

INFLUÊNCIA DO CLIMA NAS CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS EXTERIORES EM FACHADAS REVESTIDAS COM ETICS

ANA RAQUEL PINTO COELHO DE TAVEIRA E PINTO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

JUNHO 2011

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2010/2011

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2010/2011 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais e irmão

“O começo é sempre a parte mais importante de qualquer trabalho”

Platão

AGRADECIMENTOS

Ao concluir este trabalho, gostaria de expressar o meu mais sincero e profundo agradecimento às pessoas que tornaram possível a realização do mesmo.

À professora Eva Barreira, minha orientadora, e sem a qual este trabalho jamais seria concluído. Não só pela disponibilidade e acompanhamento prestado ao longo do trabalho mas também pelos conselhos dados durante o decorrer no mesmo.

Aos meus pais e irmão por tua ajuda e paciência que tiveram ao longo da realização deste trabalho.

E a todos os meus amigos, que de uma maneira ou de outra estiveram ao meu lado durante a execução desde trabalho. Obrigado pela paciência.

RESUMO

A ocorrência de condensações superficiais em fachadas revestidas com o sistema ETICS, potencia o desenvolvimento biológico e a degradação do aspecto, o que levanta algumas preocupações na altura de se optar por este tipo de sistema. Apesar deste fenómeno não acarretar problemas a nível do conforto térmico no interior da habitação, a presença de microrganismos na fachada dos edifícios condiciona o seu aspecto.

As condensações superficiais ocorrem sempre que a temperatura superficial é inferior à temperatura do ponto de orvalho. Esta condição verifica-se normalmente durante a noite, em situações de céu limpo, devido às trocas radiativas entre a fachada do edifício e a envolvente.

O objectivo fundamental deste trabalho, consistiu em avaliar a probabilidade de ocorrência de condensações superficiais exteriores em fachadas revestidas com o sistema ETICS em diferentes cidades europeias, tendo em consideração as características climáticas de cada uma delas.

A orientação da fachada é um dos parâmetros que condicionam a ocorrência de condensações, porque influencia a incidência directa de radiação solar não só durante o dia, mas também no período nocturno. No entanto, existem outros factores que influenciam a temperatura superficial durante a noite, entre eles, a radiação emitida pela atmosfera, que varia em função do clima específico de cada local. A temperatura e a humidade relativa do ar exterior também condicionam a ocorrência destas condensações, porque a temperatura do ponto de orvalho é função daqueles dois parâmetros.

Este estudo foi efectuado recorrendo à simulação numérica, utilizando o programa de cálculo automático WUFI Pro 4.2. Este permitiu simular para as quatro cidades europeias, o comportamento de uma fachada face ao fenómeno das condensações. O estudo iniciou-se determinando a orientação mais susceptível a este fenómeno, sendo, em seguida, avaliado em pormenor o comportamento dessa fachada durante um dia em que ocorriam condensações superficiais exteriores em todas as cidades estudadas.

PALAVRAS-CHAVE: Fachadas, ETICS, Trocas radiativas de onda longa, Condensações superficiais exteriores, Simulação numérica

ABSTRACT

The occurrence of surface condensation on facades coated with ETICS system, encourages the development and degradation of the biological aspect, which raises some concerns at the time of choosing for this type of system. Although this phenomenon does not cause problems with the thermal comfort inside the housing, the presence of microorganisms on the facade of buildings affects their appearance.

The surface condensation occurs when the surface temperature is below the dew point temperature. This condition takes place normally at night, in situations of clear sky due to radiative exchanges between the facade of the building and surroundings.

The main objective of this study was to evaluate the probability of occurring surface condensation on exterior facades coated with the ETICS system in different European cities, taking into account the climatic characteristics of each of them.

The orientation of the facade is one of the parameters which determine the occurrence of condensation, because it influences the incidence of direct solar radiation not only during the day but also at night time. However, there are other factors that influence the surface temperature during the night, including the radiation emitted by the atmosphere, which varies depending on the specific climate of each site. The temperature and relative humidity of outside air also affect the occurrence of such condensations, because the dew point temperature depends of those two parameters.

The present study was conducted resorting to numerical simulation, by using the automatic calculation program WUFI Pro 4.2. This allowed simulating to the four European cities, the behavior of a facade due to the condensation phenomenon. The study was initiated by determining the more susceptible orientation to this phenomenon, and then evaluated in detail the behavior of this facade for a particular day where condensation occurs in all cities.

KEYWORDS: Facades, ETICS, Long-wave radiative exchanges, Exterior surface condensation, Numerical simulation

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO	2
1.3. DESCRIÇÃO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2

2.FACTORES QUE INFLUENCIAM AS CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS EXTERIORES	5
2.1. TRANSFERÊNCIA DE CALOR	5
2.1.1. NOTA INTRODUTÓRIA	5
2.1.1. CONDUÇÃO	6
2.1.2. CONVECÇÃO	7
2.1.3. RADIAÇÃO	8
2.1.3.1. Radiação de onda curta	10
2.1.3.2. Radiação de onda longa	11
2.1.3.3. Radiação atmosférica	13
2.1.3.4. Balanço radiativo nos edifícios	15
2.2. TRANSFERÊNCIA DE HUMIDADE	16

3.CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS EXTERIORES EM FACHADAS REVESTIDAS COM ETICS	21
3.1. SISTEMA DE ISOLAMENTO TÉRMICO DE FACHADAS PELO EXTERIOR DO TIPO ETICS	21
3.1.1. NOTA INTRODUTÓRIA	21
3.1.2. VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DOS SISTEMAS DO TIPO ETICS	23
3.1.3. PATOLOGIAS MAIS FREQUENTES NOS SISTEMAS DO TIPO ETICS	24
3.2. OCORRÊNCIA DE CONDENSAÇÕES NOS SISTEMAS DO TIPO ETICS	25
3.2.1. NOTA INTRODUTÓRIA	25
3.2.2. BLAICH	26

3.2.3. FRAUNHOFER – IBP	27
-------------------------------	----

4.O PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO – WUFI PRO

4.2

4.1. DESCRIÇÃO GERAL DE FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA

4.1.1. NOTA INTRODUTÓRIA

4.1.2. EQUAÇÕES DE TRANSFERÊNCIA CONJUNTA DE CALOR E HUMIDADE

4.1.3. EQUAÇÕES DO BALANÇO RADIATIVO EXPLÍCITO NA SUPERFÍCIE EXTERIOR

4.1.4. LIMITAÇÕES DO PROGRAMA.....

4.1.5. DADOS DE ENTRADA E DADOS DE SAÍDA

4.2. DESCRIÇÃO DO CLIMA DAS CIDADES ESTUDADAS

4.2.1. DESCRIÇÃO DAS CIDADES

4.2.2. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS EXTERIORES

4.2.2.1. Temperatura do ar exterior.....

4.2.2.2. Humidade relativa do ar

4.2.2.3. Radiação solar

4.2.2.4. Temperatura do ponto de orvalho

4.2.2.5. Radiação atmosférica.....

5.SIMULAÇÃO NUMÉRICA

5.1. RESULTADOS OBTIDOS DA SIMULAÇÃO

5.1.1. NOTA INTRODUTÓRIA

5.1.2. ORIENTAÇÃO

5.1.3. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA FACHADA NORTE.....

5.2. SÍNTESE CRÍTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO.....

6.CONCLUSÕES

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS DA INVESTIGAÇÃO NESTE DOMÍNIO

BIBLIOGRAFIA

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Mecanismos de transferência de calor em edifícios	5
Fig.2.2 – Fluxo de calor por condução	6
Fig.2.3 – Fluxo de calor por convecção	7
Fig.2.4 – Caracterização da radiação de acordo com o seu comprimento de onda	8
Fig.2.5 – Espectro da radiação electromagnética.....	9
Fig.2.6 – Radiação incidente numa superfície (absorção, reflexão e transmissão)	9
Fig.2.7 – Distribuição da radiação emitida pelo Sol e pela Terra	10
Fig.2.8 – Distribuição espectral da energia irradiada pelos corpos negros para diferentes temperaturas	11
Fig.2.9 – Relação entre a emissividade do corpo negro, cinzento e do corpo real	12
Fig.2.10 – Radiação de onda longa emitida e absorvida pela atmosfera terrestre	13
Fig.2.11 – Espectro de absorção de onda longa que atravessa verticalmente a atmosfera.....	14
Fig.2.12 – Espectro de emissão em condições de céu limpo	14
Fig.2.13 – Balanço radiativo da envolvente de um edifício.....	16
Fig.2.14 – Diagrama psicrométrico (adaptado)	18
 Fig.3.1 – Composição esquemática de um ETICS	22
Fig.3.2 – Redução das perdas de calor devido à continuidade do isolamento térmico.....	23
Fig.3.3 – Comparação entre os gradientes de temperaturas a que estão sujeita três paredes com revestimento de cor clara	24
Fig.3.4 – Distribuição das patologias associadas ao sistema.....	24
Fig.3.5 – Imagem visível, termograma e curva da temperatura superficial de uma fachada revestida com ETICS e com fixação mecânica do sistema.....	26
Fig.3.6 – Influência da camada de isolamento e do reboco exterior na temperatura superficial de uma fachada revestida com ETICS.....	27
Fig.3.7 – Influência da orientação na temperatura superficial de uma fachada revestida com ETICS.....	28
Fig.3.8 – Influência da espessura do isolamento térmico de uma fachada revestida com ETICS.....	28
Fig.3.9 – Influência da cor do reboco exterior de uma fachada revestida com ETICS.....	29
 Fig.4.1 – Balanço radiativo explícito	34
Fig.4.2 – Parcelas do balanço radiativo explícito na superfície exterior de uma parede.....	37
Fig.4.3 – Menu inicial do programa WUFI Pro 4.2	38
Fig.4.4 – Esquema do elemento construtivo simulado	39

Fig.4.5 – Constituição do elemento construtivo, programa WUFI Pro 4.2	40
Fig.4.6 – Orientação, inclinação e altura do elemento construtivo, programa WUFI Pro 4.2	40
Fig.4.7 – Coeficientes de transferência superficiais, programa WUFI Pro 4.2	42
Fig.4.8 – Condições iniciais, programa WUFI Pro 4.2	42
Fig.4.9 – Condições climáticas exteriores e interiores, programa WUFI Pro 4.2.....	43
Fig.4.10 – Saída de resultados, programa WUFI Pro 4.2	43
Fig.4.11 – Mapa com a localização das cidades europeias em estudo.....	44
Fig.4.12 – Médias anuais para a temperatura do ar exterior nos quatro países em estudo.....	45
Fig.4.13 – Médias mensais para a temperatura do ar exterior nos quatro países em estudo.....	46
Fig.4.14 – Médias anuais para a humidade relativa nos quatro países em estudo	47
Fig.4.15 – Médias mensais para a humidade relativa nos quatro países em estudo	48
Fig.4.16 – Influência da radiação global na Europa	48
Fig.4.17 – Acumulados anuais e número de horas da radiação global nos quatro países em estudo	49
Fig.4.18 – Acumulados anuais e número de horas da radiação difusa nos quatro países em estudo	50
Fig.4.19 – Acumulados anuais e número de horas da radiação directa nos quatro países em estudo	50
Fig.4.20 – Relação entre a radiação directa e a radiação difusa para a cidade de Espoo.....	51
Fig.4.21 – Relação entre a radiação directa e a radiação difusa para a cidade de Kassel	51
Fig.4.22 – Relação entre a radiação directa e a radiação difusa para a cidade de Grenoble	52
Fig.4.23 – Relação entre a radiação directa e a radiação difusa para a cidade de Lisboa	52
Fig.4.24 – Acumulados mensais para a radiação global nos quatro países em estudo	53
Fig.4.25 – Médias anuais para a temperatura de ponto de orvalho nos quatro países em estudo	54
Fig.4.26 – Médias mensais para a temperatura do ponto de orvalho nos quatro países em estudo ...	54
Fig.4.27 – Médias anuais para a radiação atmosférica nos quatro países em estudo.....	55
Fig.4.28 – Médias mensais para a radiação atmosférica nos quatro países em estudo	56
 Fig.5.1 – Acumulado anual das condensações para Lisboa nas diferentes orientações da fachada ..	58
Fig.5.2 – Médias da temperatura superficial exterior em Lisboa nas diferentes orientações da fachada	58
Fig.5.3 – Radiação que incide nas fachadas orientadas aos quatro pontos cardeais para a cidade de Lisboa	59
Fig.5.4 – Acumulado anual das condensações para Espoo nas diferentes orientações da fachada...	60
Fig.5.5 – Acumulado anual das condensações para Kassel nas diferentes orientações da fachada ..	60
Fig.5.6 – Acumulado anual das condensações para Grenoble nas diferentes orientações da fachada	60

Fig.5.7 – Acumulado anual das condensações na fachada Norte para as diferentes cidades em estudo.....	61
Fig.5.8 – Média horária das condensações na fachada Norte para as quatro cidades em estudo.....	62
Fig.5.9 – Acumulado mensal das condensações na fachada Norte para as quatro cidades em estudo.....	62
Fig.5.10 – Acumulado do número de horas em que ocorrem condensações para as quatro cidades em estudo.....	63
Fig.5.11 – Ocorrência de condensações no mês de Março para a cidade de Lisboa	64
Fig.5.12 – Ocorrência de condensações no mês de Agosto para a cidade de Espoo	64
Fig.5.13 – Ocorrência de condensações no mês de Agosto para as cidades em estudo	65
Fig.5.14 – Variação da temperatura superficial, da temperatura do ponto de orvalho do ar e das condensações para o dia 24 de Agosto para as quatro cidades em estudo	65
Fig.5.15 – Variação da radiação difusa e a ocorrência de condensações para o dia 24 de Agosto para as quatro cidades em estudo	66
Fig.5.16 – Variação da temperatura superficial, da temperatura do ponto de orvalho do ar e das condensações das 21:00 do dia 23 de Agosto as 09:00 do dia 24 de Agosto para as quatro cidades em estudo.....	67
Fig.5.17 – Variação da radiação atmosférica e a ocorrência de condensações para o dia 24 de Agosto para as quatro cidades em estudo	68
Fig.5.18 – Variação da temperatura e da humidade relativa do ar exterior para o dia 24 de Agosto para as quatro cidades em estudo	69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Coeficiente de absorção solar da superfície exterior	29
Tabela 4.1 – Propriedades do reboco acrílico (exterior)	39
Tabela 4.2 – Propriedades básicas das restantes camadas do elemento construtivo.....	39
Tabela 4.3 – Coeficientes de transferência superficiais	41
Tabela 4.4 – Valores do índice de nebulosidade para os diferentes países em estudo	41

SIMBOLOGIA

c_p	– Calor específico do material [J/kg.K]
C_o	– Velocidade da luz no vácuo [m.s ⁻¹]
D_φ	– Coeficiente de condução líquida [kg/(m.s)]
e	– Espessura do elemento [m]
g_{atm}	– Factor de forma atmosfera/superfície [-]
g_{ter}	– Factor de forma solo/superfície [-]
H	– Entalpia [J/m ³]
HR	– Humidade relativa do ar [%]
h_c	– Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/(m ² .K)]
h_r	– Coeficiente de transferência de calor por radiação [W/(m ² .K)]
h_v	– Calor latente da mudança de fase [J/kg]
I_{ar}	– Radiação de onda longa emitida pelo céu limpo [W/m ²]
I_{atm}	– Radiação emitida pela atmosfera [W/m ²]
$I_{atm,ref}$	– Radiação atmosférica reflectida pelo solo [W/m ²]
I_{cn}	– Radiância total emitida pelo corpo negro [W/m ²]
I_e	– Radiação de onda longa emitida pela superfície [W/m ²]
$I_{e,ln}$	– Radiação de onda longa linear [W/m ²]
I_{nuvens}	– Radiação de onda longa emitida pelo céu encoberto [W/m ²]
I_{ol}	– Componente normal da radiação de onda longa que chega à superfície [W/m ²]
I_s	– Componente da radiação solar normal à superfície [W/m ²]
$I_{s,dif}$	– Radiação solar difusa [W/m ²]
$I_{s,dif}$	– Radiação solar directa perpendicular à superfície [W/m ²]
$I_{s,dif,h}$	– Radiação solar directa numa superfície horizontal [W/m ²]
$I_{s,ref}$	– Radiação solar reflectida pelo solo [W/m ²]
I_{ter}	– Radiação emitida pelo solo [W/m ²]
K	– Condutância térmica do elemento [W/m ² .K]
N	– Índice de nebulosidade [-]
p	– Pressão atmosférica medida pela estação [hPa]
P_{sat}	– Pressão de saturação [Pa]
p_v	– Pressão parcial de vapor de água [Pa]
q	– Densidade de fluxo de calor [W/m ²]

- q_{rad} – Densidade do fluxo de calor por radiação [W/m^2]
- q_{solar} – Densidade do fluxo de calor absorvido pela superfície devido à radiação solar incidente [W/m^2]
- R_t – Constante universal dos gases [$J/Kg.K$]
- t – Tempo [s]
- T_a – Temperatura do ar próximo do solo [K]
- T_{ar} – Temperatura do ar ambiente [$^{\circ}C$]
- T_{atm} – Temperatura efectiva do céu [K]
- T_D – Temperatura de ponto de orvalho medido pela estação [K]
- T_f – Temperatura do fluido [K]
- T_{po} – Temperatura de ponto de orvalho [$^{\circ}C$]
- T_s – Temperatura da superfície [K]
- $T_{s,i}$ – temperatura da superfície exterior antes da iteração (conhecida) [K]
- $T_{s,i+1}$ – temperatura da superfície exterior depois da iteração (a ser resolvida) [K]
- w – Teor de humidade [kg/m^3]
- α – Coeficiente de absorção [-]
- α_{ol} – Coeficiente de onda longa [-]
- α_s – Coeficiente de absorção para radiação solar [-]
- δ_p – Permeabilidade ao vapor do material [$kg/(m.s.Pa)$]
- ε – Porosidade [m^3/m^3]
- ε – Emissividade [-]
- ε_{atm} – Emissividade da atmosfera [-]
- λ – Condutibilidade térmica do material [$W/m.K$]
- λ – Comprimento de onda [μm]
- λ_w – Condutibilidade térmica do material húmido [$W/(m.K)$]
- μ – Factor de resistência à difusão de vapor [-]
- ν – Frequência de onda [Hz]
- θ – Temperatura do ar [$^{\circ}C$]
- ρ – Coeficiente de reflexão [-]
- ρ – Massa volúmica [kg/m^3]
- $\rho_{s,ter}$ – Coeficiente de reflexão de onda curta do solo [-]
- σ – Constante de Stefan-Boltzmann [$W/(m^2.K^4)$]
- τ – Coeficiente de transmissão [-]
- φ – Humidade relativa [-]

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Segundo Luís Viegas Mendonça, *‘A condensação pode ser descrita como a doença moderna dos edifícios’*. Um pouco por toda a Europa, a presença de humidade em fachadas, resultante da ocorrência de condensações superficiais, é uma patologia corrente, fazendo das condensações cada vez mais um problema dos nossos dias [1].

A envolvente exterior de um edifício desempenha um papel fundamental no conforto térmico de uma habitação, uma vez que filtra a passagem de luz, ar, ruído e energia, garantindo condições de conforto e habitabilidade. Para a quantificação da energia necessária para garantir o confronto térmico da habitação é essencial uma contabilização das trocas de calor através da envolvente do edifício [2].

De modo a minimizar as trocas de calor com o exterior é imprescindível dotar a envolvente dos edifícios de isolamento térmico, capaz de responder às exigências de conforto higrotérmico impostas não só pelos utilizadores, mas também associadas ao consumo de energia e protecção ambiental [30].

Os sistemas de isolamento térmico pelo exterior do tipo reboco delgado armado sobre isolante – ETICS, são utilizados um pouco por toda a Europa especialmente desde a década de 70. Este tipo de sistema é bastante utilizado quer em construções novas quer em obras de reabilitação, uma vez que apresenta vantagens no caso de edifícios com isolamento térmico insuficiente, infiltrações ou aspecto degradado.

Estes sistemas apresentam diversas vantagens face a outros sistemas construtivos, quer do ponto de vista energético, quer do ponto de vista construtivo. Em termos energéticos resultam numa melhoria do conforto térmico, uma vez que garantem a continuidade do isolamento. Por outro lado, em termos construtivos permitem uma diminuição da espessura da fachada e uma maior durabilidade desta. A estas vantagens estão associadas outras, fundamentalmente importantes no caso da reabilitação, como baixo custo do sistema e a facilidade de aplicação em obra, que pode ser feita sem perturbar os ocupantes da habitação [30] [8].

Contudo, estes sistemas não apresentam só vantagens. Com a utilização cada vez mais frequente destes sistemas têm sido detectados alguns problemas, nomeadamente a baixa resistência ao impacto e a degradação do aspecto devido ao desenvolvimento biológico. Apesar do crescimento biológico não apresentar qualquer tipo de alteração no desempenho térmico e mecânico do sistema, o impacto visual que confere à fachada causa o desagrado por parte dos utilizadores, condicionando a implantação deste tipo de sistema.

O fenómeno físico que potencia o desenvolvimento biológico na superfície de fachadas revestidas com ETICS, está relacionado com o teor de humidade à superfície, que resulta fundamentalmente da ocorrência de condensações superficiais exteriores. É sobretudo durante a noite e em situações de céu limpo que se registam as maiores diminuições da temperatura da superfície. Assim a humedificação por condensação verifica-se sempre que a temperatura superficial é inferior à temperatura de ponto de orvalho do ar exterior.

As exigências regulamentares referentes à eficiência energética, tornam o estudo do problema das condensações superficiais exteriores e consequentemente a degradação biológica, num assunto de toda a importância e actualidade, uma vez que o uso dos sistemas do tipo ETICS tem sofrido, cada vez mais, um aumento na sua utilização um pouco por toda a Europa [8].

1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO

A ocorrência de condensações superficiais exteriores em fachadas revestidas com ETICS propicia o desenvolvimento biológico. Neste sentido, têm sido desenvolvidos estudos na área do desempenho higrotérmico deste tipo de fachadas.

Assim o objectivo fundamental deste trabalho consistiu na avaliação da ocorrência de condensações superficiais exteriores em fachadas revestidas com sistemas do tipo ETICS, identificando os principais factores de influência, nomeadamente, a,

- Localização ao nível Europeu;
- Orientação da fachada;
- Radiação solar incidente;
- Radiação atmosférica;
- Temperatura superficial;
- Temperatura de ponto de orvalho e, consequentemente, a temperatura e humidade relativa do ar exterior.

Para alcançar este objectivo recorreu-se ao programa de cálculo automático WUFI Pro 4.2, para efectuar as diferentes simulações numéricas, cujos resultados traduzem as diferentes temperaturas superficiais para cada uma das simulações efectuadas. As simulações realizadas neste trabalho consistiram em variar a localização do elemento em estudo, por quatro cidades europeias, e a sua orientação relativamente aos quatro pontos cardeais, determinando qual a orientação mais condicionante para a ocorrência das condensações.

1.3. DESCRIÇÃO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho encontra-se dividido em 6 capítulos,

- O Capítulo 1 apresenta o enquadramento do trabalho, os objectivos propostos e a estruturação do texto.
- O Capítulo 2 apresenta os princípios teóricos fundamentais sobre a transferência de calor e de humidade e o modo como eles influenciam a ocorrência de condensações exteriores em fachadas de edifícios.
- O Capítulo 3 descreve o sistema ETICS e apresenta as principais vantagens e patologias que lhe estão associadas. São, por fim, referidos os estudos realizados no sentido de relacionar a ocorrência de condensações superficiais exteriores com este tipo de sistemas.

- O Capítulo 4 é referente ao programa de cálculo automático WUFI Pro 4.2. Inicia-se com uma descrição do programa, onde são referidos os fundamentos teóricos a ele associados, bem como as suas limitações, os dados de entrada, a introduzir no programa para a realização das simulações, e os de saída, por ele devolvidos. Seguidamente é feita uma descrição das cidades em estudo, no que diz respeito às suas condições climáticas exteriores.
- O Capítulo 5 trata da simulação numérica efectuada com o WUFI Pro 4.2, apresentando os resultados obtidos pela simulação face à orientação e à avaliação do comportamento da fachada Norte, para cada uma das cidades em estudo.
- O Capítulo 6 resume as principais conclusões deste estudo e perspectiva trabalhos de investigação futura neste domínio.

2

FACTORES QUE INFLUENCIAM AS CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS EXTERIORES

2.1. TRANSFERÊNCIA DE CALOR

2.1.1. NOTA INTRODUTÓRIA

Uma das causas que contribui para a falta de conforto nos edifícios é o aparecimento de água líquida na superfície dos elementos construtivos, resultante da ocorrência de condensações. Este fenómeno depende de três factores: a constituição do elemento construtivo, as condições climáticas existentes, quer interiores ou exteriores, e os mecanismos de comportamento do ar húmido [3].

Os mecanismos de transferência de calor e humidade condicionam o desempenho higrométrico dos edifícios. A transferência de calor representa a transmissão de energia de uma região para a outra e ocorre sempre que se estabelece uma diferença de temperatura entre elas, desenvolvendo-se o fluxo de calor na direcção das temperaturas mais baixas.

É por isso essencial ter em consideração os mecanismos físicos que permitem a transferência de calor entre sistemas, para assim ser possível quantificar a quantidade de energia transferida entre eles. Assim a transmissão de calor a partir da envolvente pode ocorrer segundo três mecanismos distintos: condução, convecção e radiação (figura 2.1) [2].

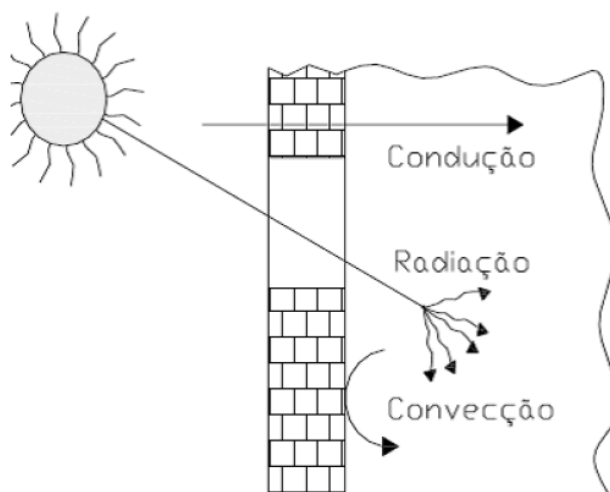


Fig.2.1 – Mecanismos de transferência de calor em edifícios [2]

2.1.1. CONDUÇÃO

Na condução a energia é transmitida por comunicação molecular directa (quer em sólidos, líquidos ou gases), sem consideráveis deslocamentos das moléculas. Assim, nos líquidos e sólidos, uma vez que estes não são condutores, a condução térmica ocorre quando há oscilações longitudinais da estrutura molecular das partículas. Por sua vez nos metais, como são bons condutores, a condução de calor é em tudo idêntica à condução eléctrica, quer isto dizer, verifica-se sempre que há movimento dos electrões livres. Nos gases, a condução de calor dá-se por meio da colisão elástica entre as moléculas.

No caso da envolvente dos edifícios, o parâmetro característico da transmissão de calor por condução é a condutância térmica do elemento, equação (2.1), que depende da espessura do elemento e da condutibilidade térmica [2].

$$K = \frac{\lambda}{e} \quad (2.1)$$

Em que,

K – Condutância térmica do elemento [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

λ – Condutibilidade térmica [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]

e – Espessura do elemento [m]

A transferência de calor por condução é regida pela lei de Fourier, que estabelece que o fluxo de calor trocado por condução numa certa direcção é directamente proporcional à área que ele atravessa e ao gradiente de temperatura na direcção do fluxo de calor (figura 2.2). O coeficiente de proporcionalidade é definido como a condutibilidade térmica do material.

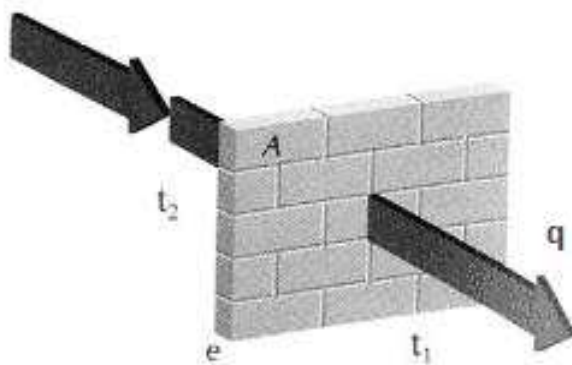


Fig.2.2 – Fluxo de calor por condução [4]

A lei de Fourier vem expressa na equação (2.2), onde o sinal negativo garante que o fluxo de calor é positivo no sinal positivo do eixo dos xx [5].

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.2)$$

Em que,

q – Densidade de fluxo de calor por condução [W/m^2]

λ – Condutibilidade térmica do material [$\text{W}/\text{m.K}$]

T – Temperatura [K]

X – Direcção do fluxo de calor [m]

2.1.1. CONVECÇÃO

Na transferência de calor por convecção, e contrariamente à condução, a propagação do calor ocorre devido ao movimento das moléculas de um fluido, ocorrendo transporte de matéria. A convecção (figura 2.3) pode ser classificada sob duas formas, natural e forçada. A convecção natural acontece quando o movimento do fluido é provocado pelas diferenças de densidades devidas a diferenciais térmicos. A convecção é designada por forçada quando existem forças externas a forçar o movimento do fluido. Nos edifícios correntes, o fluido em causa é normalmente o ar e as forças externas são o vento [5] [6].

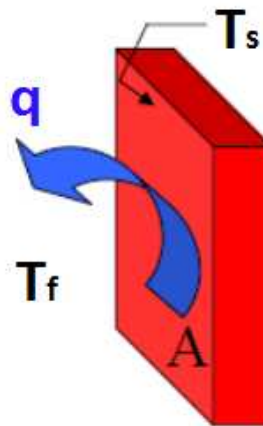


Fig.2.3 – Fluxo de calor por convecção [5]

A lei de Newton exprime que a taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à diferença de temperatura entre a superfície e o fluido [7]. A equação (2.3) expressa a densidade do fluxo de calor por convecção transmitido por unidade de tempo [8].

$$q = h_c(T_s - T_f) \quad (2.3)$$

Em que,

q – Densidade de fluxo de calor por convecção [W/m^2]

h_c – Coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$]

T_s – Temperatura da superfície [K]

T_f – Temperatura do fluido [K]

2.1.3. RADIAÇÃO

O terceiro e último fenómeno da transmissão de calor é a radiação térmica. Este processo distingue-se dos anteriores por não necessitar de nenhum suporte físico para se propagar. Trata-se de um fenómeno electromagnético, de natureza ondulatória, que se verifica sempre que há diferença de temperatura entre duas superfícies [2].

As ondas electromagnéticas não necessitam de um meio de propagação e são definidas em termos de frequência, movendo-se a uma velocidade constante. O comprimento de onda corresponde à distância entre dois picos consecutivos da onda electromagnética e é numericamente igual à divisão da velocidade pela frequência como é apresentado na equação (2.4).

$$\lambda = \frac{c_0}{\nu} \quad (2.4)$$

Em que,

λ – Comprimento de onda [μm]

$c_0 = 3 \times 10^8$ – Velocidade da luz no vácuo [m.s^{-1}]

ν – Frequência de onda [Hz]

Os comprimentos de onda variam consoante o tipo de radiação, como é possível verificar na figura 2.4. Quanto menor for o comprimento de onda maior será a energia transportada.

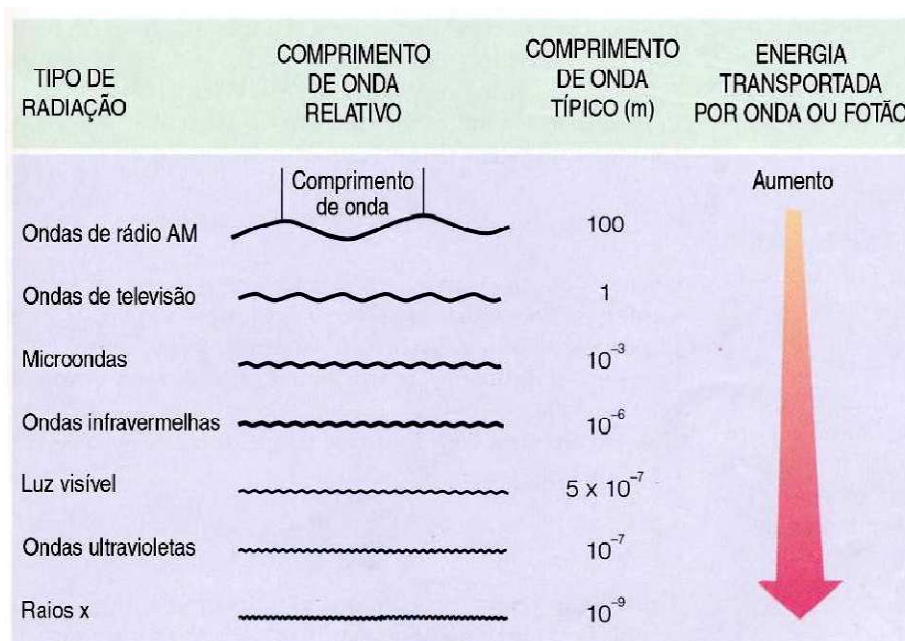


Fig.2.4 – Caracterização da radiação de acordo com o seu comprimento de onda [9]

O espectro electromagnético, no que diz respeito à gama de comprimentos de onda, tem uma amplitude bastante elevada, que vai desde os raios gama, com comprimento de onda curtos, até às ondas de rádio, cujos comprimentos são longos. A zona intermédia do espectro corresponde à radiação térmica que engloba parte da radiação ultravioleta, a radiação visível e parte da radiação

infravermelha. A radiação térmica está compreendida entre os comprimentos de onda que variam 0,1 e 100 μ m e tem a particularidade de aumentar a temperatura dos corpos em que incide. Apenas uma ínfima parte do espectro é perceptível ao olho humano. Esta gama de comprimentos de onda é designada por ‘luz visível’ e corresponde a comprimentos entre 0,35 e 0,75 μ m [9].

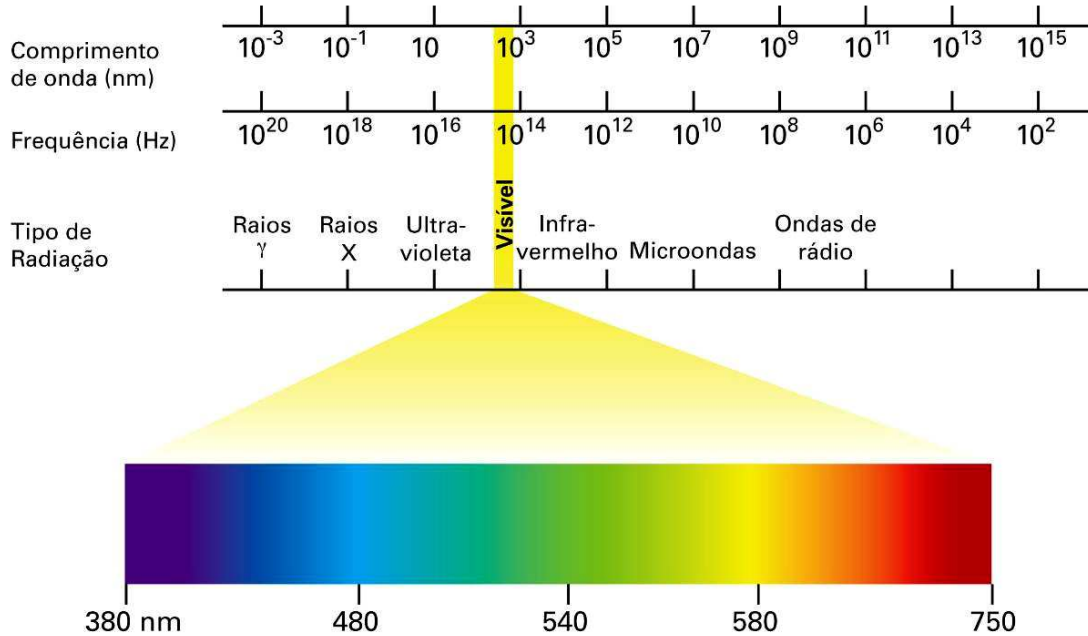


Fig.2.5 – Espectro da radiação electromagnética [9]

Os corpos emitem energia de forma constante, assim como absorvem grandes quantidades de energia que sobre eles incide provenientes do meio que os cerca. No entanto, da radiação que incide sobre a superfície apenas uma parcela é absorvida, sendo a restante reflectida e transmitida (figura 2.6).

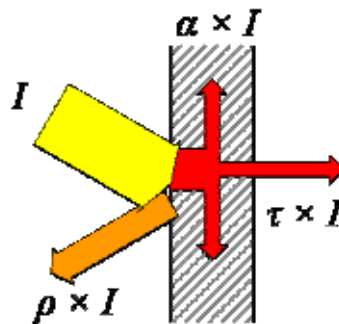


Fig.2.6 – Radiação incidente numa superfície (absorção, reflexão e transmissão) [8]

Pela lei de conservação de energia, para uma dada temperatura da superfície, a soma dos coeficientes de absorção, reflexão e transmissão, tem que ser à unidade (equação (2.5)) [9].

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.5)$$

Em que,

- α – Coeficiente de absorção, que traduz a razão entre a radiação absorvida pelo objecto e a radiação total que sobre ele incide [-]
- ρ – Coeficiente de reflexão, que traduz a razão entre a radiação reflectida pelo objecto e a radiação total que sobre ele incide [-]
- τ – Coeficiente de transmissão, que traduz a razão entre a radiação transmitida pelo objecto e a radiação total que sobre ele incide [-]

2.1.3.1. Radiação de onda curta

A radiação solar, designada de onda curta, corresponde à energia proveniente do sol. Da radiação total que incide sobre uma superfície horizontal, uma parte corresponde à radiação directa, se os raios forem provenientes directamente do sol e outra à radiação difusa, se esta for difundida e reflectida pela atmosfera e pelas nuvens [10].

A figura 2.7 mostra a gama de comprimentos de onda da radiação solar em comparação com os comprimentos de onda da radiação terrestre. Observa-se que quanto maior a intensidade da radiação, menores são os comprimentos de onda a ela associados. Assim, o sol com uma temperatura de 6000K e emite radiação com comprimentos de onda mais baixos, da ordem dos 0,5 μm , estando incluídos na gama da chamada ‘luz visível’. A superfície terrestre, com temperaturas da ordem dos 300K emite radiação com comprimentos de onda mais elevados, na ordem dos 10 μm , já fora da gama do visível [9].

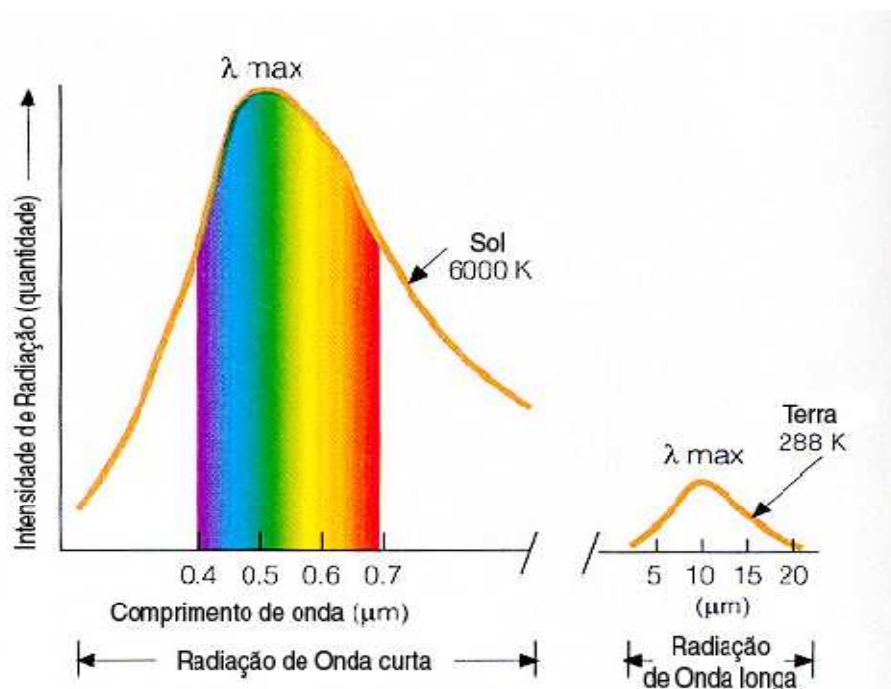


Fig.2.7 – Distribuição da radiação emitida pelo Sol e pela Terra [9]

O fluxo de calor, proveniente da radiação solar, absorvido pela fachada é dado pela equação (2.6).

$$q_{solar} = \alpha_s \times I_s \quad (2.6)$$

Em que,

q_{solar} – Densidade do fluxo de calor absorvido pela superfície devido à radiação solar incidente [W/m^2]

α_s – Coeficiente de absorção para radiação solar [-]

I_s – Componente da radiação solar normal à superfície [W/m^2]

2.1.3.2. Radiação de onda longa

A superfície terrestre emite radiação com comprimento de onda longo que, como foi visto anteriormente, corresponde a comprimentos de onda superiores a $5 \mu m$. A emissão de radiação pela superfície terrestre está relacionada com a noção de corpo negro. O corpo negro pode ser definido como um corpo perfeito, já que tem a capacidade de absorver a totalidade da energia que sobre ele incide e posteriormente emití-la na sua totalidade sobre a forma de calor. Corpo negro é então uma superfície ideal que absorve toda a radiação que sobre ele incide, para qualquer comprimento de onda.

A lei de Planck define a radiação emitida pelo corpo negro e é frequentemente apresentada sob a forma de uma família de curvas, onde através do comprimento de onda e da temperatura absoluta, é possível obter a radiância espectral (figura 2.8). Assim quanto mais alta a temperatura absoluta do corpo mais pequeno é o comprimento de onda para o qual ocorre o valor máximo da radiância espectral [6].

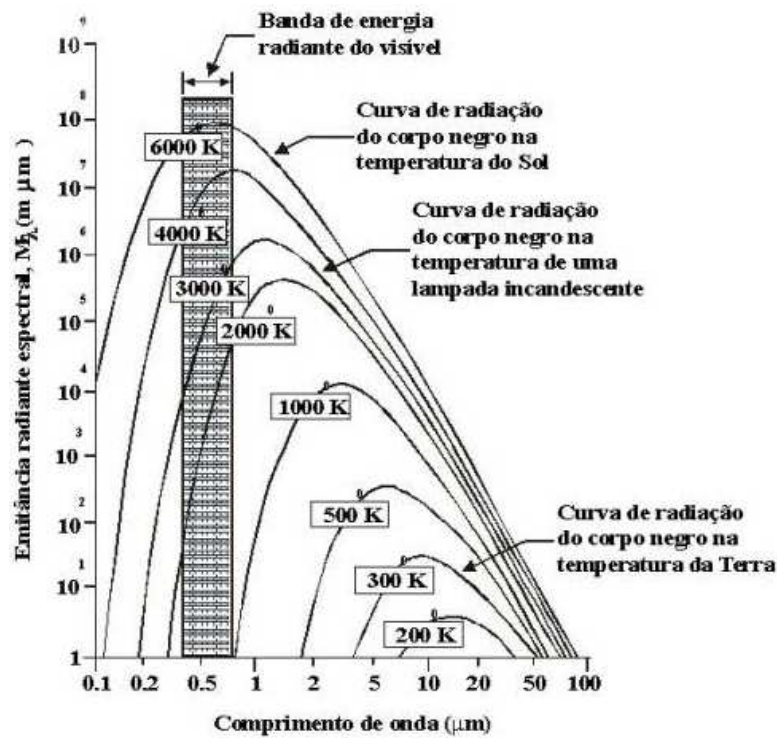


Fig.2.8 – Distribuição espectral da energia irradiada pelos corpos negros para diferentes temperaturas [11]

Através da lei de Planck é possível obter, por integração no domínio $[\lambda=0 ; \lambda=\infty]$, a lei de Stefan-Boltzmann. Esta lei permite obter o valor total da radiância emitida por um corpo negro a uma dada temperatura. A equação (2.7) expressa esta lei [8],

$$I_{cn} = \sigma \times T^4 [W/m^2] \quad (2.7)$$

Em que,

I_{cn} – Radiância total emitida pelo corpo negro [W/m^2]

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ – Constante de Stefan-Boltzmann [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$]

T – Temperatura absoluta do corpo negro [K]

No entanto, o corpo negro é considerado uma idealização física e matemática, pois na realidade as superfícies emitem menos quantidade de radiação que os corpos negros. Contudo, existem outros corpos que apresentam um comportamento bastante semelhante aos corpos negros, estes corpos são designados de corpos não negros ou cinzentos [6].

A Lei de Kirchoff, nas situações mais correntes, admite que a absorção e a emissividade são independentes do comprimento de onda. Assim para uma determinada temperatura, o coeficiente de absorção de onda longa e a emissividade são iguais (equação (2.8)).

$$\alpha_{ol} = \varepsilon \quad (2.8)$$

Em que,

α_{ol} – Coeficiente de onda longa [-]

ε – Emissividade [-]

A figura 2.9 apresenta um gráfico onde é possível visualizar a diferente emissividade espectral de corpos negros, corpos cinzentos e corpos reais, em função do comprimento de onda.

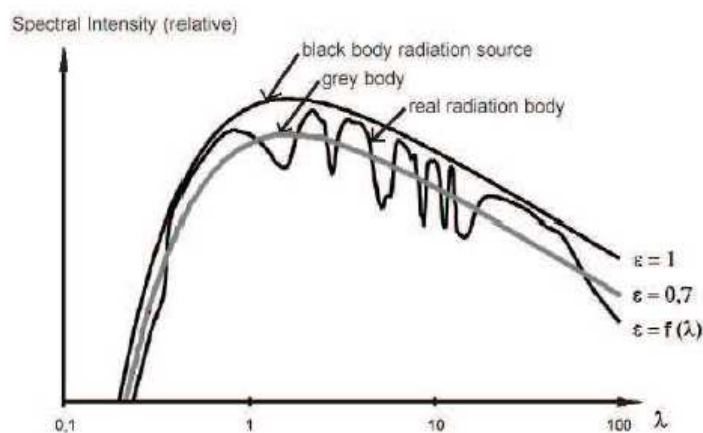


Fig.2.9 – Relação entre a emissividade do corpo negro, cinzento e do corpo real [6]

A energia emitida então pelo corpo real, que emitem menor quantidade de radiação que os corpos negros, é caracterizada pela emissividade, que representa a relação entre a radiação emitida pela superfície real e a radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura. A equação (2.9) representa a energia emitida por uma superfície real [8].

$$I_e = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad (2.9)$$

Em que,

I_e – Energia emitida por uma superfície real [W/m^2]

2.1.3.3. Radiação atmosférica

A atmosfera terrestre absorve radiação de onda curta, emitida directamente pelo sol, e radiação de onda longa, emitida pela superfície terrestre. A radiação terrestre resulta da absorção pelo solo da radiação solar directa e difusa. De modo a ser garantido o equilíbrio térmico, a radiação absorvida pela atmosfera é emitida na direcção da superfície terrestre e do espaço, sob a forma de radiação de onda longa (figura 2.10) [8].

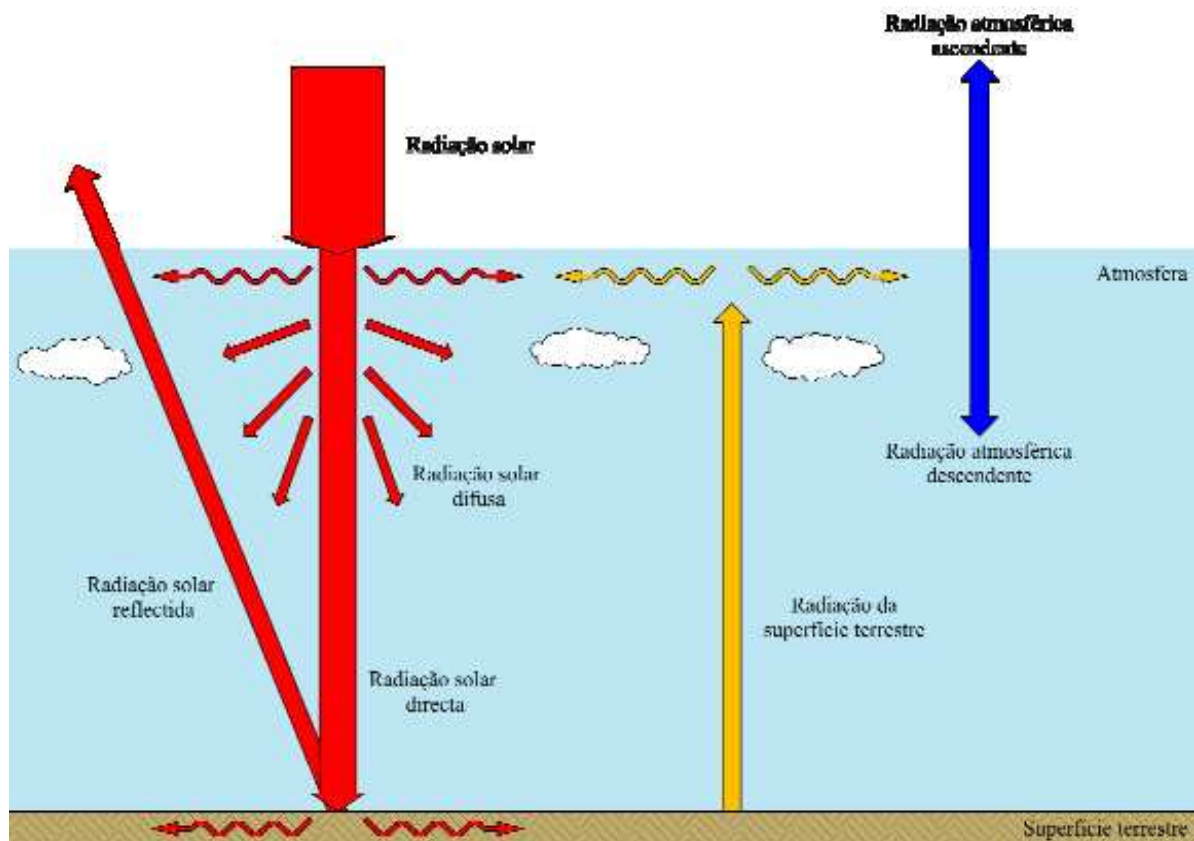


Fig.2.10 – Radiação de onda longa emitida e absorvida pela atmosfera terrestre [8]

A radiação atmosférica é muito influenciada pelas partículas que constituem a atmosfera, fundamentalmente o vapor de água e os gases carbónicos e apresenta dois comportamentos distintos. Se o céu se apresenta encoberto, a atmosfera tem um comportamento semelhante ao corpo cinzento, com uma temperatura igual à do edifício, e por isso, emite radiação com intensidade idêntica à das superfícies terrestres. A capacidade de absorção de cada constituinte da atmosfera é função do comprimento de onda (figura 2.11) [6].

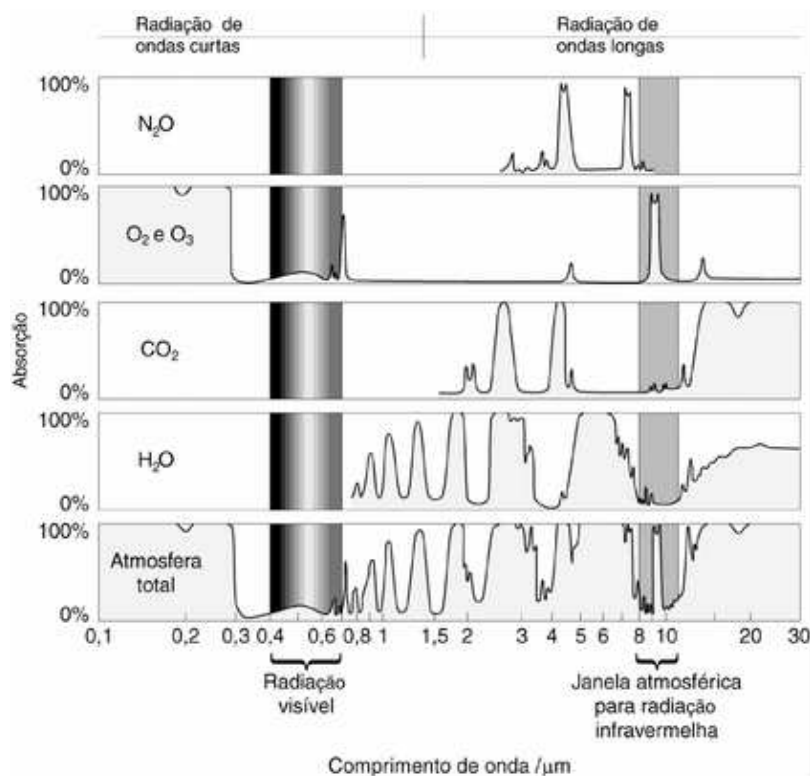


Fig.2.11 – Espectro de absorção de onda longa que atravessa verticalmente a atmosfera [12]

A emissão de radiação pela atmosfera rege-se pela Lei de Plank, com espectro de emissão semelhante ao do corpo negro e com a temperatura na mesma ordem de grandeza que a temperatura do ar. É entre os 8 e os 12 μm que a atmosfera tem menor capacidade de absorver radiação de onda longa. Isto é observado na figura 2.11 sobrepondo o espectro das várias partículas. Este intervalo é considerado ‘transparente’ à radiação de onda longa, uma vez que facilita a emissão de radiação através da atmosfera para o espaço, e designa-se por janela atmosférica (figura 2.12). Este efeito pode ser atenuado no caso do céu enevoado. O céu passa a emitir radiação de forma contínua para todos os comprimentos de onda, anulando o seu poder emissivo na região da janela atmosférica [6][8].

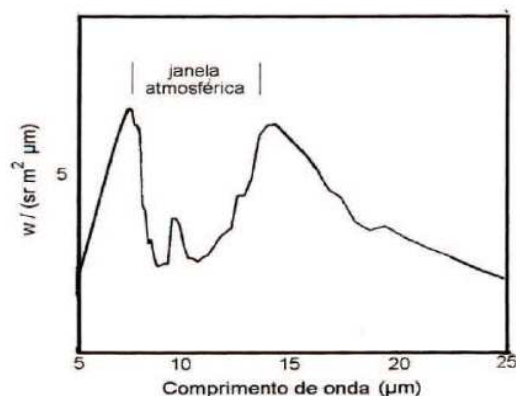


Fig.2.12 – Espectro de emissão em condições de céu limpo [6]

Para a determinação da radiação emitida pela atmosfera, é importante o conceito de temperatura efectiva do céu, que se define como sendo a temperatura de um corpo negro que emite a mesma radiação que a atmosfera (equação 2.10).

$$I_{atm} = \sigma \times T_{atm}^4 \quad (2.10)$$

Em que,

I_{atm} – Radiação emitida pela atmosfera [W/m^2]

T_{atm} – Temperatura efectiva do céu [K]

A atmosfera é constituída por diferentes camadas com propriedades radiativas distintas. A temperatura efectiva do céu depende de um perfil vertical de temperaturas. Como esta informação não é muito corrente, assume-se que o céu se comporta como um corpo cinzento com uma emissividade e temperatura igual à do ar próximo do solo (equação 2.11).

$$I_{atm} = \varepsilon_{atm} \times \sigma \times T_a^4 \quad (2.11)$$

Em que,

ε_{atm} – Emissividade da atmosfera [-]

T_a – Temperatura do ar próximo do solo [K]

Como grande parte da radiação atmosférica incidente na superfície terrestre é emitida pela atmosfera abaixo dos 150m, esta aproximação torna-se aceitável, uma vez que a temperatura nessa região não difere muito da temperatura ao nível do solo.

É ainda de salientar que para a determinação da radiação atmosférica podem ser efectuadas medições directas, através de pirgeómetros, ou efectuados cálculos, através de métodos teóricos detalhados ou por relações empíricas, que calculam o valor da emissividade do céu [8].

2.1.3.4. Balanço radiativo nos edifícios

As fachadas dos edifícios comportam-se como corpos cinzentos, que emitem radiação com uma intensidade que pode ser calculada pela Lei de Stefan-Boltzmann (2.9), considerando a emissividade do reboco exterior. A fachada também absorve parte da radiação de onda longa emitida pelos objectos da envolvente, ou seja, a radiação terrestre, e parte da radiação emitida pelo céu, a radiação atmosférica.

Na figura 2.13 estão apresentados os conceitos de radiação de onda longa aplicados aos edifícios. Os três parâmetros fundamentais que entram na determinação do balanço radiativo de onda longa na fachada de um edifício são a radiação emitida pelo edifício, I_e , a radiação emitida pela atmosfera, I_{atm} , e a radiação emitida pelas superfícies terrestres que se localizam na proximidade do edifício, I_{ter} .

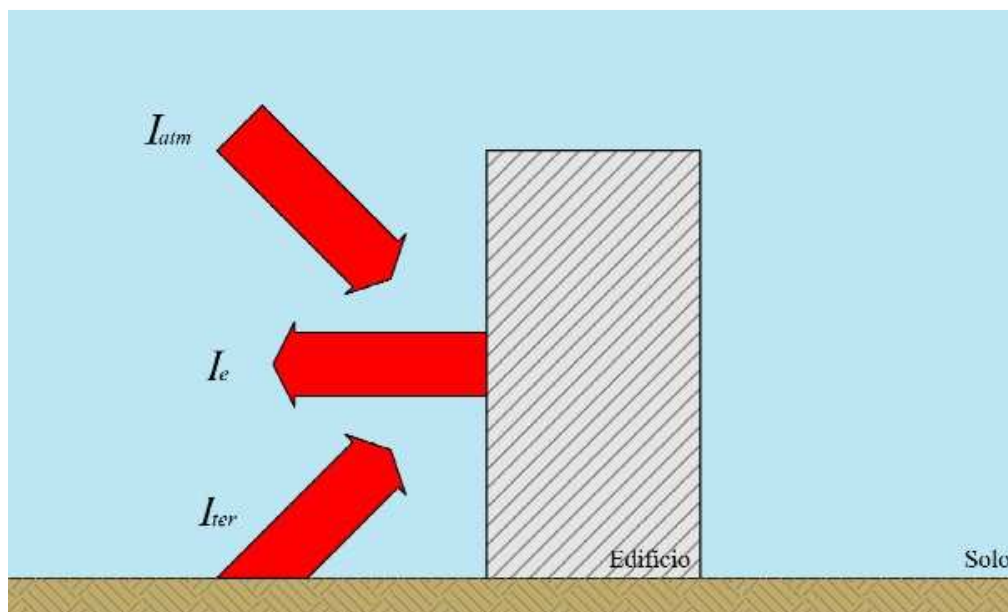


Fig.2.13 – Balanço radiativo da envolvente de um edifício [8]

O principal factor responsável pela descida acentuada na temperatura exterior numa fachada durante a noite é o efeito da atmosfera no balanço radiativo. Assim quando o céu se apresenta encoberto, a atmosfera comporta-se como um corpo cinzento, sendo a sua temperatura idêntica à do edifício e emitindo radiação num espectro contínuo com intensidade próxima da superfície terrestre. Desta forma é praticamente nulo o balanço das trocas de radiação de onda longa que ocorrem entre a fachada do edifício e a atmosfera.

Por outro lado, se o céu se apresenta limpo, a intensidade total emitida reduz-se, uma vez que a emissão de radiação pela atmosfera não é contínua para todos os comprimentos de onda. A radiação emitida pelo edifício é superior àquela que este recebe das superfícies vizinhas e da atmosfera, originando uma perda de calor por radiação.

Durante a noite, como não há radiação solar, o balanço radiativo é negativo, uma vez que não vai poder ser compensado pela acção de sol. Isto origina uma descida na temperatura superficial do edifício, que acontece até que o transporte de calor por condução e convecção compense a perda por radiação. Assim sempre que a temperatura superficial do edifício for inferior à temperatura de ponto de orvalho ocorrem condensações e o teor de humidade à superfície aumenta por acumulação de água condensada. As condensações superficiais exteriores são favoráveis ao aparecimento de microrganismos, o que deteriora gravemente o aspecto exterior da fachada [8].

2.2. TRANSFERÊNCIA DE HUMIDADE

Correntemente na construção, os materiais mais usados apresentam quase sem excepção uma estrutura porosa. O transporte de humidade em materiais com elevada porosidade resulta essencialmente de três mecanismos físicos fundamentais: a adsorção, a condensação e a capilaridade. Estes três fenómenos são responsáveis, na generalidade dos casos, pela variação do teor de humidade dos materiais porosos.

A fixação de humidade por adsorção ocorre em três fases. Na primeira fase ocorre a fixação de uma única camada de moléculas de água no interior dos poros. A esta etapa dá-se o nome de absorção molecular. Em seguida, dá-se a fixação das camadas consecutivas das moléculas de água, designada

por adsorção plurimolecular, e por fim, as diferentes camadas agrupam-se quando a saturação dos poros é atingida, ocorrendo o fenómeno de condensação capilar. O comportamento higroscópico dos materiais é caracterizado pela variação do seu teor de humidade em função da humidade relativa do ambiente em que estão colocados. Na construção civil a generalidade dos materiais utilizados são higroscópicos [13].

A ocorrência de condensações é influenciada por vários factores, nomeadamente, a constituição do material, as condições climáticas do local e o modo de comportamento do ar húmido. As condensações ocorrem sempre que o ar entra em contacto com superfícies mais frias e a humidade absoluta do ar atinge o limite de saturação para a respectiva temperatura [6].

O ar húmido é constituído por uma mistura de vapor de água e ar seco que se comportam de forma ideal. A quantidade de vapor de água presente na atmosfera é muito variável e em determinadas circunstâncias pode dar origem à formação de nuvens, nevoeiro, neblina, precipitação, orvalho, etc. O ar seco é determinado quando o vapor de água e os poluentes são retirados do ar na sua totalidade, tendo uma composição mais ou menos constante. O comportamento do ar húmido influencia fortemente a ocorrência de condensações. A pressão total do ar húmido corresponde ao somatório da pressão parcial de vapor de água e da pressão parcial de ar seco. A Lei geral dos gases (2.12) permite calcular a pressão parcial do vapor de água, onde a concentração de vapor no ar corresponde à relação entre a massa de vapor de água e o volume de ar húmido.

$$p_v = R_t \times T \times v \quad (2.12)$$

Em que,

p_v – Pressão parcial de vapor de água [Pa]

$R_t = 461,52$ – Constante universal dos gases [J/Kg.K]

T – Temperatura absoluta [K]

v – Concentração de vapor no ar [kg/m³]

A pressão parcial do vapor da água corresponde à pressão exercida pelo vapor de água existente no ar. No entanto, o ar apresenta um limite máximo para a absorção de vapor de água. Uma vez ultrapassado o limite suportado pelo ar, o vapor de água vai condensar. Este limite é chamado de limite de saturação e corresponde à pressão de saturação.

$$p_{sat} = 611 \times e^{\left(\frac{22,44 \times \theta}{272,44 + \theta}\right)}, \text{ para } \theta < 0^\circ\text{C} \quad (2.13)$$

$$p_{sat} = 611 \times e^{\left(\frac{17,08 \times \theta}{234,18 + \theta}\right)}, \text{ para } \theta \geq 0^\circ\text{C} \quad (2.14)$$

Em que,

P_{sat} – Pressão de saturação [Pa]

θ – Temperatura do ar [°C]

Há várias formas de exprimir a quantidade de vapor de água na atmosfera, sendo as mais utilizadas a humidade relativa e a temperatura de ponto de orvalho. A humidade relativa do ar mede a quantidade de vapor de água existente na atmosfera em relação ao máximo que esta pode conter a uma dada temperatura. A humidade relativa é expressa pela relação entre a pressão de ar e pressão de saturação [8].

$$HR = \frac{p_v}{p_{sat}} \times 100 \quad (2.15)$$

Em que,

HR – Humidade relativa do ar [%]

p_v – Pressão parcial de vapor de água [Pa]

p_{sat} – Pressão de saturação [Pa]

A temperatura de ponto de orvalho define a temperatura para a qual o vapor de água presente na atmosfera, a uma determinada pressão, passa ao estado líquido na forma de pequenas gotas, ocorrendo a condensação do ar. Quanto mais próxima a temperatura de ponto de orvalho estiver da temperatura do ar, mais o ar está próximo da saturação [14].

A temperatura de ponto de orvalho pode ser determinada através da consulta do diagrama psicrométrico (figura 2.14). O diagrama psicrométrico representa graficamente as propriedades termodinâmicas do ar húmido e as relações existentes entre si. Com este diagrama e conhecendo, por exemplo, a temperatura ambiente e a humidade relativa do ar é possível facilmente obter a temperatura ponto de orvalho ($HR=100\%$) [6].

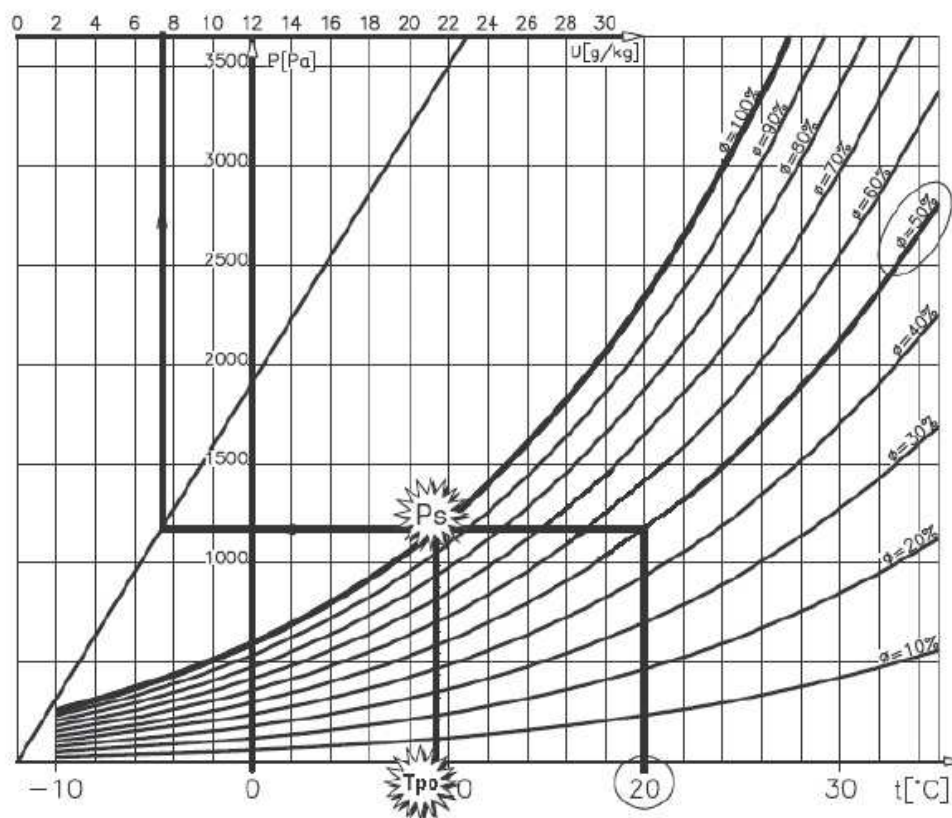


Fig.2.14 – Diagrama psicrométrico (adaptado) [6]

Com a figura 2.14 é possível visualizar o modo de obtenção da temperatura ponto de orvalho recorrendo a um diagrama psicrométrico. Tomando, por exemplo, uma temperatura do ar de 20°C e uma humidade relativa do ar de 50% obtém-se uma temperatura de ponto de orvalho do ar (T_{po}) de 9,5°C [6].

Como foi visto anteriormente, a temperatura de ponto de orvalho pode ser obtida através da consulta do diagrama psicrométrico. Por outro lado, é também possível obter esta temperatura através de uma equação que relaciona a humidade relativa do ar com a temperatura do ar (2.16) [20]. Durante este trabalho, o cálculo da temperatura de ponto de orvalho foi determinada recorrendo à equação (2.16).

$$T_{po} = \frac{237,7 \left[\frac{17,271 \times T_{ar}}{237,7 + T_{ar}} + \ln\left(\frac{HR}{100}\right) \right]}{\left[17,271 - \frac{17,271 \times T_{ar}}{237,7 + T_{ar}} + \ln\left(\frac{HR}{100}\right) \right]} \quad (2.16)$$

Em que,

T_{po} – Temperatura de ponto de orvalho [°C]

T_{ar} – Temperatura do ar ambiente [°C]

HR – Humidade relativa do ar [%]

Geralmente no ar húmido existe menor quantidade de vapor que a correspondente à saturação. No entanto, se o ar estiver saturado a humidade relativa é 100% e a temperatura do ar é igual à temperatura de ponto de orvalho. Por outro lado, considera-se que o ar está seco se o valor da humidade relativa for inferior a 30% e, neste caso, a temperatura do ar é muito superior à temperatura de ponto de orvalho. A condensação do vapor de água ocorre sempre que a pressão instalada for superior à pressão de saturação [14].

Para o caso em estudo são abordadas as condensações superficiais exteriores. Assim a ocorrência de condensações na superfície exterior do elemento construtivo, foi avaliada, como referido anteriormente, comparando a temperatura superficial do elemento com a temperatura de ponto de orvalho do ar exterior. As condensações ocorrem quando a temperatura na superfície do elemento é menor que a temperatura de ponto de orvalho (2.18). O potencial de condensação foi avaliado utilizando o conceito de graus acumulados de condensação. Durante um certo período de tempo, foi calculado o acumulado horário da diferença positiva entre a temperatura de ponto de orvalho do ar e a temperatura da superfície exterior. As temperaturas negativas foram consideradas iguais a zero (2.17). [15].

$$\text{Graus Acumulados de Condensação}_{\text{mensal}} = \Sigma(T_{po(\text{hora})} - T_{sup(\text{hora})} > 0) \quad (2.17)$$

$$T_{sup(\text{hora})} < T_{po(\text{hora})} \quad (2.18)$$

Em que,

T_{po} – temperatura de ponto de orvalho [°C]

T_{sup} – Temperatura da superfície exterior do elemento [°C]

3

CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS EXTERIORES EM FACHADAS REVESTIDAS COM ETICS

3.1. SISTEMA DE ISOLAMENTO TÉRMICO DE FACHADAS PELO EXTERIOR DO TIPO ETICS

3.1.1. NOTA INTRODUTÓRIA

Cada vez mais as preocupações com a energia e a protecção ambiental são uma constante. De modo a superar as crescentes exigências ao nível do conforto higrométrico, é imprescindível dotar a envolvente dos edifícios de um isolamento térmico que possibilite a minimização das trocas de calor com o exterior. Esta minimização possibilita a redução das necessidades de aquecimento/arrefecimento e consequentemente a diminuição do risco de ocorrência de condensações.

Os sistemas de isolamento térmico pelo exterior são cada vez mais utilizados quer na reabilitação de edifícios, que não apresentem índices de isolamento térmico satisfatórios, quer na construção de novos edifícios. Estes sistemas têm sido desenvolvidos e cada vez mais utilizados em diversos países europeus, uma vez que, constituem uma boa solução, não só do ponto de vista energético mas também do ponto de vista construtivo.

Os sistemas de isolamento térmico pelo exterior são constituídos por uma camada de isolamento térmico, fixada ao suporte, e por um paramento exterior para a protecção às solicitações climáticas e mecânicas. Os sistemas de isolamento de fachadas pelo exterior são geralmente divididos em três grandes grupos distintos:

- Revestimentos descontínuos fixados ao suporte através de uma estrutura intermédia – fachadas ventiladas;
- Componentes prefabricados constituídos por um isolamento e um paramento, fixados directamente ao suporte – “vêture”;
- Rebocos armados directamente aplicados sobre o isolamento térmico – ETICS (*External Thermal Insulation Composite Systems with rendering*).

A designação ETICS, segundo a ETAG nº004 (EOTA 2000), define todos os sistemas compostos por um isolamento térmico prefabricado, seja colado e/ou fixo mecanicamente ao suporte, e revestido por um reboco armado constituído por uma ou várias camadas e aplicado directamente sobre o isolamento. A resistência térmica destes sistemas deve garantir pelo menos $1\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C/W}$ [16].

Com o fim da 2ª Guerra Mundial a Europa deparou-se com uma difícil situação económica onde o custo do aquecimento dos edifícios e a escassez de combustível constituíam motivos de grande

inquietação. Tornou-se então necessário reduzir o consumo de energia aplicando um isolamento térmico às fachadas. Surgiu assim na Suécia, durante os anos 40, um sistema de isolamento de fachadas pelo exterior constituído por lã mineral revestida com um reboco de cimento e cal. O químico suíço Edwin Horbach foi, segundo alguns autores, o responsável pelo desenvolvimento dos sistemas de reboco armado delgado sobre poliestireno expandido actualmente conhecidos. Edwin propôs alterações ao nível da composição do reboco, do tipo de reforço e do isolamento térmico. O seu novo sistema era composto por placas de poliestireno expandido (EPS) sobre as quais se aplicava um reboco flexível reforçado.

O sistema ETICS começou a ser comercializado na década de 60, na Alemanha, contudo a sua expansão pela Europa só se acentuou uma década depois, com o agravamento da crise energética, que obrigou à redução dos consumos energéticos, e previsivelmente, levou a um cuidado acrescido com o isolamento térmico da envolvente dos edifícios. Só na década de 90 se verificou a introdução dos sistemas de reboco delgado armado sobre poliestireno expandido em Portugal [16] [17].

Actualmente a utilização dos sistemas ETICS é uma prática corrente quer na construção de novos edifícios quer na reabilitação de edifícios existentes. Isto deve-se à crescente necessidade da melhoria do conforto térmico no interior das habitações, imposta não só pela regulamentação mas principalmente pelos seus utilizadores.

Os sistemas ETICS mais usados em Portugal são constituídos por placas de poliestireno expandido (EPS) coladas ao suporte e revestidas por um reboco delgado, aplicado em várias camadas e armado com uma ou mais redes de fibra. O acabamento final do sistema é normalmente garantido pelo recobrimento com um revestimento plástico espesso – RPE (figura 3.1) [16].

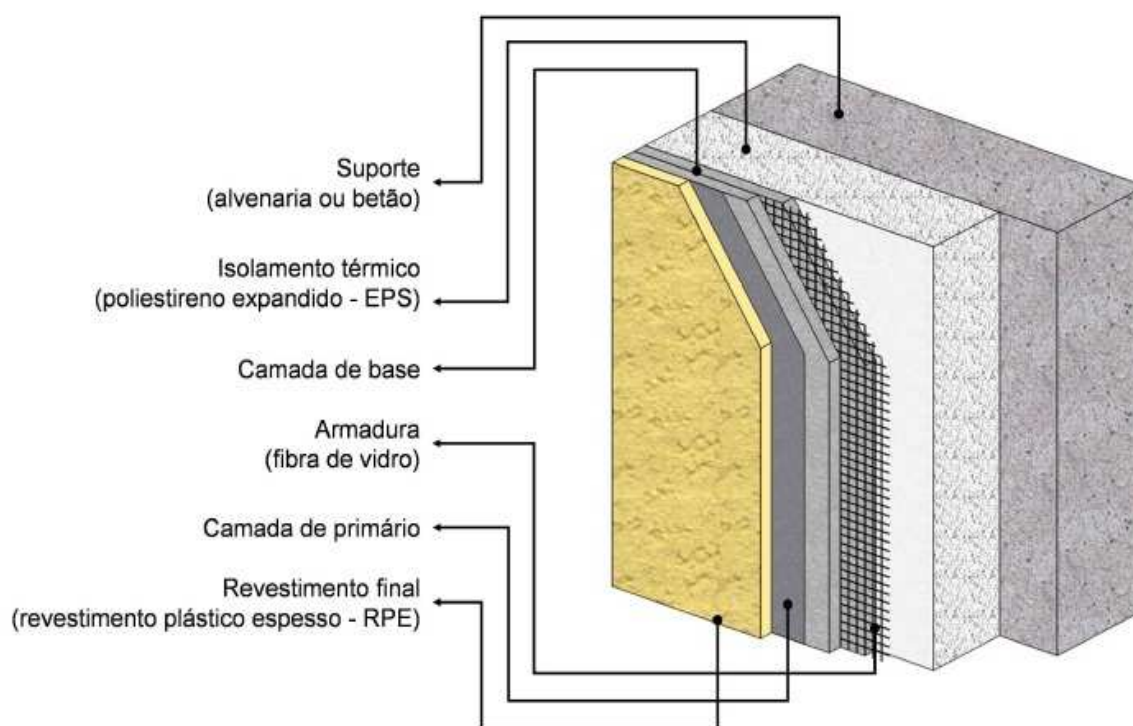


Fig.3.1 – Composição esquemática de um ETICS [16]

3.1.2. VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DOS SISTEMAS DO TIPO ETICS

O isolamento térmico pelo exterior tem tido um verdadeiro impulso na sua utilização. As principais vantagens que contribuem para uma cada vez maior utilização deste sistema são [8] [16]:

- Redução das pontes térmicas e das perdas globais de calor, dado que o isolamento é aplicado uniformemente em toda a face exterior do suporte rígido, o que permite a obtenção do mesmo coeficiente de transmissão térmica global da envolvente, para uma menor espessura do isolamento térmico aplicado (figura 3.2). Com esta redução é possível uma diminuição nos consumos energéticos e uma melhoria das condições de salubridade no interior do edifício assegurando uma redução das condensações nos pontos singulares.

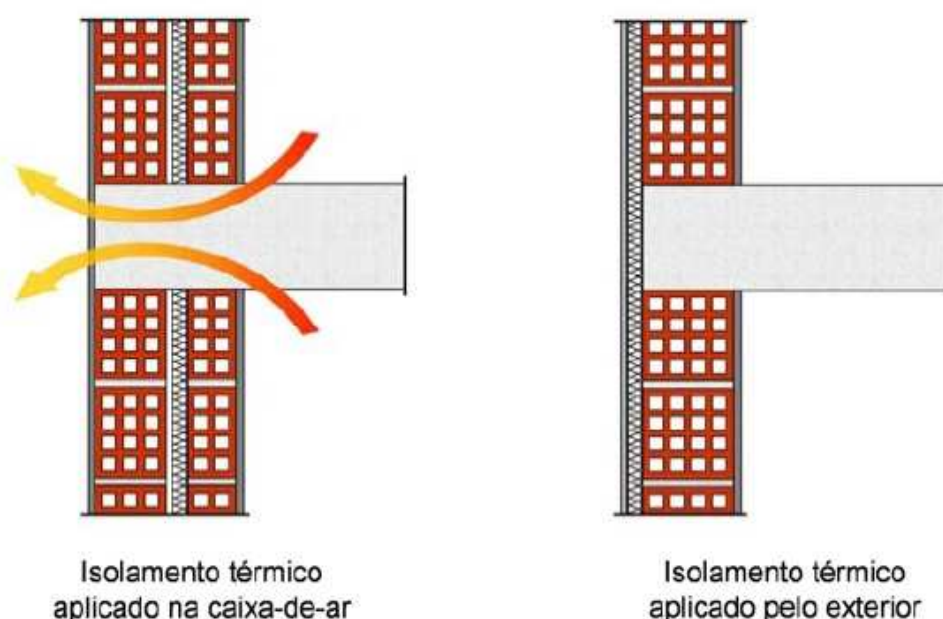


Fig.3.2 – Redução das perdas de calor devido à continuidade do isolamento térmico [16]

- Aumento da área útil dos compartimentos e diminuição da espessura das paredes exteriores, permitindo a substituição das paredes duplas com isolamento na caixa-de-ar por paredes simples com isolamento pelo exterior, que também se traduz numa redução do peso das paredes e das cargas permanentes sobre a estrutura.
- Aumento da inércia térmica no interior dos edifícios, devido à posição do isolamento, uma vez que a maior parte da massa das paredes se encontra pelo interior da camada de isolamento térmico, armazenando calor. Isto resulta na melhoria do conforto térmico de Inverno, com o aumento dos ganhos solares úteis, e de Verão, devido à capacidade de regulação da temperatura interior, absorvendo calor nas horas mais quentes do dia para o restituir durante a noite.
- Aumento da durabilidade das fachadas, uma vez que estas se encontram mais protegidas das acções dos agentes atmosféricos, resistindo de forma mais eficaz ao choque térmico, água líquida, radiação solar, etc. (figura 3.3).

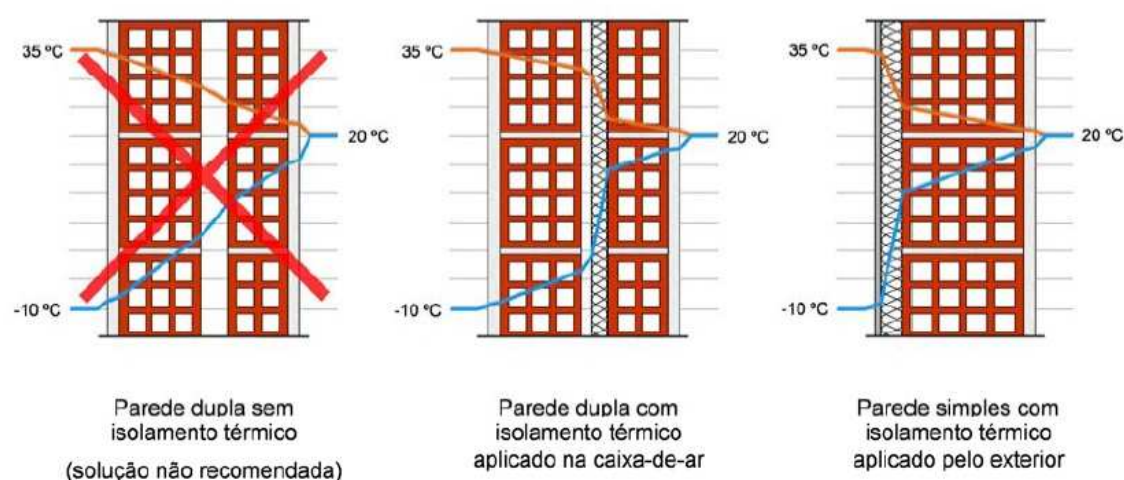


Fig.3.3 – Comparação entre os gradientes de temperaturas a que estão sujeita três paredes com revestimento de cor clara [16]

- Melhoria da impermeabilidade das paredes.
- Facilidade de alteração do aspecto das fachadas e simplicidade de colocação em obra sem perturbar os ocupantes, técnica bastante interessante e adequada na reabilitação de fachadas degradadas. Apresenta também grande variedade de cores e texturas de acabamento.

3.1.3. PATOLOGIAS MAIS FREQUENTES NOS SISTEMAS DO TIPO ETICS

Com a utilização mais frequente dos sistemas do tipo ETICS, começaram a ser detectadas patologias inerentes a estes sistemas, que é importante conhecer. Em França foi realizado um estudo que permitiu verificar quais as principais patologias associadas aos ETICS. Os dados da figura 3.4, são relativos às anomalias declaradas às companhias de seguros entre 1979 e 1985 [16].

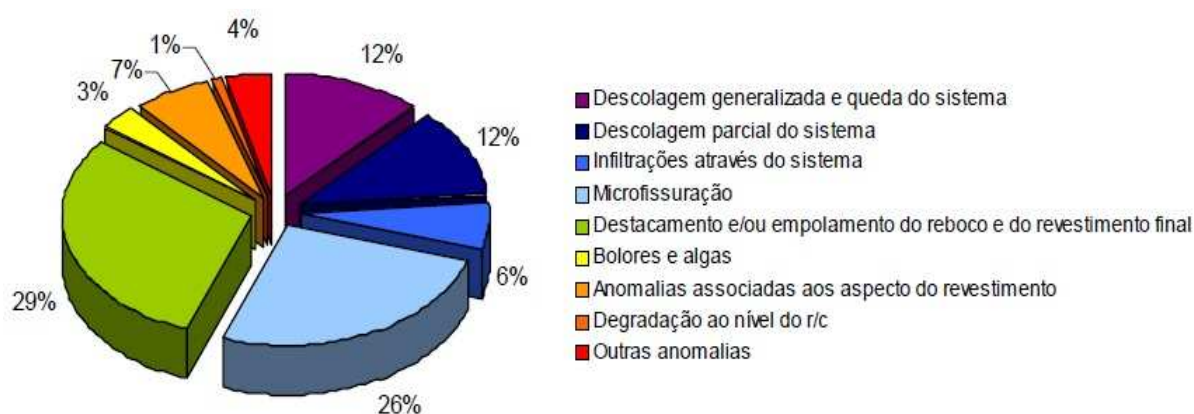


Fig.3.4 – Distribuição das patologias associadas ao sistema [16]

Assim apesar das anteriormente referidas vantagens, os sistemas ECTIS, evidenciam alguns problemas, que causam a desconfiança dos utilizadores, nomeadamente [16] [17]:

- Descolagem generalizada e queda do sistema, consequência da incorrecta preparação do suporte. Assim o sistema não deve ser aplicado sobre suportes que apresentem sujidade, poeiras ou se apresentem molhados.
- Descolagem parcial do sistema, resultante das más condições atmosféricas durante a aplicação, nomeadamente, períodos muito húmidos ou temperaturas muito baixas, da má repartição do produto de colagem ou de infiltrações de água entre o isolamento e o suporte.
- Fissuração devida, por exemplo, à instabilidade do sistema por má fixação do isolamento térmico ao suporte ou à aplicação de reboco entre as placas de isolamento térmico.
- Destacamento e/ou empolamento do reboco, devido às más condições de aplicação do reboco ou do revestimento final. Podem também surgir após o aparecimento de fissuras, associadas ou não a infiltrações de água através do sistema.

Todas estas anomalias resultam de uma má concepção ou aplicação do sistema. Contudo existem outras patologias inerentes aos sistemas que não resultam da má concepção do sistema, nomeadamente [16] [17]:

- A baixa resistência ao impacto, bastante problemático em zonas de fácil acesso, uma vez que pode trazer consequências gravosas para a envolvente, nomeadamente, a degradação do aspecto exterior mas principalmente porque correspondem a pontos privilegiados de entrada de água para o interior do edifício.
- Degradação do aspecto exterior da envolvente devido ao desenvolvimento de microrganismos. Esta patologia confere à fachada um aspecto de acentuada degradação, apesar de não provocar nenhuma alteração térmica ou mecânica no sistema.

3.2. OCORRÊNCIA DE CONDENSAÇÕES NOS SISTEMAS DO TIPO ETICS

3.2.1. NOTA INTRODUTÓRIA

Como já foi mencionado anteriormente, os sistemas ETICS, apesar de bastante recentes encontram-se bem caracterizados do ponto de vista tecnológico. No início da década de 80, os trabalhos realizados pelo CSTB, permitiram avaliar as principais vantagens e inconvenientes deste tipo de sistema, definir as exigências funcionais que deveriam ser garantidas, definir as condições de aplicação e limites à sua utilização e estabelecer regras para o tratamento de pontos singulares, tendo para isso disponibilizado uma série de pormenores construtivos detalhados. Na década seguinte, toda esta informação foi complicada, de modo a garantir o fácil e rápido acesso a toda a informação referente a este tipo de sistemas.

Em Portugal, o responsável por este tipo de compilação foi o LNEC, efectuando algo semelhante que incluía a descrição e classificação dos revestimentos de parede, assim como a definição das exigências funcionais e de regras de qualidade para esses revestimentos.

Uma vez que os sistemas do tipo ETICS, como mencionado anteriormente, são utilizados um pouco por toda a Europa, foi publicado pela EOTA (European Organization for Technical Approval), no ano de 2000, o Guia de Aprovação Técnica Europeia, ETAG 004. Este documento, visa, através da definição das exigências funcionais de desempenho dos materiais e do seu conjunto, determinar ensaios e critérios de forma a ser possível a correcta avaliação do comportamento do sistema. É elaborada uma ETA (Aprovação Técnica Europeia) para cada sistema, de acordo com as

recomendações do ETAG 004. A marcação CE é atribuída por cada ETA e funciona como garantia ao correcto funcionamento do sistema.

Estudos efectuados por alguns autores, no âmbito do comportamento higrométrico como causa da degradação do aspecto de fachadas revestidas com sistemas do tipo ETICS, permitiram a compreensão deste fenómeno físico. Assim recorrendo ensaios e a modelos de simulação, foi relacionado o comportamento higrométrico das fachadas revestidas com este tipo de sistemas com a possível ocorrência de condensações e consequentemente com o desenvolvimento de microrganismos [8].

3.2.2. BLAICH

Um dos primeiros autores a publicar um artigo sobre o comportamento higrométrico dos sistemas ETICS foi, em 1999, Jürgen Blaich do instituto EMPA. Blaich concluiu, com base em estudos por ele efectuados, que o principal factor para o desenvolvimento de microrganismos em fachadas era a humidificação da superfície da mesma. Esta humidificação, deve-se não só à chuva incidente mas principalmente às condensações superficiais, que ocorrem devido à acentuada descida da temperatura da superfície que ocorre nos períodos nocturnos. Com base em termogramas, Blaich demonstrou que o aumento da espessura do isolamento contribui para a ocorrência de condensações e, consequentemente, para o desenvolvimento de microrganismos.

A figura 3.5 mostra uma fachada com 10cm de isolamento térmico onde é visível um desenvolvimento biológico em toda a superfície exterior com excepção de pequenos pontos com cerca de 5cm de diâmetro. No termograma da mesma figura são apresentados os pontos onde não é visível a presença de microrganismos. Estes pontos correspondem às fixações mecânicas do sistema, que permitem um maior fluxo de calor proveniente do interior da fachada do que a restante área pertencente à zona corrente do isolamento térmico. O aumento do fluxo de calor corresponde a um aumento da temperatura superficial de menos de 1°C. Comparando o termograma com a fachada é evidente que um aumento de 1°C na superfície é suficiente para restringir o desenvolvimento biológico.

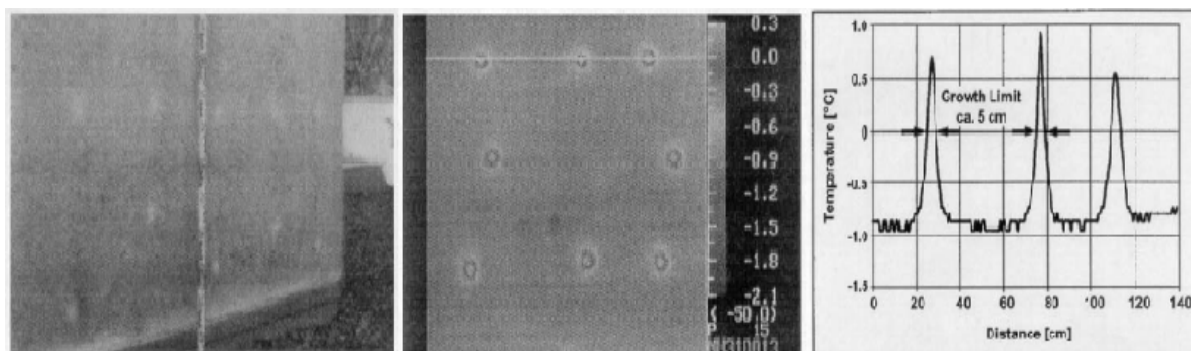


Fig.3.5 – Imagem visível, termograma e curva da temperatura superficial de uma fachada revestida com ETICS e com fixação mecânica do sistema [18]

Deste modo o autor aponta as condensações superficiais exteriores como causa para humidificação superficial. Quando a temperatura superficial da fachada desce abaixo da temperatura ambiente, uma pequena diminuição na temperatura da superfície pode torná-la mais baixa que a temperatura de ponto de orvalho e consequentemente ocorrerem condensações [8] [18].

3.2.3. FRAUNHOFER – IBP

O instituto alemão Fraunhofer – IBP realizou diversos estudos, com base em simulação numérica e também em métodos experimentais, relativos à humidificação de fachadas revestidas com ETICS. Concluiu que o teor de humidade à superfície resultava, como anteriormente mencionado por Blach, da humidificação causada pela chuva incidente na fachada e pela condensação superficial, mas era também devido ao processo de secagem e às propriedades dos materiais que constituem o reboco exterior.

O instituto Fraunhofer – IBP desenvolveu um programa de cálculo automático onde é possível introduzir condições climáticas reais e estudar o comportamento higrométrico de diferentes tipos de sistemas. Este programa é denominado WUFI e tem sofrido algumas alterações com o decorrer do tempo no intuito de aperfeiçoar a sua precisão. Nesta última versão, o cálculo da temperatura superficial é efectuado através de um balanço radiativo explícito na superfície exterior da fachada. Para o cálculo deste balanço são definidas diferentes parcelas que correspondem aos diferentes tipos de radiação: radiação solar, radiação de onda longa incidente na fachada (terrestre e atmosférica) e a radiação de onda longa emitida pela superfície.

A utilização do programa WUFI tornou mais fácil a compreensão da influência de determinados parâmetros na ocorrência das condensações superficiais exteriores. Foram analisados pelo instituto Fraunhofer – IBP alguns parâmetros, de modo a definir os que mais influenciam a ocorrência de condensações superficiais exteriores, entre eles, a espessura do reboco, a orientação, a espessura do isolamento térmico e a cor do material de revestimento da superfície.

Os sistemas com pequena espessura de reboco, aplicado pelo lado exterior do isolamento térmico, apresentam uma reduzida capacidade térmica. Este factor contribui para o aumento da ocorrência de condensações, quando comparados com um reboco de maior espessura ou mesmo com uma parede monolítica (figura 3.6).

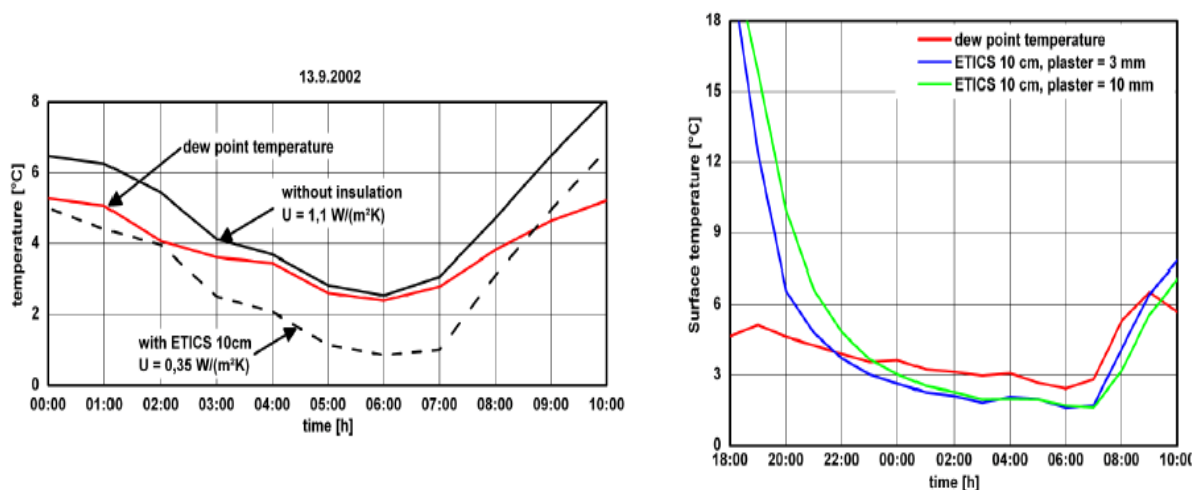


Fig.3.6 – Influência da camada de isolamento e do reboco exterior na temperatura superficial de uma fachada revestida com ETICS [8]

A orientação das fachadas é outro dos parâmetros que influencia a temperatura superficial, não só durante o dia, através da radiação solar incidente, mas também durante a noite. Pelo gráfico da figura 3.7 é visível que fachada Oeste apresenta maiores riscos de condensação ao contrário da fachada Este. Os valores intermédios apresentados pelas fachadas Norte e Sul são bastante idênticos, sendo que na

fachada Norte as horas de condensação são superiores mas o diferencial face à temperatura de ponto de orvalho é menor.

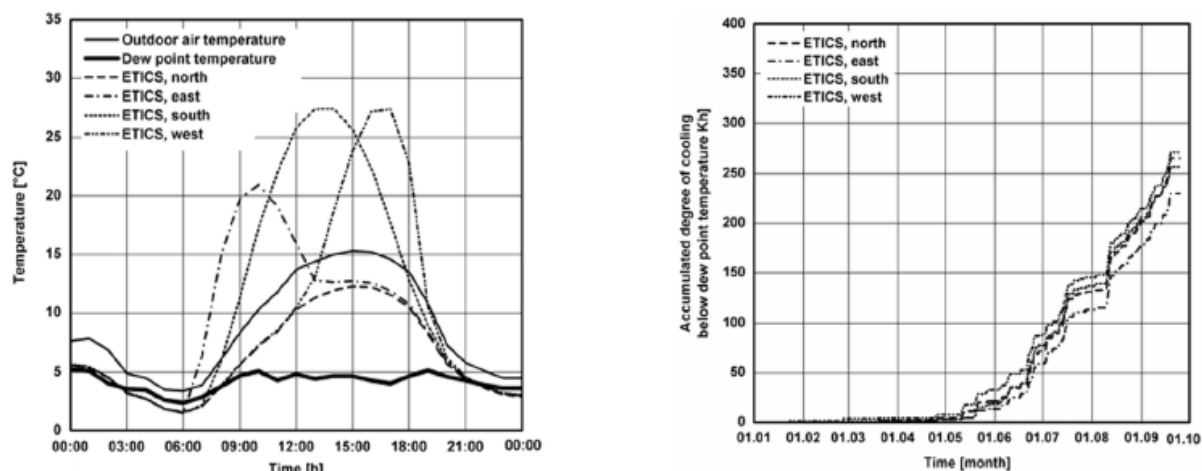


Fig.3.7 – Influência da orientação na temperatura superficial de uma fachada revestida com ETICS [8]

A espessura do isolamento térmico também condiciona o aparecimento de condensações, assim na figura 3.8 é mostrado que para fachadas com maior espessura de isolamento térmico, 10cm, a temperatura superficial exterior é menos elevada que para as fachadas com 5cm de espessura. Isto deve-se ao facto de o fluxo de calor proveniente do interior diminuir com o aumento da espessura de isolamento térmico.

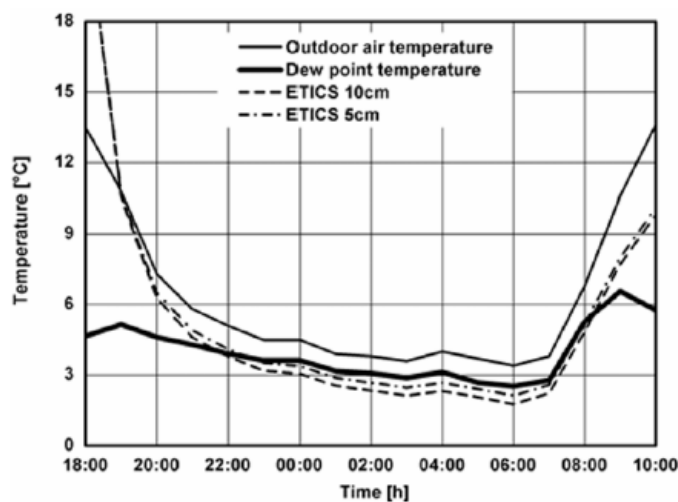


Fig.3.8 – Influência da espessura do isolamento térmico de uma fachada revestida com ETICS [8]

A cor da fachada influencia a temperatura superficial, uma vez que quanto mais escura maior será o coeficiente de absorção solar e quanto maior for o coeficiente de absorção solar maior vai ser a absorção de energia por parte da superfície exterior da fachada (tabela 3.1). Um reboco de cor clara apresenta, por isso, uma maior probabilidade de ocorrência de condensações que um reboco de cor escura (figura 3.9) [6] [8].

Tabela 3.1 – Coeficiente de absorção solar da superfície exterior [19]

Cor da protecção	Clara	Média	Escura
Coeficiente de absorção solar da superfície exterior da protecção Cor	0,4 Branco. Creme. Amarelo. Laranja. Vermelho-claro.	0,5 Vermelho-escuro. Verde-claro. Azul-claro.	0,8 Castanho. Verde-escuro. Azul-vivo. Azul-escuro. Preto.

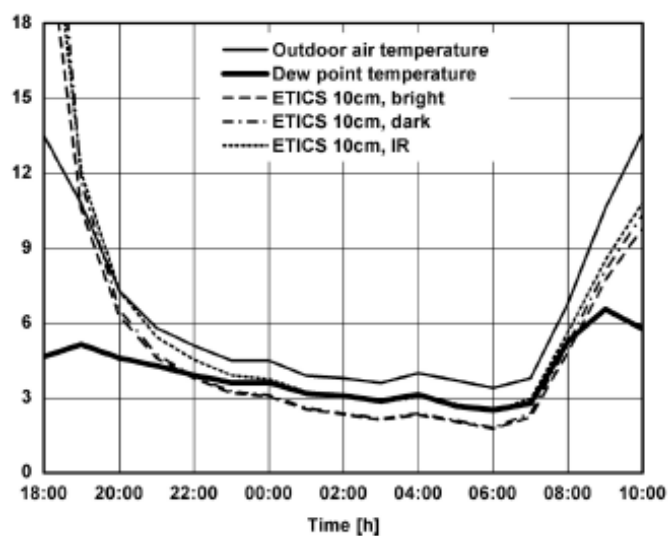


Fig.3.9 – Influência da cor do reboco exterior de uma fachada revestida com ETICS [8]

4

O PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO – WUFI PRO 4.2

4.1. DESCRIÇÃO GERAL DE FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA

4.1.1. NOTA INTRODUTÓRIA

Com o aumento dos problemas causados pela humidade em fachadas de edifícios têm sido realizados diversos estudos na área do desempenho higrométrico dos elementos construtivos. Neste sentido, e na última década, foram desenvolvidos ou aperfeiçoados, centenas de programas de cálculo que permitem avaliar o comportamento dos elementos construtivos face à humidade.

É de elevada importância, no âmbito da física das construções, haver programas de cálculo que permitam avaliar as condições higrométricas dos edifícios. Estes softwares são utilizados para simular o transporte de calor e humidade ao longo dos elementos, sendo bastante úteis aos projectistas uma vez que, permitem avaliar e quantificar a presença de humidade nos diferentes materiais constituintes de uma fachada.

Existem diferentes programas de simulação numérica, no entanto estes variam significativamente entre si, consoante a sua sofisticação matemática, o grau de importância atribuído ao fenómeno de transferência de humidade, o tipo de fluxo, que pode ocorrer no regime estacionário, dinâmico ou quase-estático, e a disponibilidade e qualidade das informações, designadamente as propriedades dos materiais e as condições climáticas [15].

Os modelos matemáticos de transferência de calor, ar e humidade, designados modelos HAM – “Heat, Air and Moisture”, combinam as equações do fluxo de calor com o balanço de massa. Com a rápida evolução dos sistemas informáticos, surgiram nos últimos 10 anos diversas versões de programas utilizando os modelos HAM, onde as condições de análise foram melhoradas e aperfeiçoadas, assegurando uma maior confiança nos resultados obtidos. Segundo alguns autores, estão actualmente referenciados na literatura mais de 57 modelos HAM, contudo apenas 14 se encontram disponíveis para o público em geral, quer por serem versões comerciais ou gratuitas: ID – HAM (versão comercial), BSim2000 (versão comercial), DALPHIN 5 (versão comercial), EMPTIED (versão gratuita), GLASTA (versão comercial), hygIRC (versão comercial), HAMLab (versão gratuita), HAM – Tools (versão gratuita), IDA – ICE (versão comercial), MATCH (versão comercial), MOIST (versão gratuita), MOIST – EXP (versão comercial), UMIDUS (versão gratuita), WUFI (versão comercial) [6] [15].

A capacidade de simular o balanço radiativo da superfície exterior é sem dúvida das características fundamentais dos modelos de HAM. A generalidade dos modelos, utilizam um método simplificado

para avaliar a temperatura da superfície da camada exterior, que só considera explicitamente o efeito da radiação solar. A radiação solar é então a fonte de calor que aquece a superfície exterior durante o dia e depende do coeficiente de absorção para radiação solar e da componente da radiação solar normal à superfície (equação (2.6)).

As trocas de calor à superfície são calculadas considerando a diferença de temperaturas entre a superfície e o ar e o coeficiente de transferência de calor (equação 4.1). Este coeficiente é constituído por duas parcelas distintas, uma referente à convecção (equação (2.3)) e a outra referente à radiação de onda longa (equação (4.2)).

$$q = h(T_s - T_a) \quad (4.1)$$

$$q = h_c + h_r \quad (4.2)$$

Em que,

q – Densidade do fluxo de calor [W/m^2]

h – Coeficiente de transferência de calor [$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$]

h_c – Coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$]

h_r – Coeficiente de transferência de calor por radiação [$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$]

T_s – Temperatura absoluta da superfície [K]

T_a – Temperatura absoluta do ar [K]

O coeficiente de transferência de calor por radiação traduz as trocas de radiação de onda longa entre a superfície em estudo e as outras superfícies terrestres, que são regidas pela Lei de Stefan–Boltzmann. Considerando que todas as superfícies em redor do edifício têm temperaturas análogas, o erro a que a linearização da Lei de Stefan–Boltzmann conduz, para a determinação das trocas de calor entre superfícies, é aceitável. Assumindo que a temperatura terrestre é semelhante à temperatura do ar e que todas as superfícies terrestres têm emissividades similares, exceptuando as superfícies metálicas, as trocas de calor por radiação são calculadas atendendo a uma equação semelhante à das trocas de calor por convecção (equação (4.3)). Para isso são agrupadas três das quatro potências da Lei de Stefan–Boltzmann no coeficiente de transferência de calor por radiação (equação (2.9)).

$$q_{rad} = \varepsilon_1 \times \sigma \times T_s^4 - \varepsilon_2 \times \sigma \times T_a^4 \approx h_r(T_s - T_a) \quad (4.3)$$

Em que,

q_{rad} – Densidade do fluxo de calor por radiação [W/m^2]

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – Emissividade das superfícies [-]

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ – Constante de Stefan–Boltzmann [$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K}^4)$]

No que diz respeito ao comportamento de superfícies revestidas com ETICS, esta simplificação dos modelos HAM não é a mais adequada para a avaliação do fenómeno do ‘undercooling’. Como a capacidade térmica do sistema é muito reduzida, dado que a espessura do reboco é muito pequena e existe uma descontinuidade térmica do sistema, a influência das condições fronteira, em especial da

radiação incidente, é considerável. Por isso, a modelação do efeito da radiação de onda longa não pode ser demasiado simplificado, devendo sempre incluir as trocas radiativas entre a superfície e a atmosfera. Como em situações de céu limpo, o céu emite menos radiação do que as superfícies terrestres, se estas perdas não forem devidamente consideradas o arrefecimento nocturno não será devidamente avaliado, introduzindo erros às simulações efectuadas [8] [15].

4.1.2. EQUAÇÕES DE TRANSFERÊNCIA CONJUNTA DE CALOR E HUMIDADE

O WUFI Pro 4.2 é um programa de cálculo automático elaborado pelo instituto alemão Fraunhofer – IBP que permite a simulação numérica 1D, em regime variável, cujo principal objectivo é o cálculo da quantidade de calor e humidade presentes nas diversas camadas de um elemento construtivo. O WUFI permite a simulação numérica do arrefecimento nocturno, já que inclui na sua modelação o balanço explícito da radiação de onda longa incidente na superfície exterior.

Para o cálculo do balanço radiativo explícito o WUFI considera três parcelas distintas, a radiação de onda curta proveniente do sol, a radiação de onda longa que chega à superfície e a radiação de onda longa que é emitida pela superfície. Uma vez que o efeito da radiação é determinado explicitamente apenas é contabilizada a parcela referente à convecção para a determinação do coeficiente de transferência de calor [8] [15].

O programa WUFI não se destaca apenas pelas suas aptidões em termos de programa de cálculo, mas também por apresentar diversas características que cativam o interesse dos diversos utilizadores:

- Utiliza um ambiente gráfico Windows o que torna a sua interface muito apelativa, facilitando a sua utilização;
- Campos de ajuda muito detalhados e de fácil consulta inseridos no programa e um prático fórum de discussão on-line possibilitam ao utilizador obter facilmente uma maior e mais eficaz ajuda ao acesso à informação.

Para o cálculo da transferência de calor, o WUFI considera os parâmetros referentes à condução, aos fluxos de entalpia resultantes da mudança de fase, a radiação solar e quando é fornecida nos dados climáticos, a radiação de onda longa. No cálculo dos mecanismos de transporte de humidade, os parâmetros considerados são, para a fase de vapor, a difusão, e para a fase líquida, a capilaridade e a difusão de superfície. As equações relativas à transferência de massa e energia, são respectivamente [8] [15]:

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \left(D_{\varphi} \cdot \nabla \varphi + \delta_p \cdot \nabla (\varphi \cdot p_{sat}) \right) \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda_w \cdot \nabla T) + h_v \cdot \nabla \left(\delta_p \cdot \nabla (\varphi \cdot p_{sat}) \right) \quad (4.5)$$

Em que,

w – Teor de humidade [kg/m^3]

φ – Humidade relativa [-]

t – Tempo [s]

D_{φ} – Coeficiente de condução líquida [$\text{kg}/(\text{m.s})$]

δ_p – Permeabilidade ao vapor do material [$\text{kg}/(\text{m.s.Pa})$]

p_{sat} – Pressão de saturação [Pa]

H – Entalpia [J/m^3]

T – Temperatura absoluta [K]

λ_w – Condutibilidade térmica do material húmido [W/(m.K)]

h_v – Calor latente da mudança de fase [J/kg]

4.1.3. EQUAÇÕES DO BALANÇO RADIATIVO EXPLÍCITO NA SUPERFÍCIE EXTERIOR

O balanço radiativo explícito na superfície exterior é, como já foi mencionado antes, efectuado pelo programa WUFI. A radiação de onda longa é composta por duas partes, a radiação que chega à superfície e a radiação por esta emitida. Esta radiação é combinada com a parcela relativa à radiação solar de onda curta (figura 4.1).

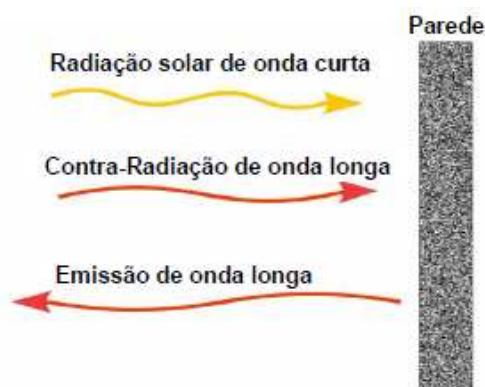


Fig.4.1 – Balanço radiativo explícito [21]

No cálculo do balanço radiativo, as duas primeiras parcelas da equação (4.6) traduzem a radiação total que chega à superfície, tanto de onda curta como de onda longa, pois a emissividade é igual ao coeficiente de absorção de onda longa como é referido pela Lei de Kirchhoff. A última parcela traduz a radiação de onda longa emitida pela superfície [8] [23].

$$q_{rad} = \alpha_s \cdot I_s + \varepsilon \cdot I_{ol} - I_e \quad (4.6)$$

Em que,

q_{rad} – Densidade do fluxo de calor resultante do balanço radiativo à superfície [W/m^2]

α_s – Coeficiente de absorção para a radiação solar [-]

I_s – Componente da radiação solar normal de onda curta à superfície [W/m^2]

ε – Emissividade da superfície [-]

I_{ol} – Componente normal da radiação de onda longa que chega à superfície [W/m^2]

I_e – Radiação de onda longa emitida pela superfície [W/m^2]

A radiação solar total (equação (4.7)), é obtida em função da radiação solar directa perpendicular à superfície, da radiação solar difusa, afectada por um factor de forma atmosfera/superfície, e pela radiação solar reflectida pelo solo, também esta afectada de um factor de forma solo/superfície. Para o

cálculo dos factores de forma são usadas as equações (4.8) e (4.9), que dependem da inclinação da superfície em causa.

$$I_s = I_{s,dir} + g_{atm} \cdot I_{s,dif} + g_{ter} \cdot I_{s,ref} \quad (4.7)$$

$$g_{atm} = \cos^2(\beta/2) \quad (4.8)$$

$$g_{ter} = 1 - g_{atm} \quad (4.9)$$

Em que,

$I_{s,dir}$ – Radiação solar directa perpendicular à superfície [W/m^2]

g_{atm} – Factor de forma atmosfera/superfície [-]

$I_{s,dif}$ – Radiação solar difusa [W/m^2]

g_{ter} – Factor de forma solo/superfície [-]

$I_{s,ref}$ – Radiação solar reflectida pelo solo [W/m^2]

A radiação solar directa perpendicular à superfície é obtida automaticamente pelo programa WUFI Pro 4.2 em função da radiação solar directa que incide numa superfície horizontal, fornecida pelos ficheiros dos dados climáticos, e pela posição do sol. A radiação solar reflectida pelo solo, expressa na equação (4.10), é calculada usando a radiação difusa e a radiação solar directa incidente numa superfície horizontal. Estes valores são fornecidos directamente pelo ficheiro dos dados climáticos e são afectados de um coeficiente de reflexão de onda curta do solo.

$$I_{s,ref} = \rho_{s,ter}(I_{s,dir,h} + I_{s,dif}) \quad (4.10)$$

Em que,

$\rho_{s,ter}$ – Coeficiente de reflexão de onda curta do solo [-]

$I_{s,dir,h}$ – Radiação solar directa numa superfície horizontal [W/m^2]

Outra das parcelas presente na equação do balanço radiativo explícito é a componente normal de onda longa que chega à superfície (equação (4.11)). Esta é obtida através do somatório da radiação emitida pela atmosfera afectada pelo factor de forma atmosfera/superfície, da radiação que pelo solo é emitida e da radiação atmosférica reflectida pelo solo, ambas afectadas pelo factor de forma solo/superfície [8] [21].

$$I_{ol} = g_{atm} \cdot I_{atm} + g_{ter}(I_{ter} + I_{atm,ref}) \quad (4.11)$$

Em que,

I_{atm} – Radiação emitida pela atmosfera [W/m^2]

I_{ter} – Radiação emitida pelo solo [W/m^2]

$I_{atm,ref}$ – Radiação atmosférica reflectida pelo solo [W/m^2]

A radiação emitida pela atmosfera pode ser obtida por duas formas. Através dos ficheiros dos dados climáticos ou calculada empiricamente pelo programa WUFI Pro 4.2, através das equações (4.12) a (4.14), no caso dos ficheiros climáticos não incluírem a parcela da radiação atmosférica. Neste caso tem que ser fornecido o índice de nebulosidade [22].

$$I_{atm} = N \cdot I_{nuvens} + (1 - N) \cdot I_{ar} \quad (4.12)$$

$$I_{ar} = \sigma \cdot T^4 (0,79 - 0,174 \times 10^{-0,041 \cdot p}) \quad (4.13)$$

$$I_{nuvens} = \sigma \cdot T_D^4 \quad (4.14)$$

Em que,

N – Índice de nebulosidade [-]

I_{nuvens} – Radiação de onda longa emitida pelo céu encoberto [W/m^2]

I_{ar} – Radiação de onda longa emitida pelo céu limpo [W/m^2]

T – Temperatura do ar medido pela estação [K]

p – Pressão atmosférica medida pela estação [hPa]

T_D – Temperatura de ponto de orvalho [K]

Através da Lei de Stefan–Boltzmann é obtida a equação que permite calcular a radiação de onda longa emitida pelo solo (equação (4.15)). Para o seu cálculo é considerada a emissividade do solo e a temperatura do ar exterior, uma vez que durante a noite a temperatura do solo se assume que seja aproximadamente igual à temperatura do ar exterior.

$$I_{ter} = \varepsilon_{ter} \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (4.15)$$

Em que,

ε_{ter} – Emissividade do solo [-]

$\sigma = 5,64 \cdot 10^{-8}$ – Constante de Stefan–Boltzmann [$W/(m^2 \cdot K^4)$]

T_a – Temperatura absoluta do ar exterior [K]

A radiação atmosférica reflectida pelo solo (equação (4.16)), é avaliada usando a radiação emitida pela atmosfera e o coeficiente de reflexão de onda longa do solo, $\rho_{ol,ter}$.

$$I_{atm,ref} = \rho_{ol,ter} \cdot I_{atm} \quad (4.16)$$

Todos os componentes da radiação, mencionados até agora, são explicitamente conhecidos antes da simulação, ou são determinados pelo programa WUFI utilizando as fórmulas já referidas, ou seja, não dependem dos resultados da simulação. No entanto o cálculo da radiação de onda longa emitida pelo edifício (4.17), a última parcela da equação do balanço radiativo explícito na superfície exterior, é uma excepção. Esta é calculada com base na Lei de Stefan–Boltzmann e depende da temperatura da superfície e da sua emissividade.

$$I_e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (4.17)$$

Em que,

T_s – Temperatura da superfície exterior [K]

Uma vez que a temperatura da superfície exterior não é conhecida até ao final da simulação, o programa WUFI resolve esta dependência não-linear da equação de acordo com a linearização da série de Taylor, equação (4.18).

$$I_{e,ln} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{s,i}^4 + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{s,i}^3 \cdot (T_{s,i+1} - T_{s,i}) \quad (4.18)$$

Em que,

$I_{e,ln}$ – radiação de onda longa linear [W/m²]

$T_{s,i}$ – temperatura da superfície exterior antes da iteração (conhecida) [K]

$T_{s,i+1}$ – temperatura da superfície exterior depois da iteração (a ser resolvida) [K]

A figura 4.5 apresenta de forma clara, todas as parcelas do balanço radiativo na superfície exterior de uma parede anteriormente mencionadas [8] [23].

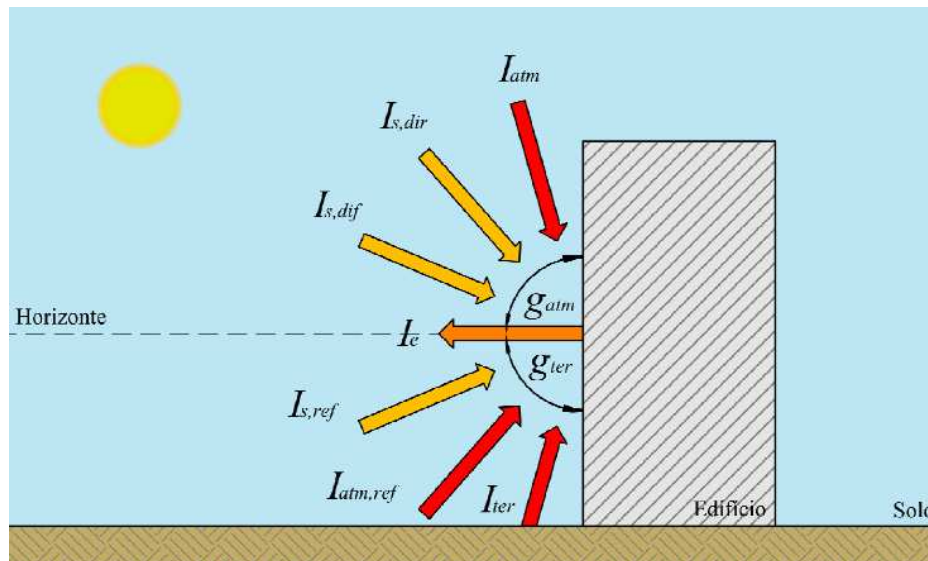


Fig.4.2 – Parcelas do balanço radiativo explícito na superfície exterior de uma parede [8]

4.1.4. LIMITAÇÕES DO PROGRAMA

Como qualquer programa de cálculo o WUFI Pro 4.2 também apresenta as suas limitações resultantes de simplificações introduzidas ao modelo de cálculo. As principais limitações ao programa resultam da não consideração [8]:

- Da transferência de calor e humidade por convecção correspondente ao movimento do ar;
- De alguns dos mecanismos de transporte de água líquida, nomeadamente os fluxos hidráulicos devidos às diferenças de pressão, os fluxos de infiltração por gravitação ou os efeitos electrocinéticos e osmóticos;
- Da transferência conjunta de água líquida e de sais;
- Da resistência, à transferência de humidade, da interface entre dois materiais porosos;
- Dos fluxos de calor resultantes da transferência de água líquida devida a diferenciais de temperatura.

4.1.5. DADOS DE ENTRADA E DADOS DE SAÍDA

Uma vez aberto o programa o menu inicial (figura 4.3) permite a descrição geral do projecto, com os dados gerais da simulação, como o nome do projecto, a localização, data, contactos entre outros, para posteriormente o projecto ser facilmente identificado.

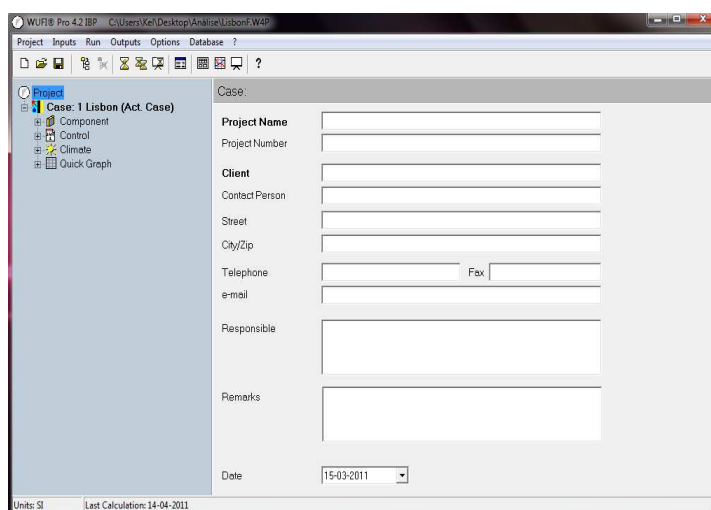


Fig.4.3 – Menu inicial do programa WUFI Pro 4.2

Antes de se iniciar a simulação, é essencial organizar a introdução de dados. Estes dados são introduzidas através da selecção dos itens no menu localizado no lado esquerdo do ecrã, que é composto por três grupos distintos. O primeiro grupo é referente ao menu componente, onde são introduzidos os dados relativos à configuração do elemento construtivo, designadamente, a constituição das diferentes camadas incluindo escolha das propriedades dos materiais que as constituem e que podem ser escolhidas a partir de uma base de dados disponibilizada pelo WUFI ou introduzidos manualmente pelo utilizador, a orientação, altura e inclinação do elemento a simular, as indicações relativas aos coeficientes de transferência de calor à superfície e as condições de simulação iniciais.

O elemento construtivo considerado neste trabalho foi o mesmo para todas as simulações, uma vez que o presente estudo pretende comparar a ocorrência de condensações em diferentes cidades europeias.

Assim foi escolhido para as simulações uma estrutura de betão revestida pelo exterior com o sistema ETICS (figura 4.4). As propriedades dos materiais que constituem as diferentes camadas do elemento foram retiradas da base de dados do programa WUFI Pro 4.2, com a excepção de alguns valores relativos ao reboco exterior recolhidos de outras fontes.

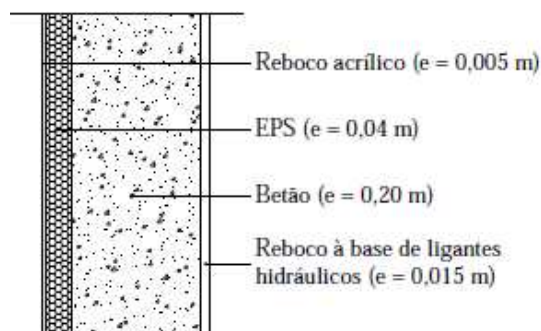


Fig.4.4 – Esquema do elemento construtivo simulado [8]

Adoptou-se um reboco monocamada com as propriedades descritas na tabela 4.1. Apesar de o reboco presente nos sistemas ETICS ser constituído por uma camada base e uma camada de acabamento em vez da monocamada, pressupõe-se que esta alteração não introduz variações significativas nos resultados das simulações [8].

Tabela 4.1 – Propriedades do reboco acrílico (exterior)

PROPRIEDADE		VALOR
<i>Propriedades básicas</i>		
ρ	Massa volúmica [kg/m^3]	1600
ε	Porosidade [m^3/m^3]	0,2
c	Calor específico do material seco [$\text{J}/\text{kg.K}$]	850
λ	Condutibilidade do material seco [$\text{W}/(\text{m.K})$]	1
μ	Factor de resistência à difusão de vapor [-]	25
<i>Propriedades hígricas complementares</i>		
Curva Higroscópica		Não
Coeficiente de difusividade hígrica para a sucção e redistribuição		Não
Condutibilidade térmica dependente da humidade		Não
Factor de resistência à difusão de vapor dependente da humidade		Não

A tabela 4.2 apresenta de forma simplificada as principais propriedades dos restantes materiais que constituem as demais camadas do elemento construtivo. Estes valores foram obtidos a partir da base de dados do programa WUFI Pro4.2.

Tabela 4.2 – Propriedades básicas das restantes camadas do elemento construtivo

Material	ρ [kg/m^3]	ε [m^3/m^3]	c [$\text{J}/\text{kg.K}$]	λ [$\text{W}/(\text{m.K})$]	μ [-]
Poliestireno Expandido (EPS)	30	0,95	1500	0,04	50
Betão	2220	0,18	850	1,60	248
Reboco hidráulico	2000	0,30	850	1,20	25

A figura 4.5 apresenta o menu do programa WUFI onde foram introduzidos os dados referentes à constituição do elemento construtivo.

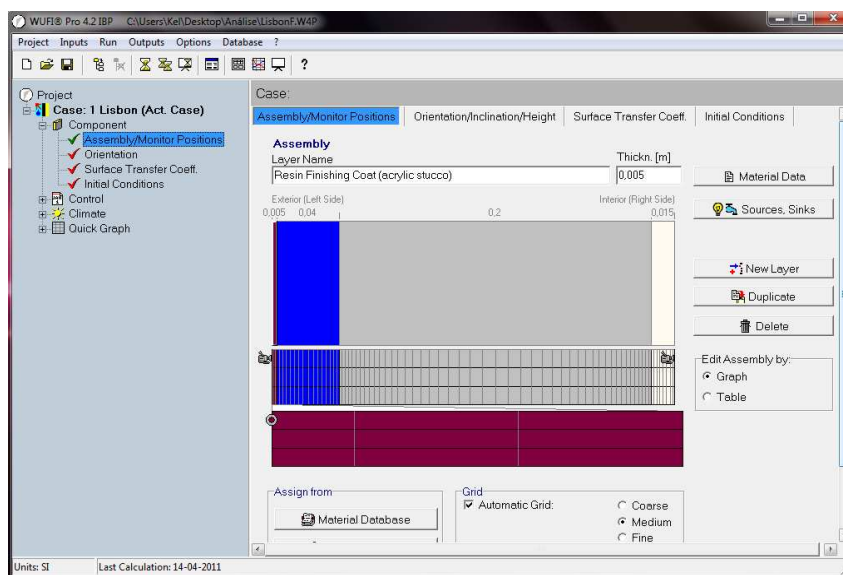


Fig.4.5 – Constituição do elemento construtivo, programa WUFI Pro 4.2

Para uma fase inicial do estudo, foram consideradas fachadas orientadas aos quatro pontos cardeais (N, S, E e O). Posteriormente adoptou-se apenas a orientação Norte. A inclinação considerada foi de 90°, uma vez que o estudo é referente a fachadas. A altura da fachada, que condiciona o efeito da chuva incidente, foi até aos 10 metros (figura 4.6). Esta opção não é relevante porque o efeito da chuva foi desprezado, ao considerar-se o factor de absorção da água da chuva nulo (tabela 4.3).

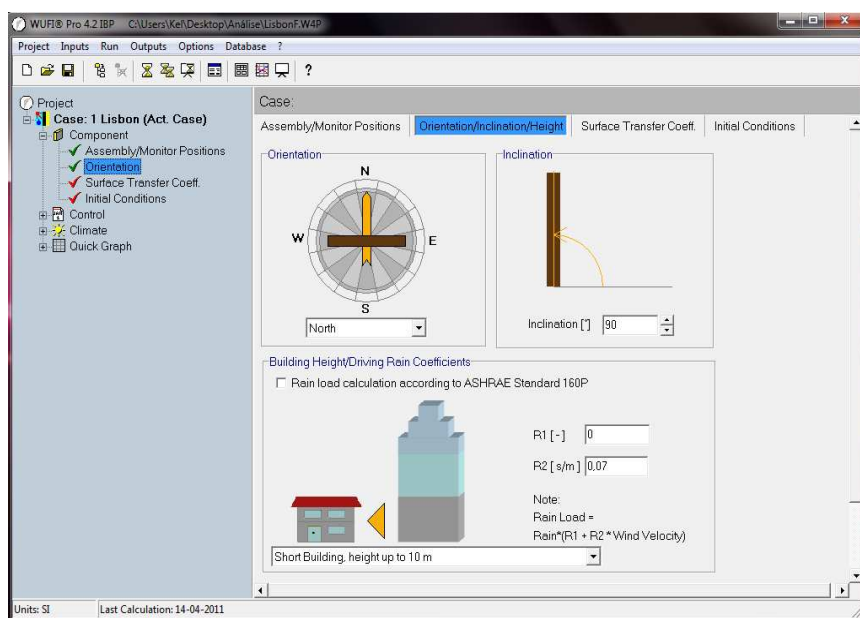


Fig.4.6 – Orientação, inclinação e altura do elemento construtivo, programa WUFI Pro 4.2

A tabela 4.3 descreve os valores utilizados para os coeficientes de transferência à superfície, quer na face exterior, quer na face interior (figura 4.7). A tabela 4.4 traduz os valores utilizados para o índice de nebulosidade para cada uma das cidades simuladas (§4.2). Estes valores correspondem à média anual do índice de nebulosidade obtidos a partir dos valores horários fornecidos pelo Meteonorm [24].

Tabela 4.3 – Coeficientes de transferência superficiais

Face Exterior	
Heat Resistance	Foi seleccionada a opção 'External Wall', uma vez que o elemento construtivo em estudo é uma fachada. A acção do vento não foi contabilizada para este estudo.
Sd-Value	Foi escolhida a opção 'No coating'
Short-Wave Radiation Absorptivity	0,4
Long-Wave Radiation Emissivity	0,9
Explicit Radiation Balance	Seleccionou-se a a opção 'Enable' mantendo os valores pré-definidos pelo programa, com excepção do valor para o índice de nebulosidade que foi seleccionado em função da cidade (tabela 4.4)
Rain Water AbsorptionFactor	Foi seleccionada a opção 'No absorption', uma vez que o efeito da chuva não foi contabilizado neste estudo
Face Interior	
Heat Resistance	Automático em função do tipo de elemento construtivo ('External Wall')
Sd-Value	Foi escolhida a opção 'No coating'

Tabela 4.4 – Valores do índice de nebulosidade para os diferentes países em estudo

	Índice de nebulosidade, N
Lisboa	0,51
Kassel	0,76
Grenoble	0,63
Espoo	0,70

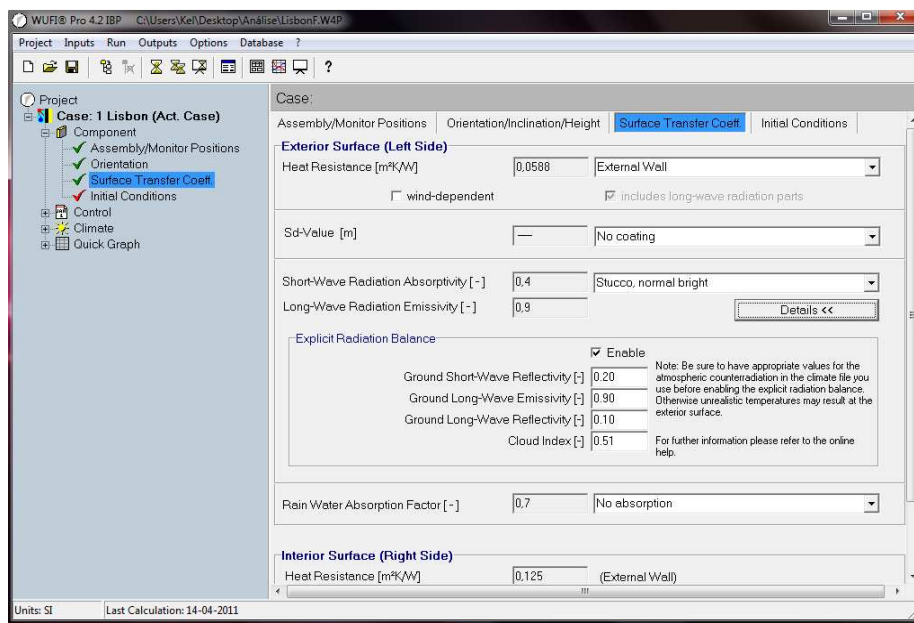


Fig.4.7 – Coeficientes de transferência superficiais, programa WUFI Pro 4.2

Como condições iniciais da simulação considerou-se, 20°C para a temperatura e 60% para a humidade relativa no componente (figura 4.8).

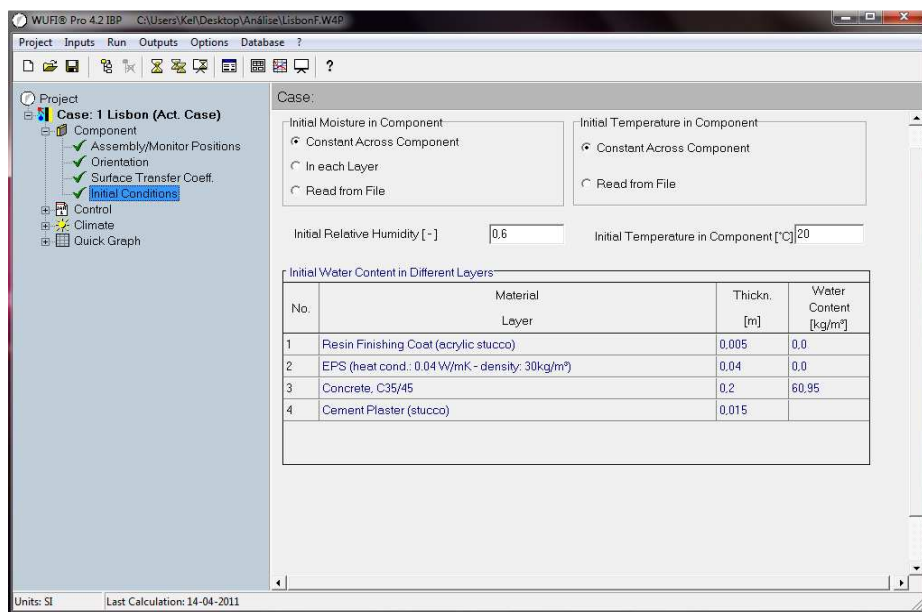


Fig.4.8 – Condições iniciais, programa WUFI Pro 4.2

O segundo grupo do menu localizado do lado esquerdo do ecrã, diz respeito ao menu controle da simulação e define o período e as condições de cálculo em que esta vai ser realizada. O último grupo é relativo ao menu clima, onde são definidas as condições fronteira exteriores e interiores da simulação, podendo o clima ser obtido através da base de dados do WUFI ou ser introduzido manualmente pelo utilizador. Para este estudo, o clima exterior foi obtido através da base de dados do programa WUFI. Teve-se o cuidado de seleccionar climas onde o valor da radiação atmosférica não fosse fornecido nos

dados climáticos, mas sim calculado pelo WUFI através do índice de nebulosidade (equações (4.12), (4.13) e (4.14)). As condições climáticas interiores foram consideradas como sendo constantes ao longo do ano, com uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa de 60% (figura 4.9).

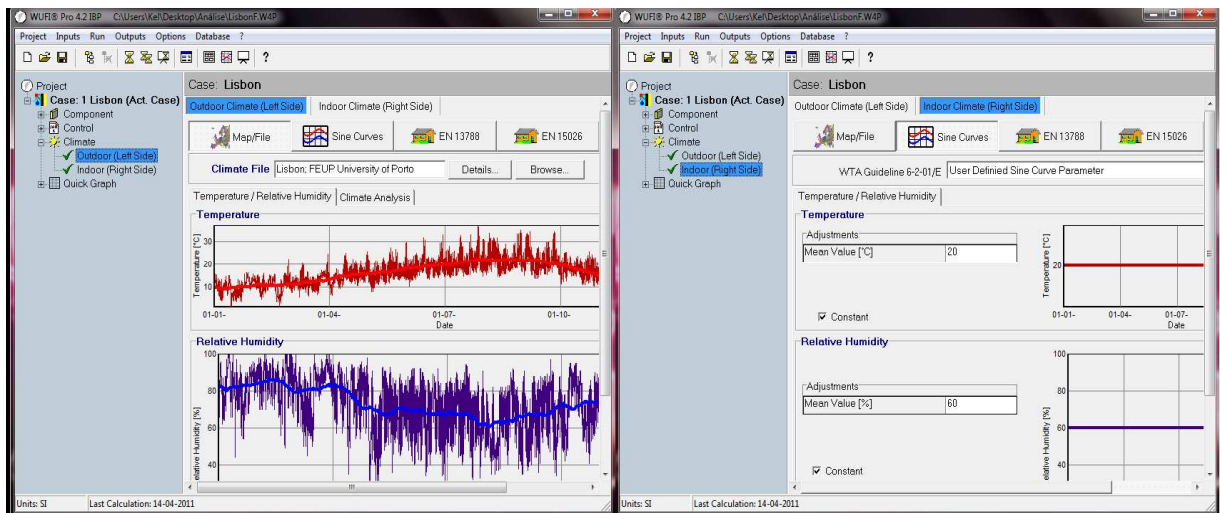


Fig.4.9 – Condições climáticas exteriores e interiores, programa WUFI Pro 4.2

O programa WUFI, no que diz respeito à saída de resultados, gera diversas opções. Gráficos predefinidos pelo WUFI, referentes à variação ao longo do tempo, apresentam o teor de humidade total do elemento construtivo e o teor de humidade presente em cada camada constituinte do elemento (figura 4.10). O WUFI gera também dados que podem ser exportados para ficheiros de texto, onde é possível ter acesso a diversos parâmetros, nomeadamente, à temperatura, humidade relativa e temperatura de ponto de orvalho na face interior e exterior do elemento em estudo.

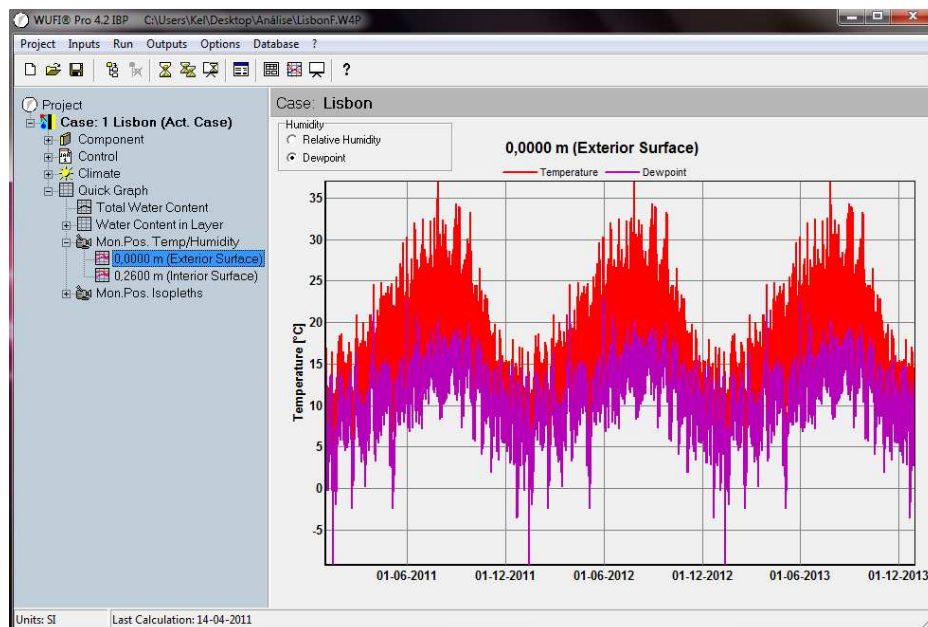


Fig.4.10 – Saída de resultados, programa WUFI Pro 4.2

É ainda possível obter uma animação 1D onde é ilustrada a variação de determinados parâmetros, nomeadamente, a temperatura, a humidade relativa e o teor de humidade ao longo do tempo nas diferentes camadas dos elementos construtivos.

4.2. DESCRIÇÃO DO CLIMA DAS CIDADES ESTUDADAS

4.2.1. DESCRIÇÃO DAS CIDADES

Este estudo tem por base a determinação da ocorrência de condensações superficiais exteriores em fachadas revestidas com ETICS, em diferentes cidades europeias. As cidades foram escolhidas a partir da base de dados climáticos do WUFI, tendo em conta que só alguns dos dados eram facilmente lidos pelo utilizador. Dos dados acessíveis foram escolhidos aqueles que correspondiam a cidades pertencentes a diferentes países, com localizações geográficas muito distintas e, consequentemente, com climas também muito distintos. As cidades seleccionadas foram Lisboa, Grenoble, Kassel e Espoo (figura 4.11). Como o factor que varia na realização das simulações em estudo é o clima das diferentes cidades, todos os restantes dados se mantêm inalterados para todas as simulações.



Fig.4.11 – Mapa com a localização das cidades europeias em estudo [28]

Lisboa, cidade situada no litoral de Portugal continental, a uma altitude de 114m, apresenta um clima mediterrânico. Caracterizado como um clima temperado húmido, com chuvas nos meses de Inverno e Verões na generalidade secos e quentes. A média anual da temperatura do ar é da ordem dos 16,8°C, tem uma precipitação anual de 753mm estimada em 82 dia por ano e apresenta 2781 horas de sol por ano. É de referir que os valores aqui considerados, para todas as cidades, estão de acordo com [25] e não correspondem exactamente aos valores obtidos em §4.2.2 pelo programa de cálculo WUFI, e especialmente no que se refere ao número de horas anuais de sol, uma vez que os valores médios da temperatura do ar apresentam valores relativamente próximos.

Grenoble localiza-se em França, mais propriamente no sopé dos Alpes franceses, a uma altitude de 212m. Apresenta um clima continental interior moderado. Caracteriza-se por ser bastante húmido e chuvoso no Inverno e apresentar Verões moderados. A temperatura média anual do ar ronda os 11,0°C, apresenta uma precipitação anual de 1025mm repartidos por 114 dias e conta com 2090 horas anuais de sol.

Kassel, cidade situada no centro da Alemanha, a 277m de altitude, conta com um clima temperado com Invernos bastante frios e nebulosos, onde tanto os invernos como os Verões são chuvosos e húmidos. A temperatura média anual é de 8,6°C, a sua precipitação média anual é de 698 repartida por 177 dias do ano e conta com 1449 horas de sol anuais.

Espoo, cidade litoral situada na costa sul da Finlândia, a uma altitude de 16m, apresenta um clima temperado frio e bastante húmido durante todo o ano. Como se localiza no sul da Finlândia conta com a presença de correntes quentes provenientes do atlântico norte, o que torna o clima da cidade de Espoo diferente do clima sub-ártico observado na maioria das outras cidades finlandesas, nomeadamente das situadas mais a norte do país. Conta com temperaturas médias muito baixas que rondam os 5,4°C, a precipitação anual ronda os 643mm ocorrendo em 115 dias por ano e apresenta em média 1858 horas de sol por ano [25] [26].

4.2.2. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS EXTERIORES

Para a caracterização das condições climáticas exteriores é necessário ter em conta diversos parâmetros. No entanto, para a realização deste estudo nem todos vão ser analisados, uma vez que se optou por excluir a influência do vento e da precipitação nesta análise. Assim vão ser analisadas a temperatura do ar exterior, a humidade relativa do ar e a radiação solar. Estes dados foram obtidos a partir dos ficheiros climáticos fornecidos pelo programa WUFI Pro 4.2 e posteriormente tratados para uma melhor interpretação dos resultados obtidos.

4.2.2.1. Temperatura do ar exterior

Um dos parâmetros a ter em conta para avaliar o clima de uma dada localidade é a temperatura do ar exterior. A figura 4.12 mostra os valores médios anuais para a temperatura nos quatro países em estudo.

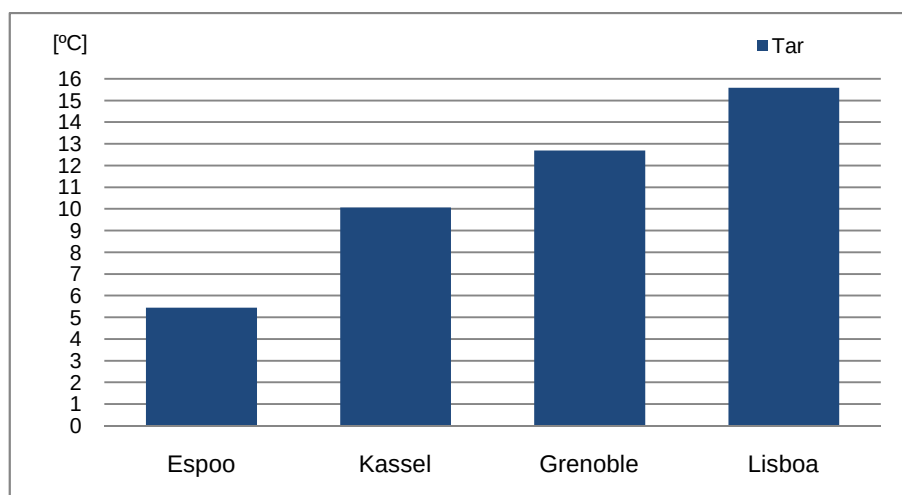


Fig.4.12 – Médias anuais para a temperatura do ar exterior nos quatro países em estudo

Lisboa apresenta a maior média anual da temperatura do ar, rondando os 15,5°C, como seria de esperar uma vez que tem um clima mediterrânico e se encontra mais próximo do equador. Grenoble tem uma média anual de aproximadamente 12,5°C. Apesar de se encontrar junto ao mediterrâneo, o seu clima é muito influenciado pelos Alpes franceses, o que reduz a temperatura do ar. Segue-se Kassel com uma média anual de cerca de 10°C, e Espoo, onde a média anual para a temperatura do ar ronda somente os 5,5°C. O gráfico da figura 4.13 apresenta de forma mais detalhada as médias mensais para a temperatura do ar exterior nos quatro países em estudo.

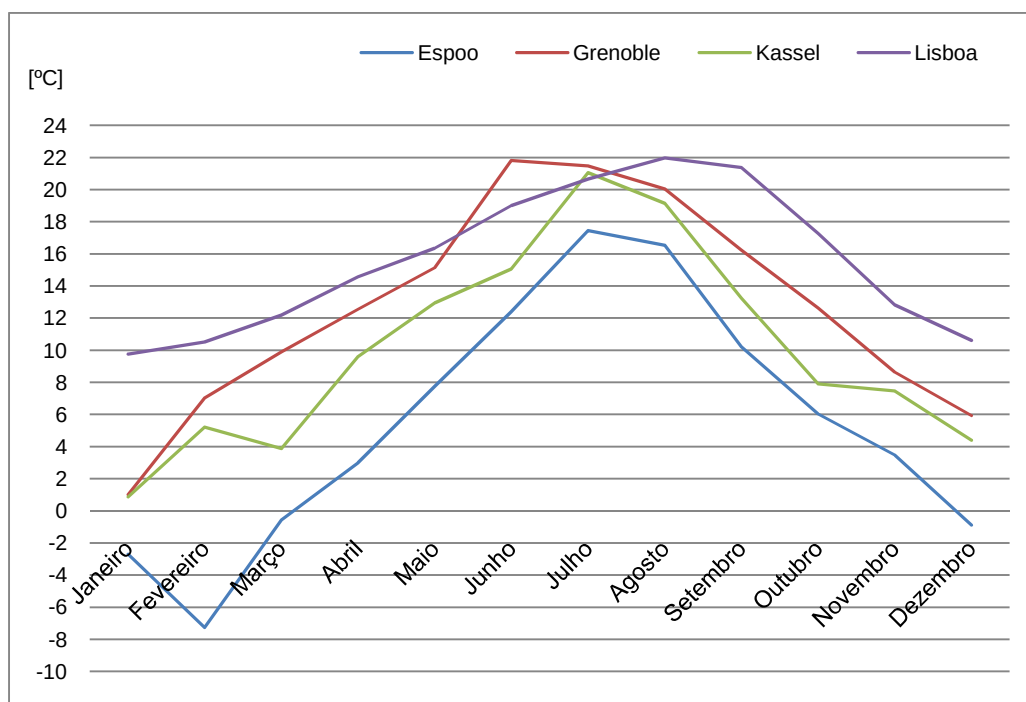


Fig.4.13 – Médias mensais para a temperatura do ar exterior nos quatro países em estudo

De forma geral, pela observação da figura 4.13, nota-se que a temperatura evolui de igual modo para todas as cidades, isto é, apresenta temperaturas mais baixas no início do ano, correspondentes aos meses de Inverno, e vão aumentando gradualmente durante o decorrer dos meses, conforme o Verão se aproxima, voltando a decrescer novamente até Dezembro. Atingindo o seu pico mais alto nos meses de Junho, Julho e Agosto, onde são atingidas temperaturas médias de quase 22°C para todas as cidades excepto Espoo, cujo máximo ronda os 18 °C. As temperaturas médias mais altas são muito próximas para as diferentes cidades em estudo. No entanto, as temperaturas médias mais baixas variam consideravelmente.

Analisando a curva referente Espoo vê-se que apresenta para todos os meses uma média mensal da temperatura do ar inferior às restantes cidades europeias, chegando mesmo atingir valores negativos para o primeiro trimestre do ano. Por outro lado Lisboa, é a cidade que apresenta médias mensais mais elevadas, mantendo-se a temperatura do ar exterior mais constante ao longo do ano, nunca sendo muito inferiores a 10°C nos meses mais frios de Inverno e atingindo os 22°C de média nos meses mais quentes de Verão. As temperaturas médias para Kassel e Grenoble não variam muito, no entanto verificam-se sempre valores ligeiramente mais elevados para Grenoble.

4.2.2.2. Humidade relativa do ar

Outro dos parâmetros a ter em conta na avaliação do clima é a humidade relativa do ar. As suas variações são principalmente condicionadas pelas variações da temperatura do ar, assim geralmente, quando a temperatura aumenta a humidade relativa diminui.

Como seria de esperar, a maior média anual para a humidade relativa do ar verifica-se para Espoo, seguindo-se Kassel, Lisboa e Grenoble (figura 1.14). Apesar de Lisboa apresentar uma média da temperatura do ar mais elevada do que Grenoble, a sua média em termos de humidade relativa é inferior. Este facto ocorre porque as temperaturas médias anuais apenas variam em menos de 3°C e sendo Lisboa uma cidade litoral, que sofre grandes influências das correntes marítimas, a sua humidade relativa vai aumentar relativamente à cidade de Grenoble, que se encontra afastada do litoral e apenas é influenciada pelas correntes continentais, menos húmidas [27].

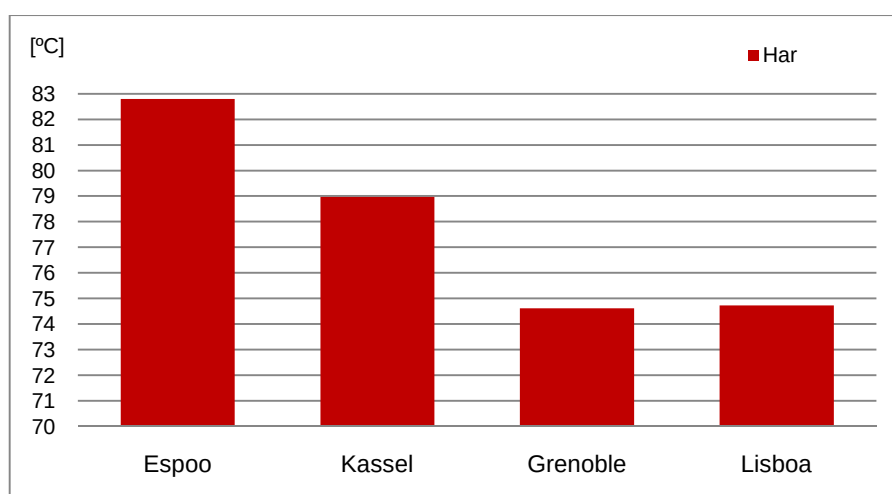


Fig.4.14 – Médias anuais para a humidade relativa nos quatro países em estudo

Quando analisamos o gráfico da figura 4.15, para os valores médios mensais da humidade relativa do ar, é evidente que Espoo apresenta, praticamente para todos os meses, os valores mais elevados. Só nos meses de Abril, Maio e Setembro Espoo não apresenta o valor mais elevado da média mensal. Segue-se a cidade de Kassel, que apesar de contar com valores menores que Espoo apresenta uma evolução anual semelhante.

Quanto a Lisboa e Grenoble apesar de apresentarem uma média anual semelhante para a humidade relativa do ar, em termos mensais apresentam evoluções diferentes. Se de Fevereiro a Abril, Lisboa apresenta uma humidade relativa do ar bastante elevada relativamente a Grenoble, já para os restantes meses verifica-se o oposto.

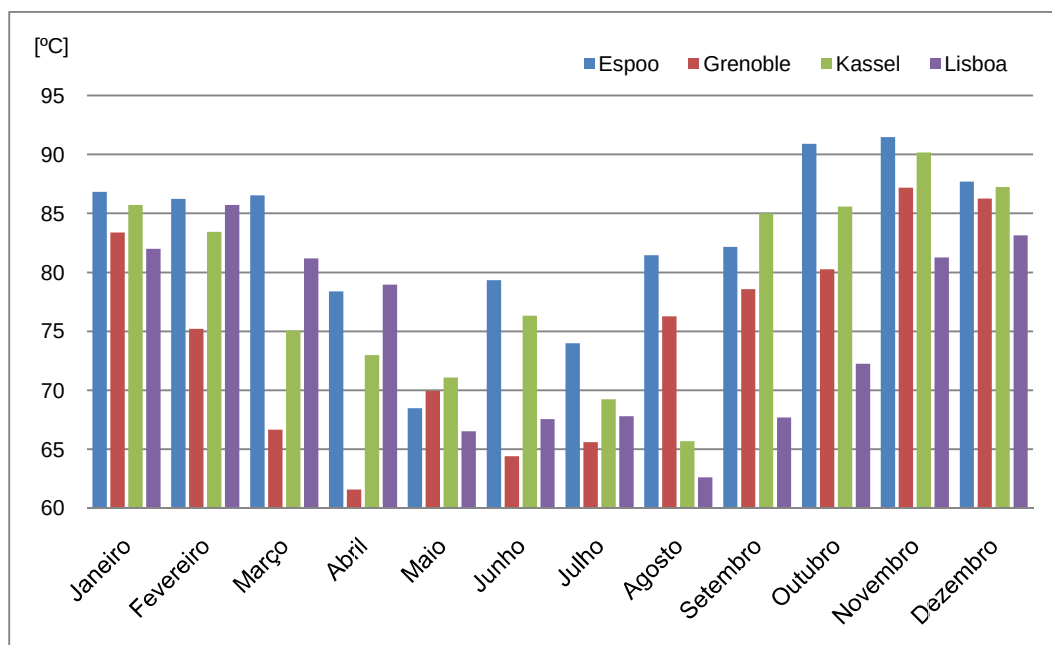


Fig.4.15 – Médias mensais para a humidade relativa nos quatro países em estudo

4.2.2.3. Radiação solar

A radiação solar é talvez o parâmetro mais importante para a caracterização de um clima. A radiação solar atinge a superfície terrestre de duas formas distintas, a radiação directa, proveniente directamente do sol e a radiação difusa, radiação desviada pelos diferentes componentes da atmosfera. Ao acumulado das duas dá-se o nome de radiação global.

A figura 4.16 mostra a influência da radiação solar nos diferentes países em estudo. O acumulado de intensidade da radiação solar depende essencialmente da latitude, isto é, da sua proximidade ao equador: quanto mais próximo estiver o país, maior vai ser a radiação solar recebida. A radiação é também influenciada pela altitude, declinação solar e pela quantidade de nuvens presentes no céu.

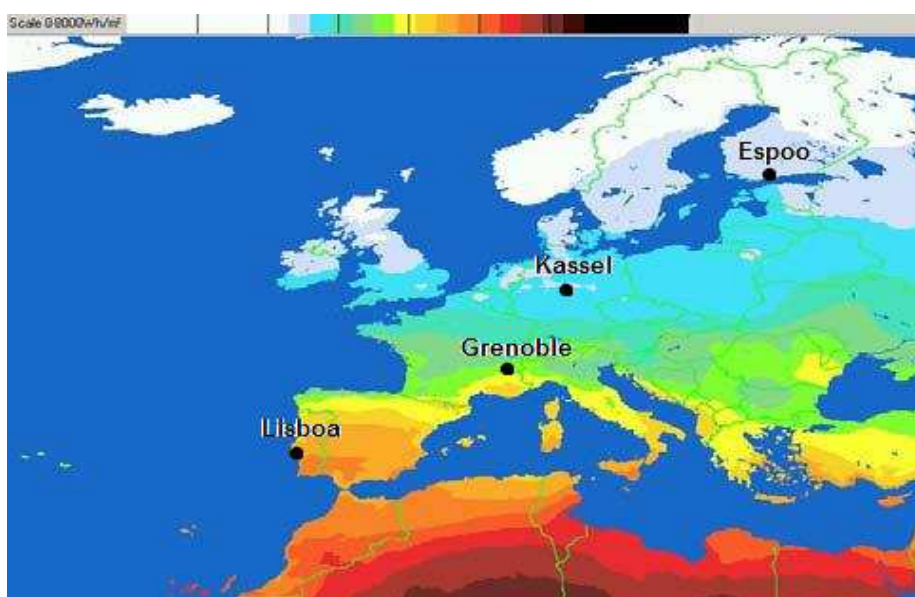


Fig.4.16 – Influência da radiação global na Europa [29]

Nas figuras 4.17, 4.18 e 4.19 são apresentados os acumulados anuais de radiação solar global, difusa e directa, incidente num plano horizontal, bem como o respectivo número de horas.

Analisando o gráfico da figura 4.17 observa-se que Lisboa apresenta o maior acumulado anual de radiação global, correspondendo a uma intensidade superior a 1700000 W/m^2 . Este valor é cerca de 35% superior ao observado para Grenoble, cidade onde se regista o segundo valor mais elevado. Para Espoo, Kassel e Grenoble a intensidade anual de radiação global mostra-se muito próxima, com variações de cerca de 15% entre elas. Como já foi referido a proximidade ao equador influencia a radiação solar, pelo que os valores mais altos para Lisboa e mais baixos para Espoo seriam de esperar. Relativamente ao número de horas com sol, verifica-se que as diferenças entre as várias cidades não são tão significativas e que a tendência é semelhante à do acumulado anual de radiação, excepto para Grenoble. A redução acentuada no número de horas de sol em Grenoble pode resultar da sua localização próxima dos Alpes franceses, que ‘sombreiam’ a cidade.

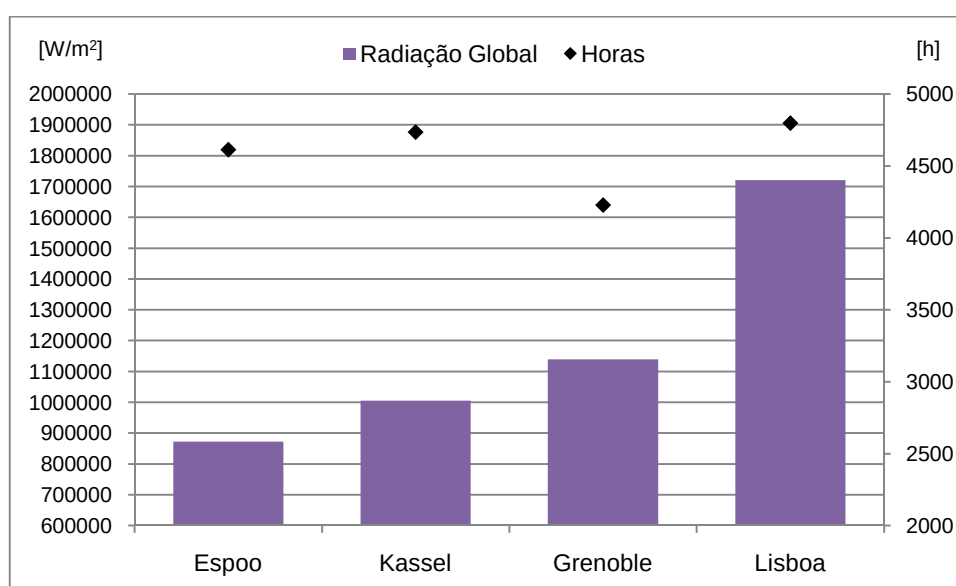


Fig.4.17 – Acumulados anuais e número de horas da radiação global nos quatro países em estudo

O gráfico da figura 4.18 representa a radiação difusa anual nos quatro países em estudo. Pela leitura do gráfico observa-se que o acumulado da radiação difusa não varia muito de país para país, principalmente para Espoo, Grenoble e Kassel onde a diferença entre eles ronda os 5%. Lisboa conta com uma diferença ligeiramente maior. A radiação difusa resulta, entre outros factores, da existência de nuvens e de outros componentes na atmosfera, que são mais ou menos independentes da proximidade ao equador. Portanto, as diferenças nos acumulados anuais são pouco significativas para as quatro cidades. Quanto ao acumulado do número de horas, para radiação difusa, não se verificam grandes alterações relativamente à radiação global.

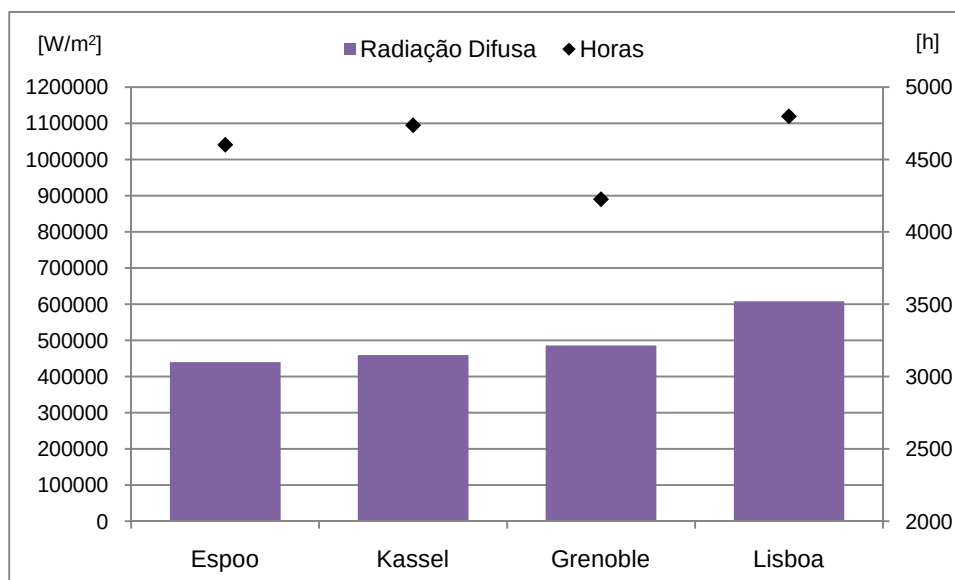


Fig.4.18 – Acumulados anuais e número de horas da radiação difusa nos quatro países em estudo

Quanto aos acumulados anuais referentes à radiação directa, as diferenças são mais evidentes para as quatro cidades e seguem a mesma tendência da radiação global, pelo que é possível concluir que esta é mais influenciada pela radiação directa (figura 4.19). O número de horas em que é registada é menor em comparação com a radiação difusa tal como seria de esperar. O efeito do relevo é muito evidente no número de horas com radiação directa a incidir num plano horizontal, já que Grenoble, localizada junto aos Alpes, apresenta uma redução significativa do número de horas de radiação directa.

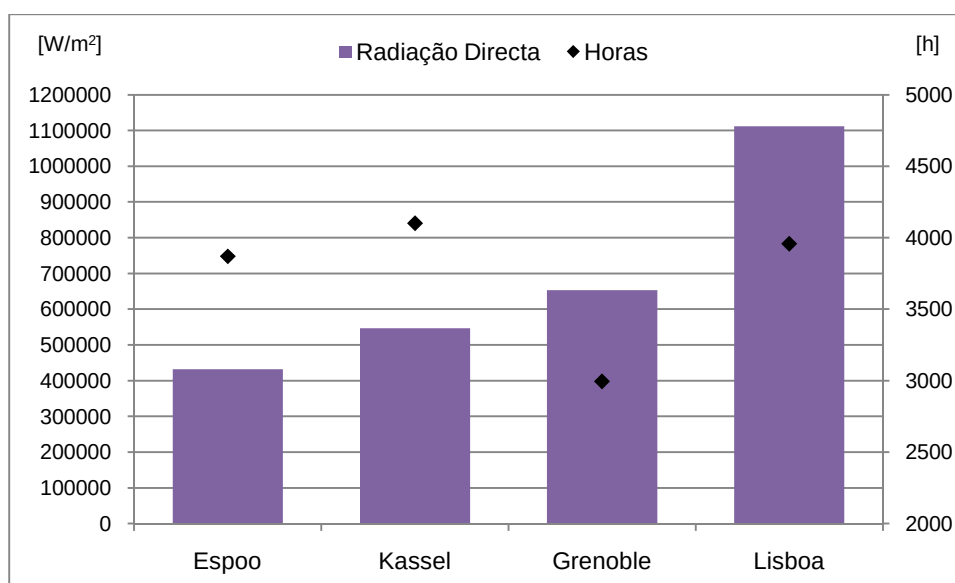


Fig.4.19 – Acumulados anuais e número de horas da radiação directa nos quatro países em estudo

Os gráficos das figuras 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23 têm como objectivo ilustrar a relação entre a radiação difusa e a radiação directa nos quatro países em estudo, mensalmente e ao longo do ano.

A figura 4.20 mostra a relação para Espoo. Como era visível nos gráficos das figuras 4.18 e 4.19, os acumulados anuais para a radiação difusa e para a radiação directa apresentavam valores muito próximos. Isso também é possível observar no gráfico da figura 4.20, que mostra uma evolução muito idêntica durante todo o ano destas radiações. Isto acontece, provavelmente, devido ao facto de Espoo apresentar poucos dias de céu completamente aberto, mesmo no Verão.

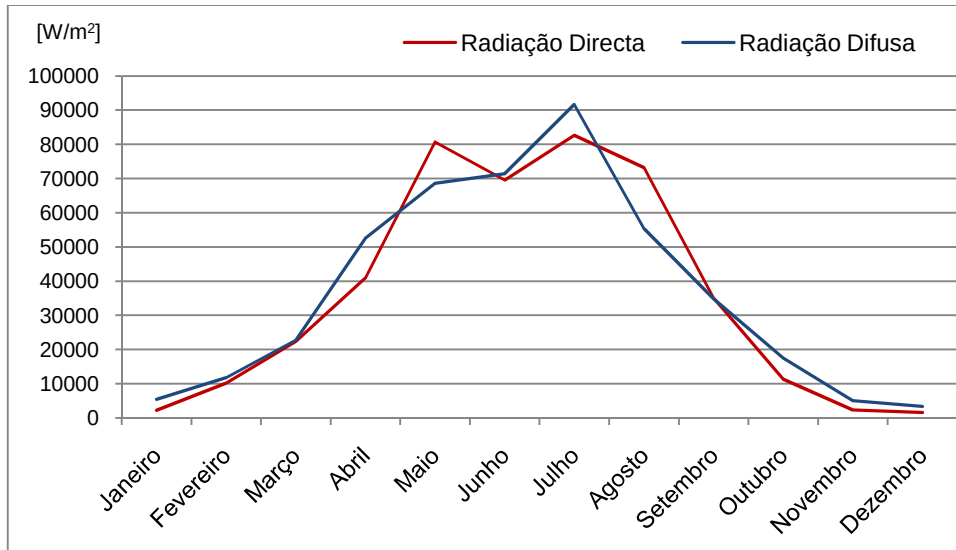


Fig.4.20 – Relação entre a radiação directa e a radiação difusa para a cidade de Espoo

Para os restantes países esta relação é um pouco diferente, uma vez que os valores da radiação directa e difusa não são tão próximos. O gráfico da figura 4.21 mostra a relação entre radiações, directa e difusa, para a cidade de Kassel. Kassel apresenta um aumento da radiação directa a partir do mês de Abril até ao mês de Setembro, o que corresponde aos meses de Verão. Durante este período a radiação directa é superior à difusa, atingindo o seu valor mais elevado no mês de Julho.

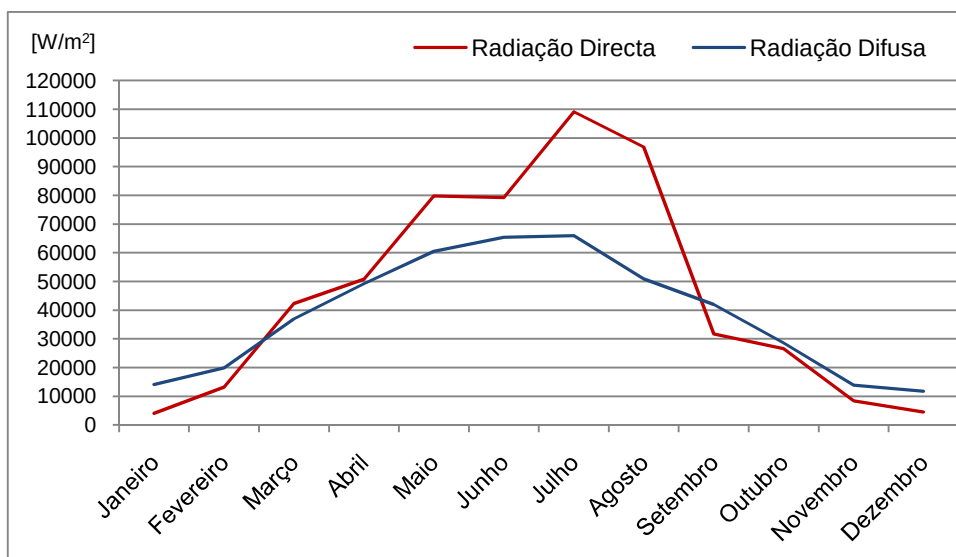


Fig.4.21 – Relação entre a radiação directa e a radiação difusa para a cidade de Kassel

Grenoble, comparada com Kassel, apresenta um maior período em que a radiação directa é consideravelmente maior que a radiação difusa (figura 4.22), o que pode resultar de menores períodos com céu encoberto. O valor mais elevado da radiação directa ocorre, tal como para Kassel, em Julho.

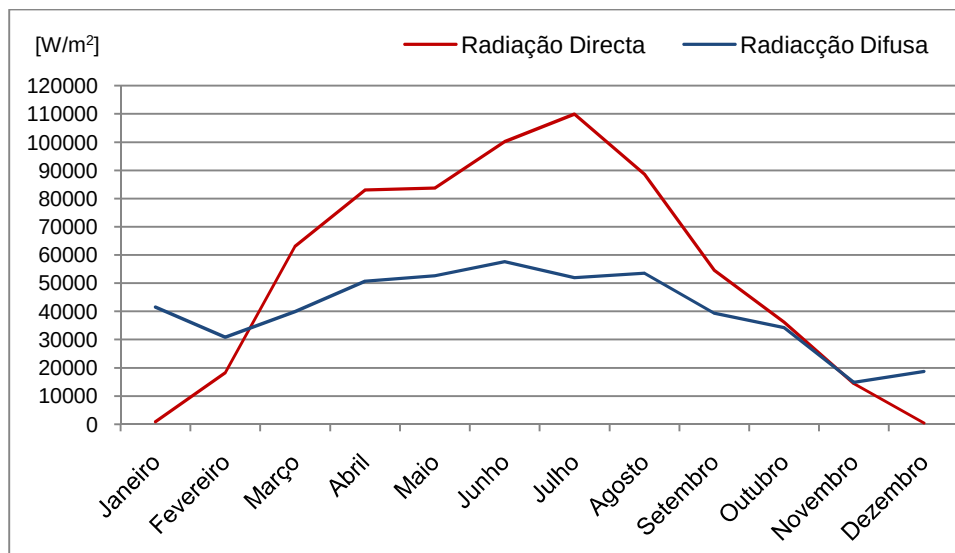


Fig.4.22 – Relação entre a radiação directa e a radiação difusa para a cidade de Grenoble

Como mostra o gráfico da figura 4.23, o cenário para Lisboa, é diferente dos demais países europeus. Lisboa apresenta, durante grande parte do ano, uma radiação directa em muito superior à difusa. Isto acontece porque o seu clima é mais ameno que o das restantes cidades em análise e, mesmo durante o Inverno, apresenta dias de céu pouco encoberto ou mesmo de sol.

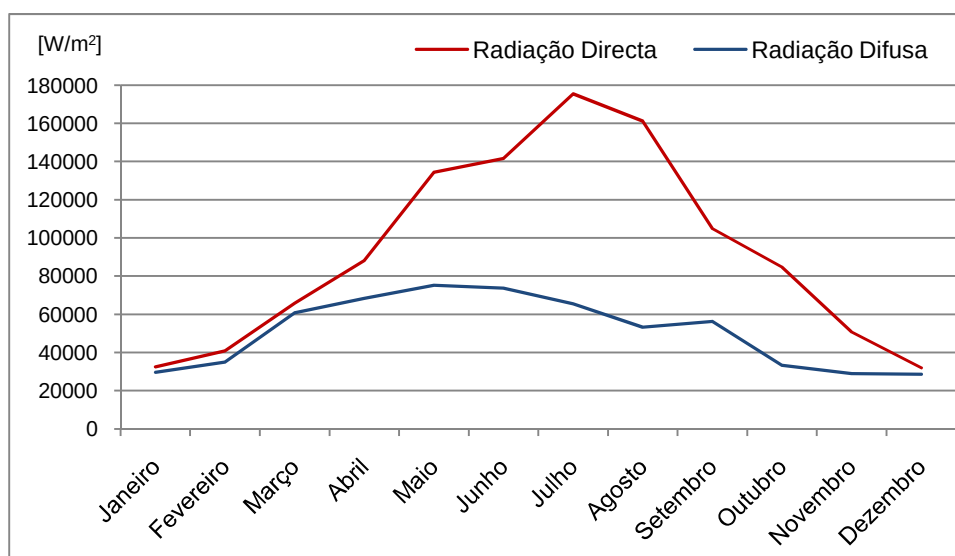


Fig.4.23 – Relação entre a radiação directa e a radiação difusa para a cidade de Lisboa

O gráfico da figura 4.24 apresenta a média mensal da radiação global ao longo do ano, para as quatro cidades em estudo. Pela análise do gráfico é possível concluir que a intensidade da radiação global é sempre superior nos meses de Verão. A diferença das médias mensais no Verão, para as cidades de Espoo, Kassel e Grenoble é muito pequena. Já Lisboa apresenta valores um pouco superiores aos das restantes cidades. Para os meses de Inverno a diferença da média das intensidades entre as várias cidades é relativamente maior.

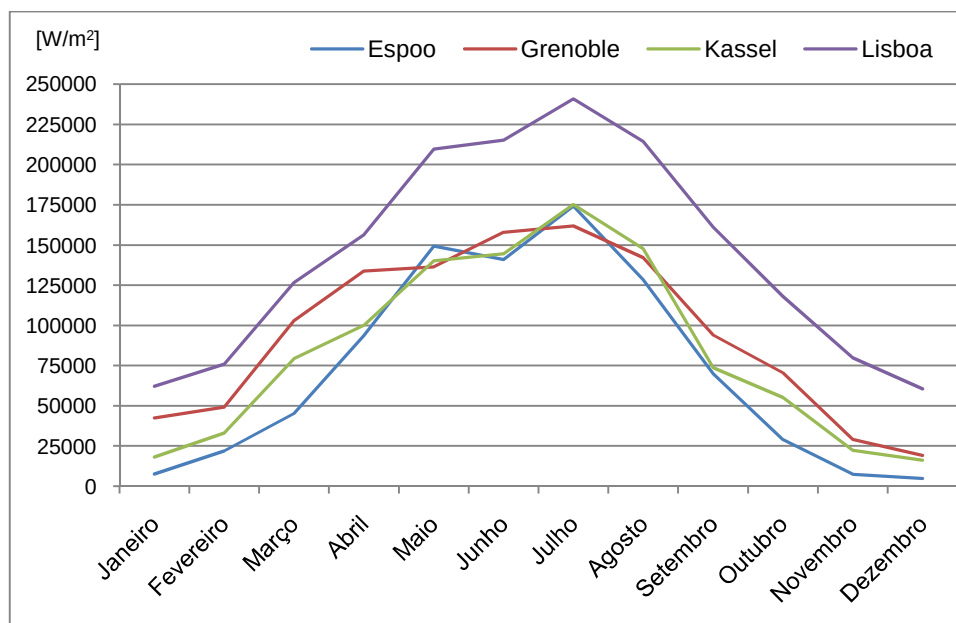


Fig.4.24 – Acumulados mensais para a radiação global nos quatro países em estudo

4.2.2.4. Temperatura de ponto de orvalho

Apesar de não ser um factor climático propriamente dito, a temperatura de ponto de orvalho do ar exterior é um parâmetro que deve ser tido em consideração, uma vez que o presente estudo é direccionado para a possibilidade de ocorrência de condensações. A temperatura de ponto de orvalho, como, referido no §2.1, corresponde à temperatura para a qual o vapor de água presente na atmosfera passa ao estado líquido, ou seja, condensa. Este valor depende directamente da temperatura e da humidade do ar e é calculado através da equação (2.16).

O gráfico da figura 4.25 apresenta a média anual para a temperatura de ponto de orvalho nos quatros países em estudo. Lisboa apresenta o maior valor para a temperatura de ponto de orvalho e Espoo a menor. Como era de prever a temperatura de ponto de orvalho é sempre menor que a temperatura do ar.

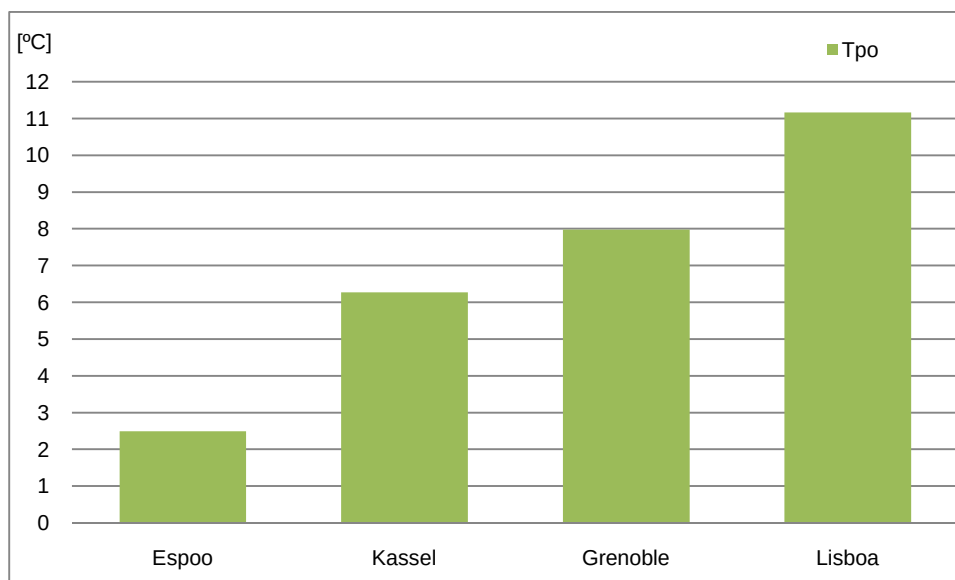


Fig.4.25 – Médias anuais para a temperatura de ponto de orvalho nos quatro países em estudo

No gráfico da figura 4.26 observa-se a evolução da média mensal para a temperatura de ponto de orvalho nos diferentes países em estudo. Os valores médios mensais para a temperatura de ponto de orvalho nos diferentes países em estudo são idênticos aos valores apresentados no gráfico da temperatura do ar (figura 4.13). O pico máximo ocorre no Verão, onde se verifica que nos meses mais quentes as diferenças na temperatura de ponto de orvalho são mais reduzidas que nos meses de Inverno, exactamente como acontece com a temperatura do ar exterior.

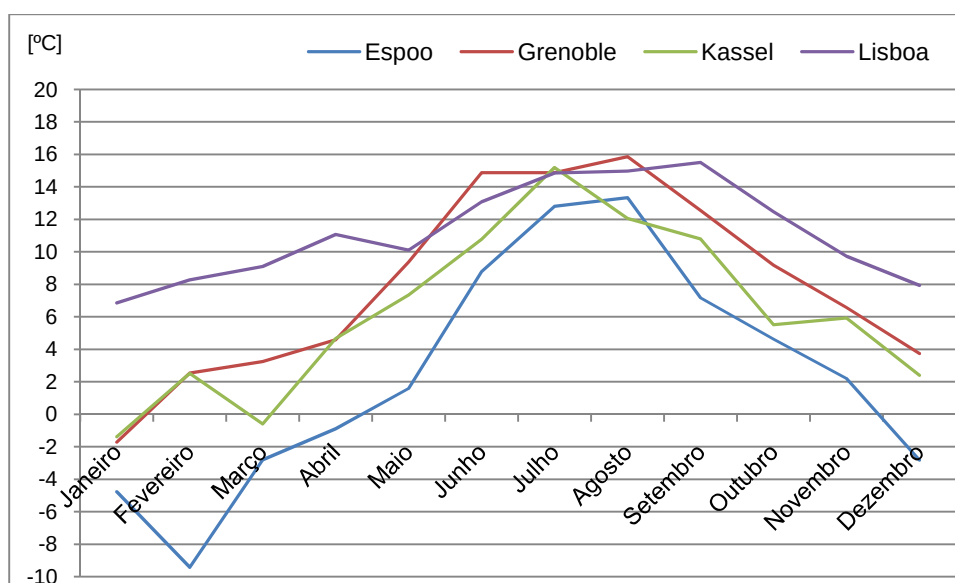


Fig.4.26 – Médias mensais para a temperatura de ponto de orvalho nos quatro países em estudo

4.2.2.5. Radiação atmosférica

Ao contrário da radiação solar, que provém directamente do sol, a radiação atmosférica é a radiação de onda longa emitida pelo céu. Esta radiação vai ser particularmente importante durante o período nocturno para o cálculo do balanço radiativo, condicionando a temperatura superficial (equações (4.6) e (4.11)).

O gráfico da figura 4.27 mostra as médias anuais para a radiação atmosférica nos quatro países em estudo, incidente numa superfície horizontal. Os valores horários da radiação atmosférica foram calculados directamente pelo programa WUFI, utilizando as equações (4.12) a (4.14) e considerando os valores da tabela 4.4.

Uma vez que esta radiação não depende directamente do sol, as médias para as diferentes cidades não vão ser muito diferentes, com a excepção da cidade de Espoo, onde o valor é consideravelmente menor. Verifica-se que as médias anuais da radiação atmosférica seguem a mesma tendência das médias anuais da temperatura de ponto de orvalho (figura 4.25) e da temperatura do ar (figura 4.12). Esta relação faz sentido, uma vez que a radiação atmosférica foi calculada em função daqueles dois parâmetros. Verifica-se ainda que a influência do índice de nebulosidade não é muito significativa, uma vez que não parece haver qualquer relação entre ele e os valores obtidos para a radiação atmosférica.

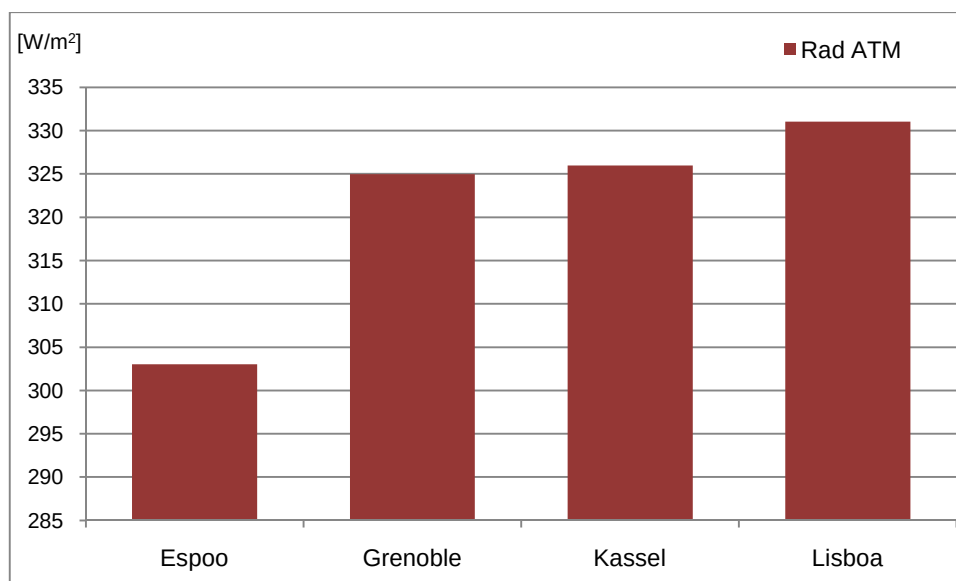


Fig.4.27 – Médias anuais para a radiação atmosférica nos quatro países em estudo

Da observação do gráfico da figura 4.28, verifica-se que a média mensal para a radiação atmosférica segue, tal como para os valores anuais, a mesma tendência da temperatura de ponto de orvalho do ar. As médias mensais da radiação atmosférica para Espoo são sempre menores do que para as restantes cidades, ao longo do ano. As médias mensais para Kassel e Grenoble são muito idênticas, no entanto, quando comparadas com as médias mensais de Lisboa, verifica-se que são sempre inferiores, excepto para os meses de Verão. Estes resultados fazem sentido porque, no Verão, em Lisboa, o céu se apresenta mais vezes limpo, o que reduz a radiação emitida pelo céu face as restantes cidades, devido ao efeito da janela atmosférica.

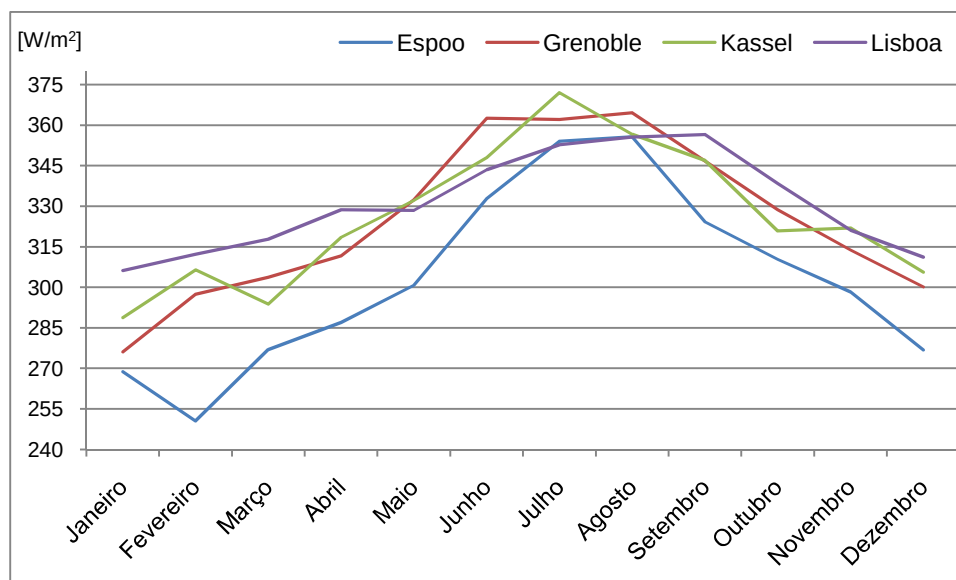


Fig.4.28 – Médias mensais para a radiação atmosférica nos quatro países em estudo

5

SIMULAÇÃO NUMÉRICA

5.1. RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO

5.1.1. NOTA INTRODUTÓRIA

Neste capítulo apresentam-se os resultados das simulações efectuadas, tendo em conta a ocorrência de condensações superficiais em fachadas revestidas com ETICS, localizadas em quatro cidades Europeias, Lisboa, Espoo, Kassel e Grenoble.

Numa primeira fase avaliou-se a influência da orientação na ocorrência de condensações para cada uma das cidades. Numa segunda fase, avaliou-se em detalhe a ocorrência de condensações na fachada Norte, apontando quais os parâmetros climáticos que mais influenciam o fenómeno em cada uma das cidades. De referir que a influência da chuva e do vento foi bloqueada nas simulações (§4.1.5).

5.1.2. ORIENTAÇÃO

Na realização deste estudo, foi avaliado o risco de ocorrência de condensações superficiais exteriores numa fachada revestida com ETICS, através do acumulado mensal das diferenças positivas entre a temperatura de ponto de orvalho e a temperatura superficial (equações (2.17) (2.18)). Os valores negativos foram considerados nulos e portanto sem condensações.

De modo a limitar os parâmetros a variar, e como já foi referido anteriormente, começou-se a análise pela simulação para as orientações Norte, Sul, Este e Oeste. Os gráficos das figuras 5.1, 5.4, 5.5 e 5.6 mostram os resultados das simulações efectuadas.

Pela observação do gráfico da figura 5.1 é notório que, para Lisboa, as duas fachadas em que as condensações são mais frequentes, atingindo valores relativamente próximos, são a fachada voltada a Norte e na fachada voltada a Este. Os valores para os acumulados de condensação nas fachadas Sul e Oeste são claramente mais reduzidos, mas também eles muito próximos. Quanto ao acumulado do número de horas correspondente às condensações, os valores são muito próximos para a fachada Norte e Este onde o valor do acumulado de condensações é maior, e é consideravelmente menor para as fachadas Sul e Oeste, onde o valor das condensações também é menor.

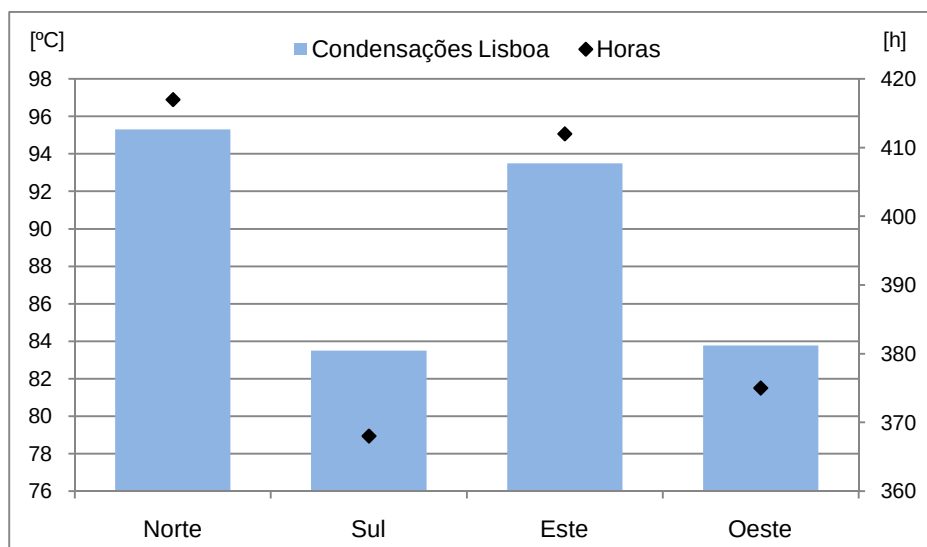


Fig.5.1 – Acumulado anual das condensações para Lisboa para as diferentes orientações da fachada

O gráfico da figura 5.2 mostra as médias da temperatura superficial exterior para cada uma das orientações da fachada. A fachada Sul apresenta uma temperatura superficial bastante mais elevada relativamente às outras fachadas, enquanto que a fachada Norte apresenta a menor temperatura. As fachadas Este e Oeste registam aproximadamente os mesmos valores. Estes resultados resultam da radiação solar que incide na fachada com diferentes orientações (figura 5.3). A parcela da radiação directa apresenta uma grande influência na radiação solar total incidente na fachada, uma vez que, tanto a radiação difusa como a reflectida apresentam os mesmos valores para todas as fachadas.

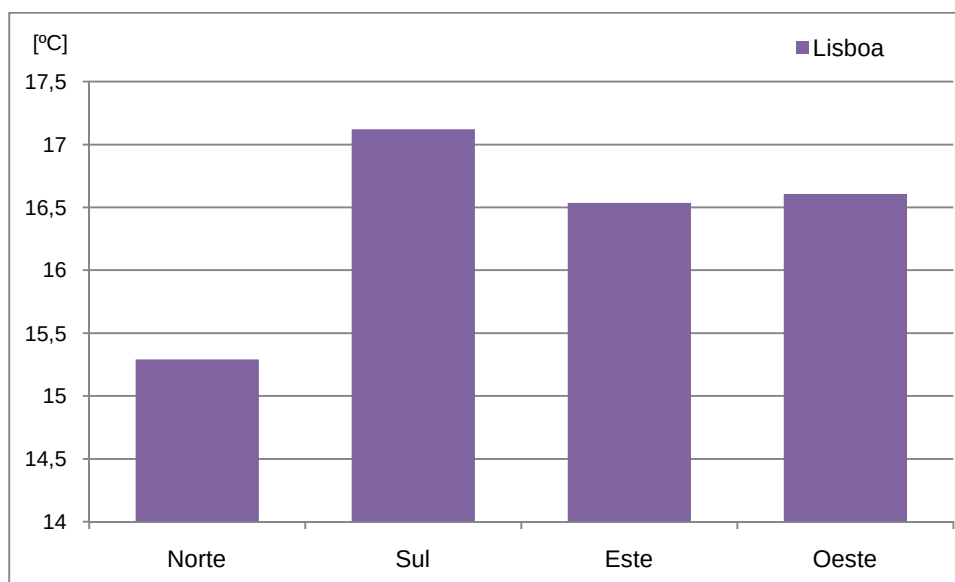


Fig.5.2 – Médias da temperatura superficial exterior em Lisboa nas diferentes orientações da fachada

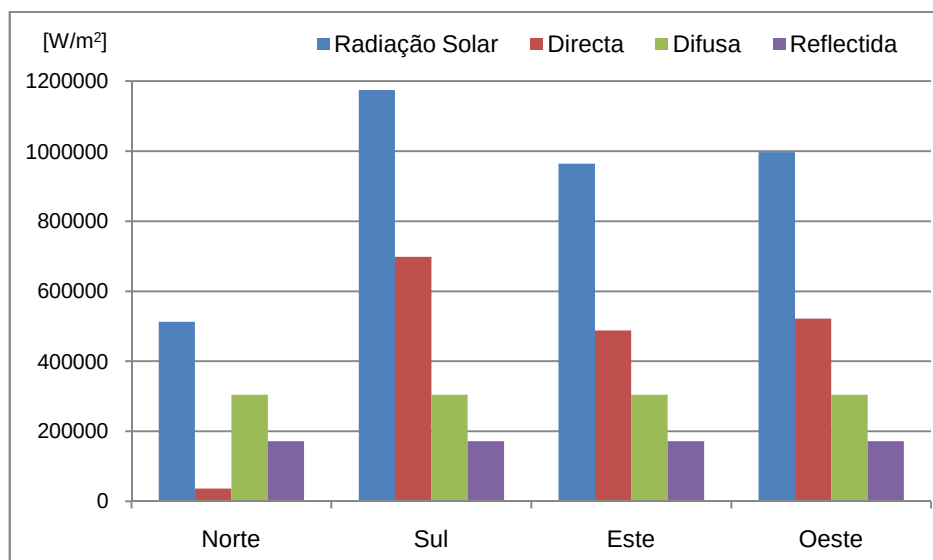


Fig.5.3 – Radiação que incide nas fachadas orientadas aos quatro pontos cardeais para a cidade de Lisboa

Para a fachada Norte a radiação directa é quase nula. Este facto condiciona a temperatura superficial, uma vez que, como não há sol directo a incidir na fachada, a sua temperatura nunca vai registar valores tão altos quando comparada com as outras fachadas. Assim é possível afirmar que, para a fachada Norte, é a radiação difusa que condiciona a temperatura superficial. Como para esta orientação a temperatura superficial vai ser aproximadamente igual à temperatura do ar (figura 4.12), a probabilidade de ocorrência de condensações vai ser superior (figura 5.1).

Na fachada Sul verifica-se o oposto. A radiação solar que incide na fachada atinge o seu valor mais alto e consequentemente a temperatura superficial também. Nesta fachada a temperatura superficial exterior vai ser, em geral, superior à temperatura do ar. Isto implica que a fachada esteja mais quente no início do período nocturno, podendo arrefecer gradualmente acompanhando a descida da temperatura do ar e, consequentemente, evitando condensações (figura 5.1).

A temperatura superficial registada para as fachadas Este e Oeste é relativamente próxima (figura 5.2), o que resulta dos valores da radiação solar serem também muito semelhantes (figura 5.3). No entanto, relativamente à ocorrência de condensações (figura 5.1), o cenário já vai ser ligeiramente diferente, uma vez que a fachada Este regista um acumulado de condensações anuais bastante superior ao da fachada Oeste. Isto acontece devido ao arrefecimento da fachada Este começar mais cedo, uma vez que na fachada Oeste o sol incide até ao pôr-do-sol retardando o início do arrefecimento no período nocturno, o que faz com que a temperatura superficial nessa altura seja superior.

Os gráficos das figuras 5.4, 5.5 e 5.6 representam o acumulado de condensações e o número de horas em que ocorrem para os restantes países em estudo. Para a cidade de Espoo (figura 5.4), a relação de ocorrência de condensações em função da orientação é idêntica ao observado para a cidade de Lisboa, no entanto o seu acumulado e o número de horas em que ocorrem é consideravelmente menor. Para Kassel (figura 5.5) e Grenoble (figura 5.6), o acumulado das condensações nas diferentes orientações da fachada é muito semelhante, no entanto, continua a ser a fachada Norte a registar maior valor.

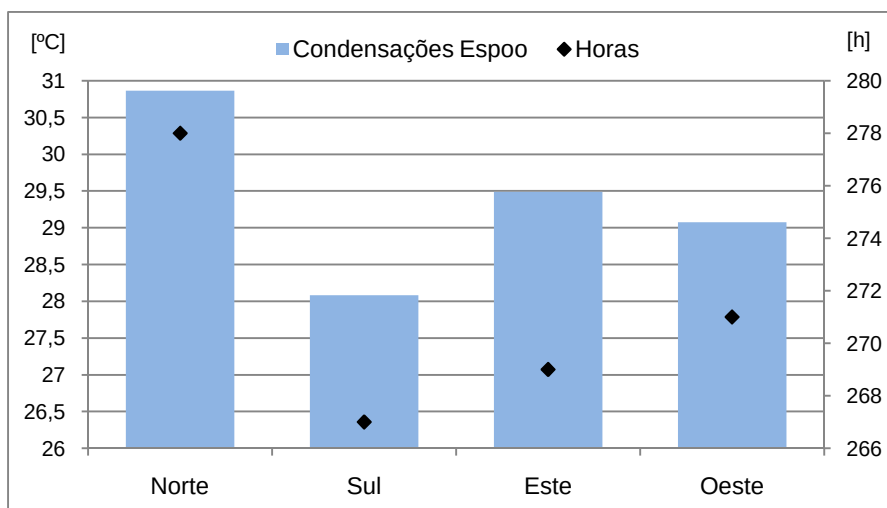


Fig.5.4 – Acumulado anual das condensações para Espoo nas diferentes orientações da fachada

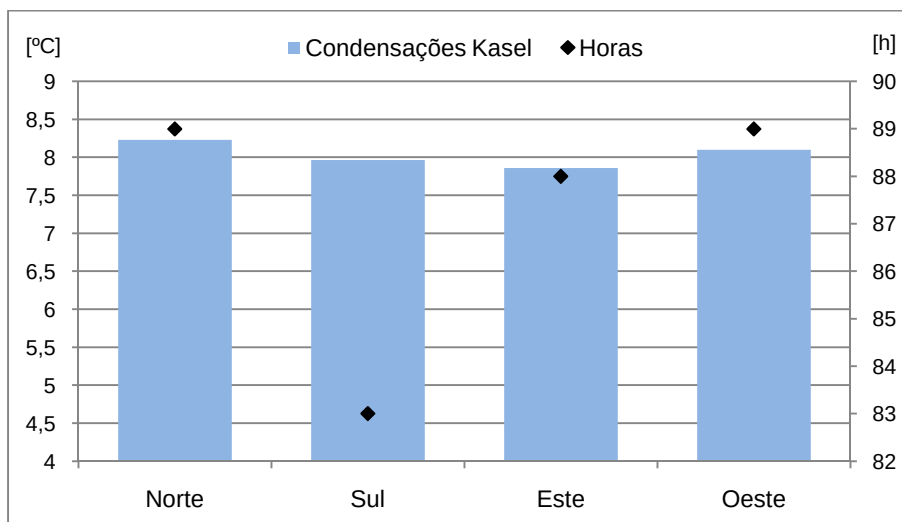


Fig.5.5 – Acumulado anual das condensações para Kassel nas diferentes orientações da fachada

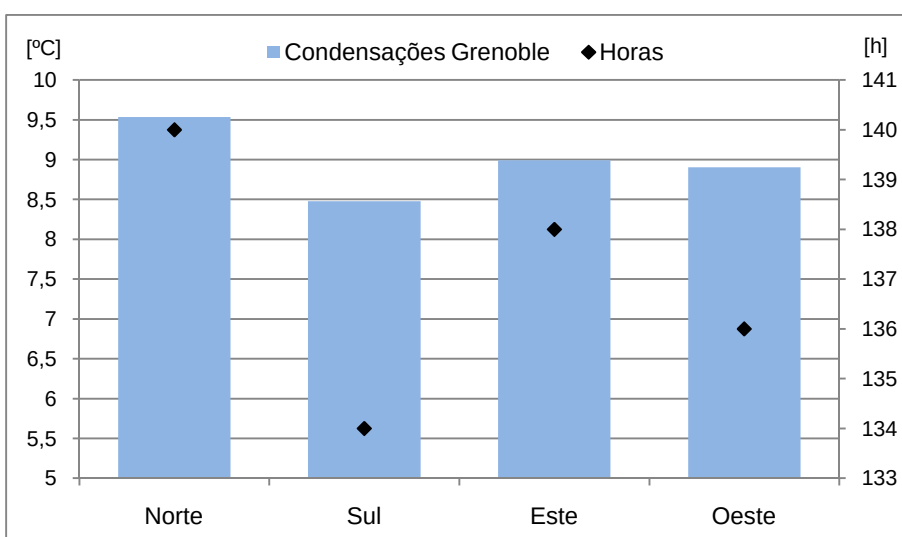


Fig.5.6 – Acumulado anual das condensações para Grenoble nas diferentes orientações da fachada

5.1.3. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA FACHADA NORTE

Em seguida apresenta-se um estudo mais detalhado da ocorrência de condensações para a fachada Norte, uma vez que é esta a mais afectada por este fenómeno, comparando as diferentes cidades em estudo.

O gráfico da figura 5.7 apresenta os valores para os acumulados anuais das condensações e número de horas em que estas ocorrem na fachada Norte. Lisboa apresenta anualmente um acumulado de condensações muito superior aos restantes países em estudo. Em Espoo as condensações correspondem apenas a um terço das verificadas para Lisboa e Grenoble e Kassel apresentam cerca de 10% das condensações de Lisboa. Em termos horários, verifica-se que quanto maiores os graus acumulados de condensações, maior o número de horas em que ocorrem.

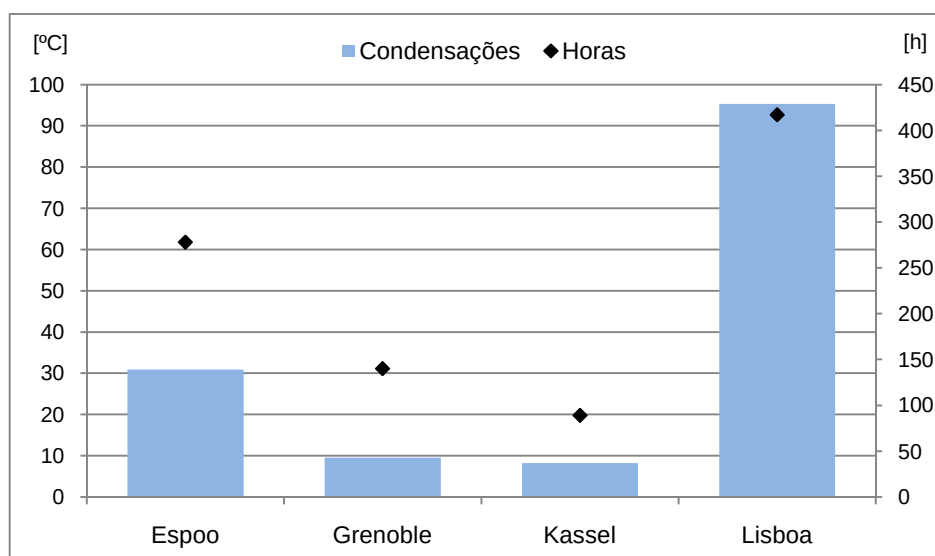


Fig.5.7 – Acumulado anual das condensações na fachada Norte para as diferentes cidades em estudo

A média dos valores horários da diferença positiva entre a temperatura de ponto de orvalho e a temperatura superficial, correspondente à ocorrência de condensações, são indicados no gráfico da figura 5.8. Verifica-se que Lisboa não só tem o maior acumulado de condensações como tem também o maior valor da média das diferenças horárias. No entanto Kassel, apesar de ter o menor acumulado, apresenta uma média das diferenças horárias superior a Grenoble, o que significa que, em média, a diferença positiva entre a temperatura de ponto de orvalho e a temperatura superficial é superior em Kassel.

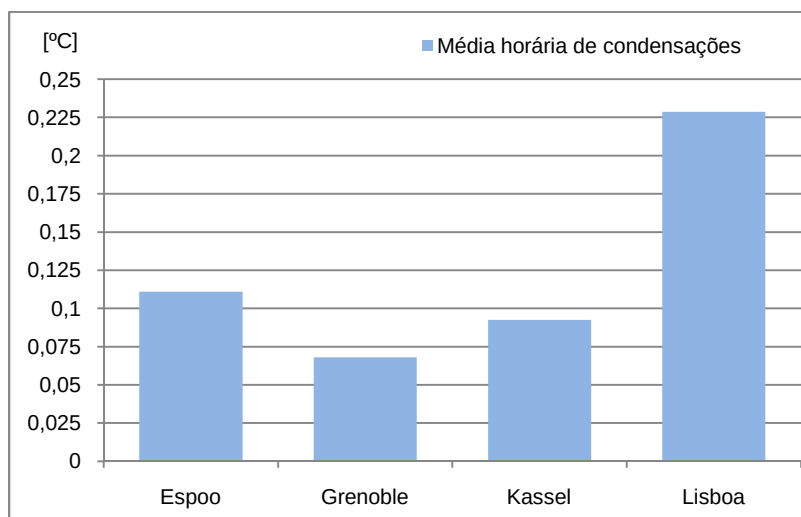


Fig.5.8 – Média horária das condensações na fachada Norte para as quatro cidades em estudo

O gráfico da figura 5.9 representa as médias mensais dos graus acumulados de condensações para as cidades em estudo. A distribuição mensal da ocorrência de condensações não é semelhante para as quatro cidades. Lisboa apresenta a maior ocorrência de condensações, como foi visto no gráfico da figura 5.7, com mais incidência nos meses de Inverno, nomeadamente em Dezembro, Janeiro, Fevereiro e Março. Para os meses de Verão Lisboa praticamente não regista ocorrência de condensações. Para os restantes países, verifica-se que as condensações ocorrem apenas no Verão com acumulados mensais muito reduzidos relativamente aos valores mais elevados de Lisboa.

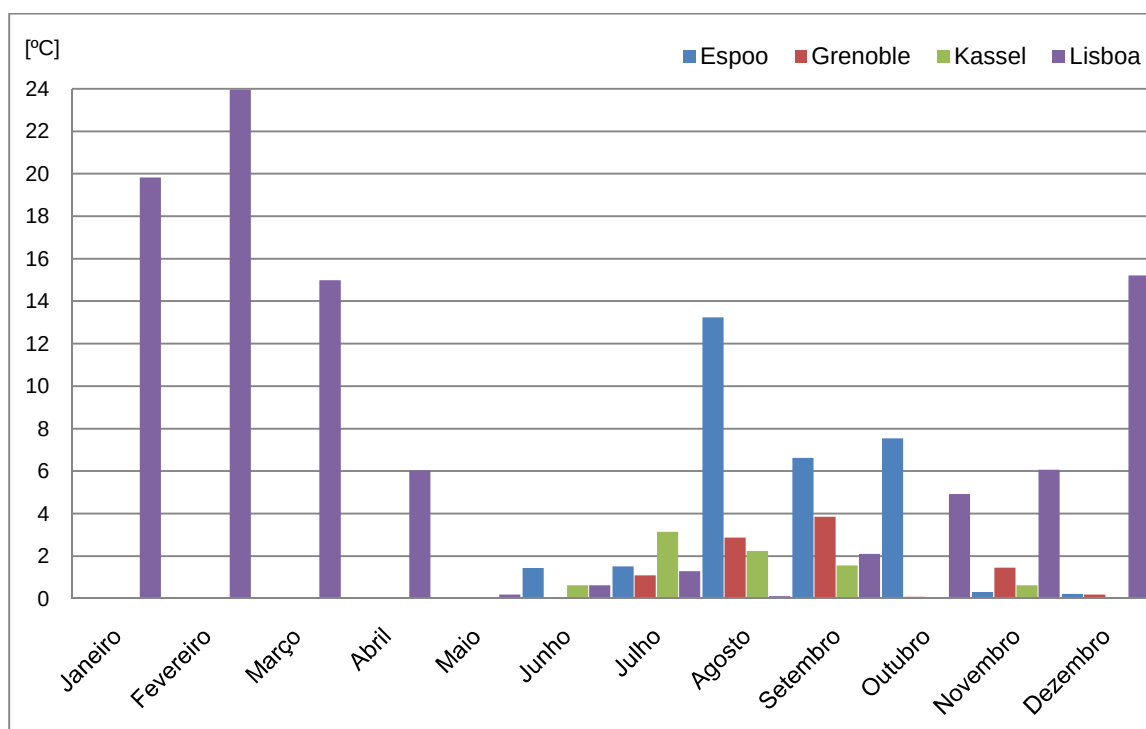


Fig.5.9 – Acumulado mensal das condensações na fachada Norte para as quatro cidades em estudo

O gráfico da figura 5.10 representa o número de horas em que ocorrem condensações por mês para cada cidade. O acumulado mensal das horas em que ocorrem condensações tem, de uma maneira geral, uma evolução semelhante ao valor dos graus acumulados de condensações. Há, contudo, situações em que a valores semelhantes de condensações correspondem número de horas muito diferentes, como é o caso do mês de Março para Lisboa e o mês de Agosto para Espoo. Com efeito, em Espoo as condensações ocorrem repartidas por mais horas. Os gráficos das figuras 5.11 e 5.12 mostram a distribuição horária das condensações para o mês de Março para Lisboa e para o mês de Agosto para Espoo. Para Lisboa as condensações apresentam-se repartidas por três momentos distintos, especialmente no final do mês, onde se observam grandes diferenças positivas entre a temperatura de ponto de orvalho e a temperatura superficial num curto espaço de tempo. Enquanto que em Espoo as condensações se encontram repartidas de forma idêntica ao longo do mês e com menores diferenças positivas entre as duas temperaturas.

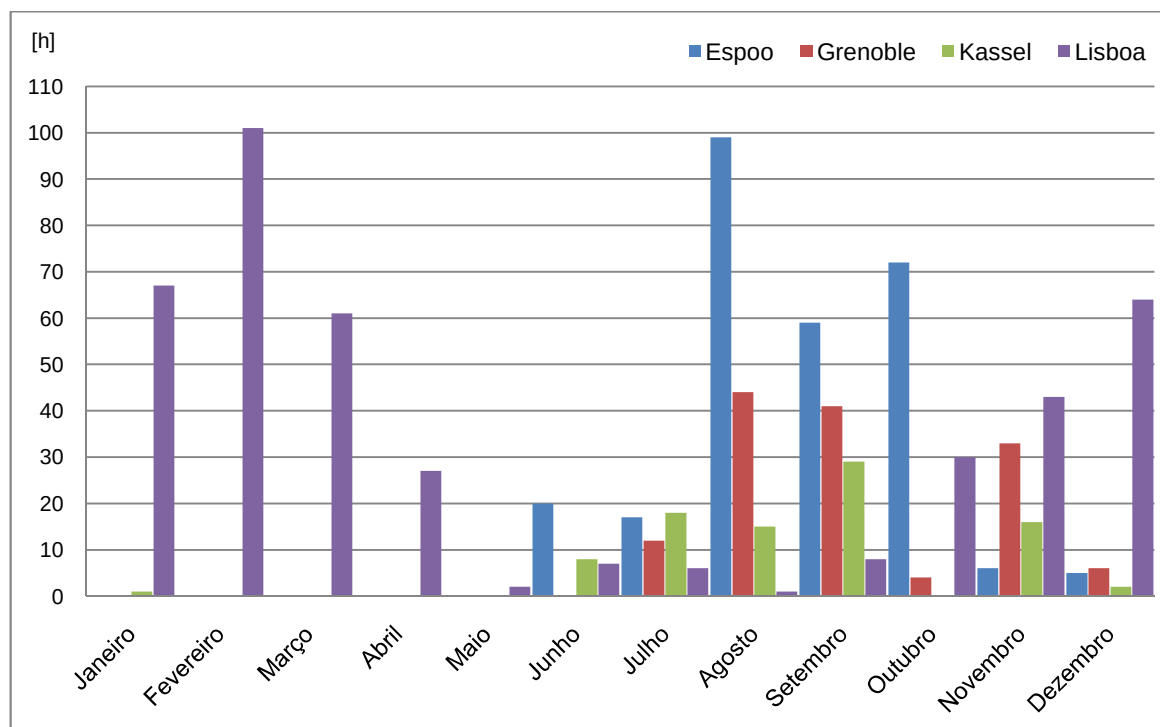


Fig.5.10 – Acumulado mensal do número de horas em que ocorrem condensações para as quatro cidades em estudo

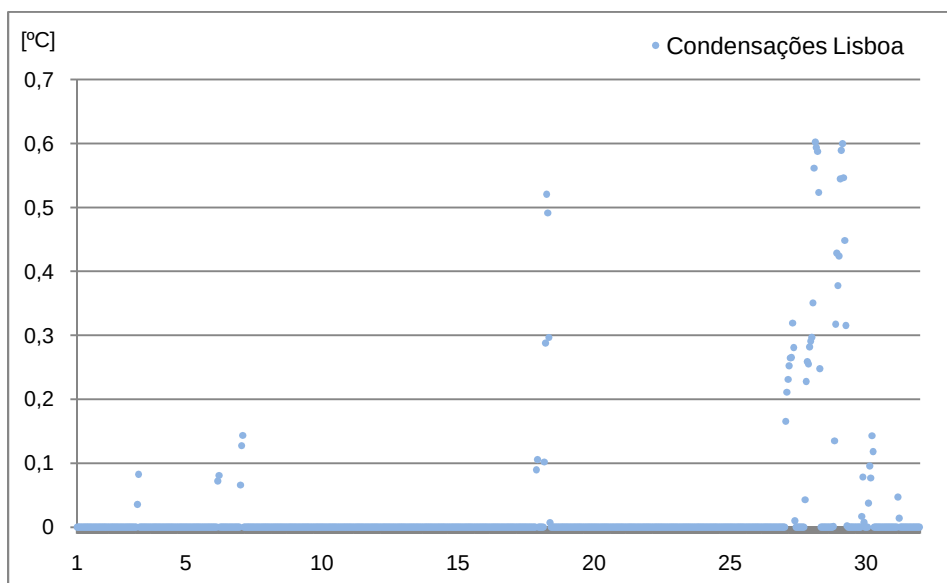


Fig.5.11 – Ocorrência de condensações no mês de Março para a cidade de Lisboa

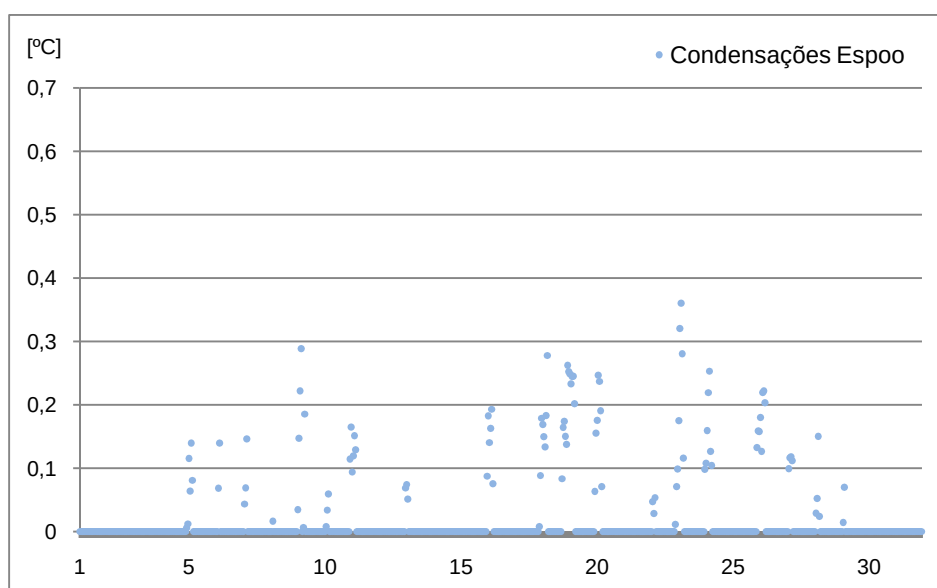


Fig.5.12 – Ocorrência de condensações no mês de Agosto para a cidade de Espoo

Para avaliar quais os parâmetros climáticos que mais influenciam a ocorrência de condensações nas diferentes cidades em estudo, foi escolhido o mês de Agosto. O gráfico da figura 5.13 mostra os valores horários das condensações para o mês de Agosto nas cidades em estudo. O dia 24 de Agosto foi um dos dias em que se verificou a ocorrência de condensações em todas as cidades, pelo que foi seleccionado para uma análise mais detalhada.

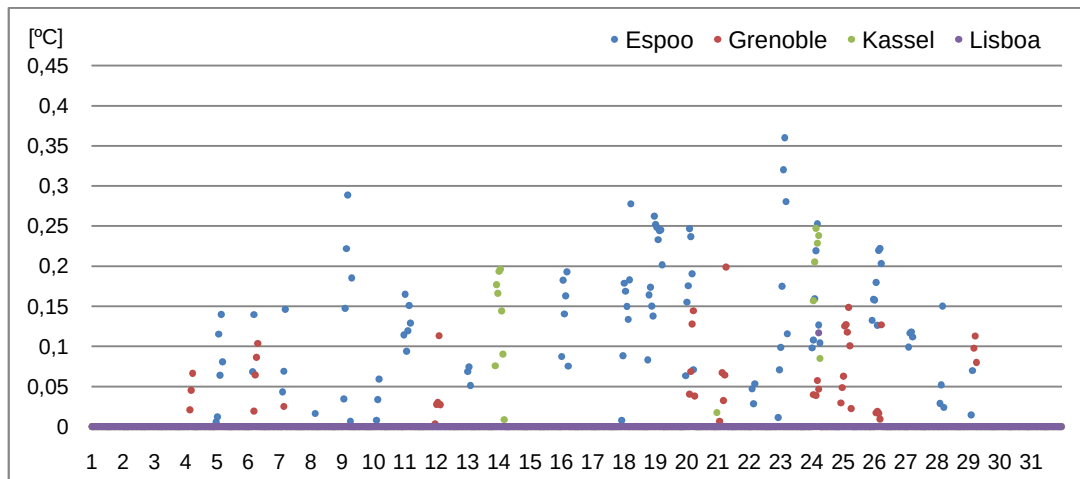


Fig.5.13 – Ocorrência de condensações no mês de Agosto para as cidades em estudo

Da análise dos gráficos da figura 5.14 conclui-se que as condensações ocorrem durante o período nocturno, normalmente a partir das 00:00 até às 07:00 horas, quando a temperatura superficial é inferior à temperatura de ponto de orvalho. Durante o dia a temperatura superficial é sempre consideravelmente superior à temperatura de ponto de orvalho do ar, devido ao efeito da radiação solar difusa. A temperatura superficial durante o dia 23 de Agosto é superior em Kassel, apesar de diminuir bruscamente a meio da tarde, o que corresponderá a um aumento de nebulosidade. Segue-se Grenoble e Lisboa, com temperaturas superficiais diurnas no dia 23 de Agosto muito próximas e com céu limpo, e finalmente Espoo, com temperatura significativamente mais baixa.

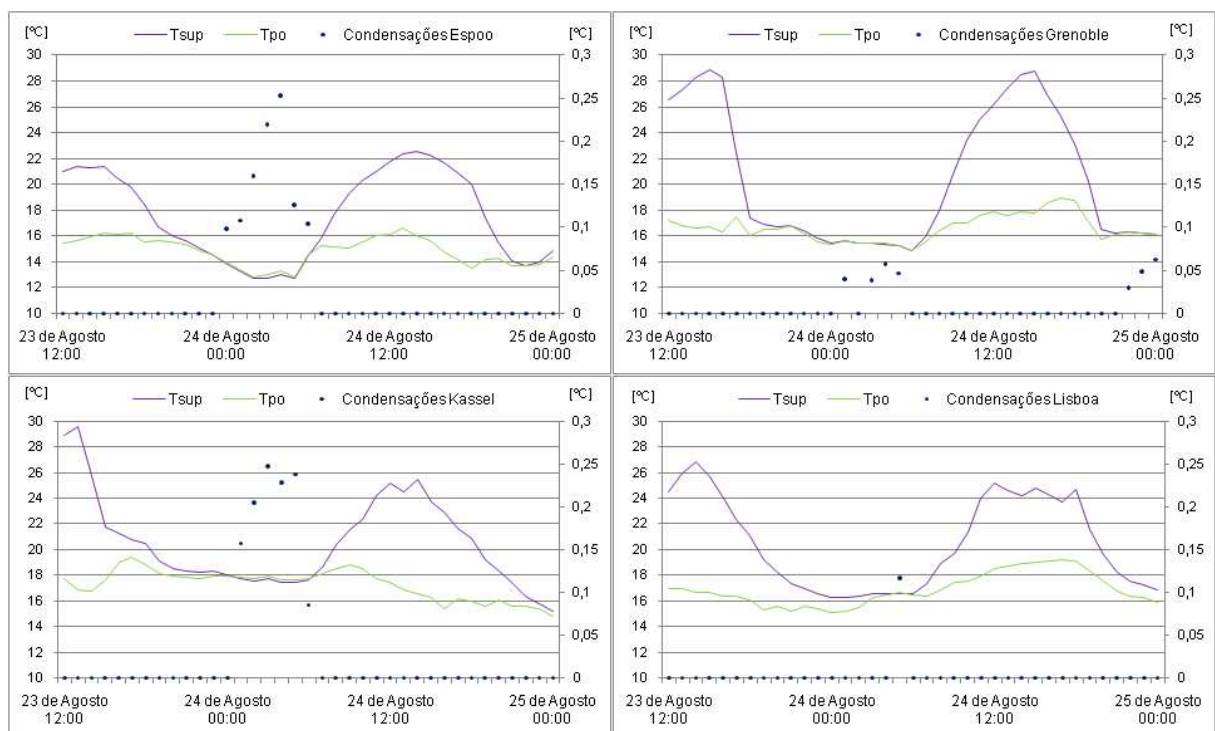


Fig.5.14 – Variação da temperatura superficial, da temperatura de ponto de orvalho do ar e das condensações para o dia 24 de Agosto para as quatro cidades em estudo

As temperaturas superficiais durante o dia 23 de Agosto resultam, como já foi referido, do efeito da radiação difusa, uma vez que a fachada em estudo está voltada a Norte. Os gráficos da figura 5.15 mostram a variação da radiação difusa que incide nas fachadas em cada uma das cidades.

Tal como seria de esperar, Espoo apresenta uma radiação incidente muito inferior às restantes cidades. Lisboa, que apesar de não apresentar a temperatura superficial mais elevada no dia 2 de Agosto, tem maior quantidade de radiação solar incidente e durante maior numero de horas, o que faz com que a temperatura superficial se mantenha mais elevada até ao final da tarde e início da noite. A redução acentuada da temperatura superficial em Kassel resulta, tal como já foi referido, de um período de céu encoberto ao final da tarde, identificado na figura 5.15 por uma diminuição brusca da radiação solar difusa.

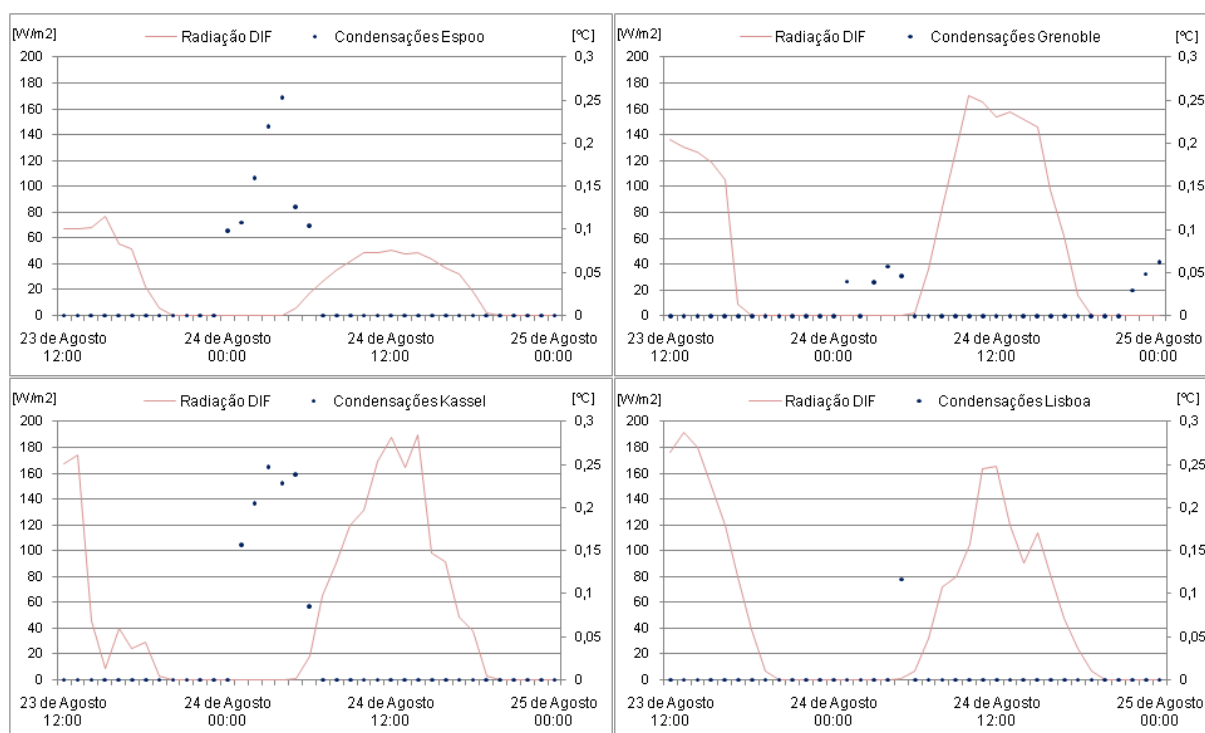


Fig.5.15 – Variação da radiação difusa e a ocorrência de condensações para o dia 24 de Agosto para as quatro cidades em estudo

Temperaturas mais elevadas durante o dia traduzem-se em temperaturas mais elevadas no período nocturno. Os gráficos da figura 5.16 mostram a variação da temperatura superficial, da temperatura de ponto de orvalho do ar e das condensações das 21:00 do dia 23 de Agosto às 09:00 do dia 24 de Agosto. Verifica-se que as condensações se iniciam mais cedo e têm maior amplitude em Espoo e em Kassel, devido à temperatura superficial ser mais baixa como resultado da menor radiação solar incidente na fachada antes do pôr-do-sol.

Em Espoo, em média, a diferença positiva entre a temperatura de ponto de orvalho e a temperatura superficial é da ordem dos 0,16 °C e em Kassel é cerca de 0,20 °C. Em Grenoble a média é de 0,04 °C e em Lisboa é de 0,12 °C, ocorrendo contudo neste último caso, em apenas uma hora.

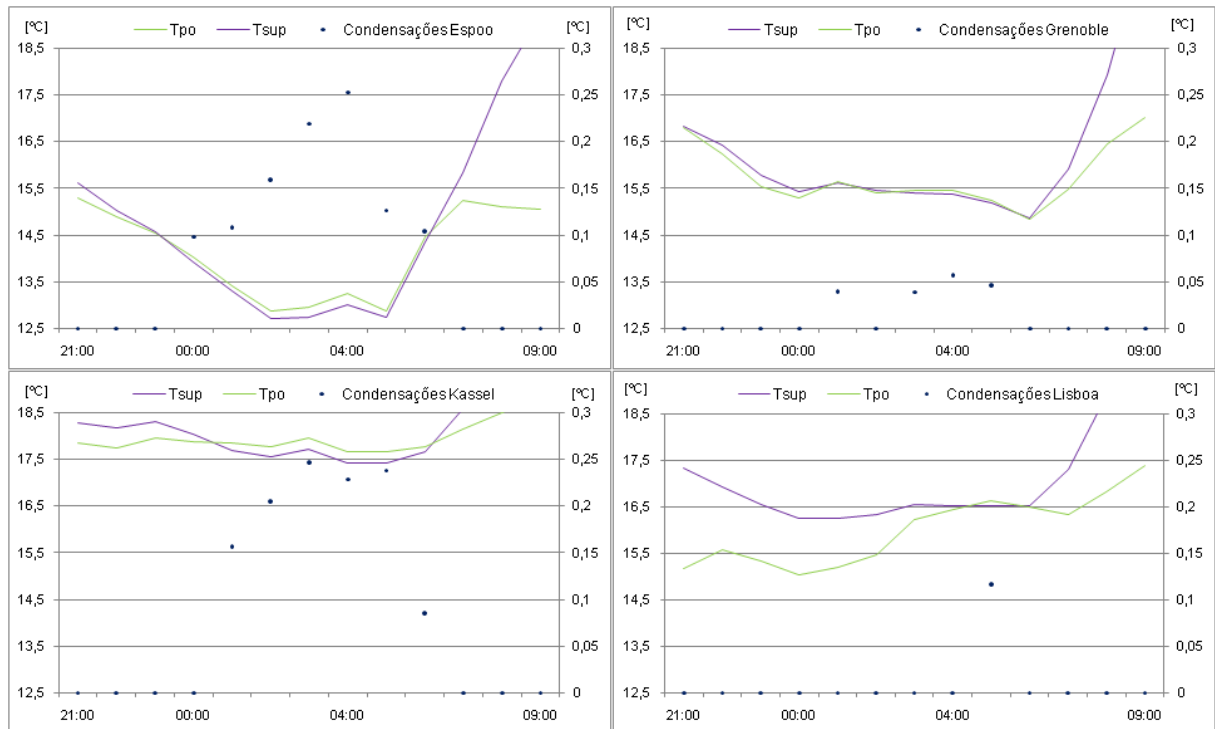


Fig.5.16 – Variação da temperatura superficial, da temperatura de ponto de orvalho do ar e das condensações das 21:00 do dia 23 de Agosto as 09:00 do dia 24 de Agosto para as quatro cidades em estudo

Os gráficos da figura 5.17 mostram a variação da radiação atmosférica no dia 24 de Agosto. Verifica-se que para Grenoble, Kassel e Lisboa os valores da radiação atmosférica são semelhantes durante a noite de 23 para 24 de Agosto, período em que ocorrem condensações. Por isso, as diferenças verificadas nas temperaturas superficiais das fachadas localizadas nestas três cidades, não resultam das diferenças nos valores da radiação atmosférica, mas sim do efeito do sol na fachada durante o dia 23. Relativamente a Kassel, o valor da radiação atmosférica neste dia é bastante superior aos valores das restantes cidades. Ainda assim, este aumento não condiciona a ocorrência de condensações, que é semelhante à verificada em Espoo. Tal facto pode significar que, neste caso específico, a redução da temperatura superficial ao final da tarde, devido a uma redução significativa da radiação solar, é mais condicionante do que o aumento da radiação atmosférica.

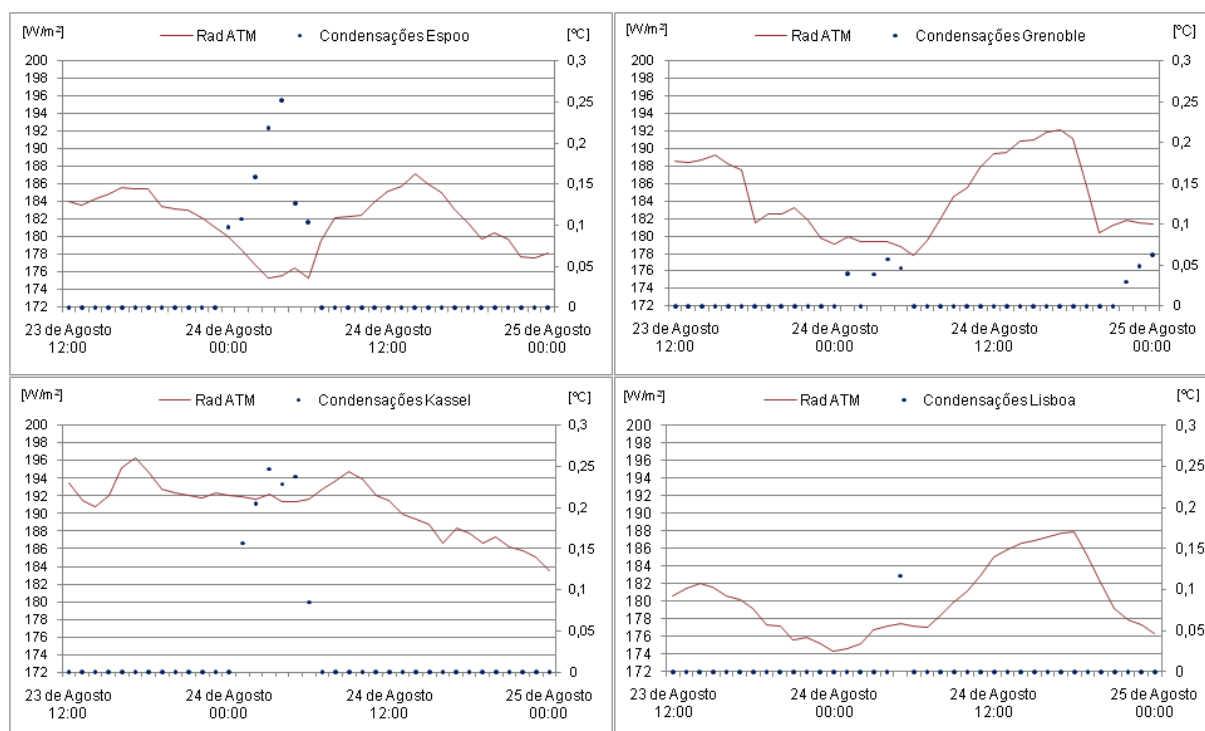


Fig.5.17 – Variação da radiação atmosférica e a ocorrência de condensações para o dia 24 de Agosto para as quatro cidades em estudo

As condensações dependem não só da temperatura superficial mas também da temperatura de ponto de orvalho do ar, que é função da temperatura e da humidade relativa do ar exterior. Os gráficos da figura 5.18 mostram, para o mesmo período em análise, a variação da temperatura e da humidade relativa do ar exterior.

Verifica-se que Espoo e Kassel apresentam valores mais elevados da humidade relativa no período nocturno. Como a temperatura do ar é mais baixa em Espoo do que em Kassel a temperatura de ponto de orvalho é também mais baixa, fazendo com que as diferenças positivas entre a temperatura ar e a temperatura de ponto de orvalho sejam também menores.

Em Grenoble e em Lisboa a humidade relativa do ar durante a noite é da ordem dos 90 – 95%, sendo, por isso, a temperatura de ponto de orvalho também mais baixa, o que diminui a probabilidade de ocorrerem condensações superficiais.

Como já foi referido, em Lisboa, apesar de apenas ocorrerem condensações numa hora, em termos de acumulados eles correspondem a um valor próximo do verificado em Grenoble, em que ocorrem condensações em quatro horas mas com menores diferenças entre a temperatura de ponto de orvalho e a temperatura superficial. Este facto resulta de um aumento da humidade relativa do ar às 05:00 do dia 24 de Agosto em Lisboa, que corresponde a um aumento brusco da temperatura de ponto de orvalho nesse período.

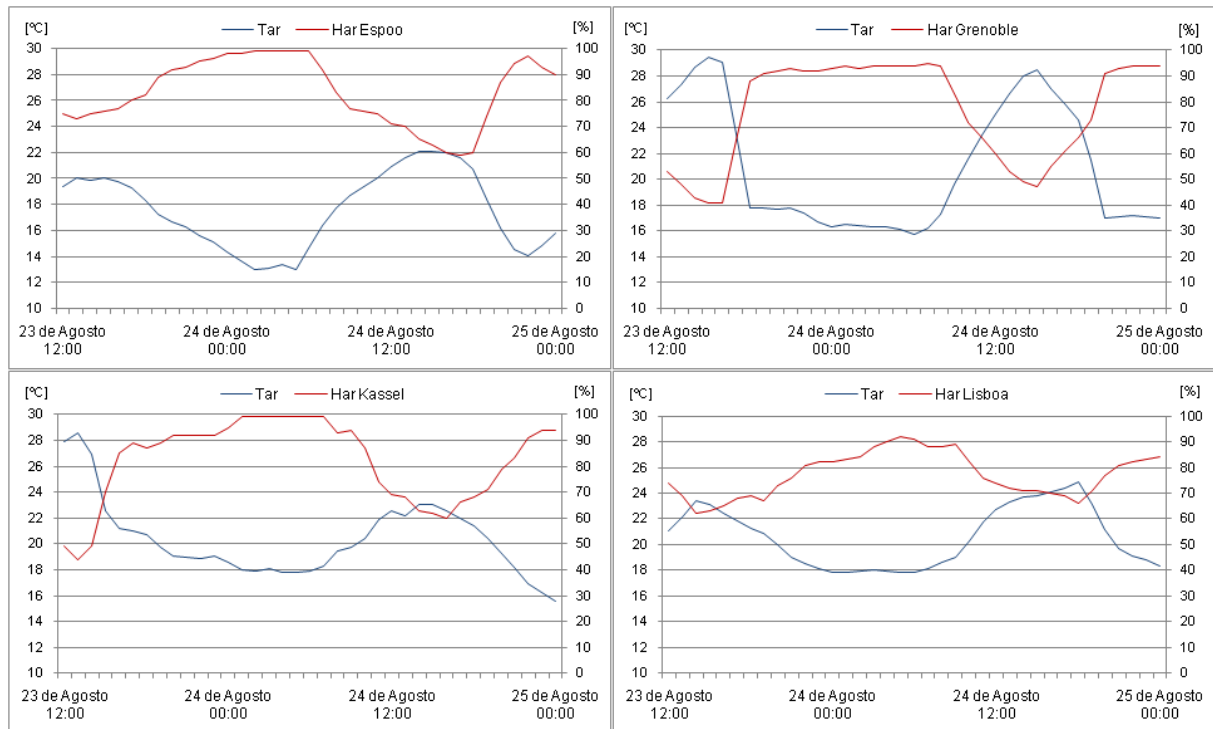


Fig.5.18 – Variação da temperatura e da humidade relativa do ar exterior para o dia 24 de Agosto para as quatro cidades em estudo

5.2. SÍNTESE CRÍTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO

Inicialmente neste capítulo foram apresentados os resultados das simulações numéricas efectuadas com o programa WUFI Pro 4.2. Numa primeira fase deste estudo o objectivo foi determinar a influência dos quatros pontos cardeais (N, S, E e O) na ocorrência de condensações superficiais exteriores em fachadas, sendo numa segunda fase do estudo, avaliado o comportamento da fachada Norte, uma vez que era a fachada mais afectada pelo fenómeno da ocorrência de condensações.

A orientação da fachada tem alguma influência no fenómeno da ocorrência das condensações superficiais em fachadas revestida com ETICS, uma vez que, consoante a orientação da fachada, a probabilidade de ocorrerem condensações também vai variar. Isto deve-se ao facto da radiação solar incidente sobre a fachada variar consoante a orientação.

Foi possível afirmar que para todos os países, a fachada Norte foi sempre a mais afectada por este fenómeno. Uma vez que para esta orientação, a radiação directa é quase nula, pois não há sol directo a incidir sobre a fachada, a radiação solar condicionante é a radiação difusa. A radiação solar condiciona a temperatura superficial da fachada, mesmo durante a noite, influenciando assim a probabilidade de ocorrência de condensações.

Analisando em detalhe a fachada Norte, e em termos de ocorrência de condensações, quando comparando as quatro cidades, Lisboa destaca-se por apresentar os maiores valores para os acumulados mensais. No entanto, para Lisboa, as condensações ocorrem durante os meses de Inverno, ao contrário das restantes cidades, onde a maior probabilidade de ocorrência de condensações é durante o Verão.

O dia 24 de Agosto registou a ocorrência de condensações para todas as cidades. Verificou-se que as condensações ocorrem durante o período nocturno, quando a temperatura superficial é inferior à

temperatura de ponto de orvalho, uma vez que durante o dia, o efeito da radiação solar difusa faz com que a temperatura superficial seja consideravelmente superior à temperatura de ponto de orvalho do ar. Assim, se a radiação solar incidente apresentar grande intensidade a temperatura superficial da fachada tende a aumentar, e se o céu se apresentar mais encoberto a intensidade da radiação diminui, provocando uma diminuição na temperatura superficial.

A temperatura de ponto de orvalho do ar é condicionada pela temperatura e pela humidade relativa do ar exterior. Quando durante o período nocturno se verificam valores da humidade relativa maiores, a temperatura de ponto de orvalho também aumenta. Com o aumento da temperatura de ponto de orvalho, aumenta a probabilidade da temperatura superficial da fachada ser inferior à temperatura de ponto de orvalho, aumentando assim a probabilidade de ocorrência de condensações.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As condensações superficiais exteriores são um fenómeno corrente em fachadas que utilizam os sistemas de isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS. No entanto apesar das suas vantagens, esta patologia causa alguma descrença por parte dos utilizadores, pois apesar de não constituir nenhum problema em termos térmicos, provoca uma degradação do aspecto visual da fachada, devido ao desenvolvimento de microrganismos.

Todo o estudo teve por base a realização de simulações numéricas. O programa utilizado para as efectuar foi o WUFI Pro 4.2, que, com base nos dados fornecidos para as diferentes simulações, gerou os valores da temperatura superficial, da radiação solar e da radiação atmosférica incidente na fachada. Uma vez obtidos os valores horários, determinou-se a temperatura de ponto de orvalho, a partir dos dados climáticos, e comparou-se com a temperatura superficial. A diferença positiva das duas temperaturas correspondia à ocorrência de condensações superficiais.

As condensações ocorrem durante o período nocturno, quando há um arrefecimento da fachada, provocado pelas trocas radiativas, quando o valor para temperatura superficial é inferior à temperatura de ponto de orvalho do ar. Foram estudados alguns dos parâmetros que influenciam a ocorrência de condensações, nomeadamente:

- A localização – Verificou-se que para as diferentes cidades estudadas o clima desempenhava um papel fundamental na ocorrência das condensações, pois consoante a temperatura e a humidade relativa do ar exterior, a temperatura de ponto de orvalho apresentam valores diferentes. Por outro lado, a intensidade da radiação solar também varia com a localização, condicionando a temperatura superficial. A radiação atmosférica também variou com a localização mas não de uma forma tão significativa quanto à radiação solar, pelo que a sua influência na ocorrência de condensações não foi tão evidente. Assim para cidades com climas mais frios, Grenoble, Kassel e Espoo, as condensações ocorriam essencialmente na Primavera e no Verão, enquanto que em Lisboa, as condensações verificam-se essencialmente nos meses de Inverno.
- A orientação – A radiação solar incidente na fachada vai influenciar a ocorrência de condensações, porque também influencia a temperatura superficial durante a noite. Foi concluído que, para as quatro cidades em estudo, a fachada Norte era a que apresentava maior acumulado de condensações. Como a radiação solar é menor na fachada Norte, a sua temperatura superficial é mais fria no início do período nocturno tornando-se mais

rapidamente inferior à temperatura de ponto de orvalho do ar e consequentemente originado mais condensações.

- Os parâmetros referentes à chuva incidente e ao vento foram bloqueados para não introduzir mais factores de variação ao presente estudo.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS DA INVESTIGAÇÃO NESTE DOMÍNIO

Este trabalho apesar de apresentar uma ideia da influência do clima na ocorrência de condensações superficiais, deve ser interpretado com algum cuidado. Como foram bloqueados os parâmetros relativos à chuva incidente e à influência do vento, não é possível ter uma ideia exacta se os valores obtidos das simulações estão totalmente correctos, uma vez que estes dois factores podem ter bastante importância na determinação da ocorrência de condensações superficiais exteriores. Por isso, de futuro, deverá avaliar-se qual a influência do vento na ocorrência de condensações superficiais, e principalmente, tentar perceber se essa influência tem efeitos opostos ao efeito da radiação solar, da radiação atmosférica e da temperatura de ponto de orvalho. Por outro lado, é fundamental avaliar o peso relativo de cada parâmetro climático na ocorrência de condensações superficiais exteriores.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mendonça, L. *Condensações em Edifícios*. Revista Arquitectura & Vida, nº 63, Set. 2005, pp.71-74
- [2] Valério, J. *Avaliação do Impacte das Pontes Térmicas no Desempenho Térmico e Energético de Edifício Residenciais Correntes*, Instituto Superior Técnico, Universidade técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.
- [3] Barreira, E., Delgado, J., Ramos, N., Freitas, V. *Análise de Condensações Internas em Paredes, Aplicação de Métodos de Diferente Complexidade*
- [4] <http://www.colegioweb.com.br/fisica/transmissao-de-calor-e-conveccao.html> (21/03/2010)
- [5] Soares, E. *Transmissão de calor e necessidades energéticas*. <http://www.youblisher.com/p/76223-Transmissao-de-Calor-e-Necessidades-Energeticas/> (21/03/2010)
- [6] Rites, S. *Simulação Numérica do Comportamento Higrométrico de Fachadas*, Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.
- [7] http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema895/modulo1_biotranscal.pdf (21/03/2010)
- [8] Barreira, E. *Degradação biológica de fachadas com sistemas de isolamento térmico pelo exterior devido ao desempenho higrométrico*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.
- [9] Equipa Proclira. *Radiação Solar e Terrestre*. Julho 2007.
<http://www.proclira.uevora.pt/modulos/modulo3.pdf> (21/03/2010)
- [10] Grupo de Trabalho do Atlas. *Radiação solar*. Notícia Explicativa I.3, Secretaria do Estado do Ambiente e Recursos Naturais, Lisboa, 1988
- [11] <http://www.geog.ufpr.br/disciplinas/Texto01.htm> (21/03/2010)
- [12] Tolentino, M., Rocha-Filho, R. *A Química no Efeito de Estufa*, Revista Química e Sociedade, Nº8, Novembro 1998, pp.10-14.
- [13] Vale, M. *Simulação numérica da transferência de humidade em materiais de construção*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1999.
- [14] http://www.meteo.pt/pt/areaeducativa/interpretar_tempo/grandezas/index.html?page=humidade.xml (26/04/2010)
- [15] Barreira, E., Delgado, J., Ramos, N., Freitas, V. *Exterior condensations on façades: numerical simulation of the undercooling phenomenon*. Journal of Building Performance Simulation, 2 de Fevereiro de 2010, Porto.
- [16] Freitas, V. *Isolamento Térmico de Fachadas pelo Exterior – Reboco Delgado Armado sobre Poliestireno Expandido (ETICS)*, Relatório – HT 191º/02, Prof. Engº Vasco Peixoto de Freitas,Lda, Porto, 2002.
- [17] Freitas, V., Gonçalves, P. *Isolamento térmico de fachadas pelo exterior – Reboco Delgado Armado sobre Poliestireno Expandido, ETICS*. <http://paginas.fe.up.pt/~vpfreita/ETICS.pdf> (21/03/2010)
- [18] Kunzel, H.; Sedlbauer, K. *Biological growth on stucco. Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII: Integration of Buildings Envelopes*, Florida, 2001.

- [19] RCCTE, *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios* (Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de Abril), Diário da República nº67, I Série, pp. 2468-2513, Lisboa, Portugal.
- [20] Barreira, E. *Condensações Superficiais Exteriores, em WUFI 2010*. Workshop sobre Simulação Higrométrica. Porto, FEUP, Março 2010.
- [21] Delgado, J. *Influência das condições climáticas exteriores, em WUFI 2010*. Workshop sobre Simulação Higrométrica. Porto, FEUP, Março 2010.
- [22] Kehrner, M. *Radiation effects on exterior surfaces*. WUFI Workshop NBI/ SINTEF, 2008, Copenhagen, Denmark.
- [23] WUFI. *WUFI Pro 4.2, Fraunhofer – IBP*. Holzirchen, Germany, 2008.
- [24] Meteotest. *Meteonorm – Version 6.0*. Meteotest, Bern, Switzerland, 2007.
- [25] <http://www.climatedata.eu/> (01/06/2010)
- [26] http://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%B6ppen_climate_classification (01/06/2010)
- [27] <http://www.aesap.edu.pt/Geografia/elementosclima.htm> (01/06/2010)
- [28] http://wikilusa.com/wiki/Predefini%C3%A7%C3%A3o:Mapa_pol%C3%ADtico_da_Europa_2 (19/04/2010)
- [29] <http://energiabarata.blogspot.com/2009/08/energia-solar-em-portugal-e-na-europa.html> (19/04/2010)
- [30] Sepúlveda, J. Sistema Capotto – ETICS.
<http://engenhariacivil.wordpress.com/2007/05/21/sistema-capotto-etics/> (21/03/2010)

