

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DE UM
OBSTÁCULO NA TEMPERATURA
SUPERFICIAL DE FACHADAS
REVESTIDAS COM ETICS – O CASO DE
ESTUDO DA FEUP**

MARIANA ARAÚJO GAMA CONSTANTE ROCHA

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

Orientador: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

JULHO DE 2011

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

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 - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

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 ao meu irmão

O desejo mede os obstáculos e a vontade vence-os

Alexandre Herculano

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho só foi possível devido ao apoio incondicional prestado por um conjunto de pessoas às quais quero manifestar os meus sinceros agradecimentos.

À Professora Eva Barreira por todo o apoio e disponibilidade demonstrados ao longo deste meses de trabalho e pela imprescindível motivação e conselhos que foram dados.

A todos os meus amigos que ouviram os meus desabafos e medos e me incentivaram e ajudaram a alcançar todas as metas que pretendia com este trabalho. Em particular ao meu amigo João Granado pela paciência e ajuda com o programa Photoshop CS5.1.

À minha mãe pela serenidade, paz e apoio que todos os dias me transmitiu durante esta fase de grande stress e preocupações, ao meu irmão por acreditar incondicionalmente em mim e no meu melhor e por fim, agradeço ao meu pai por todo o amor e paciência que me deu.

RESUMO

Devido às crescentes preocupações com a diminuição dos gastos energéticos e com a durabilidade das construções, novas soluções construtivas têm vindo a ser desenvolvidas. De todas, uma das mais utilizadas na actualidade é o sistema de isolamento pelo exterior de edifícios do tipo ETICS - Sistemas de Reboco Delgado Armado sobre Isolamento Térmico Exterior. Este sistema proporciona melhorias não só do ponto de vista do conforto térmico e da durabilidade das edificações, mas também do ponto de vista económico devido ao baixo custo e facilidade de aplicação em obra. No entanto, apesar das vantagens que este tipo de sistema oferece, também lhe são associados problemas, nomeadamente o desenvolvimento de microrganismos na sua superfície exterior. Esta patologia, apesar de apenas provocar degradação do aspecto de fachadas, tem grande impacto pois causa o descontentamento dos utilizadores, condicionando a sua implantação.

O desenvolvimento biológico está relacionado com a humidificação da superfície de fachadas revestidas com ETICS, que pode ocorrer através de condensações superficiais associadas à diminuição da temperatura superficial, principalmente durante a noite, devido a trocas radiativas. Este fenómeno está dependente de diversos factores que influenciam as trocas de radiação de onda longa, entre eles, a presença de obstáculos. Diferentes obstáculos na proximidade de fachadas revestidas com ETICS afectam a ocorrência de condensações superficiais de formas distintas, provocando, conseqüentemente, degradações visuais desiguais.

O objectivo fundamental deste trabalho consistiu em avaliar o efeito de obstáculos na temperatura superficial de fachadas revestidas com ETICS, analisando os diferentes níveis de degradação visual.

Assim foi utilizado o programa de simulação numérica WUFI Pro 4.2 para analisar o comportamento higrotérmico das fachadas e determinar as temperaturas superficiais exteriores. Neste modelo de cálculo foi incluído uma rotina para simular a influência de obstáculos na temperatura superficial durante o período nocturno.

A validação dos resultados de simulação foi realizada através do desenvolvimento de uma metodologia, que permitiu realçar visualmente os diversos níveis de degradação das fachadas devido ao desenvolvimento desigual de microrganismos, provocado pela presença de diferentes obstáculos.

PALAVRAS-CHAVE: ETICS, Degradação visual, Condensações superficiais, Obstáculos, Simulação numérica.

ABSTRACT

Due to growing concerns about the decrease in energy costs and the requirements of durability in construction, new constructive solutions have been developed. Of all, one of the solutions most used nowadays is the insulation systems called ETICS – Exterior Thermal Insulation Composite Systems. This system provides improvements not only in terms of thermal comfort and durability of buildings but also on an economic point of view due to low cost and ease of application on site. However, despite the advantages that this type of system offers, it is also associated with problems, mainly the development of microorganisms on the outer surface. This pathology, despite only causing deterioration of the exterior of the facades, is of great importance because it causes dissatisfaction of users that conditions its implementation.

Biological development is related to wetting of the surface of facades coated with ETICS that can occur through condensation on the surface associated with the decrease in surface temperature, especially during the night due to radiative exchanges. This phenomenon is dependent on several factors that influence the exchange of long wave radiation, including the presence of obstacles. Different obstacles in the surrounding of the facades coated with ETICS affect surface condensation in different ways, causing irregular visual degradations.

The main objective of this study is to evaluate the effect of obstacles on the surface temperature of walls coated with ETICS, analyzing the different levels of visual degradation.

It was used the simulation program WUFI Pro 4.2 to analyze the hygrothermal behavior of the facades and determine the exterior surface temperatures. In this calculation model it was included a routine to simulate the influence of obstacles on the surface temperature during the night.

The validation of simulation results was done by developing a methodology that allows to visually enhance the various levels of degradation of the facades, caused by the uneven development of microorganisms due to the presence of different obstacles.

KEYWORDS: ETICS, Visual Degradation, Surface Condensation, Obstacles, Numerical Simulation.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS/ENQUADRAMENTO.....	1
1.2.OBJECTIVOS DO TRABALHO	2
1.3.ESTRUTURA DO TEXTO	2
2. ESTADO DA ARTE	5
2.1. FACHADAS COM SISTEMAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO PELO EXTERIOR DO TIPO ETICS.....	5
2.1.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	5
2.1.2. VANTAGENS	8
2.1.3. PATOLOGIAS	8
2.2. DESEMPENHO HIGROTÉRMICO DE FACHADAS.....	9
2.2.1. INTRODUÇÃO.....	9
2.2.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	9
2.2.2.1. Condução.....	10
2.2.2.2. Convecção.....	10
2.2.2.3. Radiação.....	11
2.2.2.4. Factores de Forma	15
2.2.3. TRANSFERÊNCIA DE HUMIDADE	18
2.2.3.1. Condensações superficiais exteriores.....	18
2.2.3.2. Método dos graus acumulados de condensação.....	20
3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	23
3.1. ESCOLHA DO PROGRAMA DE CÁLCULO.....	23
3.1.1. GENERALIDADES	23
3.1.2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA WUFI PRO 4.2	23
3.1.2.1. Equações de transferência simultânea de calor e humidade	23

3.1.2.2. Equações do balanço radiativo explícito na superfície exterior.....	24
3.1.2.3. Dados de entrada.....	28
3.1.2.4. Dados de Saída	33
3.1.2.5. Limitações do programa	34
3.1.3. TRATAMENTO DOS DADOS CLIMÁTICOS A INTRODUIR NO WUFI.....	34
3.2. SIMULAÇÕES	36
3.2.1. Enquadramento.....	36
3.2.2. Obstáculos Verticais.....	37
3.2.2.1. Modelo de Simulação do Efeito dos Obstáculos – MOD.O.....	37
3.2.2.2. Validação do modelo MOD.O	39
3.2.3. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	41
3.2.3.1. Localização 1 – Edifício sem obstáculo vertical.....	41
3.2.3.2. Localização 2 – Edifício com obstáculo vertical paralelo de diferente altura	47
3.2.3.3. Localização 3 – Edifício com obstáculo vertical paralelo de igual altura	52
3.2.3.4. Comparação das três localizações	56
3.3. SÍNTESE CRÍTICA DOS RESULTADOS	59
4. AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DAS FACHADAS E COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	61
4.1. INTRODUÇÃO	61
4.2. FOTOGRAFIAS – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	62
4.2.1. ÁREA DA FACHADA A FOTOGRAFAR	62
4.2.2. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS IDEAIS/POSICIONAMENTO DO OPERADOR	63
4.2.3. MÁQUINA FOTOGRÁFICA COM PROGRAMA MANUAL	64
4.3. TRATAMENTO DAS FOTOGRAFIAS	64
4.3.1. NOTA INTRODUTÓRIA	64
4.3.2. PRIMEIRO PASSO DO TRATAMENTO – PRETO E BRANCO	64
4.3.3. SEGUNDO PASSO DO TRATAMENTO – NÍVEL.....	65
4.3.4. TERCEIRO PASSO DO TRATAMENTO – LIMAR	67
4.3.5. QUARTO PASSO DO TRATAMENTO – MULTIPLICAÇÃO	67
4.4. RESULTADOS.....	70
4.4.1. LOCALIZAÇÃO 1 – SEM OBSTÁCULO VERTICAL.....	70

4.4.2. LOCALIZAÇÃO 2 – OBSTÁCULO VERTICAL PARALELO DE DIFERENTE ALTURA	71
4.4.3. LOCALIZAÇÃO 3 – OBSTÁCULO VERTICAL PARALELO DE IGUAL ALTURA.....	73
4.4.4. COMPARAÇÃO DAS TRÊS LOCALIZAÇÕES – FOTOGRAFIAS	75
4.5. ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS	77
5. CONCLUSÕES.....	79
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	80
BIBLIOGRAFIA.....	81
ANEXO I VARIAÇÃO HORÁRIO DO CLIMA DO PORTO MEDIDO PELA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO LFC	83
ANEXO II RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DAS FACHADAS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Evolução histórica das fachadas [1].....	6
Fig. 2 – Diversos componentes de uma fachada do tipo ETICS [1].....	7
Fig. 3 – Continuidade do isolamento térmico que permite a redução das perdas de calor [1].....	8
Fig. 4 – Espectro electromagnético [5].....	11
Fig. 5 – Radiação térmica em função do comprimento de onda para várias gamas de temperatura [3]13	
Fig. 6 – Transmissão directa de radiação de uma superfície para outra [7].....	16
Fig. 7 – Radiação entre duas superfícies [8].....	17
Fig. 8 – Gráfico de valores de factores forma para duas superfícies paralelas [9].....	17
Fig. 9 – Exemplo de diagrama psicrométrico [10].....	20
Fig. 10 – Parcelas do balanço radiativo na superfície exterior de uma parede durante o dia [5].....	27
Fig. 11 – Balanço radiativo da envolvente do edifício no período noturno [5].....	28
Fig. 12 – Esquema do elemento construtivo simulado.....	29
Fig. 13 - Dados de entrada: configuração do elemento construtivo.....	31
Fig. 14 – Temperatura interior utilizando norma EN15026.....	33
Fig. 15 – Humidade relativa interior utilizando norma EN 15026 (carga normal).....	33
Fig. 16 – Excerto da folha de Excel na ferramenta “CreatClimateFile.xls”.....	36
Fig. 17 – Planta dos edifícios em estudo e localização das simulações.....	37
Fig. 18 - Factor forma entre a atmosfera e a superfície (FF_{atm}) [8].....	38
Fig. 19 - Efeito do obstáculo vertical na fachada [5].....	38
Fig. 20 – Variação no tempo da temperatura da fachada protegida por OV afastado de 1 m, em Dez/2009 e Ago/2009 (ensaio versus simulação) [5].....	40
Fig. 21 – Variação da radiação de onda longa na fachada protegida por OH em Out/2009 e Jul/2009 (ensaio versus simulação) [5].....	40
Fig. 22 – Médias mensais da temperatura superficial na fachada.....	41
Fig. 23 – Mínimos mensais da temperatura superficial na fachada.....	42
Fig. 24 – Máximos mensais da temperatura superficial na fachada.....	42
Fig. 25 – Diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e temperatura superficial de dois dias de Dezembro 2010.....	43
Fig. 26 – Diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e temperatura superficial de dois dias de Abril 2010.....	43
Fig. 27 – Valores máximos e médios mensais das diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e temperatura superficial para o ano de 2010.....	44

Fig 28 – Radiação incidente e condensações superficiais na fachada em 3 dias de Novembro 2010.	45
Fig. 29 – Acumulados mensais das diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e superficial para o ano de 2010	46
Fig. 30 – Temperatura e humidade relativa do ar exterior e diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e superficial numa noite de Agosto de 2010	46
Fig. 31 – Localização e dados necessários para a simulação.....	47
Fig. 32 – Médias mensais da temperatura superficial na fachada exposta (s/ov) e protegida pelo obstáculo vertical 1 (c/ov1).....	48
Fig. 33 – Mínimos mensais da temperatura superficial na fachada exposta (s/ov) e protegida pelo obstáculo vertical 1 (c/ov1).....	48
Fig. 34 – Máximos mensais da temperatura superficial na fachada exposta (s/ov) e protegida pelo obstáculo vertical 1 (c/ov1).....	49
Fig. 35 – Temperatura superficial na fachada exposta e protegida por ov1 e temperatura de ponto de orvalho para dois dias de Julho de 2010	50
Fig. 36 – Diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e superficial na fachada exposta e protegida por ov1 em dois dias de Novembro de 2010	50
Fig. 37 – Radiação incidente na fachada exposta e protegida por ov1 e diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e temperatura superficial no dia 13 de Dezembro de 2010.....	51
Fig. 38 – Acumulado anual das diferenças positivas entre a temperatura de ponto de orvalho temperatura superficial na fachada exposta e protegida por ov1	51
Fig. 39 – Factor forma FF_{ov2} [8]	52
Fig. 40 – Médios mensais da temperatura superficial na fachada exposta (s/ov) e protegida pelo obstáculo vertical 2 (c/ov2).....	53
Fig. 41 – Mínimos mensais da temperatura superficial na fachada exposta (s/ov) e protegida pelo obstáculo vertical 2 (c/ov2).....	53
Fig. 42 – Máximos mensais da temperatura superficial na fachada exposta (s/ov) e protegida pelo obstáculo vertical 2 (c/ov2).....	54
Fig. 43 – Diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e superficial na fachada exposta e protegida por ov2 em dois dias de Outubro de 2010.....	54
Fig. 44 - Radiação incidente na fachada exposta e protegida por ov2 e diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e temperatura superficial nos dias 7 e 8 de Março de 2010.....	55
Fig. 45 – Acumulado anual das diferenças positivas entre a temperatura de ponto de orvalho temperatura superficial na fachada exposta e protegida por ov2	55
Fig. 46 – Médias mensais da temperatura superficial na fachada exposta (s/ov), protegida pelo obstáculo vertical 1 (c/ov1) e pelo obstáculo vertical 2 (c/ov2).....	56
Fig. 47 – Mínimos mensais da temperatura superficial na fachada exposta (s/ov), protegida pelo obstáculo vertical 1 (c/ov1) e pelo obstáculo vertical 2 (c/ov2).....	56

Fig. 48 – Máximos mensais da temperatura superficial na fachada exposta (s/ov), protegida pelo obstáculo vertical 1 (c/ov1) e pelo obstáculo vertical 2 (c/ov2)	57
Fig. 49 – Radiação incidente e diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e temperatura superficial para a fachada exposta e protegida por ov1 e ov2	58
Figura 50 – Acumulado anual das diferenças positivas entre a temperatura de ponto de orvalho temperatura superficial na fachada exposta e protegida por ov1 e ov2	59
Fig. 51 – Posição em corte do local das fotografias a serem analisadas	62
Fig. 52 – Posição, em planta, do local de onde foram tiradas as fotografias.....	63
Fig. 53 – Fotografia da localização 1 no dia 25 às 11 horas.....	65
Fig. 54 – Fotografia da localização 1 no dia 25 às 11 horas a preto e branco	65
Fig. 55 – Exemplos de histogramas RGB [13]	66
Fig. 56 – Fotografia da localização 1 no dia 25 às 11 horas (Nível).....	66
Fig. 57 – Fotografia da localização 1 no dia 25 às 11 horas (Limiar).....	67
Fig. 58 – Comandos do Photoshop	67
Fig. 59 – Aplicação visual do modo “Multiplicação” [17]	68
Fig. 60 – Fotografia da localização 1 no dia 25 às 11 horas (Multiplicação)	68
Fig. 61 – Todos os passos do tratamento realizado, desde a fotografia original até ao resultado final, aplicado à fotografia do dia 25 de Maio da localização 1	69
Fig. 62 – Fotografia da localização 1 no dia 26 às 11 horas (original e após tratamento)	70
Fig. 63 – Fotografia da localização 1 no dia 28 às 11 horas (original e após tratamento)	70
Fig. 64 – Fotografia da localização 1 no dia 31 às 11 horas (original e após tratamento)	71
Fig. 65 – Fotografia da localização 2 no dia 26 às 11 horas (original e após tratamento)	72
Fig. 66 – Fotografia da localização 2 no dia 28 às 11 horas (original e após tratamento)	72
Fig. 67 – Fotografia da localização 2 no dia 31 às 11 horas (original e após tratamento)	73
Fig. 68 – Fotografia da localização 3 no dia 26 às 11 horas (original e após tratamento)	74
Fig. 69 – Fotografia da localização 3 no dia 28 às 11 horas (original e após tratamento)	74
Fig. 70 – Fotografia da localização 3 no dia 31 às 11 horas (original e após tratamento)	75
Fig. 71 – Fotografia da localização 1 no dia 29 às 11 horas (após tratamento)	75
Fig. 72 – Fotografia da localização 2 no dia 29 às 11 horas (após tratamento)	76
Fig. 73 – Fotografia da localização 3 no dia 29 às 11 horas (após tratamento)	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Factores forma consoante a geometria das superfícies [12]	17
Tabela 2 – Fenómenos de transferência de calor e humidade	23
Tabela 3 – Propriedades básicas dos materiais [6].....	29
Tabela 4 - Dados de entrada: propriedades dos materiais	30
Tabela 5 - Parâmetros de simulação	31
Tabela 6 – Parâmetros dos dados climáticos.....	35
Tabela 7 – Médias e acumulados mensais e anual dos parâmetros climáticos medidos pela estação meteorológica do LFC.....	35
Tabela 8 – Parâmetros de simulação – localização 2	47
Tabela 9 – Parâmetros de simulação – localização 3	52
Tabela 10 – Valores anuais de temperatura superficial nas três localizações	57
Tabela 11 – Factores de forma e médias anuais de radiação incidente, temperatura superficiais e condensações para as três fachadas	58

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$q_{\text{condução}}$ - Fluxo de calor por condução [W/m^2]

t - Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

λ - Condutibilidade térmica [$\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$]

$q_{\text{convecção}}$ - Fluxo de calor por convecção [W/m^2]

h_c - Coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$]

t_s - Temperatura da superfície [$^{\circ}\text{C}$]

t_a - Temperatura do ar [$^{\circ}\text{C}$]

v_v - Velocidade do vento [m/s]

v - Frequência de oscilação [Hertz]

λ - Comprimento de onda [m]

α - Coeficiente de absorção [-]

ρ - Coeficiente de reflexão [-]

τ - Coeficiente de transmissão [-]

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

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

$I_{s,\text{perp}}$ - Componente normal à superfície da radiação solar [W/m^2]

$E_{\text{cn}}(\lambda, T)$ - Poder emissivo espectral de um corpo negro [W/m^3]

h - Constante de Plank [J.s]

c - Velocidade da luz [m/s]

k - Constante de Boltzmann [J/K]

T - Temperatura absoluta [K]

I_{cn} - Radiação total emitida por um corpo negro [W/m^2]

σ - Constante de Stefan-Boltzman [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$]

I_e - Radiação emitida por uma superfície real [W/m^2]

ε - Emissividade [-]

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

ε_{atm} - Emissividade da atmosfera [-]

T_a - Temperatura do ar próximo do solo [K]

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

I_{12} - Fracção da radiação emitida por superfície de área A_1 que incide na superfície de área A_2 [W]

A_1 - Área da superfície 1 [m^2]

A_2 – Área da superfície 2 [m^2]

I_1 - Radiação emitida por superfície de área A_1 [W]

F_{12} - Factor forma entre superfícies 1 e 2 [-]

n_i – Normal da superfície i [-]

n_j – Normal da superfície j [-]

θ_i e θ_j – Ângulos que cada normal faz com a linha que une as duas superfícies [rad]

S – Linha que une as duas superfícies [m]

p_v - Pressão parcial de vapor de água [Pa]

R_v - Constante universal dos gases [J/(Kg.K)]

v - Concentração do vapor de água [kg/m^3]

p_{sat} - Pressão de saturação [Pa]

HR – Humidade relativa [-] ou [%]

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

T_{sup} - Temperatura superficial [°C]

w – Teor de humidade [kg/m^3]

ϕ – Humidade relativa [-]

t – Tempo [s]

D_ϕ – Coeficiente de condução líquida [$kg/(m.s)$]

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

H – Entalpia [J/m^3]

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

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

I_{rad} – Fluxo de calor resultante do balanço radiativo [W/m^2]

$I_{s,perp}$ – Componente normal à superfície da radiação solar [W/m^2]

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

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

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

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

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

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

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

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

β – Inclinação da superfície [°]

- $\rho_{s,ter}$ – Coeficiente de reflexão de onda curta do solo [-]
- $I_{s,dir,h}$ – Radiação solar directa numa superfície horizontal [W/m^2]
- ϵ_{ter} – Emissividade do solo [-]
- T_a – Temperatura absoluta do ar exterior [K]
- $I_{atm,ref}$ – Radiação atmosférica reflectida pelo solo [W/m^2]
- $\rho_{ol,ter}$ – Coeficiente de reflexão de onda longa do solo [-]
- ρ – Massa Volúmica [kg/m^3]
- ϵ – Porosidade [m^3/m^3]
- c - Calor específico do material seco [$J/(kg.K)$]
- K - Condutibilidade térmica do material seco [$W/(m.K)$]
- μ - Factor de resistência à difusão de vapor [-]
- e – Espessura [m]
- FF_{atm} - Factor de forma entre a atmosfera e a superfície [-]
- α - Inclinação da superfície [°]
- I_{OV} - Radiação emitida pelo obstáculo vertical [W/m^2]
- ϵ_{OV} - Emissividade do obstáculo vertical [-]
- $I_{OV(inc)}$ - Radiação emitida pelo obstáculo que incide na fachada [W/m^2]
- FF_{OV} - Factor de forma entre duas superfícies [-]
- ΔI_{atm} - Incremento de radiação atmosférica resultante do efeito do obstáculo na fachada [W/m^2]
- a – Constante de acerto [-]
- $I_{inc(s/ov)}$ – Radiação incidente na fachada sem obstáculo vertical [W/m^2]
- $\overline{I_{atm}}$ - Média da radiação atmosférica [W/m^2]
- h – Distância entre superfícies [m]
- w – Largura das superfícies [m]

ETICS – External Thermal Insulation Composite Systems with rendering

LFC – Laboratório de Física das Construções

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

OV1 – Obstáculo vertical 1

OV2 – Obstáculo vertical 2

MOD. O – Modelo de Simulação do Efeito dos Obstáculos

1

Introdução

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS/ENQUADRAMENTO

Actualmente uma das principais patologias que afecta os edificios está relacionada com o desenvolvimento de microrganismos no exterior de fachadas. Este crescimento biológico causa o aparecimento de manchas que provocam a degradação do aspecto exterior dos edificios. Apesar de este problema não causar alterações no desempenho térmico ou mecânico do elemento construtivo, provoca o desagrado dos utilizadores devido ao impacto visual negativo que origina. O desenvolvimento de microrganismos tem sido associado principalmente a fachadas revestidas com isolamento pelo exterior do tipo ETICS.

Na última década, a implementação de sistemas de isolamento pelo exterior do tipo ETICS tem sido cada vez mais frequente devido às vantagens que proporcionam quer do ponto de vista térmico, pois garantem uma melhoria do conforto térmico, quer do ponto de vista construtivo, pois permitem uma maior durabilidade das fachadas. Contudo, devido ao aumento da espessura do isolamento térmico que este tipo de soluções causa, as trocas de calor entre interior e exterior dos edificios são menores, o que provoca um agravamento de problemas relacionados com a degradação visual.

O desenvolvimento biológico está fortemente relacionado com o teor de humidade presente na face exterior da fachada, que resulta da humedificação pela chuva incidente, da humedificação por condensações superficiais e do processo de secagem [6]. A ocorrência de condensações, associada à diminuição da temperatura superficial dos elementos construtivos, acontece principalmente durante o período nocturno quando não existe radiação solar para compensar as trocas de radiação de onda longa entre a superfície e a atmosfera.

Uma maneira de avaliar o comportamento higrotérmico das fachadas revestidas com ETICS é através da utilização de modelos de simulação de transferência de calor, ar e humidade, designados por modelos HAM. Segundo Kehrer & Schmidt (2008), considerando o fenómeno do arrefecimento devido às trocas radiativas nos modelos higrotérmicos, é possível realizar simulações mais precisas e obter valores de temperatura superficial mais correctos. No entanto, estes modelos de simulação não consideram a presença de obstáculos na avaliação do comportamento higrotérmico.

Um obstáculo funciona como elemento protector das fachadas evitando a incidência do vento, chuva e radiação solar. No entanto, como uma superfície também emite radiação de onda longa, pode-se ainda interpretar o obstáculo como sendo uma fonte extra de radiação de onda longa à fachada que protege. Desta forma, ao influenciar a radiação que incide numa fachada, condiciona a temperatura superficial exterior e, conseqüentemente, a ocorrência de condensações. Tendo isto em conta, é necessário definir

e validar uma metodologia de cálculo que permita incorporar os efeitos de obstáculos no cálculo de simulações, avaliando assim a sua influência nas degradações do aspecto das fachadas.

O estudo da influência de obstáculos no desenvolvimento biológico nas fachadas é importante uma vez que, na actualidade, a construção excessiva sem ter em atenção o planeamento urbanístico dá origem a edifícios de diversas alturas e tamanhos, provocando degradações do aspecto diferenciais numa mesma fachada, caso esteja revestida com ETICS.

1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO

O objectivo fundamental deste trabalho consiste em avaliar a influência de edifícios localizados na proximidade de fachadas revestidas com ETICS na variação da sua temperatura superficial exterior, durante o período nocturno. De modo a alcançar este objectivo principal foram estabelecidos um conjunto de tarefas, seguidamente enumeradas:

- Estudo das vantagens e patologias de fachadas com isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS;
- Estudo dos princípios teóricos sobre transferência de calor e humidade na superfície exterior de elementos construtivos;
- Escolha do programa de cálculo automático mais adequado para estudar o comportamento higratérmico de fachadas revestidas por ETICS;
- Identificação e estudo dos princípios e fundamentos teóricos do programa de simulação assim como das suas limitações;
- Definição de um modelo de cálculo simplificado utilizado para simular a influência de obstáculos em fachadas do tipo ETICS;
- Avaliação da influência de obstáculos no comportamento higratérmico de fachadas considerando diversas situações – análise da ocorrência de condensações superficiais;
- Definição de uma metodologia para avaliar os vários níveis de degradação do aspecto das fachadas causados pela presença de diferentes obstáculos. Posterior validação através da comparação entre resultados simulados e resultados obtidos.

1.3. ESTRUTURA DO TEXTO

O presente trabalho é constituído por cinco capítulos e referências bibliográficas.

- Capítulo 1: Introdução – É feita uma breve introdução ao tema de forma a transmitir a ideia base do estudo, definindo objectivos e estrutura do texto;
- Capítulo 2: Estado da arte – É constituído por uma síntese dos princípios teóricos envolvidos na transferência de calor e humidade em fachadas. Contém também a descrição geral de isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS referindo as suas vantagens e patologias mais comuns;
- Capítulo 3: Simulações numéricas – Engloba a justificação da escolha do programa de cálculo para análise do comportamento higratérmico de fachadas, descrevendo os princípios por detrás dos mecanismos de transferência simultânea de calor e humidade e do balanço radiativo. É também indicada a informação necessária introduzir no programa de simulação assim como as suas limitações. São apresentados o modelo de cálculo simplificado, que permite simular o efeito de obstáculos na temperatura superficial de fachadas revestidas com ETICS durante o período nocturno, e o trabalho de simulação efectuado para diferentes localizações;

- Capítulo 4: Avaliação da degradação das fachadas e comparação com os resultados das simulações numéricas – Definição de uma metodologia de avaliação dos diferentes níveis de degradação visual causados pelo desenvolvimento de microrganismos. Esta metodologia engloba também a comparação dos resultados obtidos com os resultados das simulações;
- Capítulo 5: Conclusões – É feita uma síntese das conclusões obtidas nesta dissertação e apresentam-se as perspectivas de investigação futura.

2

Estado da arte

2.1. FACHADAS COM SISTEMAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO PELO EXTERIOR DO TIPO ETICS

2.1.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS

Tem havido em Portugal uma evolução da construção de fachadas, quer quanto aos diferentes tipos de materiais utilizados, quer relativamente às diferentes disposições possíveis das camadas que constituem o elemento construtivo.

Inicialmente, até à década de 40, as fachadas eram constituídas por um único elemento que podia ser granito ou tijolo maciço, por exemplo, sendo caracterizadas por possuir uma elevada espessura e peso. Com o passar das décadas, novas soluções continuaram a ser implantadas. Nos anos 50 surgiram as primeiras fachadas duplas com alvenarias de pedra no pano exterior e alvenaria de tijolo no pano interior. Duas décadas mais tarde as fachadas eram constituídas unicamente por panos de alvenaria de tijolo com espessuras de dimensões semelhantes. No entanto a grande inovação constituiu no aparecimento nos anos 90 de estruturas porticadas em betão armado que passaram a desempenhar funções de suporte reduzindo assim o peso e espessura das fachadas (Figura 1).

Durante os anos 80 começaram a introduzir-se materiais de isolamento térmico a preencher, total ou parcialmente, a caixa-de-ar das paredes. Inicialmente não existia grande preocupação com o tratamento das pontes térmicas, o que foi significativamente alterado após a entrada em vigor, na década de 90, do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) [1].

Com o RCCTE, estimulou-se o aumento do conforto térmico e o tratamento das pontes térmicas, minimizando as patologias na construção. Começou assim a desenvolver-se a aplicação de sistemas com isolamento térmico pelo exterior e interior.

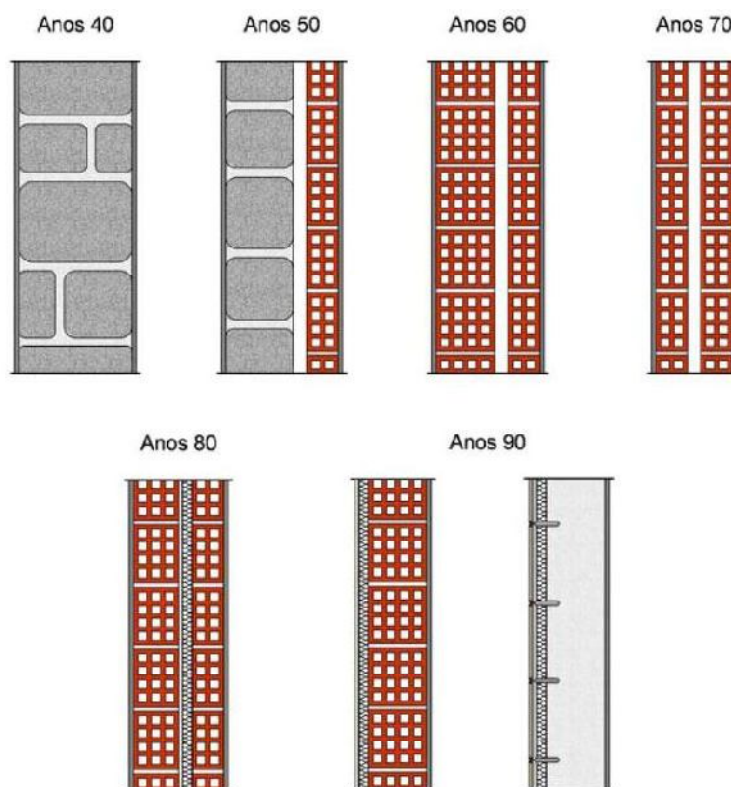


Fig. 1 – Evolução histórica das fachadas [1]

Os sistemas de isolamento térmico pelo exterior são constituídos por uma camada de isolamento aplicada directamente sobre o suporte e por um revestimento exterior para protecção das solicitações climáticas e mecânicas. Este tipo de solução surge para responder às crescentes exigências de conforto higrotérmico, que estão intimamente associadas às preocupações com o consumo de energia e protecção ambiental. É por isso necessário isolar termicamente a envolvente dos edifícios, de modo a minimizar as trocas de calor com o exterior, com consequente redução das necessidades de aquecimento/arrefecimento e diminuição dos riscos de ocorrência de condensações [1].

Os sistemas de isolamento pelo exterior podem ser classificados em três grupos:

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

Dos três grupos, o isolamento pelo exterior que assumiu maior importância foi o sistema do tipo ETICS. Este começou por se generalizar na Europa na década de 70 devido à crise energética, que obrigou a um tratamento térmico mais eficaz da envolvente dos edifícios para reduzir os consumos de energia.

O ETICS é constituído por diversos componentes que são aplicados sobre o suporte vertical da fachada exterior de um edifício. O termo "suporte" refere-se a uma parede, que por si só já cumpre requisitos de resistência mecânica (resistência às cargas estáticas e dinâmicas) e estanquidade ao ar. O suporte pode estar rebocado, pintado, conter revestimentos orgânicos, minerais ou elementos cerâmicos. No entanto tem que existir uma preparação conveniente e a certificação do bom estado de aderência do suporte de modo que a aplicação do ETICS seja viável. As paredes de suporte podem ser do tipo parede em alvenaria ou parede de betão. [2]

Para conferir ao sistema propriedades de resistência térmica, um dos componentes colocado é o isolamento térmico. Normalmente este é constituído por poliestireno expandido (EPS) cuja espessura varia consoante o coeficiente de transmissão térmica desejado.

A camada seguinte, camada base, consiste num reboco de alguns milímetros de espessura a aplicar directamente sobre o isolamento térmico, de forma a permitir o completo recobrimento da armadura. Normalmente a armadura é constituída por redes de fibra de vidro e confere resistência mecânica à camada.

Antes da aplicação do revestimento final, pode existir ou não, uma camada muito fina à base de resinas designada de camada de primário.

Por fim, o revestimento final do sistema ETICS vai funcionar como uma protecção contra agentes climáticos e agentes exteriores, sendo normalmente utilizado um revestimento plástico espesso (RPE).

Para fixar o isolamento térmico ao suporte conta-se com o auxílio de fixações mecânicas e de produtos de colagem. Estas fixações podem ser usadas de forma permanente, funcionando como sistema de segurança para o caso de ocorrer alguma descolagem, ou provisoriamente, ajudando a fixar o isolamento enquanto o produtos de colagem secam.

Em Portugal, apenas na década de 90 é que se começou a utilizar com mais regularidade o sistema do tipo ETICS, frequentemente constituído por poliestireno expandido (EPS) colado ao suporte e revestido por um reboco delgado, armado com uma ou várias camadas de rede de fibra de vidro como demonstrado na Figura 2.

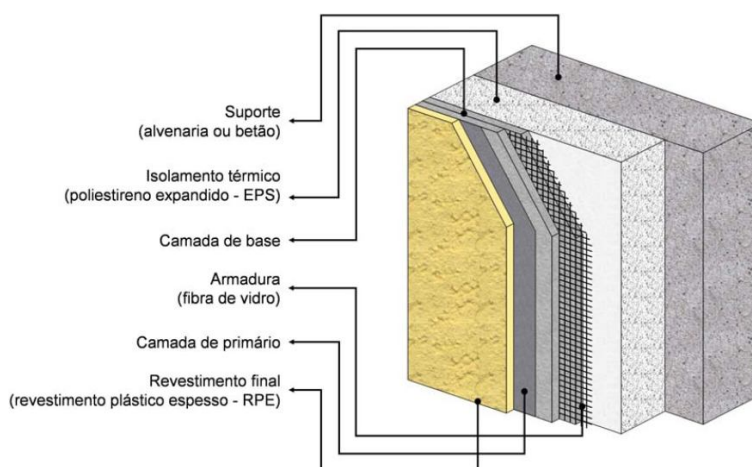


Fig. 2 – Diversos componentes de uma fachada do tipo ETICS [1]

2.1.2. VANTAGENS

A utilização de sistemas de isolamento térmico pelo exterior é cada vez mais vulgar pois possui diversas vantagens, tais como:

- A redução das pontes térmicas, pois é assegurada a aplicação contínua do isolamento térmico em toda a envolvente do edifício (Figura 3);
- Efeitos positivos nos consumos de energia devido à redução das necessidades de aquecimento e de arrefecimento do ambiente interior. Isto implica uma redução de perdas globais de calor;
- Diminuição do risco da ocorrência de condensações internas;
- Devido à posição do isolamento térmico, a massa das paredes localiza-se quase toda no lado interior do isolante térmico o que provoca um aumento da inércia térmica interior dos edifícios. Este aumento confere uma melhoria do conforto térmico de Verão e Inverno com o aumento da capacidade de regulação da temperatura interior e dos ganhos solares úteis, respectivamente;
- A diminuição da espessura das paredes exteriores provoca o acréscimo da área habitável assim como a redução do peso das paredes e das cargas permanentes sobre a estrutura;
- O aumento da protecção contra agentes atmosféricos;
- Possibilidade de colocação em obra sem perturbar os ocupantes dos edifícios (particularmente útil na reabilitação de fachadas degradadas);
- Existência uma grande variedade de soluções de acabamento.

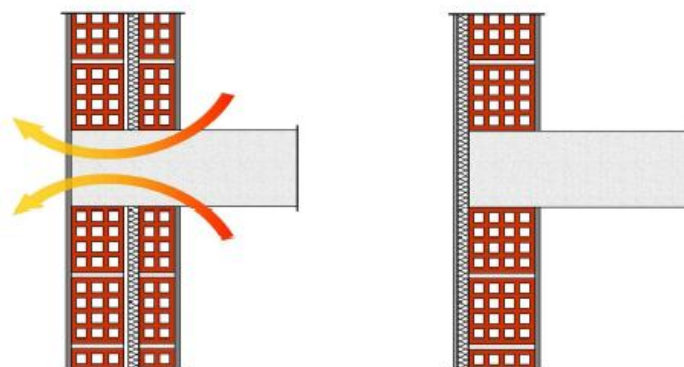


Fig. 3 – Continuidade do isolamento térmico que permite a redução das perdas de calor [1]

2.1.3. PATOLOGIAS

Apesar da utilização do sistema de isolamento térmico do tipo ETICS ser cada vez mais comum, existem algumas anomalias e problemas importantes de referir, tais como [1]:

- Fissuração – que resulta de erros de execução como a má fixação do isolamento ao suporte, espessura da camada base insuficiente para embeber a armadura, problemas relacionados com o mau posicionamento da armadura ou problemas de choques térmicos diferenciais causados pela utilização de revestimentos de cor escura ou de grande contraste de cores;
- Descolagem total e/ou parcial do sistema – devido à aplicação do sistema de isolamento sobre suportes inadequados que contêm, por exemplo, sujidade e/ou humidade, devido à deficiente colocação e distribuição do produto de colagem e a problemas de infiltrações que causam dificuldade de aderência entre o isolamento térmico e o suporte. A descolagem também pode

ser causada pelas condições atmosféricas adversas durante o período de aplicação que influenciam, por exemplo, o tempo de secagem do produto de colagem;

- Destacamento e/ou empolamento do reboco ou do revestimento final – causados pelo desrespeito dos intervalos de secagem, pela ausência de camada de primário entre a camada de base e o revestimento final ou pela aplicação do reboco sobre placas de poliestireno degradadas;
- Baixa resistência aos impactos – além de provocar problemas estéticos, também pode provocar a entrada de água para o interior;
- Degradação do aspecto exterior devido ao desenvolvimento de microrganismos – aparecimento de organismos como algas, fungos, bolores, cianobactérias devido à presença de água na superfície da fachada. Este problema, apesar de não provocar alterações no desempenho térmico e mecânico dos sistemas de isolamento do tipo ETICS, tem grande impacto visual que acaba por causar o desagrado dos utilizadores, condicionando a sua implantação. A solução mais habitual para tentar evitar a alteração do aspecto é a aplicação de biocidas.

2.2. DESEMPENHO HIGROTÉRMICO DE FACHADAS

2.2.1. INTRODUÇÃO

Para avaliar o desempenho higrotérmico de um edifício é necessário conhecer os modos de propagação de calor e de humidade nos seus elementos construtivos, pois é-lhes exigida a satisfação de exigências de conforto e salubridade ambiental tendo em vista uma construção energeticamente sustentável e durável.

Neste subcapítulo são abordadas as três formas de transferência de calor, condução, convecção e radiação, dando mais importância à última pois é a que mais influência tem nesta dissertação. São também descritos diferentes factores de forma tipo disponíveis na literatura e que são necessários para o cálculo de trocas radiativas entre diferentes superfícies.

Quanto às diferentes formas de manifestação da humidade em edifícios, é explicado o fenómeno físico que potencia a ocorrência de condensações superficiais e como será feito o seu cálculo matemático, para que seja possível avaliar as condensações ocorridas durante o ano em estudo.

2.2.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O estudo de transferências de calor assenta nas leis e princípios básicos da termodinâmica que permitem concluir que a transmissão de calor entre dois elementos se verifica sempre que entre eles se estabelece uma diferença de temperatura. Esta transferência de energia, sob a forma de calor, faz-se sempre no sentido do elemento com temperatura mais elevada para o elemento de temperatura menor [3].

Existem três processos distintos de transferência de calor:

- Condução – típico dos materiais sólidos;
- Convecção – verifica-se sobretudo nas zonas de contacto entre meios sólidos e gasosos;
- Radiação – não necessita de meio físico de propagação.

2.2.2.1. Condução

A condução é um dos fenómenos de transferência de calor que ocorre quando existe um gradiente térmico num dado domínio, provocando a transferência de energia a nível molecular da região com temperatura mais elevada para a região com temperatura mais baixa [4]. Este processo de transferência de energia, onde não se verificam movimentos internos e emissão de radiações, necessita de um meio físico de propagação, ocorrendo sobretudo no interior dos meios sólidos, líquidos ou gasosos.

Este mecanismo de transferência de calor é expresso pela Lei de Fourier (1). Segundo esta lei o fluxo de calor, por unidade de área, entre duas faces é proporcional ao gradiente da temperatura.

$$q_{condução} = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (1)$$

em que

$q_{condução}$	Fluxo de calor por condução	[W/m ²]
t	Temperatura	[°C]
λ	Condutibilidade térmica	[W/(m.°C)]

A condutibilidade térmica depende do tipo de material utilizado e fase em que se encontra, da temperatura, porosidade e sobretudo, do peso específico e teor de humidade do material.

Se o fluxo de calor e a temperatura não variarem ao longo do tempo, pode-se afirmar que se trata de um regime estacionário.

2.2.2.2. Convecção

A convecção dá-se quando a transferência de calor ocorre devido ao movimento das moléculas de um fluido, normalmente o ar. Este mecanismo necessita de um meio físico de propagação e verifica-se sobretudo nas zonas de contacto entre meios sólidos e gasosos. A convecção pode ser classificada como natural, se resulta de diferenças na densidade do ar devido a variações de temperatura, ou forçada, se resulta da acção do vento [5].

A equação (2) expressa a quantidade de calor transferido por convecção.

$$q_{convecção} = h_c \times (t_s - t_a) \quad (2)$$

em que

$q_{convecção}$	Fluxo de calor por convecção	[W/m ²]
h_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/(m ² .°C)]
t_s	Temperatura da superfície	[°C]
t_a	Temperatura do ar	[°C]

O coeficiente de transferência de calor por convecção, h_c , depende de parâmetros tão distintos como a forma e rugosidade da superfície, diferenças de temperatura entre o ar e a superfície, direcção e sentido do fluxo de calor, velocidade do ar à superfície e tipo de regime da deslocação do ar. Devido a esta diversidade de dependências, não existe uma expressão única para a quantificação deste coeficiente.

Tendo em conta, que nesta dissertação é escolhido o programa WUFI Pro 4.2 (§ 3.1) para realizar as simulações higrotérmicas, este utiliza as equações (3) e (4) para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção em função da velocidade do vento, v_v (m/s), e da exposição da fachada.

$$h_c = 4,5 + 1,6 \times v_v \quad \text{se superfície voltada ao vento} \quad (3)$$

$$h_c = 4,5 + 0,33 \times v_v \quad \text{se superfície protegida do vento} \quad (4)$$

2.2.2.3. Radiação

Radiação é uma forma de transferência de energia realizada através de ondas electromagnéticas que se propagam pelo espaço à velocidade da luz e que não requer a presença de um meio intermediário [7]. As ondas electromagnéticas são caracterizadas pela sua frequência de oscilação, ν , e comprimento de onda, λ .

O espectro electromagnético abrange uma enorme quantidade de comprimentos de onda, como demonstrado na Figura 4, que podem variar desde ondas de rádio até ondas cósmicas. No entanto, a radiação com interesse para este estudo denomina-se de radiação térmica e está apenas compreendida entre os comprimentos de onda 0,1 e 100 μm . Sabendo que todos os corpos emitem e absorvem radiações de diferentes comprimentos de ondas, é a radiação térmica que faz com que a temperatura de um corpo aumente quando incide sobre este.

	RAIOS CÓSMICOS				RAIOS γ				RAIOS X		ULTRA-VIOLETAS	VISÍVEL	INFRAVERMELHOS		ONDAS DE RÁDIO													
λ		10^{-4} nm	10^{-3} nm	10^{-2} nm	10^{-1} nm	1 nm	10 nm	0,1 μm	1 μm	10 μm	100 μm	0,1 cm	1 cm	10 cm	1 m	10 m	100 m	1 km	10 km	100 km								
ν (Hertz)		$3,10^{23}$	$3,10^{20}$	$3,10^{19}$	$3,10^{18}$	$3,10^{17}$	$3,10^{16}$	$3,10^{15}$	$3,10^{14}$	$3,10^{13}$	$3,10^{12}$	$3,10^{11}$	$3,10^{10}$	$3,10^9$	$3,10^8$	$3,10^7$	$3,10^6$	$3,10^5$	$3,10^4$	$3,10^3$								

Fig. 4 – Espectro electromagnético [5]

Sabendo que da radiação que incide num corpo, uma parte é absorvida (α) enquanto a restante é reflectida (ρ) e transmitida (τ), e tendo em mente a lei da conservação da energia chega-se à conclusão:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (5)$$

sendo

- α Coeficiente de absorção, que traduz as quantidades percentuais da radiação incidente que foi absorvida;
- ρ Coeficiente de reflexão, que traduz as quantidades percentuais da radiação incidente que foi reflectida;
- τ Coeficiente de transmissão, que traduz as quantidades percentuais da radiação incidente que foi transmitida.

No caso de corpos sólidos e opacos (edifícios), considera-se que não existe transmissão de radiação ($\tau = 0$). No entanto, para corpos transparentes, como por exemplo vidros, a transmissão espectral toma um valor próximo da unidade, pelo facto de grande parte da radiação incidente atravessar o objecto. Os corpos são denominados de reflectores perfeitos quando a sua reflexão espectral for igual à unidade ($\rho=1$), podendo esta ocorrer sob duas formas distintas: especular, se o ângulo de reflexão for igual ao ângulo de incidência, ou difusa, quando a radiação se manifesta em todas as direcções [22].

Radiação de onda curta

Da radiação solar total que incide numa superfície e provoca o seu aquecimento, podem ser designados dois tipos de radiação: radiação directa ou difusa, consoante esta é respectivamente proveniente directamente do sol ou devido à múltipla reflexão na atmosfera dos raios solares.

Segundo Künzel [24], o fluxo de calor da radiação solar que é parcialmente absorvida quando esta incide numa superfície opaca, pode ser calculada através da equação (6):

$$I_{solar} = \alpha_s \times I_{s,perp} \quad (6)$$

em que

I_{solar}	Densidade de fluxo de calor absorvido pela superfície devido à radiação solar incidente	[W/m ²]
α_s	Coeficiente de absorção para a radiação solar	[-]
$I_{s,perp}$	Componente normal à superfície da radiação solar	[W/m ²]

Radiação de onda longa

A emissão de radiação de onda longa está relacionada com a noção de corpo negro. Um corpo negro, também denominado por corpo perfeito ou radiante puro, detém estas designações pelo facto de absorver toda a radiação incidente ($\alpha = 1$) e posteriormente emiti-la na sua totalidade e com a mesma intensidade em todas as direcções sob a forma de calor.

Segundo Plank a radiação emitida por um corpo negro por unidade de área e por unidade de tempo é designada de poder emissivo espectral, E_{cn} . A equação (7) demonstra a Lei de Plank por área de superfície unitária, numa determinada direcção, em função do comprimento de onda e da temperatura absoluta.

$$E_{cn}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1 \right)} \quad (7)$$

em que

$E_{cn}(\lambda, T)$	Poder emissivo espectral de um corpo negro	[W/m ³]
$h = 6,6256 \times 10^{-34}$	Constante de Plank	[J.s]
$c = 2,998 \times 10^8$	Velocidade da luz	[m/s]
λ	Comprimento de onda	[m]
$k = 1,3805 \times 10^{-23}$	Constante de Boltzmann	[J/K]
T	Temperatura absoluta de um corpo negro	[K]

A Lei de Plank é de grande importância pois permite quantificar a radiação emitida por um corpo negro e pode ser representada sob a forma de uma família de curvas (Figura 5). Esta representação demonstra como varia a quantidade de energia irradiada com o comprimento de onda para diferentes níveis de temperatura absoluta.

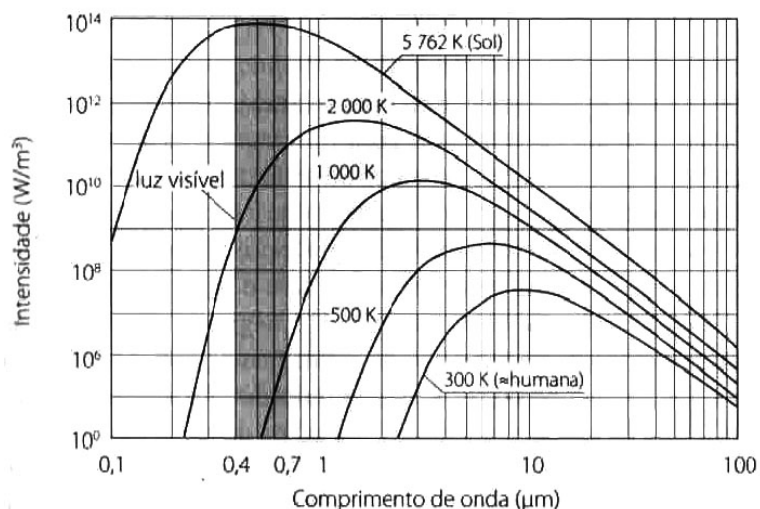


Fig. 5 – Radiação térmica em função do comprimento de onda para várias gamas de temperatura [3]

Ao observar o gráfico da Figura 5, é possível concluir:

- A quantidade de radiação emitida aumenta com a temperatura, qualquer que seja o comprimento de onda;
- Quanto mais elevada é a temperatura absoluta, mais pequeno é o comprimento de onda para o qual ocorre o maior valor de poder emissivo;
- A radiação emitida varia continuamente com o comprimento de onda;

- Para temperaturas muito elevadas, como é o caso do sol, a radiação emitida pode intersectar a região visível do espectro. O mesmo não se verifica para radiações emitidas a temperaturas baixas;
- Com o aumento da temperatura, aumenta também a área sob cada curva correspondente à quantidade de radiação total emitida.

Através da Lei de Plank é possível então obter a Lei de Stefan-Boltzman que afirma que a quantidade total de radiação emitida por um corpo negro está relacionada com a temperatura absoluta (8).

$$I_{cn} = \sigma \times T^4 \quad (8)$$

sendo

I_{cn}	Radiação total emitida por um corpo negro	[W/m ²]
$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$	Constante de Stefan-Boltzman	[W/(m ² .K ⁴)]
T	Temperatura absoluta	[K]

No entanto, a radiação emitida por um corpo real (não negro) é inferior a I_{cn} . Sendo I_e (W/m²) a radiação efectivamente emitida por uma superfície real, então a propriedade que caracteriza a relação entre I_e e a quantidade máxima de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura, é designada por emissividade, ε , e os seus valores variam entre zero e a unidade (9).

$$\varepsilon = \frac{I_e}{I_{cn}} \quad (9)$$

Este valor representa assim uma emissividade global, ou seja, um valor médio que tem em conta todos os comprimentos de onda e direcções da radiação, sendo por isso conhecida por emissividade hemisférica total. É normalmente este o valor que é tabelado para os materiais correntes [3].

A radiação emitida por uma superfície real, depende então da emissividade do material de que é constituída, como demonstrado na equação (10).

$$I_e = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (10)$$

Uma das leis mais importantes da radiação térmica é a Lei de Kirchoff. Esta afirma que o valor da emissividade de uma superfície é igual ao valor do coeficiente de absorção para uma mesma temperatura (11). Esta condição simplifica bastante o problema das trocas de calor entre superfícies por radiação.

$$\varepsilon = \alpha \quad (11)$$

A maioria dos materiais correntes na construção são considerados corpos cinzentos – emissividade e coeficiente de absorção são independentes do comprimento de onda.

Radiação atmosférica

A radiação absorvida pela atmosfera é proveniente directamente do sol, sob a forma de radiação de onda curta ($\lambda \leq 0,5\mu\text{m}$), e da superfície terrestre, sob a forma de radiação de onda longa ($\lambda \geq 10\mu\text{m}$). A radiação de onda longa emitida pela superfície resulta da absorção do solo da radiação solar directa e difusa. No entanto, absorção deste tipo de radiação pela atmosfera é muito influenciada pelos seus constituintes, fundamentalmente o vapor de água e os gases carbónicos [5]. De todos os comprimentos de onda do espectro de absorção da radiação atmosférica, existe uma região entre os 8 e 12 μm , designada por “janela atmosférica”, que tem menor capacidade de absorção. Esta região é dita “transparente” à radiação de onda longa pois facilita a sua passagem através da atmosfera.

De forma a manter o equilíbrio térmico, a radiação que é absorvida pela atmosfera volta depois a ser emitida na direcção da superfície e do espaço, sob a forma de radiação de onda longa. Esta emissão de radiação segue a Lei de Plank com um espectro de emissão semelhante ao corpo negro com uma temperatura da mesma ordem de grandeza da temperatura efectiva do céu (T_{atm}). No entanto, em termos práticos assume-se que o céu se comporta como um corpo cinzento pois a atmosfera é constituída por diversas camadas com propriedades radiativas diferentes, o que torna difícil a determinação da temperatura efectiva do céu. Assim, a determinação da radiação emitida pela atmosfera no sentido da superfície é função da emissividade da atmosfera, ϵ_{atm} , e de uma temperatura igual à do ar próximo do céu, T_a (12).

$$I_{\text{atm}} = \epsilon_{\text{atm}} \times \sigma \times T_a^4 \quad (12)$$

em que:

I_{atm}	Radiação emitida pela atmosfera	[W/m ²]
ϵ_{atm}	Emissividade da atmosfera	[-]
T_a	Temperatura do ar próximo do solo	[K]

Apenas na região da “janela atmosférica” é que o céu deixa de emitir radiação de forma contínua para todos os comprimentos de onda, reduzindo o poder emissivo da radiação. Este efeito é menos sentido quando o céu se encontra nublado.

2.2.2.4. Factores de Forma

O cálculo das trocas de radiação entre duas superfícies está directamente relacionado com a relação geométrica entre as faces, ou seja, a vista que cada superfície tem uma da outra. Considerando duas superfícies, como demonstradas na Figura 6, e estando cada uma delas a temperaturas diferentes, vai ocorrer uma transferência de radiação térmica entre elas.

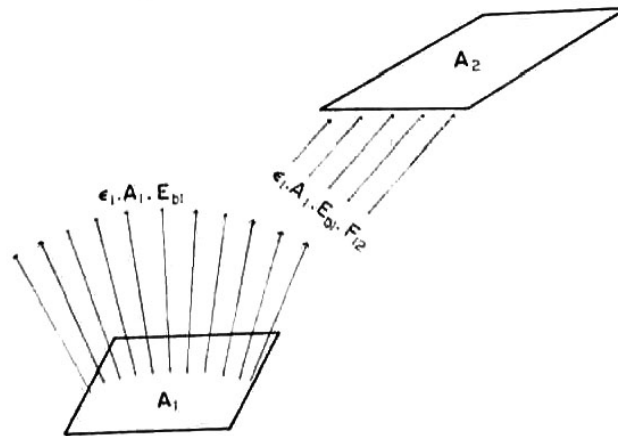


Fig. 6 – Transmissão directa de radiação de uma superfície para outra [7]

Tendo em atenção a superfície A_1 , a totalidade da radiação emitida, I_1 , por efeito da temperatura, uniformemente distribuída por todas as direcções, é:

$$I_1 = A_1 \times \varepsilon_1 \times \sigma \times T^4 \quad [\text{W}] \quad (13)$$

No entanto, desta energia radiante apenas uma fracção atinge A_2 . A fracção da radiação que é emitida pela superfície 1 e incide sobre a superfície 2 é representada pela equação (14):

$$I_{12} = I_1 \times F_{12} \quad [\text{W}] \quad (14)$$

em que

I_{12}	Fracção da radiação emitida por superfície de área A_1 que incide na superfície de área A_2	[W]
I_1	Radiação emitida por superfície de área A_1	[W]
F_{12}	Factor forma entre superfícies 1 e 2	[-]

Pode-se assim afirmar que o factor de forma define a fracção da radiação total emitida pela superfície i que incide na superfície j – F_{ij} – e toma valores entre zero e um.

A determinação do factor de forma constitui um problema geométrico que depende da forma como as superfícies se posicionam entre si no espaço. Considerando duas superfícies (Figura 7) cujas normais são, respectivamente, n_i e n_j , e θ_i e θ_j os ângulos que cada normal faz com a linha que une as duas superfícies (S), consoante a geometria das superfícies, existem três casos diferentes para a definição da fórmula geral do factor de forma (Tabela 1 e equações (15), (16) e (17)):

Tabela 1 – Factores forma consoante a geometria das superfícies [12]

Casos	Geometria	Factor forma
1	Área elementar para área elementar	$dF_{di-dj} = \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi^2 S} dA_j$ (15)
2	Área elementar para área finita	$F_{di-j} = \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi^2 S} dA_j$ (16)
3	Área finita para área finita	$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi^2 S} dA_j dA_i$ (17)

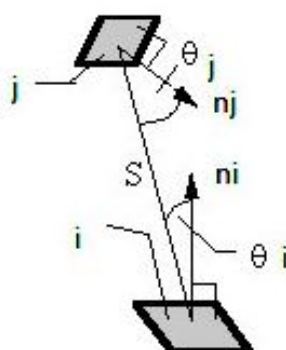


Fig. 7 – Radiação entre duas superfícies [8]

No entanto, por vezes existe uma certa dificuldade em resolver as equações mencionadas na Tabela 1. Por isso estão disponíveis tabelas com as soluções geométricas mais frequentes, como por exemplo, o factor de forma entre superfícies rectangulares perpendiculares entre si e com um lado comum ou o factor de forma entre superfícies rectangulares iguais, paralelas e opostas [8]. Para além de fórmulas simplificadas e tabeladas também existem gráficos que permitem a obtenção directa do factor de forma (Figura 8).

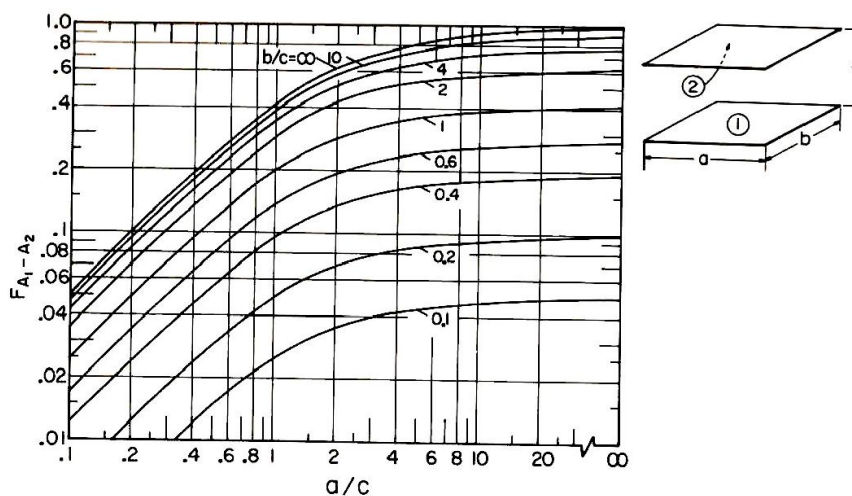


Fig. 8 – Gráfico de valores de factores forma para duas superfícies paralelas [9]

2.2.3. TRANSFERÊNCIA DE HUMIDADE

A ocorrência de humidade nos elementos de construção pode dar lugar a graves perturbações funcionais, causando uma redução apreciável da durabilidade dos materiais e provocando condições deficientes de habitabilidade para os utilizadores. Podem ser várias as causas e as formas de manifestação da humidade nos edifícios, sendo usual adoptar-se a seguinte classificação [3]:

- Humidade de obra – decorrente da execução dos edifícios e que, em regra, diminui gradualmente até desaparecer;
- Humidade de absorção e capilaridade – decorrente da ascensão capilar, através das fundações e paredes, da água existente no solo;
- Humidade de infiltração – decorre geralmente da água proveniente do exterior (chuva ou neve) infiltrada através dos elementos da envolvente;
- Humidade de condensação – proveniente do vapor de água que se condensa nos paramentos expostos ou no interior dos elementos de construção;
- Humidade devido a fenómenos de higroscopicidade;
- Humidade devido a causas fortuitas.

Para este estudo apenas será abordado o fenómeno de humidade que dá origem a condensações superficiais exteriores.

2.2.3.1. Condensações superficiais exteriores

Este tipo de humidade resulta da condensação do vapor de água sobre os paramentos de elementos da envolvente (janelas, paredes), manifestando-se tipicamente através de manchas resultantes do desenvolvimento biológico [3].

A ocorrência de condensações em elementos construtivos depende de vários factores como a constituição do material aplicado, as condições climáticas do local e o modo de comportamento do ar húmido. Em qualquer situação em que o ar entre em contacto com superfícies mais frias e a humidade absoluta do ar atinja o limite de saturação para a respectiva temperatura, surgirão condensações [6].

O ar húmido é definido como uma mistura de ar seco e vapor de água que se comportam de forma ideal. O vapor de água existente no ar exerce uma pressão designada por pressão parcial, que é proporcional à quantidade de vapor de água existente, e pode ser obtida aplicando a lei geral dos gases (18).

$$p_v = R_v \times T \times v \quad (18)$$

em que

p_v	Pressão parcial de vapor de água	[Pa]
$R_v = 461,54$	Constante universal dos gases	[J/(Kg.K)]
T	Temperatura absoluta	[K]
v	Concentração do vapor de água	[kg/m ³]

No entanto, o ar apresenta um limite para a quantidade de vapor de água, que simboliza a capacidade máxima de concentração de moléculas de água na sua estrutura. Este limite é designado como pressão

de saturação e está relacionado com a temperatura a que se encontra o ar, como se pode observar nas equações (19) e (20).

$$p_{sat} = e^{\left(\frac{22,44 \times t_a}{272,44 + t_a}\right)} \quad \theta < 0^\circ \quad (19)$$

$$p_{sat} = e^{\left(\frac{17,08 \times t_a}{234,18 + t_a}\right)} \quad \theta \geq 0^\circ \quad (20)$$

sendo

p_{sat}	Pressão de saturação	[Pa]
t_a	Temperatura do ar	[°C]

É possível definir a relação entre pressão parcial e pressão de saturação do vapor de água através do índice da humidade relativa, HR (21).

$$HR = \frac{p_v}{p_{sat}} \times 100 \quad [\%] \quad (21)$$

Sempre que a pressão instalada de vapor de água é superior ao limite de saturação, ocorrem condensações do vapor de água ($p_v > p_{sat}$). Este fenómeno corresponde a uma HR = 100%. Quando ocorrem condensações à superfície dos elementos construtivos, são denominadas por condensações superficiais e dependem exclusivamente da temperatura superficial.

O diagrama psicrométrico permite analisar graficamente a ocorrência de condensações (Figura 9). Com este diagrama, conhecendo a temperatura ambiente e a humidade relativa do ar, é possível obter a temperatura de ponto de orvalho, T_{po} , correspondente à temperatura cuja humidade relativa é 100%. T_{po} , também designado como o valor da temperatura para a qual a pressão parcial de vapor é máxima, pode ser utilizada como critério de avaliação da ocorrência de condensações superficiais pois sempre que a temperatura superficial é inferior à temperatura de ponto de orvalho, ocorrem condensações.

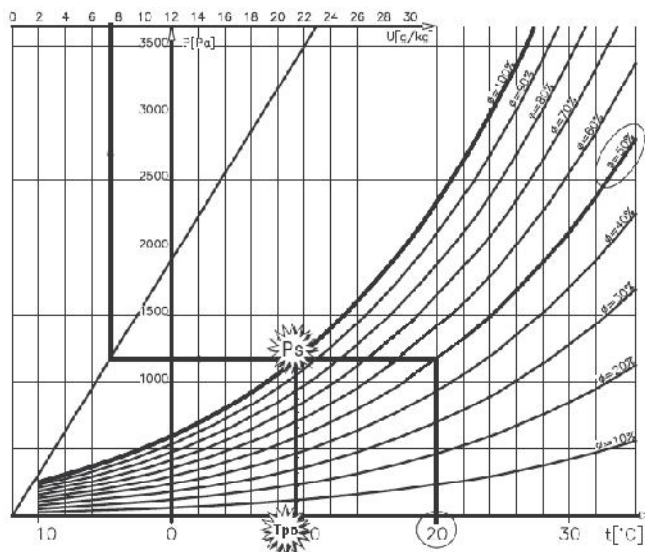


Fig. 9 – Exemplo de diagrama psicrométrico [10]

2.2.3.2. Método dos graus acumulados de condensação

O risco de ocorrência de condensação pode ser avaliado utilizando o conceito de “graus acumulados de condensação” onde as condensações são calculadas acumulando, durante um determinado período de tempo, as diferenças positivas entre a temperatura do ponto de orvalho do ar e da temperatura da superfície e considerando que as diferenças negativas são iguais a zero [11] (22).

$$\text{Graus acumulados de condensação} = \sum [T_{po} - T_{sup} > 0] \quad (22)$$

em que,

T_{po}	Temperatura de ponto de orvalho	$^{\circ}\text{C}$
T_{sup}	Temperatura superficial	$^{\circ}\text{C}$

Neste trabalho foram calculados os acumulados mensais das diferenças positivas horárias para todo o ano de 2010, calculando a temperatura de ponto de orvalho em função da humidade relativa e da temperatura do ar, segundo a equação (23).

$$T_{po} = 237,7 \times \left[\frac{17,271 \times t_a}{237,7 + t_a} + \ln \left(\frac{HR}{100} \right) \right] / \left[17,271 - \frac{17,271 \times t_a}{237,7 + t_a} + \ln \left(\frac{HR}{100} \right) \right] \quad (23)$$

em que,

HR	Humidade relativa do ar	$\%$
t_a	Temperatura do ar	$^{\circ}\text{C}$

Foi necessária a aplicação deste método para calcular a ocorrência das condensações uma vez que o programa de simulação utilizado para analisar o comportamento higrotérmico de um elemento construtivo (§3.1), não permite a obtenção directa deste parâmetro. Assim, calculando as temperaturas de ponto de orvalho (23) e obtendo os valores de temperaturas superficiais através dos resultados da simulação, é possível realizar as diferenças positivas e avaliar a ocorrência de condensações.

3

Simulações numéricas

3.1. ESCOLHA DO PROGRAMA DE CÁLCULO

3.1.1. GENERALIDADES

Em consequência do aumento das patologias nas fachadas de edifícios relacionadas com a transferência de calor e humidade através dos elementos construtivos, o investimento e empenho na área de investigação do comportamento higrotérmico de fachadas tem vindo a aumentar.

Nos últimos 20 anos começaram a surgir programas informáticos que permitem realizar simulações numéricas utilizando modelos de transferência de calor, ar e humidade designados por modelos HAM. Por simularem o transporte de humidade e calor ao longo dos elementos construtivos, é assim possível quantificar a humidade presente nas diferentes camadas.

De todos os software disponíveis optou-se por utilizar o programa de cálculo WUFI Pro 4.2 IBP. Este consiste num programa de simulação numérica em regime variável 1D, desenvolvido pelo “Fraunhofer Institute for Building Physics”. Esta ferramenta informática possibilita o cálculo simultâneo da transferência de humidade e calor no elemento construtivo assim como o cálculo da temperatura superficial através da definição de um balanço radiativo explícito na superfície exterior das fachadas.

3.1.2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA WUFI PRO 4.2

3.1.2.1. Equações de transferência simultânea de calor e humidade

O WUFI Pro 4.2 permite o cálculo simultâneo, unidireccional e em regime variável da transferência de calor e humidade num elemento construtivo constituído por diferentes camadas [5]. Esta ferramenta de simulação higrotérmica tem em consideração os fenómenos de transporte e armazenamento de calor e humidade enumerados na Tabela 2, que permitem definir as equações (24) e (25) de balanço de massa e energia [24].

Tabela 2 – Fenómenos de transferência de calor e humidade

Transferência de calor	Transferência de humidade
Condução	Transporte de humidade por difusão de vapor de água
Radiação solar e de onda longa	Transporte de água líquida por difusão de superfície e por capilaridade
Fluxos de entalpia	----

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \times \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla (D_{\varphi} \times \nabla \varphi + \delta_p \times \nabla (\varphi \times p_{\text{sat}})) \quad (24)$$

$$\frac{\partial H}{\partial T} \times \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda_w \times \nabla T) + h_l \times \nabla (\delta_p \times \nabla (\varphi \times p_{\text{sat}})) \quad (25)$$

em que

w	Teor de humidade	[kg/m ³]
φ	Humidade relativa	[-]
t	Tempo	[s]
D _φ	Coefficiente de condução líquida	[kg/(m.s)]
δ _p	Permeabilidade ao vapor do material	[kg/(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 _l	Calor latente da mudança de fase	[J/kg]

O lado esquerdo da equação (24) representa o armazenamento de humidade e o lado direito traduz as condições de transporte descritas pela divergência de fluxo líquido e de vapor de água. Relativamente à equação de equilíbrio de calor (25), esta é obtida pela derivada da entalpia em ordem à temperatura e ao tempo. Em regime estacionário, como a temperatura é constante ao longo do tempo, a derivada da temperatura em ordem ao tempo é igual a zero, o que faz com que a variação da entalpia em ordem ao tempo também seja nula. Desta forma, explica-se que o fluxo de calor unidireccional em regime estacionário seja constante. Já em regime variável existe variação da temperatura em ordem ao tempo, assim, a variação da entalpia em ordem ao tempo não é nula, o que dá origem a um fluxo de calor variável. O termo do lado direito da equação de energia contém o transporte de calor por condução e os fluxos de entalpia devido à mudança de fase [18].

3.1.2.2. Equações do balanço radiativo explícito na superfície exterior

Para fazer a estimativa do risco de ocorrerem condensações superficiais, a radiação térmica deve ser tida em conta. No entanto, a maior parte dos modelos higrótérmicos de simulação usam um método simplificado para o cálculo da temperatura exterior das superfícies. Este método, para além das trocas de calor por condução e convecção, só considera a radiação solar de onda curta que aquece a superfície durante o dia, ignorando as trocas de radiação térmica de onda longa entre a superfície exterior e a sua envolvente. Desta forma, as temperaturas superficiais só podem ser obtidas com uma exactidão limitada. Isto influencia especialmente a análise do fenómeno de arrefecimento nocturno das superfícies exteriores, que é a grande causa do agravamento das condensações superficiais [20].

Por esta razão, o “Fraunhofer Institute for Building Physics”, que dedicou muitos dos seus estudos à análise da ocorrência de condensações superficiais em sistemas do tipo ETICS, desenvolveu um modelo de modo a permitir o cálculo correcto das temperaturas das superfícies exteriores. O software

WUFI Pro 4.2 define assim um balanço radiativo explícito na superfície exterior, de onde resultam valores positivos ou negativos, correspondente ao aquecimento ou arrefecimento da superfície.

A equação (26) demonstra o fluxo de calor que resulta do balanço radiativo na superfície tendo em conta duas parcelas de radiação de onda longa, radiação emitida pela superfície, I_e , e radiação que chega à superfície, $I_{ol,perp}$, e uma parcela de radiação de onda curta solar, $I_{s,perp}$ [20].

$$I_{rad} = \alpha_s \times I_{s,perp} + \varepsilon \times I_{ol,perp} - I_e \quad (26)$$

em que

I_{rad}	Fluxo de calor resultante do balanço radiativo	[W/m ²]
α_s	Coefficiente de absorção da radiação solar	[-]
$I_{s,perp}$	Componente normal à superfície da radiação solar	[W/m ²]
ε	Emissividade da superfície	[-]
$I_{ol,perp}$	Componente normal da radiação de onda longa que chega à superfície	[W/m ²]
I_e	Radiação emitida pela superfície	[W/m ²]

As radiações solar e de onda longa, $I_{s,perp}$ e $I_{ol,perp}$, são calculadas através das equações (27) e (28) seguidamente representadas:

$$I_{s,perp} = I_{s,dir} + g_{atm} \times I_{s,dif} + g_{ter} \times I_{s,ref} \quad (27)$$

$$I_{ol,perp} = g_{atm} \times I_{atm} + g_{ter} \times (I_{ter} + I_{atm,ref}) \quad (28)$$

em que

$I_{s,dir}$	Radiação solar directa perpendicular à superfície	[W/m ²]
g_{atm}	Factor forma atmosfera/superfície	[-]
$I_{s,dif}$	Radiação solar difusa	[W/m ²]
g_{ter}	Factor forma solo/superfície	[-]
$I_{s,ref}$	Radiação solar reflectida pelo solo	[W/m ²]
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]

Como se pode observar, existem em ambas as expressões factores de forma que afectam as radiações. Esses factores são designados por factor de forma atmosfera/superfície, g_{atm} , e solo/superfície, g_{ter} , e dependem da inclinação da superfície em análise, como demonstrado nas equações (29) e (30). Como a análise desta dissertação se centra numa parede, β tomará o valor de 90°.

$$g_{atm} = \cos^2(\beta/2) \quad (29)$$

$$g_{ter} = 1 - g_{atm} \quad (30)$$

sendo

β Inclinação da superfície [°]

Nas equações (27) e (28), existem três valores de radiação que são retirados directamente do ficheiro climático a ser introduzido no WUFI: a radiação solar difusa, $I_{s,dif}$, a radiação atmosférica, I_{atm} , e a radiação solar directa incidente numa fachada horizontal, $I_{s,dir,h}$. A radiação solar directa incidente na superfície, $I_{s,dir}$, será calculada automaticamente pelo WUFI, em função da $I_{s,dir,h}$ e conhecendo a posição do sol. Todas as parcelas que restam, são calculadas a partir dos dados climáticos e parâmetros a definir pelo utilizador [5].

A equação (31) demonstra como a radiação solar reflectida pelo solo, $I_{s,ref}$, é calculada em função da soma da radiação solar difusa com radiação solar directa incidente na superfície horizontal, afectada pelo coeficiente de reflexão de onda curta do solo, $\rho_{s,ter}$.

$$I_{s,ref} = \rho_{s,ter} \times (I_{s,dir,h} + I_{s,dif}) \quad (31)$$

sendo

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

$I_{s,dir,h}$ Radiação solar directa numa superfície horizontal [W/m²]

Segundo a Lei de Stefan-Boltzman, considerando a emissividade do solo e que a sua temperatura é igual à do ar exterior, é possível obter a radiação de onda longa emitida pelo solo, I_{ter} , como demonstrado na equação (32).

$$I_{ter} = \varepsilon_{ter} \times \sigma \times T_a^4 \quad (32)$$

em que

ε_{ter} Emissividade do solo [-]

σ Constante de Stefan-Boltzman [W/(m².K⁴)]

T_a Temperatura absoluta do ar exterior [K]

Por fim, a radiação atmosférica reflectida pelo solo, $I_{atm,ref}$, é calculada através do coeficiente de reflexão de onda longa do solo, $\rho_{ol,ter}$, e da radiação atmosférica cujos valores são fornecidos pelo dados climáticos (33).

$$I_{atm,ref} = \rho_{ol,ter} \times I_{atm} \quad (33)$$

Até agora, de todos os termos de radiação mencionados, nenhum dependia de valores resultantes do cálculo da simulação. No entanto, o mesmo não se passa com a radiação de longa onda emitida pelo edifício, I_e . Esta é calculada através da Lei de Stefan-Boltzman que depende da temperatura da superfície exterior (dado calculado pelo o WUFI após a simulação). Para contornar esse problema o programa resolve uma dependência linear da equação de Stefan-Boltzman conseguida através da linearização pela serie de Taylor (34) [20].

$$I_e = \varepsilon \times \sigma \times T_i^4 + 4 \times \varepsilon \times \sigma \times T_i^3 \times (T_{i+1} - T_i) \quad (34)$$

A Figura 10 mostra todas as parcelas envolvidas no cálculo do balanço radiativo numa superfície exterior de uma fachada durante o período diurno.

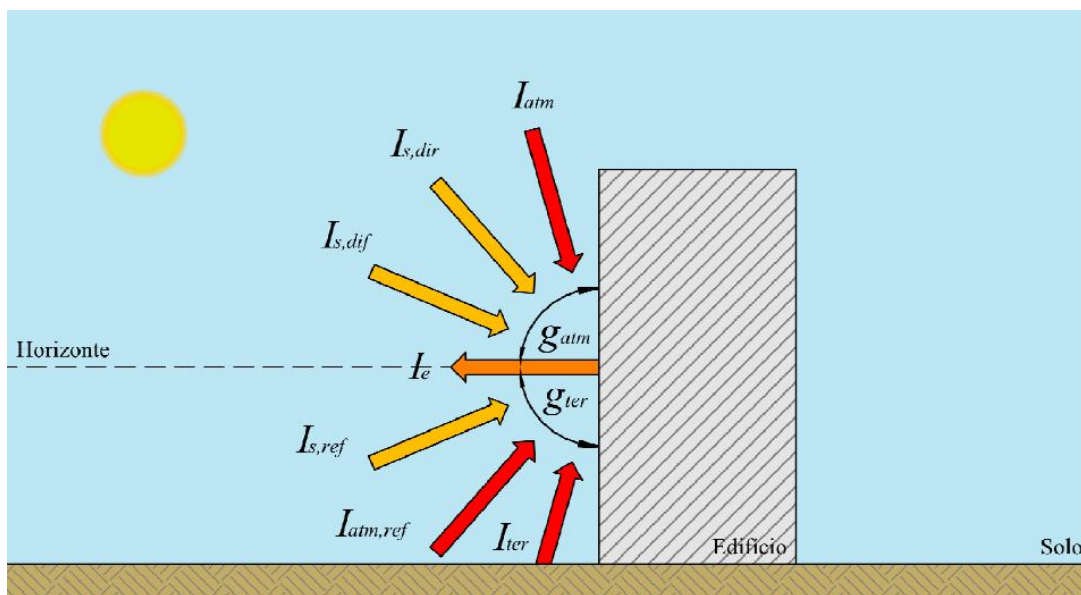


Fig. 10 – Parcelas do balanço radiativo na superfície exterior de uma parede durante o dia [5]

No entanto, como durante a noite não existe radiação solar, a parcela $I_{s,perp}$, da equação (26) deixa de existir. Assim, o balanço radiativo passa a ter apenas três parâmetros fundamentais na análise: a radiação emitida pelo edifício, I_e , a radiação emitida pelas superfícies terrestres localizadas nas proximidades do edifício, I_{ter} , e a radiação emitida pelo céu, I_{atm} (Figura 11).

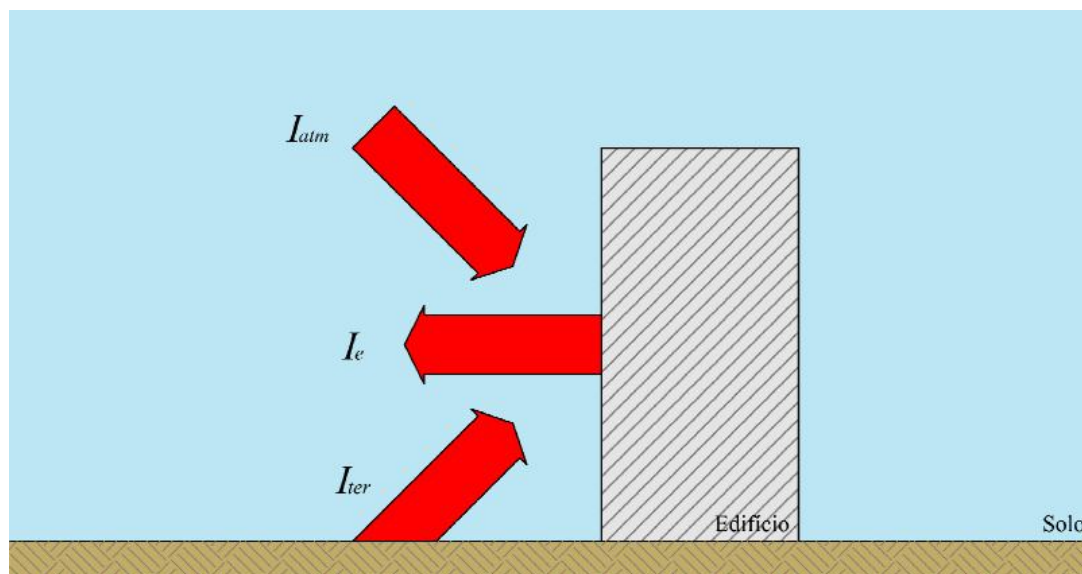


Fig. 11 – Balanço radiativo da envolvente do edifício no período noturno [5]

Como a fachada de um edifício se comporta como um corpo cinzento, não só emite radiação, I_e , mas também absorve uma parte da radiação de longa onda emitida pelo céu (I_{atm}) e pelo solo (I_{ter}).

Considerando como corpo cinzento a superfície terrestre, o balanço das trocas de radiação entre fachada e superfícies envolventes é quase nulo, pois as suas temperaturas são semelhantes. Assim o parâmetro com mais influência no balanço radiativo da fachada durante a noite é a radiação atmosférica.

Em situações de céu limpo existe uma considerável redução da intensidade total emitida pela radiação atmosférica pois não é contínua em todos os comprimentos de onda. Esta redução, que durante a noite não é compensada pela radiação solar, causa um balanço radiativo negativo.

Este balanço negativo origina uma diminuição da temperatura superficial aumentando assim a ocorrência de condensações superficiais. Esta perda de calor por radiação mantém-se até que seja compensada pelo transporte de calor por convecção e condução.

3.1.2.3. Dados de entrada

Elemento construtivo

O WUFI Pro 4.2 inicia-se com a configuração do elemento construtivo que inclui a identificação das diferentes camadas do elemento em simulação assim como as respectivas espessuras.

O elemento construtivo simulado trata-se de uma parede exterior revestida com um sistema ETICS. Esta solução, muito comum hoje em dia, permite a minimização das trocas de calor entre o exterior e interior do edifício, aumentando assim o conforto térmico e minimizando as patologias na construção.

O sistema ETICS em estudo é constituído por uma camada de poliestireno expandido (EPS) protegido por um reboco exterior acrílico sobre um suporte estrutural de alvenaria de tijolo perfurada de 22 cm como demonstrado na Figura 12. Como mencionado anteriormente (§ 2.1.1), o reboco exterior em sistemas do tipo ETICS é constituído por uma camada base e de acabamento. No entanto, por questões

de simplicidade, considerou-se uma monocamada para o reboco exterior com as propriedades descritas na Tabela 4. Supõe-se que esta alteração não influencia os resultados das simulações.

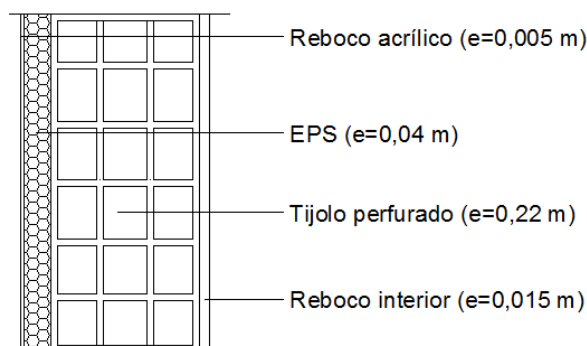


Fig. 12 – Esquema do elemento construtivo simulado

As propriedades dos materiais estão divididas em dois grupos:

- Propriedades fundamentais para o cálculo da simulação - propriedades básicas (Tabela 3);
- Propriedades de uso opcional de acordo com o tipo de simulação e material em questão designadas por propriedades hígricas complementares – curva higroscópica, coeficiente de difusividade hígrica para sucção e redistribuição [m^2/s] em função do teor de humidade [kg/m^3], condutibilidade térmica [$W/(m.K)$] em função do teor de humidade [kg/m^3] e factor de resistência à difusão de vapor [-] em função da humidade relativa[-].

Tabela 3 – Propriedades básicas dos materiais [6]

Símbolo	Conceito	Definição	Unidades
ρ	Massa Volúmica	Razão entre massa e volume de um corpo.	kg/m^3
ϵ	Porosidade	Razão entre volume de vazios dos poros e o volume total do corpo.	m^3/m^3 ou %
c	Calor específico do material seco	Quantidade de calor necessário para variar $1^\circ C$ a temperatura da unidade de massa de um determinado material.	$J/(kg.K)$
K	Condutibilidade térmica do material seco	Quantidade de calor que atravessa perpendicularmente determinado material com faces planas e paralelas, por unidade de tempo e espessura, quando sujeito a um gradiente de temperatura unitário entre as duas faces.	$W/(m.K)$
μ	Factor de resistência à difusão de vapor	Valor característico dos materiais, obtido pela relação (adimensional) entre a permeabilidade ao vapor de água do ar e a permeabilidade ao vapor de água do próprio material.	-

Os materiais da fachada podem ser escolhidos utilizando o menu “Material Database” do programa ou introduzindo dados das propriedades obtidos por ensaios ou catalogados noutras fontes bibliográficas. Neste caso foi utilizada a base de dados do programa para todas as camadas excepto o reboco exterior, cujas propriedades foram adaptadas de Barreira (2010) [5]. Na Tabela 4 apresentam-se as propriedades básicas das diversas camadas da solução construtiva em estudo assim como as espessuras, e (m), adoptadas.

Tabela 4 - Dados de entrada: propriedades dos materiais

Material	ρ [kg/m ³]	ϵ [m ³ /m ³]	c [J/(kg.K)]	K [W/(m.K)]	μ [-]	e [m]
Reboco exterior (Reboco acrílico)	1600	0,2	850	1	25	0,005
EPS	30	0,95	1500	0,04	50	0,04
Tijolo perfurado	1900	0,24	850	0,6	10	0,22
Reboco interior	2000	0,3	850	1,2	25	0,015

Orientação, inclinação e altura

Após a configuração da fachada tipo é necessário definir condições do contorno exterior através de três comandos:

- “Orientação” – permite que o WUFI calcule a quantidade de chuva incidente e a intensidade da radiação directa incidente na fachada;
- “Inclinação” – influencia o valor do cálculo da quantidade da chuva incidente e radiação incidente na superfície;
- “Altura do edifício/Coefficientes de chuva incidente” – é identificada a altura do edifício em estudo assim como os coeficientes R1 e R2 que servem para estimar a quantidade de chuva incidente (l/m²h) na superfície.

No caso em estudo considerou-se as paredes de orientação Norte dos edifícios de gabinetes da FEUP (Figura 13).

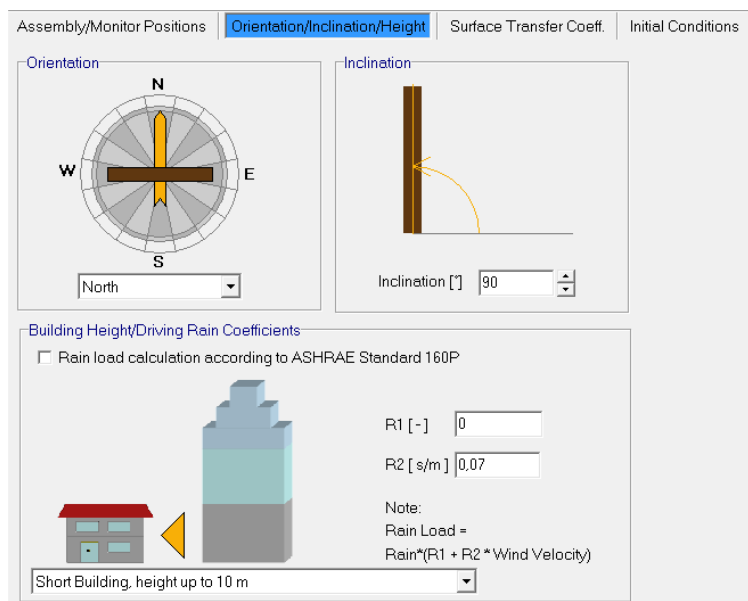


Fig. 13 - Dados de entrada: configuração do elemento construtivo

Coefficientes de transferência à superfície exterior e interior

Estes parâmetros indicam como as condições ambientais interiores e exteriores afectam os fluxos de calor e humidade que atravessam o elemento construtivo. Os coeficientes de transferência à superfície com mais importância para a avaliação da variação da temperatura superficial são apresentados na Tabela 5. Os valores são iguais aos adoptados por Barreira (2010) [5].

Tabela 5 - Parâmetros de simulação

Coefficientes de transferência à superfície (exterior)	
Resistência térmica [(m ² .K)/W]	Dependente do vento
Efeito da radiação	Explicito
Coefficiente de absorção de onda curta	0,35
Emissividade da superfície	0,85
Emissividade do solo	0,9
Coefficiente de reflexão de onda curta do solo	0,2
Coefficiente de reflexão de onda longa do solo	0,1
Factor de absorção da água da chuva	0,7
Coefficientes de transferência à superfície (interior)	
Resistência térmica [(m ² .K)/W]	0,125

Condições iniciais

Como condições iniciais da simulação higrótérmica do elemento construtivo, foram adoptados os valores 10°C e 70% para temperatura e humidade relativa, respectivamente, considerando os valores constantes ao longo da secção transversal.

Controle

Após o preenchimento da configuração do elemento construtivo, o passo seguinte do programa WUFI Pro 4.2 destina-se à definição da duração do período de simulação. Este estudo foi realizado para o ano de 2010 com os dados climáticos recolhidos pela estação meteorológica do Laboratório de Física de Construções da FEUP – LFC [21].

Clima

- **Clima exterior**

As condições ambientais exteriores a que o elemento construtivo está sujeito são consideradas pelo WUFI através de um ficheiro climático que deve incluir os valores horários da temperatura do ar (°C), humidade relativa do ar (%), direcção do vento (contabilizada no sentido dos ponteiros do relógio, com Norte a corresponder a 0°), velocidade do vento (m/s), precipitação (mm), pressão atmosférica (hPa), radiação solar global incidente num plano horizontal (W/m^2), radiação solar difusa incidente num plano horizontal (W/m^2) e radiação de onda longa emitida pela atmosfera incidente num plano horizontal (W/m^2).

No entanto, antes de introduzir o ficheiro no programa, este foi tratado em diferentes etapas que serão explicadas no § 3.1.3.

- **Clima interior**

O clima interior está dependente do clima exterior, dos sistemas de ventilação, aquecimento e arrefecimento e do comportamento dos ocupantes. As condições interiores podem assim ser introduzidas no programa através de um ficheiro com a informação da temperatura e da humidade relativa ou utilizando os modelos de cálculo fornecidos pelo WUFI – Curvas Sinusoidais ou as normas EN13788, EN15026 e ASHRAE160. No âmbito desta dissertação, para a definição das condições de clima interior foi escolhida a norma EN15026 [18].

A norma seleccionada define as condições interiores de temperatura e humidade relativa de edifícios aquecidos (habitação ou de escritórios) somente através da temperatura exterior. Para certos limites, a norma EN15026 assume que os valores de temperatura e humidade relativa interior possuem uma dependência linear da temperatura exterior. Em intervalos fora desses limites, os parâmetros são consideradas constantes [19].

Como se pode observar na Figura 14, para valores exteriores abaixo dos 10°C ou acima de 20°C, a temperatura interior assume valores constantes de 20°C e 25°C, respectivamente. No entanto, no intervalo entre 10°C e 20°C a temperatura interior é calculada a partir da temperatura exterior que varia linearmente entre os 20°C e os 25°C

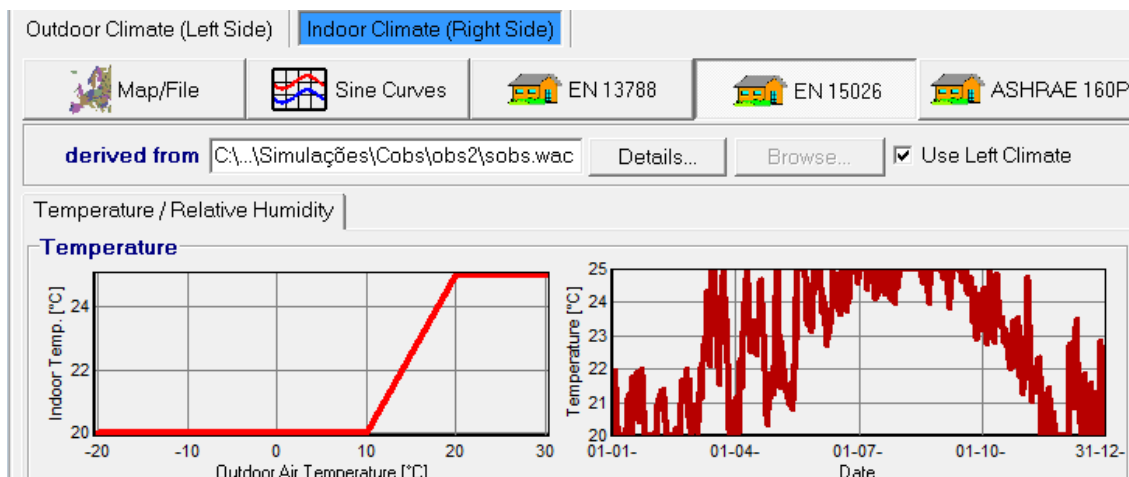


Fig. 14 – Temperatura interior utilizando norma EN15026

Quanto à humidade relativa interior, existem dois grupos de carga de humidade, normal ou alta, consoante o tipo de ocupação do edifício. Para uma carga normal é admitido que, no intervalo de temperatura exterior entre os -10°C e os 20°C , os valores de humidade relativa interior variam linearmente entre 30% e 60%. Para temperaturas fora desse intervalo, a humidade é considerada constante. Por outro lado, para uma carga de humidade alta, as humidades relativas interiores variam entre 40% e 70% para o mesmo intervalo de temperatura exterior. No estudo em questão, optou-se por seleccionar uma carga normal de humidade (Figura 15).

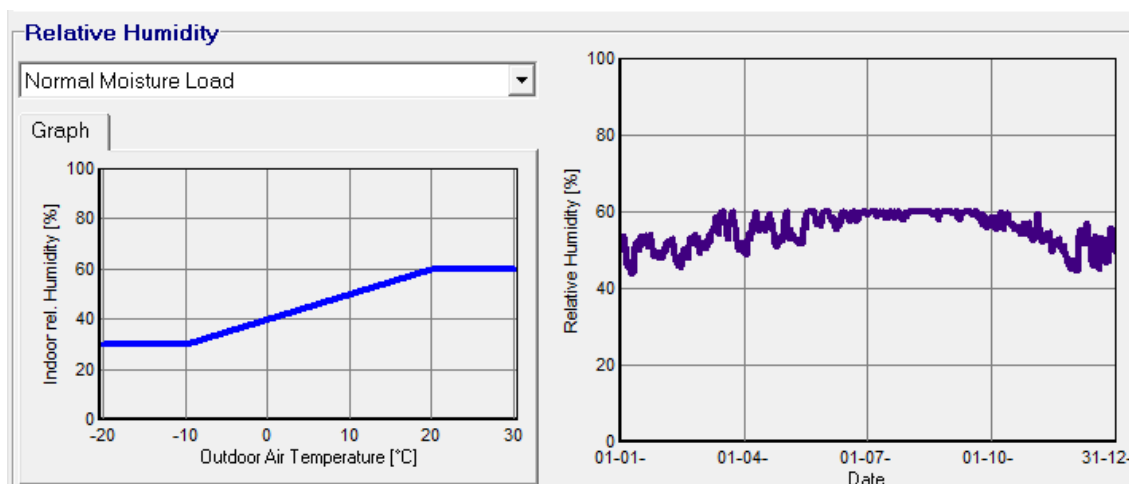


Fig. 15 – Humidade relativa interior utilizando norma EN 15026 (carga normal)

3.1.2.4. Dados de Saída

O principal objectivo desta dissertação é a avaliação da ocorrência de condensações superficiais exteriores em fachadas revestida com ETICS durante o ano de 2010. No entanto, este não é um parâmetro de saída directa do programa de simulação utilizado.

Dos vários resultados gerados pelo WUFI, os de maior importância para este estudo, são os gráficos temporais com a variação da temperatura superficial exterior. Conhecendo os valores de temperatura

superficial e calculando a temperatura de ponto de orvalho com dados de humidade relativa e temperatura do ar exterior (23) é possível avaliar de ocorrência de condensações (22).

3.1.2.5. Limitações do programa

O programa WUFI Pro 4.2, apesar da simplicidade de utilização e de oferecer um conjunto de vantagens de grande utilidade para este estudo, apresenta também algumas limitações. O software não consegue simular o efeito de obstáculos na variação da temperatura superficial em fachadas revestidas com ETICS, logo, esse efeito tem que ser introduzido nos dados climáticos como um incremento na radiação atmosférica (§ 3.2.2). No entanto, este método é considerado bastante experimental pelo que os resultados obtidos podem ser alvo de críticas pois a sua validação ainda não foi exaustiva o suficiente para garantir a sua fiabilidade.

O WUFI não tem também em consideração [19]:

- Transferências de calor e humidade por convecção devida ao movimento do ar;
- Alguns dos mecanismos de transporte da água líquida;
- A transferência conjunta de água líquida e de sais;
- A resistência da interface entre dois materiais porosos à transferência de humidade;
- Os fluxos de calor resultantes da transferência de água líquida devida à diferença de temperatura.

3.1.3. TRATAMENTO DOS DADOS CLIMÁTICOS A INTRODUIR NO WUFI

O tratamento dos dados climáticos constituiu uma das tarefas mais importante e trabalhosa deste estudo devido à quantidade de dados em análise.

Inicialmente foram fornecidos dados climáticos em ficheiros Excel, retirados da estação meteorológica do LFC da FEUP, de todo o ano de 2010 [21]. No entanto, para além de serem fornecidos os dados num conjunto de ficheiros individuais com informação diária de 10 em 10 minutos, também não se encontravam tratados. Foi por isso necessário realizar um conjunto de passos, seguidamente enumerados, com o objectivo de obter a informação climática correcta a fornecer ao WUFI:

- Agrupar cronologicamente num único ficheiro Excel todos os dados climáticos;
- Corrigir os dados que saíram directamente do logger da estação meteorológica, como indicado nas observações da Tabela 6;
- Transformar dados de 10 em 10 minutos em dados horários realizando a média de cada grupo de seis valores para todos os parâmetros. Este passo é necessário pois o WUFI, por defeito, apenas analisa informação climática horária;
- Eliminar erros de medição resultantes de falhas na transmissão de sinal entre o logger e o computador. Assim, para evitar erros significativos nas médias horárias, consideram-se que essas falhas assumem o valor zero.

Tabela 6 – Parâmetros dos dados climáticos

WUFI Pro	Unidades	Obs.
Temperatura	°C	-----
Humidade Relativa	%	-----
Direcção do vento	°	Norte - 0° (rotação no sentido dos ponteiros do relógio)
Velocidade do vento	m/s	-----
Precipitação	mm	Multiplicar por 2
Pressão atmosférica	hPa	-----
Radiação solar global	W/m ²	RadSolar < 6 W/m ² então Rad Solar = 0 W/m ²
Radiação solar difusa	W/m ²	RadSolar < 6 W/m ² então Rad Solar = 0 W/m ²
Radiação atmosférica	W/m ²	$L_{emitida} = L_{logger} + 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot T_{ar}^4$

No fim, obteve-se um ficheiro Excel com 9 colunas e 8760 linhas representativo dos dados climáticos horários para o ano de 2010, cuja as médias e acumulados mensais e anuais dos diferentes parâmetros são indicados na Tabela 7, e a variação horária é apresentada no Anexo I.

Tabela 7 – Médias e acumulados mensais e anual dos parâmetros climáticos medidos pela estação meteorológica do LFC

Médias/ Acumulados	Parâmetros climáticos								
	1 ^(*) ₁	2 ^(*) ₁	3 ^(*) ₁	4 ^(*) ₁	5 ^(*) ₂ / 3 ^(*) ₃	6 ^(*) ₁	7 ^(*) ₂	8 ^(*) ₂	9 ^(*) ₁
Jan	10,07	77	171	1,39	1,55/181,9	999	54	25	317
Fev	10,19	73	156	1,80	0,31/26,2	990	76	40	316
Mar	14,98	58	179	1,30	0,14/8,1	1002	157	42	310
Abr	14,79	66	172	1,26	0,15/9,7	999	173	70	329
Mai	17,45	64	181	1,68	0,48/23,1	999	209	63	331
Jun	19,47	70	193	1,16	0,29/11,3	999	235	67	346
Jul	21,12	71	193	1,07	0,08/0,6	1003	235	58	357
Ago	23,19	60	192	1,09	0,10/1,1	1001	205	53	367
Set	20,16	71	177	1,00	0,43/4,7	1000	166	50	351
Out	16,32	74	158	1,39	0,36/42,3	996	104	37	339
Nov	11,76	80	166	1,17	0,25/40,0	998	69	28	324
Dez	10,45	78	147	1,83	0,23/42,2	990	44	24	324
Anual	15,83	70	174	1,34	0,36/32,6	998	144	46	334

^(*)₁ Média; ^(*)₂ Média dos valores positivos; ^(*)₃ Acumulados

Parâmetros: 1 – Temperatura [°C]; 2 – Humidade relativa [%]; 3 – Direcção do vento [°]; 4 – Velocidade do vento [m/s]; 5 – Chuva [mm]; 6 – Pressão atmosférica [hPa]; 7 – Radiação solar global [W/m²]; 8 – Radiação solar difusa [W/m²]; 9 – Radiação atmosférica [W/m²]

Sabendo que o programa WUFI não lê dados climáticos em ficheiros de textos que não sejam do tipo .WAC ou .KLI, foi imprescindível a conversão do ficheiro Excel. Para isso, contou-se com o auxílio de uma ferramenta fornecida pelo WUFI denominada de “CreatClimateFile.xls”, que permite a transformação do ficheiro Excel para o formato pretendido. Optou-se neste caso, pela conversão num ficheiro .WAC.

Para obter o novo formato do ficheiro é apenas necessário, na ferramenta “CreatClimateFile.xls”, a introdução correcta dos dados climáticos horários para um ano previamente tratados, assim como a latitude, longitude e altura em relação ao nível do mar da zona em simulação. Tratando-se do estudo dos gabinetes da FEUP, a latitude, longitude e altura são, respectivamente, 41,13°, -8,60° e 100 m (Figura 16).

Após a introdução de todos os dados, seleccionando a célula “Export to .WAC file” o programa irá gerar o ficheiro pretendido, bastando importar para o WUFI.

					F	G	H	I	J	K	L	M	N
					Location: Porto				sobs.wac				
					Description:								
					Longitude [°]	-8,60	Height [m]	100					
					Latitude [°]	41,13	Time Zone [h]	0,0	Export to .WAC file Ver.: 1.2				
Year	Month	Day	Hour	cumul Hour	Temperature [°C]	Air Humidity	Wind Direction [°]	Wind Speed [m/s]	Rain [Ltr/m ² h]	Air Pressure [hPa]	Radiation [W/m ²]	Radiation [W/m ²]	Radiation [W/m ²]
					Air Temperature	Rel. Humidity [0..1]	north = 0, clockwise	Skalar Average	Normal Rain	At Station Height	Solar Global Horiz.	Solar Diffuse Horiz.	Countertrad. Atm. Horiz.
10	1	1	1	1	9,50	0,73	200,25	2,58	0,00	989,17	0,00	0,00	323,61
11	1	1	1	2	11,02	0,67	214,63	5,20	0,20	989,00	0,00	0,00	325,46
12	1	1	1	3	11,15	0,68	207,05	3,83	0,00	988,50	0,00	0,00	330,85
13	1	1	1	4	11,43	0,68	210,57	5,33	0,60	988,00	0,00	0,00	348,94
14	1	1	1	5	10,82	0,77	210,20	5,32	0,40	988,33	0,00	0,00	351,80
15	1	1	1	6	10,50	0,80	207,27	5,98	0,40	988,17	2,00	0,00	347,66
16	1	1	1	7	10,87	0,83	168,80	4,80	0,00	988,17	0,00	0,00	353,70
17	1	1	1	8	10,92	0,82	198,93	3,15	0,20	988,83	0,00	0,00	339,66
18	1	1	1	9	11,22	0,75	95,80	1,20	1,00	990,33	7,33	4,83	334,85
19	1	1	1	10	11,22	0,75	142,17	0,93	0,40	992,17	55,83	40,00	351,92
20	1	1	1	11	11,32	0,81	159,58	1,80	0,00	994,00	102,50	90,17	347,56
21	1	1	1	12	12,02	0,75	92,40	1,10	0,00	995,67	234,00	121,33	323,10
22	1	1	1	13	13,13	0,68	216,87	0,87	0,00	996,83	299,00	93,67	283,14
23	1	1	1	14	11,50	0,77	178,38	0,90	0,20	996,67	193,17	121,33	344,51
24	1	1	1	15	12,28	0,77	262,67	0,77	0,00	997,00	253,00	103,83	291,80
25	1	1	1	16	12,63	0,69	189,53	0,63	0,00	998,00	183,33	95,83	320,16
26	1	1	1	17	12,42	0,67	215,75	0,95	0,00	998,00	56,83	40,33	293,00
27	1	1	1	18	11,25	0,74	198,93	0,40	0,00	998,33	8,50	6,50	293,11
28	1	1	1	19	10,60	0,79	155,77	0,45	0,00	999,00	0,00	0,00	303,91
29	1	1	1	20	10,15	0,82	155,60	0,48	0,00	999,50	0,00	0,00	288,37
30	1	1	1	21	9,82	0,84	144,00	0,55	0,00	1000,00	0,00	0,00	285,28

Fig. 16 – Excerto da folha de Excel na ferramenta “CreatClimateFile.xls”

3.2. SIMULAÇÕES

3.2.1. ENQUADRAMENTO

A degradação do aspecto visual de fachadas revestidas com ETICS está fortemente relacionada com o teor de humidade superficial que estimula o desenvolvimento biológico. Um dos fenómenos que provoca a humedificação das superfícies é a ocorrência de condensações superficiais que acontecem sempre que a temperatura superficial é inferior à temperatura de ponto de orvalho. A presença de um obstáculo influencia a temperatura superficial na fachada protegida, pois funciona como elemento de sombreamento durante o dia e como fonte extra de radiação de onda longa durante a noite, condicionando também ocorrência de condensações. Assim, para avaliar o efeito de um obstáculo no comportamento higrotérmico de uma fachada foram realizadas diversas simulações utilizando o programa descrito no § 3.1.

O estudo é realizado para a fachada Norte dos edifícios de gabinetes dos departamentos da FEUP que apresentam fachadas revestidas com um isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS. Estes edifícios foram ideais pois, para além de se situarem na FEUP e serem de fácil acesso, também a estação meteorológica do LFC/FEUP se localiza na sua proximidade. Desta forma é garantido uma correspondência válida entre os dados climáticos medidos e as condições climáticas exteriores reais que actuam nos edifícios.

Foram assim realizados três tipos diferentes de simulações, que simbolizam as três condições a que estão sujeitas as fachadas (Figura 17):

- Primeira simulação – Edifício de Engenharia Química sem obstáculo vertical (localização 1);
- Segunda simulação – Edifício de Engenharia de Minas com obstáculo vertical paralelo de diferente altura (localização 2);
- Terceira simulação – Edifício de Engenharia Civil com obstáculo vertical paralelo de igual altura (localização 3).

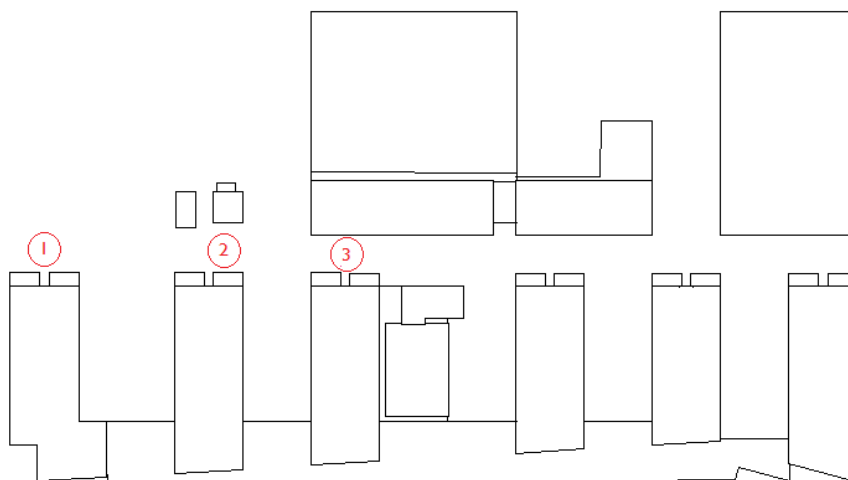


Fig. 17 – Planta dos edifícios em estudo e localização das simulações

3.2.2. OBSTÁCULOS VERTICAIS

3.2.2.1. Modelo de Simulação do Efeito dos Obstáculos – MOD.O

Para simular a influência de obstáculos verticais, utilizou-se o modelo de simulação designado por MOD.O – Modelo de Simulação do Efeito dos Obstáculos – desenvolvido por Barreira (2010) [5]. Neste modelo é calculado um balanço radiativo simplificado que representa a influência do obstáculo como um acréscimo de radiação somado à radiação atmosférica real. Este acréscimo é função não só da radiação atmosférica mas tem também em conta factores de forma relacionados com as configurações dos obstáculos, como por exemplo, o afastamento entre superfícies, diferenças de alturas, dimensões.

Considerando desprezável o efeito da fachada e do solo, a radiação emitida pelo obstáculo (I_{OV}) pode ser representada através da equação (36). Como se pode observar, I_{OV} é calculada em função da radiação atmosférica que incide sobre o objecto (Figura 19) tendo em conta o factor de forma FF_{atm} (equação (35) e Figura 18) adaptado de Howell (1982) [8] e a Lei de Kirchhoff (11). Com isto, a radiação que de facto incide na fachada emitida pelo obstáculo vertical ($I_{OV(inc)}$) é obtida através de I_{OV} e de um factor de forma FF_{OV} , que varia consoante os diversos casos em análise – localização 2 e 3 (37).

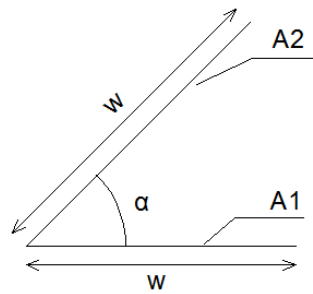


Fig. 18 - Factor forma entre a atmosfera e a superfície (FF_{atm}) [8]

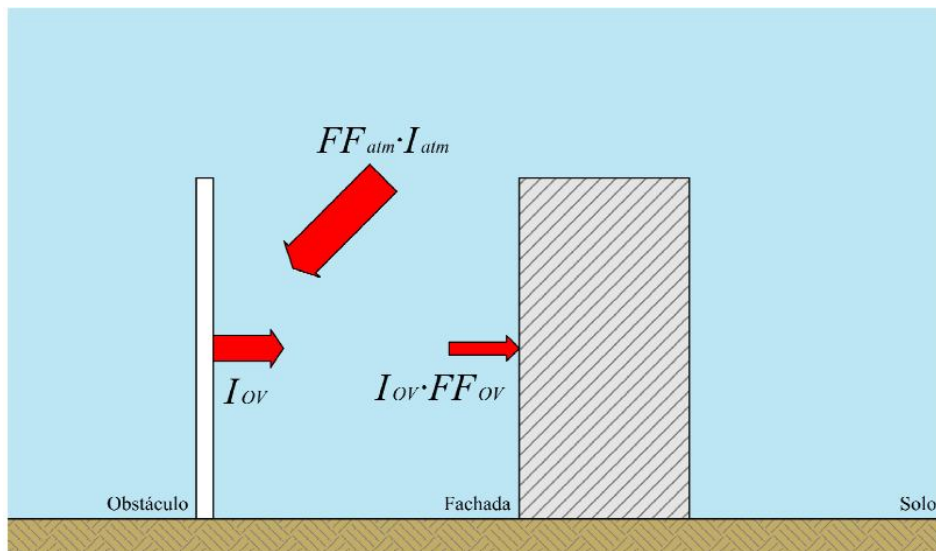


Fig. 19 - Efeito do obstáculo vertical na fachada [5]

$$FF_{atm} = \frac{1}{2} \times (1 + \cos \alpha) \quad (35)$$

$$I_{OV} = \epsilon_{OV} \times FF_{atm} \times I_{atm} \quad (36)$$

$$I_{OV(inc)} = I_{OV} \times FF_{OV} \quad (37)$$

sendo

FF_{atm}	Factor forma entre a atmosfera e a superfície	[-]
α	Inclinação da superfície	[°]
I_{OV}	Radiação emitida pelo obstáculo vertical	[W/m ²]
ϵ_{OV}	Emissividade do obstáculo vertical	[-]
I_{atm}	Radiação emitida pela atmosfera	[W/m ²]
$I_{OV(inc)}$	Radiação emitida pelo obstáculo que incide na fachada	[W/m ²]
FF_{OV}	Factor forma entre duas superfícies	[-]

Pode-se afirmar então que o incremento de radiação devido à presença de um obstáculo é função não só da radiação atmosférica mas também das características do obstáculo como dimensões, distância à fachada, emissividade, diferenças de alturas entre superfícies (38). No entanto, esta radiação é também afectada por uma constante de acerto, a , adoptada por Barreira (2010) [5], que permite uma melhor aproximação dos resultados simulados a valores experimentais.

Contudo, quando o céu se encontra nublado, a radiação atmosférica e a radiação que incide na fachada (exposta ou protegida por um obstáculo) possuem valores muito aproximados. Tendo em conta que nem sempre se sabe o índice de nebulosidade, o acréscimo de radiação só deve ser considerado caso a condição expressa pela equação (39) se verifique.

$$\Delta I_{atm} = \varepsilon_{OV} \times FF_{atm} \times I_{atm} \times FF_{OV} \times a \quad (38)$$

$$|I_{inc(S/OV)} - I_{atm}| > 1,5\% \times \overline{I_{atm}} \quad (39)$$

sendo

ΔI_{atm}	Incremento de radiação atmosférica resultante do efeito do obstáculo na fachada	[W/m ²]
a	Constante de acerto, obtida por Barreira (2010) [5]	[-]
$I_{inc(S/OV)}$	Radiação incidente na fachada sem obstáculo vertical	[W/m ²]
$\overline{I_{atm}}$	Média da radiação atmosférica	[W/m ²]

3.2.2.2. Validação do modelo MOD.O

A validação realizada por Barreira (2010) [5] deste modelo de simulação, é constituída pela comparação de resultados medidos experimentalmente da temperatura superficial, ocorrência de condensações e radiação de onda longa incidente nas superfícies, com os valores obtidos através das simulações. As comparações foram efectuadas para diferentes períodos do ano e considerando diferentes configurações de obstáculo (vertical com dois afastamentos e horizontal com duas emissividades distintas).

Para avaliar experimentalmente o efeito de obstáculos no comportamento higrotérmico de uma fachada, Barreira (2010) colocou estruturas metálicas de diferentes tamanhos e forradas com diferentes materiais a diversas distâncias. Para medir a temperatura superficial e a radiação incidente da fachada utilizou, respectivamente, dois termopares do tipo T e uma sonda Pt100, e dois pirgeómetros.

A Figura 20 mostra os gráficos obtidos por Barreira (2010) [5]. Estes representam a variação no tempo da temperatura superficial de uma fachada protegida por OV afastado de 1 m num dia de Dezembro e num dia de Agosto de 2009, para o ensaio e para a simulação. Como se pode verificar, enquanto para Dezembro os resultados entre ensaio e simulação foram muito próximos, para Agosto o mesmo já não se verificou. A simulação apresenta valores de temperatura bastante superior nos períodos diurnos, pois no cálculo da simulação não é considerado o efeito do sombreamento que o obstáculo provoca. Mesmo assim, a semelhança obtida entre resultados foi satisfatória para o período nocturno.

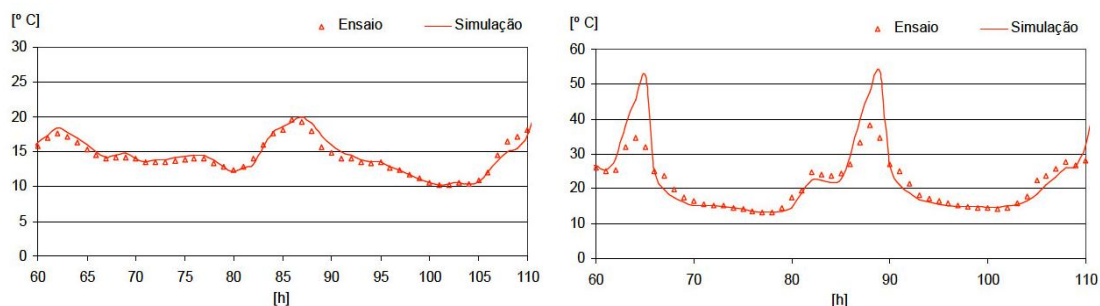


Fig. 20 – Variação no tempo da temperatura da fachada protegida por OV afastado de 1 m, em Dez/2009 e Ago/2009 (ensaio versus simulação) [5]

Quanto ao acumulado das diferentes positivas entre temperatura de ponto de orvalho e temperatura superficial, verificou-se que os resultados obtidos e simulados possuíam valores bastante próximos, com uma variação na ordem dos 10%.

Relativamente à radiação de onda longa incidente na fachada, à semelhança do que acontece para a temperatura superficial, são obtidas aproximações aceitáveis entre resultados medidos e simulados existindo, no entanto, um desfasamento mais evidente em dias de maior incidência solar. Como se pode observar pelos gráficos da Figura 21, que analisam a mesma fachada protegida agora por um OH, no mês de Julho existe uma diferença maior entre resultados, tanto para o período diurno como durante a noite. Contudo, no mês de Outubro, em que a radiação solar tem menor intensidade, essas diferenças não são tão evidentes.

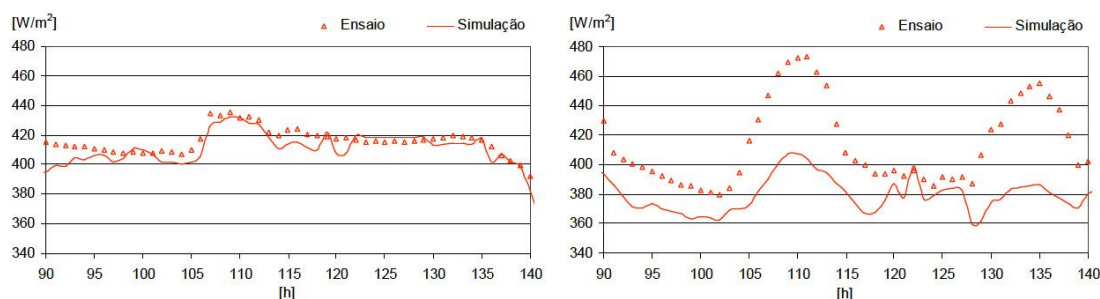


Fig. 21 – Variação da radiação de onda longa na fachada protegida por OH em Out/2009 e Jul/2009 (ensaio versus simulação) [5]

Foram obtidas as mesmas conclusões, independentemente das configurações e diferentes revestimentos dos obstáculos.

Com as comparações efectuadas foi possível concluir que os resultados obtidos pelo modelo MOD.O apresentam aproximações muito razoáveis para a temperatura superficial nocturna, ocorrência de condensações e radiação incidente na fachada.

3.2.3. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

3.2.3.1. Localização 1 – Edifício sem obstáculo vertical

Nesta primeira simulação, foi considerada a fachada Norte do edifício de gabinetes de Engenharia Química pois não apresenta nenhum obstáculo vertical. Após a introdução no programa WUFI Pro 4.2 do ficheiro de dados climáticos (sem incremento de radiação), previamente tratados (§ 3.1.3), foi executada a simulação de onde foram retirados valores de temperatura superficial exterior da fachada para todo o ano. Os gráficos das Figuras 22, 23 e 24 representam os valores médios, mínimos e máximos da temperatura superficial ao longo do ano em análise.

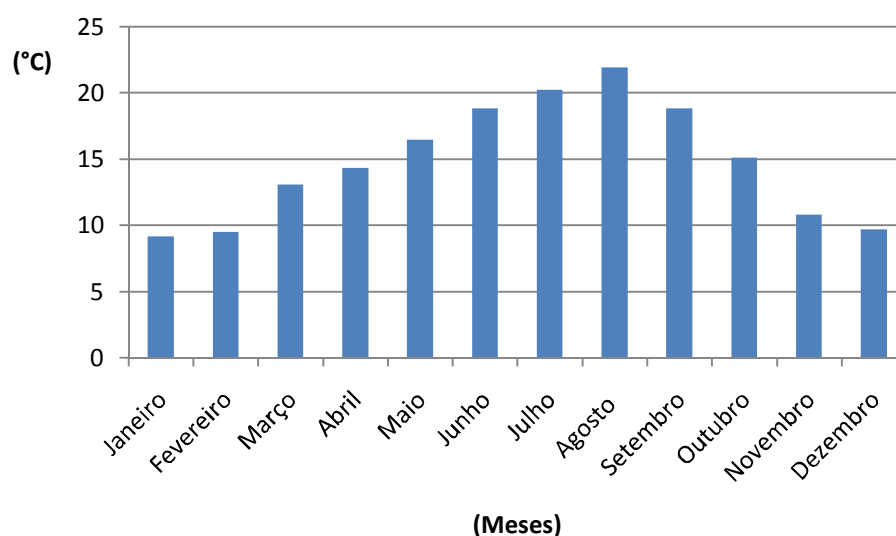


Fig. 22 – Médias mensais da temperatura superficial na fachada

Analisando os valores médios mensais (Figura 22), como era de esperar, as temperaturas mais altas ocorreram durante os meses de Verão, nomeadamente em Agosto, seguindo-se os meses de Primavera, Outono e por fim Inverno, que apresenta o menor valor médio de temperatura correspondente a Dezembro (9,7 °C).

O parâmetro que mais afecta as temperaturas mínimas é as trocas de radiação de onda longa durante a noite (Figura 23). Por outro lado, o efeito que mais condiciona as temperaturas superficiais máximas é a radiação solar directa incidente na fachada (Figura 24).

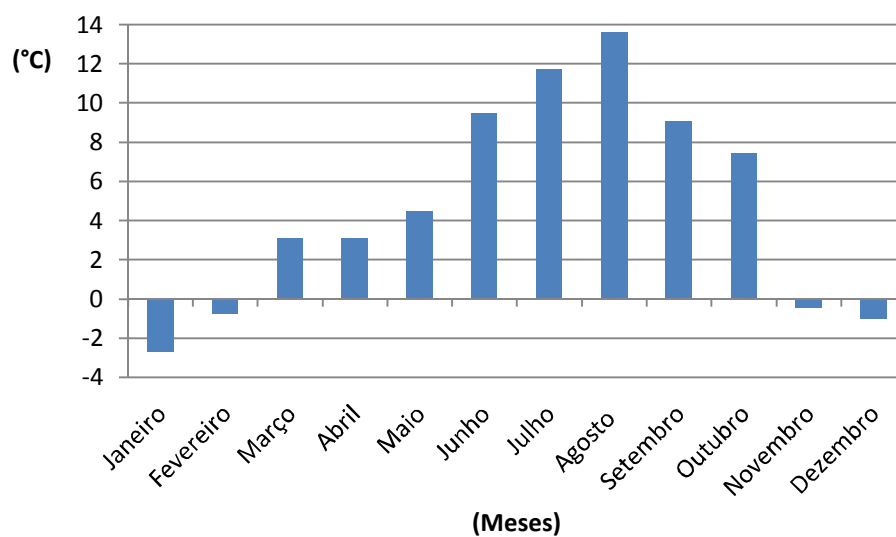


Fig. 23 – Mínimos mensais da temperatura superficial na fachada

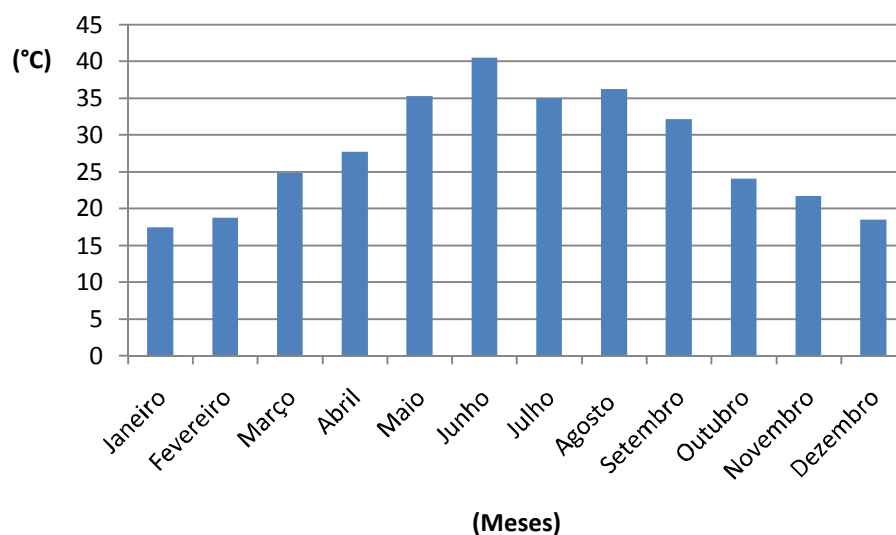
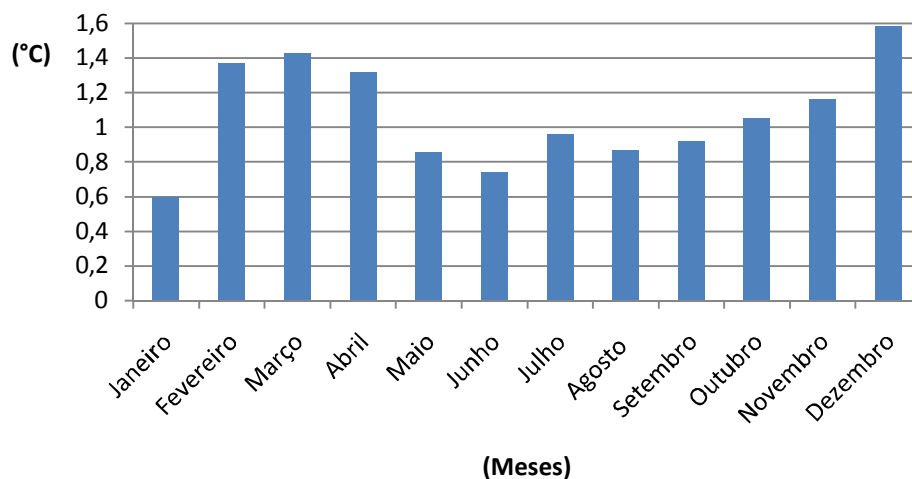


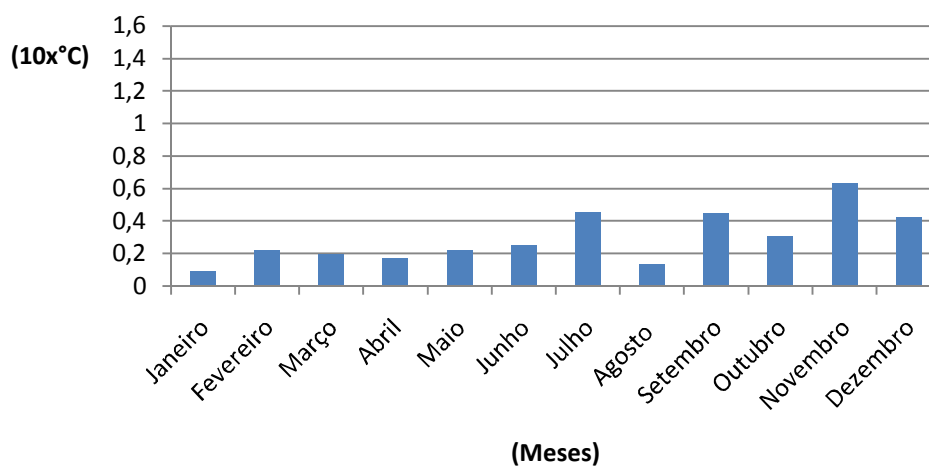
Fig. 24 – Máximos mensais da temperatura superficial na fachada

Observando as temperaturas superficiais, verifica-se que estas não possuem valores mínimos muito reduzidos. Apenas nos meses de Inverno é que os valores são negativos, o que pode estar relacionado com as temperaturas amenas do ar que se verificam durante todo o ano no Porto e com a acção do vento no período nocturno. Quanto aos valores máximos, estes também não são muito elevados, devido à radiação solar incidente na superfície ser quase inexistente. Esta situação pode condicionar a secagem da fachada, permitindo teores de humidade superficial mais elevados que facilitam o desenvolvimento de microrganismos.

Fazendo uma análise para todo o ano, observa-se que o valor máximo da diferença entre temperaturas é de 1,58 °C correspondente ao mês de Dezembro (Figura 27a). Quanto à Figura 27b, verificou-se que não existem grandes variações entre diferenças positivas médias mensais. No entanto, e como as diferenças máximas são de valor pouco elevado, considerando todo o ano em estudo, verificou-se um valor médio na ordem dos 0,03 °C.



a) Valores máximos



b) Valores médios

Fig. 27 – Valores máximos e médios mensais das diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e temperatura superficial para o ano de 2010

Ao observar o gráfico da Figura 28, verifica-se que em termos de radiação de onda longa incidente na fachada, esta sofre um aumento durante o dia. Isto acontece devido ao efeito da radiação emitida e reflectida pelo solo e devido à acção da radiação solar que incide directamente na fachada que, apesar de ser maioritariamente uma radiação de onda curta, também contém uma componente térmica. É possível observar também que, existe uma relação entre a I_{inc} e a ocorrência de condensações superficiais pois, sempre que os valores de radiação decrescem, ocorrem mais condensações.

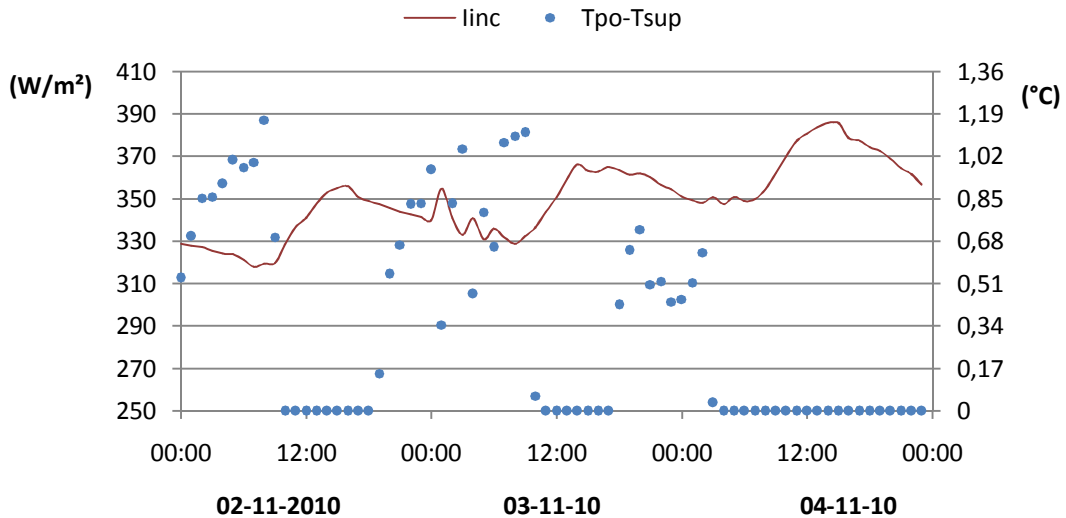


Fig 28 – Radiação incidente e condensações superficiais na fachada em três dias de Novembro 2010

Analisando os acumulados mensais das condensações superficiais para o ano de 2010 (Figura 29), observa-se que a maior quantidade de condensações ocorrem nos meses de Inverno – Novembro e Dezembro – e nos meses de Verão – Julho e Setembro. Este risco elevado de condensações no Verão pode estar relacionado com as humidades relativas elevadas e temperaturas amenas que se fazem sentir no Porto (Figura 30). Estas condições levam a que a temperatura de ponto de orvalho seja elevada proporcionando assim um aumento das condensações superficiais.

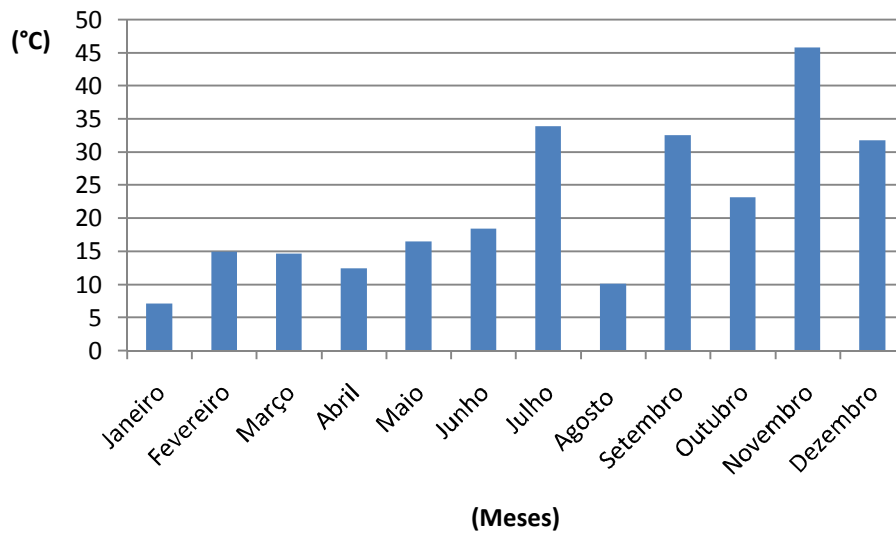


Fig. 29 – Acumulados mensais das diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e superficial para o ano de 2010

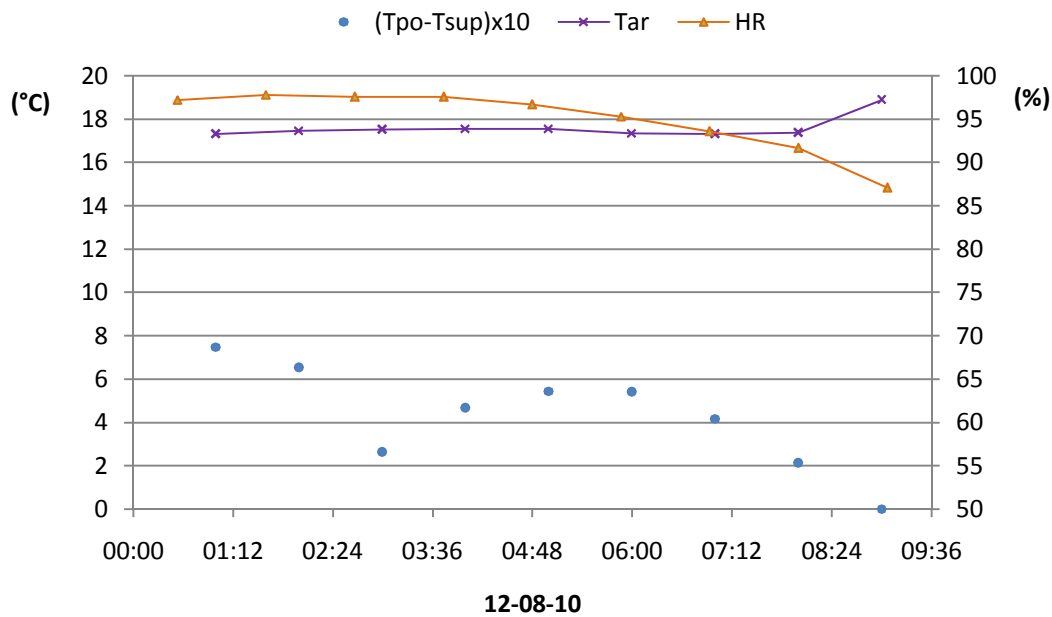


Fig. 30 – Temperatura e humidade relativa do ar exterior e diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e superficial numa noite de Agosto de 2010

3.2.3.2. Localização 2 – Edifício com obstáculo vertical paralelo de diferente altura

Para avaliar o efeito do obstáculo vertical no comportamento higratérmico da fachada foi utilizado o modelo de simulação MOD.O para obter o incremento de radiação a ser somado à radiação atmosférica real. Um dos parâmetros que foi necessário definir para implementar este modelo de simulação foi o factor de forma correspondente a superfícies paralelas (FF_{OV1}).

A Norte do edifício de Engenharia de Minas existe num pequeno edifício cuja altura é menor (Figura 17). Tratando-se da análise de duas superfícies finitas de planos paralelos com áreas diferentes, para factor de forma considerou-se a equação (17).

Na Figura 31 estão representadas as condições reais dos edifícios em estudo assim como todos os parâmetros necessários para o cálculo do factor de forma. Os parâmetros de simulação utilizados para calcular o incremento de radiação atmosférica causada pelo obstáculo estão indicados na Tabela 8.

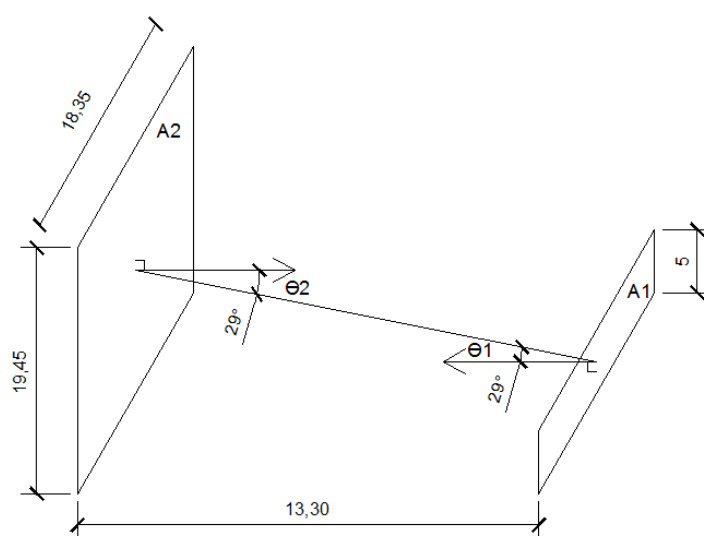


Fig. 31 – Localização e dados necessários para a simulação

Tabela 8 – Parâmetros de simulação – localização 2

Parâmetros	Valor
ϵ_{OV1} (Fachada revestida com ETICS – cinzento claro)	0,85
FF_{atm} (Equação (35) com $\alpha=90^\circ$)	0,5
FF_{OV1} (Equação (17) com θ_1 e $\theta_2=0,506$ rad, $S=15,14$ m e $A_2=18,35*19,45$ m ²)	0,38
a	1/3

Nos gráficos das Figuras 32, 33 e 34 estão representados os valores médios, mínimos e máximos mensais da temperatura superficial para a fachada exposta (localização 1) e protegida por OV1 (localização 2). Observou-se que a temperatura superficial sofreu globalmente um pequeno aumento, passando de valores de 14,32 °C, -2,7 °C e 40,47 °C para um valor médio de 15,88 °C, mínimo -2,22 °C e um valor máximo de 41,32 °C, respectivamente.

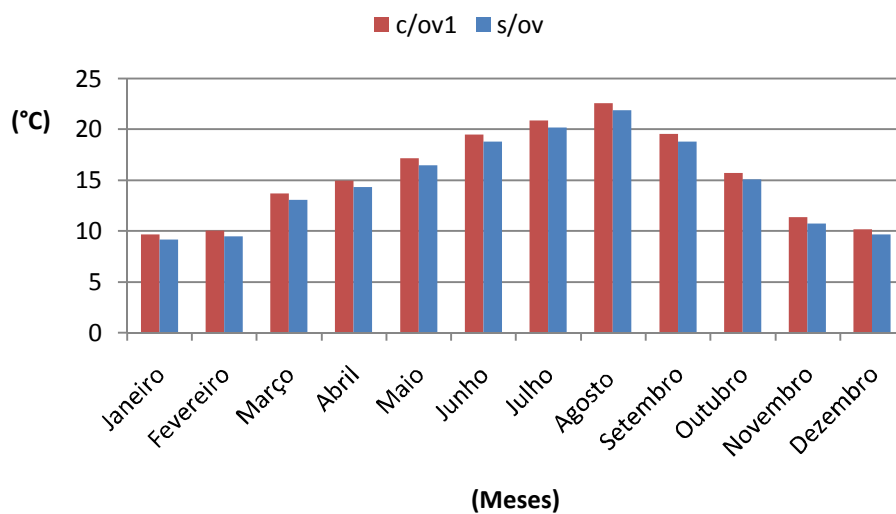


Fig. 32 – Médias mensais da temperatura superficial na fachada exposta (s/ov) e protegida pelo obstáculo vertical 1 (c/ov1)

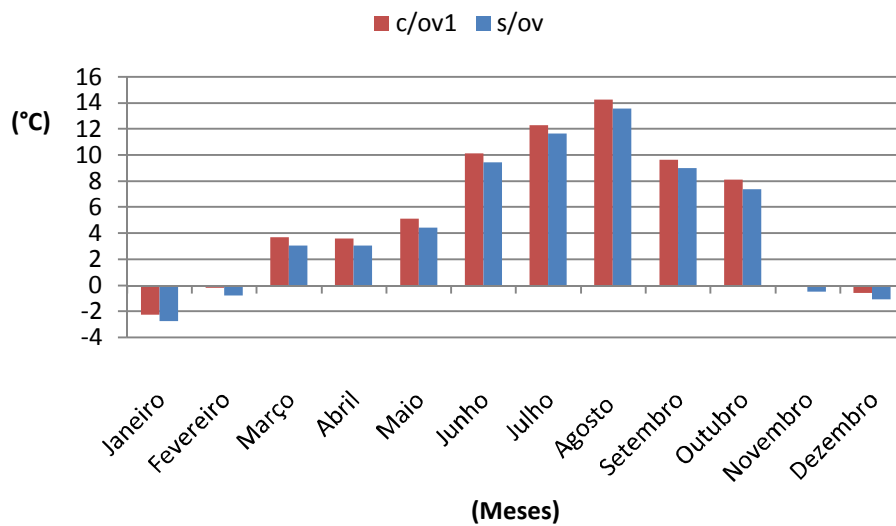


Fig. 33 – Mínimos mensais da temperatura superficial na fachada exposta (s/ov) e protegida pelo obstáculo vertical 1 (c/ov1)

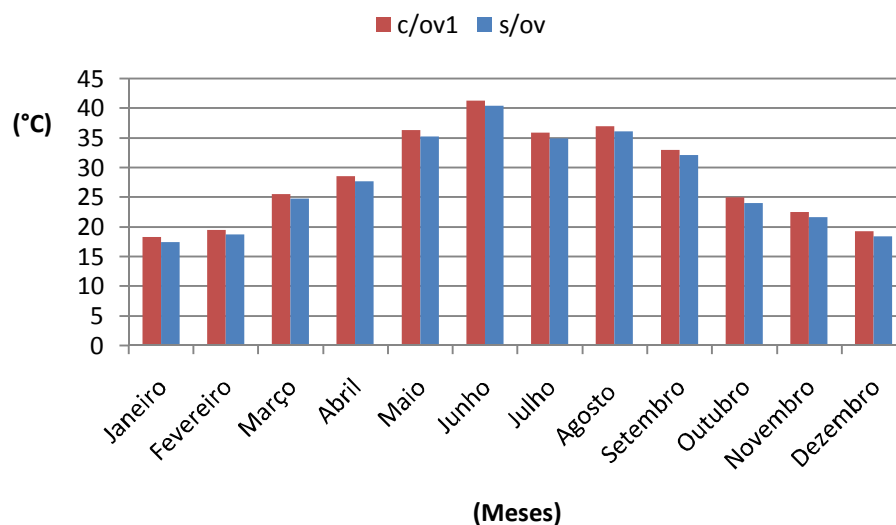


Fig. 34 – Máximos mensais da temperatura superficial na fachada exposta (s/ov) e protegida pelo obstáculo vertical 1 (c/ov1)

A Figura 35 ilustra a temperatura de ponto de orvalho e as temperaturas superficiais que ocorrem durante dois dias de Julho de 2010 na fachada exposta e protegida por OV1. Como referido anteriormente, a temperatura da fachada exposta é sempre menor. No entanto, devido à presença do obstáculo, durante o dia a incidência da radiação solar na fachada protegida deveria ser menor do que na fachada exposta, fazendo com que a fachada exposta tivesse valores de temperatura semelhantes ou maiores que os valores verificados na fachada protegida durante as horas de sol. Tal não acontece pois no cálculo não foi tido em conta com o efeito do sombreamento provocado pelo obstáculo.

É possível verificar também a influência que a descida da temperatura superficial tem na ocorrência de condensações. Olhando para os resultados da madrugada de dia 12 de Julho (Figura 35) observou-se que a temperatura de ponto de orvalho deixou de ser superior à temperatura superficial quando a fachada está protegida por OV1. Assim, as condensações para esse período deixam de ocorrer, ao contrário do que se verifica para o caso da fachada exposta. O gráfico da Figura 36 demonstra as diferenças positivas entre as duas temperaturas em dois dias de Novembro de 2010. Na fachada protegida verifica-se uma redução de cerca de 50% dos valores das diferenças positivas quando comparada com a fachada exposta da situação 1.

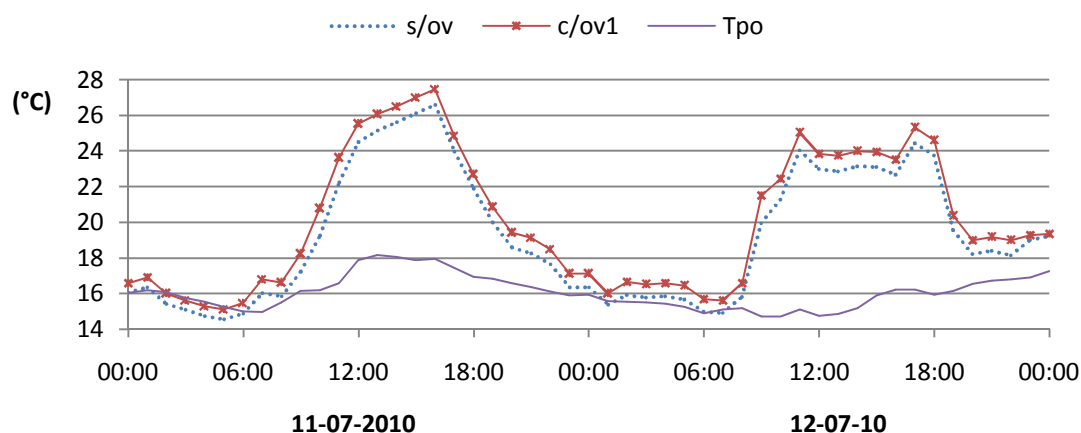


Fig. 35 – Temperatura superficial na fachada exposta e protegida por ov1 e temperatura de ponto de orvalho para dois dias de Julho de 2010

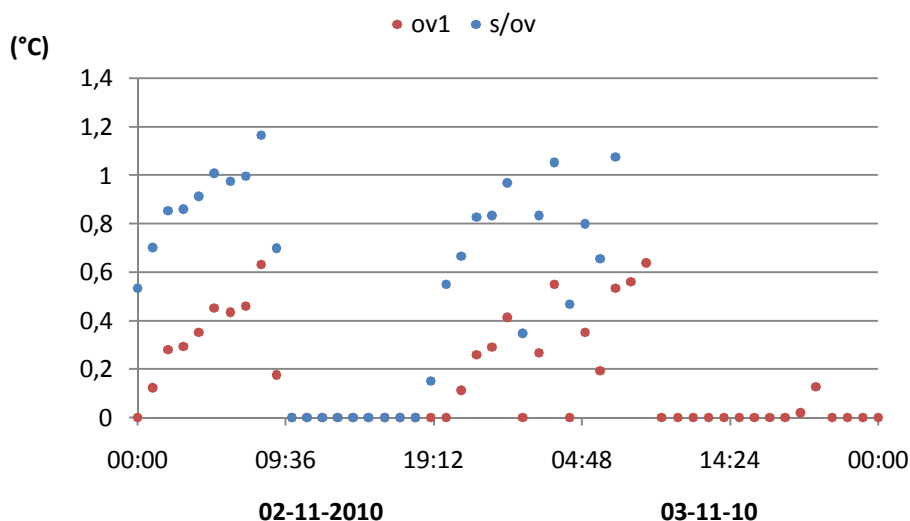


Fig. 36 – Diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e superficial na fachada exposta e protegida por ov1 em dois dias de Novembro de 2010

O aumento da temperatura superficial e consequente redução das condensações é causado pela radiação extra que o obstáculo proporciona à parede. No gráfico da Figura 37, que ilustra a radiação incidente na fachada exposta e protegida por OV1 assim como as diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e superficial, é possível evidenciar o papel do obstáculo como fonte extra de radiação. A radiação incidente na fachada protegida é sempre superior à incidente na fachada exposta graças ao incremento de radiação que o obstáculo provoca. À semelhança do que se verificou no ponto anterior (§ 3.2.3.1), também neste caso existe uma relação entre a radiação que incide numa parede e as condensações superficiais que ocorrem – quando a radiação incidente é menor, a temperatura superficial diminui e a probabilidade de ocorrerem condensações aumenta.

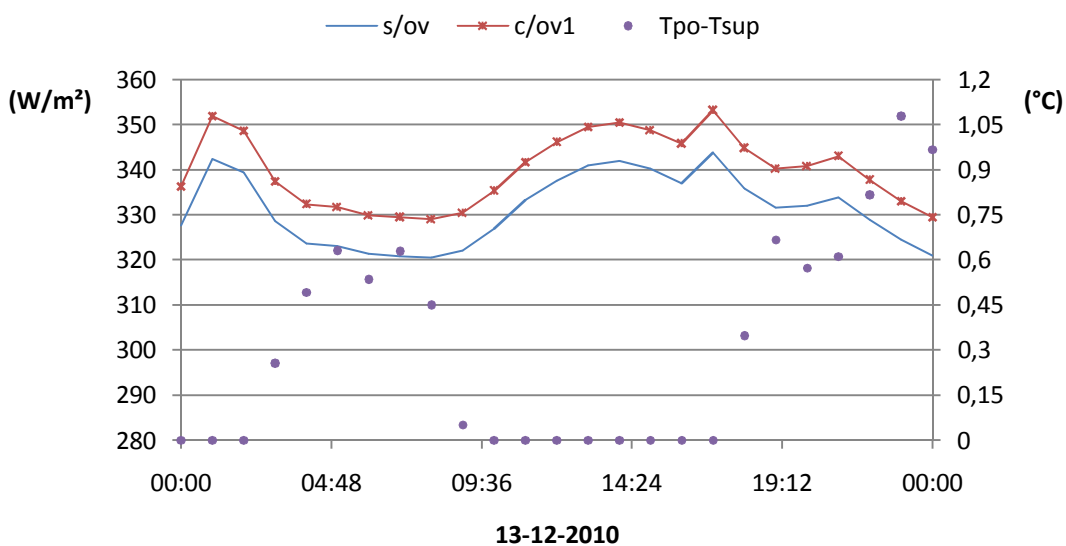


Fig. 37 – Radiação incidente na fachada exposta e protegida por ov1 e diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e temperatura superficial no dia 13 de Dezembro de 2010

Realizando uma avaliação mensal do ano em estudo, o efeito positivo do obstáculo é evidente pois reduz substancialmente as condensações superficiais na fachada protegida passando, por exemplo em Novembro, o acumulado das diferenças positivas entre a temperatura de ponto de orvalho e a temperatura superficial dos 45 $^{\circ}C$ para 12 $^{\circ}C$.

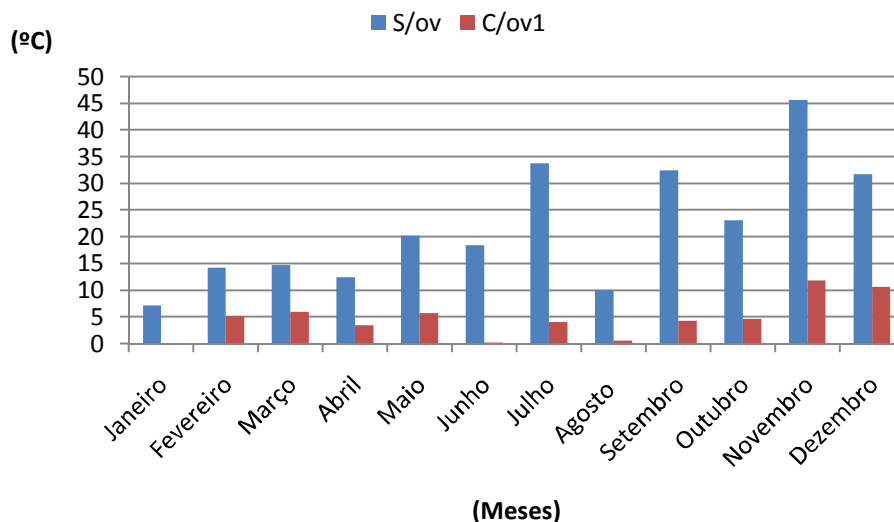


Fig. 38 – Acumulado anual das diferenças positivas entre a temperatura de ponto de orvalho temperatura superficial na fachada exposta e protegida por ov1

3.2.3.3. Localização 3 – Edifício com obstáculo vertical paralelo de igual altura

Existe por vezes alguma dificuldade no cálculo dos factores de forma através dos integrais da Tabela 1 estando por isso disponíveis soluções tabeladas para as configurações geométricas mais comuns [8]. Observando o edifício do departamento de Engenharia Civil, verificou-se que o edifício do Laboratório de Recursos Hídricos situado a Norte, possui a mesma altura. Optou-se assim por utilizar o factor de forma que traduz as trocas de calor entre duas superfícies finitas em planos paralelos directamente opostos como demonstrado na Figura 39 e equações (40) e (41). Os restantes parâmetros de simulação utilizados estão indicados na Tabela 9.

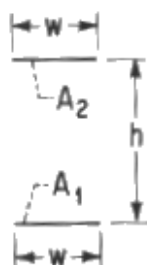


Fig. 39 – Factor forma FF_{OV2} [8]

$$H = h/w \quad (40)$$

$$FF_{OV2} = \sqrt{1 + H^2} - H \quad (41)$$

em que

h	Distância entre superfícies	(m)
w	Largura das superfícies	(m)
FF_{OV2}	Factor forma entre as duas superfícies	(-)

Tabela 9 – Parâmetros de simulação – localização 3

Parâmetros	Valor
ε_{OV} (Fachada revestida com ETICS – cinzento claro)	0,85
FF_{atm} (Equação (35) com $\alpha=90^\circ$)	0,5
FF_{OV2} (Equação (41) com $h=10$ m e $w=18,35$ m)	0,59
a	1/3

Os resultados da simulação efectuada com a presença deste obstáculo (OV2) demonstraram os mesmos efeitos observados na localização 2 (§ 3.2.3.2) mas com resultados mais significativos.

Como se pode observar, as temperaturas superficiais mensais sofreram um aumento generalizado tanto em valores médios (Figura 40), como em valores mínimos (Figura 41) e máximos (Figura 42). No entanto, este aumento de temperatura foi ligeiramente mais acentuado do que o verificado na fachada da localização 2.

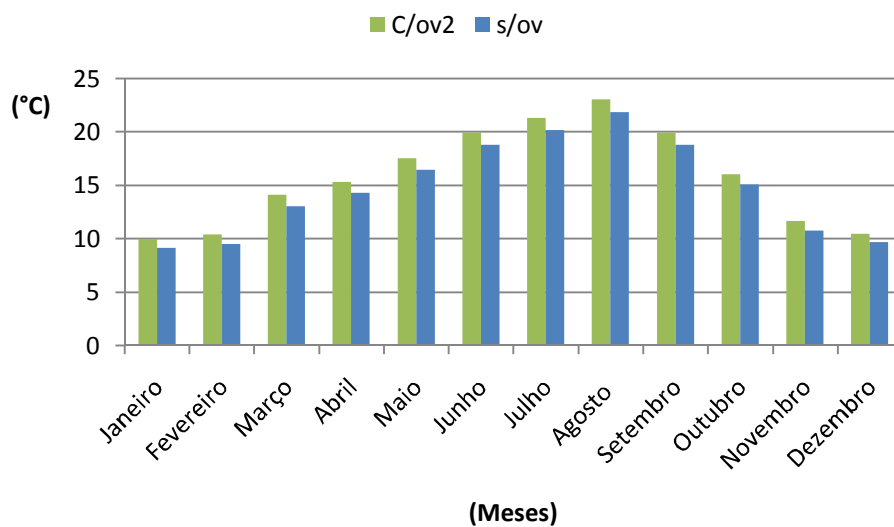


Fig. 40 – Médios mensais da temperatura superficial na fachada exposta (s/ov) e protegida pelo obstáculo vertical 2 (c/ov2)

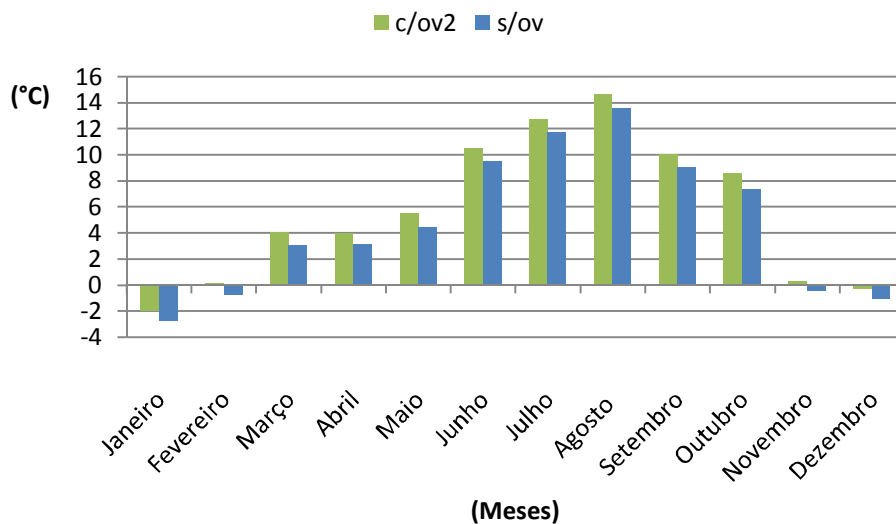


Fig. 41 – Mínimos mensais da temperatura superficial na fachada exposta (s/ov) e protegida pelo obstáculo vertical 2 (c/ov2)

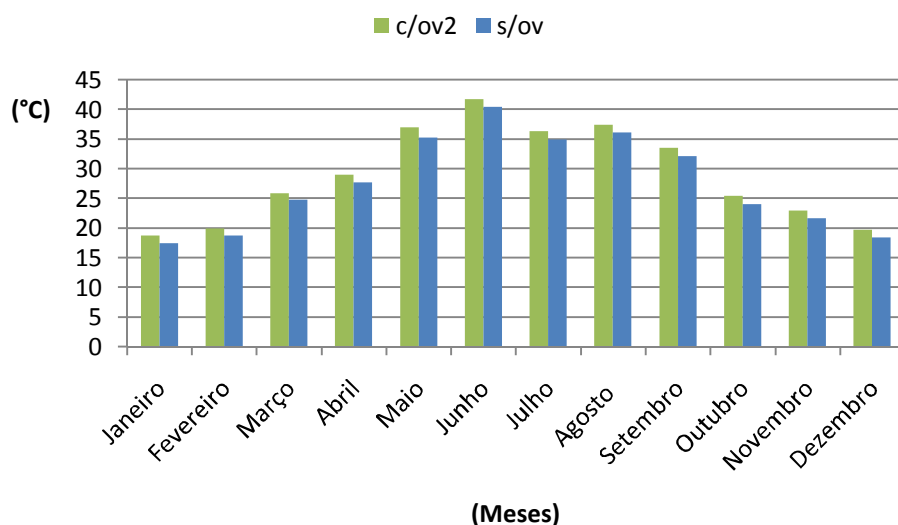


Fig. 42 – Máximos mensais da temperatura superficial na fachada exposta (s/ov) e protegida pelo obstáculo vertical 2 (c/ov2)

Este aumento das temperaturas superficiais condiciona a ocorrência de condensações. Como a probabilidade da diferença entre temperatura de ponto de orvalho e a temperaturas superficiais ser positiva é menor, ocorrem menos condensações. Na Figura 43 é possível observar que, em dois dias de Novembro, as condensações que ocorrem na fachada exposta da localização 1 não ultrapassam os 1,2°C. Por outro lado, as diferenças positivas entre as duas temperaturas na fachada protegida por OV2 ocorrem em menor quantidade – valor máximo obtido é da ordem dos 0,4 °C.

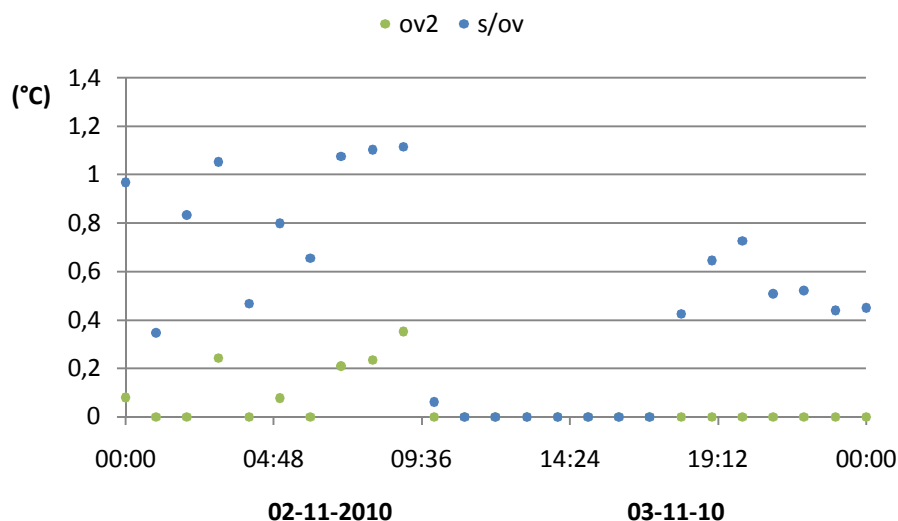


Fig. 43 – Diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e superficial na fachada exposta e protegida por ov2 em dois dias de Outubro de 2010

A ocorrência de menos condensações está directamente relacionada com a quantidade de radiação que incide na fachada. A radiação de onda longa incidente na parede protegida por OV2 é maior que na fachada exposta. No entanto, a quantidade incidente é mais significativa que a verificada na fachada protegida por OV1 (§ 3.2.3.2), uma vez que depende do factor de forma utilizado. Sendo o $FF_{OV1} < FF_{OV2}$ a diferença entre a radiação incidente na fachada protegida por OV2 e radiação incidente na fachada exposta é muito maior para esta localização (Figura 44).

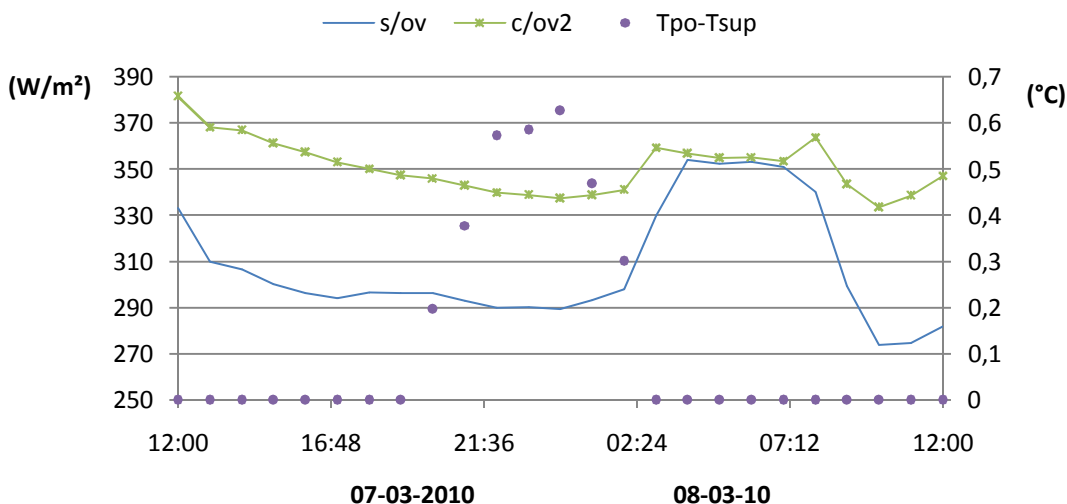


Fig. 44 - Radiação incidente na fachada exposta e protegida por ov2 e diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e temperatura superficial nos dias 7 e 8 de Março de 2010

Os fenómenos descritos afectam todo o período em estudo em termos de condensações superficiais, chegando mesmo a não ocorrerem nos meses de Janeiro, Junho e Agosto, ou serem praticamente nulas em Julho, Setembro e Outubro (Figura. 45).

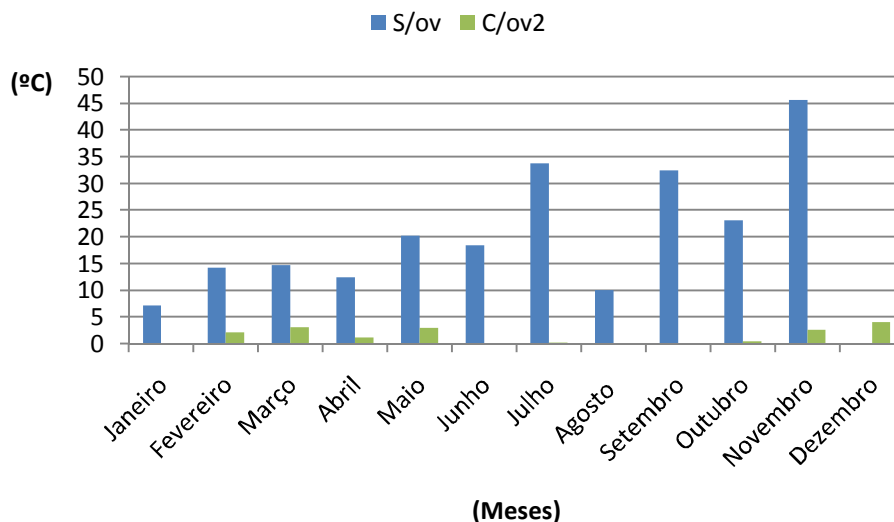


Fig. 45 – Acumulado anual das diferenças positivas entre a temperatura de ponto de orvalho temperatura superficial na fachada exposta e protegida por ov2

3.2.3.4. Comparação das três localizações

Comparando as situações analisadas nos pontos anteriores, é possível verificar o aumento da temperatura superficial na fachada que a presença de um obstáculo causa. Este aumento ocorre em todos os meses de 2010 e é maior para a fachada protegida por OV2 (Figuras 46, 47 e 48).

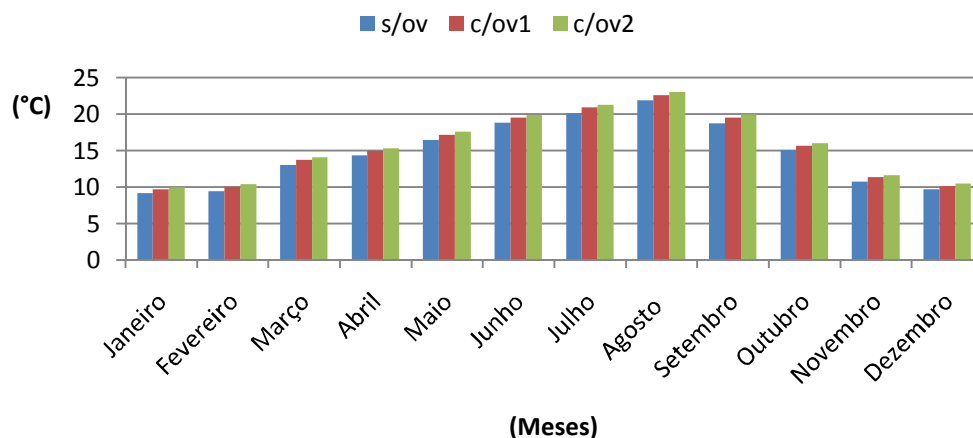


Fig. 46 – Médias mensais da temperatura superficial na fachada exposta (s/ov), protegida pelo obstáculo vertical 1 (c/ov1) e pelo obstáculo vertical 2 (c/ov2)

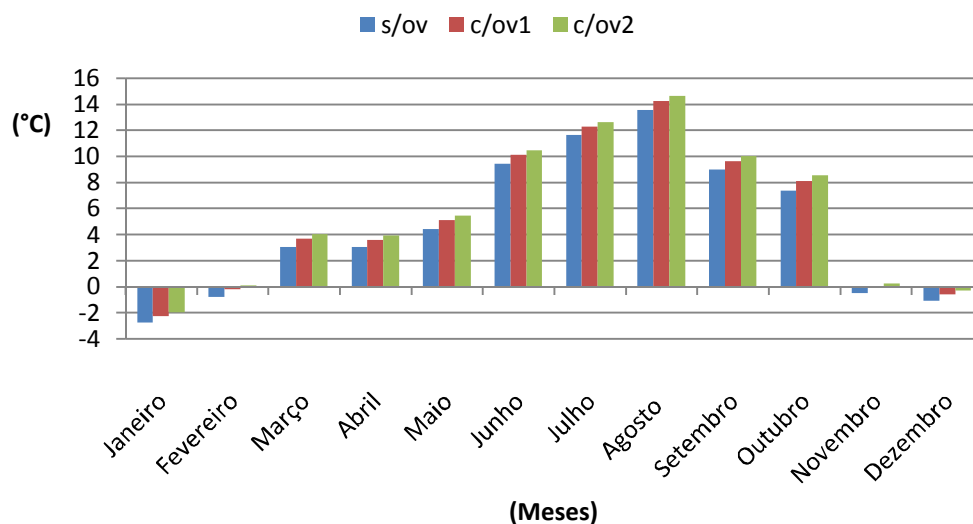


Fig. 47 – Mínimos mensais da temperatura superficial na fachada exposta (s/ov), protegida pelo obstáculo vertical 1 (c/ov1) e pelo obstáculo vertical 2 (c/ov2)

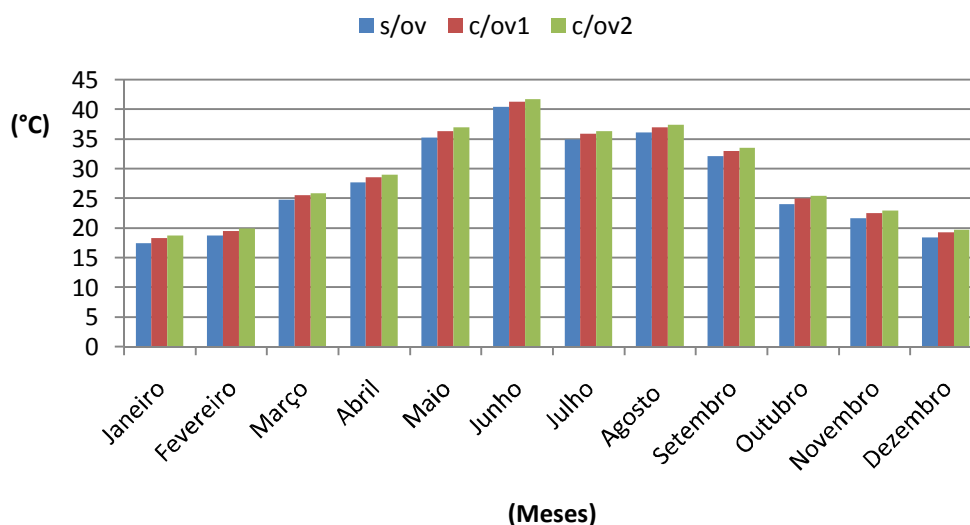


Fig. 48 – Máximos mensais da temperatura superficial na fachada exposta (s/ov), protegida pelo obstáculo vertical 1 (c/ov1) e pelo obstáculo vertical 2 (c/ov2)

No entanto, observa-se que este acréscimo de temperatura não é muito significativo em nenhuma das situações. Fazendo uma análise anual dos valores médios, mínimos e máximos de temperatura, verifica-se que não há grandes diferenças entre as três situações (Tabela 10). Em termos médios há um aumento da temperatura superficial em relação à temperatura da fachada exposta de 4,37% e 6,87% quando a fachada se encontra protegida pelo OV1 e OV2, respectivamente.

Tabela 10 – Valores anuais de temperatura superficial nas três localizações

	Médio	T_{sup} (°C) Máximo	Mínimo
Localização 1	14,86	40,47	-2,70
Localização 2	15,51	41,32	-2,22
Localização 3	15,88	41,78	-1,93

Estes pequenos acréscimos de temperatura são provocados pelas diferentes quantidades de radiação que incidem nas fachadas. Como demonstrado na equação (38), segundo o modelo de simulação MOD.O, o aumento de radiação provocado pelo obstáculo depende da radiação atmosférica e do factor de forma, que por sua vez está relacionado com as características físicas do obstáculo, como emissividade, diferenças de alturas entre superfícies e a posição geométrica entre as superfícies. Sendo a radiação atmosférica sempre igual para as três localizações, o único dado que influencia o incremento a somar à radiação atmosférica real incidente na fachada é o factor de forma.

Estando perante duas situações diferentes, foram escolhidos factores de formas distintos de valores $FF_{OV1} = 0,38$ e $FF_{OV2} = 0,59$. Assim, quanto maior o factor de forma, maior o incremento de radiação fornecido à fachada pelo obstáculo. Esse aumento de radiação provoca temperaturas superficiais maiores que, por sua vez, reduzem as condensações. Observando a Figura 49, que relaciona a radiação incidente e as diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e superficial para os três

diferentes casos em estudo num dia de Dezembro, verifica-se que, de facto, a fachada com factor forma mais elevado (protegida por OV2) possui menor quantidade de condensações.

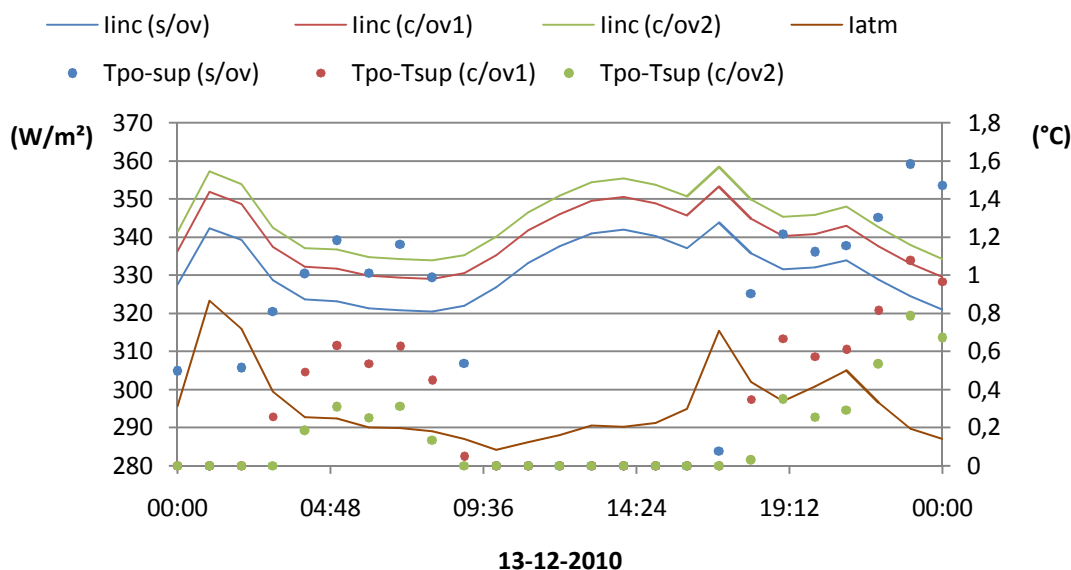


Fig. 49 – Radiação incidente e diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e temperatura superficial para a fachada exposta e protegida por ov1 e ov2

Analisando as médias anuais da temperatura superficial, radiação incidente e diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e temperatura superficial para as três situações (Tabela 11) chega-se à conclusão que:

- Entre localização 1 e 2 – um aumento de 38% do factor de forma provocou um incremento de 2,24% da radiação incidente causando um aumento da temperatura superficial de 4,36%. As condensações foram reduzidas cerca de 80%;
- Entre localização 1 e 3 – um factor de forma 59% superior provocou o aumento da radiação incidente e da temperatura superficial da fachada 3,50% e 6,83%, respectivamente, reduzindo as condensações cerca de 95%;
- Entre localização 2 e 3 - Um aumento de 21% do factor de forma causa um incremento de 1,27% de radiação, que provoca um aumento de 2,47% da temperatura, reduzindo 14% das condensações.

Não foi feito um estudo suficientemente aprofundado para verificar se existe alguma relação linear entre o número de condensações e o valor de factor de forma. Apenas se pode concluir que quanto maior o factor de forma, menor é a probabilidade de ocorrerem condensações superficiais. No entanto, a ocorrência de condensações também dependente da temperatura e humidade relativa características do clima.

Tabela 11 – Factores de forma e médias anuais de radiação incidente, temperatura superficiais e condensações para as três fachadas

	Factor de Forma (-)	linc (W/m^2)	Tsup ($^{\circ}C$)	Tpo-Tsup ($^{\circ}C$)
Localização 1	----	362,35	14,86	$2,92 \times 10^{-2}$
Localização 2	0,38	370,46	15,51	$0,62 \times 10^{-2}$
Localização 3	0,59	375,05	15,88	$0,19 \times 10^{-2}$

Na Figura 50, é possível observar o efeito positivo dos obstáculos na redução das condensações para cada mês de 2010.

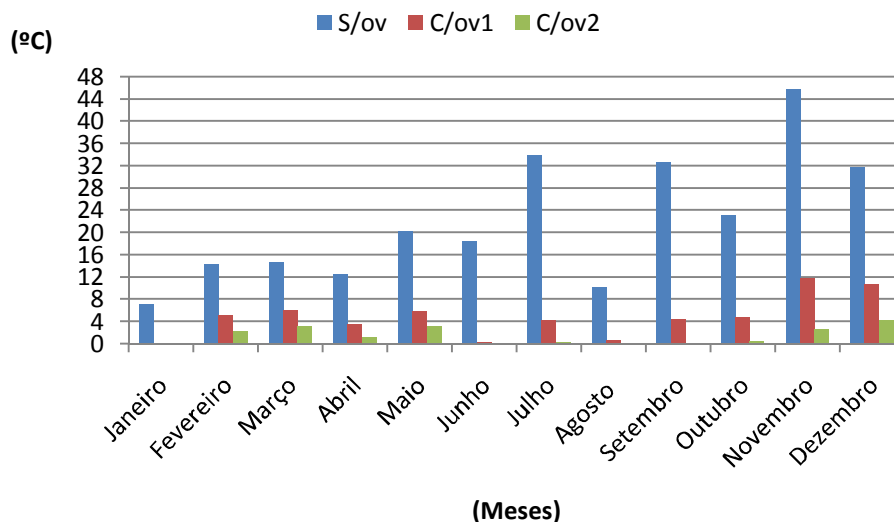


Figura 50 – Acumulado anual das diferenças positivas entre a temperatura de ponto de orvalho e a temperatura superficial na fachada exposta e protegida por ov1 e ov2

3.3. SÍNTESE CRÍTICA DOS RESULTADOS

As principais conclusões retiradas da utilização do programa WUFI Pro 4.2 na simulação do comportamento higrotérmico de fachadas revestidas com ETICS e da influência do efeito de obstáculos verticais paralelos à fachada são:

- Por imposição do programa, os dados climáticos introduzidos devem corresponder a valores horários. Foi por isso necessário realizar um tratamento dos dados fornecidos pela estação meteorológica do LFC antes da sua introdução no programa.
- Um programa de cálculo, para determinar correctamente a temperatura superficial, necessita de ter em conta um balanço radiativo explícito, que considere o arrefecimento nocturno das superfícies causado pela troca de radiação de onda longa entre as superfícies exterior e a envolvente.
- É necessária a utilização da metodologia denominada de MOD.O para simular o efeito de um obstáculo na temperatura superficial exterior. Este método determina um incremento a ser somado à radiação atmosférica através de um factor de forma que depende da geometria e posição do obstáculo.
- A simulação da fachada exposta evidenciou que as diferenças entre os valores mensais mínimos e máximos das temperaturas superficiais não são muito significativas. Isto deve-se ao facto de a fachada em estudo estar orientada Norte.
- Verificou-se também a existência de uma relação entre a radiação incidente na fachada e a ocorrência de condensações. Durante o dia, quando a radiação incidente aumenta devido à radiação emitida e reflectida pelo solo e devido à radiação solar, a ocorrência de condensações diminui. Isto acontece pois a temperatura superficial da fachada aumenta consoante a radiação que incide sobre esta.

- Fazendo uma análise a todo o ano em estudo, observou-se que as condensações ocorrem principalmente nos meses de Inverno. As condensações observadas no Verão são devido às condições climáticas do Porto, nomeadamente, a temperaturas amenas e humidades relativas elevadas.
- A presença de obstáculos causou um aumento não muito significativo da temperatura superficial. No entanto, esse pequeno aumento provocou uma diminuição de cerca de 50% e 95% das condensações superficiais nas localizações 2 e 3, respectivamente.
- O aumento de temperatura é provocado pelo incremento de radiação. Isto destaca a maior capacidade emissiva do obstáculo quando comparado com a atmosfera. Pode-se então afirmar que o obstáculo funciona como uma fonte extra de radiação de onda longa.
- O obstáculo vertical 2, por possuir um FF_{OV} superior, provoca uma diminuição mais acentuada das condensações superficiais anulando-as quase por completo. Com isso pode-se afirmar que quanto maior o factor de forma, maiores são os incrementos de radiação incidentes na fachada e maior é a temperatura superficial, o que corresponde a uma menor ocorrência de condensações superficiais.
- Em todas as fachadas observou-se que as condensações ocorriam principalmente durante a madrugada e no final do dia devido ao balanço radiativo negativo. Este balanço é provocado pela baixa capacidade térmica do sistema que permite a dissipação de calor acumulado durante o dia.
- A presença de obstáculos próximos de uma fachada Norte revestida com ETICS, apesar do efeito positivo na redução da humificação superficial, pode originar o aparecimento assimétrico de manchas de degradação. Como se pode verificar, pequenas alterações de temperaturas superficiais provocam grandes diferenças de ocorrência de condensações. É por isso necessário na fase de projecto, quando se pretende revestir uma fachada com um sistema do tipo ETICS, ter em conta os obstáculos presentes na envolvente.

4

Avaliação da degradação das fachadas e comparação com os resultados das simulações numéricas

4.1. INTRODUÇÃO

Problemas relacionados com o desenvolvimento de microrganismos têm sido uma constante em fachadas revestidas com sistemas de isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS. Manifestam-se tipicamente através do aparecimento nas fachadas de manchas escuras que podem ser observadas visualmente sem a ajuda de nenhum instrumento em especial. Este desenvolvimento biológico em fachadas de ETICS está relacionado com o teor de humidade presente à superfície. A humidificação das fachadas está dependente das condições a que estão sujeitos os edifícios, como por exemplo, exposição de radiação solar, exposição ao vento, chuva incidente, orientação ou presença de obstáculos. Deste modo, consoante as diferentes condições a que estão sujeitas as fachadas, diferentes níveis de degradação visual podem ocorrer.

De maneira a apoiar as conclusões obtidas pelas simulações numéricas realizadas (§3), foi desenvolvido um método que permitiu pôr em evidência as manchas de degradação presentes nas diversas fachadas. Identificando diferentes níveis de degradação visual, foi possível comparar os resultados obtidos pelas simulações numéricas com os resultados observados.

Este método foi dividido em três etapas explicadas nos subcapítulos seguintes:

- Apoio visual através da obtenção de fotografias dos diferentes cenários;
- Tratamento das fotografias utilizando o programa Photoshop;
- Conclusões retiradas através da observação das fotografias tratadas.

Com estas etapas pretende-se que sejam enumerados passos úteis para uma análise mais fácil e fidedigna das fotografias a fachadas degradadas visualmente.

4.2. FOTOGRAFIAS – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As manchas escuras, correspondentes ao desenvolvimento biológico provocado pela presença de água devido à ocorrência de condensações superficiais, podem ser observadas visualmente sem a ajuda de nenhum instrumento.

Para tentar demonstrar esse efeito nas fachadas foram inicialmente tiradas durante sete dias uma série de fotografias às três localizações em estudo mencionadas no § 3.2 e ilustradas na Figura 17.

4.2.1. ÁREA DA FACHADA A FOTOGRAFAR

O objectivo deste método é a análise das manchas de degradação provocadas apenas por fenómenos de condensações superficiais. No entanto, o desenvolvimento biológico que é causado pelo teor de humidade presente na superfície da fachada, depende também de fenómenos como a capacidade de secagem e a incidência de chuva. Tendo isto em consideração, houve uma necessidade de tentar minimizar a influência das restantes acções a que estão sujeitas as paredes através da escolha do local apropriado da fachada para obtenção das fotografias.

O processo de secagem depende do vento, radiação solar e temperatura e humidade relativa do ar exterior. Sendo estas características dependentes da orientação, conseqüentemente o processo de secagem varia também com a orientação das fachadas. Como o estudo é feito a fachadas todas elas viradas para Norte, sujeitas às mesmas condições climáticas, pode-se concluir que o fenómeno de secagem será sempre igual ou muito semelhante em todas as situações de análise.

Quanto à chuva incidente, este fenómeno provoca escorrimentos de água que estimulam o aparecimento mais acentuado de manchas na base da fachada devido ao efeito da gravidade. No entanto, segundo Barreira (2010), ao analisar a quantidade de chuva incidente em fachadas de um edifício da FEUP voltadas aos quatro pontos cardeais, a fachada Norte apresentou valores de menor ordem. Logo, é possível afirmar que nas fachadas em estudo, a precipitação tem uma influência pouco significativa na humedificação das superfícies.

Optou-se assim por tirar fotografias de cada edifício em estudo da parte da fachada localizada entre as janelas do primeiro e segundo andar, como demonstrado na Figura 51.

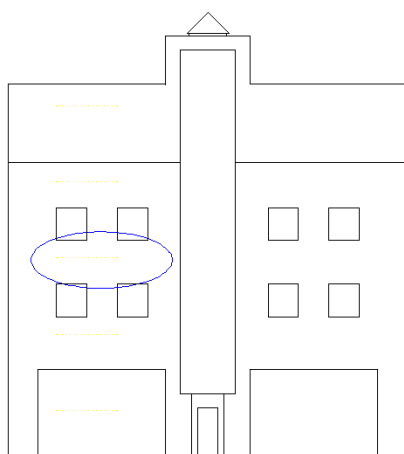


Fig. 51 – Posição em corte do local das fotografias a serem analisadas

No entanto, para que este método seja fiável, há que ter em atenção outros factores para além da localização das fotografias. Condições como a luminosidade e condições climáticas devem ser consideradas pois permitem que seja possível obter fotografias o mais parecidas possíveis umas com as outras, em diferentes dias. Estas regras têm como objectivo tentar obter um conjunto de fotografias o mais semelhante possível, tentando recriar sempre as mesmas condições para todos os edifícios e dias de análise.

4.2.2. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS IDEAIS/POSICIONAMENTO DO OPERADOR

Para tentar minimizar erros provocados pelas condições climáticas, como por exemplo, condições de precipitação e luminosidade, foi necessário escolher um conjunto de dias próximos entre si em que o céu estivesse limpo e com sol. Outra maneira de tentar manter a mesma luminosidade foi tirar as fotografias sempre à mesma hora do dia e posicionando a câmara sempre nos mesmos locais. Deste modo, como a uma dada hora o sol está sempre na mesma posição, independente do dia, a luminosidade a que estão sujeitas as fachadas é sempre a mesma.

Tendo isto em conta e por questões de comodidade, foi escolhida a última semana de Maio de 2011, desde dia 25 até dia 31, em que se verificaram dias de sol sem nuvens durante todo o período. Foi também escolhido o período das 11h da manhã para tirar as fotografias, nas posições ilustradas na Figura 52.

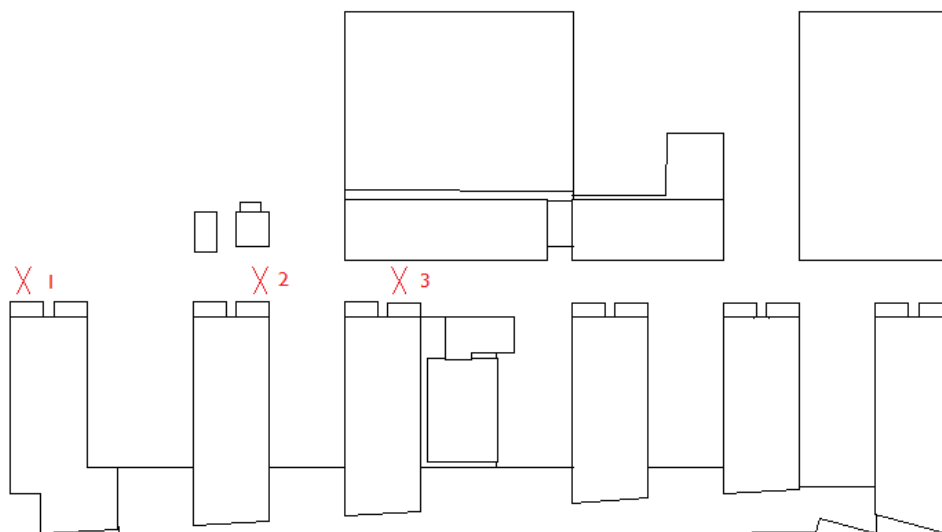


Fig. 52 – Posição, em planta, do local de onde foram tiradas as fotografias

Na localização 1 correspondente à situação de um edifício sem a presença de um obstáculo vertical, as fotografias foram tiradas à fachada da direita, devido à interferência causada pela vegetação.

4.2.3. MÁQUINA FOTOGRÁFICA COM PROGRAMA MANUAL

Apesar de todos os cuidados referidos nos pontos anteriores, na realidade, a obtenção de condições sempre iguais não é possível na realidade. Por isso, é importante a utilização de uma máquina que tenha um programa manual. Este permite que sejam feitos ajustes quanto à luminosidade de modo obter uma maior semelhança entre fotografias.

Enquanto um programa automático, como os que estamos habituados a utilizar, realiza ajustes instantâneos que para questões do dia-a-dia são suficientes para se obter fotografias com a qualidade e com a precisão que se deseja, para este tipo de trabalho é preciso uma sensibilidade extra. Assim sendo, com a utilização de uma máquina fotográfica que possua um programa manual, é possível ajustar todos os dias a abertura da lente de forma a obter a luminosidade ideal que permita adquirir a melhor imagem e que tente recriar fotografias com condições o mais semelhante possível. Logo, mesmo que seja necessário alterar a abertura da lente em diferentes dias, pois num dia pode haver mais nebulosidade, tem que se garantir que no mesmo dia as três fotografias terão a mesma abertura, replicando assim as mesmas condições.

Com isto, mediante a luminosidade, a abertura da lente foi ajustada para que as fotografias apresentassem a melhor imagem possível, mantendo sempre as mesmas condições para o mesmo dia.

4.3. TRATAMENTO DAS FOTOGRAFIAS

4.3.1. NOTA INTRODUTÓRIA

Após obter o conjunto de fotografias dos sete dias em análise, com o auxílio do programa Photoshop CS5.1 [23], estas foram sujeitas a um conjunto de tratamentos com o objectivo de evidenciar as manchas presentes nas fachadas, provocadas pelas condensações superficiais.

O Photoshop CS5.1 é um software que permite, através da utilização de diversas ferramentas, redefinir imagens digitais. Uma das opções contidas no programa que foi utilizada no tratamento das fotografias é designada de “Nova Camada de Ajuste”. Este comando é um painel de controlo com diversas opções – consoante o tipo de análise que se pretende realizar – que resolve os problemas de cores das fotos, realizando diferentes correcções.

4.3.2. PRIMEIRO PASSO DO TRATAMENTO – PRETO E BRANCO

Inicialmente foi feita uma simplificação da imagem de maneira a ser mais fácil proceder ao seu tratamento. As paredes em estudo são de uma cor acinzentada mas que por vezes, devido à luminosidade a que estão sujeitas, podem apresentar alguns tons de azuis, amarelos ou até mesmo verdes, devidos à presença de manchas de degradação.

Para realçar as manchas presentes nas fachadas foi necessário eliminar certos tons presentes nas imagens através de uma das opções do comando de ajuste designada por “Preto-e-branco”. Com este comando, para além de todas as fotografias ficarem nas mesmas condições, com a mesma paleta de cores, também o seu posterior tratamento foi mais fácil pois as manchas são as únicas partes da fotografia com tonalidade preta ou cinzento mais escuro.



Fig. 53 – Fotografia da localização 1 no dia 25 às 11 horas

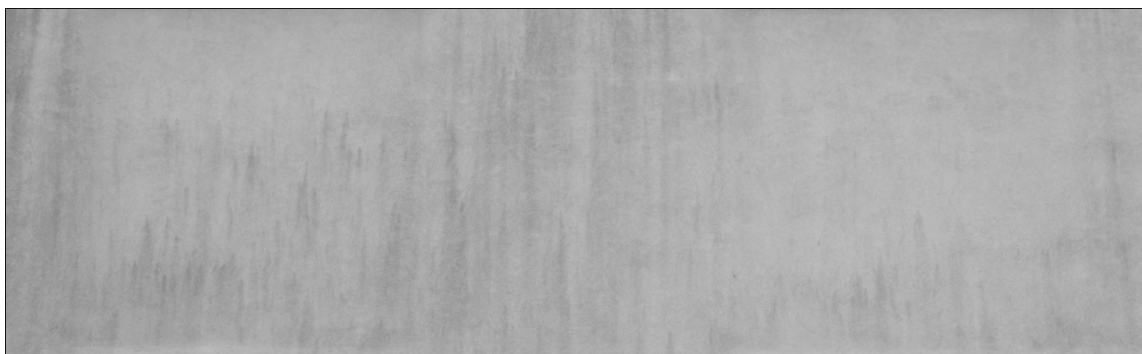


Fig. 54 – Fotografia da localização 1 no dia 25 às 11 horas a preto e branco

4.3.3. SEGUNDO PASSO DO TRATAMENTO – NÍVEL

Uma imagem é constituída por pixels cuja cor é produzida por uma combinação das cores primárias vermelho, verde e azul (red, green and blue – RGB). Para cada uma destas cores existe um nível de luminosidade que vai desde o valor 0 (shadows) ao valor 255 (highlights) para uma imagem digital. Um histograma RGB resulta da análise dos valores da luminosidade de cada pixel RGB da fotografia e da contagem de quantos existem a cada nível [15].

“Nível” é um comando do Photoshop que serve para ajustar o brilho, contraste e gama tonal de uma fotografia, especificando a localização do preto puro (shadows), branco puro (highlights) e tons médios (mid tons) de um histograma (Figura 55).

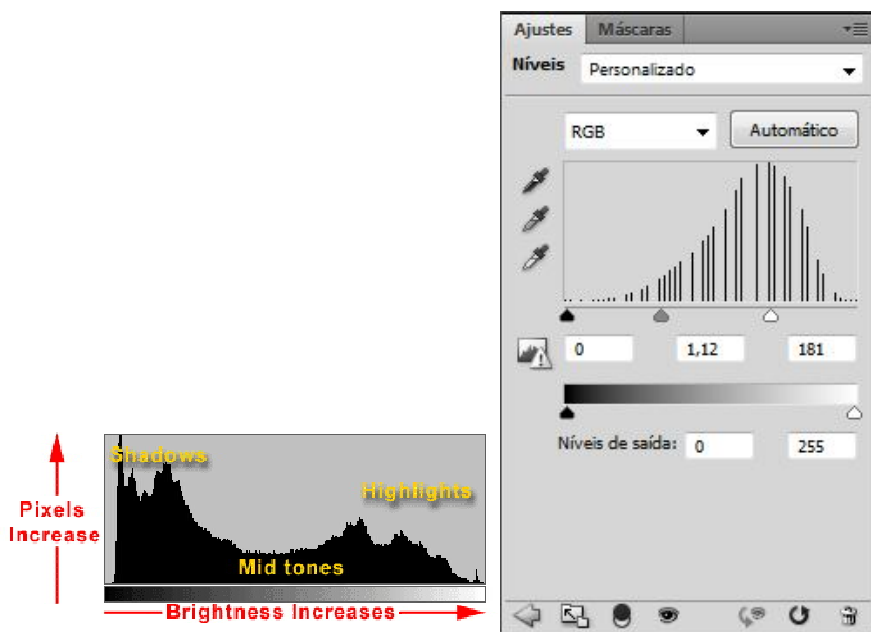


Fig. 55 – Exemplos de histogramas RGB [13]

Trabalhando com o histograma de RGB, foi criado o maior contraste possível entre a parede e as manchas escuras resultantes do desenvolvimento biológico. Como a fachada é de cor cinzenta, no fundo, tentou-se eliminar a cor da parede e escurecer as manchas o máximo possível, de maneira a produzir uma imagem em que as manchas são os únicos elementos com cor (preta/cinzenta) (Figura 56). Isso foi alcançado movendo os cursores em forma de triângulo presentes no histograma (Figura 55).

Neste procedimento foi necessário muito cuidado pois, como as fotografias foram tiradas com qualidade elevada, as rugosidades das fachadas também eram visíveis, podendo ser confundidas com manchas de degradação.

Como o histograma de cada fotografia é único, não existe uma maneira universal de ajustar os níveis. Para cada fotografia foi necessário um tratamento específico

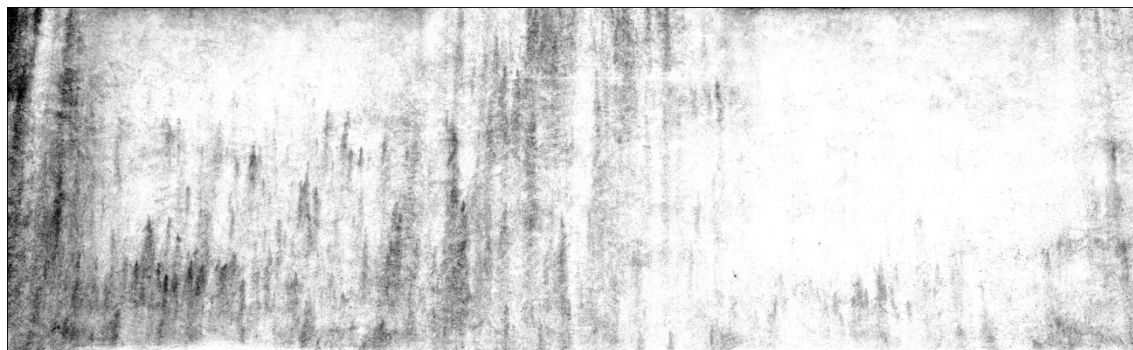


Fig. 56 – Fotografia da localização 1 no dia 25 às 11 horas (Nível)

4.3.4. TERCEIRO PASSO DO TRATAMENTO – LIMIAR

A última opção a ser utilizada do comando “Nova Camada de Ajuste” é designado por “Limiar”. Quando aplicada à camada “Preto e branco” é possível visualizar onde estão os pixels mais escuros das fotografias, pois divide a faixa tonal da imagem em apenas duas cores: preto e branco. As tonalidades abaixo do nível de limiar são transformadas em preto puro e as demais em branco puro intensificando assim apenas a localização das manchas de desenvolvimento biológico (Figura 57).

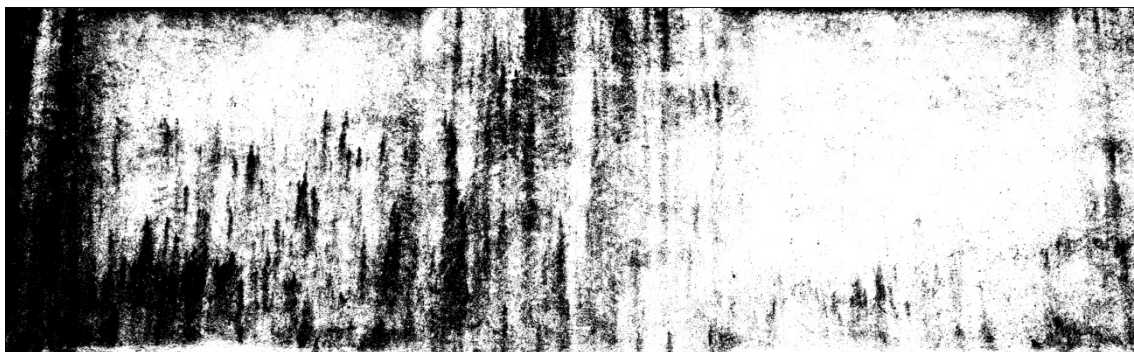


Fig. 57 – Fotografia da localização 1 no dia 25 às 11 horas (Limiar)

4.3.5. QUARTO PASSO DO TRATAMENTO – MULTIPLICAÇÃO

Esta última etapa serve para visualizar todos os passos realizados nos pontos anteriores num só “layer”. Cada opção do comando “Nova camada de ajuste” tem uma ferramenta designada de “Modo de mesclagem” que controla como os pixels na imagem são afectados por um comando de pintura ou edição.

Sendo o modo “Normal” activado por defeito, significa que as cores de dois “layers” diferentes não interagem, ou seja, são de cores sólidas (100% de opacidade). Logo apenas se pode visualizar o último passo realizado do tratamento (Figura 58).

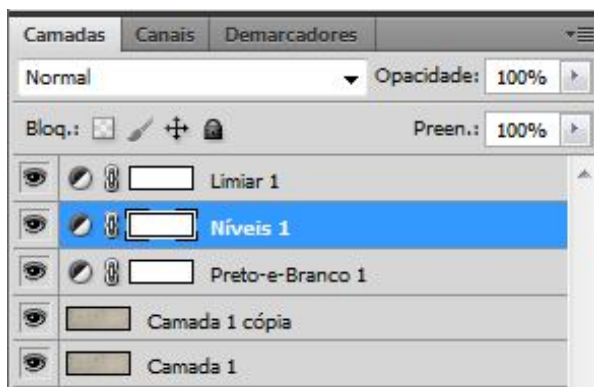


Fig. 58 – Comandos do Photoshop

De todos os modos de mesclagem, o que melhor permite visualizar todas as imagens dos diferentes tratamentos numa só, é o modo denominado de “Multiplicação”. Este modo examina as informações de cor em cada “layer” e multiplica a cor de base pela de mesclagem. A cor resultante é sempre mais escura. Multiplicar qualquer cor por preto produz preto. Multiplicar qualquer cor por branco deixa a cor inalterada [16]. Na Figura 59 é possível observar o efeito do modo “Multiplicação”. Como se pode verificar, o comando escureceu o “Upper Layer” baseada nos escuros “Lower Layer”, sendo que nenhuma parte da imagem ficou mais clara e o branco ficou transparente.

A Figura 60 mostra a aplicação do modo “Multiplicação” ao “layer” Nível à fotografia tirada no dia 25 de Maio, às 11 horas, à localização 1.

Na Figura 61 é demonstrada a evolução de todos os passos do tratamento para se ter uma noção mais precisa dos resultados.

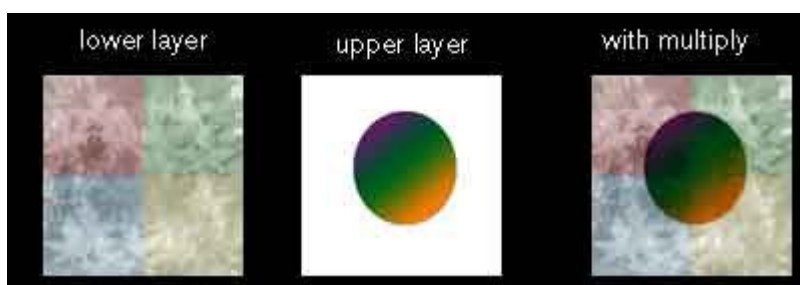


Fig. 59 – Aplicação visual do modo “Multiplicação” [17]



Fig. 60 – Fotografia da localização 1 no dia 25 às 11 horas (Multiplicação)

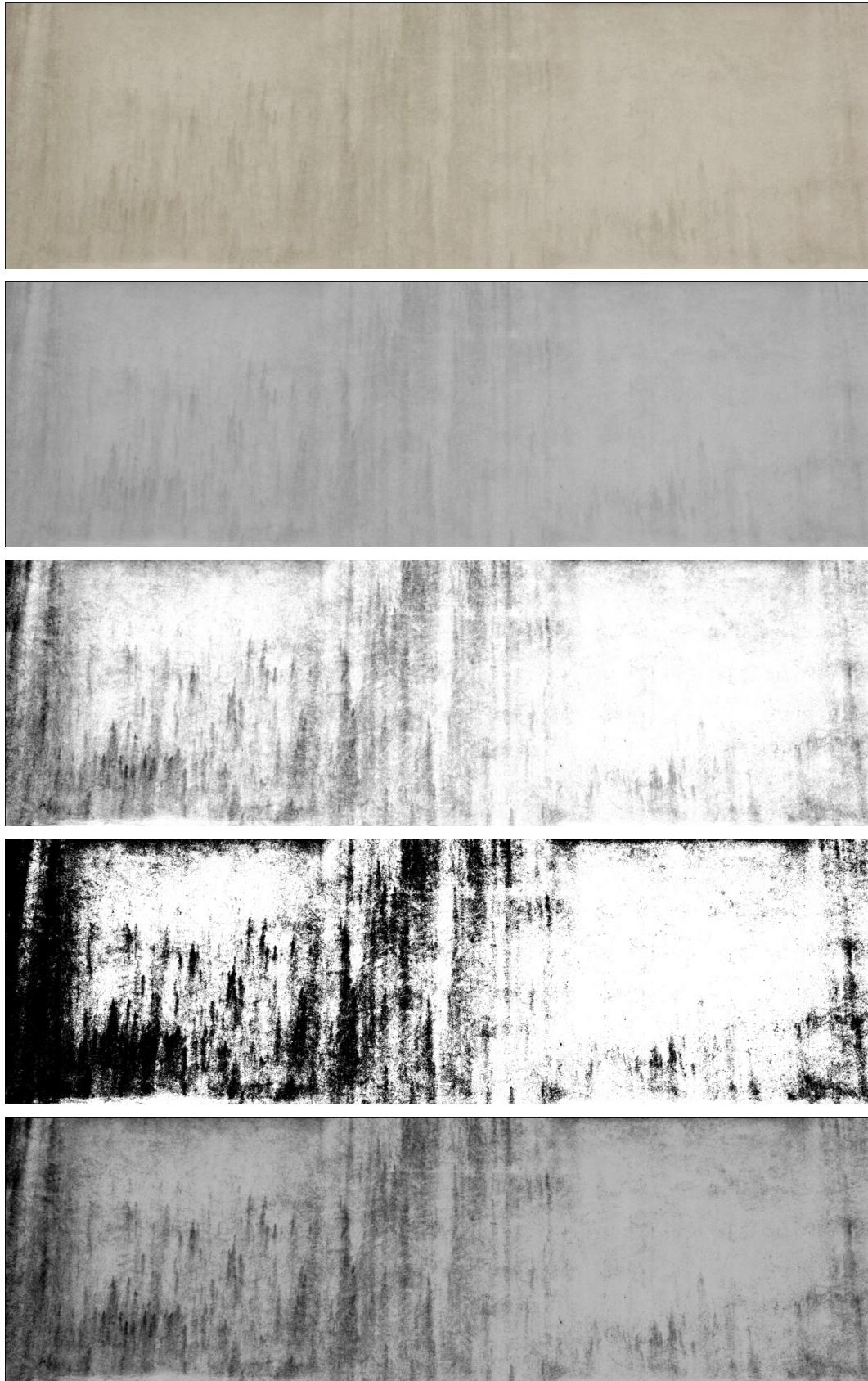


Fig. 61 – Todos os passos do tratamento realizado, desde a fotografia original até ao resultado final, aplicado à fotografia do dia 25 de Maio da localização 1

4.4. RESULTADOS

4.4.1. LOCALIZAÇÃO 1 – SEM OBSTÁCULO VERTICAL

Nas Figuras 62, 63 e 64 estão ilustradas as evoluções das fotografias originais para o resultado final, após o tratamento, dos dias 26, 28, e 31 de Maio.

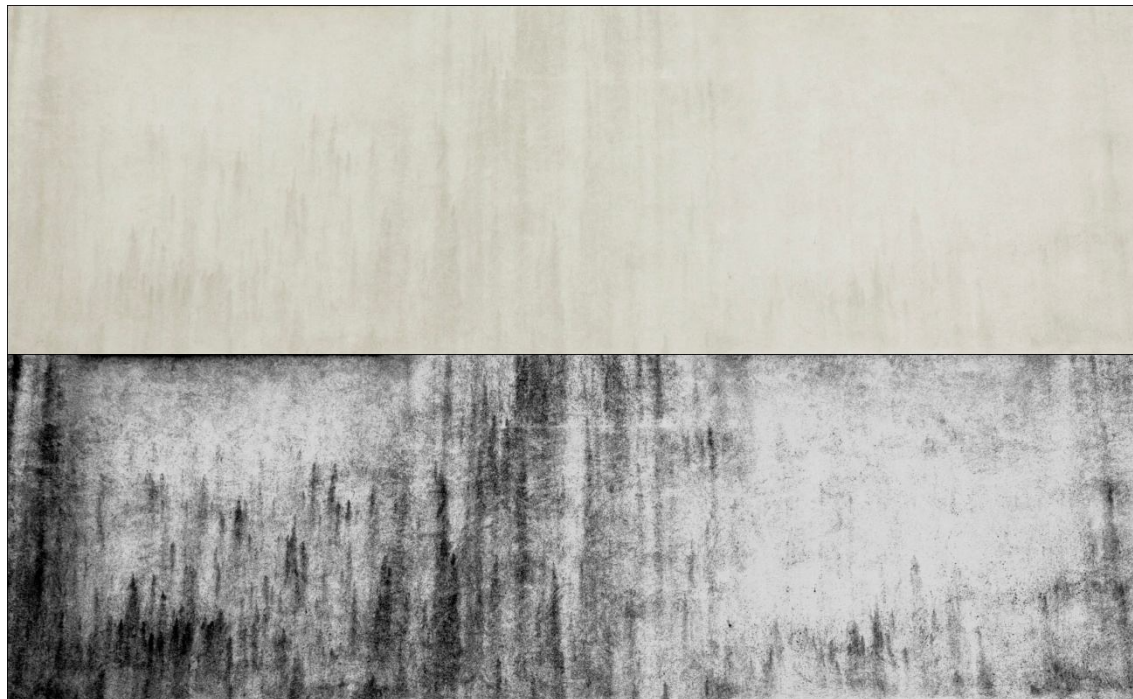


Fig. 62 – Fotografia da localização 1 no dia 26 às 11 horas (original e após tratamento)



Fig. 63 – Fotografia da localização 1 no dia 28 às 11 horas (original e após tratamento)



Fig. 64 – Fotografia da localização 1 no dia 31 às 11 horas (original e após tratamento)

Como se pode verificar, mesmo sendo as fotografias originais um pouco diferentes em termos de luminosidade a que estavam sujeitas quando captadas, após serem tratadas, como descrito no §4.3, foram obtidos resultados iguais. Em todas as situações observou-se a existência de um elevado número de manchas de degradação.

Assim é possível admitir que, numa situação como a da localização 1, em que uma fachada se encontra desprotegida, a degradação visual é bastante evidente. As fotografias que ilustram os restantes dias da semana encontram-se no Anexo II.

4.4.2. LOCALIZAÇÃO 2 – OBSTÁCULO VERTICAL PARALELO DE DIFERENTE ALTURA

Analisando os mesmos dias indicados no § 4.4.1., mas agora tendo em conta que existe um edifício paralelo ao edifício em análise de altura menor (Figura 17 e 31), foi possível evidenciar a ocorrência de manchas de degradação mas, desta vez, em menor quantidade. O mesmo aconteceu quando foram analisados os resultados das simulações numéricas (§3.2.3.2): na localização 1 o acumulado das diferenças positivas entre temperatura de ponto de orvalho e temperatura superficial foi maior do que o verificado na localização 2.

Quanto menos manchas houver nas fachadas, mais difícil é diferenciar no tratamento a rugosidade da parede das manchas de degradação. Mesmo assim, verificou-se que os resultados se repetem nos três dias ilustrados nas Figuras 65, 66 e 67 e durante o resto dos dias da semana em análise, cujas fotografias se encontram no Anexo II.

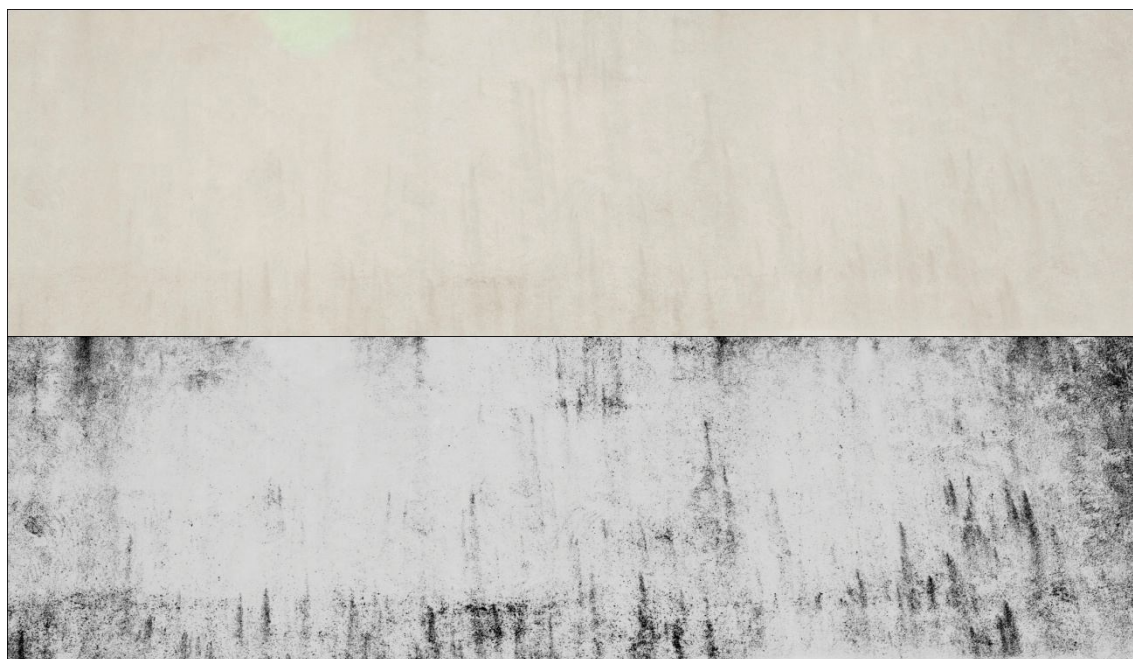


Fig. 65 – Fotografia da localização 2 no dia 26 às 11 horas (original e após tratamento)



Fig. 66 – Fotografia da localização 2 no dia 28 às 11 horas (original e após tratamento)



Fig. 67 – Fotografia da localização 2 no dia 31 às 11 horas (original e após tratamento)

4.4.3. LOCALIZAÇÃO 3 – OBSTÁCULO VERTICAL PARALELO DE IGUAL ALTURA

Segundo o exposto no §3.2.3.3., perante um obstáculo vertical paralelo de igual altura como analisado na situação 3, a presença de condensações superficiais é muito reduzida ou mesmo inexistente. Isto provoca, como se pode observar nas Figuras 68, 69 e 70, um número muito reduzido de manchas resultantes do desenvolvimento biológico associado à humidificação das superfícies por condensações superficiais.

Este facto, à semelhança do que acontece na localização 2, tornou a diferenciação das rugosidades da parede das manchas de degradação ainda mais difíceis, não influenciando no entanto, a análise da fachada nos diferentes dias da semana. A quase inexistência de manchas de degradação a olho nu fez com que o tratamento acabasse por evidenciar as rugosidades da parede mais do que as próprias manchas.

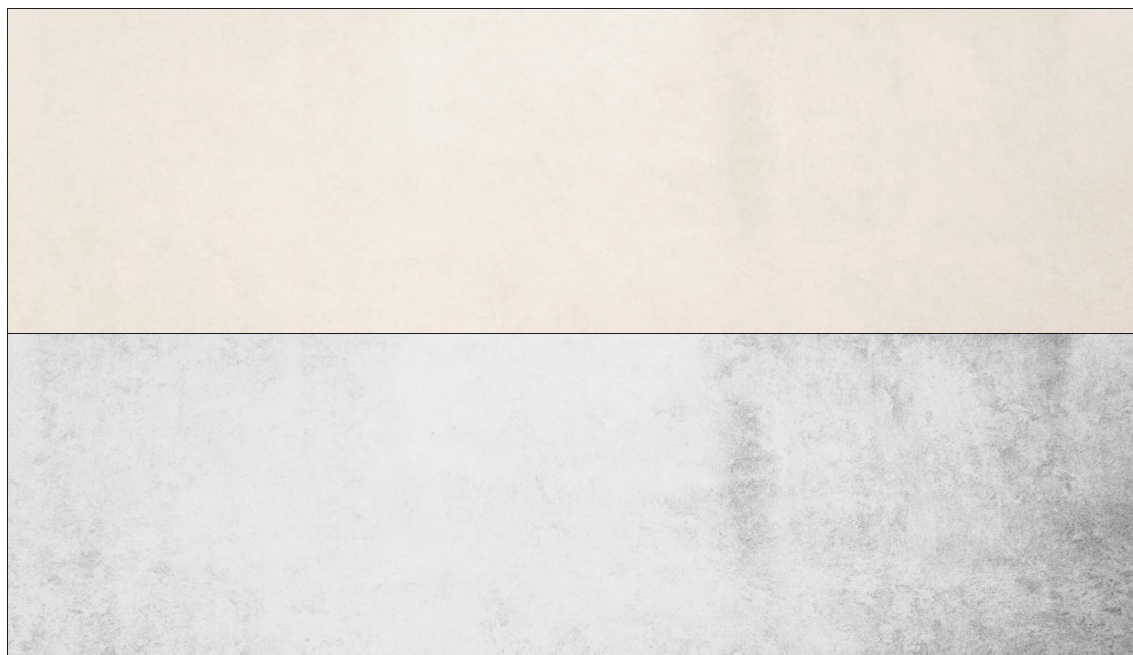


Fig. 68 – Fotografia da localização 3 no dia 26 às 11 horas (original e após tratamento)

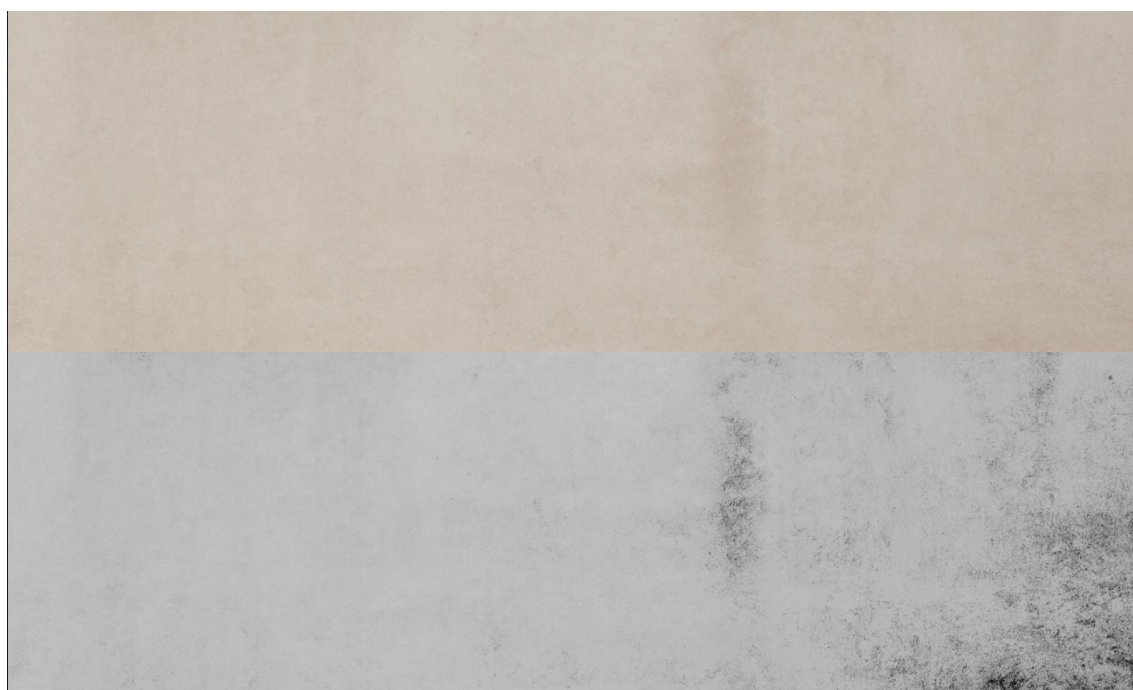


Fig. 69 – Fotografia da localização 3 no dia 28 às 11 horas (original e após tratamento)



Fig. 70 – Fotografia da localização 3 no dia 31 às 11 horas (original e após tratamento)

4.4.4. COMPARAÇÃO DAS TRÊS LOCALIZAÇÕES – FOTOGRAFIAS

Como referido anteriormente, condensações superficiais provocam o desenvolvimento de microrganismos que causam o aparecimento de manchas nas fachadas. No entanto, a presença de obstáculos verticais condiciona a ocorrência de condensações, como exposto no capítulo §3.

Um obstáculo vertical pode ser interpretado como uma fonte extra de radiação já que provoca um incremento de radiação que incide na fachada e que faz com que a temperatura superficial aumente. Dado que as condensações superficiais ocorrem sempre que a temperatura de ponto de orvalho é superior à temperatura superficial, o aumento da temperatura causado pelo obstáculo diminui a probabilidade de ocorrerem condensações. No entanto, o tipo de obstáculo condiciona a quantidade de radiação incidente pois esta depende de um factor de forma (FF_{OV}) que é calculado em função da forma das superfícies e de como estas se posicionam entre si no espaço.

Assim, numa tentativa de confirmar as conclusões observadas no capítulo §3 em relação ao efeito de obstáculos verticais nas condensações superficiais sentidas nas fachadas, foram comparadas as fotografias das fachadas das três localizações em estudo (Figura 71, 72 e 73).

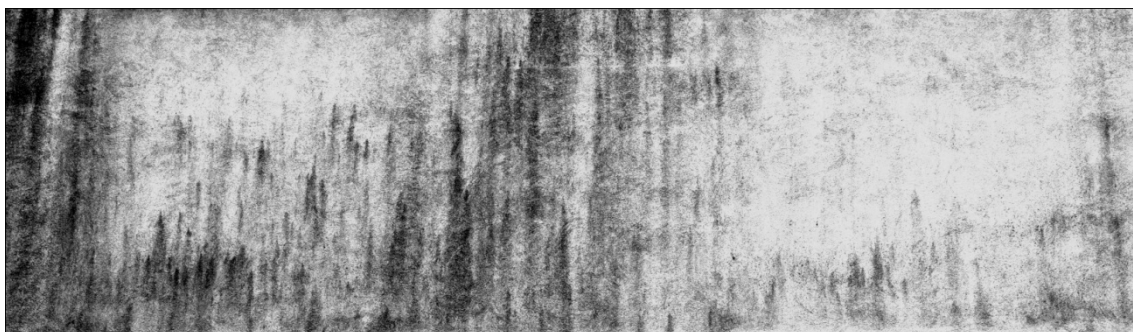


Fig. 71 – Fotografia da localização 1 no dia 29 às 11 horas (após tratamento)

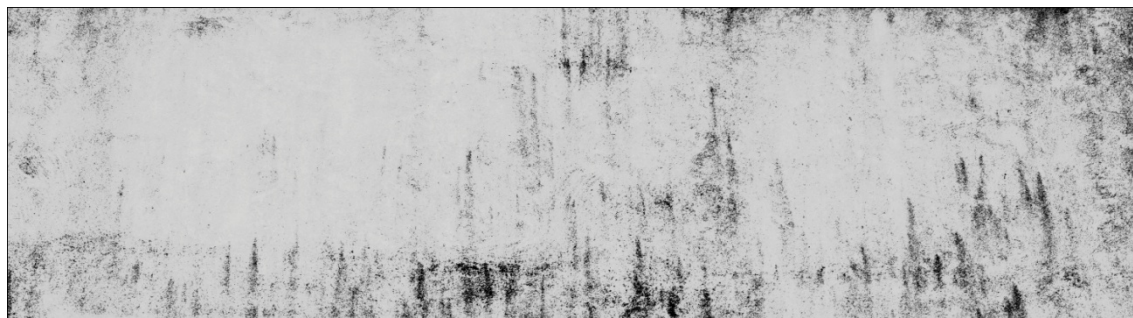


Fig. 72 – Fotografia da localização 2 no dia 29 às 11 horas (após tratamento)

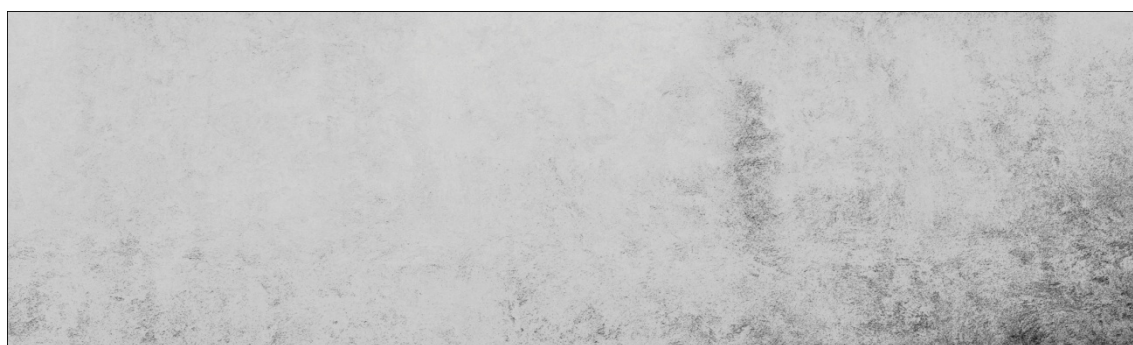


Fig. 73 – Fotografia da localização 3 no dia 29 às 11 horas (após tratamento)

Ao analisar a fachada da localização 1 (Figura 71), observou-se que a degradação da fachada exposta é de facto mais significativa que a verificada nas restantes fachadas protegidas por obstáculos – localização 2 e 3.

Na localização 2 (Figura 72) são evidenciadas mais manchas que na Figura 73, correspondente à localização 3, comprovando os resultados obtidos no capítulo §3. Tendo a situação 2 um obstáculo de factor de forma inferior ao factor de forma do obstáculo da situação 3, a radiação incidente na fachada é menor. Consequentemente, a temperatura superficial é também mais pequena, o que provocava o acontecimento de mais condensações superficiais.

A análise destas fotografias, para além de fornecer um apoio visual, veio também confirmar os resultados das simulações numéricas efectuadas. Assim, não só se reforçou o modelo de simulação MOD.O, como se validou o método de tratamento utilizado para análise das fotografias.

4.5. ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

Neste capítulo foi apresentado um método de tratamento de fotografias para comparar os diferentes níveis de degradação visual de fachadas, demonstrando a influência dos obstáculos verticais no desenvolvimento de manchas causadas por condensações superficiais.

Para que este método, constituído por três etapas, seja eficaz, algumas considerações tiveram que se ter em conta:

- **Localização** – Manchas de degradação aparecem nas fachadas não só devido à ocorrência de condensações superficiais mas também devido a outros factores como a capacidade de secagem e a chuva incidente. Tornou-se, por isso, necessário minimizar a influência dos restantes agentes através da escolha do local de captação das fotografias, de maneira a que o posterior tratamento fosse fidedigno, já que por si só o método não diferencia as diversas causas que originam manchas. Assim foi escolhida a fachada entre janelas de forma a obter uma imagem em que a degradação fosse causada principalmente por condensações.
- **Visibilidade** – Para tentar reproduzir as mesmas condições das fotografias do local seleccionado durante alguns dias seguidos, foi necessário ter em atenção certos parâmetros directamente relacionados com condições climatéricas, como por exemplo, a luminosidade. Numa tentativa de controlar essas condições teve-se em atenção certos cuidados como a escolha do mesmo local e hora para tirar as fotografias pretendidas, durante uma semana que possuísse condições propícias.

Estas considerações e cuidados verificaram-se válidos uma vez que aplicando o tratamento às fotografias obtiveram-se para o mesmo local resultados sempre iguais durante todos os dias em análise.

Este método de tratamento visual de fotografias revelou-se uma ferramenta útil pois confirmou os resultados obtidos pelas simulações efectuadas no §3. À semelhança do que se verificou anteriormente, as fotografias relativas à fachada do edifício exposto revelaram mais manchas de degradação do que as restantes situações de edifícios protegidos. O mesmo se passou quando se analisou as fachadas protegidas e se verificou que na presença de um obstáculo vertical de menor dimensões (localização 2) a fachada se encontrava muito mais degradada do que na situação 3 – local protegido por obstáculo vertical de igual altura. Considerando os obstáculos como a razão do aumento da temperatura superficial exterior, causado pelo incremento de radiação incidente que estes provocam nas fachadas e, sabendo que este incremento varia consoante o factor de forma escolhido que depende das características do obstáculo, este método permitiu também validar a escolha feita anteriormente quanto aos factores de forma utilizados para cada situação.

Devido às considerações feitas no início que permitiram a minimização da influência de outros factores responsáveis pelo desenvolvimento biológico nas fachadas, é seguro afirmar que as manchas postas em evidência pelo método de tratamento das fotografias, são em grande parte responsáveis pela ocorrência de condensações superficiais. Assim sendo pode-se afirmar a utilização deste método como válida.

5

Conclusões

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma das patologias actualmente mais frequente nos edifícios revestidos com ETICS é a degradação do aspecto exterior das fachadas devido ao crescimento de microrganismos. Não existe ainda uma solução fácil, eficaz e permanente para este problema.

O desenvolvimento biológico em fachadas é condicionado pelas condensações superficiais, que acontecem sempre que a temperatura superficial é inferior à temperatura de ponto de orvalho. A diminuição mais evidente da temperatura na superfície de fachadas acontece durante o período nocturno devido às trocas radiativas entre a superfície e a envolvente. Durante a noite, o balanço negativo das trocas de radiações de longa onda não são compensadas pela incidência na fachada de radiação solar, originando uma diminuição da temperatura superficial.

De uma variedade de programas de cálculo que permitem simular o transporte de humidade e calor ao longo de elementos construtivos, foi escolhido o software WUFI Pro 4.2. Este permite a determinação correcta da temperatura superficial exterior em fachadas revestidas por ETICS, pois tem em conta um balanço radiativo explícito que origina o arrefecimento nocturno.

No entanto este programa de simulação não conta com a influência de obstáculos no cálculo das temperaturas superficiais. Foi então aplicado a metodologia denominada de MOD.O, onde o obstáculo é assumido como fonte extra de radiação de onda longa. O incremento de radiação a adicionar à radiação atmosférica dos dados climáticos depende de um factor de forma relacionado com a geometria e posição do obstáculo face à fachada.

A presença de obstáculos provoca um aumento da temperatura superficial nocturna das fachadas devido ao acréscimo de radiação de onda longa que incide na superfície. Este aumento de temperatura, mesmo que pouco significativo, causa uma diminuição acentuada das condensações superficiais.

Foi desenvolvida uma metodologia simples de avaliação dos diferentes níveis de degradação visual de fachadas causada pelo aparecimento de manchas associadas ao desenvolvimento biológico. Este método consiste em três etapas e tem em conta alguns critérios quanto à escolha do local e condições de visibilidade ideais para a sua execução. A comparação deste processo de análise visual com os resultados obtidos por simulações numéricas permitiu a validação não só do modelo MOD.O como da escolha dos factores de forma utilizados na simulação.

Verificou-se também a existência de uma relação entre os obstáculos que protegem as fachadas e a degradação do aspecto. O desenvolvimento de microrganismos é condicionado pela geometria e posicionamento dos obstáculos em relação às fachadas. Desta forma a presença de diferentes

obstáculos, como por exemplo edifícios, nas vizinhanças de fachadas revestidas com ETICS pode originar degradações visuais desiguais. É assim importante a inclusão de estudos relacionados com obstáculos quando se pretende revestir uma fachada com ETICS.

É importante referir que nesta dissertação apenas foram estudadas fachadas Norte, logo, os resultados e valores obtidos não podem ser generalizados para as restantes orientações uma vez que estas estão sujeitas a condições climáticas distintas, influenciando assim a ocorrência de condensações superficiais de diferente modo.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os resultados desta dissertação são apenas o início da metodologia de avaliação da influência de edifícios localizados nas proximidades de fachadas revestidas com ETICS na variação da sua temperatura superficial exterior. Apesar de ser possível retirar algumas conclusões acerca dos desfazamentos de condensações superficiais provocados pela presença de diferentes tipos de obstáculos que causam vários níveis de degradação, é necessária alguma cautela na sua interpretação. Assim sendo, uma vez que este trabalho representa apenas o início de um estudo sobre este assunto, motiva diversas perspectivas de investigação futura:

- Desenvolvidos da metodologia de simulação da influência de obstáculos;
- Desenvolvidos na avaliação do comportamento higrotérmico diferencial de fachadas devido à presença de obstáculos;
- Desenvolvidos na avaliação da degradação biológica que se desenvolve nas fachadas de edifícios revestidas por ETICS e determinação de condições óptimas de desenvolvimento;
- Determinação de métodos de análise dos vários níveis de degradação do aspecto provocados por obstáculos;
- Desenvolvimento de estudos de prevenção do desenvolvimento desigual da degradação provocados por o efeito de edifícios.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Freitas, V. *Isolamento Térmico de Fachadas pelo Exterior. Reboco Delgado Armado Sobre Poliestireno Expandido - ETICS*. Dezembro de 2002.
- [2] Pereira, F. *Avaliação laboratorial do desempenho do ETICS*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [3] Moret Rodrigues, A., Canha da Piedade, A., Braga, A. *Térmica de Edifícios*. Edições Orion, Lisboa, 2009.
- [4] Pereira, F. *Influência das variações de temperatura no desempenho de fachadas de alvenaria*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [5] Barreira, E. *Degradação biológica de fachadas com sistemas de isolamento térmico pelo exterior devida ao desempenho higrotérmico*. Dissertação Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [6] Rites, S. *Simulação numérica do comportamento higrotérmico de fachadas*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [7] Gray, W. A., Müller, R. *Engineering Calculations in radiative Heat Transfer*. Pergamon Press, Oxford, 1974.
- [8] <http://www.me.utexas.edu/~howell/index.html>. 01/04/2011.
- [9] Sparrow, E.M., Cess, R. D.. *Radiation heat transfer*. Augmented Edition, California, 1978.
- [10] https://www.fe.up.pt/si/conteudos_service.conteudos_cont?pct_id=26841&pv_cod=59M9aaa4UyJa. 30/05/2011.
- [11] Barreira, E., Delgado, J.M.P.Q., Ramos, N.M.M., Freitas, V.P. *Exterior condensations on fac,ades: numerical simulation of the undercooling phenomenon*, Journal of Building Performance Simulation, 2/02/2011, pp 1-9, Taylor & Francis Group, Porto.
- [12] Siegal, Robert., Howell, Jonh R.. *Thermal radiation het transfer – third edition*, Talor and Francis, Washington, 1992.
- [13] http://www.livingroom.org.au/photolog/tips/histogram_tips.php 16/05/2011.
- [14] <http://www.photocolorcorrection.com> 16/05/2011.
- [15] <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/levels.htm> 07/06/2011.
- [16] http://help.adobe.com/pt_BR/Photoshop/10.0/help.html 08/06/2011.
- [17] <http://www.northlite.net/ps/blend.htm> 08/06/2011.
- [18] Jorne, F. *Análise Do Comportamento Higrotérmico De Soluções Construtivas De Paredes Em Regime Variável*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2010.
- [19] <http://paginas.fe.up.pt/~wufi/manual.pdf> 23/03/2011.
- [20] Kehrer, M.; Schmidt, T. *Radiation effects on exterior surfaces*, 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Vol. 1, pp. 207-212, DTU, Copenhagen, Denmark, 2008.
- [21] <http://paginas.fe.up.pt/~lfc-scc/estacao.html> 24/02/2011.

[22] Pereira, F. *Influência das variações de temperatura no desempenho de fachadas de alvenaria*, Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

[23] <http://www.tecportal.com.br/manual-photoshop-cs5/> 16/05/11.

[24] Künzle, H. *Simultaneous heat and moisture transport in building components – One and two-dimensional calculation using simple parameters*, IRB Verlag, Stuttgart, Germany, 1995.

ANEXO I

VARIAÇÃO HORÁRIA DO CLIMA DO PORTO MEDIDOS PELA ESTAÇÃO METEOROLOGICA DO LFC

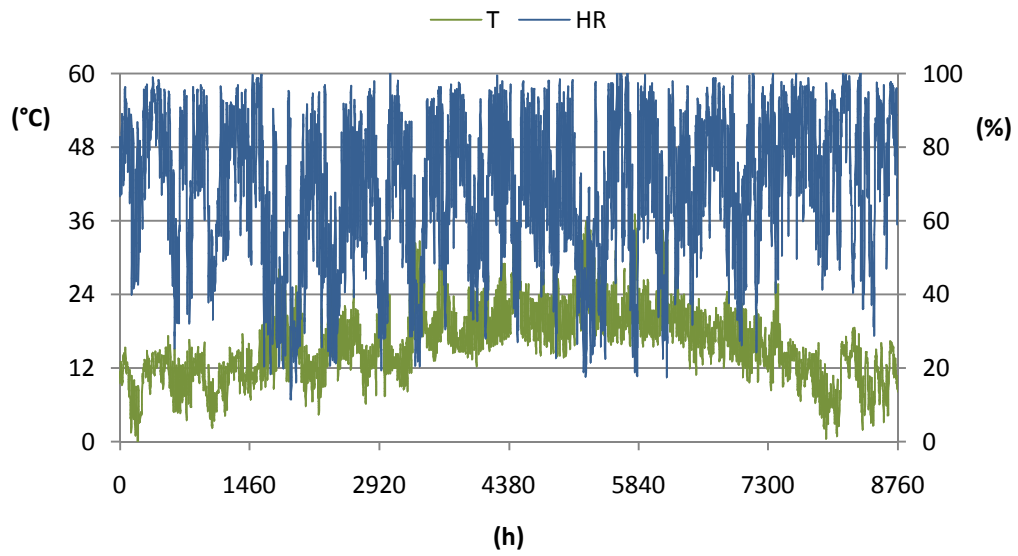


Figura A1.1 – Variação horária da temperatura e humidade relativa

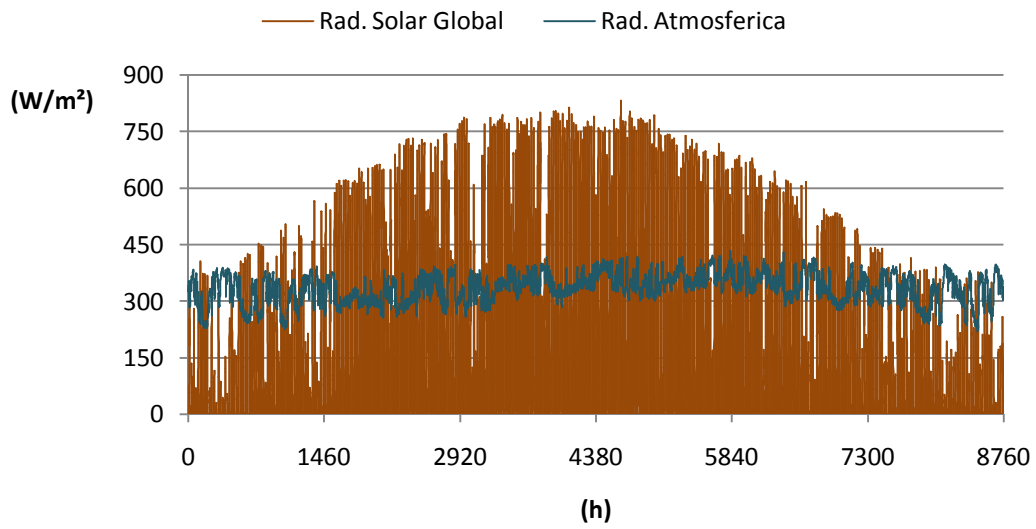


Figura A1.2 – Variação horária da radiação solar global e da radiação atmosférica

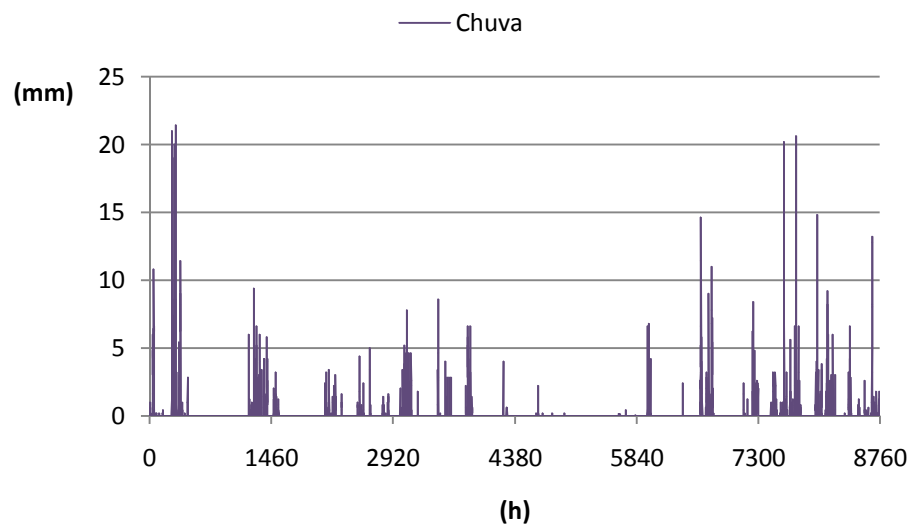


Figura AI.3 – Variação horária da chuva

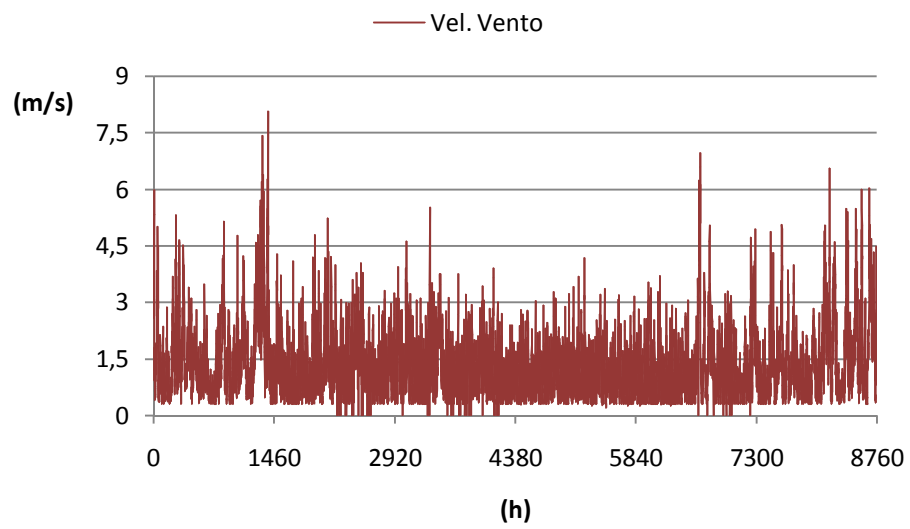


Figura AI.4 – Variação horária da velocidade do vento

ANEXO II

RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DAS FACHADAS

AII.1 LOCALIZAÇÃO 1 – SEM OBSTÁCULO VERTICAL

AII.2 LOCALIZAÇÃO 2 – OBSTÁCULO VERTICAL PARALELO DE IGUAL ALTURA

**AII.3 LOCALIZAÇÃO 3 – OBSTÁCULO VERTICAL PERALELO DE ALTURAS
DIFERENTES**

AII.1 LOCALIZAÇÃO 1 – SEM OBSTÁCULO VERTICAL

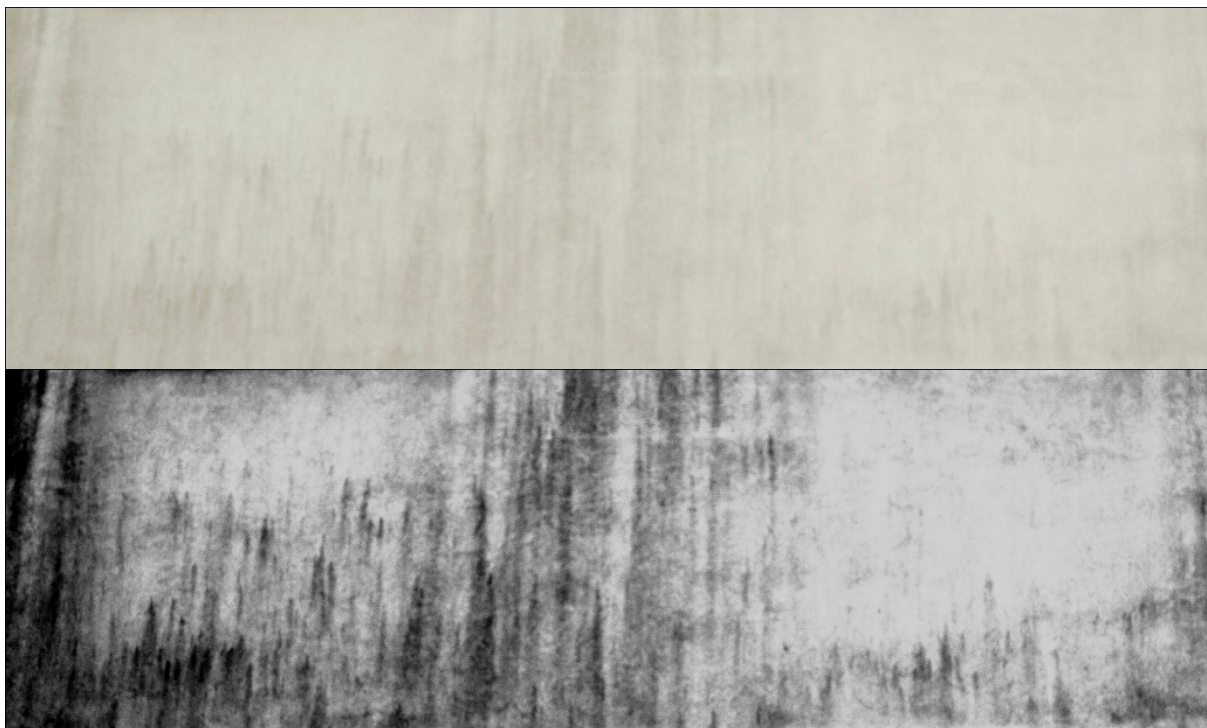


Figura AII.1 – Fotografia da localização 1 no dia 27 às 11 horas (original e após tratamento)



Figura AII.2 – Fotografia da localização 1 no dia 29 às 11 horas (original e após tratamento)



Figura All.3 – Fotografia da localização 1 no dia 30 às 11 horas (original e após tratamento)

AII. 2 LOCALIZAÇÃO 2 – OBSTÁCULO VERTICAL PARALELO DE IGUAL ALTURA



Figura All.4 – Fotografia da localização 2 no dia 25 às 11 horas (original e após tratamento)



Figura AII.5 – Fotografia da localização 2 no dia 27 às 11 horas (original e após tratamento)



Figura AII.6 – Fotografia da localização 2 no dia 29 às 11 horas (original e após tratamento)



Figura All.7 - Fotografia da localização 2 no dia 30 às 11 horas (original e após tratamento)

AII. 3 LOCALIZAÇÃO 3 – OBSTÁCULO VERTICAL PERALELO DE ALTURA DIFERENTE



Figura All.8 – Fotografia da localização 3 no dia 25 às 11 horas (original e após tratamento)

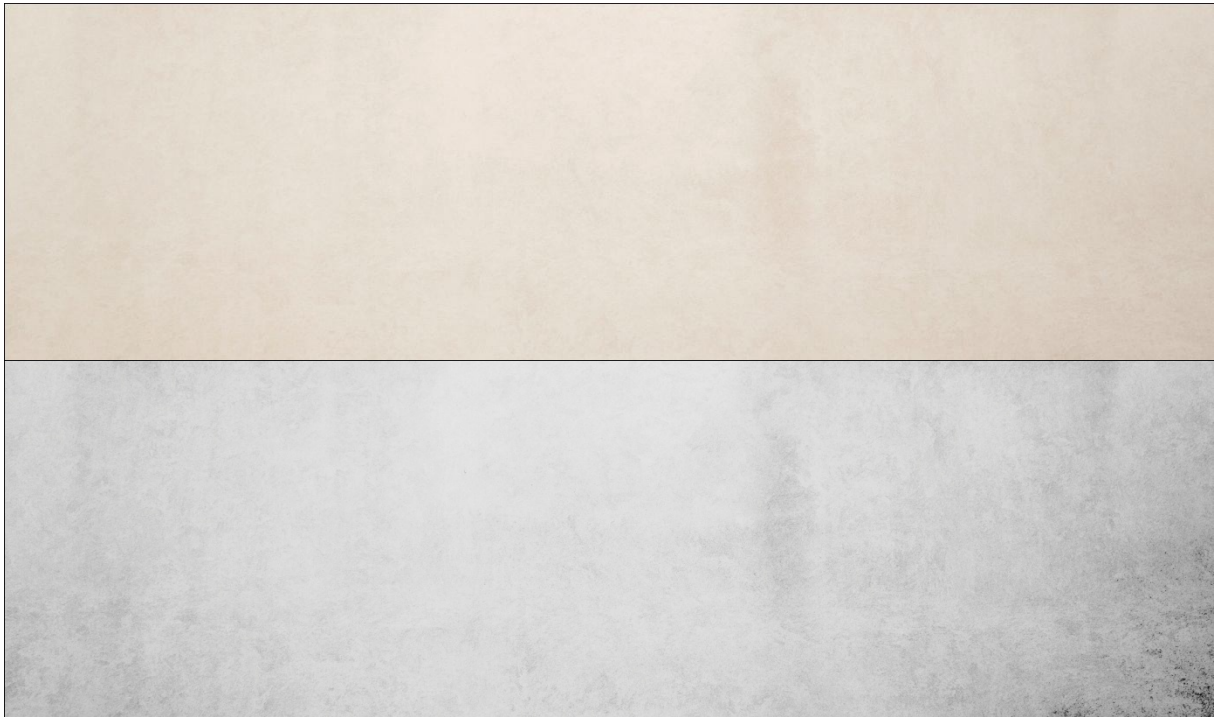


Figura AII.9 – Fotografia da localização 3 no dia 27 às 11 horas (original e após tratamento)



Figura AII.50 – Fotografia da localização 3 no dia 29 às 11 horas (original e após tratamento)



Figura AII.61 – Fotografia da localização 3 no dia 30 às 11 horas (original e após tratamento)

