

ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO INCORPORADAS COM PCM PARA CONTROLO DE HUMIDADE EM HABITAÇÕES ANTIGAS

JOÃO ANTÓNIO PINHEIRO MEIRELES

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

Orientador: Professora Doutora Ana Margarida Vaz Duarte Oliveira e Sá

JUNHO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

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 - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo 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 eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais e Irmã. À memória do meu Padrinho José, e dos meus Avôs Francisco e Frederico.

Inteligência é a capacidade de se adaptar à mudança.

Stephen Hawking

AGRADECIMENTOS

Este trabalho marca o fim de um percurso académico repleto de boas memórias, e queria deixar aqui uma palavra de gratidão a todos a aqueles que contribuíram para isso. Agora que se dá início a uma nova etapa, levo o conhecimento que adquiri durante todos estes anos e as recordações dos momentos que passei, assim como das pessoas que estiveram ao meu lado.

À Professora Doutora Ana Vaz, por todo o apoio e conhecimento partilhado durante a execução deste trabalho, assim como pela disponibilidade.

À minha família, pelo suporte incondicional.

A todos os meus amigos que me ajudaram a ultrapassar as adversidades, tendo um papel de extrema importância para o meu percurso, e com os quais celebrei as nossas conquistas.

Aos meus pais, João e Dulce, que tudo fizeram para que eu pudesse aqui chegar e que sempre estiveram presentes. À minha irmã Joana, por tudo.

RESUMO

A condensação de vapor de água nas superfícies interiores de edifícios de habitação é um problema crucial, que influencia a saúde e o conforto térmico dos seus habitantes. Para além disso, tem também um importante efeito na aparência e na durabilidade dos materiais de construção.

A mitigação dos riscos de condensações não é simples, particularmente no processo de reabilitação de edifícios antigos. Os principais métodos utilizados no tratamento dos riscos de condensações são a colocação de isolamento térmico, no exterior ou interior, e o controlo do ambiente interno através do aquecimento e ventilação. No entanto, a preservação das características arquitetónicas impede a possibilidade de usar isolamento térmico em fachadas, e a colocação destes materiais no interior dos edifícios (em paredes e tetos), quando possível, leva a outros problemas, como: (i) aparecimento de pontes térmicas; (ii) redução da inércia térmica; (iii) redução da área interior.

Face a este panorama, há uma necessidade crescente de encontrar novas soluções que permitam reduzir o risco de ocorrência de condensações mas que não alterem as características do edifício. Esta necessidade gera uma procura por novos materiais e técnicas construtivas que possam ser usados pelo interior, podendo ser aplicados em edifícios que são alvo de reabilitação ou apenas alvo de intervenções ligeira.

Os Materiais de Mudança de Fase (*Phase Change Materials* – PCM) podem ser incorporados em materiais de construção tradicionais com o objetivo de aumentar a capacidade de armazenamento de energia, permitir a estabilização das temperaturas superficiais interiores de edifícios influenciando a sensação de conforto térmico e estabilização da temperatura ambiente interior e sem influenciar o aspeto tradicional desses materiais de construção.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a possibilidade de utilização de argamassas de recobrimento incorporadas com PCM para mitigar os riscos de condensações em superfícies interiores de paredes de antigos edifícios de habitação. A utilização de PCM's em revestimentos interiores pode potencialmente evitar (ou reduzir fortemente) a ocorrência de temperaturas de condensações nas superfícies interiores, cumprindo assim o seu duplo propósito: Melhorar o conforto térmico interior e minimização dos riscos de condensações.

As simulações numéricas são utilizadas para prever a temperatura de ponto de orvalho devido às condições climáticas exteriores e às características da envolvente de típicos edifícios antigos Portugueses. A influência dos PCM na mitigação dos riscos de condensações é avaliada e os resultados globais são apresentados com o objetivo de assinalar diferenças comportamentais relativamente a matérias de construção comuns.

Em termos de resultados, foi possível observar que as argamassas incorporadas com PCM são capazes de eliminar os períodos de condensação, quando estes são curtos, e diminuí-los quando estes são de longa duração. Para todos os tipos de paredes estudadas (Pedra, Tijolo e Betão) foi visível um efeito positivo face às condensações assim como a estabilização das temperaturas superficiais interiores. Quanto à influência do clima exterior, conclui-se que as argamassas com PCM têm melhores resultados em edifícios expostos a climas onde as temperaturas sejam superiores a 0°C.

PALAVRAS-CHAVE: Risco de Condensação, Temperatura de Ponto de Orvalho, Materiais de Mudança de Fase (PCM), Controlo de Humidade, Simulação Numérica.

ABSTRACT

The condensation of water vapor on inner surfaces of residential buildings is a crucial problem, which influences the health and thermal comfort of the occupants. It also has important detrimental effects on the appearance and durability of construction materials.

The mitigation of condensation risks is not simple, particularly in the process of rehabilitation of old buildings. The main techniques to prevent the occurrence of water condensation in buildings are the installation of thermal insulation, in the exterior or in the interior, and the control of the inner environment through heating and ventilation. The preservation of architectural features precludes the possibility of using thermal insulation materials on facades. The installation of these materials inside buildings (on walls and ceilings), when possible, leads to other problems, such as: (i) breeding of thermal bridges; (ii) reducing the thermal inertia; (iii) reducing the interior area.

In result, there's a growing need to find new solutions that allow the mitigation of condensation risks but don't change the building's original characteristics. This need generates the study of new materials and construction techniques that can be used on the buildings inside, allowing the possibility of usage in rehabilitations and small interventions.

Phase Change Materials (PCM) can be incorporated into traditional building materials with the aim to increase heat storage capacity, enable stabilization of interior surface temperatures of buildings whereby influencing the thermal comfort sensation and the stabilization of the interior ambient temperatures and without influencing the aspect of those traditional building materials.

This paper aims to assess the possibility of using PCM plastering mortars to mitigate condensation risks in the inner surfaces of walls of old residential buildings. The use of PCMs in internal coatings can potentially avoid (or strongly reduce) the occurrence of condensation temperatures in the inner surfaces, thus fulfilling their twofold intent: Improvement of inner thermal comfort and minimization of condensation risks.

Numerical simulations are used to predict dew point temperature due to exterior climatic conditions and envelope characteristics of typical Portuguese old residential buildings. The influence of PCM on condensation risk mitigation is assessed and the global results are presented with the goal of highlighting behavioural differences in regard to common construction materials.

As for the results, it was possible to see that the PCM plastering mortars are able to mitigate de periods of condensations, when they're short, and reduce them, when they're long. For every type of wall studied (Rock, Brick and Concrete) it was visible the positive effect in terms of condensations as well as the stabilization of the inner surface temperatures. In terms of the influence of the exterior climate, the PCM plastering mortars have better results in buildings that are exposed to temperatures above 0°C.

Keywords: Condensation Risk, Dew Point Temperatures, Phase Change Materials (PCM), Moisture Control, Numerical Simulation.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.3. APRESENTAÇÃO DOS CAPÍTULOS	4
2. CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS	5
2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	5
2.2. ESTUDO E AVALIAÇÃO DO FENÓMENO	7
2.3. METODOLOGIA DE PREVENÇÃO DE CONDENSAÇÕES	9
3. MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE	13
3.1. ENQUADRAMENTO	13
3.2. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE	14
3.3. CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE	14
3.4. APLICAÇÕES DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE	15
3.5. ESTUDOS COM NOVOS MATERIAIS	18
3.5.1. INTRODUÇÃO	18
3.5.2. COMPÓSITO DE PCM E MATERIAL HIGROSCÓPICO	18
3.5.3. COMPARAÇÃO ENTRE COMPÓSITOS DE PCM E MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE	19
3.5.4. PCM MACRO ENCAPSULADO INSERIDO NUMA PAREDE DE BETÃO	20
3.5.5. SÍLICA MESO POROSA	21
3.5.6. ARGAMASSA À BASE DE CORTIÇA	22
4. MODELO NUMÉRICO	23
4.1. ENQUADRAMENTO	23
4.2. PROGRAMAS UTILIZADOS NO ESTUDO DE CONDENSAÇÕES	24
4.2.1. PROGRAMA GLASTA	24
4.2.2. PROGRAMA CONDENSE 2000	24
4.2.3. PROGRAMA CONDENSE 13788	25

4.2.4. WUFI PRO	26
5. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	37
5.1. INTRODUÇÃO	37
5.2. CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO	37
5.2.1. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS EXTERIORES	37
5.2.2. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS INTERIORES	39
5.2.3. ENVOLVENTE	40
5.2.4. MATERIAIS E CARACTERÍSTICAS	41
5.3. SIMULAÇÕES COM DADOS CLIMÁTICOS DA CIDADE DE BRAGANÇA.....	45
5.3.1. ALVENARIA DE PEDRA – 40 CM	45
5.3.2. ALVENARIA DE PEDRA – 30 CM	49
5.3.3. ALVENARIA DE PEDRA – 20 CM	54
5.3.4. PAREDE DE BETÃO – 20 CM	59
5.3.5. ALVENARIA DE TIJOLO FURADO – 11 CM	65
5.3.6. ALVENARIA DE TIJOLO FURADO – 15 CM	69
5.3.7. ALVENARIA DE TIJOLO FURADO – 20 CM	72
5.4. SIMULAÇÕES COM DADOS CLIMÁTICOS DA CIDADE DO PORTO	75
5.4.1. PAREDE DE BETÃO	75
5.4.2. ALVENARIA DE TIJOLO FURADO – 11 CM	81
5.4.3. TIJOLO FURADO – 15 CM	86
6. CONCLUSÕES	91
6.1. ANÁLISE DE RESULTADOS	91
6.2. CONCLUSÕES FINAIS.....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Objetivos e método de trabalho	3
Figura 2.1. – Diagrama Psicrométrico	7
Figura 2.2. – Exemplos do Método de Glaser	8
Figura 2.3. – Esquema para Prevenção de Condensações em Edifícios (Code of Practice for Control of Condensation in Buildings)	10
Figura 3.1. – Sistema de armazenamento de energia com PCM, em lajes aligeiradas (Navarro et al., 2015)	15
Figura 3.2. – Colocação de PCM macro encapsulado em laje aligeirada (Navarro et al., 2015)	16
Figura 3.3. – Placas cerâmicas constituídas por parafina macro encapsulada (Cerón, Neila e Khayet, 2011)	16
Figura 3.4. – Incorporação de PCM em tijolos cerâmicos (Alawadhi, 2008)	17
Figura 3.5. – Sistema de paredes trombe com PCM (Moghiman, Hatami e Boghrati, 2011)	17
Figura 3.6. – Esquema da Colocação do PCM em Paredes de Betão em Diferentes Posições	20
Figura 4.1. – Apresentação do programa WUFI Pro	26
Figura 4.2. – Parcerias do WUFI Pro	26
Figura 4.3. – Janela de Início do WUFI Pro (WUFI Pro)	27
Figura 4.4. – Janela de definição do elemento do WUFI Pro (WUFI Pro)	27
Figura 4.5. – Janela base de dados de materiais do WUFI Pro (WUFI Pro)	28
Figura 4.6. – Janela da base de dados de materiais que permite alterações do WUFI Pro (WUFI Pro)	28
Figura 4.7. – Janela de definição das características do edifício do WUFI Pro (WUFI Pro)	29
Figura 4.8. – Janela de definição das características da superfície exterior do WUFI Pro (WUFI Pro)	29
Figura 4.9. – Janela de definição das condições iniciais do WUFI Pro (WUFI Pro)	30
Figura 4.10. – Janela de definição do período de controlo WUFI Pro (WUFI Pro)	30
Figura 4.11. – Janela de definição das características do cálculo do WUFI Pro (WUFI Pro)	31
Figura 4.12. – Janela de resumo dos dados climáticos exteriores do WUFI Pro (WUFI Pro)	31
Figura 4.13. – Janela de análise dos dados climáticos exteriores do WUFI Pro (WUFI Pro)	32
Figura 4.14. – Janela de definição do clima interior com curvas sensoriais do WUFI Pro (WUFI Pro)	32

Figura 4.15. – Janela de definição do clima interior segundo a EN13788 do WUFI Pro (WUFI Pro) ..33	33
Figura 4.16. – Janela de definição do clima interior segundo a EN15026 do WUFI Pro (WUFI Pro) ..33	33
Figura 4.17. – Janela de definição do clima interior segundo a ASHRAE 160 do WUFI Pro (WUFI Pro)34	34
Figura 4.18. – Janela do gráfico instantâneo do teor de humidade numa camada do WUFI Pro (WUFI Pro).....34	34
Figura 4.19. – Janela dos resultados gráficos dos fluxos de humidade e calor no elemento WUFI Pro (WUFI Pro)35	35
Figura 4.20. – Janela da simulação animada do WUFI Pro (WUFI Pro)35	35
Figura 5.1. – Clima Porto38	38
Figura 5.2. – Clima Bragança.....39	39
Figura 5.3. – Características do Clima Interior a Simular40	40
Figura 5.4. – Flutuação da TSI e TPO da AP40 com Reboco Tradicional45	45
Figura 5.5. – Flutuação da HR e TSI da AP40 com Reboco Tradicional.....46	46
Figura 5.6. – Flutuação da TSI e TPO da AP40 com PCM de 14°C47	47
Figura 5.7. – Flutuação da HR e TSI da AP40 com PCM 14°C.....47	47
Figura 5.8. – Flutuação da TSI e TPO da AP40 com PCM 13°C48	48
Figura 5.9. – Flutuação da HR e TSI da AP40 com PCM 13°C.....49	49
Figura 5.10. – Flutuação da TSI e TPO da AP30 com Reboco Tradicional50	50
Figura 5.11. – Flutuação da HR e TSI da AP30 com Reboco Tradicional.....50	50
Figura 5.12. – Flutuação da TSI e TPO da AP30 com PCM 14°C51	51
Figura 5.13. – Flutuação da HR e TSI da AP30 com PCM 14°C.....52	52
Figura 5.14. – Flutuação da TSI e TPO da AP30 com PCM 13°C53	53
Figura 5.15. – Flutuação da HR e TSI da AP30 com PCM 13°C.....53	53
Figura 5.16. – Flutuação da TSI e TPO da AP20 com Reboco Tradicional54	54
Figura 5.17. – Flutuação da HR e TSI da AP20 com Reboco Tradicional.....55	55
Figura 5.18. – Flutuação da TSI e TPO da AP20 com PCM 14°C56	56
Figura 5.19. – Flutuação da HR e TSI da AP20 com PCM 14°C.....56	56
Figura 5.20. – Flutuação da TSI e TPO da AP20 com PCM 12°C57	57
Figura 5.21. – Flutuação da HR e TSI da AP20 com PCM 12°C.....58	58
Figura 5.22. – Flutuação da TSI e TPO com PCM 11°C59	59
Figura 5.23. – Flutuação da HR e TSI da AP20 com PCM 11°C.....59	59
Figura 5.24. – Flutuação da TSI e TPO da PB com Reboco Tradicional60	60

Figura 5.25. – Flutuação da HR e TSI da PB com Reboco Tradicional.....	60
Figura 5.26. – Flutuação da TSI e TPO da PB com PCM 14°C	61
Figura 5.27. – Flutuação da HR e TSI da PB com PCM 14°C.....	62
Figura 5.28. – Flutuação da TSI e TPO da PB com PCM 12°C	63
Figura 5.29. – Flutuação da HR e TSI da PB com PCM 12°C.....	63
Figura 5.30. – Flutuação da TSI e TPO da PB com PCM 11°C	64
Figura 5.31. – Flutuação da HR e TSI da PB com PCM 11°C.....	64
Figura 5.32. – Flutuação da TSI e TPO da AT11 com Reboco Tradicional	65
Figura 5.33. – Flutuação da HR e TSI da AT11 com Reboco Tradicional.....	66
Figura 5.34. – Flutuação da TSI e TPO da AT11 com PCM 14°C.....	67
Figura 5.35. – Flutuação da HR e TSI da AT11 com PCM 14°C	67
Figura 5.36. – Flutuação da TSI e TPO da AT11 com PCM 12°C.....	68
Figura 5.37. – Flutuação da HR e TSI da AT11 com PCM 11°C	69
Figura 5.38. – Flutuação da TSI e TPO da AT15 com Reboco Tradicional	70
Figura 5.39. – Flutuação da HR e TSI da AT15 com Reboco Tradicional.....	70
Figura 5.40. – Flutuação da TSI e TPO da AT15 com PCM 14°C.....	71
Figura 5.41. – Flutuação da HR e TSI da AT15 com PCM 14°C.....	72
Figura 5.42. – Flutuação da TSI e TPO da AT20 com Reboco Tradicional	73
Figura 5.43. – Flutuação da HR e TSI da AT20 com Reboco Tradicional.....	73
Figura 5.44. – Flutuação da TSI e TPO da AT20 com PCM 14°C.....	74
Figura 5.45. – Flutuação da HR e TSI da AT20 com PCM 14°C.....	75
Figura 5.46. – Flutuação da HR e TSI da PB com Reboco Tradicional.....	76
Figura 5.47. – Flutuação da HR e TSI da PB com Reboco Tradicional.....	76
Figura 5.48. – Flutuação da TSI e TPO da PB com PCM 14°C	77
Figura 5.49. – Flutuação da HR e TSI da PB com PCM 14°C.....	78
Figura 5.50. – Flutuação da TSI e TPO da PB com PCM 13°C	79
Figura 5.51. – Flutuação da HR e TSI da PB com PCM 13°C.....	79
Figura 5.52. – Flutuação da TSI e TPO da PB com PCM 15°C	80
Figura 5.53. – Flutuação da HR e TSI da PB com PCM 15°C.....	83
Figura 5.54. – Flutuação da TSI e TPO da AT11 com Reboco Tradicional	81
Figura 5.55. – Flutuação da HR e TSI da AT11 com Reboco Tradicional.....	82

Figura 5.56. – Flutuação da TSI e TPO da AT11 com PCM 14°C.....	83
Figura 5.57. – Flutuação da HR e TSI da AT11 com PCM 14°C	84
Figura 5.58. – Flutuação da TSI e TPO da AT11 com PCM 15°C.....	85
Figura 5.59. – Flutuação da HR e TSI da AT11 com PCM 15°C	85
Figura 5.60. – Flutuação da TSI e TPO da AT15 com Reboco Tradicional	86
Figura 5.61. – Flutuação da HR e TSI da AT15 com Reboco Tradicional.....	87
Figura 5.62. – Flutuação da TSI e TPO da AT15 com PCM 14°C.....	88
Figura 5.63. – Flutuação da HR e TSI da AT15 com PCM 14°C	88
Figura 5.64. – Flutuação da TSI e TPO da AT15 com PCM 15°C.....	89
Figura 5.65. – Flutuação da HR e TSI da AT15 com PCM 15°C.....	90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1. – Classificação da higrometria em função do tipo de edifício (Ramos, 2007)	5
Tabela 5.1. – Designação dos elementos simulados.....	41
Tabela 5.2. – Características do Material Pedra.....	42
Tabela 5.3. – Características do Material Tijolo.....	42
Tabela 5.4. – Características do Material Betão	43
Tabela 5.5. – Características do Material Argamassa “Tradicional”	43
Tabela 5.6. – Características do Material Argamassa com 30% de PCM.....	44

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

Wi – Vapor de água presente no ar interior [g/kg]

W – Teor de Humidade do ar [kg/m³]

n – Taxa Horária da Renovação do Ar [h⁻¹]

V – Volume de um compartimento ou edifício

We - Vapor de água presente no ar exterior [g/kg]

(W /n.V) - Higrometria [g/kg]

HR – Humidade Relativa [%]

P – Pressão Parcial do vapor de água [Pa;mmHg]

Ps – Pressão de Saturação [Pa;mmHg]

Pi – Pressão Instalada [Pa;mmHg]

π - Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água [kg/(m.s.Pa)]

Rt – Resistência Térmica [(m².°C)/W]

λ – Coeficiente de Condutibilidade Térmica [W/(m.°C)]

e – Espessuras [m]

Pe – Permeância ao Vapor de Água [kg/(m².s.Pa)]

R_D – Resistência à Difusão de Vapor de Água

μ – Fator de Resistência à Difusão de Vapor de Água [-]

Sd – Espessura da Camada de Ar de Difusão Equivalente [m]

TPO – Temperatura de Ponto de Orvalho

TSI – Temperatura Superficial Interior

PCM – Phase Change Materials

AP 40 – Alvenaria de Pedra de 40 cm

AP 30 – Alvenaria de Pedra de 30 cm

AP 20 – Alvenaria de Pedra de 20 cm

PB 20 – Parede de Betão de 20 cm

AT 11 – Alvenaria de Tijolo Furado de 11 cm

AT 15 – Alvenaria de Tijolo Furado de 15 cm

AT 20 – Alvenaria de Tijolo Furado de 20 cm

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios.

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O estudo de patologias nas construções, e a procura de soluções para o seu tratamento, é um tema que surge com frequência nos dias de hoje. A necessidade de melhorar o conforto dos ocupantes e simultaneamente aumentar a sustentabilidade dos edifícios gera uma procura por novas técnicas e materiais que aumentem a longevidade dos elementos da construção e que garantam o cumprimento da sua função durante a sua utilização. As patologias podem surgir devido a erros de projeto, erros de conceção ou por má utilização dos edifícios. De forma a diminuir o número de patologias e aumentar a qualidade da construção, foram sendo criadas ferramentas para evitar, nas várias fases de vida do edifício, a ocorrência de erros que potenciam o desenvolvimento de patologias.

No âmbito da fase de projeto, são os regulamentos que definem exigências mínimas a cumprir pelos elementos construtivos, dentro dos vários âmbitos: estruturas, térmica, acústica, segurança contra incêndio e higrotérmica. A utilização de ferramentas numéricas é essencial para analisar e conceber novas soluções, dentro de cada âmbito, de forma mais rápida e de acordo com a regulamentação. A evolução das exigências de conforto, associado ao desenvolvimento científico e tecnológico obrigou à evolução dos regulamentos, resultando num aumento da qualidade dos edifícios. Na fase de execução é essencial fazer cumprir o que foi definido nos projetos para garantir a qualidade do edifício. Nesta fase, são entidades como o diretor de obra e a fiscalização que têm a função de transmitir a informação que está nos projetos para a obra, e controlar a execução dos trabalhos de forma a prevenir e evitar erros de conceção. Devido à falta de industrialização da construção, a fiscalização é essencial para garantir a qualidade dos trabalhos. Durante a fase de utilização do edifício criou-se o hábito de apenas intervir quando surgem alguns problemas visíveis, o que acaba por ser muito dispendioso quando se pensa numa revisão e manutenção periódica como alternativa. A manutenção preventiva é mais económica, reduzindo a quantidade de intervenções, e conduz a uma melhor preservação do edifício, garantindo o conforto dos seus ocupantes.

Para além das ferramentas práticas, o estudo de materiais e técnicas de construção são igualmente importantes para a evolução qualitativa da construção. O seu desenvolvimento surge como forma de prevenir as patologias dos edifícios, melhorando a sua resposta. Para tal, é necessário um grande conhecimento científico sobre os fenómenos físicos associados a cada patologia. Novos materiais e novas soluções construtivas são muito importantes para reduzir o aparecimento de patologias em edifícios durante a sua utilização.

De entre as patologias mais comuns em edifícios, as condensações no interior dos edifícios são um fenómeno bastante frequente e que é do conhecimento geral. Apesar da sua complexidade, em termos físicos e da relação entre os fatores de condicionamento, são bastante perceptíveis devido à degradação

que causam nos elementos, sendo facilmente identificável. Para além do impacto visual, as condensações superficiais podem levar a danos nos materiais, e em situações de grande concentração, podem levar a problemas de saúde dos ocupantes do edifício. A acumulação de água nos elementos construtivos gera alterações nas propriedades dos seus materiais, degradando-os progressivamente, e quando a água se acumula em grande quantidade criam-se condições para o aparecimento de bolores e fungos, que causam problemas respiratórios. Os edifícios que são construídos respeitando a regulamentação em vigor, relativamente ao desempenho energético dos edifícios de habitação, Decreto-Lei n.º 194/2015 de 14 de Setembro, à partida não apresentarão problemas de condensações, visto que o respeito pelas exigências a cumprir impede o desenvolvimento de condensações internas e é garantia da qualidade das soluções aplicadas. Assim sendo, o grande foco no tratamento destas patologias está nas intervenções de edifícios construídos antes da entrada em vigor do DL 40/90, em 1990, o primeiro regulamento sobre acondicionamento térmico de edifícios, o RCCTE.

A reabilitação de edifícios está a tornar-se num mercado muito procurado em Portugal. Devido ao grande volume de construções registado na última metade do séc. XX em Portugal, e às crises económicas que tiveram grande impacto no sector, as atenções viram-se agora para a reabilitação do edificado já construído e em muitos casos abandonado, principalmente nos centros metropolitanos. A reabilitação define-se pela intervenção num edifício para que este cumpra as exigências atuais. Para que esta intervenção seja bem-sucedida é necessário aplicar as técnicas de construção e os materiais mais recentes, em edifícios que se caracterizam por métodos de construção ultrapassados, resultando na alteração do seu aspeto. Aqui existe, por vezes, um conflito entre a necessidade de ‘atualizar’ o edifício e de preservar a sua arquitetura original. No caso particular das condensações interiores, a forma mais eficaz de evitar este problema é pela aplicação de isolamento térmico pelo exterior, o que pode implicar a alteração do aspeto do edifício. Em alternativa, e para que as fachadas dos edifícios possam ser preservadas, o isolamento térmico pode de ser aplicado pelo interior, no entanto esta técnica pode causar outros problemas, tais como: potencialização de pontes térmicas, redução a inércia térmica do edifício e redução a área habitável. Desta forma, é pertinente procurar novas soluções para a prevenção de condensações interiores mas que possam ser utilizadas mantendo as técnicas e os materiais tradicionais. Atualmente, os estudos que são feitos tentam acrescentar propriedades a materiais correntemente utilizados nos edifícios.

A argamassa de recobrimento é um material muito utilizado como acabamento interior dos vários elementos construtivos presentes num edifício. Esta dá um aspeto homogéneo aos elementos e é capaz de resistir às solicitações a que estes são sujeitos (como por ex.: solicitações mecânicas e térmicas). Nesta perspetiva, as argamassas de recobrimento têm um grande potencial para incorporarem outros materiais que lhes confiram novas características sem alterar a sua funcionalidade original, como é o caso dos materiais de mudança de fase (PCM). Estes materiais caracterizam-se pela capacidade de armazenamento de calor latente, associado às mudanças de fase sólido-líquido. A sua incorporação em argamassas já revelou grandes vantagens no aumento da qualidade térmica dos edifícios, podendo ter um papel essencial no aumento do conforto e da eficiência energética. Os materiais de mudança de fase, dependendo da sua natureza, têm uma gama de temperaturas características que ‘acionam’ o seu funcionamento de forma passiva. Verifica-se que dentro da gama de temperaturas características, existem materiais de mudança de fase que são acionados com as temperaturas do ambiente interior dos edifícios. É com base nestas temperaturas, e na sua capacidade de libertação de calor, que se tenta criar uma relação com as temperaturas de ponto de orvalho, tentando impedir que as temperaturas superficiais atinjam valores abaixo da temperatura de ponto de orvalho, evitando deste modo as indesejadas condensações superficiais.

1.2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é verificar a possibilidade da utilização de uma argamassa de recobrimento, com materiais de mudança de fase (PCM) incorporados, de forma a diminuir os riscos de condensações superficiais interiores, através de um modelo numérico. Para tal, foi necessário estudar os PCM e a sua incorporação em argamassas, assim como estudar as condições de ocorrência de condensações e os elementos mais susceptíveis ao fenómeno. A figura seguinte pretende demonstrar o método utilizado no trabalho, para chegar ao resultado final. (Figura 1.1.)

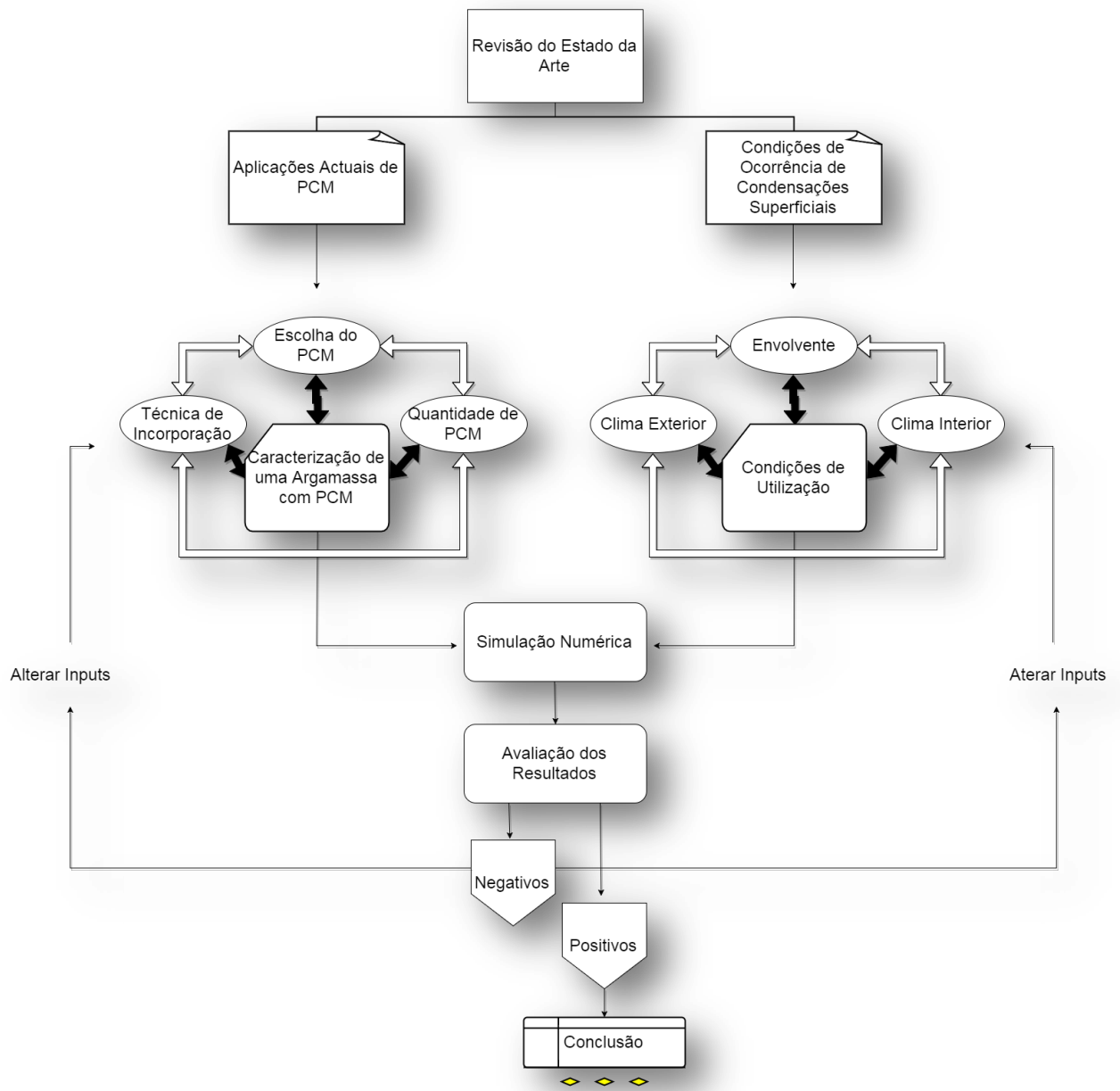


Figura 1.1.- Objetivos e método de trabalho

1.3. APRESENTAÇÃO DOS CAPÍTULOS

De forma a poder estruturar o trabalho desenvolvido, resumem-se aqui os conteúdos de cada capítulo presentes neste trabalho:

- **CAPÍTULO 1** – Introdução ao trabalho, definição dos objetivos do mesmo e síntese essencial dos assuntos abordados e desenvolvidos em cada capítulo.
- **CAPÍTULO 2** – As condensações superficiais internas. São apresentados os conceitos base associados ao fenómeno das condensações através de uma explicação resumida do fenómeno, são abordados os métodos de avaliação das condensações e os métodos de prevenção.
- **CAPÍTULO 3** – Resumo do estado da arte dos materiais de mudança de fase, PCM, na construção. Abordagem aos materiais de mudança de fase e aos conceitos base associados aos mesmos. Definição das suas características, da classificação dos mesmos e apresentam-se algumas aplicações destes materiais em soluções construtivas. A segunda parte foca as condensações superficiais. Na segunda parte deste capítulo são apresentados alguns estudos com a utilização de materiais de mudança de fase, assim como outros materiais, no âmbito da higrotérmica.
- **CAPÍTULO 4** – Definição do modelo numérico. São apresentadas alguns exemplos de ferramentas numéricas de estudo das condensações interiores para comparação com o modelo utilizado. Apresentação e descrição do programa WUFI Pro, em termos da sua utilização e da sua funcionalidade.
- **CAPÍTULO 5** – Caracterização das condições de utilização a simular no modelo numérico. Aqui são definidos as condições climáticas exteriores e interiores, é caracterizada a envolvente e os seus elementos, e são apresentadas as características dos materiais utilizados nas simulações numéricas. Apresentação dos resultados gráficos e análise dos parâmetros obtidos.
- **CAPÍTULO 6** – Análise dos resultados gráficos obtidos e conclusões finais.

2

CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS

2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A ocorrência de condensações superficiais nos elementos construtivos é motivo de muitas intervenções nos edifícios em Portugal. Devido à falta de rigor nas construções atuais e inexistência de técnicas preventivas aquando a construção de edifícios mais antigos, esta patologia é muito comum, especialmente nas habitações. As condensações superficiais, para além de degradarem o desempenho dos edifícios, e os seus materiais, podem, em alguns casos, afetar a saúde dos seus ocupantes.

Este fenómeno depende de muitas variáveis do ambiente interno do edifício ou de um compartimento. O ar presente num edifício contém uma quantidade variável de vapor de água (W_i), que depende da ocupação e das atividades realizadas no seu interior que geram produção de vapor de água (W), da ventilação (n), do volume da habitação ou compartimento (V), e do vapor de água contido no ar exterior (W_e). A caracterização independente da produção de vapor, gerada no ambiente interno, denomina-se de *Higrometria*, e tem uma gama de valores associados ao tipo de utilização do edifício (Freitas, 1998), (Tabela 1.1.) (Ramos, 2007).

$$W_i = W_e + 0,825 \frac{W}{n \cdot V} \text{ (g/kg)} \quad (2.1.)$$

Higrometria		$\frac{W}{n \cdot V} \text{ (g/m}^3\text{)}$
Fraca	$\leq 2,5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$	Escolas, Ginásios
Média	$2,5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ a $5,0 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$	Edifícios de habitação não sobre ocupados e corretamente ventilados
Forte	$5,0 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ a $7,5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$	Edifícios de habitação com ventilação deficiente, indústrias
Muito Forte	$\geq 7,5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$	Piscinas, certos locais industriais com grande produção de vapor

Tabela 1.1. – Classificação da higrometria em função do tipo de edifício (Ramos, 2007)

Quanto mais vapor de água existir no ar, maior será a *Pressão Parcial (P)* do ar. Como a quantidade de vapor que o ar pode conter é limitado, quando este atinge o *Limite de Saturação*, condensa as quantidades de vapor em excesso. Ao valor de saturação de vapor corresponde a *Pressão de Saturação (Ps)*. Contudo o comportamento do ar húmido depende da variação da temperatura, que faz variar a Pressão de Saturação. A *Humidade Relativa* do ar, para uma determinada temperatura, é a razão percentual entre a *Pressão Parcial (P)* e a *Pressão de Saturação (Ps)* (Freitas, 1998).

$$HR = \frac{P [Pa; mmHg]}{Ps[Pa; mmHg]} \times 100\% \quad (2.2.)$$

Nos edifícios, os elementos construtivos separam dois ambientes com características distintas, como a temperatura e humidade relativa. Devido há existência de uma diferença de pressão entre os dois ambientes, gera-se um gradiente que resulta na *Difusão do Vapor* ao longo dos elementos, no sentido do ambiente de maior pressão para o de menor pressão. Quando o fluxo de ar atravessa os elementos, sendo que estes podem oferecer uma maior ou menor resistência devido à *Permeabilidade ao Vapor* (π), encontra diferentes temperaturas nas suas superfícies, ou ao longo do elemento se este for composto por vários materiais. Se o ar atingir uma superfície de temperatura baixa, com uma pressão de saturação inferior à sua pressão parcial, ocorrem condensações. A água que estava presente apenas na forma de vapor passa ao estado líquido, criando inúmeros problemas nos elementos construtivos e nos próprios edifícios. A grande concentração de gotículas de água é propícia à formação de fungos e bolores que poderão gerar problemas respiratórios a quem habita esses edifícios.

Partindo do princípio de que nas habitações as condições climáticas interiores derivadas da ocupação e da utilização são pré-definidas, o fator principal que condiciona o aparecimento das condensações interiores são as temperaturas dos elementos construtivos. Este fator depende das condições climáticas exteriores, e da *Resistência Térmica (Rt)* dos elementos construtivos da envolvente.

$$Rt = \frac{e [m]}{\lambda [W/(m \cdot ^\circ C)]} [(m^2 \cdot ^\circ C)/W] \quad (2.3.)$$

Como até meados dos anos 80 não existia regulamentação que limitasse os valores de *Rt* dos elementos construtivos da envolvente, os edifícios construídos até essa época apresentam problemas de condensações quando os elementos têm uma grande *Condutibilidade Térmica* (λ), ou por apresentarem *Espessuras (e)* reduzidas, como no caso das alvenarias de pedra, ou tijolo, onde a espessura da parede por vezes é significativamente reduzida nos pisos elevados. Nos edifícios onde já é utilizado o isolamento térmico, este problema verifica-se em zonas onde a resistência térmica diminui significativamente em relação ao resto do edifício. Esta diminuição pode surgir devido à alteração da geometria dos elementos ou à diferença da condutibilidade térmica entre eles. Estas zonas chamam-se pontes térmicas, e nas construções mais recentes, são muito comuns na ligação entre zonas correntes e elementos estruturais da envolvente dos edifícios.

2.2. ESTUDO E AVALIAÇÃO DO FENÓMENO

Devido à necessidade de controlar as condensações numa fase anterior à construção, foi necessário estudar o fenómeno fisicamente, juntamente com os parâmetros que o influenciam, para poder adotar métodos de previsão do comportamento dos edifícios, e dos materiais, face às condições ambientais a que são expostos.

Como foi dito anteriormente, são muitos os parâmetros que influenciam a ocorrência de condensações numa habitação. As condições climáticas interiores dependem da ocupação, podendo ser definidas em projeto, dentro de uma gama de valores. Já as condições climáticas exteriores dependem da zona climática em que se insere o edifício, e da orientação geográfica da envolvente, o que torna estes estudos mais complexos. A zona climática traduz as condições espectáveis de exposição do edifício face ao clima da região onde será inserido. A orientação geográfica da envolvente é importante para perceber o nível de exposição da mesma, sendo que as envolventes orientadas a Norte são as que necessitam de maiores cuidados. No entanto, existem duas formas de analisar o comportamento de um edifício face às condensações, em regime permanente e em regime dinâmico.

No regime permanente admite-se que as condições climáticas, interiores e exteriores, são constantes, ou seja, apenas se estuda a possibilidade de ocorrência de condensações para uma determinada altura de um dia do ano. Este regime permite um estudo de situações limite, sendo uma análise pontual e simplificada. Uma das ferramentas utilizadas neste regime é o diagrama psicrométrico. O diagrama relaciona a humidade do ar, pressão de vapor, humidade relativa e temperatura ambiente. Através deste método gráfico podemos relacionar todos estes parâmetros e verificar a possibilidade de ocorrência de condensações através da determinação da Temperatura de Ponto de Orvalho (TPO). A TPO corresponde à temperatura para um determinado volume de ar com uma certa humidade absoluta para o qual o ar se encontra saturado (Duarte, 2010).

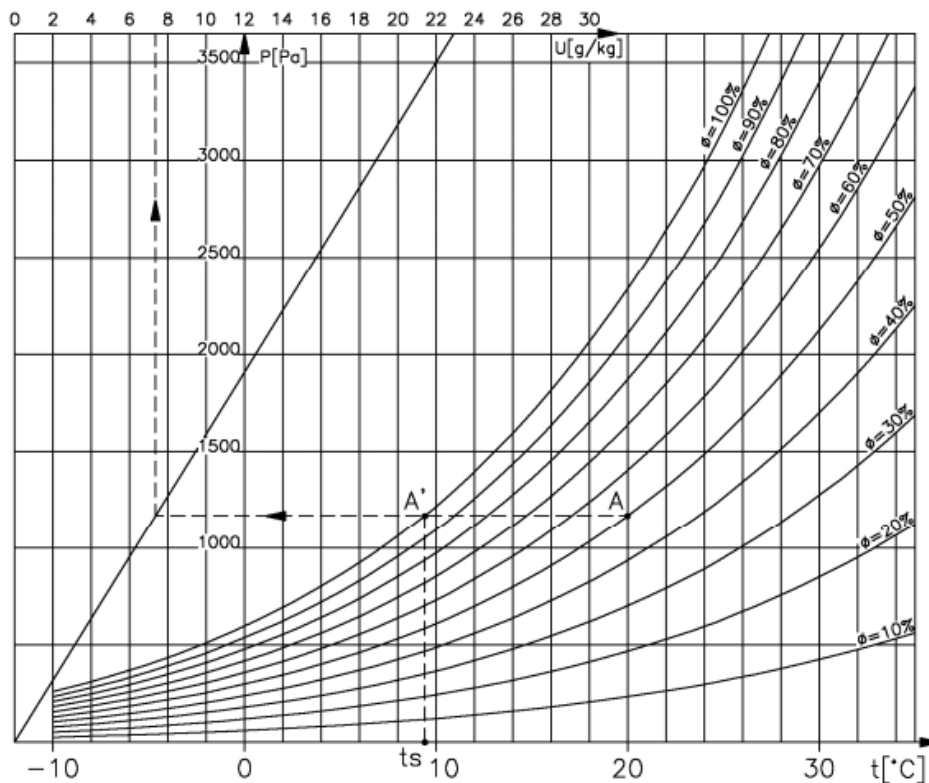


Figura 2.2. – Diagrama Psicrométrico

Outro dos métodos gráficos do regime permanente é o método de Glaser. Neste método é estudada a influência dos materiais que compõem o elemento construtivo admitindo que, se este estiver sujeito a um gradiente de pressões, a pressão de saturação varia em cada camada desse elemento. Determinando a curva de Pressões Instaladas (P), através da Pressão Exterior (P_e) e Interior (P_i), verificamos se esta intersecta a curva de Pressões de Saturação (P_s) do elemento, que depende da variação da Temperatura (t) das camadas e da sua Resistência à Difusão de Vapor.

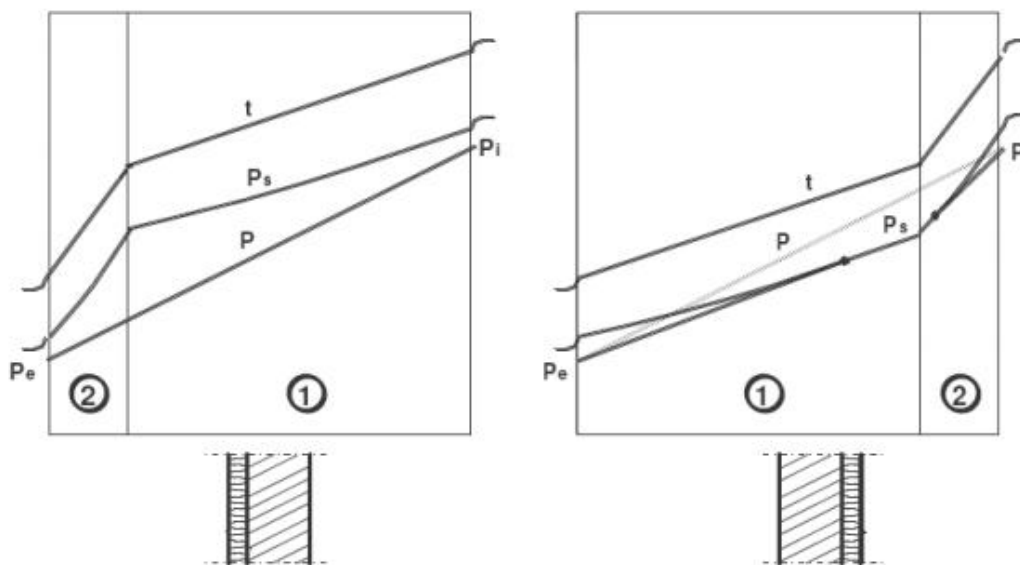


Figura 2.3. – Exemplos do Método de Glaser

O método de Glaser é muito utilizado para a definição de regras de qualidade para a prevenção de condensações internas, mas importa referir que para poder ser utilizado, é necessário que se verificam as suas condições de aplicação(Freitas, 1998)(Freitas, 1998)(Freitas, 1998)(Freitas, 1998)(Freitas, 1998)(Freitas, 1998)(Freitas, 1998)(Freitas, 1998)(Freitas, 1998)(Freitas, 1998)(Freitas, 1998)(WUFI):

- A humidade desloca-se apenas por transferência de vapor de água;
- Não há transporte de ar, pelo que a transferência de vapor se deve apenas à difusão;
- A difusão de vapor de água obedece à lei de FICK;
- O transporte de calor dá-se apenas por condução;
- O regime é permanente;
- Os materiais são não-higróscópicos;
- Os elementos de construção são estanques ao ar;
- Os elementos de construção têm as faces planas e paralelas;
- Os coeficientes de permeabilidade ao vapor de água e de condutibilidade térmica são constantes
- Não há movimento (redistribuição) do vapor de água condensado.

Os métodos gráficos, apesar de serem bastante precisos, não permitem realizar um grande número de análises num curto espaço de tempo. Para tal, foram criadas ferramentas numéricas de forma a obter resultados de forma rápida. Os métodos numéricos do regime permanente baseiam-se nos métodos gráficos, transformando-os numa ferramenta mais eficiente. Algumas das ferramentas numéricas do regime permanente são o Condensa 2000, Condensa 13788 e o Glasta. Estes programas serão detalhados mais a frente no Capítulo 4, nesta fase é importante explicar que estes programas são uma

ferramenta essencial no estudo e avaliação das condensações devido à grande precisão dos resultados que fornecem.

No regime dinâmico a complexidade do estudo aumenta significativamente. Neste regime temos de ter em conta as variações das condições climáticas exteriores e interiores. Devido à enorme complexidade, estes estudos são apenas realizados com modelos numéricos. Para tal, são necessários os dados climáticos da região onde se situará o edifício, os dados climáticos interiores, normalmente definidos pela norma EN 15026 e ASHRAE, a constituição do elemento construtivo a estudar, ou seja, as características higrótérmicas dos materiais, e a sua orientação geográfica. A grande vantagem deste regime é que podemos fazer uma análise ao longo de um ciclo, desde um dia a vários anos, e observar todas as variações que ocorrem no interior do elemento ao longo desse ciclo. Um dos programas numéricos que permite realizar este estudo é o WUFI Pro (Esteves, 2010). O WUFI Pro permite fazer uma análise temporal do comportamento do elemento face às condições a que está exposto e às suas alterações, o que permite perceber se a solução é viável para o período de tempo que foi projetada. Tal como os programas do regime permanente, o WUFI Pro será detalhado no Capítulo 4.

Todas as ferramentas referidas anteriormente são essenciais para uma fase prévia da construção, mas muitas vezes os problemas de condensações estão presentes em edifícios já construídos e ocupados, e necessitam de intervenção de modo a que esta patologia seja reparada. Nesta fase, antes de se fazer qualquer tipo de intervenção, é necessário realizar um diagnóstico. O diagnóstico é um processo que, se bem-sucedido, permite obter conhecimento da patologia, relacionando-a com o ambiente em que se insere. Este processo depende do conhecimento empírico e do conhecimento casual de quem o desenvolve, e é um processo continuado de recolha de informação e interligação da mesma, que tem como objetivo chegar à origem da patologia. Após um diagnóstico bem-sucedido, procede-se à intervenção e aí já serão úteis as ferramentas de previsão para validar as soluções adotadas.

2.3. METODOLOGIA DE PREVENÇÃO DE CONDENSAÇÕES

Entende-se aqui por metodologia de prevenção como regras de construção definidas em fase de projeto que garantem, para cada situação individual, um funcionamento aceitável das soluções adotadas face à ocorrência de condensações. Estas regras têm como base o conhecimento científico dos problemas de condensações e a experiência na resolução dos mesmos.

Couasnet (1990), apresenta uma metodologia generalizada para mitigação dos problemas de condensações nos edifícios em Portugal, que compreende o seguinte:

- Aumentar a Temperatura Interior no mínimo até aos 17°C;
- Garantir ventilação geral e permanente com um fluxo aproximado de 0.8 Rph;
- As entradas de ar devem ser colocadas nas salas e quartos, e deverão ser autos reguláveis. A ventilação individual de cada compartimento não é aceitável;
- Nas casas de banho, mesmo que exista um acesso para o exterior, é necessária a instalação de aparelhos de extração de ar;
- Nas cozinhas deve ser garantido um caudal mínimo de ventilação de 60 m³/h;
- Parede e telhados devem apresentar um coeficiente de transmissão térmica com o valor máximo de 0.8 W/m².°C;
- O isolamento térmico deve ser contínuo. Caso não seja possível, optar por um isolamento de menor espessura;

- As pontes térmicas devem ser tratadas sem reduzir a estabilidade dos elementos construtivos;
- Sem aquecimento e uma ventilação apropriada não é possível ter nenhum critério para a correção de pontes térmicas;
- O uso de tintas de anti condensações não deve ser generalizado, apesar de estas apresentarem uma redução no crescimento de bolores podem causar queda de gotículas de água nas paredes.

Relativamente ao tratamento do caso específico das pontes térmicas, Corvacho (1995) sugere uma metodologia com base no cálculo do Fator de Temperatura (τ) e na construção de gráficos de temperatura para poder chegar a valores de Fatores de Temperatura ideais, para diferentes condições climáticas. O Fator de Temperatura relaciona as condições climáticas exteriores e as condições climáticas interiores com a temperatura superficial interior do elemento construtivo. Este método surge devido à verificação da ineficácia de balizar os valores do Fator de Temperatura para que não ocorressem condensações nas pontes térmicas, independentemente da localização do edifício. Assim, com a ajuda do conhecimento aprofundado das condições locais, é possível definir o Fator de Temperatura dentro de cada cenário climático.

A metodologia Britânica baseia-se num código designado por “*Code of Practice for Control of Condensation in Buildings*”. Neste código são explicados os vários problemas de condensações, incluindo as superficiais, e são mencionados alguns critérios relativamente à conceção dos elementos construtivos. Este código é bastante simples de entender já que não é muito técnico, e apresenta várias metodologias para diferentes elementos construtivos. Deste código salienta-se uma ideia transversal a todos os elementos na prevenção e tratamento das condensações: Aquecer, Ventilar e Isolar.

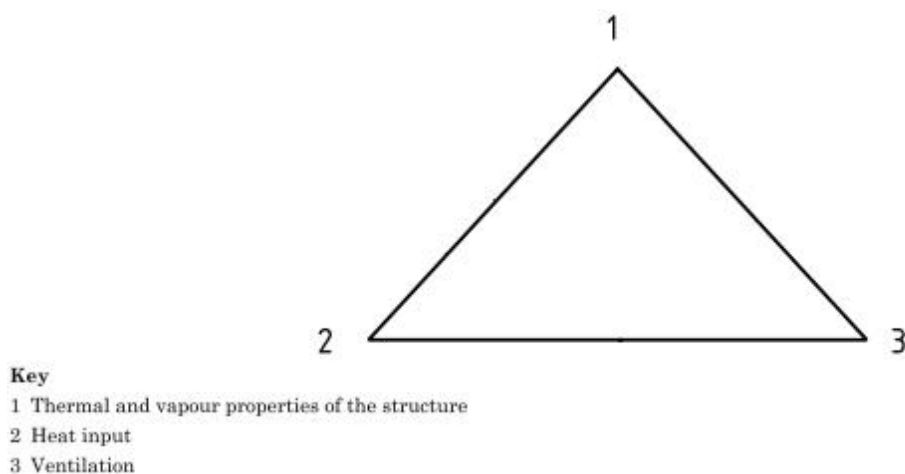


Figura 2.4. – Esquema para Prevenção de Condensações em Edifícios (Code of Practice for Control of Condensation in Buildings).

Em princípio, todos os problemas de condensações podem ser resolvidos com aquecimento para que as temperaturas dos elementos estejam acima das TPO. Se não existir um sistema adequado de aquecimento, deve ser instalado um que permita obter as temperaturas desejadas. O aquecimento e o isolamento devem ser sempre considerados em conjunto já que o bom funcionamento dos dois permite reduzir os custos de energia.

É essencial uma ventilação adequada para manter a TPO do ar abaixo das temperaturas superficiais dos elementos construtivos. A provisão de ventilação nas cozinhas e casas de banho é recomendada.

Deve ser aplicado no edifício isolamento suficiente para permitir que este seja aquecido adequadamente, a um custo razoável. Deve haver cuidado quanto à sua localização relativamente ao elemento onde é inserido para não causar outro tipo de problemas, como a condensação no interior dos elementos, e devido às pontes térmicas. É importante referir que o isolamento por si só é ineficaz no controlo de condensações, a não ser que haja um equilíbrio entre isolamento, ventilação e aquecimento.

3

MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

3.1. ENQUADRAMENTO

A sustentabilidade na construção é um dos temas mais atuais no que diz respeito à evolução do setor. É um objetivo muito ambicionado pelas empresas para que se possam diferenciar no mercado, procurando diminuir o impacto das suas atividades no ambiente. A contribuição dos edifícios, residenciais e comerciais no consumo de energia a nível global, atingiu valores entre 20% a 40% em países desenvolvidos, ultrapassando outros dois grandes sectores, os transportes e as indústrias. Dentro destes consumos, cerca de 50% da energia consumida é para conforto térmico. (Pérez-Lombard, Ortiz e Pout, 2008). Devido à necessidade de reduzir os consumos de energia durante a vida útil dos edifícios, uma das principais preocupações na sua conceção é a eficiência energética, ou seja, aproveitar ao máximo a energia disponível e diminuir os consumos. A escolha dos materiais usados para a construção destes edifícios é essencial para garantir o comportamento desejado pelo edifício, pois são estes que garantem o controlo do ambiente interno através das suas propriedades físicas e químicas. A procura de materiais que melhorem a eficiência dos edifícios é, portanto, crucial para a sustentabilidade dos mesmos.

Os *Phase Change Materials* (PCM), em português, Materiais de Mudança de Fase, têm como principal característica, o armazenamento de energia latente sob a forma de calor, destacando-se dos materiais de construção mais convencionais (Baetens, Jelle e Gustavsen, 2010). Esta capacidade de armazenamento, a temperaturas constantes, deve-se ao facto de estes materiais associarem aos processos de mudança de fase a transferência de energia. Quando a temperatura ambiente é elevada, o PCM passa do estado sólido ao estado líquido, observando-se uma reação química endotérmica. Quando a temperatura ambiente desce, o PCM volta ao estado sólido através de uma reação exotérmica. Na reação endotérmica o PCM absorve energia do meio ambiente, o que lhe permite depois libertá-la para o mesmo, através da reação exotérmica. Estes ciclos de absorção e libertação contribuem para a estabilização da temperatura interior (Sá, 2012). Esta influência no ambiente interior, através do armazenamento de energia térmica, faz com que o ambiente interior dos edifícios seja controlado passivamente, ou seja, reduz a necessidade de meios mecânicos, diminuindo o consumo de energia.

3.2. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

Naturalmente, todos os materiais têm reações energéticas associadas a mudanças de fase. No entanto, só alguns materiais apresentam, durante as mudanças de fase, as características necessárias para serem introduzidos nos edifícios. Para esta utilização, os materiais devem sofrer pequenas variações de volume, devem ter boa condutibilidade térmica, exibir um calor latente elevado, ter temperaturas de mudança de estado que se encontrem na zona de conforto em edifícios, ser quimicamente estáveis e economicamente viáveis. A variação de volume deve ser controlada para que seja compatível com as variações dimensionais admissíveis para os sistemas onde os PCM estão integrados, evitando o desenvolvimento de patologias, como a fissuração dos elementos. A boa condutibilidade térmica é necessária para o aumento de eficiência nas transferências de energias, e quanto maior for a sua capacidade de armazenamento e libertação, mais eficiente é o sistema. Naturalmente a zona de temperaturas de ‘ativação’ dos PCM têm de estar dentro do intervalo projetado para o ambiente interno do edifício, e dentro deste ambiente a sua estabilidade nas mudanças de fase é essencial devido aos perigos de corrosão e inflamação dos PCM. A rentabilidade económica destes materiais está ligada ao grande número de ciclos de fusão que estes materiais aguentam, e devem ser proporcionais aos anos de utilização do edifício.

3.3. CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

A natureza dos PCM pode ser classificada como orgânica, inorgânica e eutética. Dentro de cada grupo, podemos encontrar uma gama de valores característicos relativamente às suas propriedades, podendo definir qual o melhor tipo de material a usar nas várias aplicações. Dentro dos materiais orgânicos distinguem-se dois grupos, as parafinas e os ácidos gordos, enquanto o único material de natureza inorgânica são os sais hidratados. Os materiais eutéticos são misturas entre diferentes materiais orgânicos, entre diferentes materiais inorgânicos ou entre materiais orgânicos e inorgânicos.

Dentro destes grupos de PCM, os materiais orgânicos apresentam uma maior gama de temperaturas de fusão, incluindo temperaturas de conforto no interior de edifícios, são quimicamente estáveis, não são corrosivos e não são tóxicos. Dentro deste grupo, as parafinas têm valores de entalpia de fusão superiores aos ácidos gordos (Baetens, Jelle e Gustavsen, 2010). Estas características permitem concluir que as parafinas são mais adequadas para o uso nos edifícios.

Os materiais inorgânicos são aqueles que apresentam maior entalpia de fusão por unidade de massa e volume, melhor condutividade térmica relativamente às parafinas, têm um custo inferior aos materiais orgânicos e não são inflamáveis. No entanto, estes materiais começam a sofrer decomposição ao fim de um pequeno número de ciclos, e demonstram problemas de sobrearrefecimento (Kheradmand, 2015; Tyagi e Buddhi, 2007).

Os materiais eutéticos têm temperaturas de fusão e solidificação muito constantes. Estes materiais quando mudam de fase não apresentam segregação dos seus componentes, o que torna muito difícil a sua separação. Esta mistura de materiais pode também apresentar grandes valores de entalpia de fusão, tal como os materiais inorgânicos (Zhou, Zhao e Tian, 2012).

3.4. APLICAÇÕES DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

Dentro de um edifício, os PCM podem ser integrados em sistemas de controlo do ambiente passivos ou ativos. Os sistemas passivos são aqueles que são ‘acionados’ sem necessidade de meios mecânicos (Soares et al., 2013), estes demonstram maior interesse na construção pois permitem aumentar a eficiência dos edifícios, reduzindo os consumos energéticos. Nestes sistemas passivos, os PCM podem ser utilizados como componente de um sistema construtivo, ou integrados em materiais de construção.

A integração dos PCM em materiais de construção pode ser feita através de três métodos: Impregnação, Imersão e Encapsulamento.

A Impregnação consiste em adicionar a misturas convencionais de outros materiais, como gessos ou argamassas, uma determinada quantidade de PCM. A Imersão utiliza a pressão capilar nos poros dos materiais, para absorver os PCM previamente derretidos ou dissolvidos que depois endurece dentro dos poros do material. O encapsulamento traduz-se em envolver os PCM em cápsulas à base de polímeros, evitando o contacto direto entre os PCM e os materiais de construção. Estas cápsulas podem ter vários tamanhos e formas para que a integração seja o mais conveniente possível e reduza as incompatibilidades. Dentro do encapsulamento distingue-se o Macro encapsulamento (maior do que 1 cm de diâmetro), e o Micro encapsulamento (entre 1 a 1000 μm de diâmetro).

Atualmente já se reconhecem nos PCM características muito vantajosas no que se refere à sua utilização em edifícios, e vários estudos foram feitos demonstrando diferentes aplicações e o seu desempenho.

Baetens, Jelle e Gustavsen (2010) referem a utilização de PCM em paredes de gesso cartonado em elementos de betão. No primeiro caso, diferentes tipos de PCM são integrados através do processo de impregnação nas paredes, e os resultados demonstram que estas paredes ajudam a reduzir a energia usada para aquecimento, 6% numa habitação em Helsínquia (Finlândia) e 15% numa habitação em Madison (U.S.A). Nos elementos de betão, os autores fazem uma pequena comparação entre o gesso cartonado e o betão e demonstram que apesar de os edifícios em betão terem uma grande massa térmica, a integração de PCM por imersão de inertes porosos, pode resultar num aumento significativo de capacidade térmica do edifício.

Também Navarro et al. (2015) apresentaram um sistema de armazenamento de energia térmica numa laje aligeirada pré-fabricada. Com o objetivo de dar resposta a apenas uma parte das necessidades de aquecimento e arrefecimento, incorporaram nas secções de aligeiramento da laje, pequenos tubos contendo PCM macro encapsulados. Numa análise de verão e inverno, os autores demonstram a potencialidade deste sistema na redução energética dos edifícios (Figura 3.1. e 3.2.).

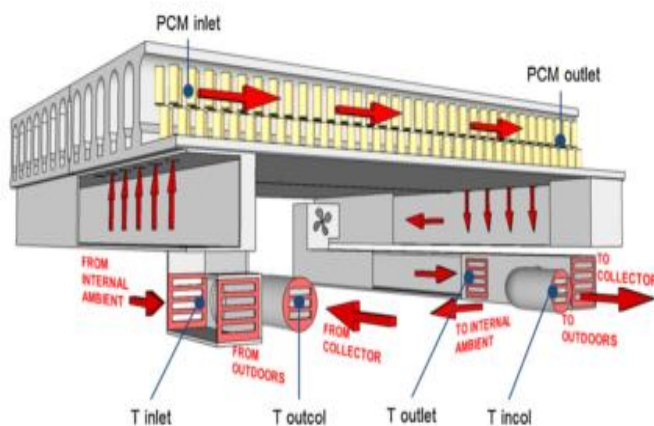


Figura 3.1. – Sistema de armazenamento de energia com PCM, em lajes aligeiradas (Navarro et al., 2015)



Figura 3.2. – Colocação de PCM macro encapsulado em laje aligeirada (Navarro et al., 2015)

Um estudo experimental realizado por Cerón, Neila e Khayet (2011), com placas cerâmicas contendo uma mistura parafínica macro encapsulada, usadas num pavimento como sistema passivo de condicionamento térmico, permitiu perceber que este sistema permitia a estabilização da temperatura interior no inverno e redução da energia consumida para condicionamento térmico durante a noite (Figura 3.3).



Figura 3.3. – Placas cerâmicas constituídas por parafina macro encapsulada (Cerón, Neila e Khayet, 2011)

Estudos com argamassas (Sá (2012); (Kheradmand (2015); Kheradmand et al. (2016))) demonstraram o efeito benéfico da incorporação de PCM no aumento da eficiência dos edifícios através da estabilização da temperatura interior. Nestes estudos, a utilização de PCM micro encapsulado em argamassas de revestimento interior, permitiu atenuar a amplitude da térmica interior, reduzir os picos de temperatura em dias atípicos, e manter os níveis de conforto térmico. Este controlo passivo resulta na redução de meios mecânicos para controlo da temperatura e consequentemente menos utilização de energia.

Outra forma de aplicação encontrada, foi a incorporação de PCM em tijolos cerâmicos. Alawadhi (2008) apresentou uma análise térmica num tijolo comum com furos cilíndricos, onde colocou os PCM. Estudando os vários parâmetros que influenciavam o seu desempenho, como quantidade de PCM, tipo de PCM, e localização no tijolo, chegou a uma configuração otimizada. Os resultados revelaram, para esta configuração, que o fluxo de calor nos espaços interiores pode ser reduzido até 17.55%. Zhang et al. (2011), avaliaram a resposta de uma parede de alvenaria de tijolo incorporado com PCM nos poros, à flutuação da temperatura exterior. Os resultados demonstraram que, comparativamente um tijolo comum, a capacidade de armazenamento de energia térmica é superior e

que a incorporação dos PCM beneficia o isolamento térmico, melhorando o conforto térmico (Figura 3.4.).

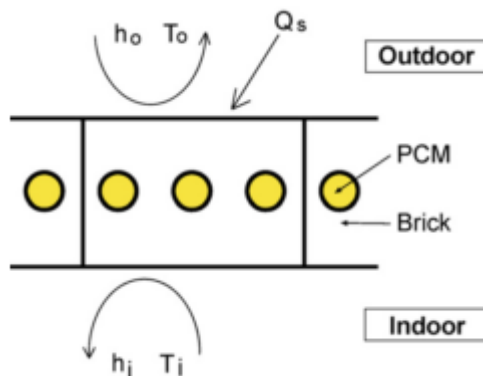


Figura 3.4. – Incorporação de PCM em tijolos cerâmicos (Alawadhi, 2008)

Em portadas, Silva et al. (2015), comparou duas amostras semelhantes, uma contendo PCM e a outra não, na influência da temperatura interior dos edifícios. A portada com PCM conseguiu reduzir a temperatura máxima interior, numa redução 16,6 °C superior à redução garantida com a portada sem PCM.

Numa nova abordagem ao estudo de paredes trombe, Moghiman, Hatami e Boghrati (2011), substituíram a massa térmica típica da parede por PCM. A grande capacidade de armazenamento destes materiais, e introdução de uma capacidade rotativa de partes da parede, permitiu reduzir a espessura da parede e tornou-a mais eficiente no armazenamento, durante o dia, e irradiação durante a noite (Figura 3.5.).

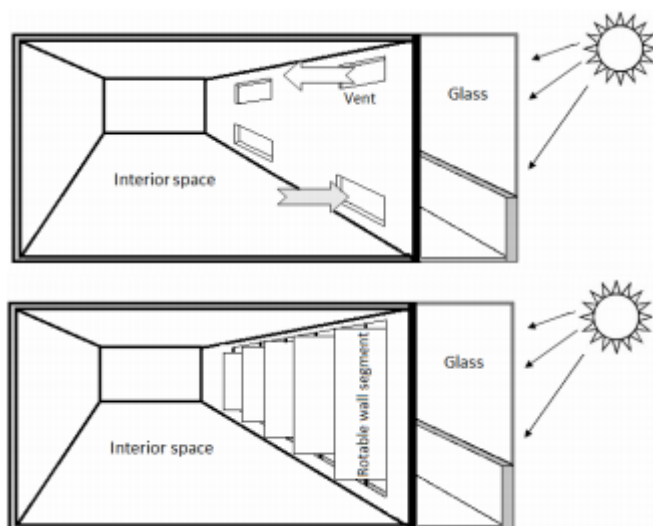


Figura 3.5. – Sistema de paredes trombe com PCM (Moghiman, Hatami e Boghrati, 2011)

Apesar de não ser do interesse deste estudo, os PCM também são muito estudados para sistemas ativos, tais como sistemas de arrefecimento, onde são um elemento complementar que proporciona maior eficiência ao mesmo. Dois destes exemplos são, um sistema de teto arrefecido realizado por Carvalho (2013) e um sistema de arrefecimento realizado por Santos (2013). Em ambos os trabalhos,

os autores salientam a redução no consumo de energia dos seus sistemas, devido a integração dos PCM.

Por último, Castilho (2014) apresentou uma simulação numérica de uma caso de estudo real, o edifício da Faculdade de Engenharia do Porto, onde apresentou resultados relativamente ao efeito dos PCM no conforto térmico do edifício. Nesta simulação foram formuladas três condições de utilização das salas de computadores, considerando a existência isolada e simultânea de sistemas de ventilação natural, mecânica e arrefecimento. Desta análise conclui-se que o efeito dos PCM no conforto térmico tem maior peso apenas com existência de ventilação natural e ocupação, diminuindo os picos de temperatura. Quando são considerados sistemas de arrefecimento complementares, estes têm maior influência na redução da temperatura, no entanto, registou-se uma ligeira economia de energia com a presença dos PCM.

3.5. ESTUDOS COM NOVOS MATERIAIS

3.5.1. INTRODUÇÃO

Visto que grande parte dos estudos presentes relativos a materiais de mudança de fase se encontram dentro da análise térmica dos edifícios, para aquecimento ou arrefecimento, e o objetivo deste trabalho se insere mais no estudo higrotérmico, era necessário perceber se já existiam algumas relações entre materiais de mudança de fase e condensações ou humidade. Aqui se reuniram alguns estudos realizados com materiais de mudança de fase num perspetiva higrotérmica, assim como outros materiais que revelaram ter um comportamento bastante promissor. Para além da descrição das investigações e dos seus objetivos, apresentam-se os seus resultados experimentais e conclusões mais relevantes.

3.5.2. COMPÓSITO DE PCM E MATERIAL HIGROSCÓPICO

Chen, Qin e Yang (2015), descrevem um método de preparação de um novo tipo de material de mudança de fase com características higroscópicas e a análise das suas propriedades, através de ensaios experimentais. Este material estudado é composto por um PCM micro encapsulado (MPCM), material com características térmicas, e diatomito, material higroscópico.

O objetivo deste estudo foi caracterizar o comportamento higrotérmico deste novo material, devido à necessidade de utilizar na construção de edifícios, materiais capazes de controlar a temperatura e humidade relativa de forma passiva, ou seja, diminuindo a necessidade de meios mecânicos.

O PCM utilizado foi encapsulado com dióxido de silício, resultando no MPCM. O MPCM tira proveito do material de encapsulamento que, para além de impedir que haja derrame durante a mudança de fase do PCM no seu interior, pode também melhorar a condutividade do PCM. O método de encapsulamento foi adotado devido ao menor risco face ao fogo e libertação de toxinas de encapsulamentos inorgânicos, quando comparados a encapsulamentos orgânicos. O diatomito é um material orgânico com boa capacidade de adsorção, e neste método foi misturada com o MPCM no interior de uma proveta juntamente com água, para formar um bloco a que chamaram CMPCM (compósito material de mudança de fase micro encapsulado). Para fazer um controlo de resultados do CMPCM, foram usadas amostras de diatomito, gesso e madeira para comparação.

Em termos de resultados práticos, foi possível verificar que as temperaturas de fusão e solidificação do CMPCM se afastam apenas de 0.2°C, o que o torna mais eficiente, contundo a sua entalpia de fusão

diminui significativamente, cerca de 7.7 vezes, relativamente ao PCM no seu estado puro. Esta diminuição deve-se à presença do material higroscópico que, por não ter mudança de fase, diminui a libertação de energia. Relativamente ao comportamento higrotérmico, a amostra de CMPCM revelou um coeficiente de transferência de humidade superior às três amostras de controlo, verificando-se o mesmo para o seu *Moisture Buffer Value* (MBV). A presença das microcápsulas aumentam a porosidade da amostra de CMPCM, o que explica o aumento do coeficiente de transferência de humidade, que por consequência faz aumentar o MBV.

Por fim, pôde então concluir-se que este compósito consegue melhorar tanto a temperatura interior de uma divisão como a sua humidade relativa. O CMPCM não só é capaz de libertar e armazenar energia, como consegue também adsorver e desadsorver vapor de água. O estudo deste compósito permitiu também perceber que o comportamento higrotérmico global é superior à simples combinação de um PCM e diatomito por camadas.

3.5.3. COMPARAÇÃO ENTRE COMPÓSITOS DE PCM E MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

Este artigo, realizado por Chen e Qin (2016), vem no seguimento do anterior. Desta vez, foram estudados três materiais de mudança de fase capazes de controlar a humidade ambiente, PCHCM (*Phase Change Humidity Control Material*). Os três compósitos são constituídos pelo mesmo PCM micro encapsulado, e três diferentes materiais higroscópicos: vesuvianite (VCPCM), sepiolite (SCPCM) e zeolite (ZCPCM). Após a caracterização e descrição dos métodos da realização dos compósitos, semelhantes ao estudo anterior, foram analisadas as suas características térmicas e higroscópicas.

Tal como no artigo anterior, dos mesmos autores, o objetivo é encontrar um material que possa ser utilizado em edifícios para melhorar o conforto, controlando a temperatura interior e a humidade relativa passivamente.

De forma idêntica, e pelas mesmas razões, o micro encapsulamento foi realizado com dióxido de silício, e foi usado como PCM uma mistura de ácido cáprico (88% da massa do PCM) e ácido octodecanóico. A vesuvianite, a sepiolite e a zeolite são materiais porosos tipicamente higroscópicos, frequentemente usados para controlar a humidade relativa de espaços interiores. Para controlo de resultados foram utilizadas 3 amostras puras de vesuvianite, sepiolite e zeolite.

Relativamente aos resultados práticos, estes provaram ser semelhantes ao do estudo anterior, o que confirma as suas conclusões. Mais uma vez, os três compósitos têm temperaturas de fusão e solidificação mais próximas do que o PCM, contudo também se verifica uma diminuição significativa na entalpia de fusão devido à presença do material higroscópico. Os valores do coeficiente de transferência de humidade são todos superiores às amostras de controlo, desde 1.47 vezes do VCPCM a 1.83 vezes do ZCPCM. O mesmo se verifica para o MBV que são em média 1.45 vezes superiores ao material higroscópico que incorporam. Este estudo permitiu também verificar que o encapsulamento com dióxido de silício reduz o sobrearrefecimento do PCM, e que o VCPCM é o compósito com mais potencial para o armazenamento de energia.

As temperaturas de fusão e solidificação do VCPCM são 26.9°C e 25.2°C, do SCPCM são 26.8°C e 25.2°C e do ZCPCM são 27.1°C e 25.1°C. Mais uma vez estas temperaturas são mais próximas do que as do PCM, 28.3°C e 24.8°C. Contudo, o calor latente do VCPCM 14.1 e 14.4 kJ/kg, do SCPCM 15.4 e 15.9 kJ/kg, e do ZCPCM 12.9 e 25.1 kJ/kg, é, mais uma vez, bastante menor relativamente ao calor

latente do PCM, 146.2 e 148.7 kJ/kg. Tal como na investigação anterior, a explicação para a menor energia libertada e armazenada é a presença dos materiais higroscópicos que não têm mudança de fase.

Após as análises experimentais, pôde concluir-se que os compósitos materiais de mudança de fase podem ser usados no interior das edificações para controlo da temperatura e humidade. O material higroscópico é responsável pela adsorção e desadsorção do vapor de água, enquanto o PCM é responsável pelo controlo da temperatura através da libertação e armazenamento de energia na forma de calor. Devido ao bom comportamento higratérmico dos compósitos, a energia utilizada pelos meios mecânicos, responsáveis pelo controlo do ambiente interior dos edifícios, pode ser reduzida em muitos casos.

3.5.4. PCM MACRO ENCAPSULADO INSERIDO NUMA PAREDE DE BETÃO

Nesta investigação, é estudada a influência da posição de um material de mudança de fase, macro encapsulado, na temperatura interior e humidade relativa de um compartimento modelo feito de betão. Shi et al. (2014), tentam ligar o comportamento térmico do PCM à mudança do ambiente interior e sua consequência na humidade relativa interior. Para tal, foi colocado um PCM macro encapsulado em três posições diferentes da parede, em três compartimentos modelo: colado exteriormente, laminado no interior e colado interiormente (Figura 3.6.).

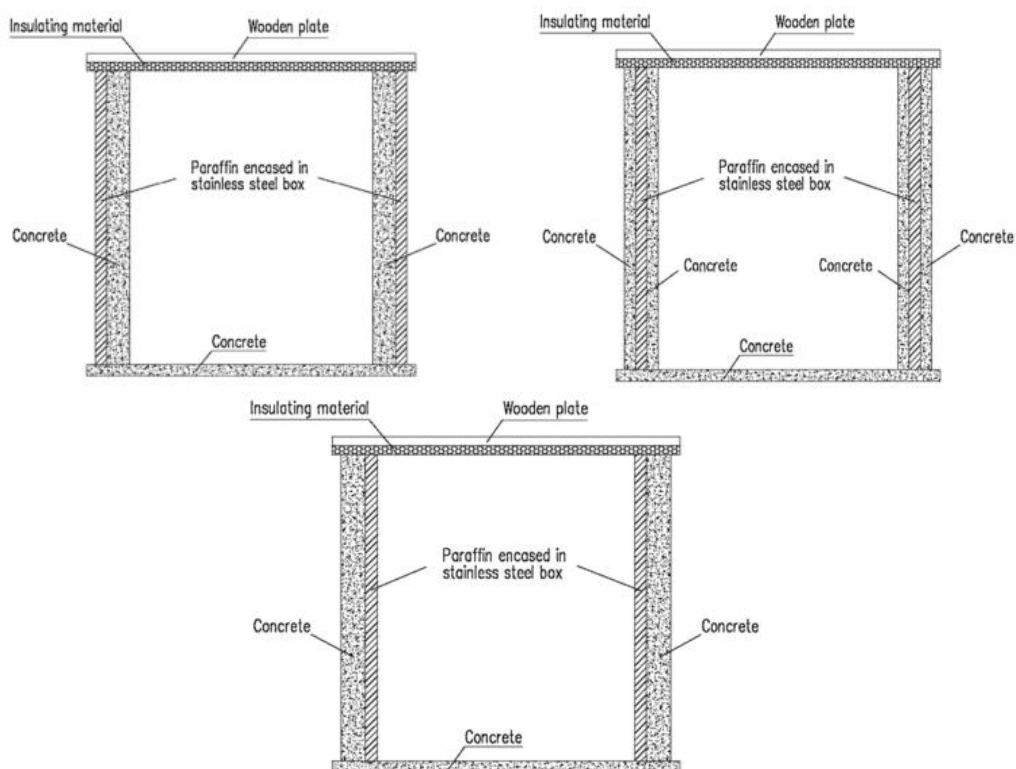


Figura 3.6. – Esquema da Colocação do PCM em Paredes de Betão em Diferentes Posições

Para cada modelo, através de sensores colocados no interior, foi observada a flutuação de temperatura e humidade relativa durante vários dias no mês de Abril, na cidade de Shenzhen, e comparado o comportamento com um modelo de controlo composto apenas por betão. Em todos os compartimentos

é colocada no teto uma placa de madeira, com isolamento térmico pelo interior, e algumas fendas e/ou aberturas isoladas com silicone.

O PCM utilizado neste estudo foi uma parafina, por ter temperaturas de fusão e solidificação na zona de conforto dos edifícios, e devido ao elevado calor latente de fusão. O encapsulamento do PCM é justificado pela eficácia que tem no controlo do derrame do PCM quando este muda de fase, reduzindo os riscos de incêndio, já que estes materiais são altamente inflamáveis, e aumentando as hipóteses de incorporação em elementos construtivos. A preferência do macro encapsulamento, em comparação com o micro encapsulamento foi justificada pelos autores com a necessidade de incorporar o PCM em elementos construtivos sem alterar a funcionalidade do edifício. Sendo que o macro encapsulamento tem reduzida condutividade térmica, foi escolhido um macro encapsulamento metálico inoxidável.

Os resultados experimentais sugerem que os modelos com PCM conseguem ajustar a temperatura e humidade relativa interior, e por isso têm um comportamento melhor que o modelo de controlo. No entanto a sua eficácia depende da posição em que são colocados. O modelo com PCM laminado no interior da parede é aquele que controla melhor a temperatura interior, e que é mais eficaz em reduzir a temperatura máxima, até 4°C. No controlo da humidade relativa interior, o modelo com PCM no interior é o que tem melhor resultado, reduzindo-a até 16% relativamente ao modelo de controlo. Este modelo mostrou especial eficácia na redução da humidade relativa, mesmo quando esta se manteve, durante longos períodos, nos 100%. Este comportamento tem especial importância para edifícios em zonas costeiras, onde há muita humidade nos ambientes interiores que causam degradação dos edifícios.

Destes resultados pode concluir-se que os PCM são termicamente eficientes, e têm influência direta na variação da humidade relativa interior. Daqui é possível verificar a potencialidade dos PCM relativamente ao comportamento higrotérmico dos edifícios, mantendo o papel fundamental no controlo da temperatura interior mas ajudando eficazmente a controlar a humidade relativa. Este potencial tem benefícios a nível da preservação dos edifícios, e também através da redução energética dos meios mecânicos controladores do ambiente interior.

3.5.5. SÍLICA MESO POROSA

Três amostras de Sílica Meso Porosa (MS) foram utilizadas como revestimento interior de ambientes interiores adaptados. O objetivo desta investigação, realizada por Casey et al. (2013), era observar as condições do ambiente interior resultante, e compará-las com as condições do ambiente de espaços revestidos interiormente com materiais comuns da construção de edifícios, como o gesso e a madeira de abeto. Como fatores condicionantes, foi estudada a influência da ventilação, cargas de humidade e área de superfície dos revestimentos.

O estudo foi realizado através de simulações numéricas com o programa WUFI Plus v2.1.1.73, e validado por comparação a resultados experimentais realizados numa câmara climática, que representa um ambiente interno fechado.

Após os testes realizados, simulando diferentes condições de utilização, foi possível concluir que as amostras de MS reduzem passivamente a flutuação da humidade relativa do ambiente interior. Este resultado demonstra o potencial da MS para melhorar o conforto, a qualidade do ar e reduzir energia. Quando as condições do ambiente interior dos resultantes da utilização de amostras de MS são

comparadas com as condições dos materiais tradicionais, verifica-se uma potencial redução a 100% de energia necessária para humedificação/desumidificação.

3.5.6. ARGAMASSA À BASE DE CORTIÇA

Neste estudo, realizado em Portugal por Brás, Gonçalves e Faustino (2014), foi simulado o comportamento de uma argamassa à base de cortiça para minimização de consumo de energia e correção de pontes térmicas num edifício dos anos 80, em Lisboa. Este estudo surge no âmbito da necessidade da redução de perdas energia de edifícios construídos antes da entrada em vigor do RCCTE, e assim melhorar o seu comportamento térmico e reduzir as patologias que surgem devido às condensações.

Para avaliação do comportamento foram utilizados dois tipos de argamassas: de cal hidráulica e de cimento, às quais se foram introduzindo várias quantidades de cortiça, de 10% a 80% do volume total, para poder comparar resultados. O método de Glaser foi a ferramenta prática escolhida para avaliar o comportamento de cada solução e observá-lo graficamente.

A ponte térmica estudada foi uma ligação entre uma parede de alvenaria simples de tijolo, sem isolamento, e uma viga de betão armado, sendo que a argamassa é colocada na face exterior da ponte térmica.

Após a caracterização das várias argamassas e as simulações, foi possível perceber que a presença de cortiça nas argamassas de cal hidráulica leva a uma menor permeabilidade, enquanto nas argamassas de cimento aumenta a permeabilidade ao vapor. Todas as argamassas com cortiça tiveram melhor comportamento na correção da ponte térmica, quando comparadas com uma argamassa de referência, de composição comum. De entre as argamassas com cortiça, aquela que mostrou melhores resultados, evitando significativamente condensações, foi uma argamassa hidráulica com 70% de cortiça.

Deste estudo é possível perceber que alguns materiais usualmente pensados para o conforto térmico dos edifícios, podem ter grande potencial no domínio higrotérmico. Devido à necessidade de melhorar o comportamento dos edifícios, tornando-os mais eficazes energeticamente, gera-se uma procura de novas soluções.

4

MODELO NUMÉRICO

4.1. ENQUADRAMENTO

No sentido de avaliar o comportamento dos edifícios quando expostos às condições dos ambientes onde são construídos, e conjuntamente às condições da sua utilização, têm sido criadas ferramentas numéricas que possibilitam avaliar qualitativamente as soluções implementadas face a estes critérios pré-definidos. O desenvolvimento destas ferramentas só é possível devido ao grande conhecimento físico dos fenómenos que estão associados aos edifícios, e aos materiais que os compõem. Todos os programas utilizados na simulação do comportamento dos edifícios encontram-se no âmbito dos estudos de eficiência energética, sustentabilidade e energias renováveis. A simulação torna-se num método indispensável para garantir que os elementos construtivos, através dos seus materiais, servem de forma eficaz o seu propósito, garantir o conforto, apresentando uma durabilidade e custo proporcionais ao tempo de utilização do edifício. Outra grande vantagem é que permitem realizar um grande número de estudos num curto espaço de tempo, permitindo validar e/ou otimizar novos materiais para diferentes exposições climáticas e diferentes tipos de utilização. A otimização através da simulação gera soluções mais viáveis e com fundamento para serem aplicadas nas construções.

No que diz respeito aos estudos higrotérmicos, os modelos numéricos são utilizados para simular o processo de transporte do calor, da humidade, do ar e da matéria nos elementos construtivos, em modelos de uma ou várias dimensões, e em regime permanente ou variável. São vários os programas que possibilitam este tipo de estudo, e entre eles diferenciam-se a qualidade e disponibilidade de informação relativamente aos parâmetros que influenciam este estudo: os dados climáticos exteriores e interiores e as propriedades físicas dos materiais construtivos. O objetivo é perceber se existe o risco de ocorrência de condensações, internas ou superficiais, nos elementos construtivos devido ao transporte de humidade e calor nos mesmos. O risco será tanto maior, quanto menor for a capacidade de resistência passiva dos materiais a este fenómeno, que depende diretamente das suas propriedades higrotérmicas: Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor (δ); Permeância ao Vapor de Água (Pe); Resistência à Difusão de Vapor de Água (R_D); Fator de Resistência à Difusão de Vapor de Água (μ); Coeficiente de Absorção de Água (A); Espessura da Camada de Ar de Difusão Equivalente (S_d); Teor de Humidade (w); Porosidade; Densidade (ρ).

4.2. PROGRAMAS UTILIZADOS NO ESTUDO DE CONDENSAÇÕES

Para poder definir o modelo numérico a utilizar é necessário conhecer as ferramentas disponíveis e, através do estudo do seu funcionamento, perceber se o seu método permite obter os dados e conclusões que são procurados. Para este estudo foi escolhido o modelo WUFI Pro, no entanto, é adequado fazer referência a outros programas de simulação higrotérmica para que, através das suas diferenças, se perceba as vantagens e desvantagens e se explique, fundamentadamente, a escolha final.

4.2.1. PROGRAMA GLASTA

Esta ferramenta 1D, de regime permanente, pertence à empresa belga Physibel. O programa simula o risco de condensações com base no método de Glaser, ou seja, as condensações surgem onde a pressão de vapor instalada excede a pressão de saturação. Para além disso, consegue ainda simular a secagem da água através de um modelo de distribuição capilar das camadas.

O modelo permite a caracterização de um elemento construtivo definido por várias camadas, onde é necessário definir para cada uma a condutibilidade térmica ou resistência térmica, resistência ao vapor de água, teor de humidade máximo, mínimo e inicial, possibilidade de humidificação e espessura de camada de ar de difusão equivalente. Antes de definir os ambientes interior e exterior, é necessário definir o número de ciclos da simulação e os seus períodos. Em termos das condições climáticas, o ambiente exterior é selecionado de uma base de dados de várias localizações Europeias que caracteriza os climas através de valores médios de temperatura, humidade relativa ou pressão de vapor, e o ambiente interior é definido manualmente.

Em termos de resultados finais, o programa permite realizar três tipos de simulações. O primeiro, de acordo com a norma EN ISO 13788:2002, calcula as pressões de vapor nas interfaces do elemento, a pressão de saturação correspondente e o fluxo de vapor para cada período. A quantidade de água no elemento varia com a quantidade de água condensada e com a secagem da mesma. Outro tipo de simulação é o DIN Glaser, que considera a existência de água nas interfaces onde é condensada a maior quantidade de vapor. O resultado da relação entre condensação e secagem de água está de acordo com a norma DIN 4108. Por último, o método de Glaser “alargado” (*extended*), considera a existência de água não só na interface de maior risco, mas também na própria camada, considerando os movimentos capilares da água devido às condensações e secagem.

Para avaliação das simulações, o programa constrói uma tabela e gráfico de Glaser para cada período de simulação, diagramas de distribuição de água e evolução do teor de água das camadas, e ainda simulações animadas através dos sucessivos gráficos de Glaser. Os gráficos são os outputs em que é possível retirar informação de forma mais rápida pois a sua visualização permite perceber se há possibilidade de condensações observando as curvas de pressão instalada e pressão de saturação, de cada interface.

4.2.2. PROGRAMA CONDENSE 2000

Este programa, desenvolvido na Faculdade de Engenharia do Porto, tem como base de cálculo o método de Glaser. Através do conhecimento das condições climáticas dos ambientes interior e

exterior, é possível quantificar as condensações em cada camada dos elementos construtivos, para uma análise em regime permanente.

Em termos de *inputs*, o programa necessita que seja definido o período de análise, em horas, com um número de intervalos de tempo nesse período, caso seja necessário associar condições climáticas diferentes a cada intervalo de análise. Após a definição das condições do ar exterior e interior, é necessário caracterizar o elemento construtivo. Primeiro define-se o número total de camadas e de seguida faz-se a caracterização de cada camada através do material, da espessura, o número de subcamadas, condutibilidade térmica e permeância ao vapor de água. Por fim, são introduzidas as condições do clima interior e exterior. Para cada intervalo de tempo é preciso conhecer os valores da temperatura interior e exterior, higrometria interior, humidade relativa exterior e duração, em horas, do intervalo de tempo. A caracterização do ambiente exterior é independente do programa, visto que este não possui base de dados.

O resultado da análise realizada pelo programa, o *output*, pode ser observado na forma de uma tabela ou de um gráfico. Em tabela são apresentados, para cada intervalo de tempo, o fluxo térmico, o fluxo condensado em cada elemento, através da diferença de fluxo de vapor de entrada e saída, a percentagem de fluxo que entra e é condensado, a quantidade de vapor condensado ao fim de cada período, e o total acumulado, em gramas. Para uma análise mais intuitiva, e menos analítica, é possível ver também o resultado em forma de gráfico. Através do cálculo das temperaturas, pressão de saturação e pressão instalada de cada camada, é apresentado um gráfico que permite observar a relação entre as curvas de pressão de saturação e pressão instalada, para o intervalo que é desejado observar. O gráfico permite verificar visualmente qual ou quais as interfaces que demonstram risco de condensações, através da intersecção das curvas.

4.2.3. PROGRAMA CONDENSE 13788

Tal como o Glasta e o Condensa 2000, este programa tem na sua base o método de Glaser. O modelo tem como objetivo não só a avaliação do risco de ocorrência de condensações nos elementos construtivos, mas também a sua evaporação, através do método de cálculo da norma EN 13788. Esta ferramenta foi, mais uma vez, desenvolvida com a colaboração da Faculdade de Engenharia do Porto, e permite a análise em regime permanente.

Para poder realizar uma análise com este *software*, primeiro é necessário definir a orientação do elemento, vertical ou horizontal, a camada exterior, isto é, se o elemento está em contacto com ar ou solo, e as condições do ar interior e exterior. Neste programa, as condições climáticas exteriores estão associadas à localização geográfica do elemento, sendo fornecidas através da base de dados do programa quando é escolhida a localização. As condições interiores estão de acordo com a norma EN 13788. Relativamente ao elemento construtivo, definem-se o número de camadas e subcamadas, espessuras, e através de uma base de dados definem-se os materiais e as características intrínsecas a cada um, como condutibilidade térmica e permeabilidade ao vapor de água. Ao longo da caracterização, é possível acompanhar a construção de um esquema desenhado do elemento construtivo.

Tal como no Condensa 2000, é possível obter os resultados em forma de tabela e de gráficos, um gráfico para cada mês do ano. A tabela traduz os resultados da análise, expondo os valores de todos os fatores envolvidos, duração do intervalo de análise (em horas), temperatura interior e exterior, pressão interior e exterior, humidade relativa exterior e variação da quantidade de água. Quando se registam

condensações a tabela fornece o valor do fluxo condensado, para cada mês. O gráfico, para cada mês, é um gráfico do método de Glaser que permite visualmente observar as variações de pressão em cada camada em função da sua resistência a difusão de vapor.

4.2.4. WUFI PRO

O modelo numérico utilizado neste estudo foi o WUFI Pro. Este programa foi desenvolvido pelo “Fraunhofer-Institut für Bauphysik”, na Alemanha, e é uma das ferramentas mais validadas experimentalmente na área da simulação higrotérmica, permitindo avaliar as condições de ocorrência de condensações em elementos construtivos. O WUFI Pro permite realizar uma análise unidimensional em elementos compostos por uma ou várias camadas, com base no conhecimento das funções de difusão de vapor e transporte de líquidos dos materiais, em regime dinâmico. Este programa tem por base um modelo matemático desenvolvido por Kunzel (KUNZEL, 1994) para o transporte simultâneo de calor e humidade em elementos construtivos (Figura 4.1. e 4.2.). Este modelo resulta na resolução de duas equações diferenciais, que representam o transporte de calor (4.1) e humidade (4.2) nos materiais, que são resolvidas pelo modelo numérico (KUNZEL, 1994).

$$\frac{dH}{d\vartheta} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla \vartheta) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\varphi p_{sat})) \quad (4.1.)$$

$$\frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi p_{sat})) \quad (4.2.)$$

Onde:

$dH/d\vartheta$ [J/m ³ K]	- Capacidade de armazenamento de calor do material de construção húmido
$dw/d\varphi$ [kg/m ³]	- Capacidade de armazenamento de humidade do material de construção
λ [W/mK]	- Condutibilidade térmica do material húmido
D_φ [kg/ms]	- Coeficiente de transporte líquido do material de construção
δ_p [kg/msPa]	- Permeabilidade ao vapor de água do material de construção
h_v [J/kg]	- Entalpia de evaporação da água
p_{sat} [Pa]	- Pressão de saturação da água
ϑ [°C]	- Temperatura
φ [-]	- Humidade Relativa



Figura 4.1. – Apresentação do programa WUFI Pro



Figura 4.2. – Parcerias do WUFI Pro

Ao iniciar o programa este abre uma primeira janela para a definição do projeto. Nesta janela podemos atribuir um nome ao projeto e associar-lhe os dados da entidade que requisitou o estudo a realizar. Dentro do mesmo projeto podemos ter vários casos de análise clicando na barra de ferramentas em “Projecto” e de seguida “Novo Caso”, e atribuir-lhes um nome (Figura 4.3.).

Figura 4.3. – Janela de Início do WUFI Pro (WUFI Pro)

Para a realização uma simulação é necessário definir o elemento construtivo, o período de análise, e os ambiente interno e externo. Para definir um elemento é necessário definir a sua geometria, e os seus materiais através da base de dados que o programa possui. O botão “Elemento Construtivo/Posições de Monitorização” permite-nos observar um esquema do elemento, no qual podemos definir o número de camadas que o mesmo irá ter, as respetivas espessuras e atribuir a cada camada, um material. Tal como os materiais, as posições de monitorização são definidas em cada camada do elemento construtivo, para a análise de determinados pontos, como por exemplo zonas fronteira com outros materiais ou pontos médios. Nesta janela também é definida a malha de análise, sendo que a sua definição deverá ser em função do nível de análise, podendo ser personalizada pelo utilizador (Figura 4.4.).

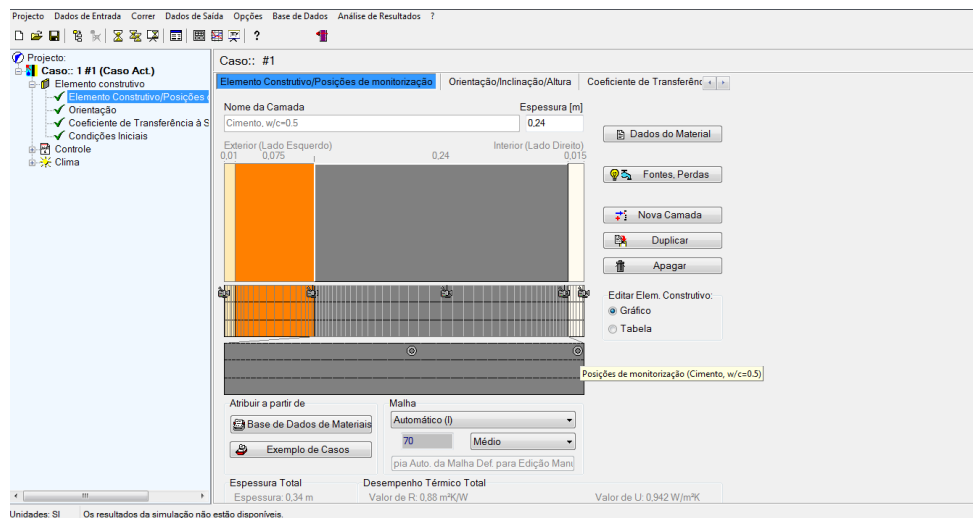


Figura 4.4. – Janela de definição do elemento do WUFI Pro (WUFI Pro)

Para poder seleccionar um material para cada camada, é necessário aceder à base de dados do programa. A base de dados está organizada por fonte, a entidade que cedeu a informação, e cada fonte tem vários catálogos de materiais, agrupando-os por tipos/utilização. Para escolher um material é necessário avaliar a sua caracterização no programa: densidade, porosidade, capacidade calorífica, condutividade térmica e fator de resistência à difusão. Para além destas características, estão disponíveis algumas funções higrotérmicas do mesmo material, como a curva higroscópica, entalpia dependente da temperatura, coeficiente de transferência de água líquida, e condutibilidade dependente da temperatura e da humidade relativa, que ficam disponíveis do lado direito da janela quando seleccionamos um material. As características disponibilizadas na base de dados servem para que os materiais seleccionados no modelo se aproximem o mais possível àqueles que se pretendem simular (Figura 4.5.).

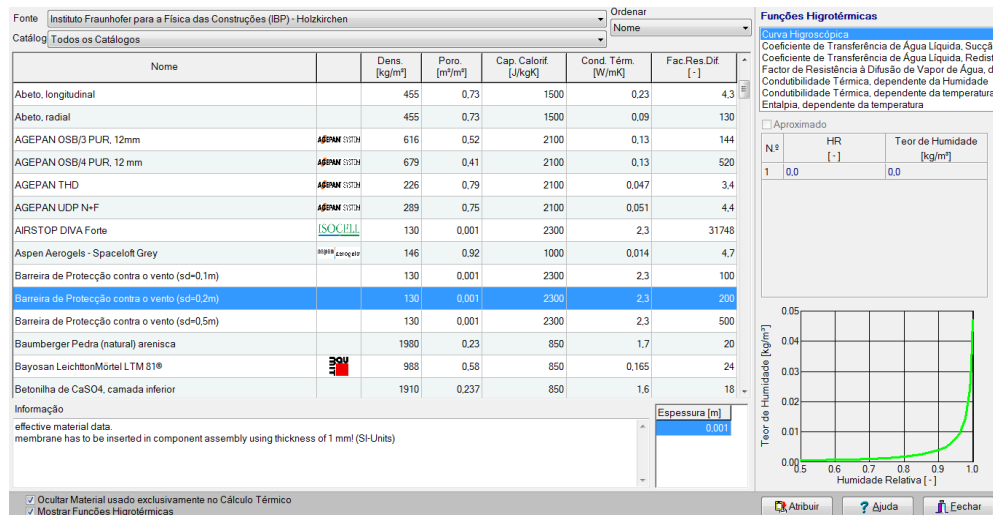


Figura 4.5. – Janela base de dados de materiais do WUFI Pro (WUFI Pro)

Ainda assim, é possível criar novos materiais com base nos existentes, ou simplesmente alterar alguma(s) característica(s). Acedendo à base de dados através da barra de ferramentas, abre-se uma janela semelhante à anterior mas com dois botões que permitem a criação de um novo material e a edição do catálogo. Esta possibilidade é bastante útil quando a base de dados não possui a caracterização de determinado material a utilizar nas simulações e, principalmente, quando se pretende simular novos materiais (Figura 4.6).

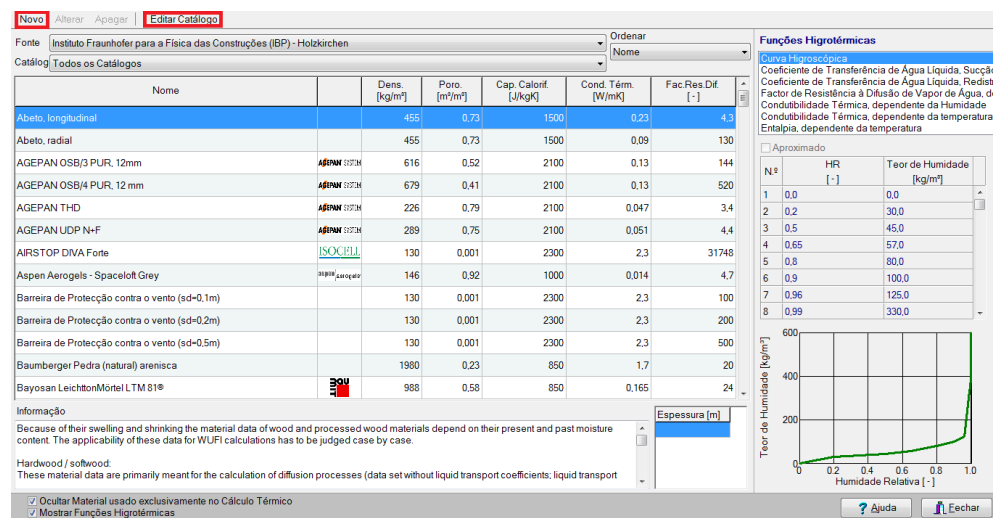


Figura 4.6. – Janela da base de dados de materiais que permite alterações do WUFI Pro (WUFI Pro)

Depois de definido o elemento a analisar, caracterizam-se as condições de exposição do mesmo: orientação geográfica, radiação solar, chuva incidente, humidade relativa e temperatura inicial. Em “Orientação” inclui-se a definição da orientação geográfica, da inclinação do elemento e das características gerais do edifício onde está inserido para definir as condições de chuva incidente (Figura 4.7.).

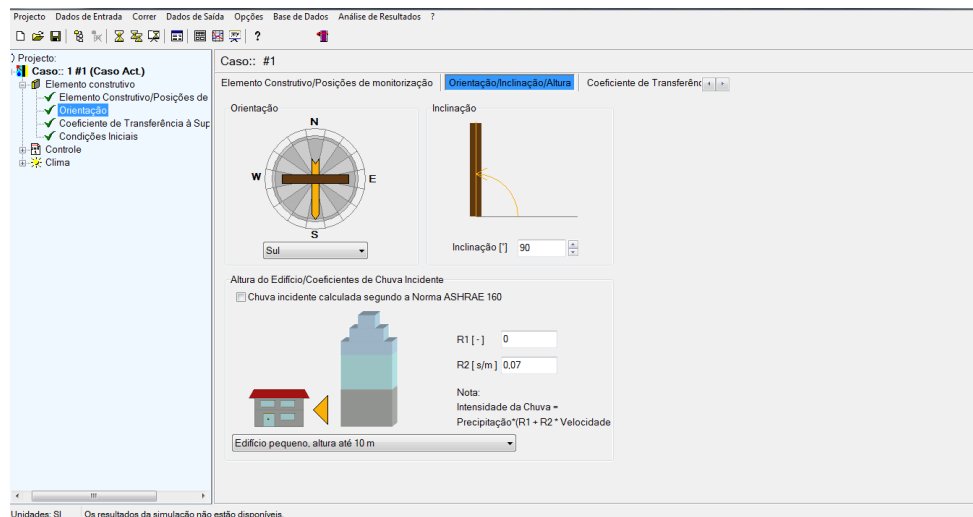


Figura 4.7. – Janela de definição das características do edifício do WUFI Pro (WUFI Pro)

Em “Coeficiente de Transferência à Superfícies” são definidas as características da superfície exterior do elemento em termos de resistência térmica exterior, da absorção e emissividade, e a definição das resistências térmicas do ar exterior e interior. Em “Condições Iniciais” é definida a humidade inicial do elemento construtivo e a sua temperatura inicial. A humidade inicial pode ser constante ao longo do elemento ou variar em cada camada, conforme a humidade característica de cada material definida na base de dados (Figura 4.8. e 4.9.).

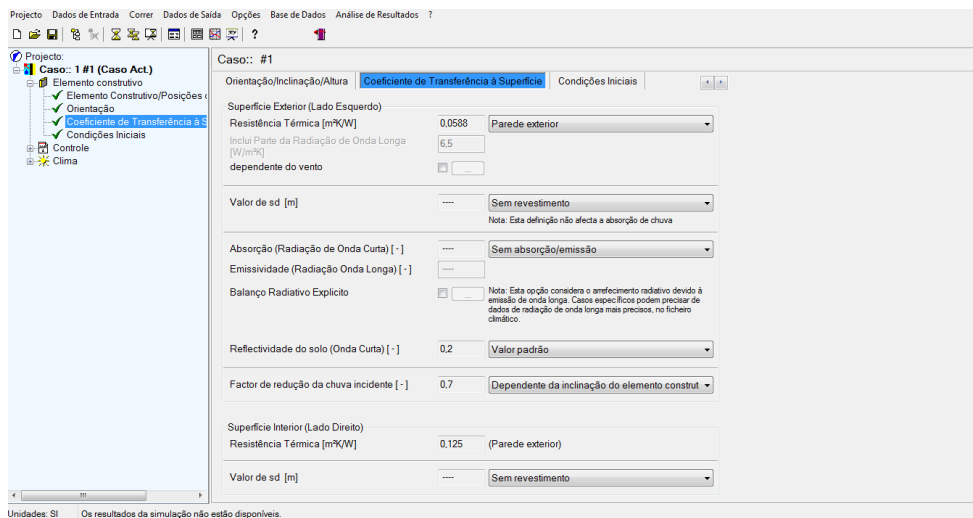


Figura 4.8. – Janela de definição das características da superfície exterior do WUFI Pro (WUFI Pro)

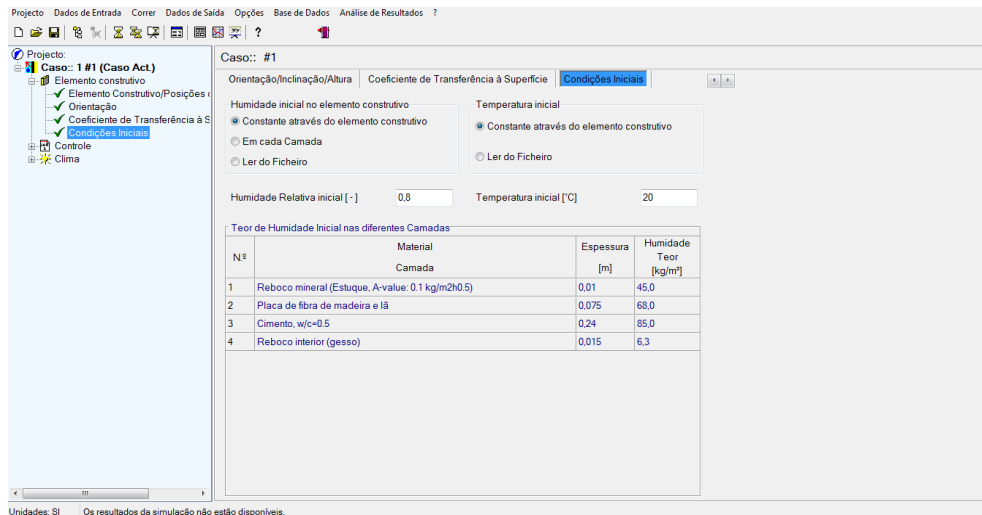


Figura 4.9. – Janela de definição das condições iniciais do WUFI Pro (WUFI Pro)

No separador “Controle” estipula-se ao período de análise. As datas de início e de fim da análise são atribuídas a um perfil, cada uma. Entre a data de início e a data de fim, é possível acrescentar mais perfis, com datas intermédias, para realizar análises em determinados momentos. Para cada perfil, haverá uma análise de resultados finais. De seguida, é necessário definir os intervalos de tempo, em horas, que não pode ser superior à menor diferença das datas entre perfis (Figura 4.10.). Para este trabalho o foi definido um time step de 4 minutos, ou seja 0,00278 horas.

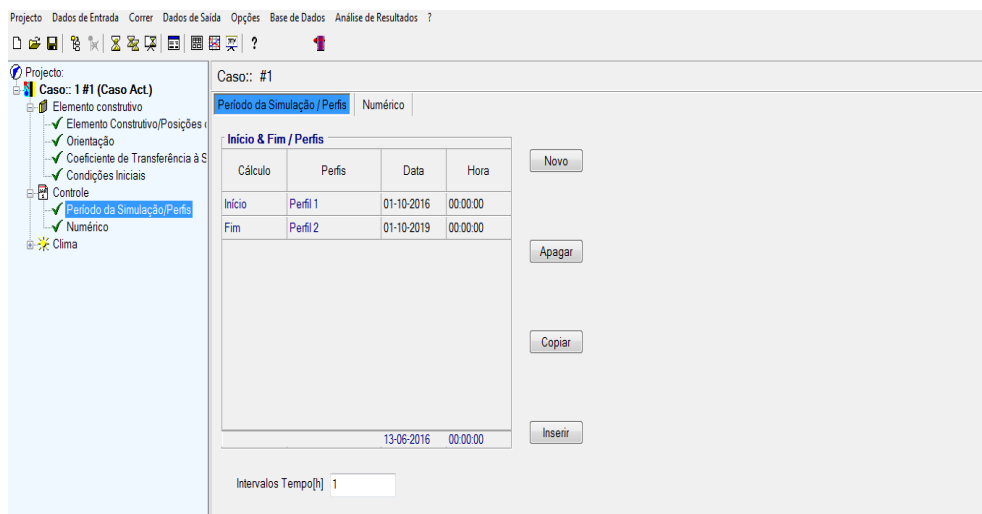


Figura 4.10. – Janela de definição do período de controlo WUFI Pro (WUFI Pro)

Dentro do “Controle” também é possível definir o modo de cálculo, incluindo ou excluindo a transferência de calor e a transferência de humidade e optar se a condutibilidade térmica dos materiais é constante ou depende da humidade e da temperatura. Na mesma janela podemos incluir no cálculo, algumas opções higrotérmicas que aparecem listadas, aumentar a precisão e adaptar a convergência dos parâmetros numéricos, adaptar o período de tempo e definir a geometria da análise (Figura 4.11.). O modo de cálculo utilizado neste trabalho incluiu a transferência de calor e de humidade, fazendo uso

as duas equações diferenciais, assim como a variação da condutibilidade térmica dos materiais com a humidade e temperatura.

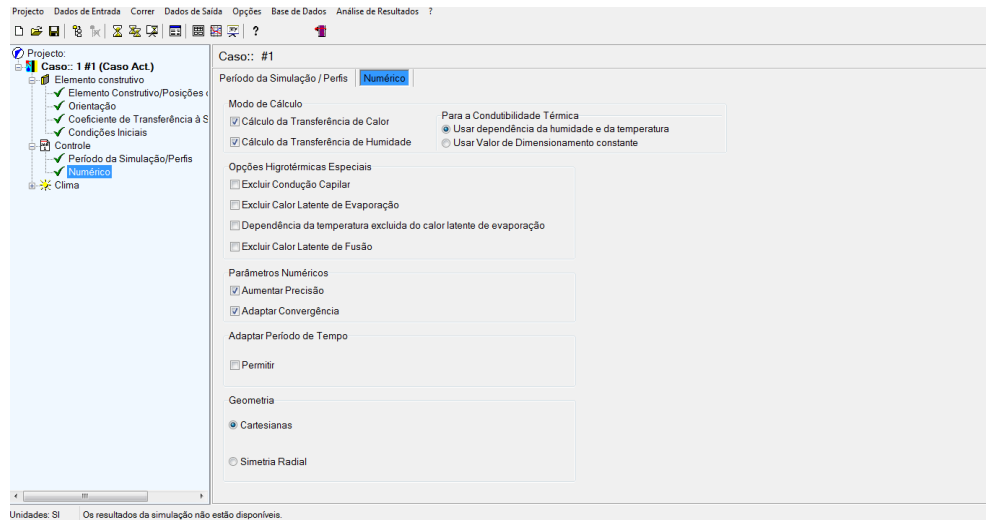


Figura 4.11. – Janela de definição das características do cálculo do WUFI Pro (WUFI Pro)

Por fim, são definidos o clima exterior e interior no separador “Clima”. Quanto ao clima exterior, este pode ser definido pela introdução de ficheiros compatíveis com o programa seleccionando “Mapa Ficheiro”. Ao introduzir um ficheiro, o programa resume o ficheiro através de dois gráficos, onde é possível observar a variação da temperatura e da humidade relativa. O botão “Análise do Clima” permite a análise da radiação solar e da chuva incidente, assim como os valores máximos, médios e mínimos da temperatura e humidade relativa (Figura 4.12. e 4.13.).

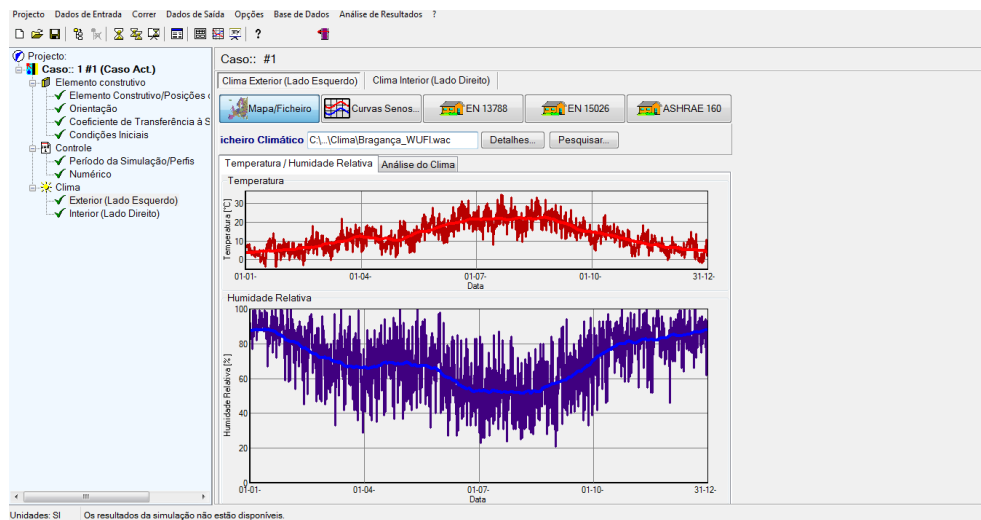


Figura 4.12. – Janela de resumo dos dados climáticos exteriores do WUFI Pro (WUFI Pro)

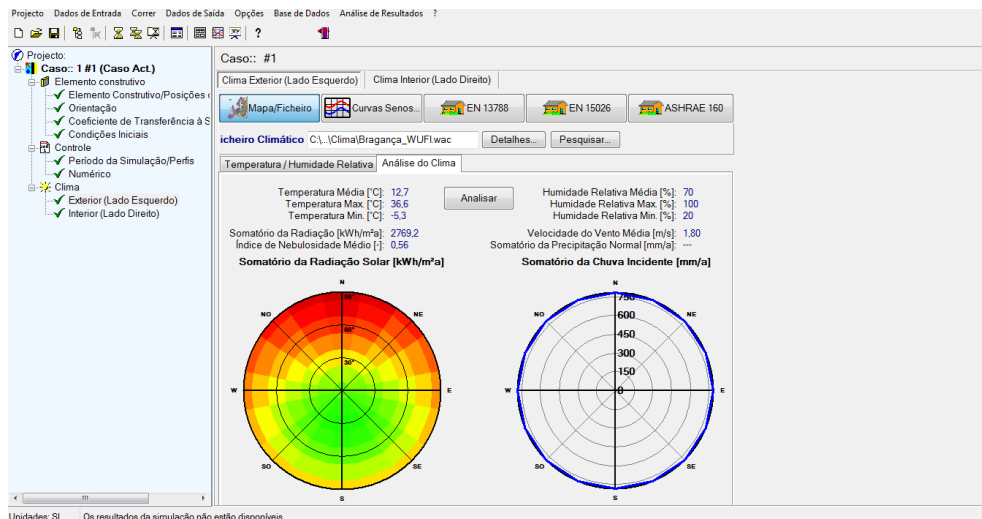


Figura 4.13. – Janela de análise dos dados climáticos exteriores do WUFI Pro (WUFI Pro)

O clima interior por definição de curvas sensoriais pelo utilizador, ou pelas normas que este tem pré-definidas: EN13788, EN15026 e ASHRAE 160. Tanto nas curvas sensoriais como nas normas, é possível alterar e inserir alguns parâmetros. Para utilizar os parâmetros das normas, é necessário um ficheiro de clima exterior. Nas curvas sensoriais o clima pode ser definido conforme o tipo de condição interior, relativamente à produção de vapor, pode ser definido segundo uma condição de clima exterior ou pode ser definido através da introdução dos parâmetros das curvas sensoriais, valores médios e amplitudes, através do utilizador. À medida que são alterados os valores, podemos observar a os gráficos de temperatura e humidade relativa do ambiente interior (Figura 4.14.).

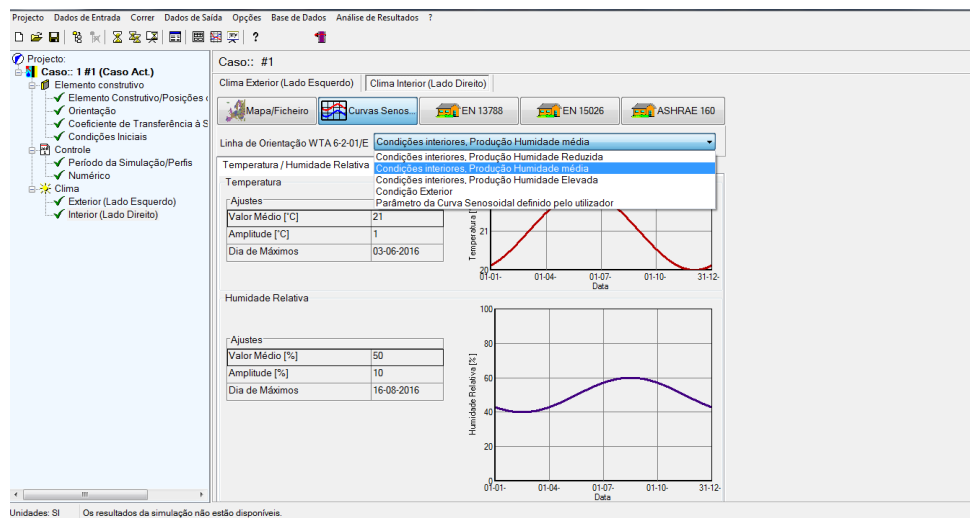


Figura 4.14. – Janela de definição do clima interior com curvas sensoriais do WUFI Pro (WUFI Pro)

Na norma EN13788 é possível definir uma temperatura interior, que é considerada constante. De seguida é definida a classe de humidade, que representa a produção de humidade no ambiente interior. A classe pode ser escolhida pelas opções pré-definidas ou através da criação de uma tabela da produção de humidade em função da temperatura. Ao definir a classe de humidade podemos observar a sua influência no gráfico da humidade relativa (Figura 4.15.).

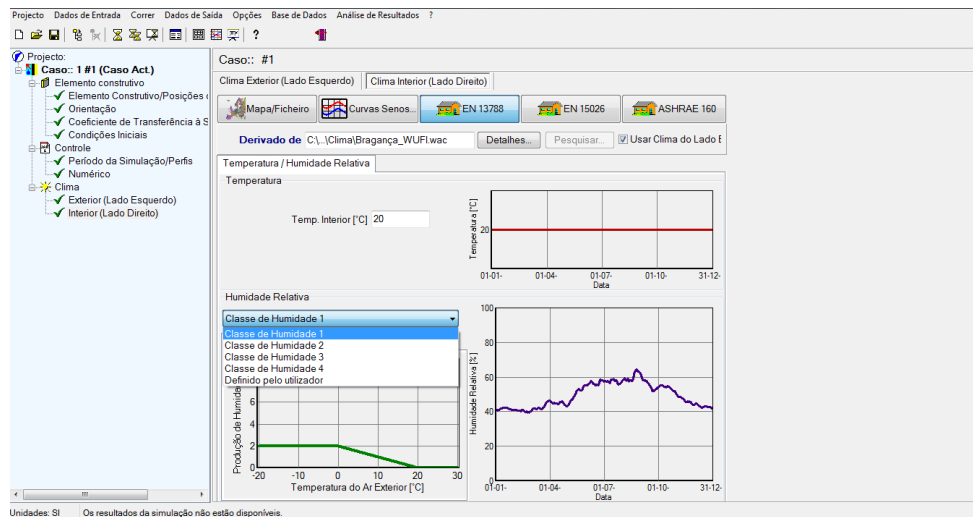


Figura 4.15. – Janela de definição do clima interior segundo a EN13788 do WUFI Pro (WUFI Pro)

Na norma EN15026 apenas é possível caracterizar o nível de produção de humidade do ambiente interior, definindo a variação da humidade relativa. A variação da temperatura interior depende do clima exterior, mas apresenta sempre um mínimo de 20°C e um máximo de 25°C (Figura 4.16.).

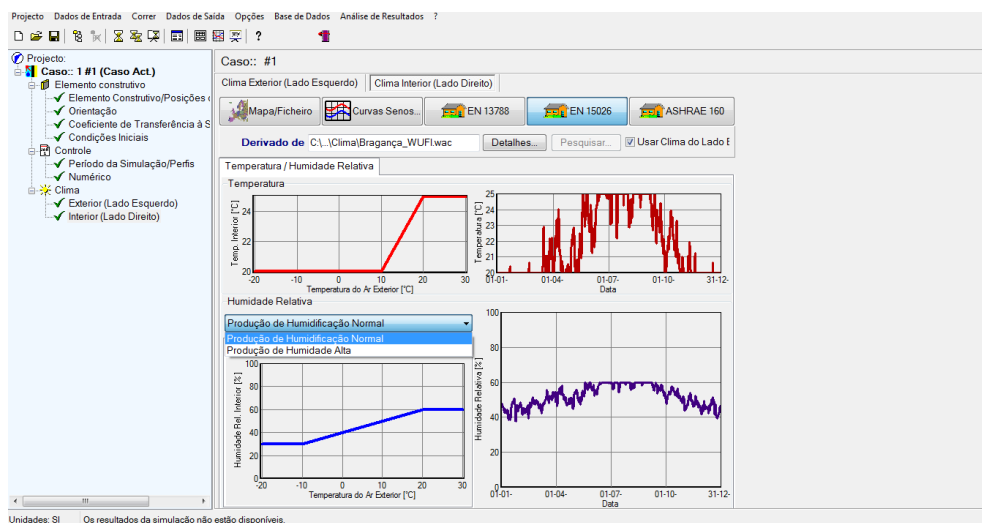


Figura 4.16. – Janela de definição do clima interior segundo a EN15026 do WUFI Pro (WUFI Pro)

Através da norma ASHRAE160 podemos caracterizar a temperatura e humidade relativa interior. Primeiro podemos especificar o tipo de sistema de ar-condicionado, se é apenas para aquecimento, aquecimento e arrefecimento ou ar-condicionado com desumidificação. De seguida podem ser definidos os pontos de ativação dos sistemas e o valor para qual se verifica a flutuação da temperatura interior. Quanto à humidade relativa, esta depende da taxa de produção da humidade e da taxa de renovação horária do ar interior. A taxa de produção de humidade é definida através da especificação do número de quartos do edifício e se tem alguma zona de banhos sem ventilação mecânica, ou inserindo um valor manualmente. A taxa de renovação do ar pode ser definida conforme o tipo de construção, para os quais estão atribuídos valores padrão de renovação horária e volume do edifício,

ou inserindo os valores dos mesmos parâmetros manualmente. A definição de todos os parâmetros associados à humidade relativa define implicitamente a higrometria do edifício (Figura 4.17.).



Figura 4.17. – Janela de definição do clima interior segundo a ASHRAE 160 do WUFI Pro (WUFI Pro)

Relativamente aos dados de saída, o WUFI Pro apresenta gráficos instantâneos, após a simulação, de variação da humidade no elemento e em cada camada, variação da temperatura e humidade relativa em cada ponto de monitorização assim como um gráfico de isopletas (Figura 4.18.).

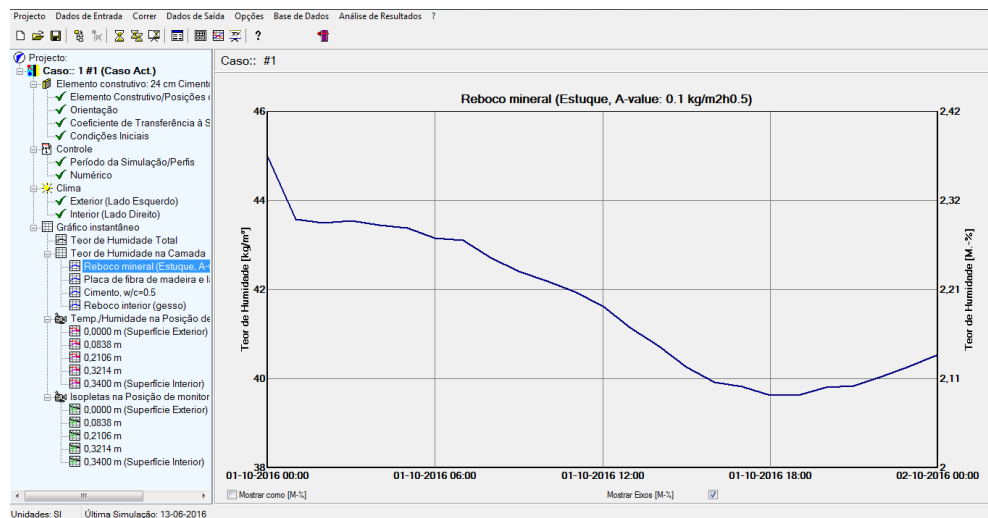


Figura 4.18. – Janela do gráfico instantâneo do teor de humidade numa camada do WUFI Pro (WUFI Pro)

Através do botão “Gráficos de Resultados” o programa permite obter a variação de humidade, temperatura e humidade relativa, humidade total na construção, fluxos de calor e humidade, precipitação e radiação ao longo de todo o período de análise e a variação dos mesmos parâmetros nos perfis especificados no período de análise, ao longo da espessura do elemento (Figura 4.19.).

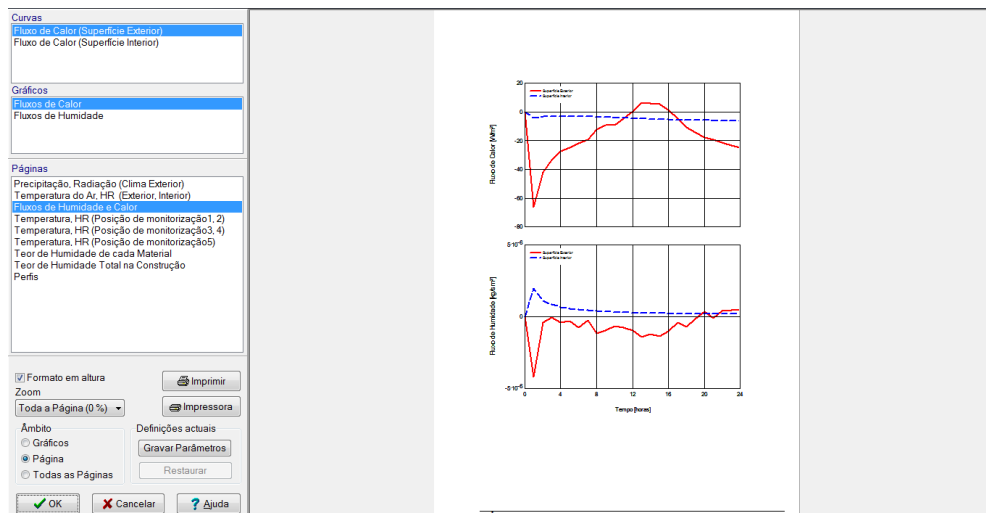


Figura 4.19. – Janela dos resultados gráficos dos fluxos de humidade e calor no elemento WUFI Pro (WUFI Pro)

O WUFI Pro também permite a observação da simulação através de uma animação 1D, em que se pode observar a variação da temperatura, teor de humidade e humidade relativa ao longo do elemento construtivo, assim como a variação da precipitação e radiação incidentes no elemento ao longo do período de análise (Figura 4.20.).

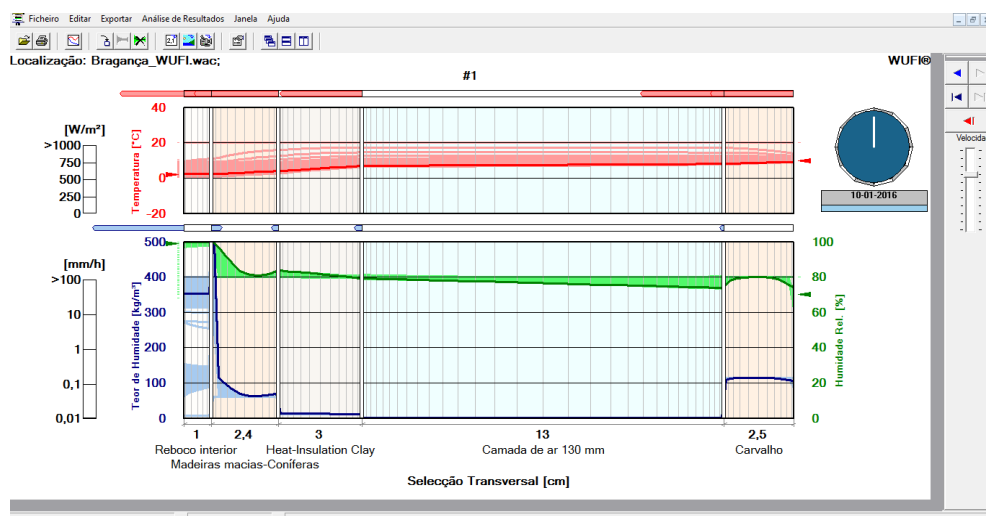


Figura 4.20. – Janela da simulação animada do WUFI Pro (WUFI Pro)

Uma das grandes vantagens, que levou à utilização deste programa, é que permite obter um gráfico que revela a flutuação da temperatura, num ponto pré-definido, conjuntamente com a variação da temperatura de ponto de orvalho desse mesmo ponto. Assim é possível visualizar em que momento a temperatura de determinado ponto de uma camada, ou uma superfície de camada, tem um valor igual ao da temperatura de ponto de orvalho, e perceber se existe algum risco de ocorrência de condensações nesse ponto.

5

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se os dados introduzidos no modelo numérico e os resultados gráficos das simulações. Relativamente aos dados introduzidos, são aqui apresentadas as características dos materiais, as condições do clima exterior, e as condições do ambiente interior definido nas simulações. Os dados aqui apresentados vêm no seguimento do enquadramento do trabalho, ou seja, aqui apresentam-se elementos construtivos e materiais típicos de edifícios de habitação antigos, que hoje em dia são alvo de reabilitação, como alvenarias de pedra, alvenarias de tijolo e elementos estruturais de betão sem isolamento, com rebocos tradicionais. Primeiro são simulados os elementos na sua forma tradicional e analisado o seu comportamento face a ocorrência de condensações. De seguida são substituídos os recobrimentos interiores tradicionais por várias argamassas incorporadas com PCM, com diferentes pontos de fusão, e analisados os resultados.

Quanto aos resultados gráficos, serão aqui apresentados os gráficos de variação de temperatura superficial interior e correspondente variação de temperatura de ponto de orvalho, assim como variação da humidade relativa na superfície interior de cada elemento. Estes gráficos permitem observar a ocorrência de condensações na superfície interior dos elementos quando a temperatura superficial interior coincidir com a temperatura de ponto de orvalho. O gráfico da humidade relativa permite confirmar a existência de condensações, sendo que estas ocorrem para valores da humidade de 100%. Com a apresentação destes gráficos espera observar-se a influência das argamassas com PCM na temperatura superficial do elemento, devido ao armazenamento latente de calor, e perceber se podem ter uma ação direta na prevenção da ocorrência de condensações, afastando a temperatura superficial da temperatura de ponto de orvalho.

5.2. CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO

5.2.1. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS EXTERIORES

Para o estudo de ocorrência de condensações superficiais no interior das habitações é necessário ter em conta o ambiente onde está inserido o edifício. A severidade deste ambiente, temperaturas mínimas e duração de períodos com temperaturas baixas, define as soluções construtivas mais adequadas, daí a

tipificação da construção em vários locais. Para este estudo tem interesse utilizar dados climáticos de locais que potenciem a ocorrência de condensações, as temperaturas devem atingir valores muito baixos na estação de Inverno para que se criem grandes diferenças de temperatura entre o ambiente exterior e o ambiente interior. Assim será possível provocar fluxos de ar do interior para o exterior, potenciando o aparecimento de superfícies frias, ou seja, com uma pressão de saturação inferior a pressão vapor interior.

Para este efeito foram utilizados dados climáticos de duas cidades do norte de Portugal, Bragança e Porto. Apesar de serem duas cidades do norte, apresentam climas bastante diferentes ao longo do ano. A cidade do Porto caracteriza-se por um clima mais ameno devido à sua localização costeira. Relativamente aos registos horários utilizados neste estudo, entre Janeiro de 2005 e Janeiro de 2006, a temperatura mínima registada foi de 2.5°C em Fevereiro de 2005 e a máxima de 33.3°C em Agosto de 2005, sendo que a média anual é de 15.1°C. A semana com média de temperaturas mais baixas foi de dia 10 de Janeiro a dia 17 de Janeiro de 2005, com médias de temperatura de 8.0°C e 78% de humidade relativa. A proximidade ao mar faz com que o clima do Porto, em geral, não atinga valores muito altos no Verão nem muito baixos no Inverno devido a elevada humidade relativa. Nos dados utilizados foram registadas várias vezes ao longo do ano valores de 100% de humidade relativa do ar, sendo que a média foi de 78%. Relativamente a outras cidades do sul do país o Porto tem um clima mais frio, mas quando comparado com cidades do norte apresenta um clima mais ameno (Figura 5.1.). A cidade de Bragança caracteriza-se por um clima mais seco devido à sua localização geográfica mais interior, mais afastada da costa. Relativamente aos registos horários utilizados neste estudo, entre Janeiro de 2005 e Janeiro de 2006, a temperatura mínima registada foi de -5.3°C em Janeiro de 2005 e a máxima de 36.6°C em Agosto de 2005, sendo que a média anual foi de 12.7°C. A semana com média de temperatura mais baixa foi de dia 8 de Janeiro a dia 16 de Janeiro de 2005, com médias de temperatura de 1.0°C e 95% de humidade relativa. Em termos de humidade relativa, também se registaram valores de 100% em alguns dias, sendo que a média do ano foi de 70% (Figura 5.2.). A cidade de Bragança apresenta um clima mais severo quando comparada ao Porto, assim é possível comparar os resultados das simulações para dois climas distintos, podendo avaliar as soluções em situações distintas.

Visto que se pretende provocar situações propícias à ocorrência de condensações, dentro de um período limitado que permita melhor controlo, serão utilizadas nas simulações as semanas com médias de temperaturas mais baixas das duas cidades, referidas anteriormente.

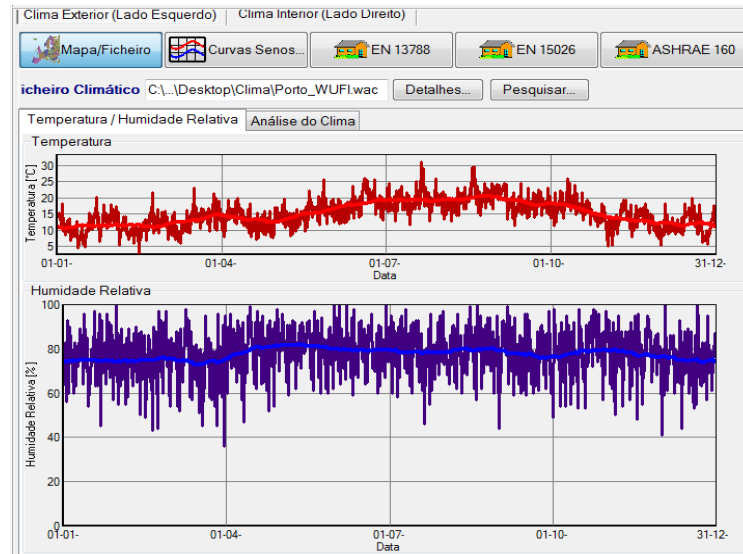


Figura 5.1. – Clima Porto

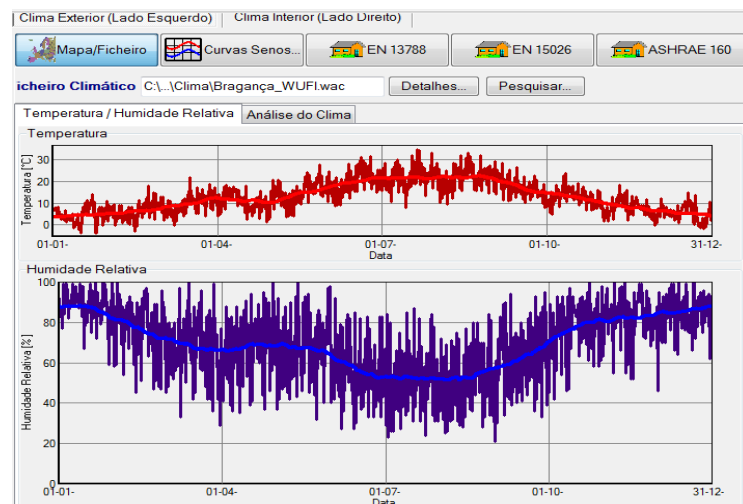


Figura 5.2. – Clima Bragança

5.2.2. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS INTERIORES

Para todas as simulações realizadas foi definido também um clima interior que simulasse um tipo de ocupação das habitações que provocam maior ocorrência de condensações. Em primeiro lugar foi estipulado que a habitação teria uma higrometria forte:

$$5.0 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3 < \frac{W}{n \cdot V} \leq 7.5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3 \quad (5.1.)$$

A higrometria forte pretende simular uma situação de ocupação da habitação com forte produção de vapor de água. Este tipo de situações ocorre, por exemplo, durante a noite, quando os habitantes estão a dormir e nos quartos se verifica maior produção de vapor ou também durante a manhã quando os

habitantes utilizam águas quentes nas casas de banho e produzem maior vapor de água nesses compartimentos.

De forma a simular o ambiente interno pretendido, foram utilizadas as curvas sensoriais do programa WUFI Pro que permitem definir as curvas de variação de temperatura e humidade relativa interior ao longo de um ano. Foi estabelecido um clima interior com uma temperatura média anual de 20°C, com amplitude de 2°C, e uma média anual de 80% de humidade relativa, com amplitude de 5%. Para o período das simulações, em ambos os climas exteriores, a temperatura interior ronda os 18°C e a humidade relativa 78% (Figura 5.3.).

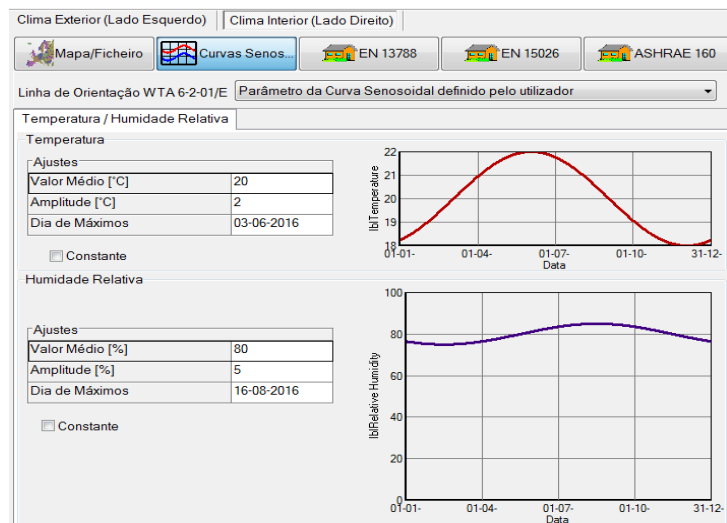


Figura 5.3. – Características do Clima Interior a Simular

5.2.3. ENVOLVENTE

Como foi referido anteriormente, o âmbito deste estudo é simular o comportamento de uma argamassa com PCM, colocada na superfície interior de elementos construtivos onde o aparecimento de condensações interiores é comum. Quando se fala em elementos construtivos que tipicamente estão associados ao aparecimento de condensações internas, normalmente referem-se elementos que não têm isolamento térmico, quer por motivos das técnicas de construção da época em que foram construídos, o caso de edifícios mais antigos, quer por falhas no projeto e/ou na construção, o caso de edifícios mais atuais. Para além da principal função pretendida desta solução, esta pode também apresentar uma grande vantagem ao nível da preservação da fachada visto que se aplica na face interior, e por ser aplicada como um reboco não reduz as áreas interiores. Posto isto, esta solução poderá ser ideal para aplicações em reabilitações e em pontes térmicas, logo os elementos a definir nas simulações devem ser elementos característicos dessas situações.

Para as situações de reabilitação definiram-se dois tipos de elementos, alvenaria de pedra e alvenaria de tijolo furado. Estas alvenarias são bastante comuns em edifícios que são alvo de reabilitação e normalmente são elementos simples apenas rebocadas pelo interior e pelo exterior. Caracterizam duas épocas diferentes da construção mas têm em comum o facto de não serem isoladas. Para a realização das simulações com as alvenarias de pedra definiram-se três alvenarias com espessura de pedra diferente: 40 cm, 30 cm e 20 cm. Normalmente as alvenarias de pedra têm uma espessura bastante significativa, principalmente na base, devido à sua natureza estrutural, sendo representadas pelo elemento de 40 cm. As outras duas espessuras, 30 cm e 20 cm, pretendem representar elementos da

mesma alvenaria mas que são colocados a alturas superiores onde por vezes a alvenaria varia a sua espessura, e casos de alvenarias de pedra menos espessas. Quanto às alvenarias de tijolo furado foram utilizadas três espessuras comuns de tijolos furados: 11 cm, 15 cm e 20 cm. Estas alvenarias já não têm a função estrutural, logo não necessitavam de ser tão espessas, apenas separavam o ambiente interior do exterior. Normalmente a grande espessura da pedra evita o aparecimento de problemas devido à grande inércia térmica e higrotérmica, no entanto a redução da espessura pode potenciar algumas patologias.

Para representar as pontes térmicas foi definido um elemento em betão com 20 cm de espessura, igualmente rebocado nas duas faces. Este elemento caracteriza as zonas estruturais nas fachadas, como as vigas e os pilares, e que não estão isoladas. Estas zonas normalmente são propícias ao aparecimento de várias patologias nas construções, incluindo as condensações superficiais, quer devido à heterogeneidade que existe entre o elemento estrutural e a alvenaria onde está inserido, quer pela própria característica do betão que tem uma condutividade térmica elevada.

De forma a resumir os elementos acima descritos e para facilitar a sua nomenclatura, apresenta-se uma tabela com a descrição de cada elemento e a sua designação (Tabela 5.1.).

Tabela 5.1. – Designação dos elementos simulados

Designação	Descrição do elemento	Espessura do material (cm)	Espessura dos Recobrimentos (cm) (exterior + interior)
AP 40	Alvenaria de Pedra	40	3+3
AP 30	Alvenaria de Pedra	30	3+3
AP 20	Alvenaria de Pedra	20	3+4
PB 20	Parede de Betão	20	3+4
AT 11	Alvenaria de Tijolo Furado	11	3+3
AT 15	Alvenaria de Tijolo Furado	15	2+2
AT 20	Alvenaria de Tijolo Furado	20	2+2

5.2.4. MATERIAIS E CARACTERÍSTICAS

Após definidas as envolventes a estudar, foi necessário escolher na base de dados de materiais do WUFI Pro os materiais com as características dos materiais a usar ou materiais semelhantes. Através do ITE 50 “ Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios” do

LNEC, versão de 2006 e da Nota de informação Técnica - NIT 002- LFC 2000 “ Permeabilidade ao Vapor de Materiais de Construção - Condensações Internas”, foi possível comparar algumas características dos materiais existentes na base de dados do programa, para que se aproximassem o máximo possível das características estudadas por estes documentos. Assim utilizaram-se alguns materiais da base de dados e modificaram-se alguns para se aproximarem mais dos valores conhecidos. Aqui apresentam-se os quadros com as características, dos materiais utilizados nas simulações, consideradas mais importantes e os valores de referência de algumas delas, dos documentos consultados.

Na tabela seguinte apresentam-se as características principais do material utilizado no programa para simular a pedra de granito, e algumas das características deste material no ITE 50 e na NIT 002 (Tabela 5.2.).

Tabela 5.2. – Características do Material Pedra

Pedra 20 cm Pedra 30 cm Pedra 40 cm	WUFI Pro “Granite”	ITE 50 “Granito”	NIT 002 “Rocha metamórfica (granito,..)”
Densidade (kg/m^3)	2453,0	2500 - 2700	2800
Condutibilidade Térmica ($W/m. ^\circ C$)	1,66	2,8	
Fator de Resistência à Difusão de Vapor de Água (-)	54,0	-	300
Porosidade (m^3/m^3)	0,095	-	-
Calor específico, Seco ($J/kg. ^\circ C$)	702,0	-	-
Teor de Humidade de Referência (kg/m^3)	7,3	-	-

Na tabela seguinte apresentam-se as características principais do material utilizado no programa para simular o tijolo cerâmico furado, e algumas das características deste material no ITE 50 e na NIT 002 (Tabela 5.3.).

Tabela 5.3. – Características do Material Tijolo

Tijolo Furado 11 cm Tijolo Furado 15 cm Tijolo Furado 20 cm	WUFI Pro “Tijolo Furado”	ITE 50 “Tijolos cerâmicos – furado”			NIT 002 “Tijolo sílico- calcário”
		11 cm	15 cm	20 cm	
Densidade (kg/m^3)	630,0	-			1500 - 1700
Condutibilidade Térmica ($W/m. ^\circ C$)	0,38	-			
Resistência Térmica ($(m^2. ^\circ C)/W$)	-	0,27	0,39	0,52	

Fator de Resistência à Difusão de Vapor de Água (-)	4,0	-	9 - 27
Porosidade (m^3/m^3)	0,67	-	-
Calor específico, Seco ($J/kg. ^\circ C$)	850,0	-	-
Teor de Humidade de Referência (kg/m^3)	28,0	-	-

Na tabela seguinte apresentam-se as características principais do material utilizado no programa para simular o betão, e algumas das características deste material no ITE 50 e na NIT 002 (Tabela 5.4.).

Tabela 5.4. – Características do Material Betão

Betão	WUFI Pro “Betão C35/45”	ITE 50 “Betão Normal”	NIT 002 “Betão Normal”
Densidade (kg/m^3)	2300,0	2300 - 2600	-
Condutibilidade Térmica ($W/m. ^\circ C$)	2,0	2,0	-
Fator de Resistência à Difusão de Vapor de Água (-)	248,0	-	15 - 260
Porosidade (m^3/m^3)	0,18	-	-
Calor específico, Seco ($J/kg. ^\circ C$)	850,0	-	-
Teor de Humidade de Referência (kg/m^3)	-	-	-

Na tabela seguinte apresentam-se as características principais do material utilizado no programa para simular as argamassas tradicionais de recobrimento, e algumas das características deste material no ITE 50 e na NIT 002 (Tabela 5.5.).

Tabela 5.5. – Características do Material Argamassa “Tradicional”

Argamassas “Tradicionais”	WUFI Pro “Gesso de Cimento”	WUFI Pro “Reboco Mineral”	ITE 50 “Argamassas e Rebocos Tradicionais”	NIT 002 “Argamassa à base de Cimento”
Densidade (kg/m^3)	2000,0	1900,0	1800- 2000	1900 - 2100
Condutibilidade Térmica ($W/m. ^\circ C$)	1,2	0,8	1,3	-
Fator de Resistência à Difusão de Vapor de Água (-)	25,0	25,0	-	15 - 41

Porosidade (m^3/m^3)	0,3	0,24	-	-
Calor específico, Seco ($J/kg \cdot ^\circ C$)	850,0	850,0	-	-
Teor de Umidade de Referência (kg/m^3)	35,0	45,0	-	-

Na tabela seguinte apresentam-se as características principais do material utilizado no programa para simular as argamassas com 30% de PCM, com diferentes temperaturas de fusão (Tabela 5.6.).

Tabela 5.6. – Características do Material Argamassa com 30% de PCM

Argamassas com 30% PCM	WUFI Pro “Argamassa 30% PCM – 11 Graus”	WUFI Pro “Argamassa 30% PCM – 12 Graus”	WUFI Pro “Argamassa 30% PCM – 13 Graus”	WUFI Pro “Argamassa 30% PCM – 14 Graus”
Densidade (kg/m^3)	1400	1400	1400	1400
Condutibilidade Térmica ($W/m \cdot ^\circ C$)	0,6	0,6	0,6	0,6
Fator de Resistência à Difusão de Vapor de Água (-)	25,0	25,0	25,0	25,0
Porosidade (m^3/m^3)	0,3	0,3	0,3	0,3
Calor específico, Seco ($J/kg \cdot ^\circ C$)	1000	1000	1000	1000
Teor de Umidade de Referência (kg/m^3)	35,0	35,0	35,0	35,0
Temperatura de Fusão ($^\circ C$)	11,0	12,0	13,0	14,0
Entalpia (kJ/kg)	30,0	30,0	30,0	30,0

Relativamente ao último quadro, estão caracterizadas as argamassas com PCM. Estes materiais foram definidos no WUFI Pro com base num estudo previamente realizado por Sá (2012). Este estudo caracteriza uma argamassa com PCM em laboratório, assim foi possível ter por base alguns valores necessários para este estudo, sendo que foram adaptados para a percentagem de PCM contida nas argamassas, neste caso de 30%.

5.3. SIMULAÇÕES COM DADOS CLIMÁTICOS DA CIDADE DE BRAGANÇA

Aqui apresentam-se as simulações das Alvenarias de Pedra de 40 cm, 30 cm, e 20cm, da Ponte Térmica de Betão e das Alvenarias de Tijolo de 11 cm, 15cm e 20cm. As simulações foram realizadas de acordo com as condições climáticas exteriores e interiores definidas em 5.2.1 e 5.2.2.

5.3.1. ALVENARIA DE PEDRA – 40 CM

5.3.1.1. AP40 com Reboco Tradicional

O elemento aqui simulado foi uma alvenaria de pedra com 40 cm de espessura, rebocado pelo exterior e interior com 3 cm com uma argamassa tradicional “Gesso de Cimento”.

Relativamente às condensações, esta simulação permite observar que em nenhum momento a Temperatura Superficial Interior (TSI), a vermelho, atinge a Temperatura de Ponto de Orvalho (TPO), a violeta, ou seja, aparentemente não ocorrem condensações. A face interior deste elemento atinge uma temperatura mínima de cerca de 13.5°C no dia 16, e máxima de cerca de 16.5°C no dia 8. Entre o dia 13 e o dia 17 decorre o período em que a TSI está mais perto da TPO com diferenças significativamente pequenas, inferiores a 0,5°C (Figura 5.4). Esta pequena diferença entre a TSI e TPO é suficiente para assumir que existe um risco considerável de ocorrência de condensações, e a variação da humidade relativa (HR) suporta esta ideia já que se verificam valores superiores a 95%. O pico da HR, cerca de 98%, coincide com o momento de menor temperatura (Figura 5.5).

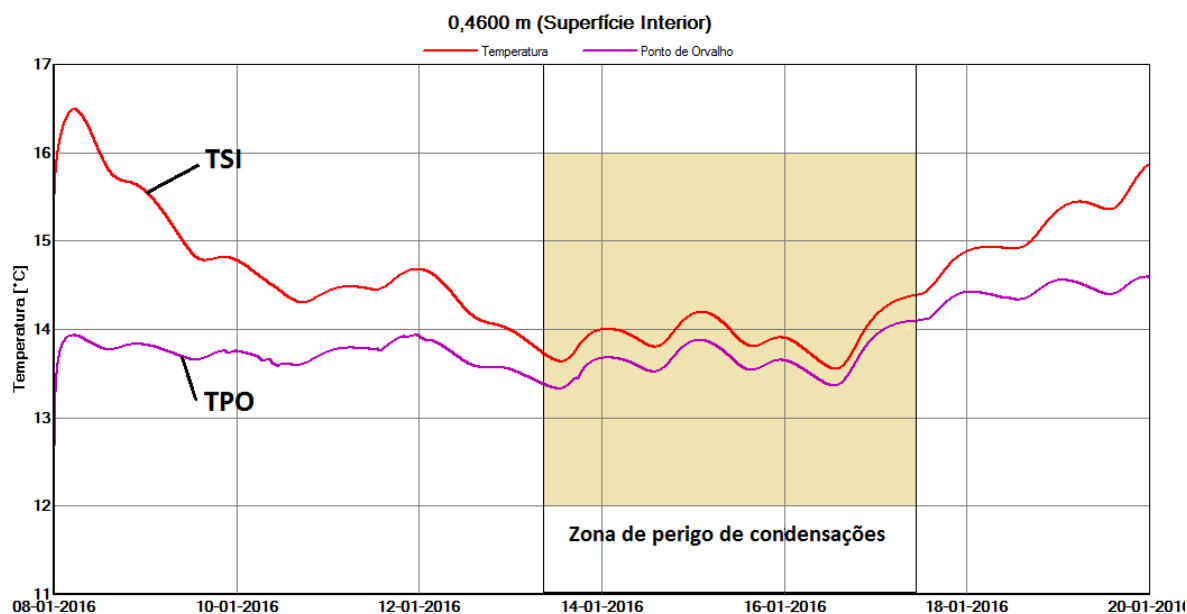


Figura 5.4. – Flutuação da TSI e TPO da AP40 com Reboco Tradicional

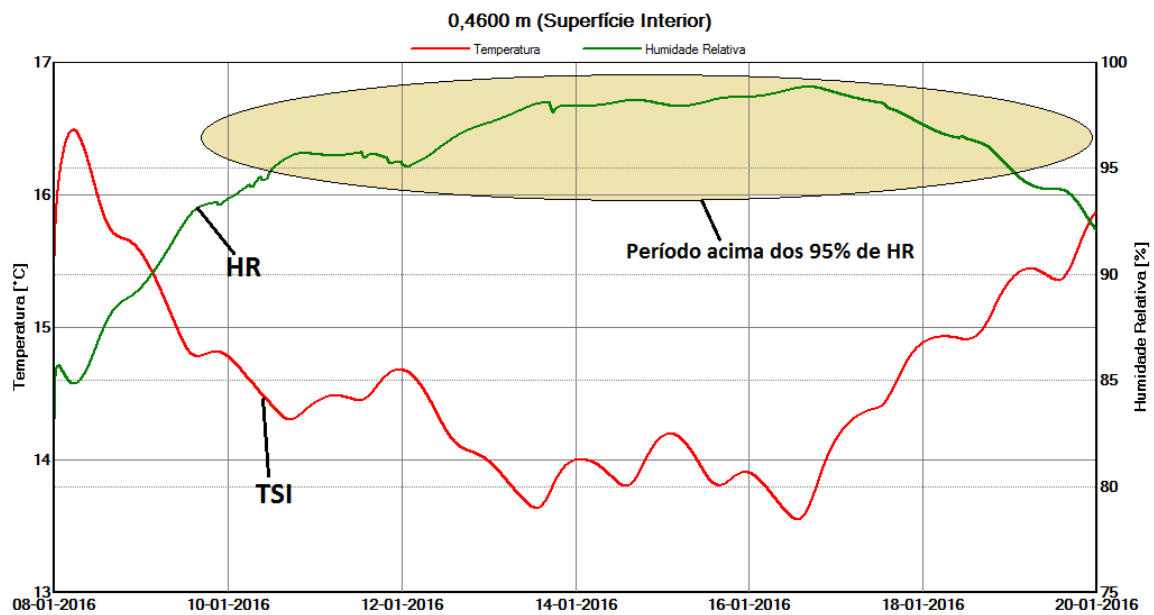


Figura 5.5. – Flutuação da HR e TSI da AP40 com Reboco Tradicional

Visto que a TPO da alvenaria, durante o período mais crítico da análise, se situa entre os 14°C e os 13°C, foi substituída a argamassa do reboco interior por uma argamassa com PCM com uma temperatura de fusão de 14°C.

5.3.1.2. AP40 com PCM de 14°C

Estudou-se, para o mesmo cenário, a substituição da argamassa tradicional colocada na face interior da alvenaria de pedra, por uma argamassa com PCM com uma temperatura de fusão de 14 °C.

Relativamente à situação original, o gráfico da TSI e da TPO demonstram que esta nova argamassa piora o comportamento do elemento face às condensações na superfície interior. Neste novo caso, a proximidade entre a TSI e a TPO sugere a ocorrência de condensações. Esta grande proximidade, que decorre entre o dia 13 e o dia 17, atinge um máximo no dia 16. É nesse dia em que se verifica a temperatura mais baixa da superfície, 13.5°C. Mais uma vez estas diferenças são muito pequenas, atingindo valores inferiores a 0.1°C (Figura 5.6.).

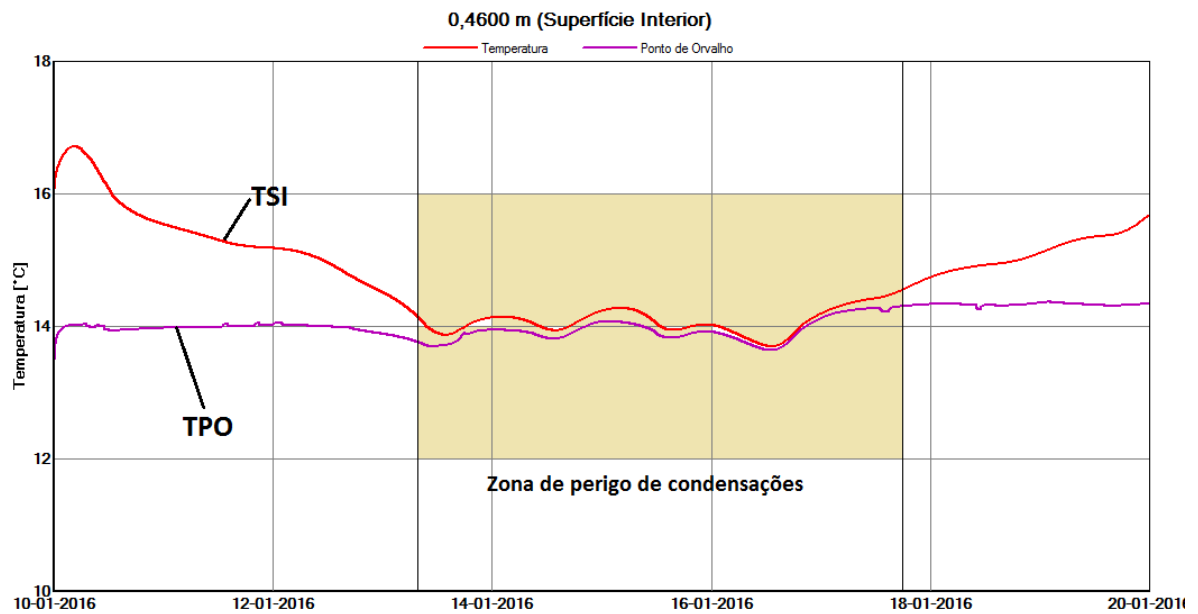


Figura 5.6. – Flutuação da TSI e TPO da AP40 com PCM de 14°C

Tanto a TSI mínima como o período de maior perigo de ocorrência de condensações são muito semelhantes à situação original. A variação da HR demonstra que em grande parte do período de análise, são atingidos valores superiores a 95%, com um pico muito próximo dos 100% no mesmo momento de registo da TSI mínima. Em termos positivos, denota-se uma pequena estabilização da TSI e das TPO. Apesar dos valores não se alterarem, há uma redução de picos na flutuação das temperaturas (Figura 5.6. e 5.7.).

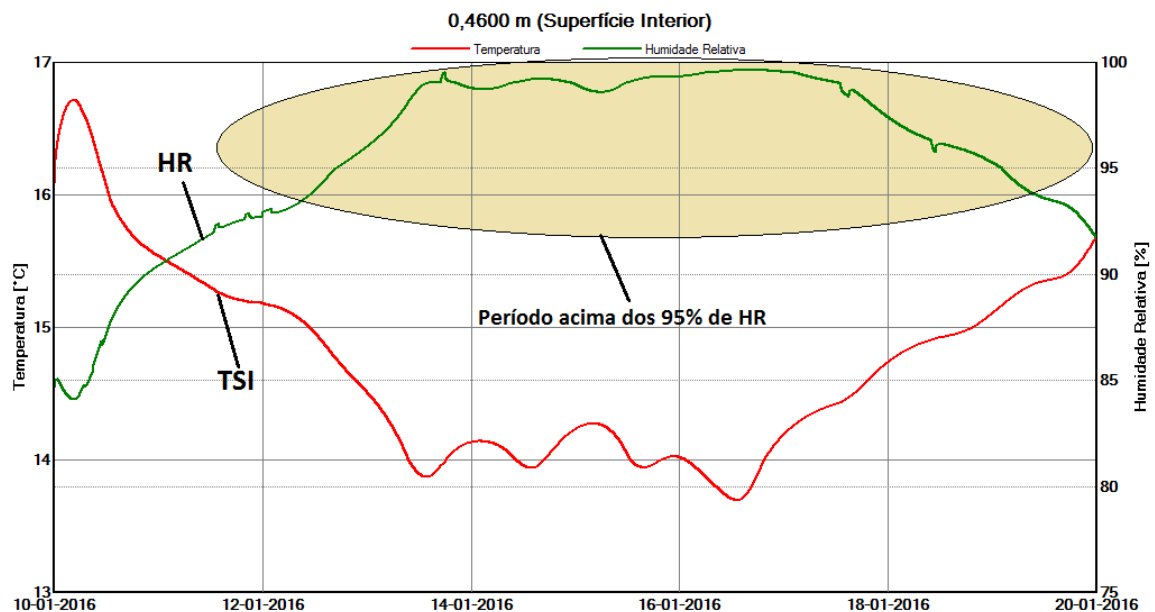


Figura 5.7. – Flutuação da HR e TSI da AP40 com PCM 14°C

5.3.1.3. AP40 com PCM de 13°C

Visto que a argamassa com PCM com temperatura de fusão de 14°C teve um efeito negativo, foi utilizada para esta simulação uma argamassa com PCM com uma temperatura de fusão de 13°C.

Numa primeira observação da TSI e da TPO pode afirmar-se que esta nova argamassa não teve um efeito negativo, relativamente à solução original, no entanto também não apresenta melhorias significativas. O valor mínimo da TSI aumentou ligeiramente para os 14°C, registado no dia 16. Continua a verificar-se uma grande proximidade entre a TSI e a TPO, com valores inferiores a 0.5°C, sendo que o período em que se verifica esta proximidade é muito semelhante ao da situação original (Figura 5.8.).

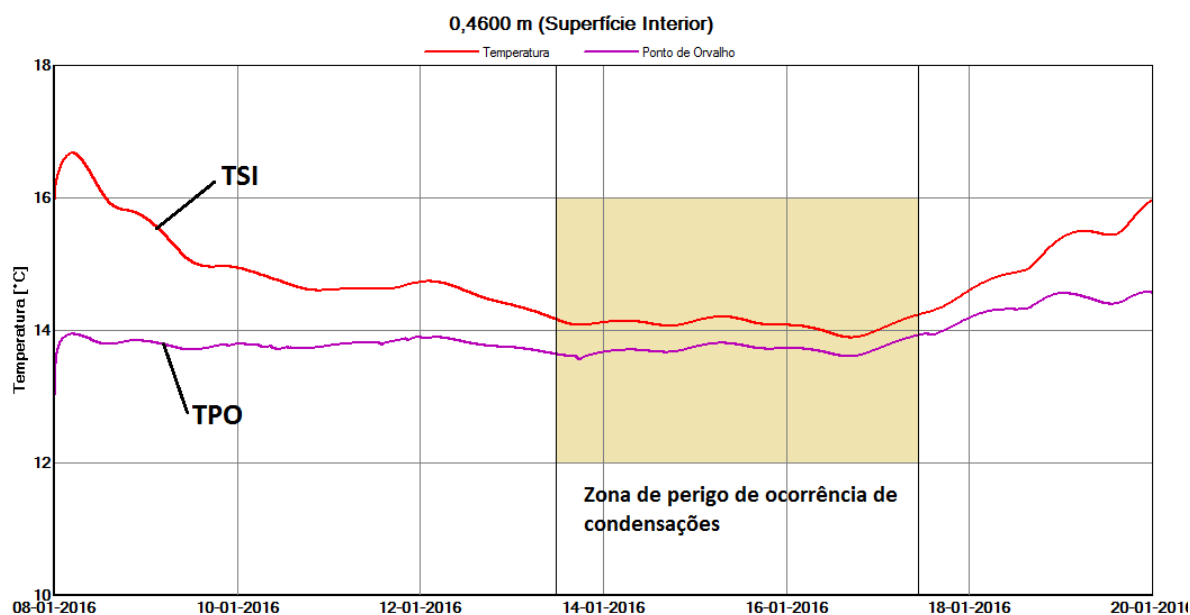


Figura 5.8. – Flutuação da TSI e TPO da AP40 com PCM 13°C

A HR situa-se acima dos 95% em grande parte do período de análise, com um pico de 98% no momento de registo da TSI mínima. A grande diferença é a estabilização das temperaturas e da HR, tal como ocorreu para a argamassa com PCM com temperatura de fusão de 14°C, sendo que nesta simulação teve um efeito mais acentuado (Figura 5.9.)

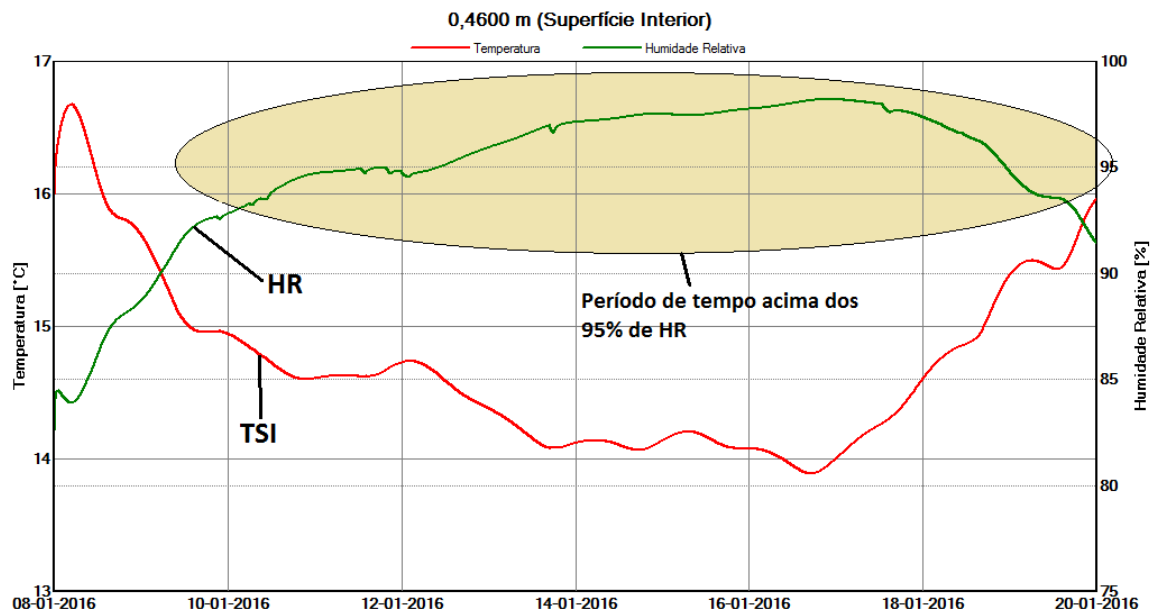


Figura 5.9. – Flutuação da HR e TSI da AP40 com PCM 13°C

5.3.2. ALVENARIA DE PEDRA – 30 CM

5.3.2.1 AP30 com Reboco Tradicional

Nesta simulação definiu-se uma alvenaria de pedra com 30 cm, rebocada pelo interior e pelo exterior com 3 cm com uma argamassa tradicional “Gesso de cimento”.

Através do gráfico da flutuação da TSI e da TPO podemos observar que estas estão muito próximas entre dia 13 e dia 18, com diferenças inferiores a 0,5°C, chegando mesmo a coincidir no dia 16. Esta grande proximidade entre a TSI e a TPO, que culmina numa coincidência, sugere a ocorrência de condensações na face interna da alvenaria. Em termos de amplitude da TSI, registou-se uma temperatura mínima de cerca de 13°C, e máxima de aproximadamente 16°C (Figura 5.10.).

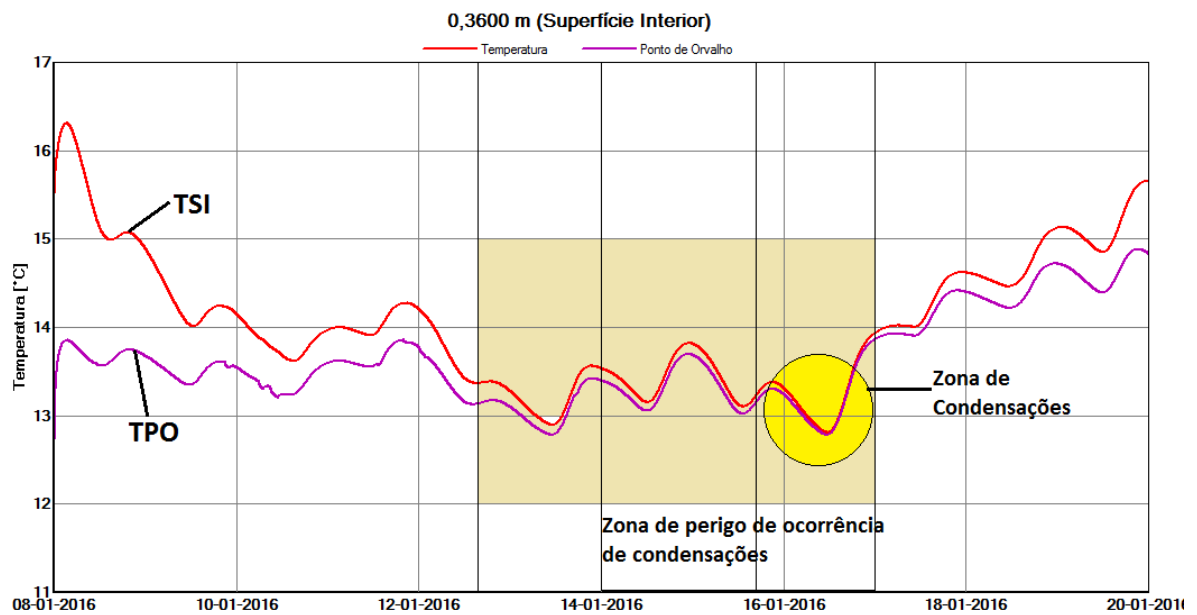


Figura 5.10. – Flutuação da TSI e TPO da AP30 com Reboco Tradicional

É no momento em que a TSI atinge o seu valor mínimo que se faz coincidir com a TPO, o mesmo momento do período de análise em que a HR atinge os 100%, o que leva a concluir que há ocorrência de condensações. De salientar que em grande parte da análise a HR está acima dos 95%, o que suporta a ideia do grande potencia para ocorrência de condensações Figura (5.11.).

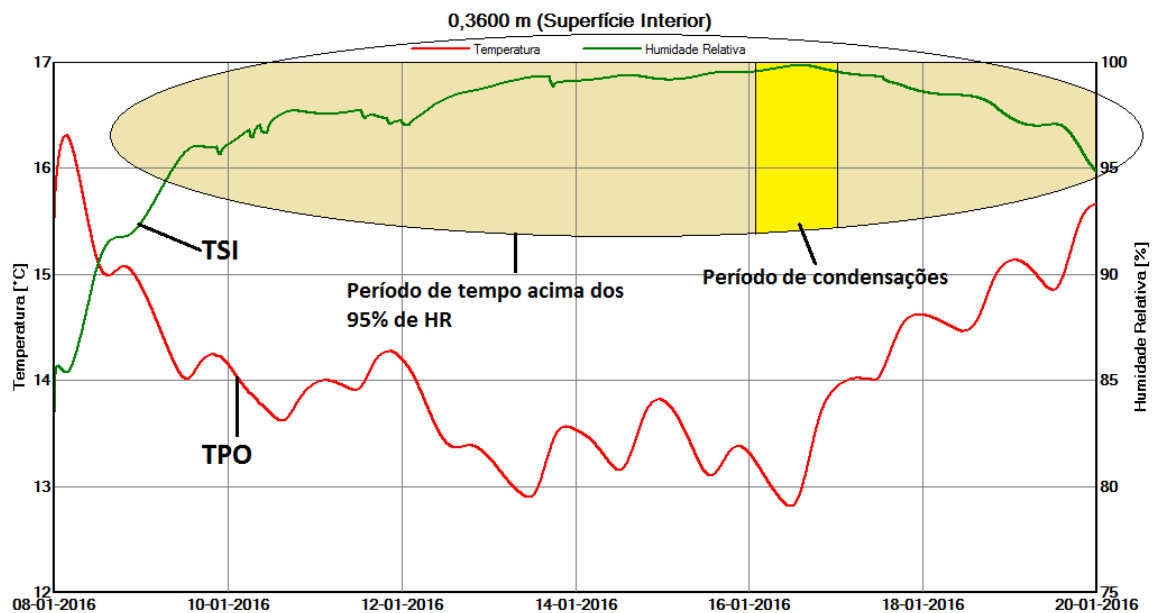


Figura 5.11. – Flutuação da HR e TSI da AP30 com Reboco Tradicional

Como a TPO deste elemento flutua entre os 14°C e os 13°C, nos momentos mais críticos, definiu-se primeiro uma argamassa com PCM com uma temperatura de fusão de 14°C para observar os resultados.

5.3.2.2. AP30 com PCM de 14°C

Estudou-se, para o mesmo cenário, a substituição a argamassa tradicional que estava no interior da parede por uma argamassa com PCM, com uma temperatura de fusão de 14°C.

Através da observação do gráfico da TSI e TPO pode verificar-se que esta nova solução tem um comportamento significativamente pior, relativamente à situação original. A nova argamassa provoca um aumento do período de coincidência entre a TSI e a TPO, resultando num maior período de ocorrência de condensações, entre o dia 13 e o dia 18 (Figura 5.12.).

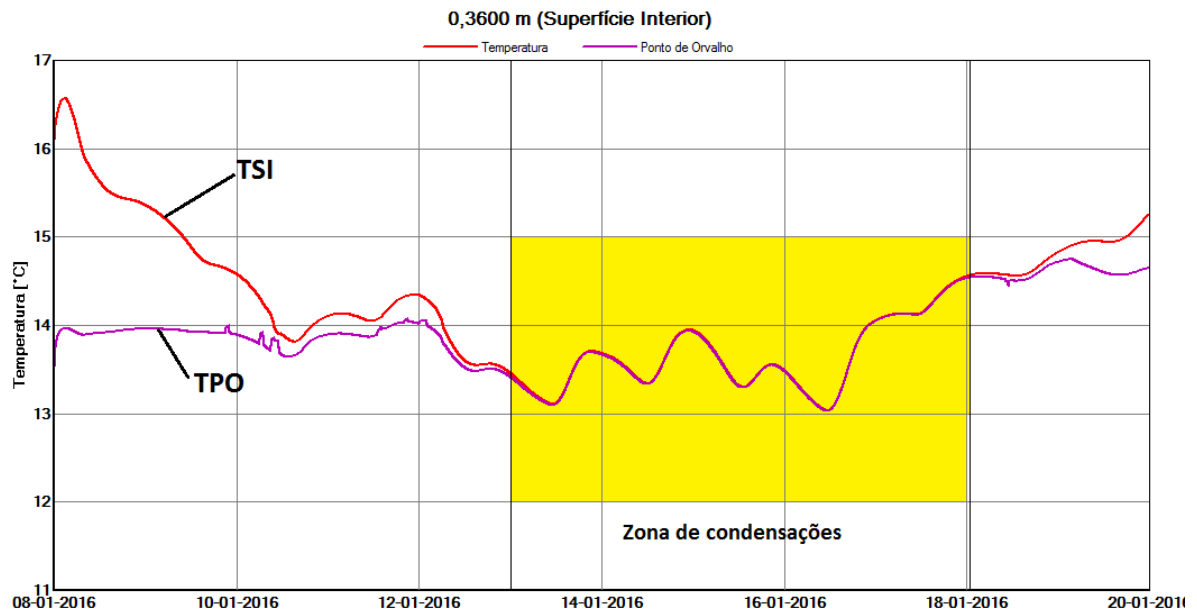


Figura 5.12. – Flutuação da TSI e TPO da AP30 com PCM 14°C

O gráfico da variação da HR suporta o que foi observado anteriormente, já que a HR atinge os 100% no mesmo intervalo de tempo. Fora desse intervalo a HR continua, em grande parte do período de análise, acima dos 95%. Relativamente a amplitude da TSI, não se verificam alterações significativas visto que as temperaturas mínimas e máximas se mantiveram muito próximas das que se verificaram na análise da solução original (Figura 5.13.)

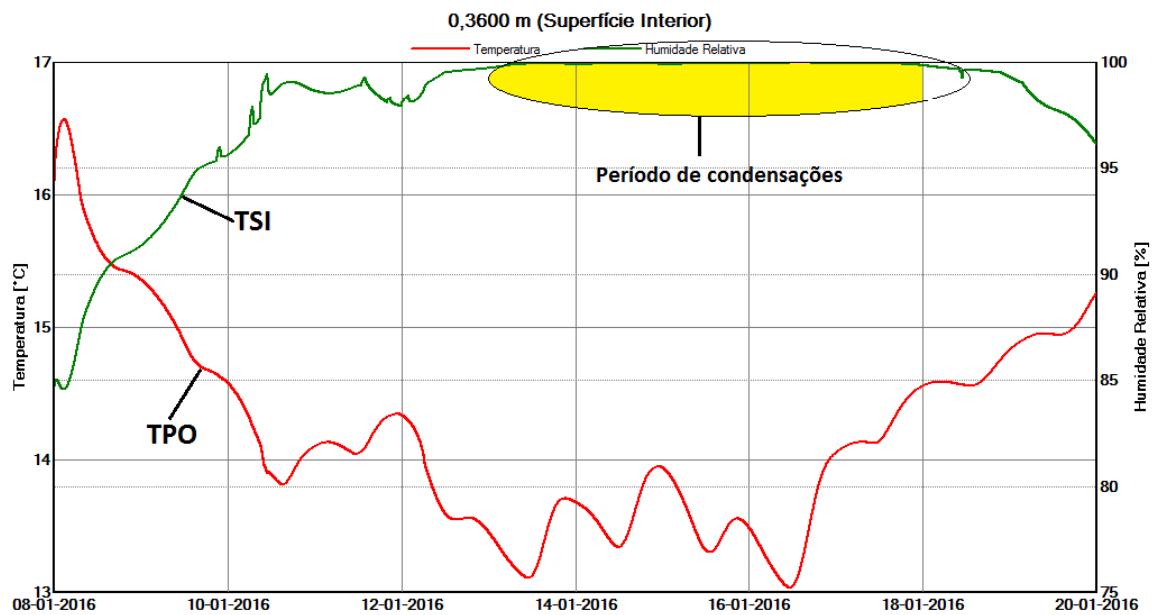


Figura 5.13. – Flutuação da HR e TSI da AP30 com PCM 14°C

Sendo que esta argamassa, com uma temperatura de fusão de 14°C não teve um efeito benéfico, muito pelo contrário, definiu-se uma argamassa com temperatura de fusão 1°C inferior, 13°C, para perceber se há algum benefício na prevenção de condensações.

5.3.2.3. AP30 com PCM de 13°C

Relativamente ao elemento anterior, nesta simulação apenas se alterou a argamassa utilizada no interior da parede. Foi definida uma argamassa com PCM com uma temperatura de fusão de 13°C.

Após a simulação pode ver-se que já não há coincidência entre a TSI e TPO em nenhum momento do período de análise, ou seja, aparentemente não ocorrem condensações (Figura 5.14.)

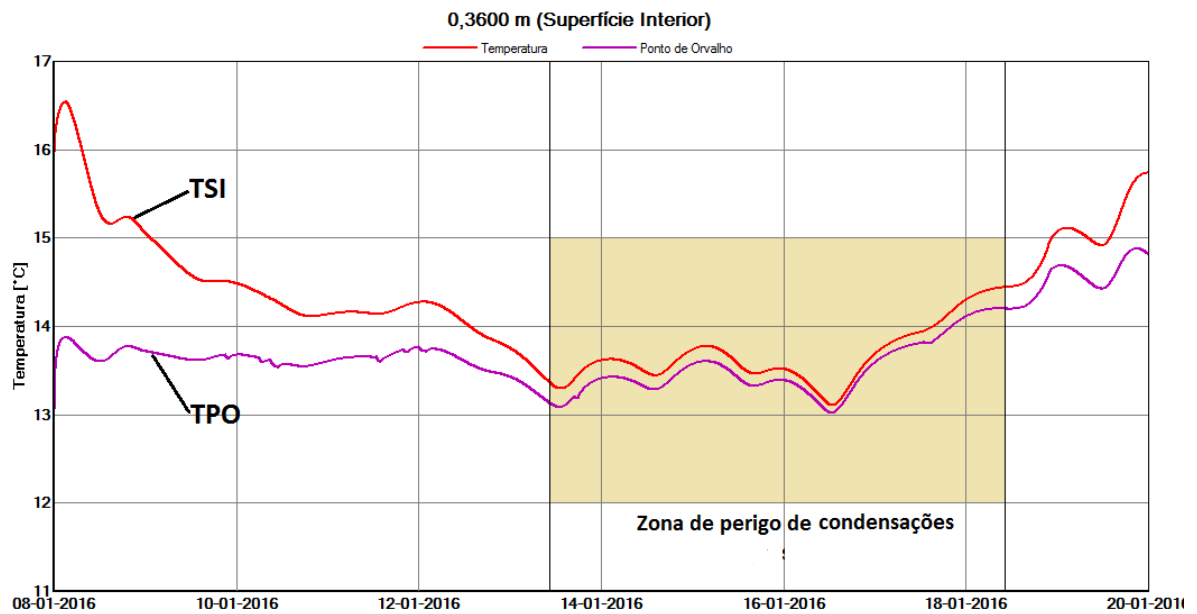


Figura 5.14. – Flutuação da TSI e TPO da AP30 com PCM 13°C

No entanto, verificam-se momentos em que estas estão bastante próximas, e através da variação da HR verifica-se que esta se encontra com valores muito altos, em grande parte do período de análise acima dos 95%. Apesar de nunca atingir os 100%, estes valores de HR sugerem a existência do risco de condensações. Mais uma vez, em termos de amplitude, temperaturas máximas e mínimas não revelam alterações significativas. A argamassa com PCM parece ter um pequeno efeito estabilizador nas temperaturas, visto que há uma pequena redução dos picos de temperatura em toda a flutuação (Figura 5.15.)

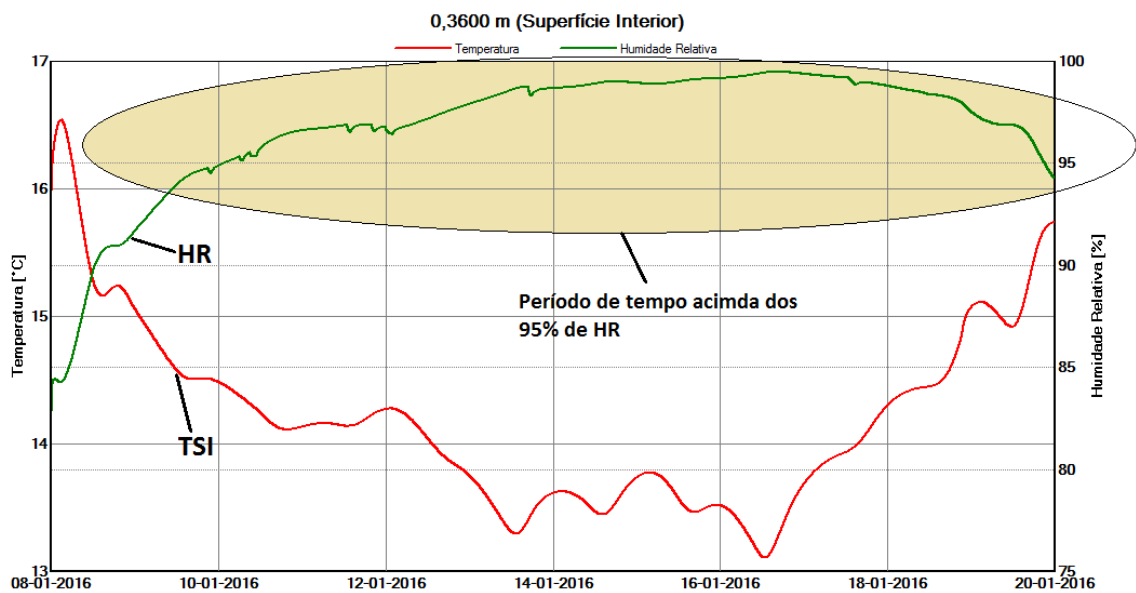


Figura 5.15. – Flutuação da HR e TSI da AP30 com PCM 13°C

5.3.3. ALVENARIA DE PEDRA – 20 CM

5.3.3.1. AP20 com Reboco Tradicional

Nesta simulação definiu-se uma parede de alvenaria de pedra com 20 cm, rebocada com argamassa tradicional “ Gesso de Cimento” no exterior e interior com 3 cm e 4 cm, respetivamente. Esta diferença entre espessuras deve-se a uma tentativa de maximizar os efeitos positivos da camada interior, já que o elemento é de espessura reduzida.

Relativamente a esta solução, é possível observar no gráfico da variação das temperaturas que existe uma grande sobreposição entre a linha da TSI e da TPO. Esta sobreposição indica que existe um período dentro do tempo de análise em que a TSI iguala a TPO, resultando na ocorrência de condensações. No gráfico da variação da HR, podemos verificar que esta atinge os 100% durante o mesmo período em há a sobreposição de TSI e TPO, entre o dia 13 e o dia 17. É durante este período que se verifica a temperatura mínima da superfície, aproximadamente 12 °C no dia 16 (Figura 5.16.).

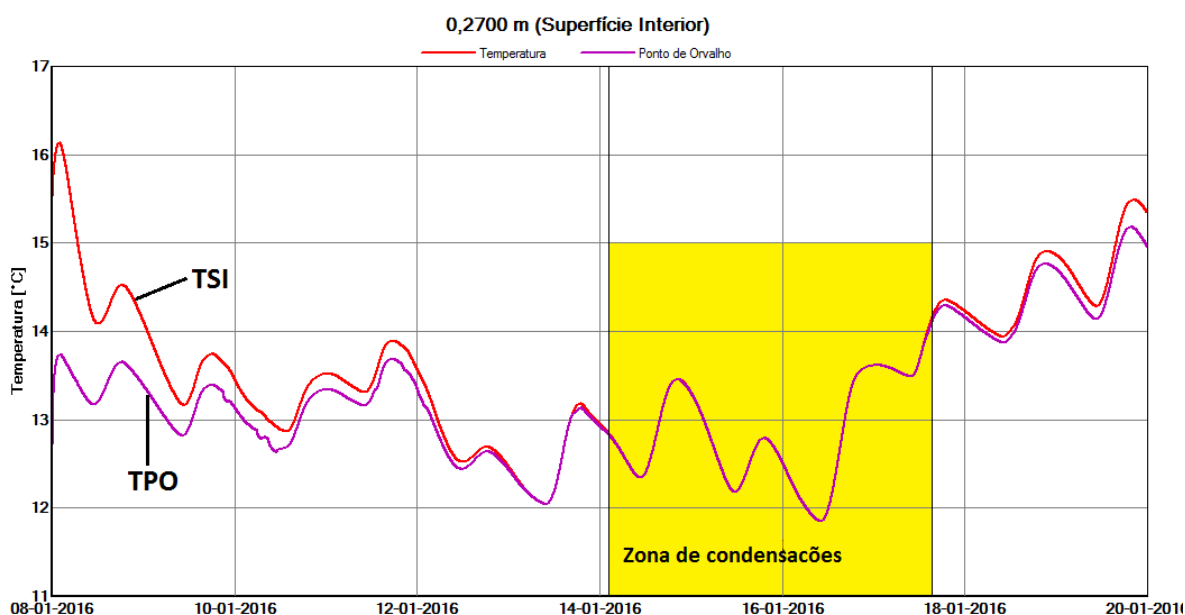


Figura 5.16. – Flutuação da TSI e TPO da AP20 com Reboco Tradicional

Nos dias que antecedem e precedem o período de ocorrência de condensações, a TSI e a TPO têm diferenças inferiores a 0,5°C e a HR está acima dos 95% (Figura 5.17.).

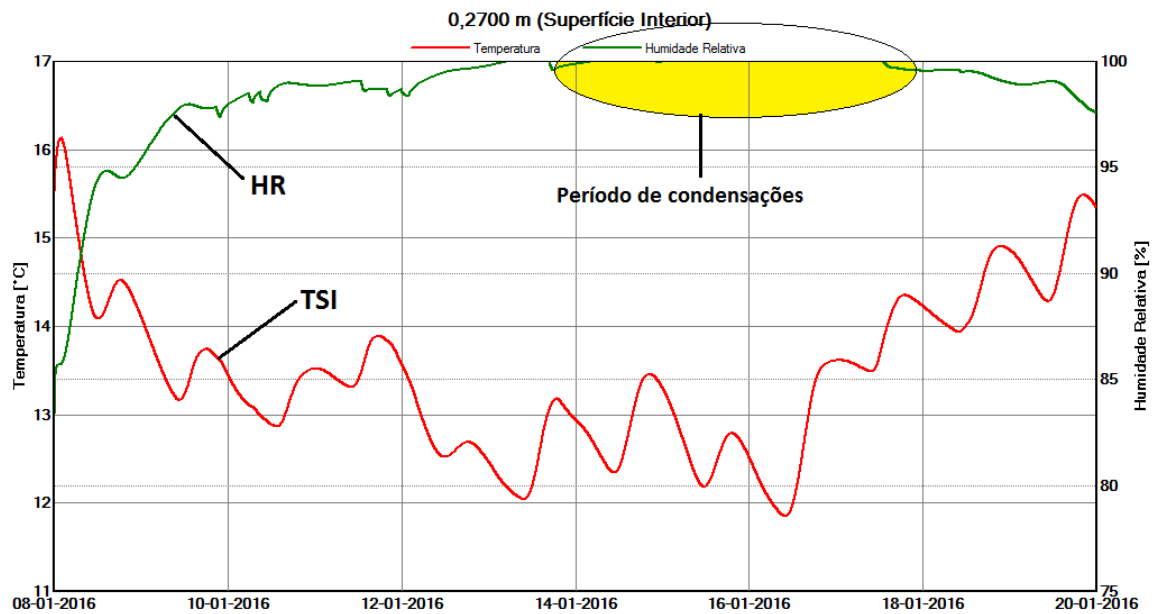


Figura 5.17. – Flutuação da HR e TSI da AP20 com Reboco Tradicional

Visto que a sobreposição de TPO e TSI ocorre entre os 14°C e os 12°C, como primeira tentativa, definiu-se uma argamassa com PCM com uma temperatura de fusão de 14°C.

5.3.3.2. AP20 com PCM de 14°C

Estudou-se, para o mesmo cenário, a substituição da argamassa tradicional colocada no interior por uma argamassa com 30% de PCM com uma temperatura de fusão de 14°C, com a mesma espessura do revestimento interior original, 4 cm.

Através do gráfico das temperaturas podemos verificar que o período de ocorrência de condensações aumentou significativamente, ou seja, esta solução tem um comportamento pior ao da original na prevenção de condensações (Figura 5.18).

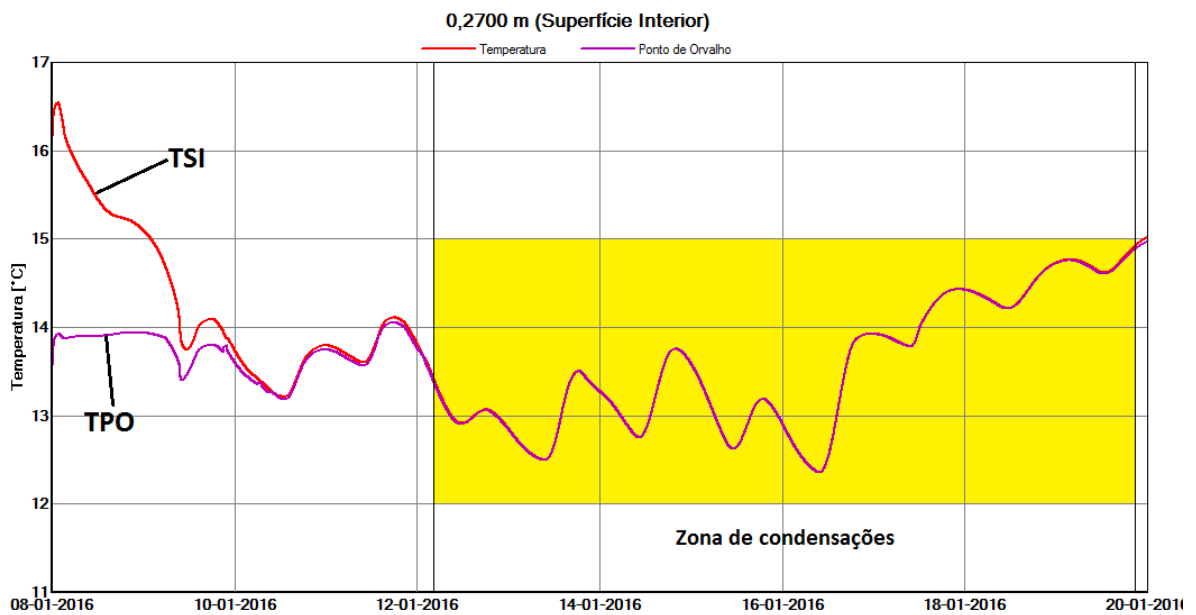


Figura 5.18. – Flutuação da TSI e TPO da AP20 com PCM 14°C

Apesar de a TSI mínima aumentar para os 12,5°C, existe um longo período de sobreposição entre a TSI e a TPO, tal como de HR acima dos 100%, entre o dia 11 e o dia 20 (Figura 5.19.).

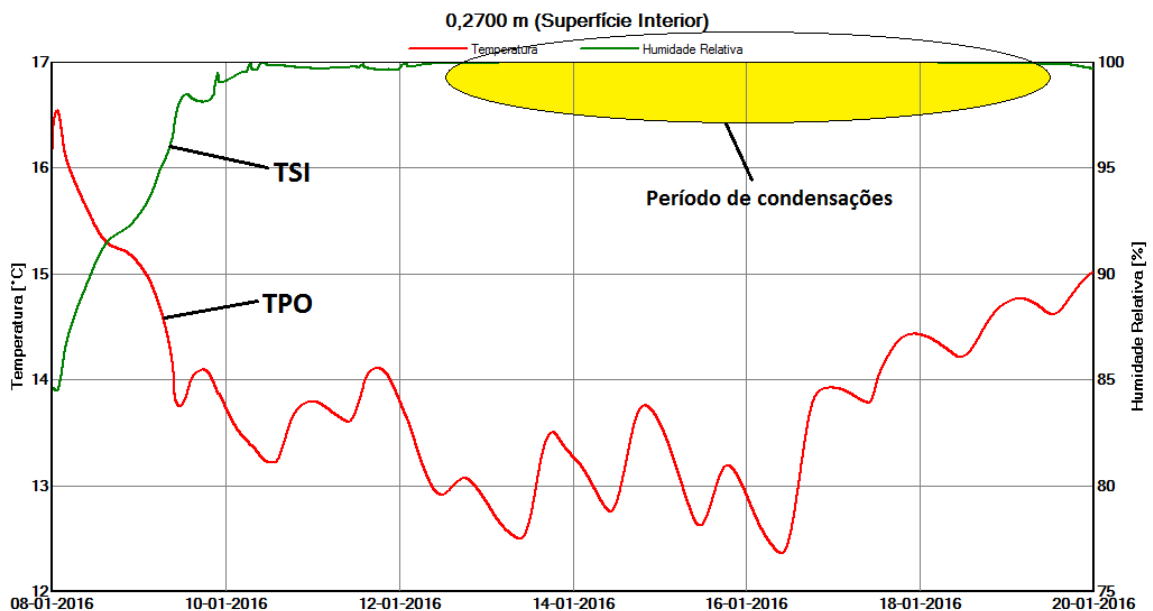


Figura 5.19. – Flutuação da HR e TSI da AP20 com PCM 14°C

Visto que esta argamassa não teve o comportamento esperado, definiu-se outra argamassa com PCM mas com uma temperatura de fusão de 12°C, a TPO mínima da solução original.

5.3.3.4. AP20 com PCM de 12°C

Visto que na simulação anterior a argamassa utilizada teve um efeito negativo, nesta simulação utilizou-se para argamassa de reboco interior uma argamassa com 30% de PCM com uma temperatura de fusão a de 12°C, mantendo a espessura de 4 cm.

Observando a flutuação da TPO e da TSI verifica-se que ainda existe um período de sobreposição das mesmas, apesar de ser mais reduzido relativamente a solução original. O gráfico da HR permite constatar que este período é de cerca de 24h, enquanto na solução original era de 72h. Tal como a primeira argamassa com PCM, esta também aumentou a TSI mínima cerca de 1°C, para os 12.5°C (Figura 5.20. e 5.21.).

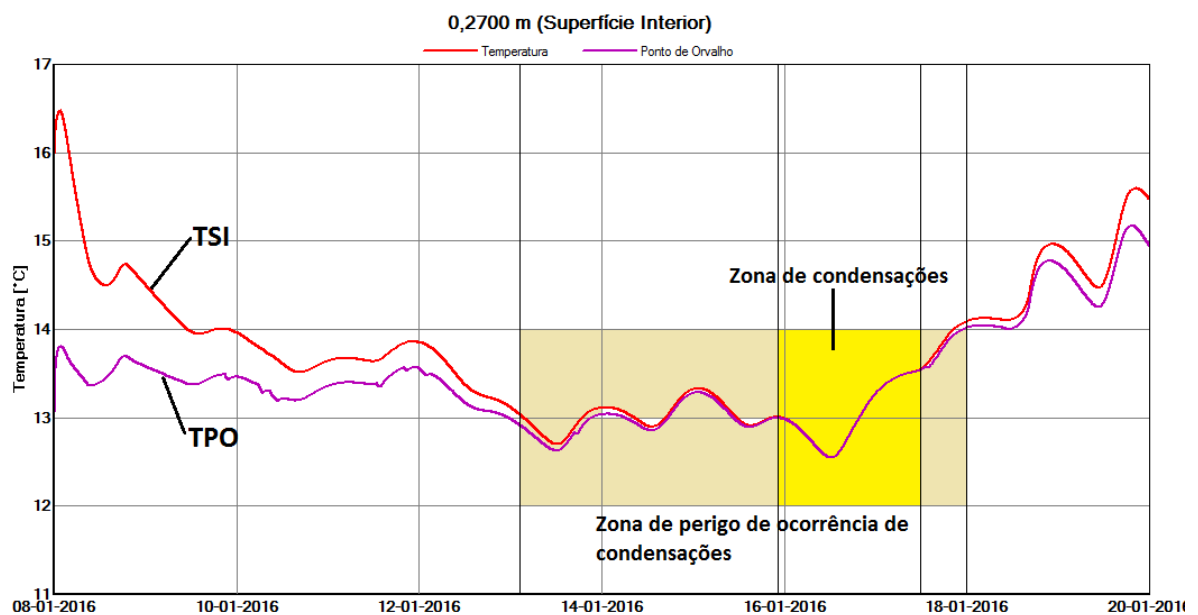


Figura 5.20. – Flutuação da TSI e TPO da AP20 com PCM 12°C

Apesar de se verificarem pequenas melhorias, em termos gerais esta solução apresenta grande risco de ocorrência de condensações entre o dia 12 e o dia 19, já que neste período a TSI e a TPO estão muito próximas e a HR se aproxima muito dos 100% (Figura 5.20. e 5.21.).

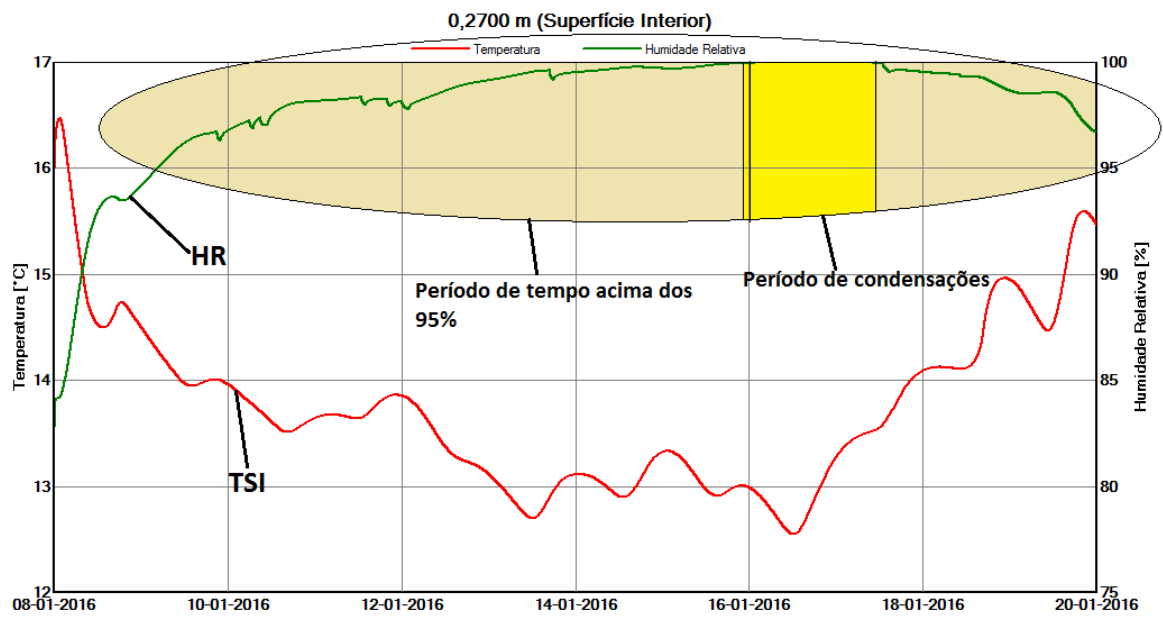


Figura 5.21. – Flutuação da HR e TSI da AP20 com PCM 12°C

5.3.3.4. AP20 com PCM de 11°C

Esta simulação foi apenas realizada para verificar se haveria alguma diferença significativa no comportamento do elemento se aplicássemos uma argamassa com PCM com uma temperatura de fusão inferior à TPO mínima da solução original, neste caso de 11°C.

Por observação dos gráficos da TSI, da TPO e da HR é possível verificar que os resultados são muito semelhantes aos da simulação anterior, e que esta alteração na temperatura fusão não tem influência significativa (Figura 5.22. e 5.23.).

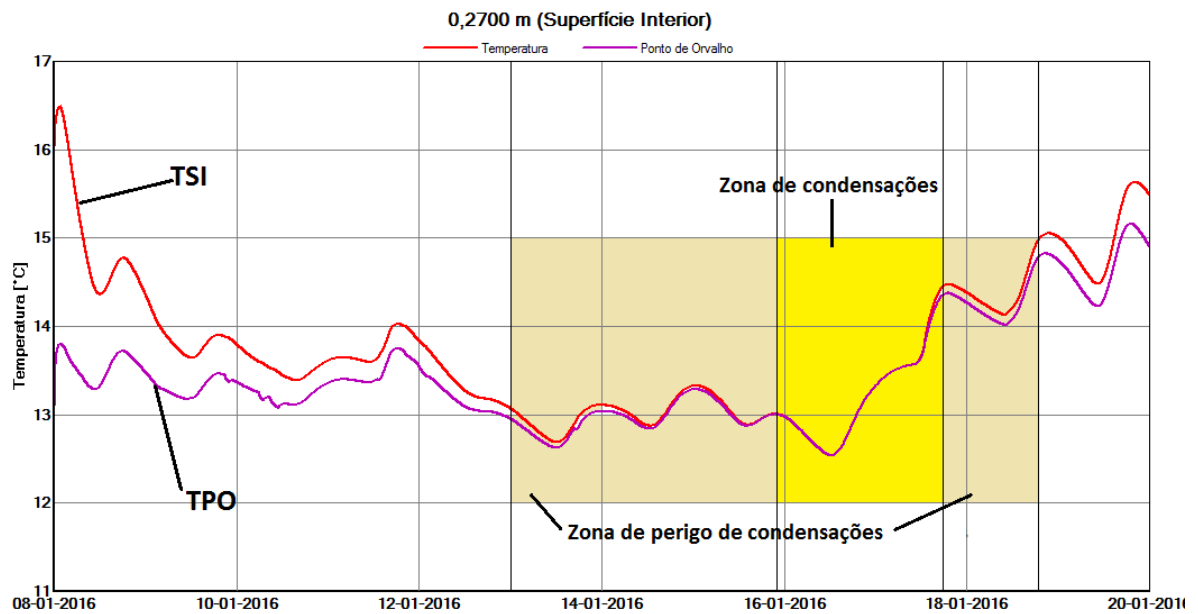


Figura 5.22. – Flutuação da TSI e TPO com PCM 11°C

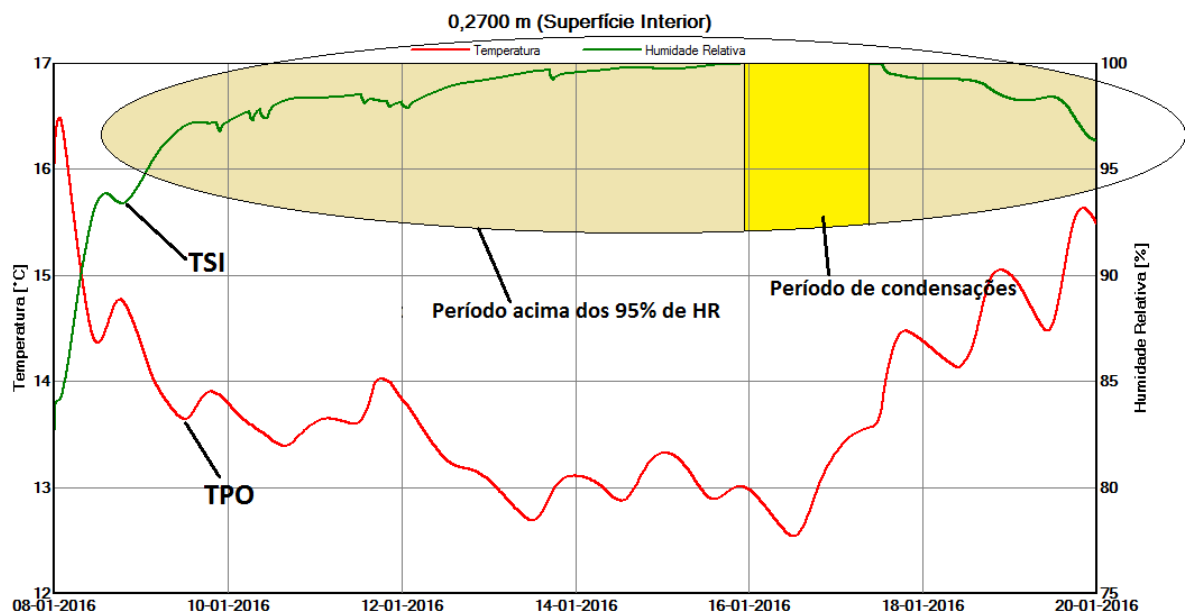


Figura 5.23. – Flutuação da HR e TSI da AP20 com PCM 11°C

5.3.4. PAREDE DE BETÃO – 20 CM

5.3.4.1. PB com Reboco Tradicional

Nesta simulação definiu-se um elemento de betão de 20 cm rebocado pelo interior e pelo exterior com uma argamassa tradicional “Reboco Mineral”. O reboco exterior tem uma espessura de 3 cm e o interior tem 4 cm.

Através da observação da TSI e da TPO verifica-se que existe um grande risco de condensações ao longo de todo o período de análise. A TSI coincide com a TPO desde o dia 9 até ao último da análise, dia 20. A TSI mínima é de 11,5°C, registada no dia 16 (Figura 5.24.).

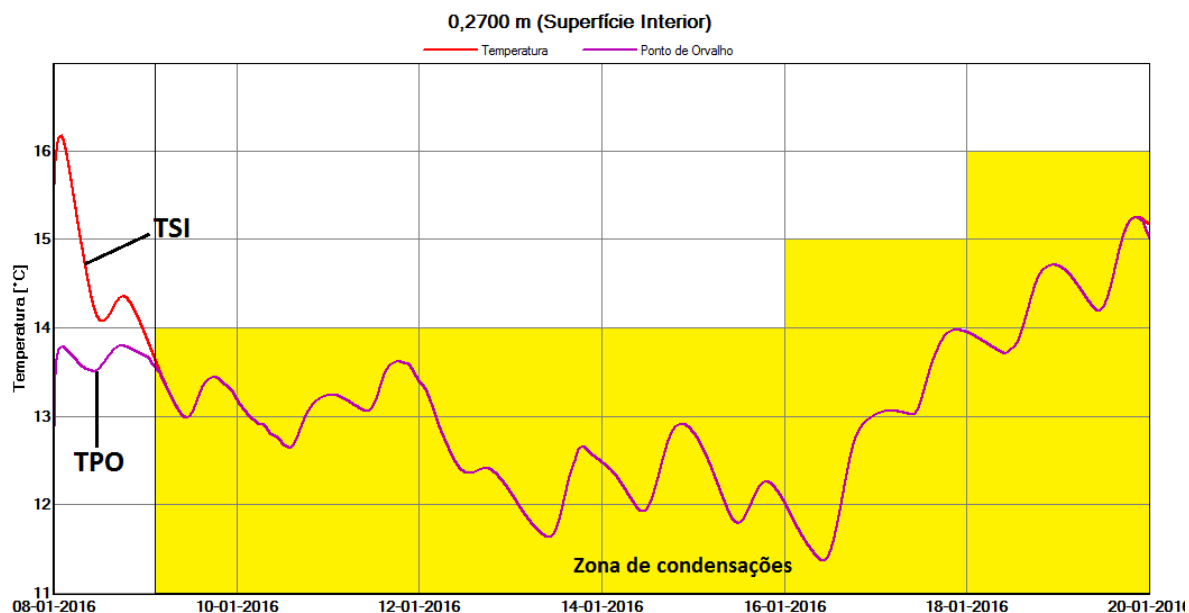


Figura 5.24. – Flutuação da TSI e TPO da PB com Reboco Tradicional

A Linha da HR ascende acima dos 100% logo no início da análise, no dia 9, o que não deixa margem para dúvidas da má qualidade deste elemento no comportamento higrotérmico face às condensações (Figura 5.25.).

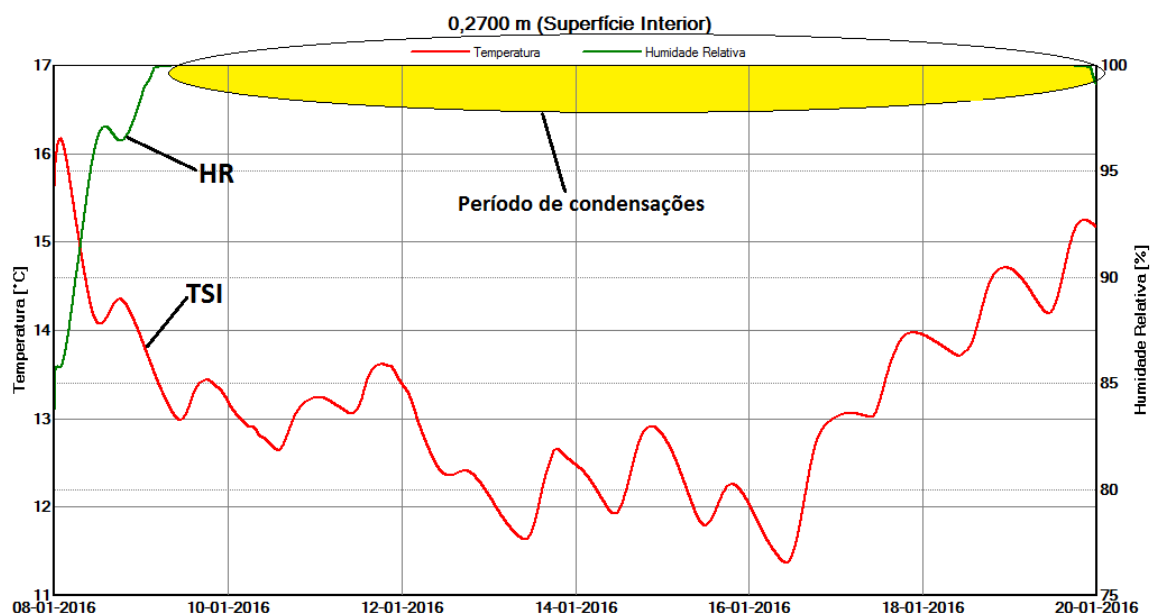


Figura 5.25. – Flutuação da HR e TSI da PB com Reboco Tradicional

Como a TPO varia entre os 11.5°C e aproximadamente os 15°C, utilizaram-se as mesmas argamassas com PCM para observar a sua influência face a ocorrência de condensações superficiais.

5.3.4.2. PB com PCM de 14°C

Nesta simulação, foi substituída a argamassa tradicional colocada no interior por uma argamassa com 30% de PCM com uma temperatura de fusão de 14°C, com a mesma espessura do revestimento interior original, 4 cm.

Os resultados gráficos desta simulação não demonstram grandes alterações no comportamento do elemento face às condensações, relativamente à solução original. Apesar de a TSI mínima aumentar cerca de 0.5°C, ainda existe um grande período de coincidência entre a TSI e a TPO (Figura 5.26.).

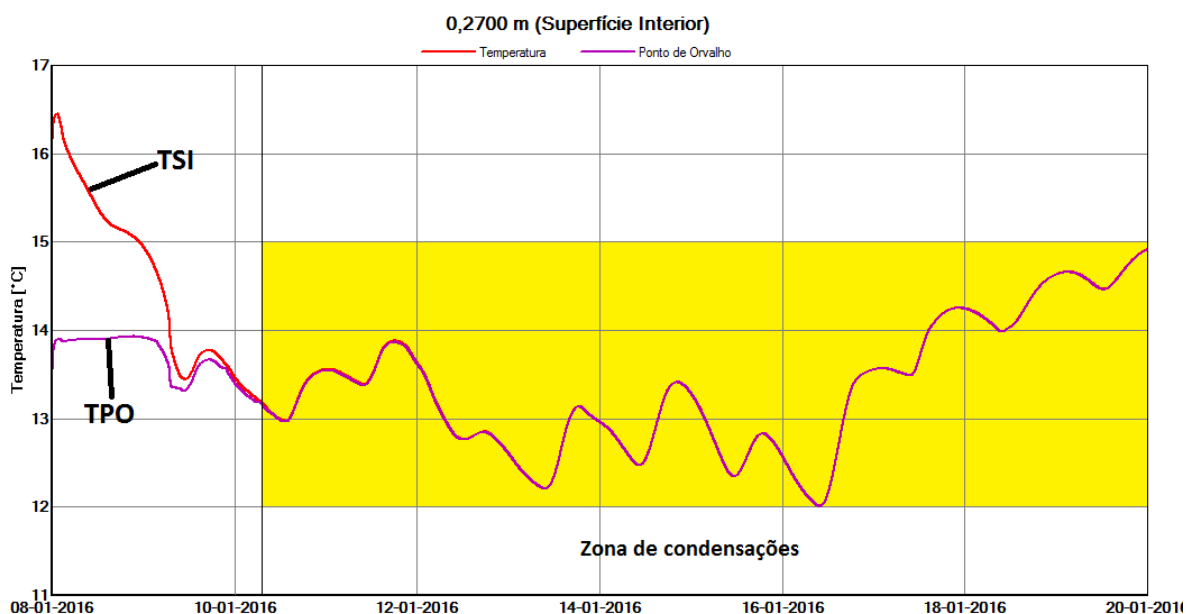


Figura 5.26. – Flutuação da TSI e TPO da PB com PCM 14°C

Tal como na solução original a HR ultrapassa os 100% logo no início do período de análise (Figura 5.27.).

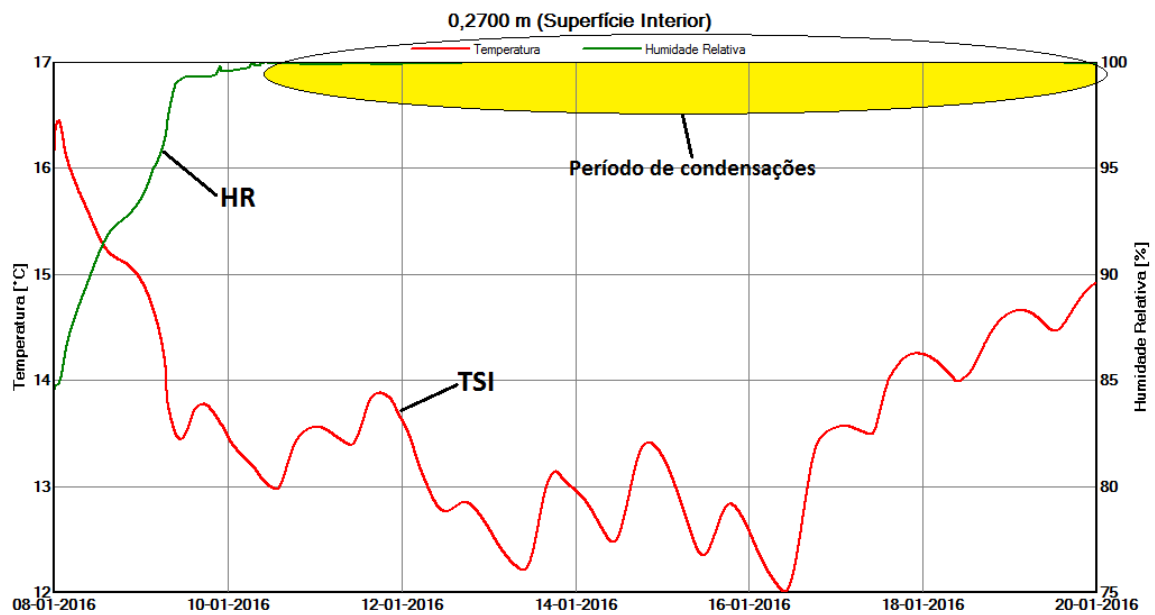


Figura 5.27. – Flutuação da HR e TSI da PB com PCM 14°C

5.3.4.3. PB com PCM de 12°C

Nesta simulação, foi substituída a argamassa tradicional colocada no interior por uma argamassa com 30% de PCM com uma temperatura de fusão de 12°C, com a mesma espessura do revestimento interior original, 4 cm.

É possível observar no gráfico que ainda existe coincidência entre a TSI e a TPO, ou seja, ainda ocorrem condensações. No entanto, o período em que as temperaturas se igualam é menor, relativamente às duas simulações anteriores, ocorrendo apenas entre o dia 14 e o dia 17 (Figura 5.28.).

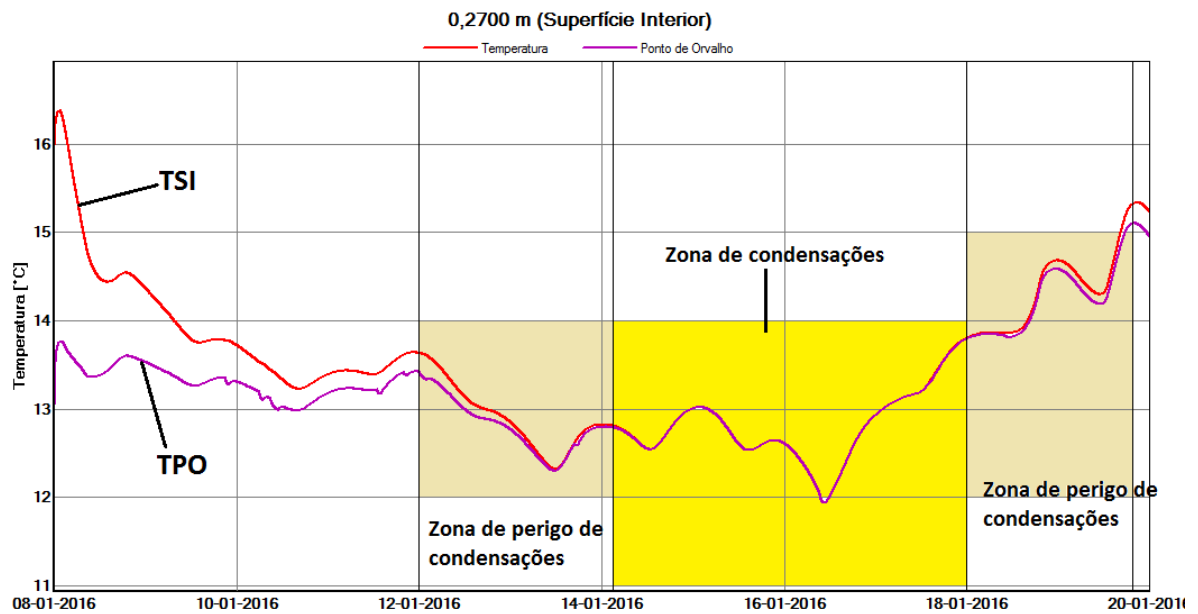


Figura 5.28 – Flutuação da TSI e TPO da PB com PCM 12°C

Durante estes mesmos dias a HR atinge os 100 %, e nos outros dias mantém-se acima dos 95%. A TSI mínima registada é, novamente, 12°C (Figura 5.29.).

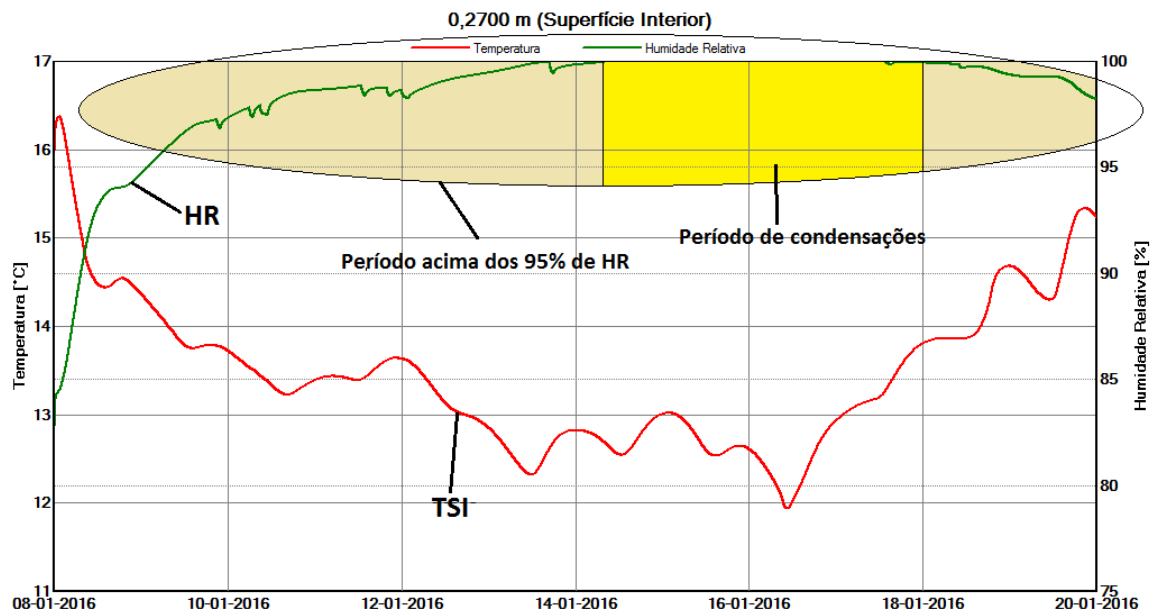


Figura 5.29. – Flutuação da HR e TSI da PB com PCM 12°C

5.3.4.4. PB com PCM de 11°C

Definiu-se, nesta simulação, uma argamassa de reboco interior com PCM com uma temperatura de fusão de 11°C, inferior a TPO mínima. Mais uma vez para perceber se ao utilizar uma Temperatura de Fusão inferior a gama de TPO teria algum efeito benéfico na prevenção de condensações.

Através dos gráficos é possível observar que não existem grandes alterações relativamente à simulação anterior, tal como ocorreu nas simulações nas alvenarias. Mais uma vez, não se verifica nenhuma influência desta condição experimentada (Figura 5.30. e 5.31).

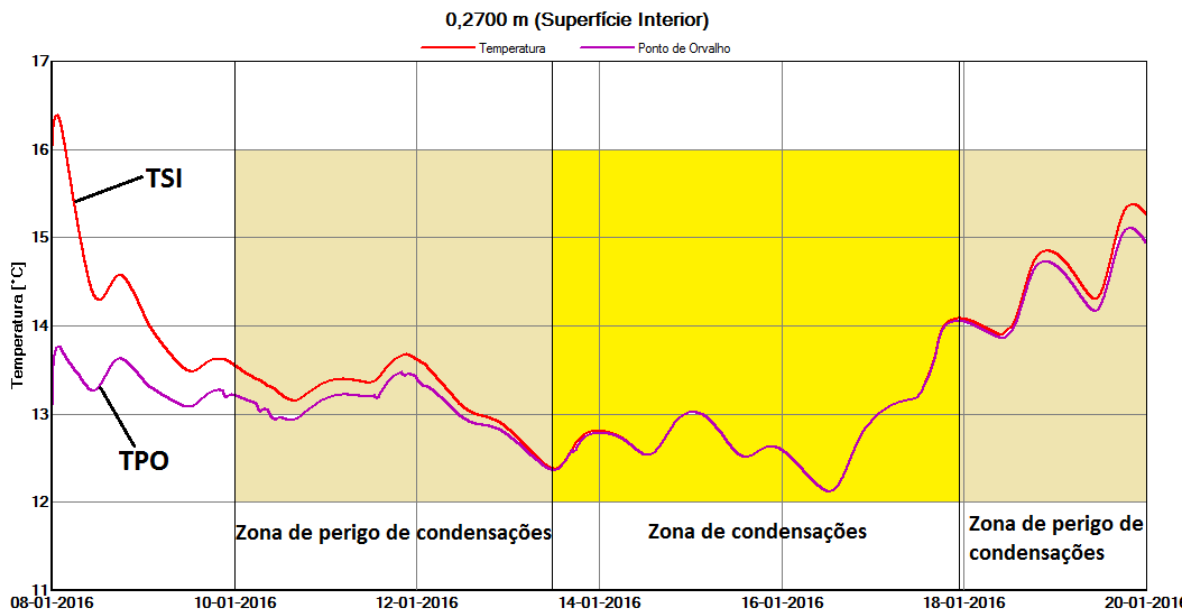


Figura 5.30. – Flutuação da TSI e TPO da PB com PCM 11°C

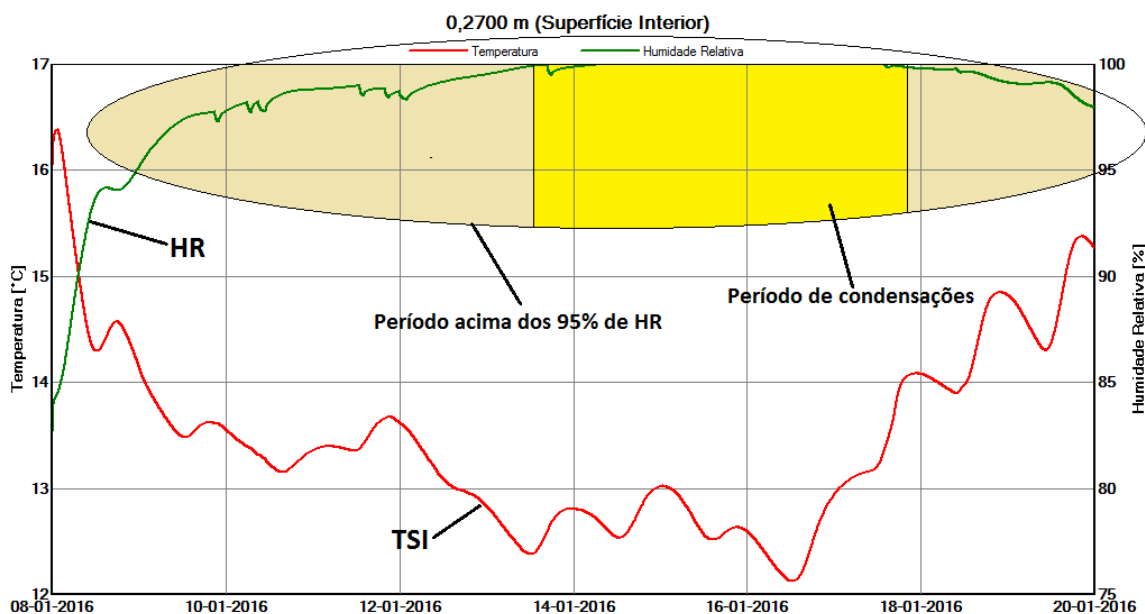


Figura 5.31. – Flutuação da HR e TSI da PB com PCM 11°C

5.3.5. ALVENARIA DE TIJOLO FURADO – 11 CM

5.3.5.1. AT11 com Reboco Tradicional

Neste conjunto de simulações foi definida uma parede de alvenaria de tijolo de 11 cm, rebocada pelo interior e exterior com 3 cm de argamassa tradicional “Gesso de Cimento”.

Nesta simulação, da solução tradicional, podemos afirmar que a TSI e a TPO nunca chegam a coincidir durante período da análise. Apesar de estarem bastante próximas, principalmente entre os dias 13 e 17 onde a diferença atinge valores inferiores a $0,5^{\circ}\text{C}$, o gráfico da HR permite verificar que esta nunca atinge os 100%, logo não ocorrem condensações. No entanto, a grande proximidade da TSI à TPO, com valor da HR constantemente acima dos 95%, sugerem um grande risco. A TSI mínima registada é aproximadamente 13°C (Figura 5.32. e 5.33.)

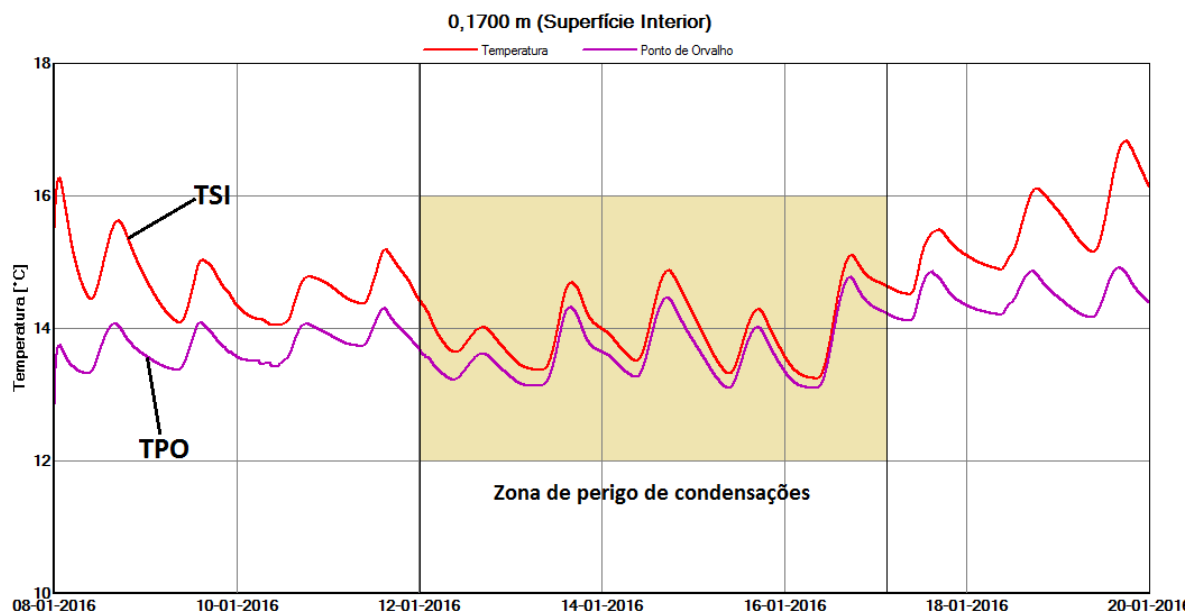


Figura 5.32. – Flutuação da TSI e TPO da AT11 com Reboco Tradicional

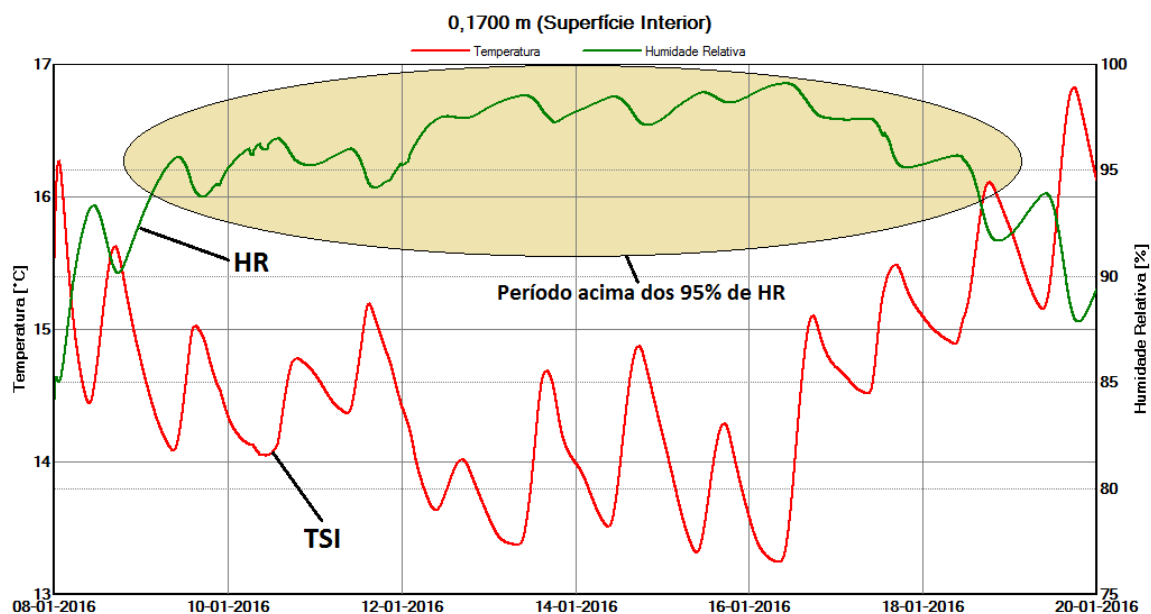


Figura 5.33. – Flutuação da HR e TSI da AT11 com Reboco Tradicional

Como a TPO deste elemento varia entre os 14°C e os 15°C, utilizar-se-á uma argamassa com temperatura de fusão de 14°C para observar a sua influência na diminuição do risco de condensações.

5.3.5.2. AT11 com PCM de 14°C

Nesta simulação, foi substituída a argamassa tradicional colocada no interior por uma argamassa com 30% de PCM com uma temperatura de fusão de 14°C, com a mesma espessura do revestimento interior original, 3 cm.

Nos resultados gráficos desta simulação é possível verificar alterações significativas, relativamente ao reboco tradicional. É possível observar, claramente, um período crítico entre os dias 13 e 17, onde a TSI e a TPO estão bastante próximas face ao restante período de análise, chegando mesmo a coincidir (Figura 5.34.).

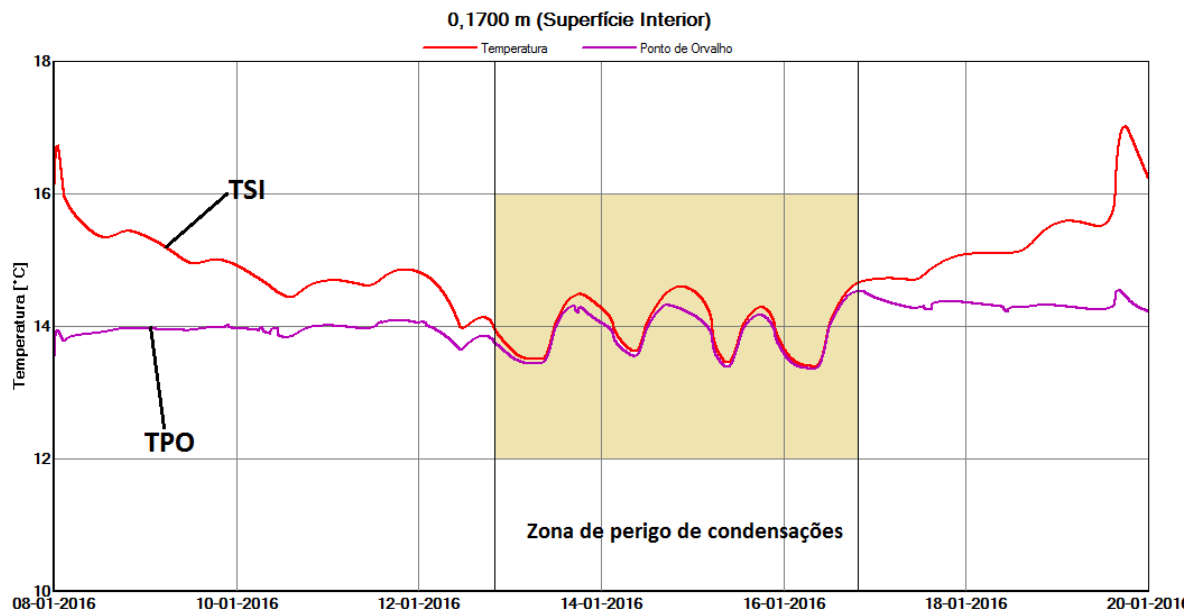


Figura 5.34. – Flutuação da TSI e TPO da AT11 com PCM 14°C

Durante os mesmos dias, a HR atinge os seus valores máximos chegando mesmo aos 100%. Fora do que se considera o período mais crítico, a HR flutua dos 85% aos 95% e a TSI atinge, em média, mais 1°C que a TPO, algo que não ocorria na solução original. A TSI mínima registada manteve-se nos 13°C (Figura 5.34. e 5.35.).

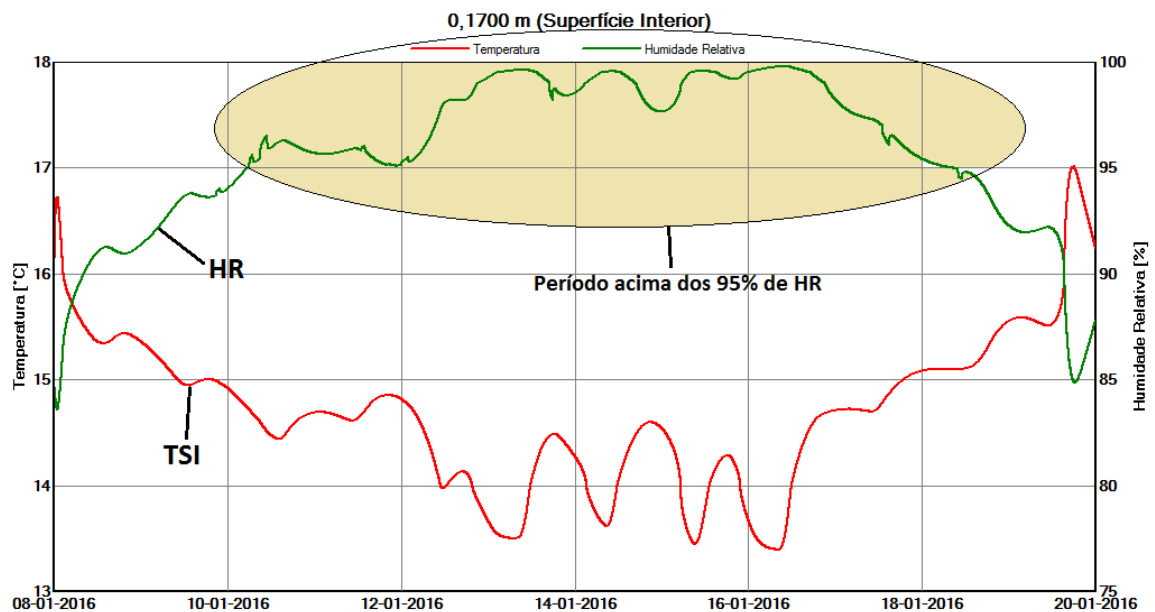


Figura 5.35. – Flutuação da HR e TSI da AT11 com PCM 14°C

5.3.4.4. AT11 com PCM de 12°C

Nesta simulação, foi substituída a argamassa tradicional colocada no interior por uma argamassa com 30% de PCM com uma temperatura de fusão de 12°C, com a mesma espessura do revestimento interior original, 3 cm.

Contrariamente às simulações nas alvenarias de pedra e no betão, usar uma argamassa com PCM para reboco interior com uma temperatura de fusão inferior a TPO da solução original, parece ter um efeito positivo. É de salientar um ligeiro aumento no afastamento da TSI e da TPO, mantendo uma diferença de cerca de 1°C, entre os dias 8 e 13 e os dias 17 e 20. No restante período, de 13 a 17, a TSI e a TPO têm valores muito próximos, com diferenças inferiores a 0,5°C em apenas 3 momentos Figura (5.36.).

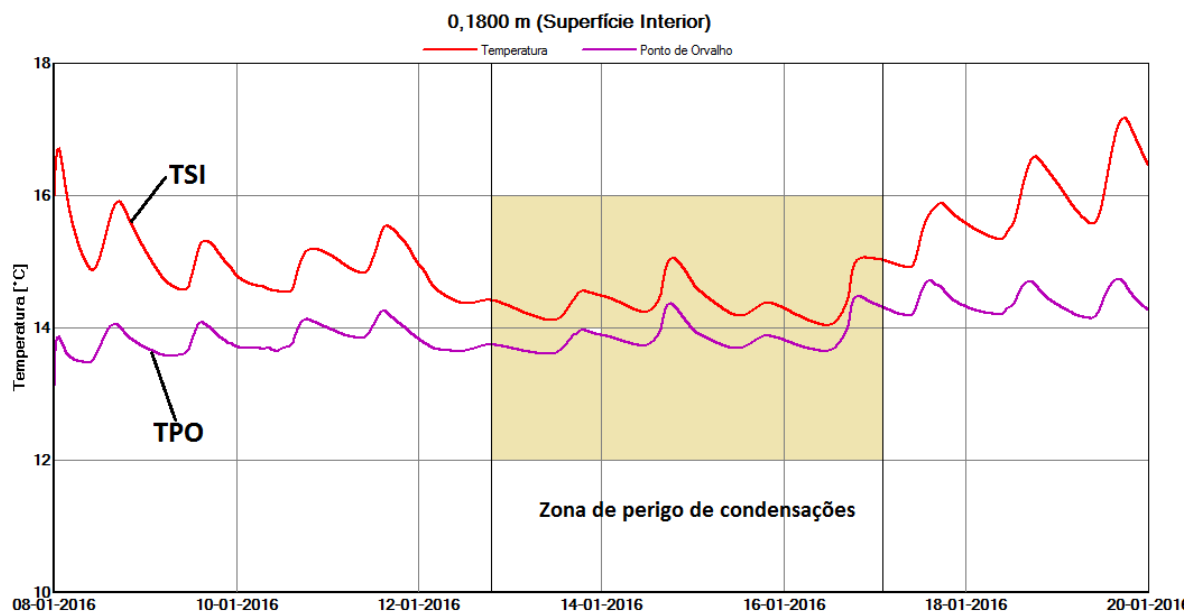


Figura 5.36. – Flutuação da TSI e TPO da AT11 com PCM 12°C

Esta aproximação reflete-se na HR que atinge valores acima dos 95% para esse mesmo período, chegando mesmo aos 97%. Fora do mesmo, flutua entre os 85% e os 95%. O comportamento da flutuação das temperaturas é muito semelhante à solução original, no entanto a TSI mínima desta simulação foi de 14°C (Figura 5.36 e 5.37.).

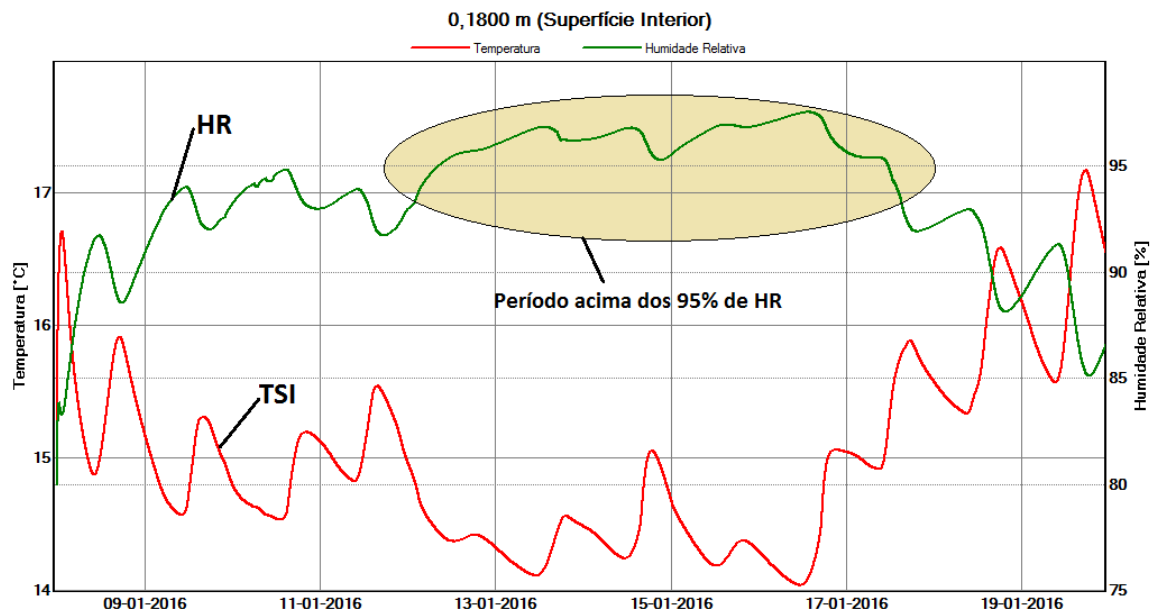


Figura 5.37. – Flutuação da HR e TSI da AT11 com PCM 11°C

5.3.6. ALVENARIA DE TIJOLO FURADO – 15 CM

5.3.6.1. AT15 com Reboco Tradicional

Nesta simulação definiu-se uma alvenaria de tijolo de 15 cm, rebocada pelo interior e pelo exterior com uma argamassa tradicional “Gesso de Cimento” com 2 cm de espessura em ambos os lados.

O gráfico da variação da TSI e da TPO demonstra que as duas temperaturas nunca se igualam durante o período de análise. Neste gráfico observa-se um intervalo de dias mais crítico, em que as duas temperaturas se aproximam, com diferenças inferiores a 0,5°C, entre os dias 13 e 16 (Figura 5.38.).

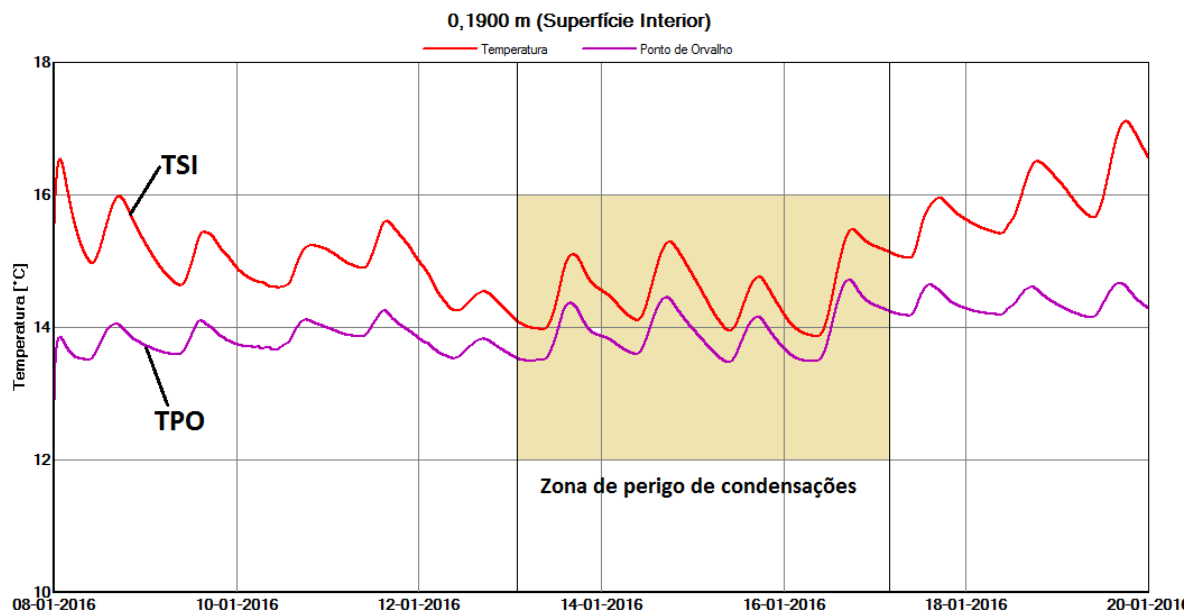


Figura 5.38. – Flutuação da TSI e TPO da AT15 com Reboco Tradicional

É entre esses dias que a HR atinge valores acima dos 95%, com pico nos 97%. Fora desse período varia entre os 85% e os 95%. A TSI mínima registada é de 14°C (Figura 5.39.).

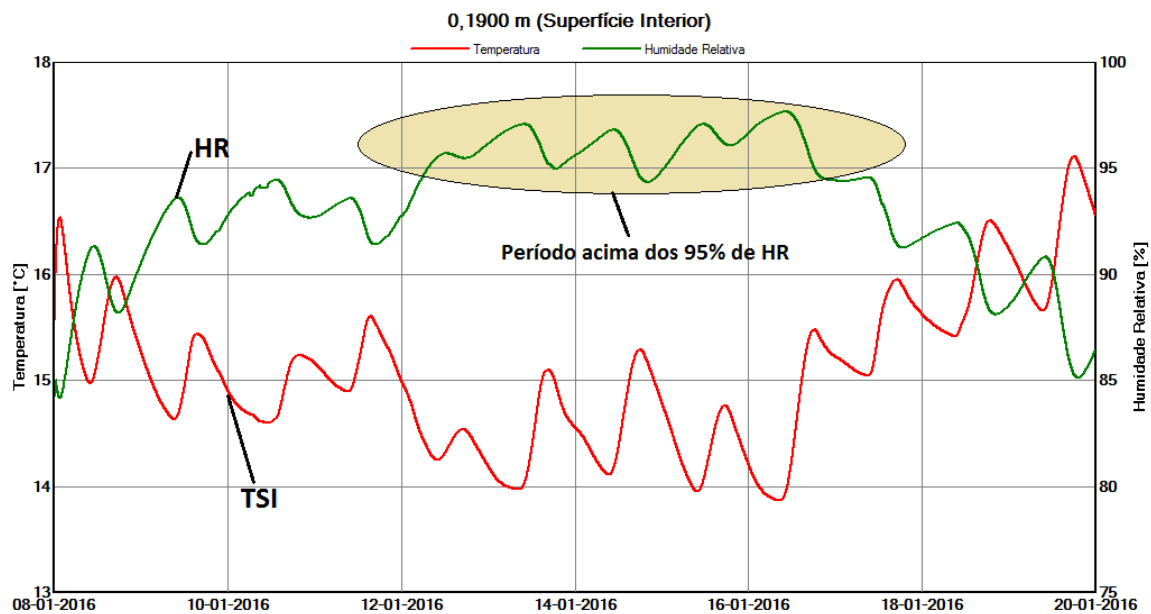


Figura 5.39. – Flutuação da HR e TSI da AT15 com Reboco Tradicional

Sendo que a TPO, em todo o período de análise, se situa nos 14°C com variações muito ligeiras, irá utilizar-se uma argamassa com PCM com uma temperatura de fusão de 14°C e substitui-la pela argamassa tradicional colocada na superfície interior.

5.3.6.2. AT15 com PCM de 14°C

Nesta simulação, foi substituída a argamassa tradicional colocada no interior por uma argamassa com 30% de PCM com uma temperatura de fusão de 14°C, com a mesma espessura do revestimento interior original, 2 cm.

O gráfico da flutuação da TSI e da TPO demonstra que nesta simulação não ocorrem condensações visto que as duas temperaturas não coincidem. Mais uma vez, destaca-se um período mais crítico em que as duas estão mais próximas, entre os dias 13 e 17. Entre estes dias, a diferença entre a TSI e a TPO atinge valores inferiores a 0,5°C. Fora deste período, a diferença é igual ou superior a 1°C (Figura 5.40.).

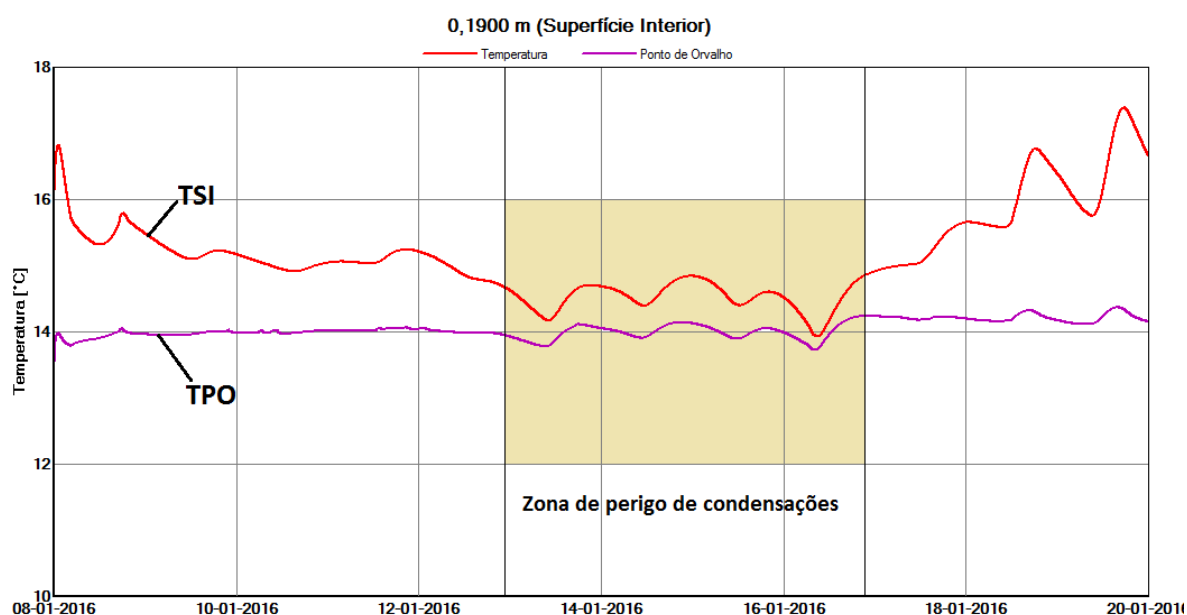


Figura 5.40. – Flutuação da TSI e TPO da AT15 com PCM 14°C

A HR atinge valores máximos no mesmo período crítico, com valores acima dos 95% que atingem um máximo de 98%. No restante período de análise, varia entre 83% e 95%. Não se verificam grandes alterações em termos de amplitude da temperatura, sendo que a TSI mínima registada foi de aproximadamente 14°C. É possível observar que a flutuação das temperaturas se dá de uma forma mais estável, com menos picos (Figura 5.40 e 5.41.).

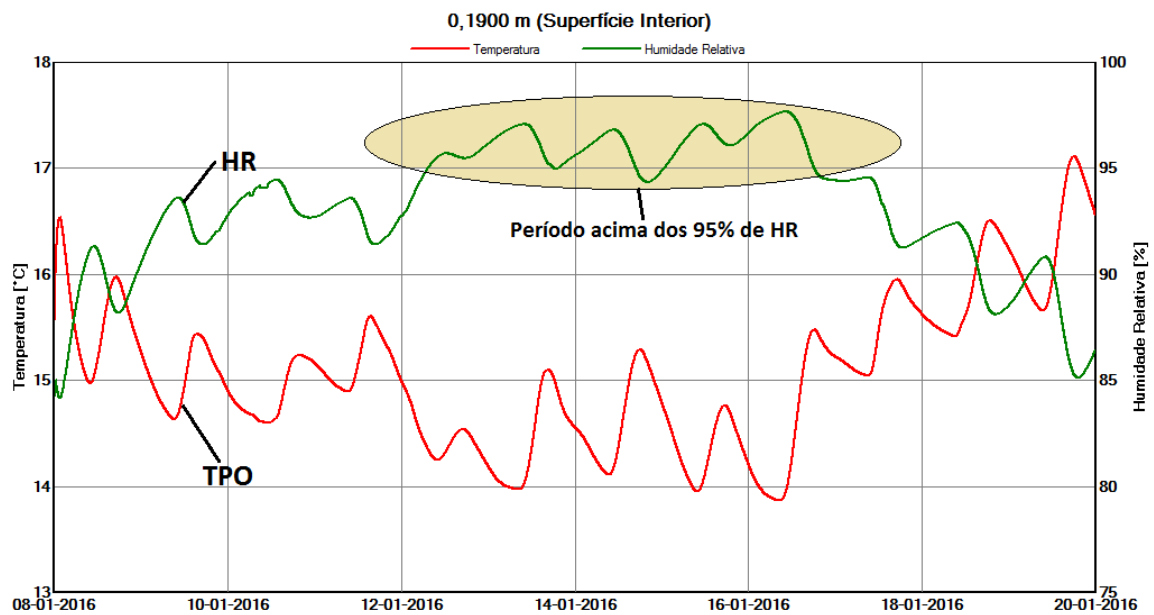


Figura 5.41. – Flutuação da HR e TSI da AT15 com PCM 14°C

5.3.7. ALVENARIA DE TIJOLO FURADO – 20 CM

5.3.7.1. AT20 com Reboco Tradicional

Nesta simulação definiu-se uma alvenaria de tijolo de 15 cm, rebocada pelo interior e pelo exterior com uma argamassa tradicional “Gesso de Cimento” com 2 cm de espessura em ambos os lados.

O gráfico da flutuação da TSI e da TPO demonstra que nesta simulação não ocorrem condensações visto que as duas temperaturas não coincidem. Entre o dia 13 e o dia 16 decorre o período de temperaturas ligeiramente inferiores, cerca de 14,5°C, em que a TSI e a TPO diferem 1°C (Figura 5.42.).

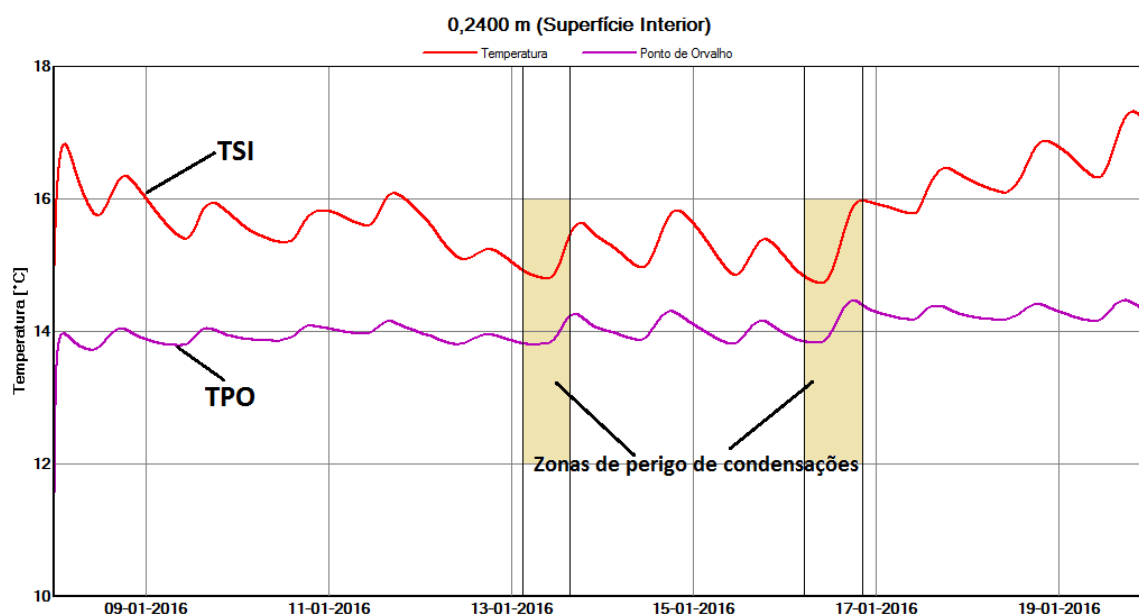


Figura 5.42. – Flutuação da TSI e TPO da AT20 com Reboco Tradicional

Neste mesmo período a HR varia entre os 92% e os 96%. Fora deste período, a diferença é igual ou superior a 1,5°C, e a HR varia entre 85% e 92% (Figura 5.43.)

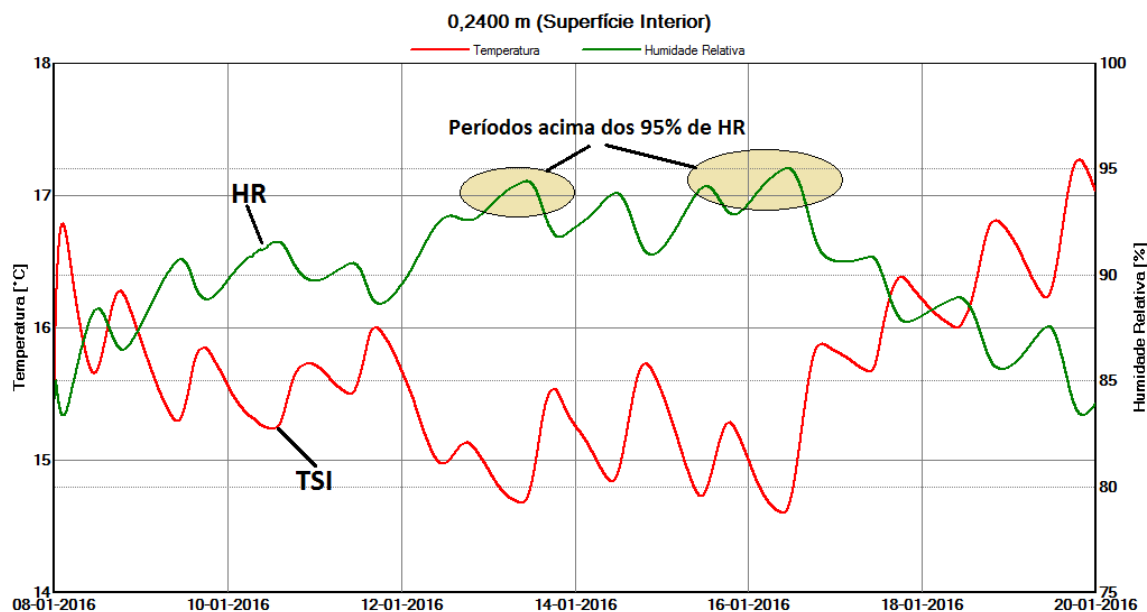


Figura 5.43. – Flutuação da HR e TSI da AT20 com Reboco Tradicional

5.3.7.2. AT20 com PCM de 14°C

Nesta simulação, foi substituída a argamassa tradicional colocada no interior por uma argamassa com 30% de PCM com uma temperatura de fusão de 14°C, com a mesma espessura do revestimento interior original, 2 cm.

O gráfico da flutuação da TSI e da TPO demonstra que nesta simulação também não ocorrem condensações, visto que as duas temperaturas não coincidem. De forma muito geral, os parâmetros observados na simulação anterior mantiveram-se iguais nesta simulação. Entre o dia 13 e o dia 16 decorre o período de temperaturas ligeiramente inferiores, cerca de 15°C, em que a TSI e a TPO diferem 1°C (Figura 5.44.).

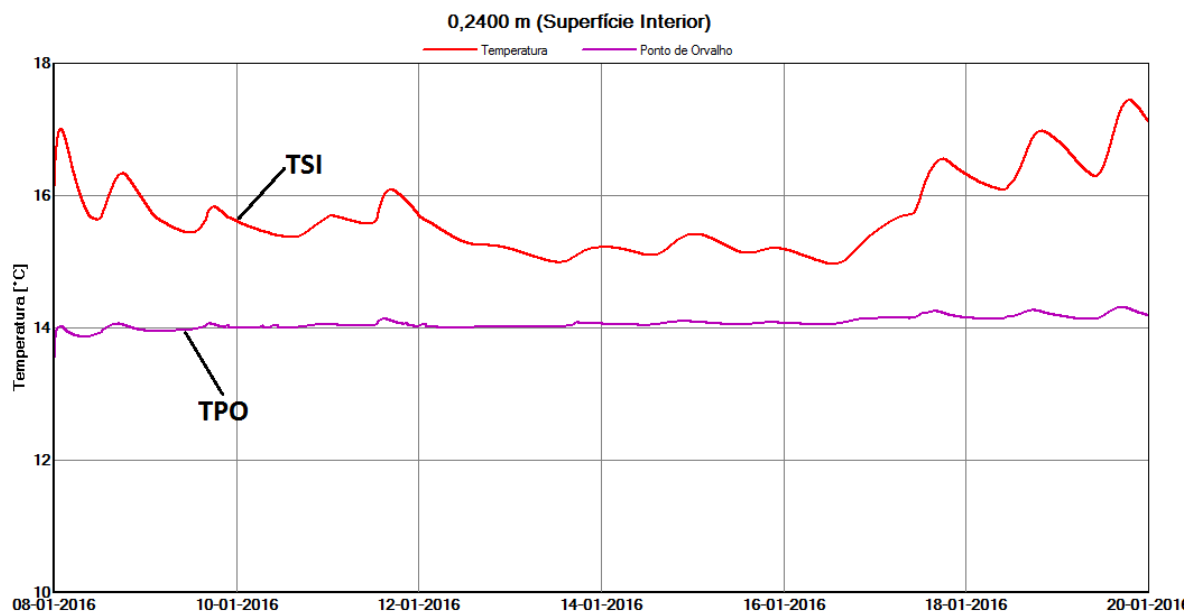


Figura 5.44. – Flutuação da TSI e TPO da AT20 com PCM 14°C

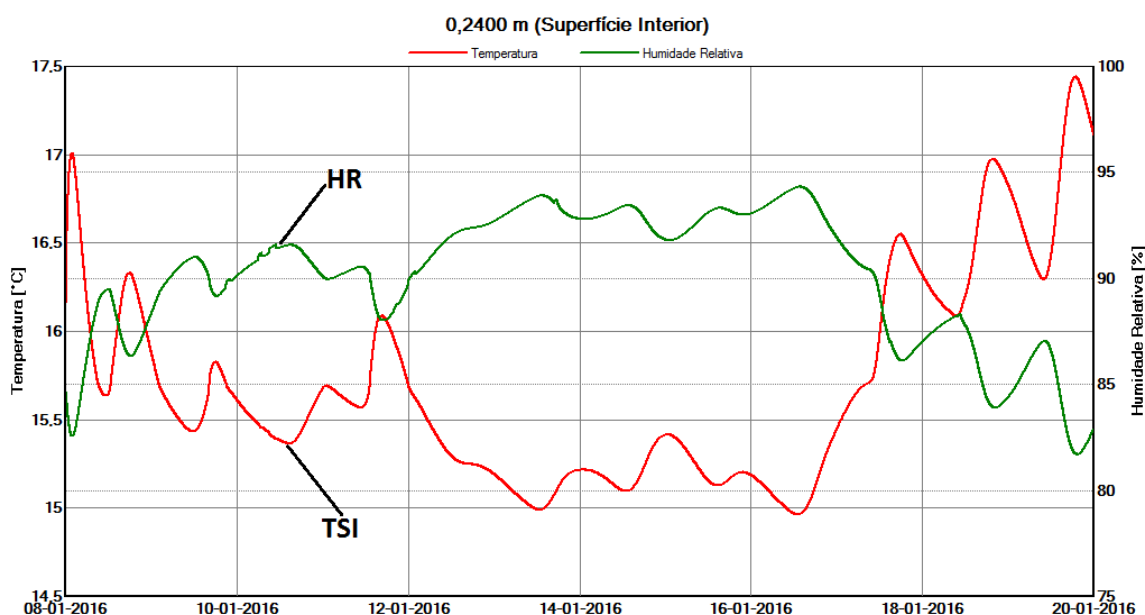


Figura 5.45. – Flutuação da HR e TSI da AT20 com PCM 14°C

Registou-se uma ligeira diminuição da HR para este período, com um máximo de 94%. O que se destaca mais é grande estabilização das temperaturas, TSI e TPO, cujas flutuações são mais estáveis e com menos picos (Figura 5.45.).

5.4. SIMULAÇÕES COM DADOS CLIMÁTICOS DA CIDADE DO PORTO

Para as condições climáticas da cidade do Porto, apenas se apresentam os resultados das simulações com interesse de aplicação das argamassas com PCM. Foram excluídos os elementos cujas simulações não apresentavam qualquer “problema” face à ocorrência de condensações, ou seja, que não demonstravam potencialidade de utilização destes novos materiais. Assim sendo, apresentam-se aqui as simulações da Parede de Betão e das Alvenarias de Tijolo de 15 cm e 11 cm. As simulações foram realizadas de acordo com as condições climáticas exteriores e interiores definidas em 5.2.1 e 5.2.2.

5.4.1. PAREDE DE BETÃO

5.4.1.1. PB com Reboco Tradicional

Nesta simulação definiu-se um elemento de betão de 20 cm rebocado pelo interior e pelo exterior com uma argamassa tradicional “Reboco Mineral” com uma espessura de 3 cm.

Como é visível neste caso existem dois momentos de coincidência entre a TSI e a TPO, indicando que existem dois momentos de ocorrência de condensações na face interna do elemento no decorrer do período de análise. Os momentos de coincidência ocorrem dentro dia 13 e o dia 17, sendo que se

verificam no início e fim deste período. Entre eles verifica-se uma grande proximidade entre a TSI e a TPO apesar de não haver mais pontos ou momentos de coincidência (Figura 5.46.).

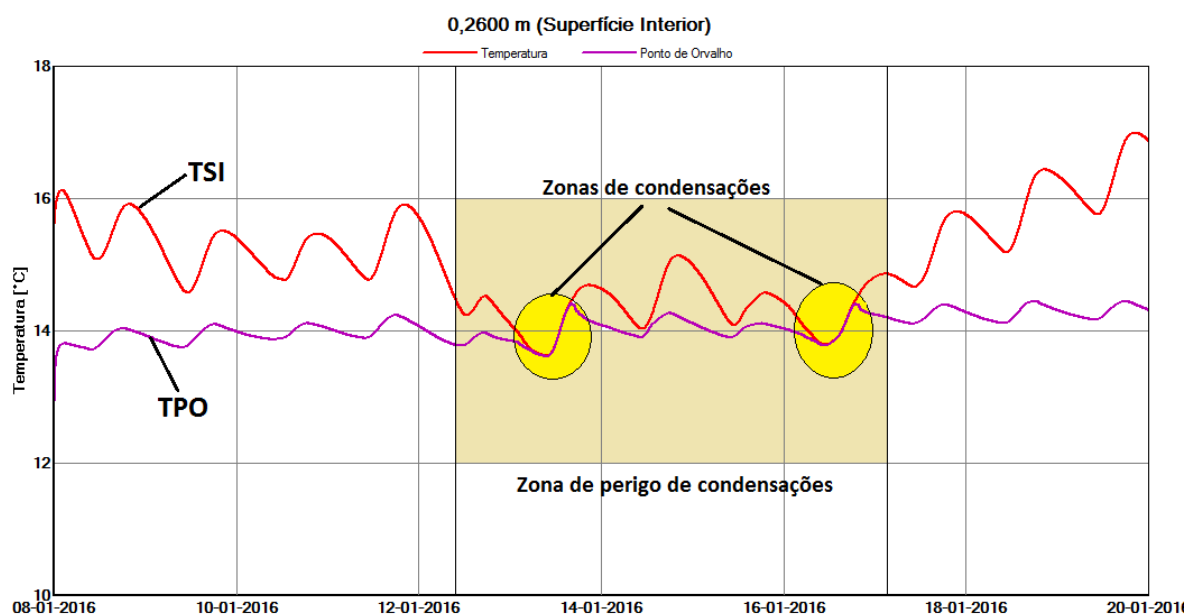


Figura 5.46. – Flutuação da HR e TSI da PB com Reboco Tradicional

A TSI máxima registada é de 17°, enquanto a mínima é de 13,5°C. Entre dia 13 e dia 17 também se registam os maiores valores de HR, entre 95% e 100%, o que suporta a ideia de ocorrência de condensações. A TPO varia entre os 13,5°C e os 14,3°C (Figura 5.46 e 5.47).

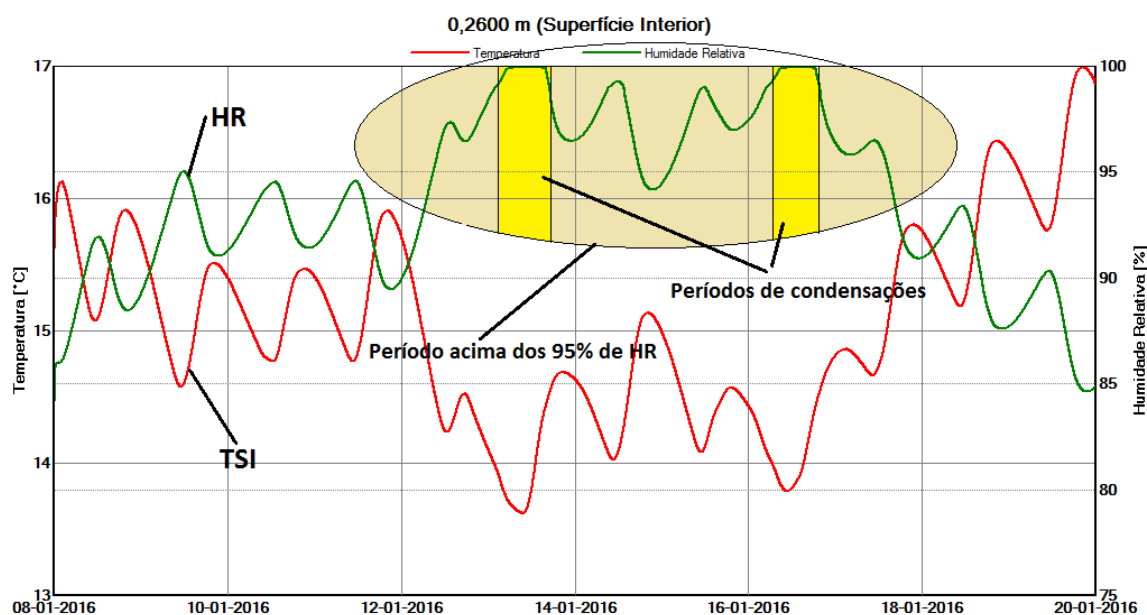


Figura 5.47. – Flutuação da HR e TSI da PB com Reboco Tradicional

Visto que a TPO se situa, em todo o período de análise, próxima dos 14°C e que as condensações se dão para 13,5°C, definiu-se um novo elemento com uma argamassa com 30% de PCM com uma temperatura de fusão de 14°C para colocar como reboco interior, de modo a prevenir as condensações.

5.4.1.2. PB com PCM de 14°C

Relativamente ao elemento original, nesta simulação apenas se substituiu a argamassa tradicional da face interior por uma argamassa com 30% de PCM com uma temperatura de fusão de 14°C, para que a energia resultante da fusão do PCM fizesse aumentar a TSI e evitar que igualasse a TPO.

Observando o gráfico da TSI e da TPO podemos perceber que foi possível terminar com os momentos de coincidência entre ambos. Houve claramente uma melhoria em relação à solução original. Apesar disso, os momentos que anteriormente a TSI igualava a TPO passaram a ser dois momentos de grande proximidade, havendo uma diferença mínima inferior a 0,5°C. De registar também que a TSI mínima passou para os 14°C, sendo que a máxima se manteve (Figura 5.48.).

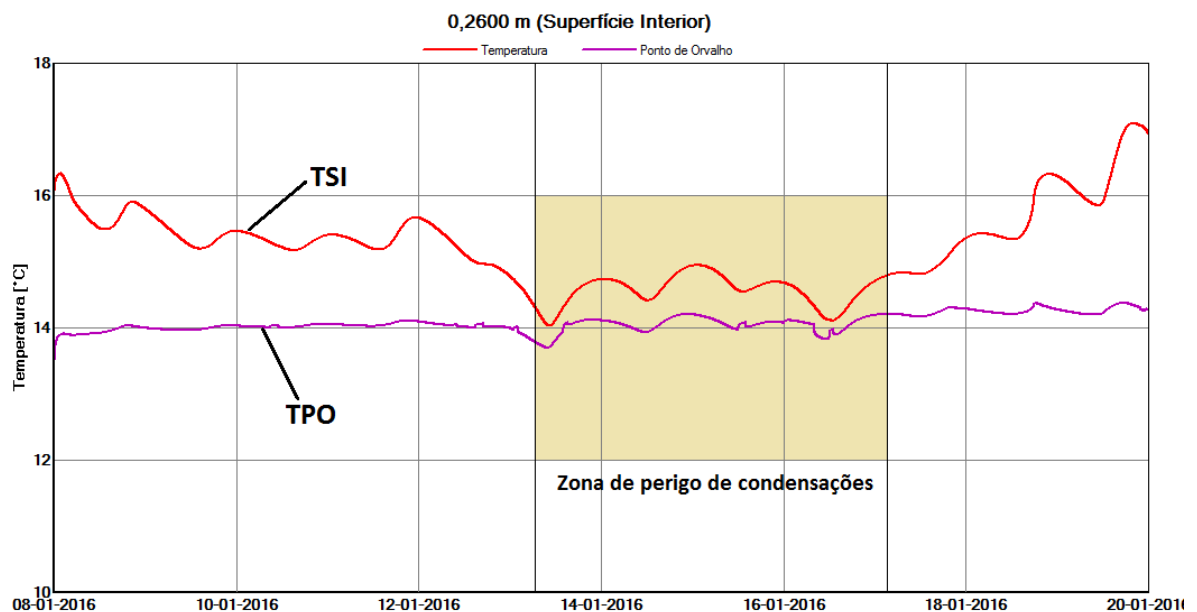


Figura 5.48. – Flutuação da TSI e TPO da PB com PCM 14°C

A HR máxima mantém-se bastante elevada, 98%, mas já não atinge os 100%. A TPO tem um registo mais estável, nos 14°C, apresentando apenas dois picos de descida que evitam a coincidência com a TSI (Figura 5.48 e 5.49.).

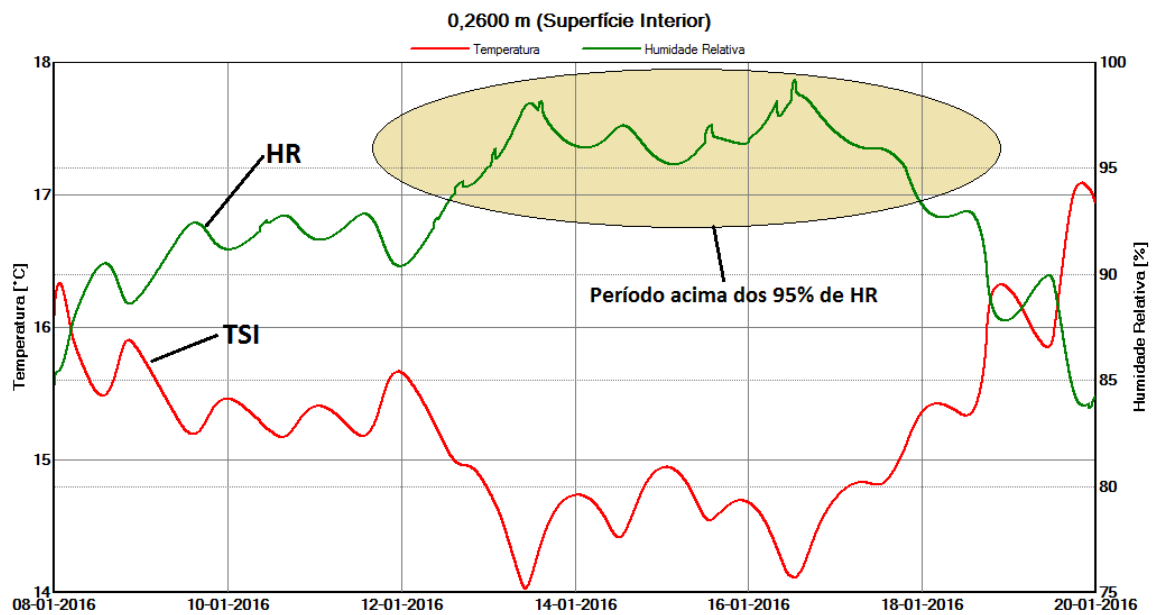


Figura 5.49. – Flutuação da HR e TSI da PB com PCM 14°C

5.4.1.3. PB com PCM de 13°C

Relativamente ao elemento original, nesta simulação apenas se substituiu a argamassa tradicional da face interior por uma argamassa com 30% de PCM com uma temperatura de fusão de 13°C. Apesar de a temperatura no elemento original nunca atingir os 13°C, nos momentos críticos atinge valores inferiores a 14°C, podendo potenciar esta argamassa com PCM.

Em termos gerais, a argamassa utilizada no interior parece ter um efeito positivo relativamente as duas situações anteriores. A TSI em momento algum coincide com a TPO, sugerindo que não ocorrem condensações. Em comparação com a simulação anterior, os dois pontos de maior aproximação entre a TSI e a TPO deixaram de existir, passando apenas a haver um período, de 12 a 17, em que a diferença entre ambas oscila entre os 0,5°C e 1°C. A TSI máxima continua nos 17°C, enquanto a mínima sofreu um ligeiro aumento passando para os 14,5°C (Figura 5.50).

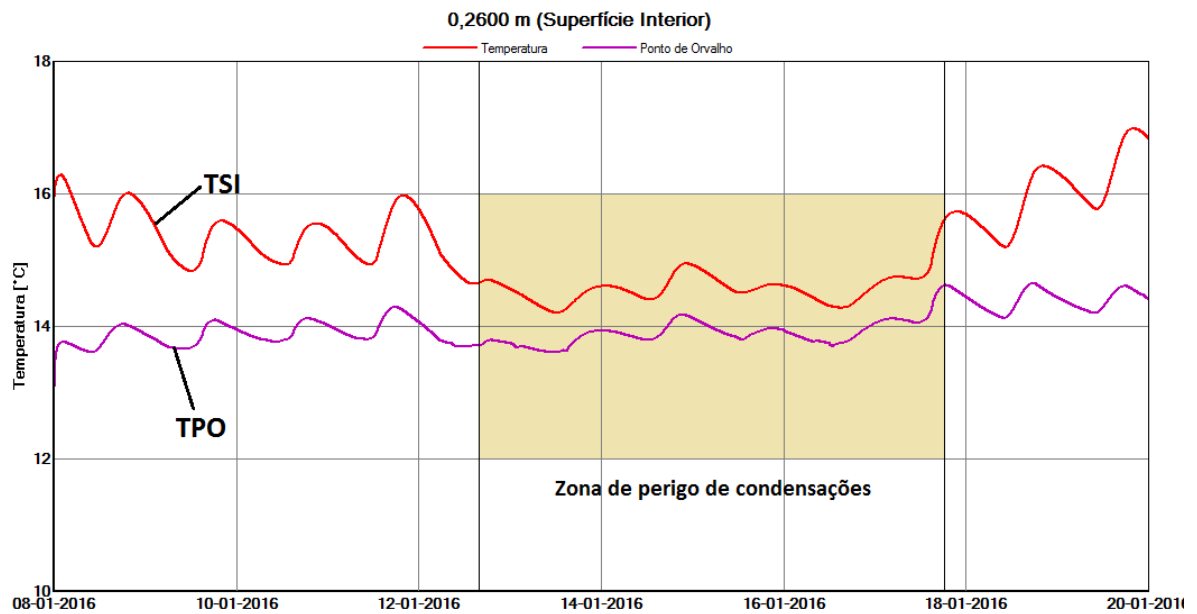


Figura 5.50. – Flutuação da TSI e TPO da PB com PCM 13°C

A HR máxima atinge os 96% no período mais crítico, contudo encontra-se durante toda a análise acima dos 85%. Tal como nas simulações anteriores a TPO varia entre 13,5°C e os 14,5°C, considerando-se relativamente constante (Figura 5.50 e 5.51).

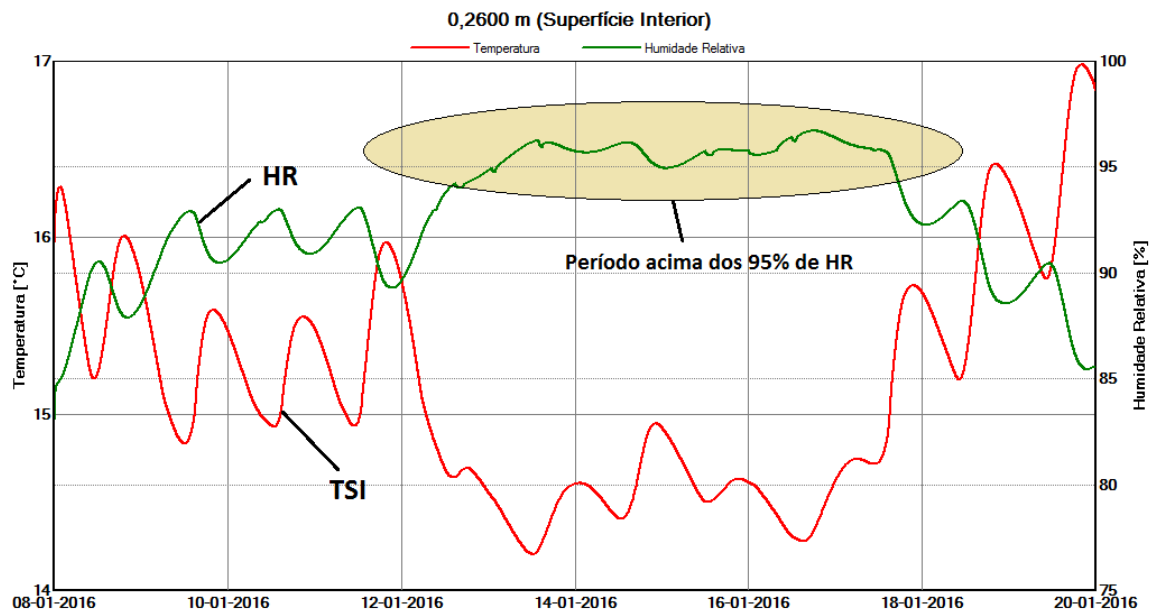


Figura 5.51. – Flutuação da HR e TSI da PB com PCM 13°C

5.4.1.4. PB com PCM de 15°C

Relativamente ao elemento original, nesta simulação apenas se substituiu a argamassa tradicional da face interior por uma argamassa com 30% de PCM com uma temperatura de fusão de 15°C. Desta vez o objetivo era perceber qual o efeito de uma argamassa que liberta a energia a uma temperatura superior à da TPO registada, sendo que é uma temperatura atingida no início da análise, antes de a TSI igualar a TPO.

Quanto às condensações, em nenhum momento a TSI iguala a TPO, logo o efeito da argamassa é positivo relativamente à solução original. No entanto, em comparação com a simulação anterior, há uma reaproximação entre as mesmas entre o dia 13 e o dia 17. Fora desse período, a argamassa parece ter o efeito desejado impedindo a temperatura superficial de baixar dos 15°C (Figura 5.52).

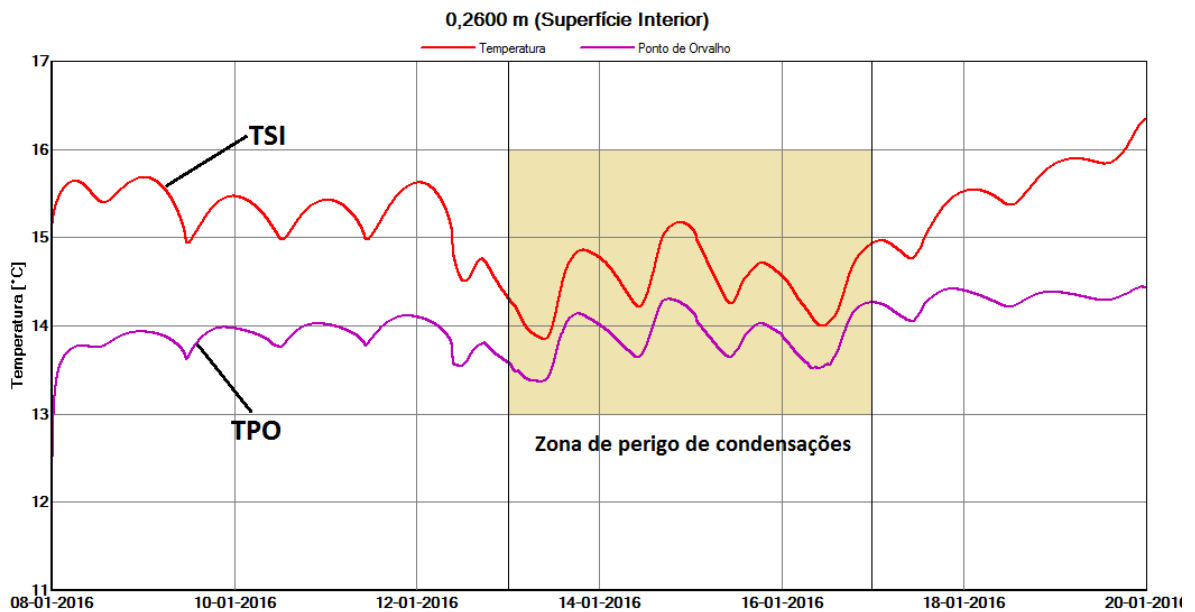


Figura 5.52. – Flutuação da TSI e TPO da PB com PCM 15°C

No entanto a partir do dia 12 há uma descida significativa que leva ao período mais crítico, com a HR a variar entre os 90% e os 96%. Esta argamassa acaba por ter um efeito positivo fora do período mais crítico, mas leva a uma maior aproximação da TSI e da TPO nos dias mais críticos. A TSI máxima é de 16,5°C e a mínima muito próxima dos 14°C. A TPO varia entre os 13,5°C e os 14,5°C (Figura 5.52 e 5.53.).

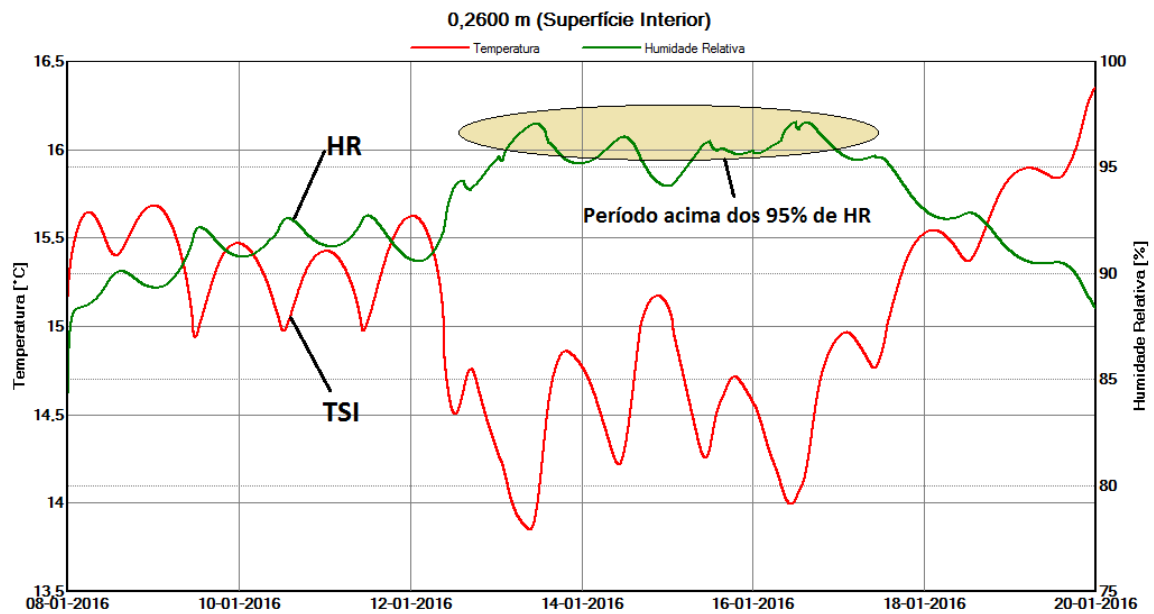


Figura 5.53. – Flutuação da HR e TSI da PB com PCM 15°C

5.4.2. ALVENARIA DE TIJOLO FURADO – 11 CM

5.4.2.1 AT11 com Reboco Tradicional

Para esta simulação foi definida uma alvenaria de tijolo simples com 11 cm de espessura, rebocada pelo interior e pelo exterior por uma argamassa tradicional “Gesso de Cimento” com 3 cm.

Em todo o período de análise não existe nenhum momento em que a TSI iguale a TPO, logo não existe nenhum indício de ocorrência de condensações. A TSI máxima é de 18°C e a mínima de 15°C. Nesta simulação não existe claramente um período crítico visto que os momentos de temperaturas mais baixas não sucedem ou antecedem grandes flutuações (Figura 5.54.).

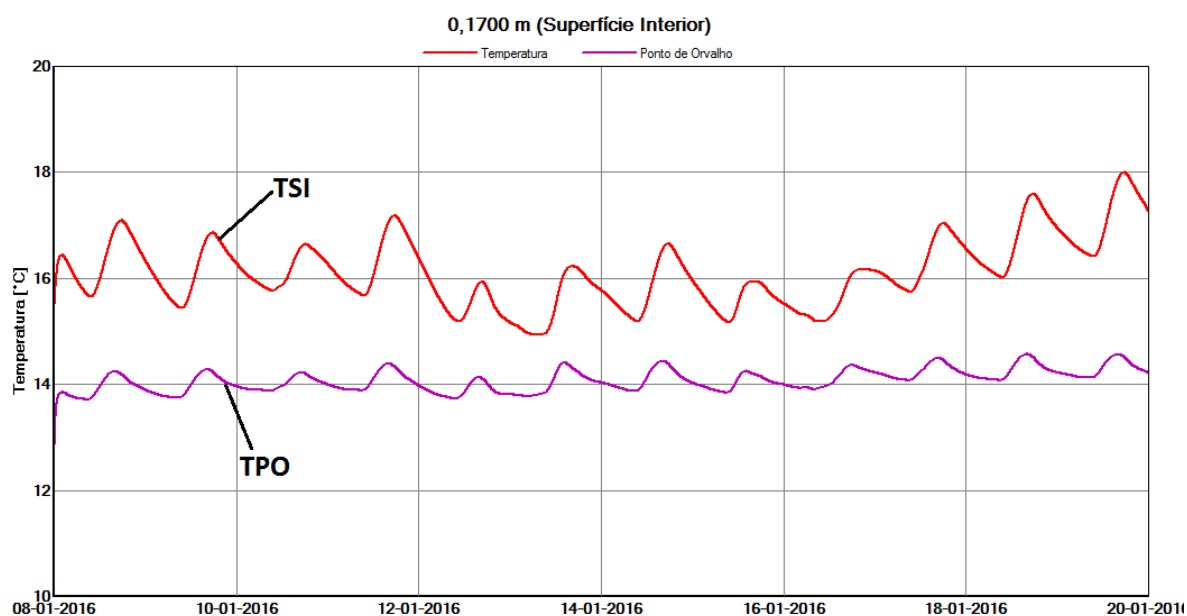


Figura 5.54. – Flutuação da TSI e TPO da AT11 com Reboco Tradicional

O registo dos valores máximos de HR surgem entre o dia 12 e o dia 17, variando entre 90% e 94%. É entre os mesmos dias em que a TSI atinge os seus valores mais baixos. O valor mínimo da HR é de 80%. A TPO não sofre uma grande variação durante a análise, estando sempre muito próxima dos 14°C (Figura 5.54 e 5.55).

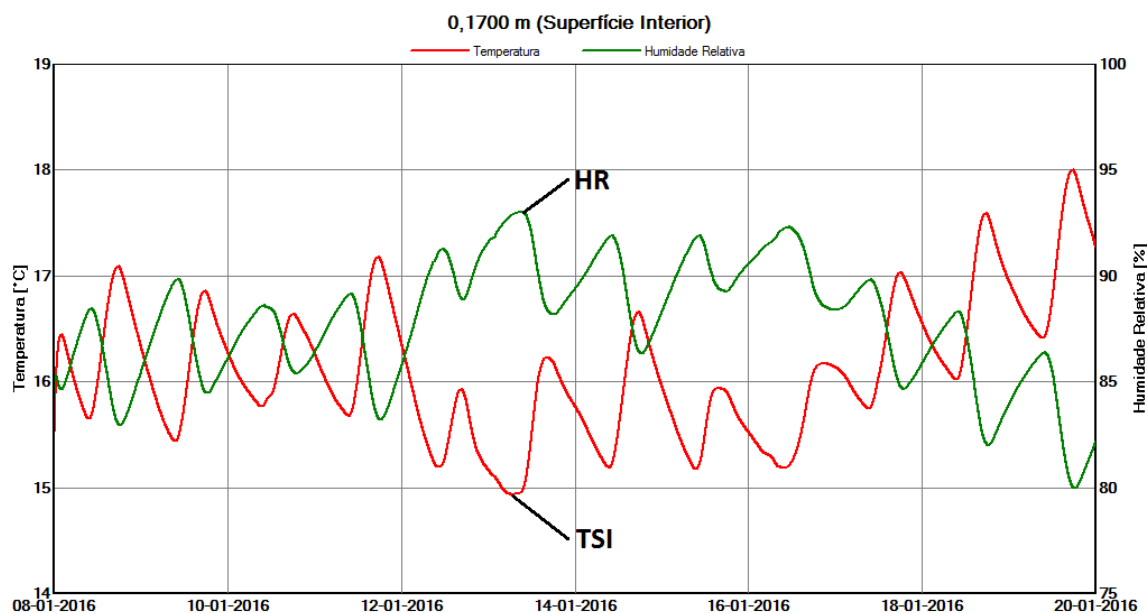


Figura 5.55. – Flutuação da HR e TSI da AT11 com Reboco Tradicional

Considerando que a TPO tem um valor relativamente constante nos 14°C, definiu-se uma argamassa com 30% de PCM com uma temperatura de fusão de 14°C para colocar como reboco interior.

5.4.2.2. AT com PCM de 14°C

Relativamente ao elemento original, nesta simulação apenas se substituiu a argamassa tradicional da face interior por uma argamassa com 30% de PCM com uma temperatura de fusão de 14°C.

Tal como na situação original, não existe nenhum momento de coincidência entre a TSI e a TPO. Mais uma vez, parece não existir risco de condensações. Comparativamente ao elemento original, esta argamassa parece ter em efeito na estabilização da TPO em todo o período de análise, situando-se nos 14°C, e uma pequena estabilização da TSI ente o dia 12 e o dia 17. Neste período a diferença mínima entre as temperaturas sofreu um ligeiro aumento, subindo para 1,5°C. A TSI mínima aumentou ligeiramente passando para os 15,5° enquanto a máxima se manteve nos 18°C (Figura 5.56.).

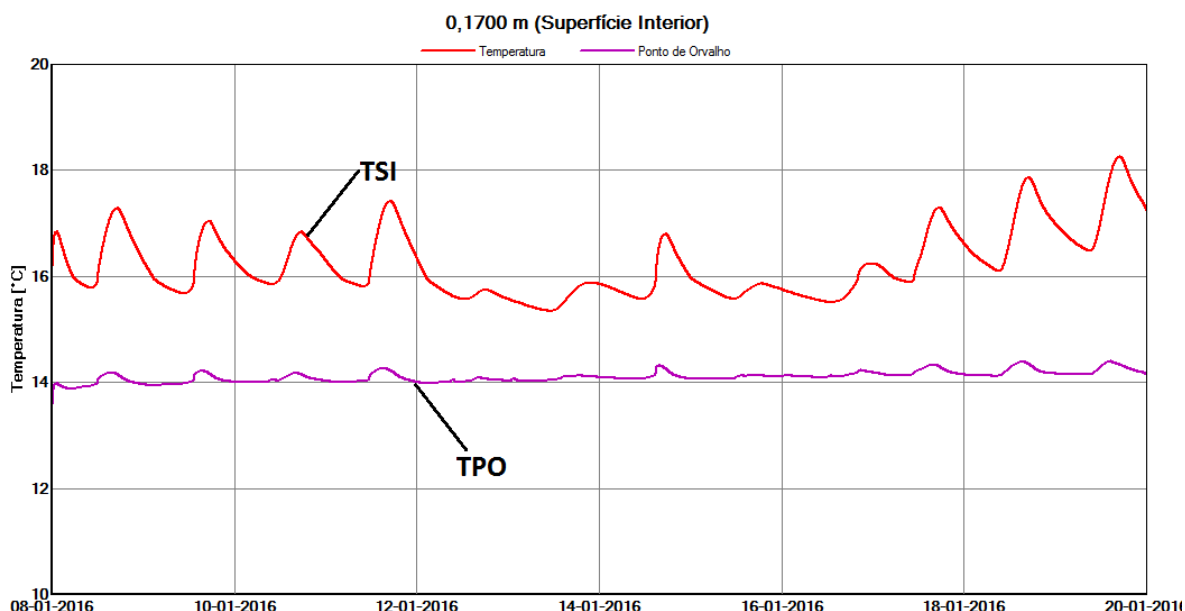


Figura 5.56. – Flutuação da TSI e TPO da AT11 com PCM 14°C

A HR máxima registada foi de 92%, para o período de menores temperaturas, e o mínimo foi de 78% (Figura 5.57.).

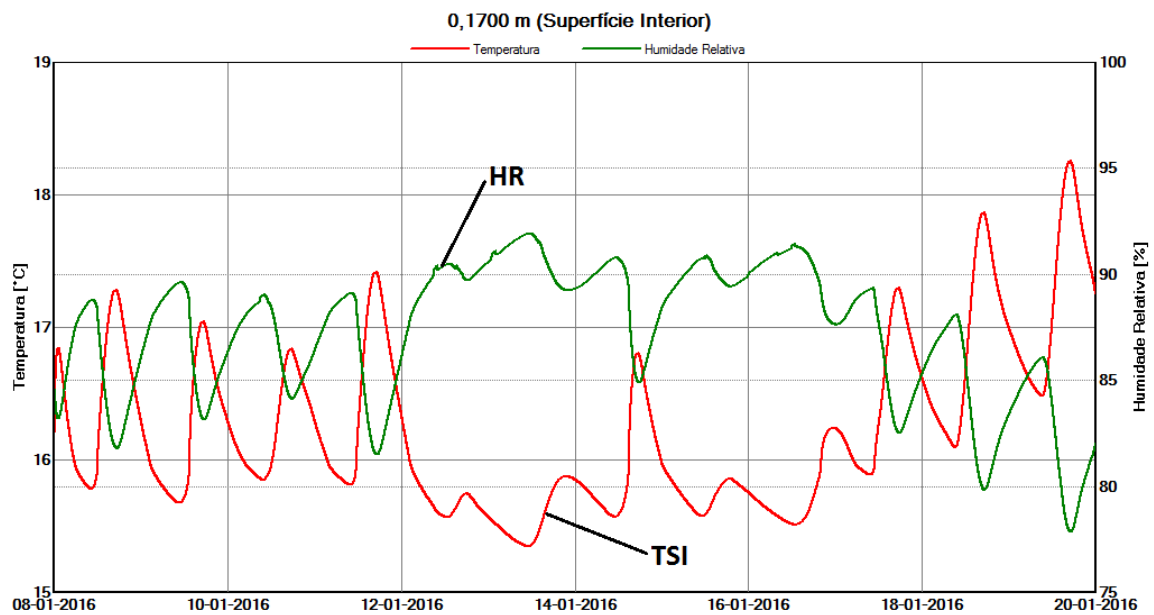


Figura 5.57. – Flutuação da HR e TSI da AT11 com PCM 14°C

5.4.2.3. AT11 com PCM de 15°C

Relativamente ao elemento original, nesta simulação apenas se substituiu a argamassa tradicional da face interior por uma argamassa com 30% de PCM com uma temperatura de fusão de 15°C. Neste caso o objetivo é tentar definir um limite mínimo da TSI para que haja uma maior diferença entre a TSI e a TPO.

A análise do gráfico da variação da TSI e da TPO demonstra uma clara melhoria em relação às simulações anteriores. A TSI nunca coincide com a TPO e tem sempre mais de 2°C de diferença, o que para além de demonstrar a inexistência de condensações dá uma boa margem de segurança (Figura 5.58.).

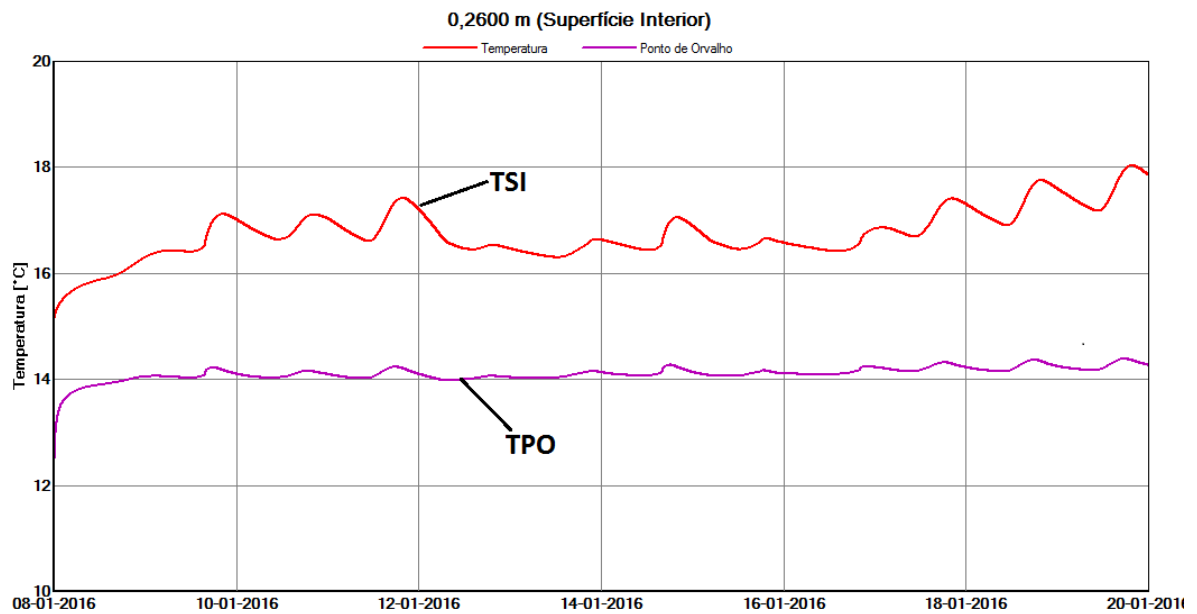


Figura 5.58. – Flutuação da TSI e TPO da AT11 com PCM 15°C

Esta observação é suportada pelos valores da HR, que apesar de no início estar nos 88%, desce aos 82% e acaba por chegar a um mínimo de 80%. A TSI máxima é de 18°C e a mínima de 15°C. A TPO tem uma flutuação muito ligeira, aproximando-se sempre dos 14°C. Nesta simulação, para além de a TSI nunca igualar a TPO, existe uma diferença considerável entre as duas que transmite maior segurança em relação à ocorrência de condensações Figura (5.59 e 5.60.)

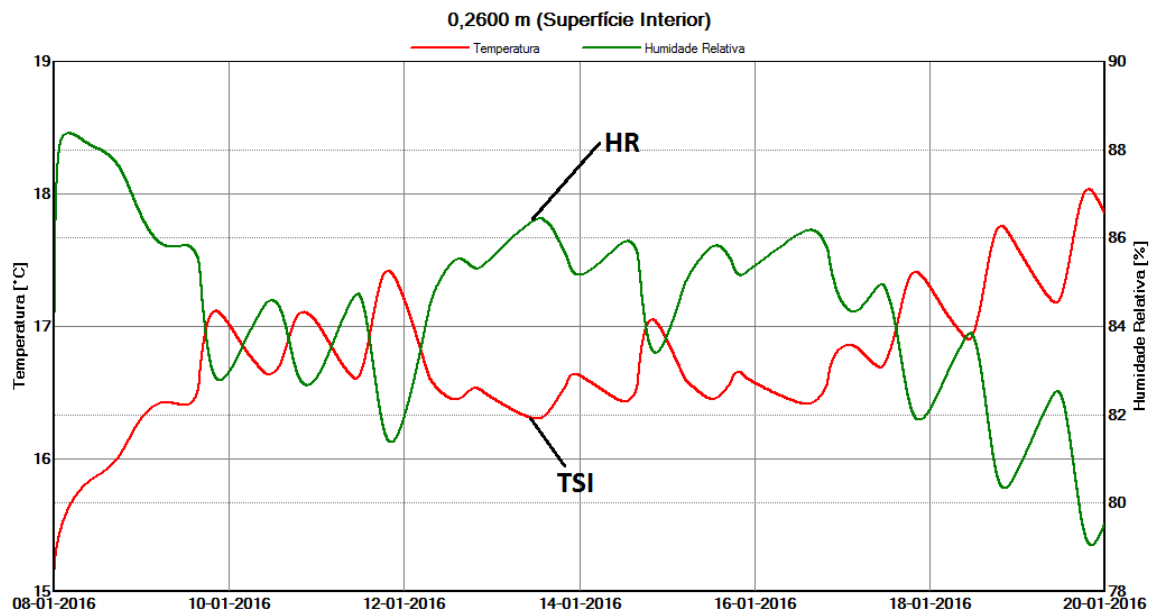


Figura 5.59. – Flutuação da HR e TSI da AT11 com PCM 15°C

5.4.3. TIJOLO FURADO – 15 CM

5.4.3.1. AT15 com Reboco Tradicional

Para esta simulação foi definida uma alvenaria de tijolo simples com 15 cm de espessura, rebocada pelo interior e pelo exterior por uma argamassa tradicional “Gesso de Cimento” com 2 cm.

Em termos de condensações, o gráfico da variação da TSI e da TPO demonstra que estas não ocorrem visto que as duas linhas nunca coincidem, mantendo-se a uma distancia mínima de 1°C. A TSI regista um máximo de 18°C e um mínimo de 15,5°C, tendo uma flutuação relativamente constante. Nesta simulação o período de temperaturas mais baixas não se sobressai do restante, ocorrendo entre o dia 13 e o dia 17 (Figura 5.60.).

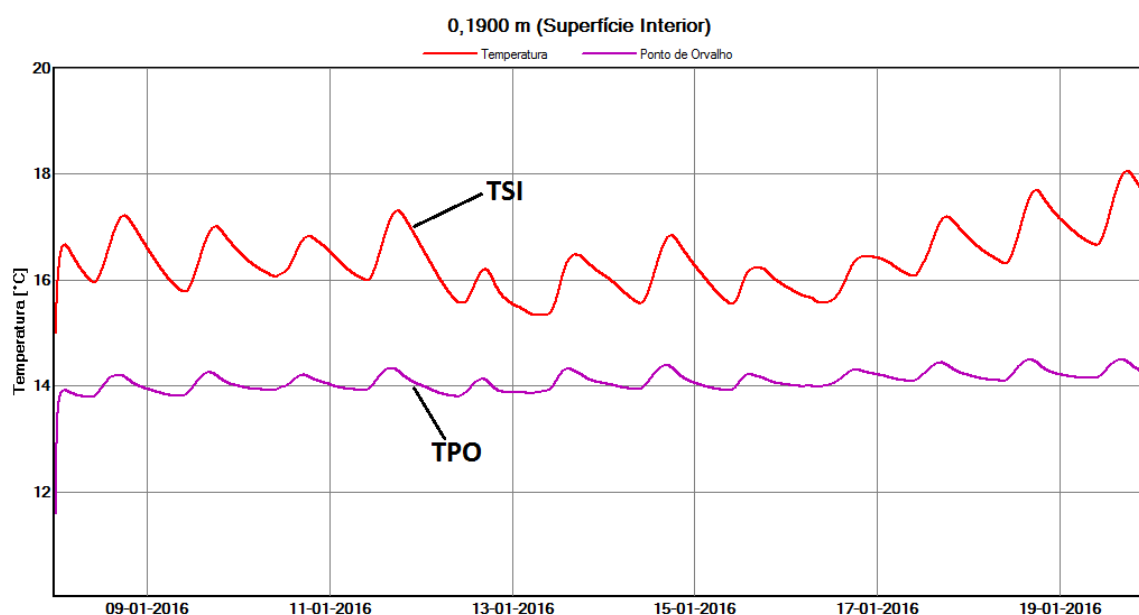


Figura 5.60. – Flutuação da TSI e TPO da AT15 com Reboco Tradicional

É para o mesmo período que se registam os maiores valores de HR que atingem um máximo de 92%, e é já no final do período de análise que atinge um mínimo de 80%. A TPO não sofre uma grande variação durante a análise, estando sempre muito próxima dos 14°C (Figura 5.60 e 5.61.).

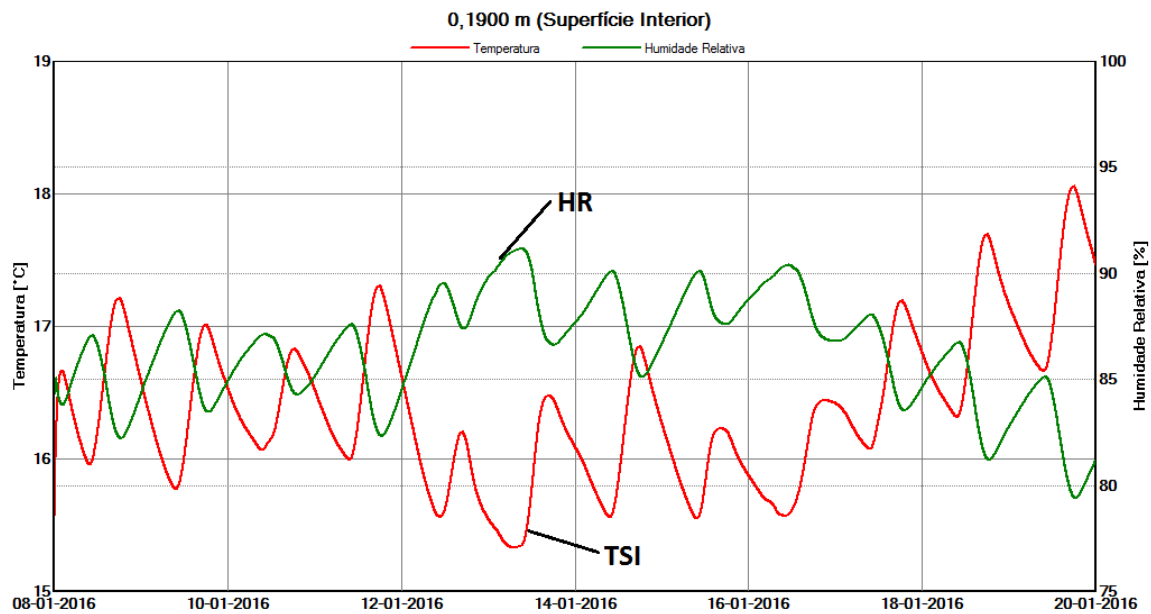


Figura 5.61. – Flutuação da HR e TSI da AT15 com Reboco Tradicional

Considerando que a TPO tem um valor relativamente constante nos 14°C, definiu-se uma argamassa com 30% de PCM com uma temperatura de fusão de 14°C para colocar como reboco interior.

5.4.3.2. AT15 com PCM de 14°C

Relativamente ao elemento original, nesta simulação apenas se substituiu a argamassa tradicional da face interior por uma argamassa com 30% de PCM com uma temperatura de fusão de 14°C.

Em comparação com a situação original, não há evidências de alterações significativas nos resultados gráficos, quer nas temperaturas quer na HR. A TSI continua com uma flutuação relativamente constante não tendo grandes variações, apresentando os mesmos máximos e mínimos (Figura 5.62.).

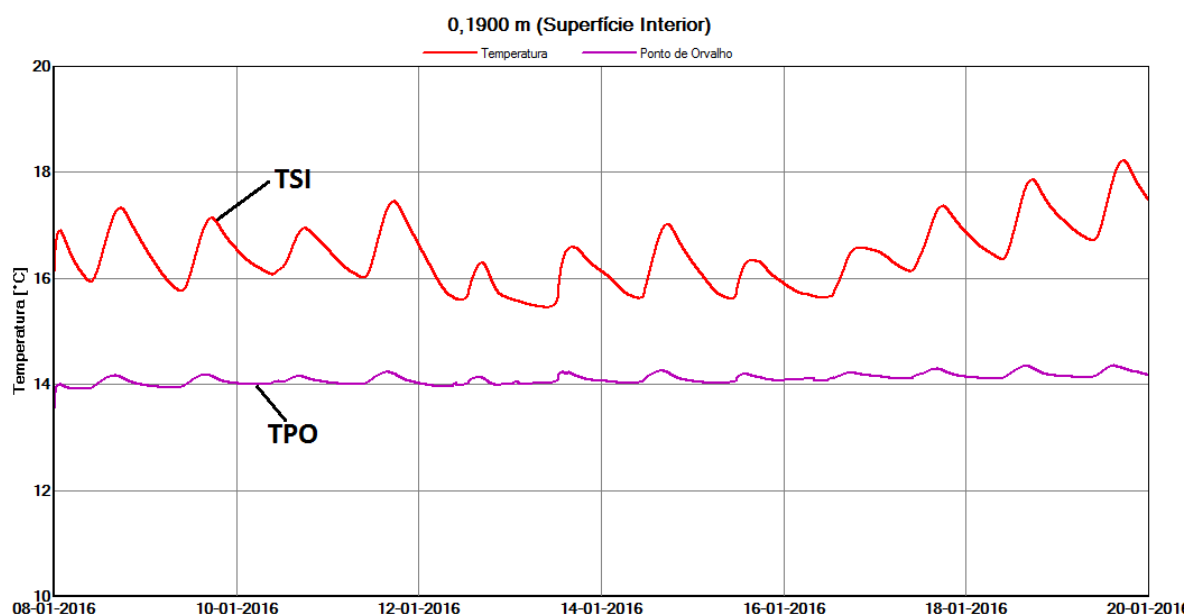


Figura 5.62. – Flutuação da TSI e TPO da AT15 com PCM 14°C

A HR varia entre 78% e 92%. A diferença mínima entre a TSI e a TPO é aproximadamente de 1,5°C, tal como na simulação anterior (Figura 5.62 e 5.63).

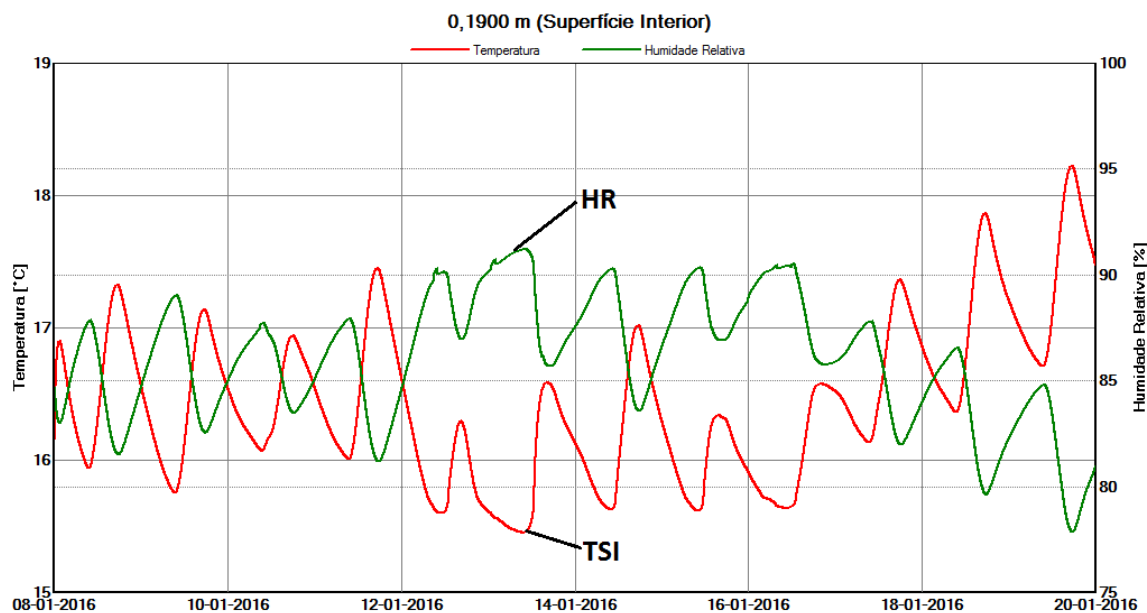


Figura 5.63. – Flutuação da HR e TSI da AT15 com PCM 14°C

5.4.3.3 AT15 com PCM de 15°C

Relativamente ao elemento original, nesta simulação apenas se substituiu a argamassa tradicional da face interior por uma argamassa com 30% de PCM com uma temperatura de fusão de 15°C. Neste caso o objetivo é tentar definir um limite mínimo da TSI para que haja uma maior diferença entre a TSI e a TPO.

Graficamente é visível uma melhoria em relação à simulação realizada anteriormente. A linha da TSI nunca coincide com a linha da TPO, e para além disso, estão sempre com uma diferença igual ou superior a 2°C. O gráfico demonstra uma boa segurança quanto à prevenção da ocorrência de condensações neste elemento. A TSI mínima registada é de 15°C, enquanto a máxima é de 18°C. A argamassa acaba por ter um efeito estabilizador das temperaturas reduzindo significativamente os picos ao longo da flutuação (Figura 5.64.)

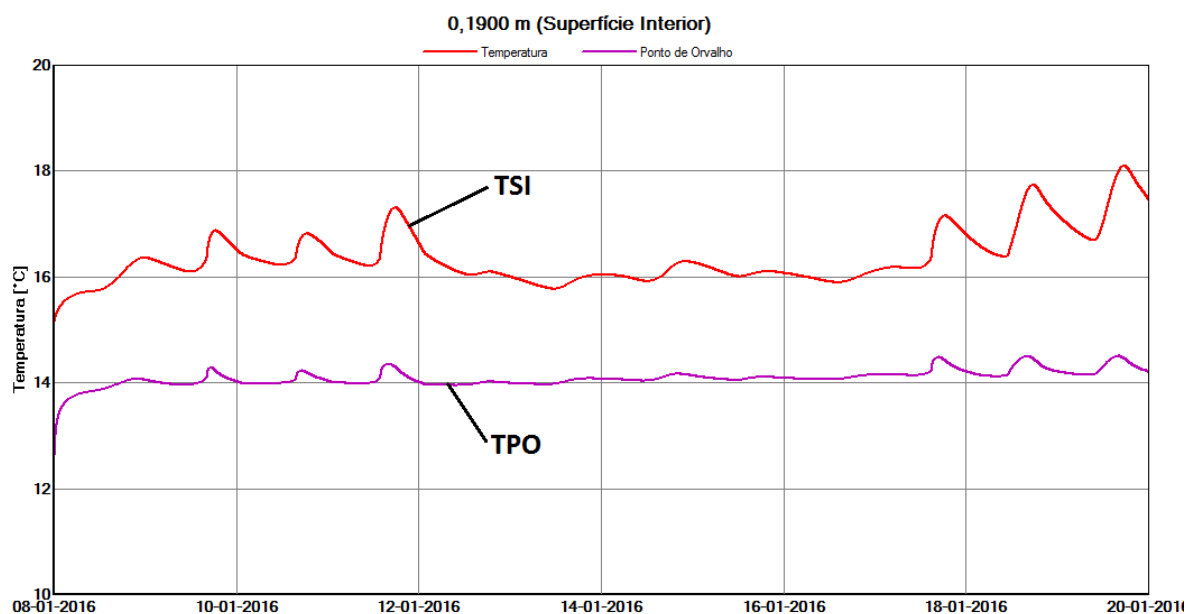


Figura 5.64. – Flutuação da TSI e TPO da AT15 com PCM 15°C

A HR tem um máximo de 89%, e um mínimo de 79%. A TPO mantém-se relativamente constante nos 14°C (Figura 5.64 e 5.65).

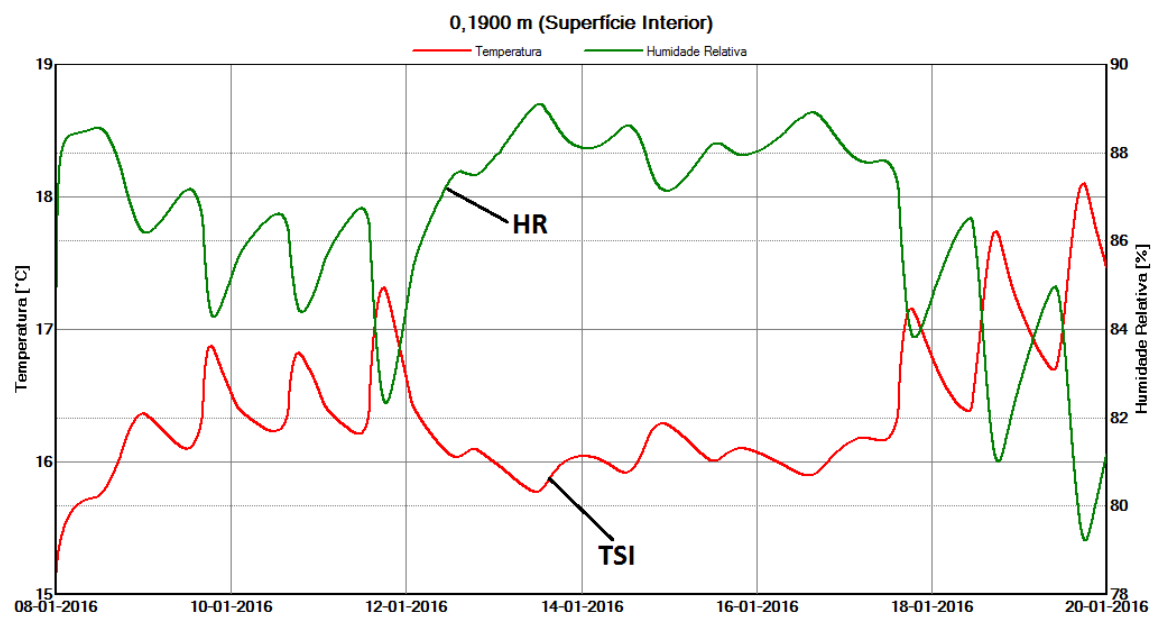


Figura 5.65. – Flutuação da HR e TSI da AT15 com PCM 15°C

6

CONCLUSÕES

6.1. ANÁLISE DE RESULTADOS

Quanto aos resultados obtidos, constatarem-se panoramas um pouco diferentes para as duas cidades analisadas. Como seria de esperar, os resultados foram melhores na cidade do Porto devido ao seu clima mais ameno que provoca situações menos problemáticas nos elementos face às condensações. Já na cidade de Bragança, com temperaturas mais baixas, observaram-se mais situações de ocorrência de condensações que dificultaram a atuação dos PCM incorporados nas argamassas.

Na cidade de Bragança, os resultados das simulações nas alvenarias de pedra demonstraram principalmente o efeito estabilizador dos PCM na temperatura superficial interior (TSI) e da respetiva temperatura de ponto de orvalho (TPO) dos elementos. Na AP40 e na AP30 este efeito foi bastante visível quando se substituíram os rebocos tradicionais por argamassas com PCM com ponto de fusão de 13°C, que inclusivamente fez com que deixassem de ocorrer condensações na AP30. A utilização desta argamassa fez com que a TSI mínima da AP40 e da AP30 aumentassem cerca de 0,5°C. O facto de estes elementos terem uma espessura relativamente grande beneficia os resultados. Na AP20, de espessura menor, as argamassas com PCM não são capazes de impedir a ocorrência de condensações, no entanto a utilização de uma argamassa com PCM com ponto de fusão de 12°C fez com que o período de condensações reduzisse de 96h, quando era utilizado um reboco tradicional, para 36h, e aumentou a TSI mínima de 12°C para 12,5°C. Em todas as simulações com as alvenarias de pedra não se registaram alterações significativas das temperaturas mínimas, tal como dos valores de humidade relativa, que se mantiveram sempre acima dos 95% com os dois tipos de reboco interior.

Os resultados com a parede de betão foram semelhantes aos da alvenaria de pedra com 20 cm de espessura, o facto de serem dois elementos com espessura reduzida e com uma grande condutibilidade térmica explica a semelhança. A PB com reboco tradicional apresenta um período de condensações de 11 dias, e quando é usada uma argamassa com PCM com ponto de fusão de 12°C o período passa a ser de 4 dias. A argamassa com PCM permitiu aumentar a TSI mínima de 11,5°C para 12°C. Naturalmente, o período da humidade relativa a 100% diminui, mas os valores continuam a ser bastante altos, acima dos 95%, durante praticamente todo o período de análise.

Quanto às alvenarias de tijolo furado, nenhum elemento apresenta condensações quando é utilizado um reboco tradicional. Visto que os tijolos são furados, o ar presente nesses espaços cria uma descontinuidade no material e faz com que a sua condutibilidade térmica seja mais reduzida, o que resulta num bom comportamento das alvenarias face às condensações. Na AT11 a substituição do reboco tradicional por uma argamassa com PCM com ponto de fusão de 12°C fez com que houvesse

uma estabilização da TSI e da TPO, principalmente na zona de perigo de condensações. Esta argamassa fez com a TSI mínima aumentasse de 13,4°C para 14°C e reduziu o período de tempo com humidade relativa acima dos 95% em 4 dias. Fora da zona de perigo de condensações também se observa um maior afastamento entre a TSI e a TPO, fruto da estabilização das duas. Para a AT15, a utilização de uma argamassa com PCM com ponto de fusão de 14°C, em substituição do reboco tradicional, fez com que a TSI e a TPO registassem uma flutuação mais estável, sem muitos picos. As temperaturas mínimas e valores de humidade relativa não sofreram alterações. Para o elemento de maior espessura, a AT20, os resultados da simulação com reboco tradicional já não apresentam uma situação tão crítica, devido à espessura significativa aliada a uma condutibilidade térmica baixa. Ainda assim, a utilização de uma argamassa com PCM com ponto de fusão de 14°C faz com que a TSI e a TPO sejam mais estáveis e a humidade relativa não ultrapasse os 95%.

Também é de registar que algumas argamassas tiveram um feito negativo em alguns dos elementos, face a utilização dos rebocos tradicionais. Esta situação verificou-se quando foi utilizada uma argamassa com PCM com ponto de fusão de 14°C nas AP40, AP30 e AP20. Na AP40, esta argamassa fez com que a TSI e a TPO se aproximassem, com diferenças inferiores a 0,1°C, resultando em valores de humidade relativa muito próximos dos 100%. Nos casos da AP30 e da AP20 o efeito negativo foi muito mais notório visto que aumentou os períodos de ocorrência de condensações dos dois elementos, em 4 dias na AP30 e em 2 dias na AP20.

Para a cidade do Porto, como foi previamente explicado, apenas se apresentaram os resultados das simulações da parede de betão e das alvenarias de tijolo de 11cm e 15 cm. Na PB a utilização de um reboco tradicional resultou em dois momentos em que a TSI igualou a TPO, durante o período de análise, ou seja, dois momentos de ocorrência de condensações. A substituição do reboco tradicional por uma argamassa com PCM com ponto de fusão de 14°C, e uma com ponto de fusão de 12°C, fez com que não se verificasse a ocorrência de condensações. No entanto, a argamassa com PCM com ponto de fusão de 12°C conseguiu manter a diferença mínima entre a TSI e a TPO acima do 0,5°C, baixou a humidade relativa para 96% e estabilizou as temperaturas, principalmente no período em que elas estão mais próximas. A argamassa com PCM com ponto de fusão de 14°C fez com que a diferença mínima entre a TSI e a TPO fosse cerca de 0,1°C, o que resulta em valores de humidade relativa muito próximos dos 100%. Quanto à utilização de uma argamassa com ponto de fusão de 15°C, temperatura superior à TPO, resultou num aumento da diferença entre a TSI e a TPO, fora da considerada zona de perigo de condensações, em 1,5°C, face ao reboco tradicional. Dentro dessa zona, os resultados são bastante semelhantes aos da simulação que a antecede. Há de facto uma melhoria significativa nos períodos em que não existia risco de condensações, mas não consegue eliminar o período em que a TSI e a TPO se aproximam.

Na AT11 a substituição do reboco tradicional por uma argamassa com PCM com ponto de fusão de 14°C aumentou a TSI mínima cerca de 0,5°C e fez com que a TSI e TPO estabilizassem, aumentando a diferença mínima entre elas, em cerca de 1°C. A humidade relativa não sofreu alterações significativas, passando de um máximo de 94% para 92%. Quando foi utilizada uma argamassa com PCM com ponto de fusão de 15°C, as melhorias foram mais notáveis. A TSI mínima aumentou mais de 1°C e a diferença entre a TSI e a TPO manteve-se sempre acima de 2°C, face aos resultados do reboco tradicional. Naturalmente, a humidade relativa desceu para um máximo de 88% no início do período de análise, contrariamente às outras simulações em que o máximo se registava a meio do período de análise. Na AT15 as argamassas com PCM com ponto de fusão de 14°C e 15°C aumentaram a diferença mínima entre a TSI e a TPO cerca de 0,5°C e 1°C, respetivamente, face ao reboco tradicional. Mas o grande efeito que é possível observar, e que aumenta da primeira argamassa

com PCM para a segunda, é estabilização da TSI e da TPO. Relativamente a TSI mínima e humidade relativa, os valores mantêm-se muito próximos dos resultados com reboco tradicional.

6.2. CONCLUSÕES FINAIS

Relativamente ao conhecimento sobre os materiais de mudança de fase, PCM, já existe um vasto número de estudos e investigações que comprovam os seus benefícios na área da térmica, e nos estudos energéticos em edifícios. A grande capacidade de absorção e libertação de energia sobre a forma de calor latente faz com que estes materiais influenciem, de forma passiva, o ambiente interno de um edifício, estabilizando a sua temperatura. Esta estabilização faz com que seja possível reduzir os recursos tradicionais para a manter a temperatura interior dentro dos níveis de conforto, inclusive meios mecânicos. No entanto, na área da higratérmica ainda não existem muitos estudos com os PCM. Ainda não é clara qual a influência dos PCM sobre a humidade relativa e temperatura de ponto de orvalho do elemento construtivo onde estes são incorporados. Sendo que os PCM são capazes de libertar e absorver energia sobre a forma de calor, a sua presença terá influência direta na temperatura do elemento, logo é compreensível que existe um potencial para a sua utilização de forma a prevenir a ocorrência de condensações no elemento. Já é possível encontrar investigações em que os PCM são utilizados como um material que faz parte de um compósito, juntamente com materiais tipicamente higroscópicos, para estudar a sua influência na temperatura e humidade relativa do ambiente interno onde este é introduzido. Contudo estas recentes investigações procuram associar os benefícios dos PCM na estabilização da temperatura com os benefícios dos materiais higroscópicos, que têm capacidade de adsorver e desadsorver vapor de água, e assim estabilizar a humidade relativa. O que se procurou neste trabalho foi perceber a relação direta da influência dos PCM, incorporados num material de construção, no comportamento higratérmico de um elemento construtivo.

Visto que as condensações superficiais internas são um tipo de patologias muito frequentes nos edifícios, é pertinente procurar soluções alternativas e mais flexíveis às atuais. As soluções que existem neste momento obrigam à alteração das fachadas, pela colocação de isolamento no exterior, ou perda de área habitável e inércia térmica dos elementos, pela colocação do isolamento no interior, o que por vezes pode provocar mais problemas. Nas intervenções de edifícios antigos, o que acontece muitas vezes é que há uma incompatibilidade entre a melhor solução, colocar isolamento no exterior, e a necessidade de preservação da arquitetura original. Face a este panorama, é natural que já existam análises a soluções alternativas que permitam preservar as fachadas mas que não tenham influência negativa no interior do edifício, nem nas características físicas dos elementos construtivos. Os estudos aqui apresentados apontam para a utilização de materiais tradicionais atribuindo-lhes novas características, para que estes possam desempenhar mais funções. Através da adição de outros elementos na composição tradicional, procura-se atribuir novas características aos materiais dando-lhes novas funcionalidades. Os revestimentos interiores e os tijolos cerâmicos furados são exemplos de materiais tradicionais onde há bastante facilidade de introduzir novos componentes que lhes permitem cumprir novas funções, como foi exemplificado no Capítulo 2. Visto que já existiam estudos bem-sucedidos sobre a caracterização de argamassas de revestimento com PCM, foi possível perceber que este novo material poderia ter grande utilidade na prevenção de condensações em edifícios antigos, e na correção de edifícios mais recentes que apresentem a mesma patologia devido à existência de pontes térmicas.

Como não foi encontrada informação relativa ao comportamento das argamassas com PCM na prevenção de condensações internas, considerou-se este estudo como uma primeira análise. Para tal foi essencial o uso do modelo numérico WUFI Pro. O modelo permitiu a caracterização dos materiais

necessários para as simulações e a introdução dos dados necessários para caracterizar os ambientes exterior e interior. A grande facilidade da introdução e alteração dos dados, e a rapidez das análises possibilitou um grande número de análises assim como a otimização das simulações. A utilização de um modelo de regime variável aproxima as simulações de uma situação de exposição climática real, através da utilização de dados registados de determinado local, sendo que neste caso foram utilizados dados das cidades do Porto e Bragança. Os modelos numéricos são ferramentas essenciais para o desenvolvimento de novos materiais a utilizar nas construções, e para a sua validação.

Depois da análise dos resultados pode concluir-se que, de facto, a utilização de argamassas com PCM para mitigar a ocorrência de condensações interiores demonstra potencial. Em todas as simulações estas argamassas foram capazes de estabilizar a temperatura superficial e a temperatura de ponto de orvalho dos elementos. Este efeito já conhecido deve-se ao facto dos PCM armazenarem energia sob a forma de calor latente quando atingem o seu ponto de fusão, fazendo com que as temperaturas permaneçam relativamente constantes após a ‘ativação’ destes materiais. A estabilização das temperaturas é um dos efeitos associados a utilização destes materiais, como foi exposto no Capítulo 3, e que, mais uma vez, foi demonstrado. A flutuação das temperaturas de forma menos acidentada faz com que se evitem descidas acentuadas de temperatura, que causam riscos de ocorrência de condensações.

Para além da estabilização das temperaturas, observou-se em maior parte dos casos que estas argamassas foram capazes de aumentar as temperaturas superficiais mínimas registadas com a utilização de rebocos tradicionais. Mais uma vez, a libertação de energia dos PCM sob a forma de calor permitiu aumentar ligeiramente as temperaturas mínimas.

A grande revelação, e que foi de facto o objeto deste estudo, foi a mitigação das condensações interiores. Nos casos em que os elementos apresentaram condensações com rebocos interiores tradicionais, a sua substituição por argamassas com PCM fez com que estas deixassem de ocorrer quando o período de ocorrência era curto, e diminui significativamente o período de ocorrência de condensações quando este era longo. Tal como tinha sido pensado, ao aliar o ponto de fusão com a temperatura de ponto de orvalho faz com que o PCM liberte a energia sob a forma de calor aumentando a temperatura superficial, e evitando que esta atinga o ponto de orvalho. Esta capacidade é relativamente limitada devido à entalpia dos PCM quando são incorporados em argamassas. Em climas mais agressivos, com temperaturas mínimas continuamente abaixo de 0°C, e em que se verificam períodos de ocorrência de condensações significativamente longos, mais de 2 dias, a utilização destas argamassas por si só, poderá resultar na redução desse período mas não evitará que as condensações ocorram. Em climas mais amenos, com temperaturas mínimas acima dos 0°C, com períodos de ocorrência de condensações inferiores a 2 dias, a utilização destas argamassas poderá ser suficiente para evitar que estas possam ocorrer. Para tal, é importante estudar a solução original para saber o ponto de fusão que deve ter a argamassa com PCM, ou seja, esta deverá ser pensada em fase de projeto, antes de ser aplicada.

Por fim, visto que este estudo foi uma primeira análise à utilização das argamassas incorporadas com PCM para mitigação das condensações interiores alerta-se para o facto de os resultados serem apenas teóricos, fruto da simulação numérica. Com este trabalho verificou-se a potencialidade destes materiais, fazendo com que agora existam bases para um trabalho experimental para a sua validação.

Referências Bibliográficas

- ALAWADHI, Esam M. (2008) - Thermal analysis of a building brick containing phase change material. *Energy and Buildings*. 40:3. 351-357. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778807000953>>. ISSN 0378-7788.
- ANDRADE, J. Côte-Real; PIEDADE, António Carlos Canha da; BENTO, João (1995) - *Humidity diagnosis and treatment in building resorting to an expert system*. [S. l.]: Instituto Superior Técnico. Departamento de Engenharia Civil. Grupo de Estudos de Física e Tecnologia de Edifícios.
- BAETENS, Ruben; JELLE, Bjørn Petter; GUSTAVSEN, Arild (2010) - Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*. 42:9. 1361-1368. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810001180>>. ISSN 0378-7788.
- BRÁS, Ana; GONÇALVES, Fábio; FAUSTINO, Pedro (2014) - Cork-based mortars for thermal bridges correction in a dwelling: Thermal performance and cost evaluation. *Energy and Buildings*. 72: 296-308. ISSN 03787788.
- CARVALHO, Ivo Manuel Silva (2013) - *Dimensionamento de um Sistema de Teto Arrefecido Integrando Materiais de Mudança de Fase*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- CASEY, S. P. [et al.] (2013) - Energetic and hygrothermal analysis of a nano-structured material for rapid-response humidity buffering in closed environments. *Building and Environment*. 60: 24-36. ISSN 03601323.
- CASTILHO, António José Soares (2014) - *Simulação numérica do efeito de PCM no conforto térmico de edifícios: caso de estudo da FEUP*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- CATUMBA, Maria João da Silva (2009) - *Condensações Internas - Critérios de Aceitabilidade*.
- CERÓN, Isabel; NEILA, Javier; KHAYET, Mohamed (2011) - Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use. *Energy and Buildings*. 43:8. 1869-1874. ISSN 03787788.
- CHEN, Zhi; QIN, Menghao (2016) - Preparation and hygrothermal properties of composite phase change humidity control materials. *Applied Thermal Engineering*. 98: 1150-1157. ISSN 13594311.
- CHEN, Zhi; QIN, Menghao; YANG, Jun (2015) - Synthesis and characteristics of hygroscopic phase change material: Composite microencapsulated phase change material (MPCM) and diatomite. *Energy and Buildings*. 106: 175-182. ISSN 03787788.
- CORVACHO, Maria Helena Póvoas (1995) - *Moisture condensation in thermal bridges establishing design criteria*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- COUASNET, Yves (1990) - *Les Condensations dans les batiments guide pratique et éléments d'analyse*. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées: Paris. ISBN 2-85978-152-8.
- CUNHA, Ana Luísa Alves da (2009) - *Simulação Numérica do Comportamento Higrotérmico de Edifícios – Condensações Internas*.
- DUARTE, João Pedro Sequeira Rodrigues Ferreira (2010) - *Condensações Superficiais Interiores - Avaliação do Risco*.
- ESTEVES, Teresa Isabel Aguiar Azevedo (2010) - *Optimização da envolvente exterior para minimização do risco de condensações superficiais*. Porto: [s. n.].
- FRANÇA, Carlos Manuel Coelho (2013) - *Avaliação dos programas para quantificar condensações em engenharia civil*. Porto: FEUP.
- FRAUNHOFER IPB (2016) - *WUFI*. [Consult. 08/06/2016]. Disponível em WWW: <URL: <https://wufi.de/en/software/wufi-pro/>>.
- FREITAS, Vasco Peixoto de (1998) - *Permeabilidade ao Vapor Materiais de Construção Condensações Internas: Nota de Informação Técnica NIT. 002- LFC-1998*. Porto: Litografia Finearte. ISBN 9727620294.
- KHERADMAND, Mohammad (2015) - *Incorporation of hybrid phase change materials in plastering mortars for increased energy efficiency in buildings*. Universidade do Minho.
- KHERADMAND, Mohammad [et al.] (2016) - Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behaviour of buildings. *Energy*. 94: 250-261. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215015091>>. ISSN 0360-5442.

- KUNZEL, H. M. (1994) - Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One and Two Dimensional Calculation Using Simple Parameters. University of Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart. Ph.D. Thesis.
- MENDONÇA, Luís Viegas (2005) - Condensações em Edifícios Arquitetura & Vida. nº 63. 71-74.
- MOGHIMAN, Mohammad; HATAMI, Mohammad; BOGHRATI, Mehdi (2011) - Improvement the winter space heating by the effect of rotating thermal wall storage. 2011.
- N.M.M. RAMOS, J.M.P.Q. Delgado, E. Barreira and V.P. de Freitas (2010) - Numerical Simulations - Examples and Applications in Computational Fluid Dynamics ISBN 978-953-307-153-4.
- NAVARRO, Lidia [et al.] (2015) - PCM incorporation in a concrete core slab as a thermal storage and supply system: Proof of concept. Energy and Buildings. 103: 70-82. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815300591>>. ISSN 0378-7788.
- PÉREZ-LOMBARD, Luis; ORTIZ, José; POUT, Christine (2008) - A review on buildings energy consumption information. Energy and Buildings. 40:3. 394-398. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778807001016>>. ISSN 0378-7788.
- RAMOS, Nuno Manuel Monteiro (2007) - A importância da inércia higroscópica no comportamento higratérmico dos edifícios. Porto: [s. n.].
- SÁ, Ana Margarida Vaz Duarte Oliveira e (2012) - Sustentabilidade na construção - Comportamento térmico de edifícios em Portugal usando materiais de mudança de fase. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- SANTOS, André Costa Nogueira dos (2013) - Estudo da Eficiência Energética de um Sistema de Arrefecimento com Materiais de Mudança de Fase. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- SHI, Xian [et al.] (2014) - Experimental assessment of position of macro encapsulated phase change material in concrete walls on indoor temperatures and humidity levels. Energy and Buildings. 71: 80-87. ISSN 03787788.
- SILVA, Tiago [et al.] (2015) - Development of a window shutter with phase change materials: Full scale outdoor experimental approach. Energy and Buildings. 88: 110-121. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814010093>>. ISSN 0378-7788.
- SOARES, N. [et al.] (2013) - Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. Energy and Buildings. 59: 82-103. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813000157>>. ISSN 0378-7788.
- TYAGI, Vineet Veer; BUDDHI, D. (2007) - PCM thermal storage in buildings: A state of art. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 11:6. 1146-1166. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032105000973>>. ISSN 1364-0321.
- ZHANG, Chengbin [et al.] (2011) - Thermal response of brick wall filled with phase change materials (PCM) under fluctuating outdoor temperatures. Energy and Buildings. 43:12. 3514-3520. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811004300>>. ISSN 0378-7788.
- ZHOU, D.; ZHAO, C. Y.; TIAN, Y. (2012) - Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. Applied Energy. 92: 593-605. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261911005216>>. ISSN 0306-2619.

