05	2,80E+05	Laminar	4,92	2,539	0,123	0,394	

0,05	0,19	0,03	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	3,91E+05	2,80E+05	Laminar	4,92	2,539	0,123	0,394
0,05	0,19	0,05	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	3,91E+05	2,80E+05	Laminar	4,92	2,539	0,123	0,394
0,03	0,19	0,03	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	8,80E+04	6,29E+04	Laminar	2,86	2,427	0,071	0,412
0,03	0,19	0,03	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	8,80E+04	6,29E+04	Laminar	2,86	2,427	0,071	0,412
0,03	0,19	0,05	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	8,80E+04	6,29E+04	Laminar	2,86	2,427	0,071	0,412
0,02	0,19	0,02	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	2,33E+04	1,66E+04	Laminar	1,76	2,332	0,044	0,429
0,02	0,19	0,03	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	2,33E+04	1,66E+04	Laminar	1,76	2,332	0,044	0,429
0,02	0,19	0,05	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	2,33E+04	1,66E+04	Laminar	1,76	2,332	0,044	0,429
0,01	0,19	0,01	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	6,24E+03	4,46E+03	Laminar	1,20	2,467	0,030	0,405
0,01	0,19	0,03	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	6,24E+03	4,46E+03	Laminar	1,20	2,467	0,030	0,405
0,01	0,19	0,05	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	6,24E+03	4,46E+03	Laminar	1,20	2,467	0,030	0,405
0,05	0,19	0,05	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	3,91E+05	2,80E+05	Laminar	4,92	2,539	0,123	0,394
0,05	0,19	0,02	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	3,91E+05	2,80E+05	Laminar	4,92	2,539	0,123	0,394
0,05	0,19	0,04	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	3,91E+05	2,80E+05	Laminar	4,92	2,539	0,123	0,394
0,03	0,19	0,03	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	8,80E+04	6,29E+04	Laminar	2,86	2,427	0,071	0,412
0,03	0,19	0,02	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	8,80E+04	6,29E+04	Laminar	2,86	2,427	0,071	0,412
0,03	0,19	0,04	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	8,80E+04	6,29E+04	Laminar	2,86	2,427	0,071	0,412
0,02	0,19	0,02	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	2,33E+04	1,66E+04	Laminar	1,76	2,332	0,044	0,429
0,02	0,19	0,02	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	2,33E+04	1,66E+04	Laminar	1,76	2,332	0,044	0,429
0,02	0,19	0,04	283,15	2,663	3,53E-03	1,25	1,77E-05	2,50E-02	7,15E-01	1,5	3,0	20	0	2,33E+04	1,66E+04	Laminar	1,76	2,332	0,044	0,429

II.3- Cálculo do coeficiente de transmissão térmica equivalente

	Alvéolos	Dimensões			T1	T2	ΔT	Características das superfícies		hr (W/m ² °C)	hc (W/m ² °C)	hequi. (W/m ² °C)	Cond. térmica equivalente (W/m°C)	Resistência térmica equivalente (m ² °C/W)
		D	L	H				ϵ	σ					
Solução 1A	Principais	0,05	0,19	0,11	20	0	20	0,9	5,675E-08	3,28	2,54	5,816	0,2815	0,172
	Secundários	0,05	0,19	0,05	20	0	20	0,9	5,675E-08	2,87	2,54	5,412	0,2620	0,185
	Rotura de junta	0,05	0,19	0,07	20	0	20	0,9	5,675E-08	3,07	2,54	5,608	0,2714	0,178
Solução 2A	Principais	0,03	0,19	0,03	20	0	20	0,9	5,675E-08	2,90	2,43	5,329	0,1568	0,188
	Secundários	0,03	0,19	0,05	20	0	20	0,9	5,675E-08	3,14	2,43	5,569	0,1639	0,180
	Rotura de junta	0,03	0,19	0,06	20	0	20	0,9	5,675E-08	3,25	2,43	5,680	0,1672	0,176
Solução 3A	Principais	0,02	0,19	0,02	20	0	20	0,9	5,675E-08	2,90	2,33	5,234	0,0989	0,191
	Secundários	0,02	0,19	0,05	20	0	20	0,9	5,675E-08	3,33	2,33	5,662	0,1069	0,177
	Rotura de junta	0,02	0,19	0,06	20	0	20	0,9	5,675E-08	3,42	2,33	5,751	0,1086	0,174
Solução 4A	Principais	0,01	0,19	0,01	20	0	20	0,9	5,675E-08	2,90	2,47	5,368	0,0654	0,186
	Secundários	0,01	0,19	0,05	20	0	20	0,9	5,675E-08	3,48	2,47	5,942	0,0724	0,168
	Rotura de junta	0,01	0,19	0,06	20	0	20	0,9	5,675E-08	3,54	2,47	6,008	0,0732	0,166
Solução 5A	Principais	0,05	0,19	0,05	20	0	20	0,9	5,675E-08	2,90	2,54	5,440	0,2633	0,184
	Secundários	0,05	0,19	0,03	20	0	20	0,9	5,675E-08	2,71	2,54	5,253	0,2543	0,190
	Rotura de junta	0,05	0,19	0,05	20	0	20	0,9	5,675E-08	2,88	2,54	5,416	0,2621	0,185
Solução 6A	Principais	0,03	0,19	0,03	20	0	20	0,9	5,675E-08	2,90	2,43	5,329	0,1568	0,188
	Secundários	0,03	0,19	0,03	20	0	20	0,9	5,675E-08	2,94	2,43	5,369	0,1580	0,186
	Rotura de junta	0,03	0,19	0,05	20	0	20	0,9	5,675E-08	3,11	2,43	5,542	0,1631	0,180

Solução 7A	Principais	0,02	0,19	0,02	20	0	20	0,9	5,675E-08	2,90	2,33	5,234	0,0989	0,191
	Secundários	0,02	0,19	0,03	20	0	20	0,9	5,675E-08	3,15	2,33	5,485	0,1036	0,182
	Rotura de junta	0,02	0,19	0,05	20	0	20	0,9	5,675E-08	3,31	2,33	5,640	0,1065	0,177
Solução 8A	Principais	0,01	0,19	0,01	20	0	20	0,9	5,675E-08	2,90	2,47	5,368	0,0654	0,186
	Secundários	0,01	0,19	0,03	20	0	20	0,9	5,675E-08	3,34	2,47	5,803	0,0707	0,172
	Rotura de junta	0,01	0,19	0,05	20	0	20	0,9	5,675E-08	3,46	2,47	5,926	0,0722	0,169
Solução 9A	Principais	0,05	0,19	0,05	20	0	20	0,9	5,675E-08	2,90	2,54	5,440	0,2633	0,184
	Secundários	0,05	0,19	0,02	20	0	20	0,9	5,675E-08	2,57	2,54	5,112	0,2474	0,196
	Rotura de junta	0,05	0,19	0,04	20	0	20	0,9	5,675E-08	2,77	2,54	5,304	0,2567	0,189
Solução 10A	Principais	0,03	0,19	0,03	20	0	20	0,9	5,675E-08	2,90	2,43	5,329	0,1568	0,188
	Secundários	0,03	0,19	0,02	20	0	20	0,9	5,675E-08	2,77	2,43	5,195	0,1529	0,192
	Rotura de junta	0,03	0,19	0,04	20	0	20	0,9	5,675E-08	3,00	2,43	5,426	0,1597	0,184
Solução 11A	Principais	0,02	0,1850	0,02	20	0	20	0,9	5,675E-08	2,90	2,33	5,234	0,0989	0,191
	Secundários	0,02	0,19	0,02	20	0	20	0,9	5,675E-08	2,97	2,33	5,307	0,1002	0,188
	Rotura de junta	0,02	0,185000	0,03600	20	0	20	0,9	5,675E-08	3,20	2,33	5,537	0,1046	0,181

II.4- Coeficiente de transmissão térmica e características geométricas dos blocos

Características térmicas do material e alvéolos							Dimensões (mm)			Disposições geométricas (mm)													Características térmicas do elemento		
Desg.	Mat.	λ mat.	C mat.	λ dos alv. Princ.	λ dos alv. Sec.	λ dos alv. de rot. de junta	Larg	Com.	Alt.	nº de camadas de alvéolos verticais	nº de camadas de alvéolos horiz.	Rot. de junta	Largura dos septos verticais centrais (X2)	Largura dos septos verticais extremos (X1)	Largura dos septos horiz. centrais (X4)	Largura dos septos horiz. extremos (X3)	Com. dos alv. Princ.	Comp. dos alv. Sec.	Comp. dos alv. de rotura de junta	Larg. dos alv.	Altura do alvéolo	Disposição dos alvéolos	λ	Peso da uni.	% de furação
Solução 1A	B.leve	0,35	0,9	0,281	0,262	0,271	350	400	190	3	5	Sim	18	18	18	18,00	109,33	45,67	68,67	48,40	185,00	Descentrado	0,717	14,32	53,19
Solução 2A	B.leve	0,35	0,9	0,157	0,164	0,167	350	400	190	3	7	Sim	18	9	18	18,00	115,33	48,67	62,67	29,43	185,00	Descentrado	0,615	16,95	44,59
Solução 3A	B.leve	0,35	0,9	0,099	0,107	0,109	350	400	190	3	9	Sim	18	9	18	18,00	115,33	48,67	62,67	18,89	185,00	Descentrado	0,572	19,3	36,91
Solução 4A	B.leve	0,35	0,9	0,065	0,072	0,073	350	400	190	3	11	Sim	18	9	18	18,00	115,33	48,67	62,67	12,18	185,00	Descentrado	0,547	21,51	29,68
Solução 5A	B.leve	0,35	0,9	0,263	0,254	0,262	350	400	190	4	5	Sim	18	9	18	18,00	82,00	32,00	46,00	48,40	185,00	Descentrado	0,722	15,04	50,83
Solução 6A	B.leve	0,35	0,9	0,157	0,158	0,163	350	400	190	4	7	Sim	18	9	18	18,00	82,00	32,00	46,00	29,43	185,00	Descentrado	0,632	17,45	42,96
Solução 7A	B.leve	0,35	0,9	0,099	0,104	0,107	350	400	190	4	9	Sim	18	9	18	18,00	82,00	32,00	46,00	18,89	185,00	Descentrado	0,585	19,65	35,76
Solução 8A	B.leve	0,35	0,9	0,065	0,071	0,072	350	400	190	4	11	Sim	18	9	18	18,00	82,00	32,00	46,00	12,18	185,00	Descentrado	0,571	21,75	28,90
Solução 9A	B.leve	0,35	0,9	0,263	0,247	0,257	350	400	190	5	5	Sim	18	9	18	18,00	62,00	22,00	36,00	48,40	185,00	Descentrado	0,713	15,88	48,09
Solução 10A	B.leve	0,35	0,9	0,157	0,153	0,160	350	400	190	5	7	Sim	18	9	18	18,00	62,00	22,00	36,00	29,43	185,00	Descentrado	0,631	18,1	40,83
Solução 11A	B.leve	0,35	0,9	0,099	0,100	0,105	350	400	190	5	9	Sim	18	9	18	18,00	62,00	22,00	36,00	18,89	185,00	Descentrado	0,610	20,15	34,13