



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Análise do desempenho térmico de um piso radiante hidráulico

Pedro Manuel Alves Esdras Martins

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva
Co-orientador: Prof. Doutor Miguel Costa Santos Nepomuceno

Covilhã, Outubro de 2011





Dedicatória

À minha Avó Graciete





Agradecimentos

Entre todos os que me ajudaram neste caminho e especificamente neste trabalho, gostaria de reiterar os meus sinceros agradecimentos:

Ao meu orientador Prof. Doutor Pedro Nuno Silva e ao meu Co-orientador o Prof. Doutor Miguel Nepomuceno por esta oportunidade, por toda a disponibilidade, por todas as orientações e pela motivação e apoio que prestaram ao longo deste trabalho.

Ao técnico do laboratório de transmissão de calor Sr. João Correia por toda a disponibilidade e ajuda cedida.

A todos os que de uma maneira ou de outra me ajudaram, motivaram e apoiaram durante a realização deste trabalho, em especial os meus colegas e companheiros Luís Jorge e Manuel Gomes.

E em último, mas não por último, ao meu Avô Helder que sempre acreditou.





Resumo

Neste trabalho foi estudado o desempenho térmico de um piso radiante com dois tipos de acabamento de superfície, estudo este realizado numa câmara climática com ambiente controlado.

Este estudo teve como objectivo caracterizar o desempenho térmico do piso para cada tipo de acabamento da superfície e o seu impacto nas condições de conforto térmico no interior da câmara.

Para a realização deste estudo inicialmente simulou-se condições de verão e de inverno no interior da câmara climática, utilizando-se posteriormente o piso para arrefecer e aquecer (respectivamente) o interior da câmara. Este protocolo de ensaio foi utilizado para o ensaio do piso com os dois tipos de acabamento superficial.

A análise do conforto térmico no interior da câmara climática foi feita seguindo-se a norma ISO 7730, a qual utiliza o modelo desenvolvido por Fanger [1] numa câmara climática, para tal foram calculados os índices de conforto térmico (PMV e PPD) através de folhas de cálculo auxiliadas pelo programa VISUAL BASIC.

Estas análises revelaram-se inconclusivas para a determinação de qual o acabamento de superfície do piso radiante com melhor desempenho a nível térmico e de conforto, para o funcionamento em modo de aquecimento, pois ambos os acabamentos de superfície testados apresentaram desempenhos semelhantes. Em modo de arrefecimento o piso com acabamento em cerâmica apresentou um melhor desempenho tanto em termos térmicos como também a nível de conforto.

Palavras-chave

Piso Radiante Hidráulico, Aquecimento, Arrefecimento, Desempenho Térmico, Conforto Térmico





Abstract

In this work was studied the thermal performance of a radiant floor with two types of surface finish, this study was conducted in a climatic chamber with controlled environment.

This study aimed to characterize the thermal performance of the floor for each type of surface finish and its impact on thermal comfort conditions inside the chamber.

For this study were initially simulated conditions of summer and winter climate in the chamber, the floor was then used to cool and heat (respectively) the chamber. This test protocol was used for testing the floor with the two types of surface finish.

The analysis of thermal comfort inside the climatic chamber was performed according to ISO 7730, which uses the model developed by Fanger (1982) [1] in a climatic chamber. Thermal comfort indices (PMV and PPD) were calculated using spreadsheets assisted by the program VISUAL BASIC.

These tests proved to be inconclusive in determining which surface finish of the floor had the best thermal and comfort performance in heating mode, because both surface finishes tested presented similar results. In cooling mode, the floor with the ceramic finish presented a better thermal performance, as well in terms of comfort.

Keywords

Hydronic radiant floor, Heating, Cooling, Thermal Performance, Thermal Comfort





Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Perspectiva Geral	1
1.2.	O problema em estudo e a sua relevância.....	2
1.3.	Revisão bibliográfica	3
1.4.	Objectivos e contribuição da dissertação.....	8
1.5.	Visão geral e organização da dissertação.....	8
2.	Piso Radiante	11
2.1.	Modos de funcionamento	12
2.1.1.	Piso radiante para arrefecimento.....	13
2.2.	Tipos de piso	13
2.2.1.	Piso radiante de ar	14
2.2.2.	Piso radiante Eléctrico.....	14
2.2.3.	Piso radiante Hidráulico	15
2.3.	Instalação.....	16
2.4.	Disposição das tubagens/resistências eléctricas	17
2.5.	Temperaturas da superfície do piso	18
2.6.	Tipos de acabamento da superfície.....	18
2.7.	Capacidade de aquecimento e arrefecimento	18
2.8.	Mecanismos de transferência de calor	18
2.8.1.	Transmissão de calor no piso radiante.....	20
2.9.	Controlo.....	22
2.10.	Energia	24
2.11.	Vantagens.....	25
3.	Conforto Térmico	27
3.1.	Estudo do conforto térmico	27
3.2.	Norma ISO 7730.....	28
3.2.1.	Parâmetros Individuais.....	28
3.2.2.	Trabalho.....	29
3.2.3.	Vestuário	30
3.2.4.	Humidade do ar	30
3.2.5.	Equação de conforto térmico.....	30
3.2.6.	Temperatura exterior do vestuário.....	31
3.2.7.	Factor de vestuário.....	31
3.2.8.	Coeficiente de convecção	32
3.2.9.	Evaporação.....	33
3.2.10.	Respiração	33
3.2.11.	Radiação	34
3.3.	Índice PMV	34



3.4	Índice PPD	34
4.	Instalação experimental	37
4.1	Introdução	37
4.2	Piso radiante	38
4.2.1	Isolante	38
4.2.2	Tubagem.....	39
4.2.3	Argamassa	39
4.2.4	Revestimento em cerâmica	40
4.2.5	Revestimento em piso flutuante	40
4.2.6	Aquisição de dados	41
4.2.7	Banho Térmico	42
4.3	Câmara climática.....	43
4.3.1	Estrutura	43
4.3.2	Aquisição de dados	44
4.3.3	Unidade de tratamento de ar.....	45
4.4	Equipamentos de aquisição de dados.....	46
4.4.1	Equipamento para medição e registo de temperaturas.....	46
4.4.2	Equipamento para medição de humidade relativa.....	47
4.4.3	Equipamento para medição dos parâmetros de conforto térmico	48
5.	Análise e discussão de resultados.....	51
5.1	Ensaio preliminares	51
5.2	Descrição dos ensaios experimentais	52
5.2.1	Estabilização da instalação experimental	52
5.2.2	Procedimento experimental	53
5.2.3	Ensaio de aquecimento	54
5.2.4	Ensaio de arrefecimento.....	55
5.3	Análise do desempenho térmico do piso radiante com diferentes acabamentos.....	56
5.3.1	Ensaio de aquecimento	56
5.3.2	Arrefecimento	59
5.4	Análise do comportamento térmico da câmara.....	62
5.4.1	Aquecimento.....	62
5.4.2	Arrefecimento	66
5.5	Análise dos índices de conforto térmico	69
5.5.1	Ensaio de aquecimento	70
5.5.2	Ensaio de arrefecimento	74
5.5.3	Efeito do vestuário e metabolismo nos índices de conforto térmico	78
6.	Conclusões	81
6.1	Funcionamento do piso em modo de aquecimento	81
6.2	Funcionamento do piso em modo de arrefecimento.....	82
6.3	Conforto térmico	82
	Referências bibliográficas	85



Lista de Figuras

Figura 2.1 - Exemplo da distribuição de temperaturas para vários sistemas de aquecimento ...	12
Figura 2.2 - Exemplo de uma instalação “molhada” e “seca” respectivamente	14
Figura 2.3 - Piso radiante por circulação de ar	14
Figura 2.4 - Exemplo de uma instalação de um piso radiante eléctrico	15
Figura 2.5 - Tubo de PE-X com multi-camada.....	15
Figura 2.6 - Exemplo típico de uma instalação tubular de um piso radiante hidráulico.....	16
Figura 2.7 - Barreira anti-vapor.....	16
Figura 2.8 - Exemplo de disposição das tubagens	17
Figura 2.9 - Métodos de transferência de calor dentro da câmara climática.....	19
Figura 2.10 - Esquema da resistência térmica para um sistema de piso radiante	21
Figura 2.11 - Composição do piso radiante	22
Figura 2.12 - relação entre cargas térmicas relativas e factor de energia dispendido para várias estratégias de controlo.....	24
Figura 3.1 - Gráfico da Área corporal em função da altura e do peso	29
Figura 3.2 - Gráfico do Factor de vestuário em função da resistência térmica do vestuário	32
Figura 3.3 - Gráfico do Coeficiente de convecção natural em função da diferença de temperatura.....	32
Figura 3.4 - Gráfico do Coeficiente de convecção forçada em função da velocidade	33
Figura 3.5 - Gráfico PMV vs. PPD	36
Figura 4.1 - Esquema de instalação da tubagem.....	39
Figura 4.2 - Esquema do piso radiante em corte	40
Figura 4.3 - Imagem da superfície com acabamento em cerâmica.....	40
Figura 4.4 - Imagem da superfície com acabamento em piso flutuante.....	41
Figura 4.5 - Esquema em corte do provete	42
Figura 4.6 - Esquema de aplicação dos termopares na secção 2	42
Figura 4.7 - Hubber Unistat CC	43



Figura 4.8 - Parede da câmara climática em corte	44
Figura 4.9 - Esquema de montagem do piso radiante na câmara climática.....	37
Figura 4.10 - Esquema da aplicação dos termopares nas superfícies interiores da câmara climática	44
Figura 4.11 - esquema da aplicação dos termopares ao longo da altura da câmara	45
Figura 4.12 - Equipamento de controlo de temperatura Cole Parmer Digi Sense.....	46
Figura 4.13 - OMEGA Multiscan 1200	46
Figura 4.14 - Rotronic NT3 com central de ligação DS-U2	47
Figura 4.15 - Sensor temperatura/humidade relativa Hygroclip S.....	48
Figura 4.16 - Equipamento INNOVA 1221 instalado na câmara climática	48
Figura 4.17 - Sonda de velocidade do ar	49
Figura 4.18 - Sonda de Temperatura Operativa MM0060	49
Figura 4.19 - Posição da sonda consoante a posição do utilizador	49
Figura 4.20 - Sonda de Temperatura do ar	50
Figura 4.21 - Sonda WBGT	50
Figura 4.22 - Data Logger Type 1221.....	50
Figura 5.1 - Esquema de tempos do procedimento experimental	53
Figura 5.2 - Esquema de temperaturas para um ensaio de aquecimento	55
Figura 5.3 - Esquema de temperaturas para um ensaio de arrefecimento.....	56
Figura 5.4 - Gráfico da Evolução das temperaturas da superfície do piso (secção 5) ao longo do tempo para os vários ensaios de aquecimento acabamento da superfície em cerâmica	57
Figura 5.5 - Gráfico da Evolução das temperaturas da superfície do piso (secção 5) ao longo do tempo para os vários ensaios de aquecimento para o acabamento da superfície em piso radiante	57
Figura 5.6 - Gráfico da Evolução da diferença de temperaturas da superfície (secção 5) do piso e de insuflação de água ao longo do tempo para os vários ensaios de aquecimento acabamento da superfície em cerâmica.....	58
Figura 5.7 - Gráfico da Evolução da diferença de temperaturas da superfície (secção 5) do piso e de insuflação de água ao longo do tempo para os vários ensaios de aquecimento acabamento da superfície em piso flutuante.....	59
Figura 5.8 - Gráfico da Evolução das temperaturas da superfície do piso (secção 5) ao longo do tempo para os vários ensaios de arrefecimento acabamento da superfície em cerâmica	60



Figura 5.9 - Gráfico da Evolução das temperaturas da superfície do piso (secção 5) ao longo do tempo para os vários ensaios de arrefecimento para o acabamento da superfície em piso radiante	60
Figura 5.10 - Gráfico da Evolução da diferença de temperaturas entre superfície (secção 5) do piso e a temperatura de insuflação de água ao longo do tempo para os vários ensaios de arrefecimento com acabamento da superfície em cerâmica	61
Figura 5.11 - Gráfico da Evolução da diferença de temperaturas entre superfície (secção 5) do piso e a temperatura de insuflação de água ao longo do tempo para os vários ensaios de arrefecimento com acabamento da superfície em piso flutuante	61
Figura 5.12 - Gráfico da Evolução do valor de humidade relativa ao longo do tempo para os vários de ensaio de aquecimento para o piso com acabamento em cerâmica	62
Figura 5.13 - Gráfico da Evolução do valor de humidade relativa ao longo do tempo para os vários de ensaio de aquecimento para o piso com acabamento em piso flutuante	63
Figura 5.14 - Gráfico da Evolução do valor da temperatura das superfícies internas da câmara climática ao longo do tempo para o ensaio de aquecimento com uma temperatura de insuflação de 28°C e piso com acabamento em cerâmica	64
Figura 5.15 - Gráfico da Evolução do valor da temperatura das superfícies internas da câmara climática ao longo do tempo para o ensaio de aquecimento com uma temperatura de insuflação de 28°C e piso com acabamento em piso flutuante	64
Figura 5.16 - Gráfico da Evolução do valor da temperatura da temperatura média do ar, temperatura média radiante e temperatura média da superfície do piso ao longo do tempo para o ensaio de aquecimento com uma temperatura de insuflação de 28°C e piso com acabamento em cerâmica.....	65
Figura 5.17 - Gráfico da Evolução do valor da temperatura da temperatura média do ar, temperatura média radiante e temperatura média da superfície do piso ao longo do tempo para o ensaio de aquecimento com uma temperatura de insuflação de 28°C e piso com acabamento em piso flutuante.....	65
Figura 5.18 - Gráfico da Evolução do valor de humidade relativa ao longo do tempo para os vários de ensaio de arrefecimento para o piso com acabamento em cerâmica.....	66
Figura 5.19 - Gráfico da Evolução do valor de humidade relativa ao longo do tempo para os vários de ensaio de arrefecimento para o piso com acabamento em piso flutuante.....	67
Figura 5.20 - Gráfico da Evolução do valor da temperatura das superfícies internas da câmara climática ao longo do tempo para o ensaio de arrefecimento com uma temperatura de insuflação de 18°C e piso com acabamento em cerâmica.....	67
Figura 5.21 - Gráfico da Evolução do valor da temperatura das superfícies internas da câmara climática ao longo do tempo para o ensaio de arrefecimento com uma temperatura de insuflação de 18°C e piso com acabamento em piso flutuante.....	68
Figura 5.21 - Gráfico da Evolução do valor da temperatura da temperatura média do ar, temperatura média radiante e temperatura média da superfície do piso ao longo do tempo para o ensaio de arrefecimento com uma temperatura de insuflação de 18°C e piso com acabamento em cerâmica.....	68



Figura 5.22 - Gráfico da Evolução do valor da temperatura da temperatura média do ar, temperatura média radiante e temperatura média da superfície do piso ao longo do tempo para o ensaio de arrefecimento com uma temperatura de insuflação de 18°C e piso com acabamento em piso flutuante..... 69

Figura 5.23 - Índices de conforto térmico no final dos ensaios de aquecimento (24h) para o piso radiante com acabamento em cerâmica 71

Figura 5.24 - Distribuição do PMV vs PPD ao longo do tempo para um ensaio de aquecimento com uma temperatura de insuflação de 28°C e piso com acabamento de superfície em cerâmica 72

Figura 5.25 - índices de conforto térmico no final dos ensaios de aquecimento (24h) para o piso radiante com acabamento em piso radiante 73

Figura 5.26 - Distribuição do PMV vs PPD ao longo do tempo para um ensaio de aquecimento com uma temperatura de insuflação de 28°C e piso com acabamento de superfície em piso flutuante 74

Figura 5.27 - índices de conforto térmico no final dos ensaios de arrefecimento (22h) para o piso radiante com acabamento em cerâmica 75

Figura 5.28 - Distribuição do PMV vs PPD ao longo do tempo para um ensaio de arrefecimento com uma temperatura de insuflação de 18°C e piso com acabamento de superfície em cerâmica 76

Figura 5.29 - índices de conforto térmico no final dos ensaios de arrefecimento (22h) para o piso radiante com acabamento em piso flutuante 77

Figura 5.30 - Distribuição do PMV vs PPD ao longo do tempo para um ensaio de arrefecimento com uma temperatura de insuflação de 18°C e piso com acabamento de superfície em piso flutuante 78

Figura 5.31 - Distribuição do PMV vs PPD ao longo do tempo para um ensaio de aquecimento com uma temperatura de insuflação de 20°C e piso com acabamento de superfície em piso flutuante (MET=1,2; $I_{vest}=1$)..... 79

Figura 5.32 - Distribuição do PMV vs PPD ao longo do tempo para um ensaio de aquecimento com uma temperatura de insuflação de 20°C e piso com acabamento de superfície em piso flutuante (MET=1,8; $I_{vest}=1$)..... 80

Figura 5.33 - Distribuição do PMV vs PPD ao longo do tempo para um ensaio de aquecimento com uma temperatura de insuflação de 20°C e piso com acabamento de superfície em piso flutuante (MET=1,2; $I_{vest}=0,5$) 80



Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Temperatura do piso, temperatura média do aquecimento médio e efeito de auto controlo do piso radiante em percentagem	23
Tabela 3.1 - Nível de metabolismo em função da actividade desenvolvida	29
Tabela 3.2 - Resistência térmica do vestuário	30
Tabela 4.1 - Características técnicas do isolante térmico da marca Iberfibran	38
Tabela 4.2 - Características técnicas do tubo Cristaflex	39
Tabela 4.3 - limites da temperatura de operação dos quatro mais comuns tipos de termopares	41
Tabela 4.4 - Identificação dos vários níveis de construção/aplicação dos provetes	42
Tabela 4.5 Lista de termopares utilizados	47
Tabela 5.1 - Valores utilizados para o cálculo dos índices de conforto térmico no final (24h) dos ensaios de aquecimento para o piso com acabamento em cerâmica	70
Tabela 5.2 - Valores utilizados para o cálculo dos índices de conforto térmico no final (24h) dos ensaios de aquecimento para o piso com acabamento em cerâmica	72
Tabela 5.3 - Valores utilizados para o cálculo dos índices de conforto térmico no final (22h) dos ensaios de arrefecimento para o piso com acabamento em cerâmica.....	74
Tabela 5.4 - Valores utilizados para o cálculo dos índices de conforto térmico no final (22h) dos ensaios de arrefecimento para o piso com acabamento em piso flutuante.....	76
Tabela 5.5 - Valores utilizados para o cálculo dos índices de conforto térmico para o ensaio de aquecimento (temperatura de insuflação = 20°C) do piso radiante com acabamento da superfície em piso flutuante	78





Lista de Siglas

a	Altura [m]
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers
f_{vest}	Factor de vestuário, adimensional;
h	Coeficiente de convecção entre a superfície exterior do vestuário e o ar exterior [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$];
ISO	International Organization for Standardization
l_{vest}	Resistência térmica de vestuário [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$] ou [clo],
M	Metabolismo [W/m^2] ou [met];
m	Massa [kg];
P_{vap}	Pressão parcial do valor de água do ar ambiente [Pa];
Q_{cond}	Calor transferido por condução [W/m^2];
Q_{conv}	Calor transferido por convecção [W/m^2];
Q_{Evap}	Calor transferido por evaporação [W/m^2];
Q_{Rad}	Calor transferido por radiação [W/m^2];
RCCTE	Regulamento das Características de Conforto Térmico de Edifícios
RSECE	Regulamento dos Sistemas de Energia de Climatização em Edifícios
S	Termo de acumulação de energia no corpo [W/m^2];
SCE	Sistema de Certificação de Edifícios
t_a	Temperatura média do ar ambiente [$^{\circ}\text{C}$];
T_{ins}	Temperatura da água insuflada no piso radiante [$^{\circ}\text{C}$];
t_{pele}	Temperatura da pele do corpo humano [$^{\circ}\text{C}$];
t_r	Temperatura média radiante dos elementos opacos do espaço [$^{\circ}\text{C}$]
T_{sup}	Temperatura da superfície do piso radiante [$^{\circ}\text{C}$];
t_{vest}	Temperatura exterior do vestuário [$^{\circ}\text{C}$];
V_{ar}	Velocidade média do ar [m/s];
W	Trabalho realizado para o exterior [W/m^2] ou [met];





Simbologia

ϕ	Humidade relativa do ar atmosférico [%];
ϵ	Emissividade da superfície exterior do corpo vestido; $\epsilon=0,97$, valor médio entre a pele e roupas comuns;
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)]





1. Introdução

1.1. Perspectiva Geral

O conforto ambiental proporcionado pelos edifícios aos seus ocupantes assume uma crescente importância na fase de projecto dos mesmos, enquanto factor condicionante da saúde e produtividade de quem os utiliza.

A par do aumento demográfico mundial nas últimas seis décadas, mais que duas vezes [2] verificou-se, para o mesmo período, que a economia mundial quintuplicou [3], sendo esta evolução acompanhada pela melhoria das condições de vida das populações, especialmente dos países desenvolvidos.

Em consonância com o desenvolvimento tecnológico e aumento do padrão de vida das sociedades modernas, a concepção dos edifícios ocupados pelo Homem, quer para habitação quer para trabalho ou lazer, passou a ser orientada por um conjunto de exigências funcionais nas quais o conforto ganha particular destaque por ser de percepção imediata e directa para o utilizador.

Atendendo a que no dia-a-dia o Homem passa grande parte do seu tempo dentro das edificações, torna-se importante garantir que os edifícios projectados e construídos ofereçam níveis de conforto adequados, os quais são determinados por factores como a poluição do ar interior, o ruído, a iluminação e o ambiente térmico. Neste contexto, tendo em conta a condição de homeotermia do ser humano (manutenção de uma temperatura interna corporal aproximadamente constante), o balanço térmico entre o corpo dos utilizadores do edifício e o seu ambiente interno ganha relevância entre os factores atrás enunciados, uma vez que qualquer alteração da temperatura dos ambientes interiores acarreta um dispêndio adicional de esforço biológico para recuperação da condição homeotérmica, acentuando-se a sensação de desconforto e fadiga, com consequências negativas para a saúde e rendimento dos ocupantes dos edifícios [4].

Por outro lado, associado ao conforto térmico dos edifícios está o recurso a equipamentos e sistemas artificiais de climatização que representam uma importante fatia do consumo energético imputado aos edifícios, o que levanta a problemática relativa ao consumo excessivo de recursos naturais associados à produção de energia. Em Portugal, o sector residencial, com aproximadamente 3,3 milhões de edifícios, é responsável pelo consumo de 17% da energia primária em termos nacionais, representando cerca de 29% do consumo total de energia eléctrica do país [5].

Relativamente às utilizações finais da energia, a parcela dispendida para a climatização dos ambientes interiores deste tipo de edifícios assume o valor de 25% do total de energia



consumida [5], mostrando-se de relativa importância o controlo deste consumo enquanto medida que se enquadre nas políticas da sustentabilidade ambiental, tendência que tem vindo a adquirir uma crescente relevância na actualidade [6].

Em consonância com esta linha de preocupação e com o intuito de promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios de acordo com as condições climáticas externas e locais, assim como as exigências relativas à climatização interior e rentabilidade económica [7], surge, a Directiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios. Esta directiva obrigou à implementação, nos Estados Membros, de um sistema de certificação energética (SCE), que, em Portugal, se consubstanciou na revisão do Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios - RSECE (Decreto-Lei nº 79/2006, de 4 de Abril), do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios - RCCTE (Decreto-Lei nº 80/2006, de 4 de Abril) - e no desenvolvimento de um sistema de certificação energética nacional [6].

Nesta problemática do conforto e energia surgem assim dois grandes objectivos - assegurar o conforto térmico, por um lado, e limitar os consumos de energia, por outro. É fácil perceber que estes dois objectivos são de difícil conciliação, pois à melhoria das condições de conforto está normalmente associado um incremento do consumo energético, com todas as consequências económicas e ambientais daí resultantes [6].

É neste sentido, e reconhecendo que muita da legislação e regulamentação existente relativa ao projecto do desempenho térmico dos edifícios está vocacionada para a vertente do consumo energético associado à climatização artificial, que a avaliação das condições de conforto térmico proporcionadas por edifícios construídos, respeitando ou não a regulamentação, se assume de particular interesse.

1.2 O problema em estudo e a sua relevância

O piso radiante é hoje em dia uma alternativa válida aos sistemas de climatização actuais, daí a importância do seu estudo. Entre as suas vantagens pode-se destacar os seus baixos consumos energéticos, a possibilidade de ser utilizado em conjunto com uma fonte de energia renovável ou a distribuição homogénea da temperatura deste sistema, entre muitas outras vantagens.

Apesar das suas inúmeras vantagens relativamente aos sistemas convencionais, existem lacunas ou de outro ponto de vista, pormenores que podem ser melhorados, como por exemplo o seu controlo.



O controlo de um sistema de piso radiante torna-se relevante, pois é ele que definirá o rendimento do sistema isto tendo em conta o seu principal objectivo, criar um ambiente de conforto térmico.

Actualmente os sistemas de controlo regulam apenas a temperatura de funcionamento do piso radiante, temperatura esta que não é sinónimo de conforto térmico para os ocupantes do espaço, daí ser necessário ter em conta vários factores e parâmetros para a regulação correcta dessa mesma temperatura e consequentemente para a criação de conforto térmico. O objectivo deste trabalho vem de encontro a estas necessidades, ou seja, neste estudo foi testado num ambiente controlado um piso radiante com diferentes acabamentos da sua superfície, funcionando o mesmo em várias condições e o seu desempenho avaliado tendo em conta que o espaço no qual esta instalado é ocupado por seres humanos.

1.3 Revisão bibliográfica

Já foram desenvolvidos vários modelos matemáticos para estimar as condições de instalação e funcionamento dos sistemas de piso radiante, de forma a permitir uma melhoria na concepção destes sistemas.

Em 1994 Ho et al. [8] desenvolveram um modelo matemático bidimensional para simular um sistema de um piso radiante na cave de uma habitação, através de dois métodos. O método das diferenças finitas e o método dos elementos finitos. A partir destes métodos foi possível prever a resposta das temperaturas envolventes, quer em estado estacionário, quer em estado transitório, num sistema sem perdas térmicas. O modelo enclausura o sistema e o ambiente circundante, para permitir determinar a temperatura, tanto interna como externa.

O método das diferenças finitas exigiu mais tempo de execução e apresentou valores da temperatura mais elevados que o seu similar.

Chen e Athienitis [9] realizaram o estudo de um modelo numérico da transferência de calor em sistemas de aquecimento de piso radiante, desenvolvendo um modelo tridimensional com o método das diferenças finitas. Este método permitiu-lhes estudar a influência que a camada superior ou soalho tem sobre a distribuição da temperatura e consumo energético. O soalho e a espessura do piso tiveram várias configurações. Neste estudo utilizou-se betão ou “gypcrete” de armazenamento térmico, que foi coberto com alcatifa instalada em toda a área disponível ou alcatifa a cobrir apenas uma área parcial central e utilizou-se também soalho flutuante. Verificou-se que a alcatifa parcial centrada sobre o betão com 50 mm de espessura, revelou uma diferença de temperatura média de cerca de 2°C entre a parte com e sem alcatifa, e uma diferença de 11°C para regiões do painel de aquecimento. O maior tempo de atraso térmico entre os picos de potência de aquecimento fornecida e a temperatura da



superfície do piso foi observado para o piso com alcatifa (4,75 h), que também teve o maior consumo de energia (9% mais do que para o caso sem alcatifa).

Num estudo posterior, os mesmos autores [10] utilizaram a mesma metodologia para incluir o estudo da influência da radiação solar na superfície do piso radiante eléctrico, comparando a área exposta aos raios solares com a área não exposta.

Verificou-se que quando a quantidade de radiação solar incidente é alta, a temperatura superficial na área directamente iluminada pode ser de 3°C (na manhã) a 8°C (ao meio-dia) mais elevada do que na restante área. A temperatura da superfície segundo ASHRAE [11] não deve ser superior a 29°C para ser confortável. Este estudo revela-se importante pois é aconselhável não ultrapassar esta temperatura. Como as radiações solares mudam de direcção ao longo do dia, a temperatura do piso vai sofrendo alterações, logo a temperatura do piso não é uniforme. A simulação de Athienitis e Chen [10] foi realizada para seis casos com várias combinações de espessura de massa térmica e do revestimento superficial. No primeiro foi analisado o efeito para o caso de ter apenas betão com 50 mm, seguidamente foi aumentada a espessura do betão para 10 cm; com o betão de 50 mm fez-se variar o revestimento superficial como alcatifa parcial no centro, alcatifa em toda a área e para o piso de madeira. Depois destes 5 tipos foi estudado o caso do betão especial “gypcret” como revestimento superficial de madeira.

Segundo Athienitis e Chen [10], a radiação solar pode causar diferenças de temperatura locais que podem chegar a 15°C dependendo do revestimento superficial do piso. Este valor é alcançado para o caso em que o betão é coberto por alcatifa parcial ao centro. Isto demonstra a importância do estudo dos revestimentos superficiais que o piso possa ter posteriormente, como é o caso de tapetes, móveis ou objectos que possam acumular termicamente a energia solar em sítios pontuais da instalação. No caso em que o revestimento superficial é uniforme, a diferença máxima obtida foi de 8°C. A poupança energética mais baixa foi obtida para o caso da alcatifa que cobria toda a área do betão, impedindo a acumulação da energia solar por parte da massa térmica. Os restantes casos têm poupanças de energia muito semelhantes. Em resumo, tanto o revestimento superficial do soalho como a radiação solar afectam significativamente a distribuição de temperatura no piso, bem como a temperatura do ar ambiente. Estes efeitos são muitas vezes imprevisíveis durante a fase de projecto.

Bozkır e Canbazoglu [12] utilizaram o ar quente como fonte de aquecimento do piso radiante, num estudo que resultou da análise de um modelo matemático e de um modelo experimental.

A climatização de uma habitação pode ser obtida com recurso a diversos sistemas. Tanto para arrefecimento como para aquecimento as fontes podem ser diversas, Baskin [13] fez uma análise da utilização de vários sistemas num edifício de habitação, estudando-os



individualmente e em cooperação. Para o aquecimento este autor fez uma comparação entre um piso radiante hidráulico e um sistema hidráulico de ar forçado. Para estes dois casos, o aquecimento do ar interior teve um comportamento muito equivalente, sem muitas variações.

Sattari e Farhanieh [14] desenvolveram uma simulação de um sistema típico de piso radiante para avaliar os efeitos dos parâmetros de design e do seu desempenho, utilizando o método dos elementos finitos. Através deste estudo, foi concluído que o diâmetro do tubo e o material de que é feito não tem influência na distribuição da temperatura ambiente. No entanto, tanto a espessura como o material do revestimento superficial demonstrou ter uma grande influência na distribuição de temperatura. Por fim, com o aumento do número de tubos, o tempo de aquecimento diminuiu. Foi demonstrado que a radiação é o mecanismo mais importante neste tipo de sistema e que deve-se ter especial atenção à espessura e ao tipo de revestimento superficial para proporcionar uma excelente transmissão de calor por radiação.

Para Scheatzle [15], além de uma análise computacional, os sistemas de piso radiante devem ter uma análise em ambientes mais parecidos com o uso doméstico, para se ter uma verdadeira percepção da sua actuação.

Scheatzle [15] monitorizou uma habitação construída especificamente para realizar experiências nos diversos tipos de sistemas de ar condicionado. Este trabalho foi realizado entre os anos 2000 a 2004. Durante este tempo foram realizadas diversas melhorias no desempenho. Foi possível monitorizar os dados para a estação fria e para a estação quente, tendo em conta os critérios padrão ASHRAE para um conforto térmico. Foi demonstrado que o sistema de piso radiante pode ser combinado com outros sistemas: desumidificação, ventilação e armazenamento térmico.

Mingqing et al. [16] desenvolveram um estudo de um sistema de aquecimento por piso radiante eléctrico com a diferença de usar lajes de argamassa preta de carbono (CBMS) como resistências de aquecimento. Este material possibilitou um aumento de 10°C na temperatura interior em 330 minutos, em que a distribuição da temperatura em relação à altura foi uniforme.

Karadag e Akgöbek [17] desenvolveram um programa para prever a transferência de calor por convecção para um piso radiante.

Ryu et al. [18] desenvolveram um estudo que analisou os efeitos que o caudal proveniente do piso radiante tem no conforto térmico e na temperatura dentro de um apartamento, com várias divisões (sala ou quartos), através da utilização de estudos anteriores e de simulações computacionais. Foram analisados dispositivos de controlo de caudal e os possíveis problemas



que podem causar. A simulação indicou que o caudal previsto no projecto tem oscilações dependentes da área total disponível. Para uma maior área é necessária uma maior quantidade de caudal de fluido para o aquecimento e também uma área maior leva uma excessiva desigualdade na distribuição do caudal. Isto leva a que o controlo do caudal em cada zona reflecta o desempenho do piso radiante. Aliado ao controlo do caudal, também deve ser aplicado um sistema de controlo da temperatura (termóstatos) para cada zona de aquecimento, com melhorias significativas no desempenho. Os resultados mostraram que o controlo do caudal tem de ter uma especial atenção para não levar a pressões elevadas que podem causar cavitação nas tubagens. A fim de prevenir este efeito é sugerido o uso de bombas de velocidade variável e válvulas de controlo de pressão.

A interacção entre o corpo humano e o ambiente foi o tema estudado por Kilic e Sevilgen [19], onde foi analisado, através de um modelo computacional, o calor transferido para o ar ambiente e para as paredes de uma sala.

Os avanços tecnológicos na área de sensores e microprocessadores tornam possível um controlo mais avançado do conforto térmico usando painéis radiantes. Os sensores têm vindo a tornar-se mais fiáveis e menos dispendiosos graças à sua produção em massa. O mesmo acontece para os microprocessadores, que permitem o uso de sistemas de decisão mais sofisticados que conseguem escolher o modo de operação do sistema de forma a que o mesmo funcione com máximo rendimento [20]. Têm sido realizados estudos neste campo para se incorporar os parâmetros de conforto térmico no método de controlo do sistema de forma a que se garanta um ambiente interior estável e aceitável com o mínimo de consumo de energia possível. Destes estudos resultaram dois conceitos de controlo: controlo a partir do PMV (voto médio estimado) e controlo operativo.

O controlo a partir do voto médio estimado (PMV), prevê como a pessoa “vulgar” votaria usando a escala de sensação térmica da ASHRAE. A percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD) que pode ser calculada a partir do índice PMV, é a percentagem prevista de pessoas que expressam a sua insatisfação em relação a um determinado ambiente térmico [21]. O modelo matemático de previsão, no qual é baseado o índice PMV, desenvolvido por Fanger [1] pode ser utilizado no dispositivo de controlo do conforto térmico. Este dispositivo manteria o ambiente dentro de uma gama de valores aceitáveis. Adicionalmente, como é baseado nos seis parâmetros que influenciam o PMV, o sistema de controlo poderia controlar outros dispositivos que afectariam não só a temperatura do ar ambiente como também a temperatura radiante, o movimento do ar e a humidade [20].

Lin et al. [22] desenvolveram um sistema de controlo para AVAC baseado nos índices PMV-PPD, o qual conseguia simultaneamente melhorar o conforto térmico (de 30% a 20% PPD) e reduzir o consumo energético (em 17%). Outro sistema de controlo baseado no índice PMV foi



desenvolvido por Freire et al. [23] com o objectivo de se adaptar aos parâmetros individuais ao mesmo tempo que providenciava um maior rendimento tanto em termos de conforto térmico como também em termos de consumo energético. Um sistema de controlo baseado no índice PMV já foi aplicado num sistema eléctrico de aquecimento de ar [24], o que permite concluir que o índice PMV pode também ser usado para o controlo de um painel radiante.

O sistema de controlo pode também ser projectado para funcionar apenas a partir da temperatura operativa. A temperatura operativa, cujo valor é muito próximo da temperatura do ar, é a temperatura uniforme de um recinto no qual o ocupante troca a mesma quantidade de calor por radiação e convecção como se estivesse num ambiente não uniforme. É a combinação de duas variáveis primárias na maior parte dos casos de condições sedentárias de conforto, a temperatura do ar e a temperatura média radiante. A temperatura média radiante desempenha um papel importante na avaliação do conforto quando são usados sistemas radiantes [20], devendo a mesma ser determinada com precisão. Determinar a temperatura operativa requer o conhecimento da temperatura da superfície do painel radiante [25] pois um aumento da temperatura da superfície do painel radiante (intensidade) deve ser compensado por um decréscimo na temperatura do ar de forma a se manter constante a temperatura operativa e o conforto térmico do ocupante [1]. Foram realizados estudos que comparam o controlo de painéis radiantes para aquecimento a partir da temperatura do ar e a partir da temperatura operativa durante condições transitórias [26] e condições estacionárias [27].

Como definido pela norma 55-2004 da ASHRAE, conforto térmico é a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico envolvente [28]. A avaliação do conforto individual é, portanto, um processo cognitivo que envolve vários *inputs* influenciado por factores físicos, psicológicos e outros factores. Fanger [1] fundiu uma teoria filosófica e uma evidência estatística da resposta humana e desenvolveu um modelo matemático de predição de sensação térmica. De acordo com Fanger, seis variáveis de conforto (nível de actividade, isolamento do vestuário, temperatura do ar ambiente, temperatura média radiante, velocidade do ar e humidade relativa) produzem um índice único que pode ser usado para prever as condições de conforto, *i.e.* Voto Médio Estimado (PMV). Fanger [29] definiu o Voto Médio Estimado (PMV) como o índice que prevê ou representa o voto médio de sensação térmica numa escala padrão para um grupo de várias pessoas para qualquer combinação de variáveis térmicas ambientais (temperatura do ar, humidade do ar, velocidade do ar e temperatura média radiante) e variáveis pessoais (nível de actividade e isolamento do vestuário). Qualquer uma destas variáveis pode ser medida usando referencias ou através de normas internacionais. Olesen [30] apresentou uma lista abrangente destas normas. A norma ISO 9920-1993 contém uma vasta base de dados dos valores de isolamento térmico para o vestuário, a qual resulta de medições feitas num manequim. A norma ISO 8996-1989 apresenta as taxas da produção metabólica de calor, pois a avaliação térmica de ambientes



requer uma estimativa da taxa metabólica dos ocupantes que é reflexo do nível de actividade física que estão a desenvolver.

Todas as variáveis ambientais podem variar tanto temporalmente como também no espaço em relação ao corpo ocupante [31]. Saoki et al. [32] reconheceram que com excepção do nível de actividade, todos os factores do modelo do PMV influenciam o estado térmico do ser humano através dos processos de transferência de calor na superfície da pele.

Como a necessidade energética para aquecimento e arrefecimento é directamente afectada pelo nível de conforto térmico pretendido, determinar a relação entre conforto térmico e necessidade energética (custos de funcionamento) tem uma importância fundamental para se definir os valores de referência para os contratos dos serviços de energia e para classificar o sistema de acordo com a directiva europeia 2002/92/CE [33]. Nos anos recentes, tem havido um crescente interesse na avaliação da necessidade energética para o aquecimento e arrefecimento de edifícios (desempenho energético de edifícios). Vários estudos provaram que incorporar sistemas de aquecimento radiantes no projecto de edifícios tem a vantagem de reduzir o consumo de energia assim como manter um nível aceitável de conforto térmico. A partir deste conceito, foram desenvolvidos estudos de projecto de sistemas de aquecimento radiantes com controlos baseados em parâmetros ambientais relevantes para o conforto térmico. Investigadores desenvolveram métodos automatizados para o projecto de painéis radiantes para aquecimento baseados na temperatura média radiante [34] ou estratégias de projecto baseadas em critérios de conforto térmico [35].

1.4 Objectivos e contribuição da dissertação

Este trabalho teve como objectivos o estudo do funcionamento de um piso radiante hidráulico com dois tipos de acabamento da superfície aproximadamente com a mesma espessura, a cerâmica assente com cimento cola e o piso flutuante laminado assente sobre feltro de polietileno. Este estudo realizou-se numa câmara climática com ambiente controlado no qual o piso foi sujeito a várias temperaturas ambiente e de funcionamento (temperaturas de insuflação da água) com o propósito de simular condições de inverno (aquecimento) e verão (arrefecimento).

Foi também tido como objectivo o estudo do impacto do funcionamento do piso no interior da câmara climática, mais especificamente nas condições internas de conforto térmico para a ocupação da mesma por seres humanos.

1.5 Visão geral e organização da dissertação

Esta dissertação é constituída por 6 capítulos. O capítulo 1 apresenta o tema em estudo, o seu enquadramento e os estudos feitos na mesma área. Refere ainda a importância do estudo



realizado no âmbito desta dissertação, os objectivos propostos e contributos que este estudo poderá trazer para desenvolvimentos nesta área.

O piso radiante, os diferentes tipos de aplicação, detalhes de funcionamento, construção e instalação são introduzidos no capítulo 2. Neste capítulo é destacado o piso radiante hidráulico assim como todos os pormenores e características de funcionamento referente a este tipo de piso radiante. Este capítulo é concluído com uma síntese das vantagens referentes à utilização do piso radiante.

No capítulo 3 é feita uma introdução do conforto térmico. Neste capítulo é indicada a norma de utilizada neste estudo para o cálculo dos índices de conforto térmico, onde os mesmos são descritos, assim como todos os parâmetros necessários para o seu cálculo.

O capítulo 4 descreve a instalação experimental utilizada para este estudo, sendo descritos pormenorizadamente os seus constituintes, o piso radiante, a câmara climática e os equipamentos de aquisição de dados.

Os ensaios são descritos no capítulo 5 assim como também é descrito o procedimento experimental para a realização dos mesmos. Neste capítulo são também apresentados e analisados os resultados, análise esta subdividida em três subcapítulos. Estes três subcapítulos referem-se aos três tipos de análise dos resultados.

No capítulo final (capítulo 6) são apresentadas as conclusões finais deste estudo que, para uma análise mais fácil, foram subdivididos consoante o tipo de conclusão tendo em conta os objectivos deste trabalho.





2. Piso Radiante

Os registos mais antigos da utilização de piso radiante remontam aos anos 100 a.C., sendo desenvolvido pelos norte coreanos para melhorar o conforto térmico nas regiões mais frias do país. O sistema consistia em tornar todo o chão da habitação num imenso irradiador de calor, através do aquecimento da laje de pedra da qual o chão era feito [36]. A cozinha era construída por baixo das divisões da edificação, assim o fogo usado para cozinhar era também utilizado para aquecer toda a casa. Durante a mesma altura os romanos utilizavam também um sistema semelhante de aquecimento.

Nas décadas de 1950 e 1960, as instalações na Europa Central de piso radiante para aquecimento usavam tubagens de aço e de cobre. Infelizmente, nesta altura, os edifícios não possuíam bons isolamentos térmicos, o que obrigava a que os pisos radiantes trabalhassem com temperaturas elevadas para que assim conseguissem aquecer as habitações, o que fez com que os sistemas de piso radiante ficassem com má reputação. No final da década de 1970, a introdução de tubagens de plástico para pisos radiantes de aquecimento fez com que a utilização dos mesmos fosse habitual especialmente em países como a Alemanha, Suíça, Áustria e países nórdicos. Actualmente, as tubagens de plástico tipo PE-X são os mais usados [37].

Ao contrário dos sistemas convencionais de aquecimento e arrefecimento que condicionam os espaços principalmente por convecção, os sistemas de piso radiante condicionam apenas o chão que por sua vez irradia calor directamente para os ocupantes ou objectos, ou então absorve o calor emanado pelos ocupantes ou objectos. Os sistemas radiantes de aquecimento ou arrefecimento podem ser instalados separadamente, ou então utilizar a mesma infraestrutura para providenciar aquecimento ou arrefecimento.

Os sistemas de piso radiante podem funcionar a partir de qualquer fonte de calor ou de frio que utilize qualquer tipo de combustível ou de energia [38].

O que define e caracteriza um painel radiante para aquecimento ou arrefecimento é a sua capacidade de transferir mais de 50% da sua energia de forma radiante (ASHRAE). A restante energia é transferida por meio de condução ou convecção. Enquanto a radiação é a principal forma de transferência de calor num painel radiante, a segunda forma de transferência é normalmente a convecção. A estratificação térmica é usualmente inferior em sistemas radiantes relativamente a sistemas convectivos, que são caracterizados pela flutuabilidade do ar que permite assim a distribuição do calor de uma forma mecanicamente natural [38].

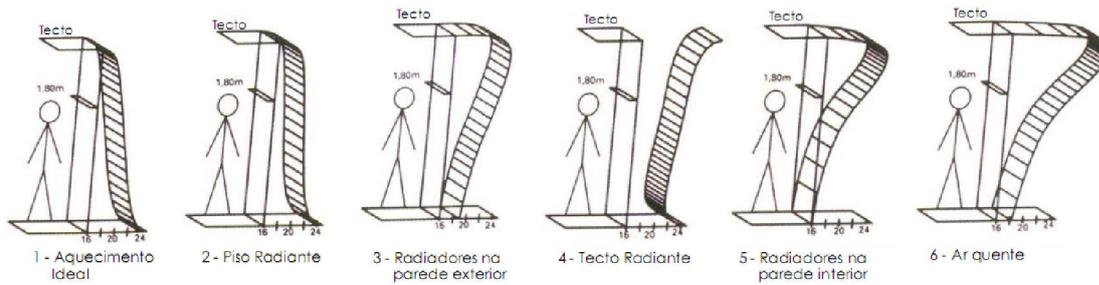


Figura 2.1 - Exemplo da distribuição de temperaturas para vários sistemas de aquecimento [39]

Os sistemas de piso radiante podem ser acomodados em habitações com varias configurações e com variados tipos de superfícies. Os painéis radiantes efectuam a transferência de calor recorrendo (entre outros) a sistemas eléctricos ou hidráulicos dispostos em várias configurações de projecto. As características radiantes das superfícies utilizadas actualmente não afectam significativamente o processo radiante de transferência de calor pois os materiais utilizados têm uma emissividade de 0,85 ou superior. No projecto o factor mais importante a ter em conta para o desempenho do piso radiante é a resistência térmica do material utilizado que separa a fonte geradora de calor e a superfície do piso radiante [38].

Os sistemas de piso radiante podem também ser caracterizados por terem perdas térmicas mínimas em sistemas hidráulicos e não terem qualquer tipo de perda em sistemas eléctricos. Enquanto os sistemas de transmissão de calor por convecção podem ter perdas de 20% a 40% ou mais devido às perdas nas tubagens necessárias para transportar a energia da fonte até ao espaço ocupado [38].

A escolha do sistema de aquecimento pode ainda afectar o desempenho do edifício em termos da humidade relativa devido ao aumento de infiltrações. Os sistemas de piso radiante não aumentam significativamente a temperatura do ar relativamente à temperatura ambiente, enquanto os sistemas convectivos fazem aumentar significativamente o diferencial de temperaturas entre a temperatura exterior e interior. Além disso, o efeito do elevado diferencial entre a temperatura exterior e interior da habitação faz aumentar as infiltrações de ar seco e frio proveniente do exterior, que provoca assim uma redução do valor da humidade relativa interior [38].

Eliminar ou a reduzir o uso de ar para distribuir ou remover energia, é reduzir também a principal fonte de propagação de pólen, pó, bactérias e germes [38].

2.1 Modos de funcionamento

O piso radiante pode funcionar com dois objectivos distintos, aquecimento e arrefecimento. Apesar de actualmente ser usado essencialmente com o propósito de aquecimento devido aos



seus inúmeros benefícios, o piso radiante apresenta também várias vantagens se for usado para arrefecimento.

2.1.1 Piso radiante para arrefecimento

O piso radiante para arrefecimento é apenas usado para o arrefecimento sensível, pois o arrefecimento latente (i.e., desumidificação) resultaria em condensação na superfície de arrefecimento, o que criaria problemas resultantes da humidade. Este facto faz com que seja necessário um sistema de arrefecimento de apoio para tratar das cargas térmicas latentes, exceptuando em climas secos, onde o sistema de arrefecimento para cargas latentes não é necessário.

Para prevenir a condensação, a temperatura da superfície radiante de arrefecimento tem de ser mantida a um valor não inferior ao ponto de orvalho (por exemplo 13°C se a temperatura de bolbo seco e a humidade relativa forem 24°C e 50% respectivamente). Para tal, é aconselhável manter-se uma temperatura mínima de aproximadamente 18°C na superfície do piso de forma a providenciar-se uma margem de segurança relativa à condensação e para evitar que os ocupantes sintam que o chão está frio [44]. Embora este valor de temperatura condicione a capacidade de arrefecimento sensível, existem dois grandes benefícios energéticos para o uso de arrefecimento radiante. O primeiro, devido à relativamente alta temperatura da superfície quando comparada com as convencionais serpentinas dos evaporadores, que faz com que eficiência de arrefecimento seja 25% superior. Segundo, a capacidade de arrefecimento é aplicada directamente no interior do espaço sem ser necessária qualquer movimentação do ar, o que normalmente consome entre 10% a 20% do consumo de energia de um sistema convencional de ar condicionado.

Combinar um piso radiante com um sistema dedicado de circulação de ar entre o interior e o exterior é uma aplicação particularmente vantajosa, pois o sistema pode assim desumidificar o ar proveniente do exterior, reduzindo assim a humidade em todo o edifício [45-47].

Em geral, quando o principal propósito do piso radiante para aquecimento/arrefecimento é arrefecimento, o tecto e as paredes são usadas como superfícies radiantes devido à convecção natural que melhora o processo de arrefecimento. A juntar ao facto da convecção natural, o facto de por vezes o piso estar coberto por carpetes ou outros tipos de materiais faz com se reduza a sua capacidade de arrefecimento ao contrário das paredes e tecto que conseguem transmitir directamente para o espaço a sua capacidade de arrefecimento.

2.2 Tipos de piso

Existem três tipos de piso radiante: piso radiante a ar quente, eléctrico e hidráulico. Estes três tipos de piso podem ser subdivididos segundo o tipo de instalação: aqueles que fazem uso da capacidade da massa térmica da laje de betão ou argamassa na qual as tubagens estão



embebidas (instalações “molhadas”), e aquelas em que as tubagens do piso radiante são ensanduichadas entre duas camadas de contraplacado de madeira ou instaladas directamente sob a superfície do piso (instalações “secas”).

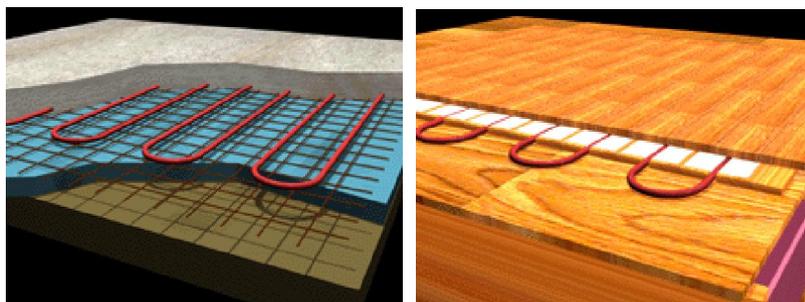


Figura 2.2 - Exemplo de uma instalação “molhada” e “seca” respectivamente [39]

2.2.1 Piso radiante de ar

Devido ao facto de o ar não conseguir manter grandes quantidades de calor, os pisos radiantes de ar quente não se tornam rentáveis em aplicações habitacionais e são raramente implementados. No entanto a sua instalação pode ser feita combinando-se com sistemas de aquecimento solar de ar, mas como é óbvio esses sistemas têm a desvantagem de apenas funcionarem durante o dia, quando a necessidade de aquecimento é baixa. Alguns destes sistemas tentam colmatar esta desvantagem utilizando a inércia térmica das paredes para armazenar calor, apesar de esta abordagem não ser recomendada [40].

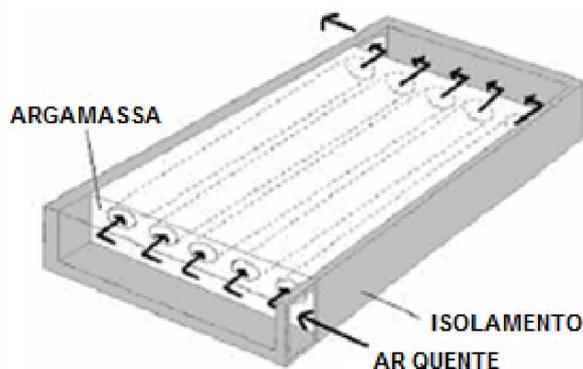


Figura 2.3 - Piso radiante por circulação de ar [41]

2.2.2 Piso radiante Eléctrico

Os pisos radiantes eléctricos consistem basicamente em resistências eléctricas embutidas no piso.

Devido aos preços relativamente altos da electricidade, normalmente a aplicação deste tipo de piso radiante só é rentável quando o fornecedor de energia eléctrica dispõe de taxas de



utilização específicas que beneficiam este tipo de aplicação e quando na sua aplicação são utilizados materiais que possuam uma massa térmica significativa. Por exemplo uma taxa de custo reduzido para uma utilização durante o período nocturno permite que se “carregue” o betão com calor durante a noite. Se a capacidade térmica do betão for suficientemente grande, isso vai permitir que o calor armazenado no betão seja o suficiente para manter a casa confortável durante um período de 8 a 10 horas, sem ser necessário recorrer à energia eléctrica.

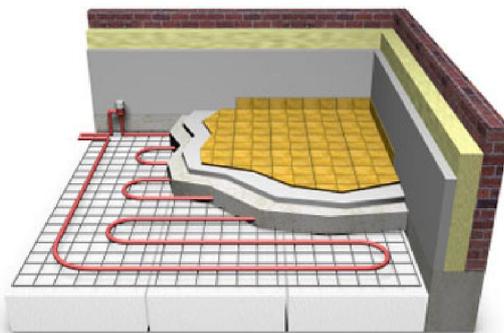


Figura 2.4 - Exemplo de uma instalação de um piso radiante eléctrico [42]

2.2.3 Piso radiante Hidráulico

Nas instalações de piso radiante hidráulico as tubagens de plástico tipo PE-X (polietileno reticulado) são actualmente as mais utilizadas [37]. Este tipo de material é utilizado devido ao seu custo, a sua não reacção com a argamassa e durabilidade. Outro material utilizado são tubos de copolímero de polipropileno, com uma grande vantagem do seu custo. O preço do cobre tem reforçado o uso de materiais alternativos, tais como os referidos anteriormente (PE-X e copolímero de polipropileno). O PE-X está disponível em várias formulações que possuem diferentes características de rigidez, flexibilidade, tolerância de temperatura, pressão de força, estabilidade química, resistência e eficiência de transferência de calor. Embora o PE-X (figura 2.5) tenha variações de diferentes marcas, existe uma característica comum, que é a de oferecerem um desempenho fiável e de longa duração [38].



Figura 2.5 - Tubo de PE-X com multi-camada [43]



O tubo ilustrado na figura 2.5 é um tubo de multi-camada, com uma estrutura formada por três camadas sobrepostas: uma camada interna de polietileno reticulado (PE-X), uma camada intermédia de alumínio e uma camada exterior de polietileno. Este tubo apresenta múltiplas vantagens, porque tem uma menor dilatação, é impermeável ao oxigénio, não é corrosivo pelo exterior e pelo interior, é flexível e adaptável.

A estrutura de um piso radiante hidráulico é semelhante ao de um piso radiante eléctrico. A figura 2.6 ilustra a estrutura típica de um piso radiante.

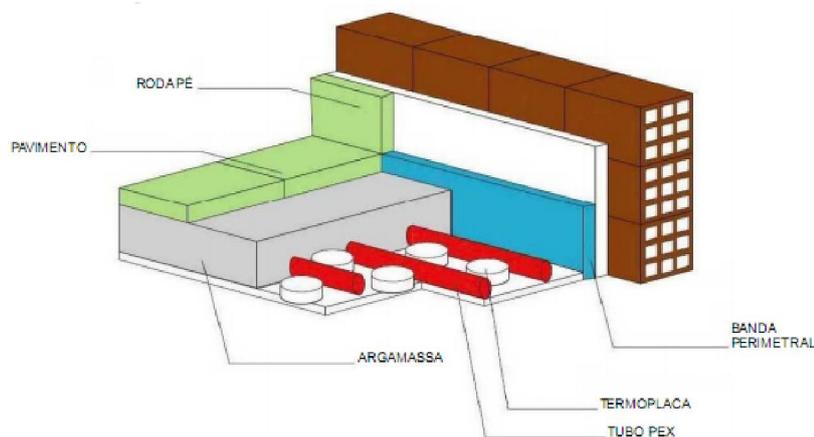


Figura 2.6 - Exemplo típico de uma instalação tubular de um piso radiante hidráulico [39]

Sempre que o piso possa transmitir humidade, é necessário colocar entre o piso e o revestimento superficial do piso uma barreira anti-vapor (figura 2.7). Este material tem a missão de evitar a passagem de humidade para a superfície. Watson e Chapman [38] revelam que a pressão nominal no piso para aquecimento é definida pela norma ANSI/NFS 14.



Figura 2.7 - Barreira anti-vapor [43]

2.3 Instalação

Sejam cabos ou tubagens, o método de instalação sistemas dos pisos radiantes eléctricos e hidráulicos é semelhante.



As instalações “molhadas” consistem em colocar os cabos ou as tubagens num piso sólido, sendo este o tipo de aplicação mais antigo. As tubagens ou cabos podem ser embutidos em placas de betão, numa camada de argamassa ou em qualquer outro material.

Os sistemas aplicados em placas de betão espessas possuem uma grande massa térmica, o que os torna ideais para armazenar calor proveniente de sistemas de energia solar, os quais têm uma produção flutuante de calor. A desvantagem de placas espessas é sua resposta lenta a variações térmicas, o que faz com que retrocessos sejam difíceis ou mesmo impossíveis. A maior parte dos especialistas recomenda que se mantenha uma temperatura constante com este tipo de instalações.

Devido a recentes inovações na tecnologia de pisos radiantes, as chamadas instalações “secas”, nas quais os cabos ou tubagens são aplicados directamente em canais de ar sob a superfície do piso, têm vindo a ganhar popularidade, principalmente porque este tipo de instalação é mais rápido e menos dispendioso. Mas devido ao facto de as tubagens ou cabos estarem instalados em espaços com ar, faz com que estas tenham que operar com temperaturas mais altas.

2.4 Disposição das tubagens/resistências eléctricas

Os principais parâmetros de projecto de um piso radiante são a distância entre tubagens, caudal de água (diferença de temperatura entre a entrada e saída do piso) e a disposição das tubagens [49].

Antes da instalação do sistema, deve ser feita uma estimativa da carga térmica da casa quarto a quarto. A estimativa das cargas térmicas da habitação vai definir as características e disposição da instalação. Para além do factor das cargas térmicas a disposição das tubagens e o seu espaçamento é feito tendo em conta o tipo de revestimento do piso ou o seu isolamento [50].

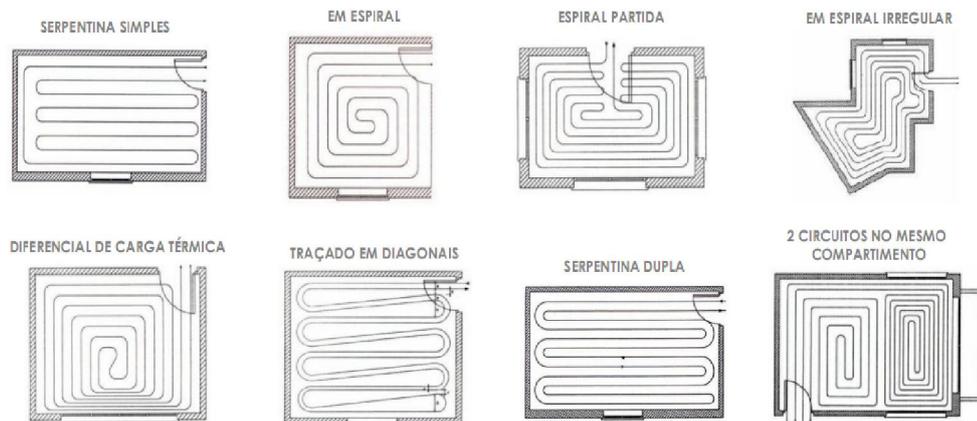


Figura 2.8 - Exemplo de disposição das tubagens [39]



2.5 Temperaturas da superfície do piso

As normas internacionais [51-53] recomendam que as superfícies dos pisos radiantes em zonas ocupadas, para quartos com ocupantes sedentários com calçado normal funcionem numa gama de temperaturas compreendidas entre 19°C e 29°C. Este é um factor limitativo para a capacidade dos pisos radiantes. Para o aquecimento, a temperatura máxima é de 29°C, enquanto para arrefecimento, a temperatura mínima é de 19°C. Em espaços em que os ocupantes andem descalços, a temperatura óptima de conforto depende também do tipo de material da superfície.

2.6 Tipos de acabamento da superfície

Apesar dos ladrilhos de cerâmica serem os mais usados como revestimento para os pavimentos, qualquer tipo de revestimento pode ser usado. No entanto, alguns têm desempenhos melhores do que outros devido as diferentes resistências térmicas. Um material com uma elevada resistência térmica pode isolar o piso reduzindo ou abrandando a transferência térmica entre o espaço interior e o piso, o que conseqüentemente faz aumentar o consumo de energia necessária.

A maior parte dos fabricantes recomenda o uso de madeira laminada em vez de madeira sólida. Isto reduz as hipóteses da madeira secar e conseqüentemente encolher e abrir fendas devido às altas temperaturas.

2.7 Capacidade de aquecimento e arrefecimento

A capacidade de aquecimento e arrefecimento de um piso radiante depende da transferência de calor entre a superfície do piso e o espaço interior (coeficientes convectivo e de radiação), da transferência de calor por condução entre a superfície do piso e as tubagens ou cabos (tipo de revestimento do pavimento, tipo de cimento, tipo de instalação, espessura da placa, espaço entre tubagens/cabos) e transporte de calor pela água (caudal de água, diferença de temperatura da água entre a entrada e saída) [54].

2.8 Mecanismos de transferência de calor

Transferência de calor é o processo pelo qual a energia passa de um corpo quente para um corpo frio. A transferência de calor é um fenómeno unidireccional que ocorre apenas do corpo quente para o corpo frio. É impossível inverter o processo sem recurso a energia adicional. Um refrigerador move o calor do seu interior relativamente frio para uma sala mais quente, mas isto á custa da energia necessária para operar o compressor de refrigeração. Por convenção, o calor a sair do controlo de volume é considerado negativo e o calor a entrar no volume de controlo é considerado positivo.



No caso experimental em estudo o volume de controlo é a câmara climática onde está instalado o piso radiante, e onde podem ocorrer três processos de transferência de calor: convecção, condução e radiação. Estes três tipos de transferência de calor estão ilustrados na Figura 2.9 é extremamente importante ter em conta e perceber que, com excepção do ambiente em vácuo, todos estes processos ocorrem simultaneamente.

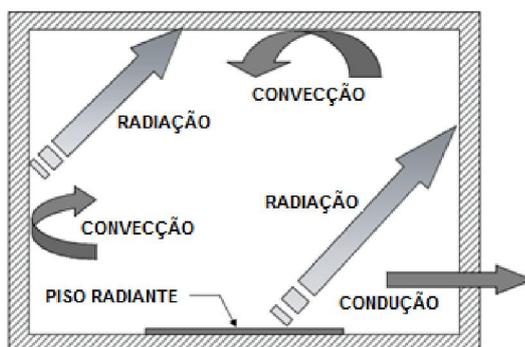


Figura 2.9 - Métodos de transferência de calor dentro da câmara climática [38]

Referindo a Figura 2.9, a condução é definida como sendo a taxa de energia transportada através de um sólido. Na Figura 2.9, a condução é representada como o calor transportado através da parede da câmara. Como seria de esperar (para o modo de aquecimento), a direcção do transporte de calor é feito da zona quente para a zona fria, ou seja do interior da câmara para o exterior. Matematicamente, a condução é proporcional á diferença de temperatura e espessura da parede e é descrita pela seguinte fórmula:

$$q''_{\text{cond}} \propto \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.1)$$

A constante de proporcionalidade que relaciona a taxa de transferência de calor pela razão da diferença de temperatura pela espessura da parede é chamada de condutividade térmica. A condutividade térmica do material é designada por K . A razão $\Delta T/\Delta x$ é o gradiente de temperatura ao longo da parede. Para aumento da precisão, e para permitir variações na condutividade térmica do material com a temperatura, a espessura da parede é reduzida a zero. A equação para a condução de calor fica então assim:

$$q''_{\text{cond}} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(-k \frac{\Delta T}{\Delta x} \right) = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

A convecção representada na Figura 2.9 é a taxa de energia que é transferida por um fluido em movimento sobre uma superfície sólida. A convecção é ilustrada como o calor transferido da superfície da parede para o ar da câmara. A convecção pode também ser forçada, devido a um ventilador ou de forma natural, fenómeno este devido á natureza flutuante de um fluido



relativamente quente. Matematicamente, a transferência de calor por convecção numa superfície é dado por:

$$q''_{\text{conv}} = h(T_f - T_i) \quad (2.3)$$

O parâmetro h é o coeficiente de transferência de calor, T_f é a temperatura do fluido, e T_i é a temperatura da superfície sólida i . Os coeficientes de transferência de calor são obtidos a partir de extensos dados bibliográficos de dados experimentais (ASHRAE Handbook [11], Incropera e DeWitt [54], entre outros). Estes dados experimentais incluem a velocidade do fluido, temperatura do fluido e superfície e propriedades do fluido.

A transferência de calor por radiação, indiscutivelmente o método mais complexo de transferência de calor, é a taxa de transferência de calor de uma fonte quente para um corpo frio através de ondas electromagnéticas. A transferência de calor por radiação é o único processo que consegue transferir energia no vácuo. Na Figura 2.9, a radiação é ilustrada como sendo a taxa de energia transferida directamente do piso radiante para a parede da câmara. A transferência de calor por radiação da parede para o tecto da câmara é também ilustrada na figura. A transferência de calor por radiação da superfície j para a superfície i é normalmente simplificada na seguinte fórmula:

$$q''_{\text{rad},j \Rightarrow i} = \varepsilon \sigma F_{ji}(T_j^4 - T_i^4) \quad (2.4)$$

A seta dupla representa a interacção da transferência de calor da superfície j para a superfície i . O parâmetro ε é a emissividade da superfície, que varia entre zero para uma superfície reflectiva e um para uma superfície completamente absorvente. O parâmetro σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$). O factor de forma, denotado por F_{ji} , representa a configuração geométrica dos itens dentro do volume de controlo. Para a maior parte das aplicações o factor de forma é aproximadamente de 0,8 a 0,9. Um caso especial de factor de configuração é quando uma superfície é demasiado pequena comparada com a outra, neste caso o factor de configuração é 1,0.

2.8.1 Transmissão de calor no piso radiante

A avaliação da eficiência do painel radiante é essencial para determinar as dimensões e avaliar o consumo de energia. A análise do balanço energético da superfície aplica a primeira lei da termodinâmica para a superfície do piso. A Figura 2.10 mostra os factores de resistência térmica, representada por Watson e Chapman [38].

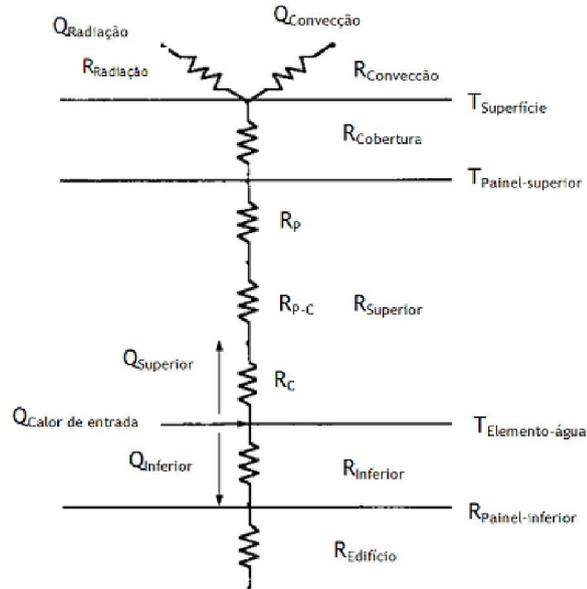


Figura 2.10 - Esquema da resistência térmica para um sistema de piso radiante [38]

Descrição da simbologia utilizada na Figura 2.10 [38]:

- R_{superior} -resistência térmica do elemento de aquecimento e a superfície do piso ($R_{\text{superior}} = R_c + R_{p-c} + R_p$) onde:
 - R_p - resistência térmica do painel superior;
 - R_{p-c} - resistência térmica na entre o tubo e o painel superior por unidade de espaço;
 - R_c - resistência térmica da parede do tubo por unidade de espaço;
- $R_{\text{cobertura}}$ - resistência térmica do revestimento superficial do piso (de vinil, tapete, etc).
- R_{inferior} - resistência térmica total entre o elemento de aquecimento ou de arrefecimento e a parte de trás do piso radiante.
- E_{edificio} - resistência térmica total do elemento de construção (teto, piso, etc.) parte inferior do painel.
- $R_{\text{radiação}}$ -resistência térmica de transferência de calor por radiação.
- $R_{\text{convecção}}$ - resistência térmica de transferência de calor por convecção.

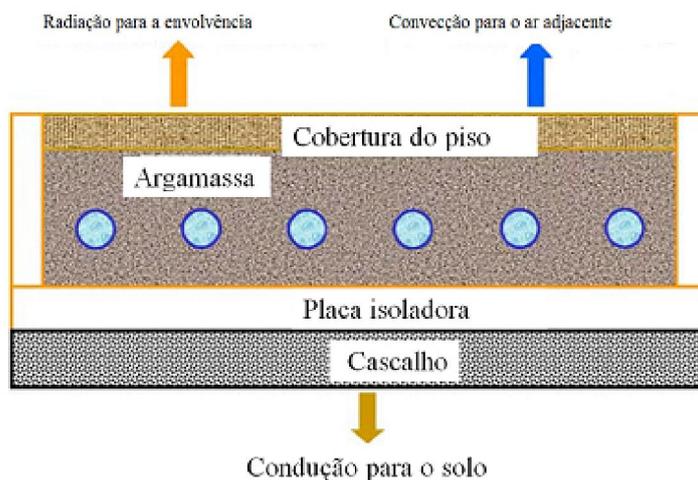


Figura 2.11 - Composição do piso radiante [48]

2.9 Controlo

O maior problema para o conforto térmico que ocorre em edifícios bem isolados, é a grande variação das temperaturas das divisões do edifício devido à variação das cargas térmicas internas dos ocupantes, iluminação, equipamentos ou da luz directa do sol. As pequenas perdas de calor em edifícios bem isolados significam que alterações nas cargas internas têm um maior impacto na temperatura das divisões do que em edifícios com isolamento padrão. A influência destas cargas depende também da massa térmica dos edifícios e da controlabilidade dos sistemas de aquecimento. Como normalmente os sistemas de piso radiante possuem uma massa térmica superior aos sistemas de aquecimento convencionais, isto significa que ao utilizá-los corre-se um risco maior de sobreaquecimento e também uma perda adicional de calor. No entanto vários estudos mostram precisamente o contrário.

A variação da temperatura exterior é controlada a partir de um sensor colocado no exterior. O controlo da temperatura no piso radiante, usualmente é feito alterando-se a temperatura da água (média entre o valor de entrada e saída da água no piso) de acordo com a temperatura exterior e uma curva de funcionamento do piso. Para um controlo eficaz da temperatura ambiente da habitação, é importante que esta curva de funcionamento seja construída tendo em conta o tipo de edifício (massa e perdas térmicas) e as diferenças de calor requeridas para as diferentes divisões. A radiação solar e as cargas térmicas internas podem ter um grande impacto na temperatura da divisão da habitação requerendo assim uma redução ou aumento de calor.

Alguma da controlabilidade do sistema depende da massa térmica do edifício e do sistema. Para um sistema de aquecimento de baixa temperatura, como um piso radiante, um efeito significativo é o chamado “auto controlo” causado pela pequena diferença de temperatura entre o ar ambiente e o piso. Um pequeno aumento da temperatura do ar ambiente vai fazer



diminuir a diferença entre o ar e o piso, fazendo assim decrescer a necessidade de calor por parte do piso. O controlo pode ser adicionalmente melhorado implementando-se termóstatos em cada divisão da casa, que baseados em cada valor individual de temperatura regulam o caudal de água necessário para cada divisão. O auto controlo depende da diferença de temperatura entre sala e o piso e na diferença de temperatura entre a sala e a água. A tabela 2.1 mostra a percentagem de decréscimo de calor emitido pelo piso para um aumento de 1K na temperatura da sala. Uma casa bem isolada tem, em média, uma carga térmica de 10 a 20 W/m² para a época de aquecimento. Para este tipo de casas, o efeito de auto controlo corresponde de 30% a 90% (tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Temperatura do piso, temperatura média de aquecimento e efeito de auto controlo do piso radiante em percentagem [55]

Fluxo médio de calor [w/m ²]	Temperatura necessária para o piso (para temperatura sala de 20 °C) °C	Temperatura média do aquecimento médio		% do decréscimo de saída de calor por cada 1K de aumento da temperatura de referência da sala		
		Azulejo 0,02 m ² .K/W, °C	Carpete 0,1 m ² .K/W, °C	Superfície Do piso %	Água Azulejo % / Carpete %	
80	27,3	31,9	38,4	14	8	5
40	23,9	26,2	29,4	26	16	11
20	22,1	23,3	24,9	48	30	20
10	21,1	21,7	22,5	91	59	40

Num estudo intensivo realizado tendo como base a nova regulamentação energética alemã para edifícios, foi estudada a controlabilidade de vários sistemas de aquecimento numa detalhada simulação dinâmica computacional. Os resultados estão agora incluídos numa nova norma alemã (DIN 4710-10) para sistemas de aquecimento e na directriz da VDI-TGA [56]. A figura 2.12 mostra as vantagens do controlo da temperatura média da água (entre entrada e saída) em vez de apenas a temperatura de entrada. A figura 2.12 mostra ainda a vantagem do uso do controlo individual de temperaturas para cada divisão em termos de gastos energéticos. O estudo mostra que usando-se um controlo individual para cada divisão se consegue poupar entre 15% a 30% de energia comparado com um sistema de controlo central.

O consumo de energia adicional representado na Figura 2.12 é dado como relação a um sistema ideal de controlo num sistema sem massa e consequentemente sem factor de gasto energético. A Figura mostra este gasto energético adicional como função da relação entre carga térmica de projecto e o calor necessário. O baixo factor (cerca de 0,08) corresponde a uma habitação de baixo consumo energético, na qual as cargas internas dos ocupantes, luz e radiação solar reduzem significativamente a necessidade de aquecimento. As casas existentes possuem valores superiores a 0,20.

A Figura 2.12 mostra ainda que o rendimento de um piso radiante é igual ou superior ao rendimento de um radiador de baixa temperatura controlado por uma válvula de termóstato.



Para além dos benefícios energéticos, é essencial para o conforto térmico que seja possível ajustar individualmente a temperatura de cada divisão do edifício. Para o controlo de um piso radiante para arrefecimento deve se ter em conta adicionalmente o ponto de orvalho [57].

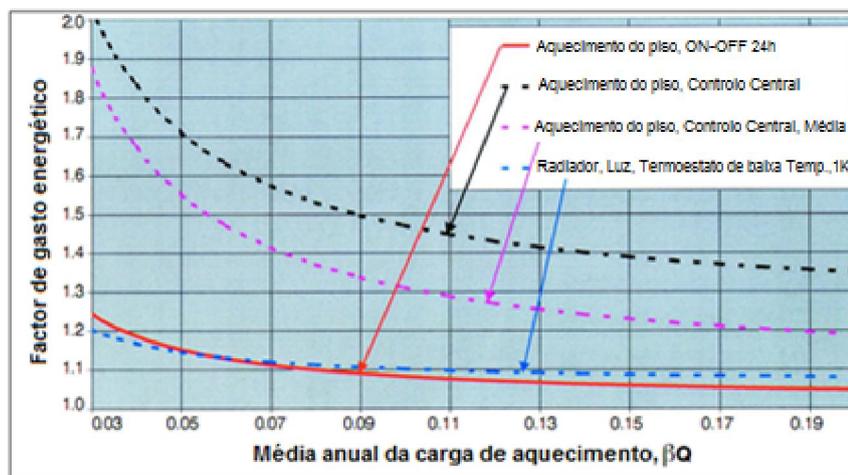


Figura 2.12 - relação entre cargas térmicas relativas e factor de energia dispendida para várias estratégias de controlo. O factor de energia dispendida é perda adicional de calor quando comparado com um sistema ideal de controlo [56-57]

2.10 Energia

O objectivo principal de isolar os edifícios é baixar os consumos energéticos. Adicionalmente, o fornecimento, distribuição e emissões do sistema têm que ser optimizados. As diferenças em perdas térmicas por emissão de calor dos diferentes tipos de sistemas (radiadores, convectores, ar quente, piso radiante, tecto radiante) são baixas em edifícios bem isolados [58 - 60]. Usar sistemas de aquecimento de baixas temperaturas é benéfico relativamente às perdas na distribuição e à eficiência da geração de calor. O alto rendimento das caldeiras, especialmente caldeiras de condensação modernas é aproveitado pelo piso radiante. Também o rendimento de bombas de calor ou colectores solares é muito mais alto com um sistema de aquecimento de baixas temperaturas. O facto do sistema de piso radiante operar com altas temperaturas de arrefecimento, possibilita um alto rendimento para uma bomba de calor ou chiller reversível. Como a temperatura do solo ronda normalmente os 10°C, isso possibilita também o arrefecimento do piso directamente a partir de um permutador de calor instalado no solo (tubagens embutidas no solo ou fundação) sem recurso a uma bomba de calor.

Um sistema de piso radiante para arrefecimento pode ser usado em conjunto com um sistema de ar condicionado. O piso radiante trata a maior parte do calor sensível, enquanto o sistema de ar encarrega-se do calor latente. Ao mesmo tempo, o ponto de orvalho vai baixando, resultando num aumento da capacidade de arrefecimento do piso radiante. As altas temperaturas da água (18°C a 20°C) fazem aumentar o rendimento do sistema de refrigeração.



2.11 Vantagens

Utilização eficiente do espaço e não é necessária limpeza. O sistema não produz barulho, não causa corrente de ar ou usa condutas. O piso radiante tem uma distribuição uniforme de temperaturas e é um sistema de aquecimento de baixa temperatura.

Edifícios bem isolados requerem controlos eficientes para a variação das cargas térmicas internas geradas por ocupantes, iluminação e radiação solar directa. A combinação do auto controlo do sistema de piso radiante para aquecimento com termóstatos nas divisões cria um controlo eficiente para as variações das cargas térmicas internas até mesmo em edifícios bem isolados.

O sistema de piso radiante para aquecimento aumenta o rendimento de fontes geradoras de calor devido ao facto de operarem com baixas temperaturas.

Um piso radiante hidráulico para arrefecimento oferece arrefecimento sensível sem gerar ruído ou corrente de ar.

A capacidade máxima de refrigeração é para a maior parte dos sítios menos de 50 W/m². Em espaços com radiação solar directa no piso, a capacidade de refrigeração é significativamente superior.





3. Conforto Térmico

O conforto térmico é a condição psicológica de um indivíduo que expressa satisfação em relação às condições térmicas do ambiente em que se encontra [52]. A sensação de conforto térmico é um processo cognitivo envolvendo muitos parâmetros influenciados por processos físicos, fisiológicos, psicológicos e outros.

A consciência aparenta decidir sobre conforto e desconforto térmico com base em sensações directas de temperatura e humidade através da pele, em temperaturas sentidas no interior do corpo, e nos esforços necessários para regular a temperatura do corpo. Em geral, o conforto ocorre quando as temperaturas do corpo são mantidas com poucas variações, a humidade da pele é baixa, e o esforço fisiológico de regulação é minimizado.

Do ponto de vista fisiológico, o conforto térmico ocorre quando há um equilíbrio térmico na ausência de suor regulatório durante a troca de calor entre o corpo de um indivíduo e o ambiente em que se encontra.

Em termos de sensações corporais, o conforto térmico está relacionado com as sensações de muito quente, quente, morno, neutro, fresco, frio e muito frio. O conforto também depende de acções comportamentais que são iniciadas inconscientemente ou conscientemente e guiadas pelas sensações térmicas e de humidade para reduzir o desconforto. Algumas das acções possíveis para reduzir o desconforto são: alteração do vestuário, alteração de actividades, mudança de postura ou localização, mudança nos parâmetros operacionais de dispositivos de controlo do ambiente, abertura ou fecho de passagens de ar, reclamação ou mesmo abandono do local.

3.1 Estudo do conforto térmico

As pesquisas relacionadas com o tema “conforto térmico” regem-se por duas metodologias, as que se baseiam em resultados obtidos em pesquisas desenvolvidas em câmaras climatizadas onde as variáveis ambientais são gerenciadas pelo investigador e aquelas onde os resultados são obtidos a partir de pesquisas de campo, sob influencia da situação climática local.

As pesquisas sobre conforto térmico seguem o disposto nas normas internacionais ISO 7730 [61], ISO 7933 [62], ISO 8996 [63] e ISO 9920 [64]. A ISO 7730 utiliza o modelo desenvolvido por Fanger [1] numa câmara climática, onde se admite que o corpo humano em dado ambiente, em estado de equilíbrio térmico ou sem acumular calor no seu interior, está desta forma, muito próximo da condição de neutralidade térmica. Entretanto, a condição de neutralidade térmica ou de verificação do balanço térmico apresentado no trabalho é uma condição necessária mas não suficiente para que a pessoa encontre-se numa situação de conforto térmico, pois a mesma pode encontrar-se ao mesmo tempo numa situação de



neutralidade térmica e ainda assim estar sujeita a algum tipo de desconforto localizado como por exemplo radiação assimétrica.

Com o objectivo de englobar a grande variedade de sensações térmicas relatadas individualmente por voluntários na forma de questionários, Fanger expandiu a equação de conforto apresentando os índices PMV - *Predicted Mean Vote* (voto médio estimado) e PPD - *Predicted Percentage of Dissatisfied* (percentagem de pessoas insatisfeitas).

3.2 Norma ISO 7730

Para este trabalho optou-se por utilizar a norma ISO 7730, consistindo a metodologia de cálculo nos seguintes pontos:

- Parâmetros: quantificam-se os parâmetros individuais e ambientais das pessoas e do ambiente.
- Equação de Conforto: substituem-se estes valores na equação de conforto térmico para determinação do termo associado à acumulação energética no corpo, S .
- PMV: com base no valor da acumulação energética no corpo e no metabolismo determina-se o valor de PMV (*Predicted Mean Vote*) através de uma correlação.

O PMV não é mais do que uma escala quantitativa da sensação de calor e de frio.

- PPD: a percentagem de pessoas insatisfeitas termicamente, PPD, é determinada com base no valor de PMV através de uma correlação.

3.2.1 Parâmetros Individuais

O metabolismo corresponde à taxa de utilização de energia pelo corpo. O metabolismo subdivide-se no metabolismo basal e de actividade. O metabolismo basal corresponde à taxa verificada durante o repouso absoluto, mas em vigília. O metabolismo de actividade está relacionado com o esforço físico, podendo ser 20 vezes superior ao metabolismo basal em atletas bem treinados.

Para a mesma actividade, verificou-se que o metabolismo varia principalmente com a área corporal, pelo que é geralmente definido nas unidades W/m^2 , tomando-se o valor de $1,75 m^2$ como área corporal de um adulto.

Embora não referido no texto da norma, convém ter em conta que, de acordo com DuBois (1916), a área corporal (área da superfície exterior de uma pessoa nua, em m^2) está correlacionada com a altura (em m) e com o peso (em kg) pela equação 3.1, com representação gráfica na Figura 3.1.



$$A_{DU} = 0,203.m^{0,425}.a^{0,725} \quad (3.1)$$

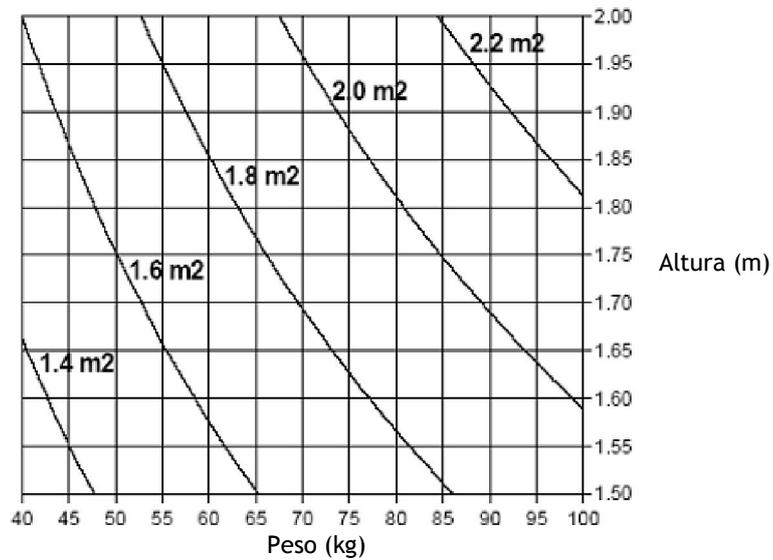


Figura 3.1 - Gráfico da Área corporal em função da altura e do peso

A relação entre a actividade e o metabolismo (valor total, i.e., soma da parcela basal com a de actividade) é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Nível de metabolismo em função da actividade desenvolvida

Actividade	Nível de metabolismo		
	W	(met)	W/m ²
Repouso	80-100	0,8-1,0	45,7 – 57,1
Actividade sedentária	100-120	1,0-1,2	57,1 – 68,6
Trabalho leve	140-180	1,4-1,8	80,0 – 102,8
Trabalho oficinal médio	200-300	2,0-3,0	114,3 – 171,4
Ginástica	300-400	3,0-4,0	171,4 – 228,6
Desporto de competição	400-600	4,0-6,0	228,6 – 342,9

Uma forma de se contabilizar o nível de actividade é através do met, que caracteriza a produção de calor devido ao desempenho humano. 1met = 58 W/m²; área média do corpo humano A = 1,75 m². Um homem produz aproximadamente 100 W de calor.

3.2.2 Trabalho

Tipicamente a avaliação de conforto verifica-se em casos em que o trabalho realizado é nulo ou corresponde apenas a dissipações por atrito, tais como, pessoas sentadas ou em andamento contínuo.



A quantificação do trabalho realizado para o exterior corresponde à variação da energia cinética e potencial (por exemplo, na subida de escadas).

3.2.3 Vestuário

O vestuário é caracterizado através da sua resistência térmica, I_{vest} , nas unidades $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$. À semelhança do metabolismo, o vestuário apresenta uma unidade própria, o clo, que corresponde à resistência térmica de $0,155 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$. A Tabela 3.2 apresenta valores típicos de resistência térmica, I_{vest} , para vários tipos de vestuário.

Tabela 3.2 - Resistência térmica do vestuário

Vestuário	Resistência térmica, I_{vest} [clo]	Resistência térmica, I_{vest} [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$]
Nu	0	0
Calções	0,1	0,016
Vestuário Tropical	0,3	0,047
Vestuário leve de Verão	0,5	0,078
Vestuário de trabalho	0,7	0,124
Vestuário de Inverno para ambiente interior	1,0	0,155
Fato completo	1,5	0,233

3.2.4 Humidade do ar

As equações de balanço energético são deduzidas com base na pressão parcial do vapor de água no ar. Definido o estado higroscópico do ar é em termos da temperatura seca, t_{ar} em $^{\circ}\text{C}$, e a humidade relativa, ϕ entre 0 e 1, a pressão parcial do vapor de água, P_{vap} em Pa, é obtida pela equação 3.3 P_{sat} .

$$P_{\text{vap}} = \phi \cdot P_{\text{sat}}(T) \quad (3.2)$$

Com,

$$P_{\text{sat}}(T) = 1000 \cdot e^{\left(\frac{16,6536 - \frac{40130,183}{T+235}}{T+235}\right)} \quad (3.3)$$

3.2.5 Equação de conforto térmico

A equação de conforto térmico permite calcular o termo de acumulação de energia no corpo, S , correspondente à diferença entre o metabolismo desenvolvido no corpo e a transferência de calor para o ambiente, sendo apresentada na equação 3.4.



$$\begin{aligned}
 &M - W && \text{(Metabolismo e Trabalho)} \\
 &-3,05 \cdot 10^{-3} \cdot (5733 - 6,99 \cdot (M - W) - P_{\text{vap}}) && \text{(Difusão de vapor)} \\
 &-0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] && \text{(Transpiração)} \\
 &-1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - P_{\text{vap}}) && \text{(Respiração latente)} \\
 &-0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) && \text{(Respiração sensível)} \\
 &-3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{\text{vest}} \cdot [(t_{\text{vest}} + 273)^4 - (t_{\text{rad}} + 273)^4] && \text{(Radiação)} \\
 &-f_{\text{vest}} \cdot h \cdot (t_{\text{vest}} - t_{\text{ar}}) = && \text{(Convecção)} \\
 &+ S && \text{(Acumulação de calor)}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

3.2.6 Temperatura exterior do vestuário

A temperatura da superfície do vestuário é obtida por balanço energético, igualando a transferência por condução da pele para o vestuário à transferência de calor por convecção e radiação, resultando na equação não linear que se apresenta nas equações 3.5 e 3.6. Nesta equação I_{vest} corresponde à resistência térmica do vestuário, em $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, e t_{pele} à temperatura da pele, em $^{\circ}\text{C}$.

$$t_{\text{pele}} = 35,7 - 0,0275 \cdot (M - W) \tag{3.5}$$

$$t_{\text{vest}} = t_{\text{pele}} - I_{\text{vest}} \cdot \left\{ 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{\text{vest}} \cdot [(t_{\text{vest}} + 273)^4 - (t_{\text{rad}} + 273)^4] + f_{\text{vest}} \cdot h_c \cdot (t_{\text{vest}} - t_{\text{ar}}) \right\} \tag{3.6}$$

3.2.7 Factor de vestuário

O factor de vestuário define-se pela razão entre a área exterior do vestuário e a área corporal, sendo, conseqüentemente, um valor adimensional e superior à unidade. O factor de vestuário correlaciona-se com a resistência térmica do vestuário através das equações 3.7 e 3.8.

$$f_{\text{vest}} = 1,00 + 1,290 \cdot I_{\text{vest}} \quad \text{para} \quad I_{\text{vest}} < 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W} \tag{3.7}$$

$$f_{\text{vest}} = 1,05 + 0,645 \cdot I_{\text{vest}} \quad \text{para} \quad I_{\text{vest}} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W} \tag{3.8}$$

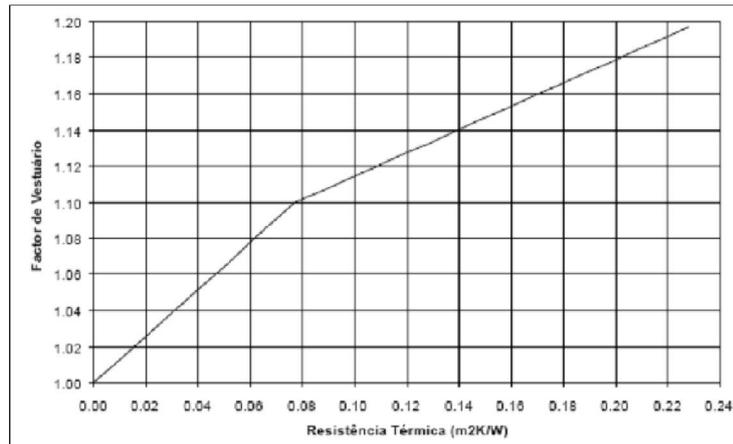


Figura 3.2 - Gráfico do Factor de vestuário em função da resistência térmica do vestuário

3.2.8 Coeficiente de convecção

A norma ISO 7730 define o cálculo do coeficiente de convecção natural e forçada pelas equações 3.9 e 3.10:

$$h = 2,38 \cdot (t_{\text{vest}} - t_{\text{ar}})^{0,25} \quad \text{para} \quad 2,38 \cdot (t_{\text{vest}} - t_{\text{ar}})^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v} \quad (3.9)$$

$$h = 12,1 \cdot \sqrt{v} \quad \text{para} \quad 2,38 \cdot (t_{\text{vest}} - t_{\text{ar}})^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v} \quad (3.10)$$

Estas correlações são representadas nos gráficos das Figuras 3.3 e 3.4.

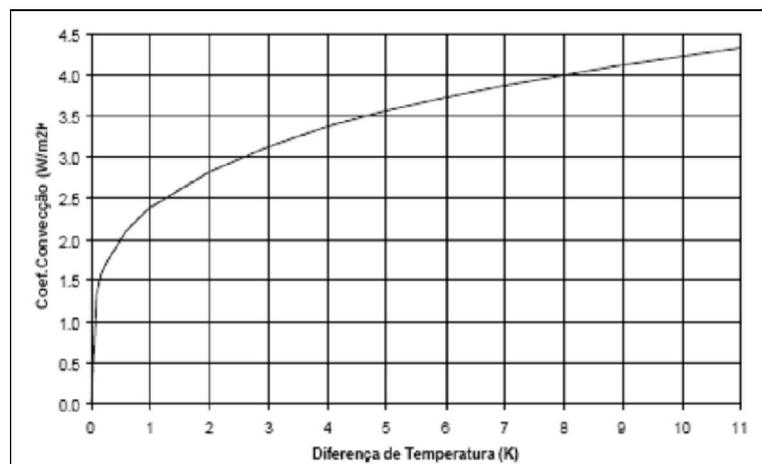


Figura 3.3 - Gráfico do Coeficiente de convecção natural em função da diferença de temperatura

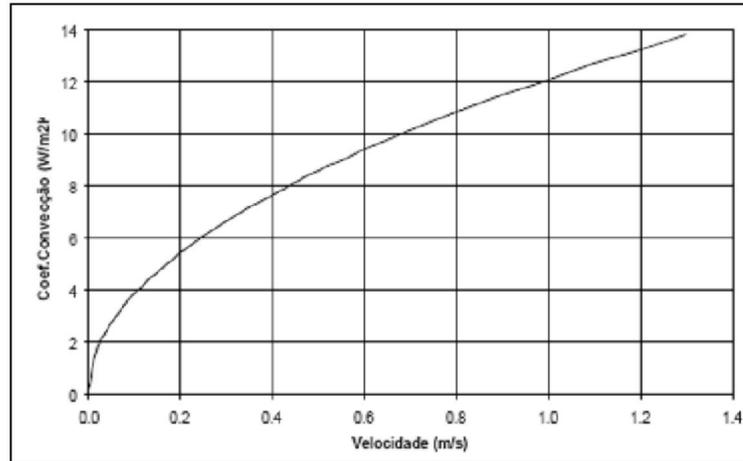


Figura 3.4 - Gráfico do Coeficiente de convecção forçada em função da velocidade

As equações de t_{vest} e h_c podem ser resolvidas iterativamente.

3.2.9 Evaporação

As perdas por evaporação de água na pele são devidas ao mecanismo permanente de difusão de vapor e às situações de transpiração, resultante da necessidade do corpo em manter uma temperatura constante.

A difusão de vapor depende da diferença de pressão de vapor entre a pele (P_{pele}) e a atmosfera (P_{vap}) sendo correlacionada por $3,05 \cdot 10^3 \cdot (P_{pele} - P_{vap})$, em W/m^2 .

Como a pressão de vapor é função da temperatura da pele, a expressão anterior poderá tomar a seguinte forma $3,05 \cdot 10^3 \cdot (256 \cdot T_{pele} - 3373 - P_{vap})$, conduzindo à expressão final do termo de evaporação substituindo T_{pele} pela correlação anteriormente apresentada, função do metabolismo e do trabalho.

3.2.10 Respiração

Trata-se de uma perda de calor de pouco significado. Compõe-se de uma carga sensível resultante do aquecimento do caudal de ar de respiração e de uma carga latente por humidificação do ar. Tipicamente a temperatura do ar expirado é de $34^\circ C$, tendo-se identificado uma relação linear entre o caudal e o metabolismo, pelo que este termo é dado por $0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_{ar})$. Para condições normais ($t_{ar} = 23^\circ C$ e metabolismo de $90 W/m^2$) esta carga é de $1,3 W/m^2$, ou seja, insignificante.

A carga latente está relacionada com a pressão de vapor do ambiente sendo calculada por: $1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - P_{vap})$. Para condições normais ($P_{vap} = 1,4 kPa$ e o metabolismo de $90 W/m^2$) esta carga é de $7 W/m^2$, pelo que muitas vezes não é considerada.



3.2.11 Radiação

A constante $3,96 \cdot 10^{-8}$ resulta do produto da constante de Stefan-Boltzmann pelo factor de forma entre o vestuário e o exterior (toma-se 0,71) e pelo termo relacionado com as emissividades (considera-se uma emissividade da pele e do vestuário de 1 e 0,95, respectivamente).

3.3 Índice PMV

O PMV é um índice que prevê o valor médio do voto de um grupo extenso de pessoas (amostragem significativa) segundo a seguinte escala de sensação térmica:

-3	-2	-1	0	1	2	3
muito frio	frio	ligeiramente frio	neutro	ligeiramente quente	quente	muito quente

O índice PMV baseia-se no balanço de energia ao corpo humano. Um indivíduo encontra-se em equilíbrio térmico quando a produção interna de energia do corpo (função do metabolismo) igualar as perdas de calor com o ambiente envolvente.

Em ambientes moderados, os sistemas internos de regulação térmica do corpo humano tentam, automaticamente, alterar a temperatura da pele e o nível de sudação, de forma o equilíbrio térmico. No índice PMV, a resposta fisiológica dos sistemas internos de temperatura foi relacionada com a escala de votos de sensação térmica recolhidos de um grupo de mais de 1300 indivíduos.

O índice PMV pode ser calculado por:

$$\begin{aligned}
 \text{PMV} = & (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot \{ (M - W) - \\
 & -3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - P_v] - \\
 & -0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \\
 & -1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - P_v) \\
 & -0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - \\
 & -3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{\text{vest}} \cdot [(t_{\text{vest}} + 273)^4 - (t_{\text{mr}} + 273)^4] + \\
 & + f_{\text{vest}} \cdot h_c \cdot (t_{\text{vest}} - t_a) \}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

3.4 Índice PPD

O índice PPD estabelece a quantidade estimada de pessoas insatisfeitas termicamente com o ambiente. Baseia-se na percentagem de um grande grupo de pessoas que gostariam que o ambiente estivesse mais quente ou mais frio, +3, +2 ou -3 e -2, na escala de sensações.



O PPD pode ser determinado analiticamente, conforme equação 3.12 em função do PMV, ou extraído da Figura 3.5.

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad (3.12)$$

Uma conclusão interessante deste gráfico, Figura 3.5, é que, quaisquer que sejam as condições ambientais, não se consegue menos do que 5% de ocupantes descontentes. Baseado nesta caracterização de conforto térmico, a ISO 7730 admite serem aceitáveis ambientes térmicos em que $-0,5 < PMV < 0,5$, ou seja, em que não mais de 10% dos ocupantes se mostrem descontentes.

A ISO 7730 impõe outras regras necessárias para conforto térmico, relacionadas com os parâmetros de conforto:

- A assimetria da temperatura radiante de janelas ou outra superfície vertical fria deve ser inferior a 10 °C (em relação a um plano vertical 0,6 m acima do chão);
- A velocidade do ar tem de ser no Inverno inferior a 0,15 m/s, com temperaturas entre 20°C e 24 °C. No Verão inferior a 0,25 m/s, com temperaturas entre 23°C e 26 °C.
- A diferença de temperatura do ar a 1,1 m e a 0,1 m acima do chão não deve exceder 3 °C.
- A temperatura do chão deve situar-se entre 19°C e 26 °C excepto em pavimentos radiantes podendo atingir neste caso os 29 °C.

No anexo da norma ISO X35.203 recomenda-se, para actividade sedentária, o seguinte:

Em condições de Inverno:

- Temperatura operativa: $22 \pm 2^\circ\text{C}$;
- Diferença de temperatura do ar na vertical entre 0,1m e 1,8m acima do pavimento (ao nível do tornozelo e da cabeça, respectivamente) menor que 3°C;
- Temperatura superficial do pavimento entre os 19°C e os 26°C;
- Velocidade média do ar menor que 0,15m/s;
- Assimetria da temperatura radiante devida a janelas ou outras superfícies frias verticais menor que 10°C (em relação a um pequeno plano vertical colocado a 0,6m acima do pavimento);



- Assimetria da temperatura radiante devida a painéis radiantes de tecto menor que 5°C (em relação a um pequeno plano horizontal colocado a 0,6m acima do pavimento).

Em condições de Verão:

- Temperatura operativa: 24,5 ± 1,5°C;
- Diferença de temperatura do ar na vertical entre 0,1m e 1,8m acima do pavimento (ao nível do tornozelo e da cabeça, respectivamente) menor que 3°C;
- Velocidade média do ar menor que 0,25m/s.

Em Portugal fixaram-se os seguintes limites de temperaturas, humidade relativa, velocidade do ar ambiente e da radiação de contorno:

Temperatura do ar: 18°C a 26°C. Estes limites podem ser excedidos em 2°C por períodos curtos. A flutuação diária da temperatura durante os períodos de ocupação não deve ser superior a ±2°C. Em períodos de Inverno, a diferença em locais não aquecidos no edifício não deve ser superior a 4°C.

Humidade do ar: entre 35% e 85%. No Verão não deve exceder os 60%.

Radiação de contorno: A temperatura média de radiação deve estar próxima da temperatura do ar. A temperatura do pavimento não deve exceder a temperatura do ar mais do que 6°C.

Velocidade do ar: No Inverno < 0,2 m/s. No Verão < 0,5 m/s.

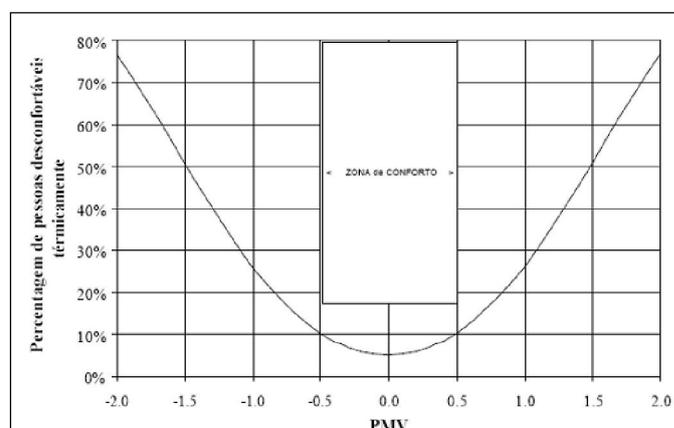


Figura 3.5 - Gráfico PMV vs. PPD

4. Instalação experimental

A instalação experimental é constituída por vários elementos, destacando-se dois elementos principais, o piso radiante como objecto de estudo e a câmara climática como ambiente artificial para o estudo do piso. Para registo do comportamento térmico tanto da câmara climática como do piso recorreu-se a vários equipamentos de aquisição de dados consoante os dados pretendidos.

Para o funcionamento de toda a instalação recorreu-se igualmente a diferentes equipamentos, destacando-se entre eles o banho térmico e a unidade de tratamento de ar que serviram de fonte de calor/frio para todos os ensaios desenvolvidos.

4.1 Introdução

A construção deste protótipo e o seu ensaio numa câmara climática teve como objectivo testar o desempenho do mesmo com diferentes tipos de acabamento da superfície, e o seu impacto nas condições de conforto térmico dentro da câmara climática.

A instalação (Figura 4.1) compreende o piso radiante com dois tipos de acabamento de superfície, a câmara climática onde o mesmo foi testado sob condições térmicas controladas e todo o equipamento necessário para a aquisição de dados como também para o funcionamento do piso e estabilização da câmara climática.

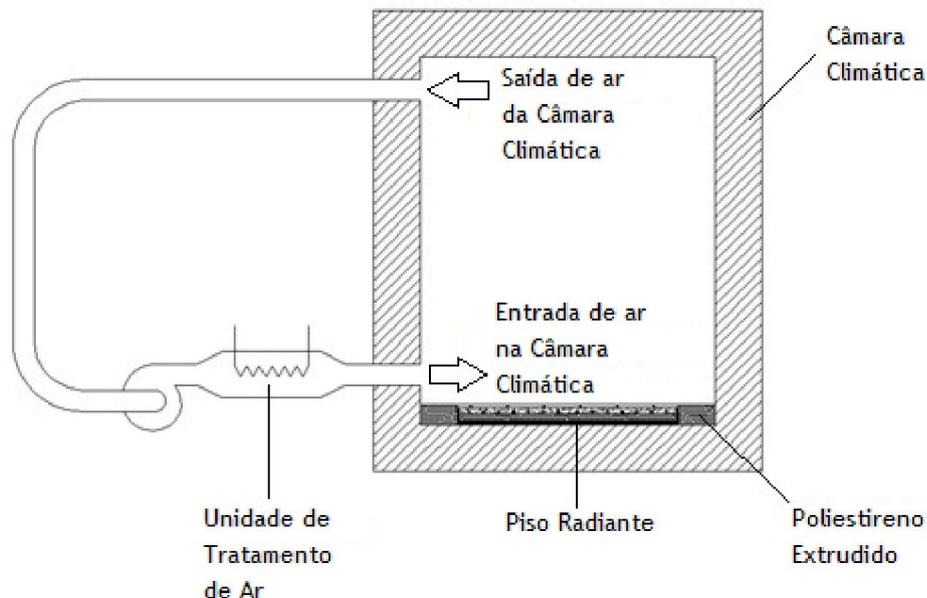


Figura 4.1 - Esquema de montagem do piso radiante na câmara climática

4.2 Piso radiante

O piso radiante testado é constituído por quatro partes distintas: isolante, tubagem, argamassa e o revestimento superficial.

As características do piso radiante utilizado estão ilustradas na Figura 4.2.

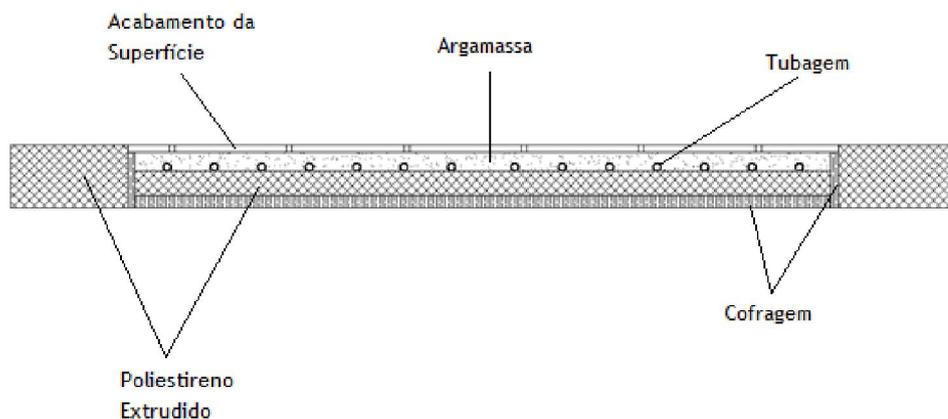


Figura 4.2 - Esquema do piso radiante em corte

4.2.1 Isolante

O isolante escolhido foi XPS (Poliestireno extrudido) com 3 cm de espessura, da marca Iberfibran, com a característica de ter ranhuras que facilitam a ligação da argamassa ao XPS.

As características do XPS utilizado encontram-se descritas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características técnicas do isolante térmico (FIBRANxps 300 C) da marca Iberfibran [65]

Espessura da placa [mm]	Condutibilidade Térmica Declarada - λ_d [W/mk]	Resistência Térmica Declarada - R_d [m ² k/W]	Nº de placas por atado	Quantidade por atado (m ²)	Nº de atados por palete	Quantidade por palete (m ²)	Resistência declarada à Compressão (kPa)
30	0,034		14	10,50	12	126,0	300
35	0,035		12	9,00	12	108,0	300
40	0,035		10	7,50	12	90,0	300
45	0,035		9	6,75	12	81,0	300
50	0,035	*	8	6,00	12	72,0	300
60	0,035		7	5,25	12	63,0	300
80	0,036		5	3,75	12	45,0	300
100	0,038		4	3,00	12	36,0	300
120	0,038		3	2,25	14	31,5	300

* A resistência térmica de produtos com espessura não constante não pode ser declarada

- Superfície lisa com ranhurado em C
- Tipo de encaixe: Mela-madeira "L"
- Dimensões da placa: 1250/600 [mm]



4.2.2 Tubagem

O tipo de tubo utilizado foi uma mangueira flexível sem reforço Cristaflex (tabela 4.2) com um diâmetro externo de 11mm.

Tabela 4.2 - Características técnicas do tubo Cristaflex [66]

Código / Code				Equivalência Equivalence (poleg./inches)	Ø Ext. Outside (mm)	Peso Weight (Kg/m)	Qt. Pallets Qty. Pallet	Metro Meter €	Unid. Unit €
Grupo/Group	Ø Int. Inside (mm)	Comp. Length (m)	Cor Color						
110 190	005	050 100	91	1/5"	7,0	0,025		0,261	13,05 26,08
110 190	008	025 050 100	91	8/25"	11,0	0,060		0,442	11,06 22,12 44,23

Para um melhor aproveitamento do espaço a tubagem foi disposta em espiral como mostra a Figura 4.3.

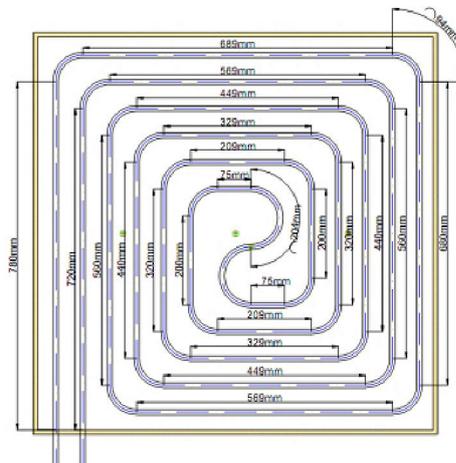


Figura 4.3 - Esquema de instalação da tubagem [67]

4.2.3 Argamassa

A camada de base que envolve a tubagem de transporte de fluido do piso radiante tem uma espessura média da 2,4 cm e é constituída por uma argamassa bastarda de cimento (CEM II/B-L32, 5N), cal hidráulica (NHL 5) e areia natural rolada do rio ao traço de 1:0,5:3 (em volume aparente e para materiais secos), reforçada com fibras têxteis na dosagem de 3kg/m³ para controlo de retracção plástica e razão água/cimento de 0,35 (em massa). Esta argamassa possui uma massa volúmica aparente seca superior a 2000 kg/m³ e um coeficiente de condutibilidade térmica estimado de 1,8 W/(m°C). Considerando que a camada acima da tubagem possui uma espessura média de 1,3 cm, a resistência dessa camada é estimada em $R=0,013/1,8 = 0,007 \text{ m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$.

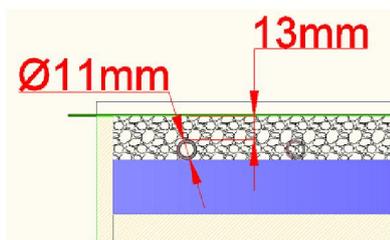


Figura 4.4 - Esquema do piso radiante em corte [67]

4.2.4 Revestimento em cerâmica

O revestimento de piso cerâmico (Figura 4.5) é constituído por ladrilhos cerâmicos com massa volúmica aparente seca de aproximadamente 2300 kg/m^3 , coeficiente de condutibilidade térmica estimado em $1,3 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$ e espessura média de 7 mm , assente com cimento cola de massa volúmica aparente seca entre 1600 e 1800 kg/m^3 , coeficiente de condutibilidade térmica estimado em $1,0 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$ e espessura média de 4 mm . A resistência térmica média estimada para o revestimento (ladrilhos e cimento-cola) é de aproximadamente $0,009 \text{ m}^2\cdot\text{°C/W}$.



Figura 4.5 - Imagem da superfície com acabamento em cerâmica

4.2.5 Revestimento em piso flutuante

O revestimento do piso em pavimento flutuante laminado (Figura 4.6), tem massa volúmica aparente seca de aproximadamente 500 kg/m^3 , coeficiente de condutibilidade térmica estimado em $0,13 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$ e espessura média de 7 mm , assente sobre uma subcamada de feltro em polietileno, com massa volúmica aparente seca de aproximadamente 120 kg/m^3 , coeficiente de condutibilidade térmica estimado em $0,050 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$ e espessura média de 3 mm . A resistência térmica média estimada para o conjunto do pavimento (laminado e feltro) é de aproximadamente $0,114 \text{ m}^2\cdot\text{°C/W}$.



Figura 4.6 - Imagem da superfície com acabamento em piso flutuante

4.2.6 Aquisição de dados

Para a caracterização mais pormenorizada das temperaturas de funcionamento do piso foram instalados vários termopares em vários níveis de construção do piso radiante.

A escolha recaiu nos termopares do tipo K pois permitem ler temperaturas superficiais e internas e garantem ainda a leitura para casos de aumento ou diminuição brusca de temperatura.

Tabela 4.3 - limites da temperatura de operação dos quatro mais comuns tipos de termopares [68]

Common Thermocouple Temperature Ranges			
Calibration	Temp Range	Std. Limits of Error	Spec. Limits of Error
J	0°C to 750°C (32°F to 1382°F)	Greater of 2.2°C or 0.75%	Greater of 1.1°C or 0.4%
K	-200°C to 1250°C (-328°F to 2282°F)	Greater of 2.2°C or 0.75%	Greater of 1.1°C or 0.4%
E	-200°C to 900°C (-328°F to 1652°F)	Greater of 1.7°C or 0.5%	Greater of 1.0°C or 0.4%
T	-250°C to 350°C (-328°F to 662°F)	Greater of 1.0°C or 0.75%	Greater of 0.5°C or 0.4%

A aplicação dos termopares foi feita nos vários níveis de construção do piso e por cada nível foram aplicados 3 termopares em 3 zonas distintas (como ilustra a Figura 4.7), zona A, B e C. Aplicou-se três termopares ao longo do piso para que se conseguisse obter um valor médio da temperatura da superfície em estudo. A Figura 4.8 mostra a aplicação dos termopares na secção 2.

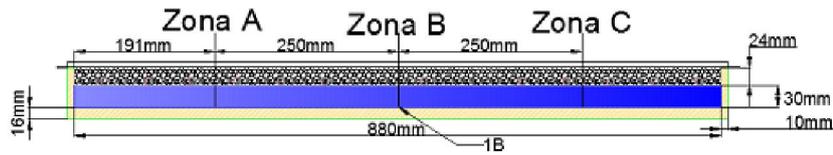


Figura 4.7 - Esquema em corte do provete [67]

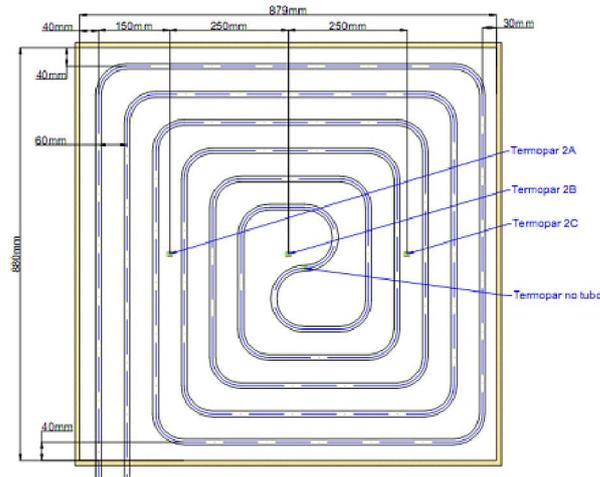


Figura 4.8 - Esquema de aplicação dos termopares na secção 2 [67]

Foram considerados 4 níveis de construção do piso radiante com o acabamento da superfície em cerâmica e 5 níveis de construção para piso com acabamento em piso flutuante. Estes níveis estão descritos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Identificação dos vários níveis de construção/aplicação dos provetes

Nível	Descrição
1	cofragem / isolante
2	isolante / argamassa
3	argamassa / piso ou feltro de polietileno*
4*	feltro de polietileno / piso
5	superfície do piso

*apenas para o piso com acabamento em piso radiante

4.2.7 Banho Térmico

Para o fornecimento do fluido de trabalho (água) nas condições desejadas recorreu-se a um banho térmico da marca Huber e modelo CC (Figura 4.9).



Figura 4.9 - Hubber Unistat CC [69]

O equipamento utilizado possui um banho de aquecimento/arrefecimento com uma unidade de refrigeração a ar livre de CFC e H-CFC. Tem uma capacidade de aquecimento de 1,5kW, tubagem de aço inoxidável, bomba de pressão e sucção, protecção ajustável de temperatura excessiva e protecção para baixo nível de líquido [69].

4.3 Câmara climática

Para se testar o piso radiante num ambiente controlado recorreu-se a uma câmara climática do laboratório de transmissão de calor.

O objectivo de se utilizar uma câmara climática foi ter pleno controlo sobre o ambiente onde o piso seria testado, podendo assim caracterizar-se mais rigorosamente o funcionamento do piso.

Para este estudo e tendo em conta o isolamento da câmara em questão, considerou-se que não houve trocas significativas de calor entre o interior e o exterior da câmara.

4.3.1 Estrutura

A câmara climática utilizada é constituída (do interior para o exterior) por placa MDF hidrófugo (19 mm), isolante térmico poliestireno extrudido (3x50 mm) e placa MDF hidrófugo (19 mm) como representado na figura 4.10.

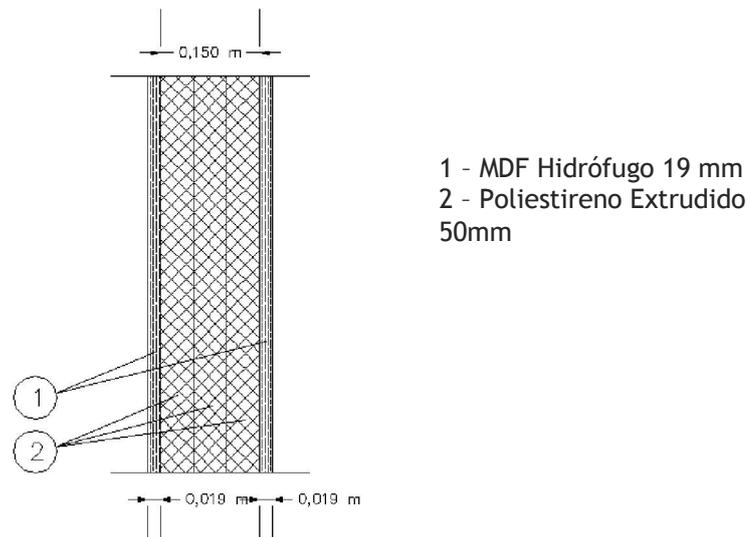


Figura 4.10 - Parede da câmara climática em corte [70]

4.3.2 Aquisição de dados

No interior da câmara foram colocados termopares tipo K no centro das superfícies frontal, lateral e superior da câmara, com o objectivo de medir a temperatura superficial das mesmas.



Figura 4.11 - Aplicação dos termopares tipo K nas superfícies interiores da câmara climática (superfície frontal, lateral e superior respectivamente)

Com o objectivo de se medir a estratificação térmica no interior da câmara climática, foram colocados cinco termopares tipo K ao longo da altura da câmara espaçados 23,7 cm entre si.

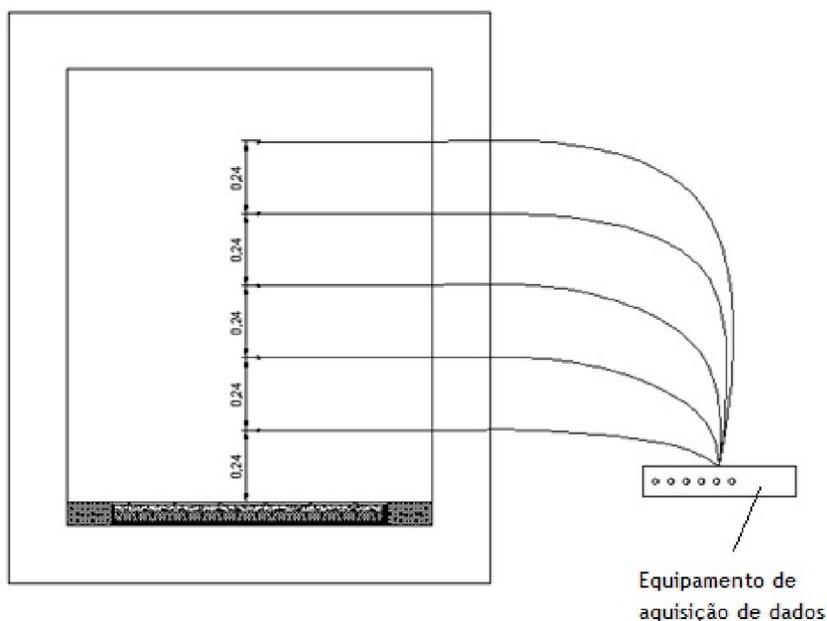


Figura 4.12 - esquema da aplicação dos termopares ao longo da altura da câmara climática

4.3.3 Unidade de tratamento de ar

Para a estabilização da câmara climática recorreu-se ao equipamento de ar condicionado P.A. Hilton A573 em conjunto com o equipamento de Digi Sense da Cole Parmer (Figura 4.13) para o controlo da temperatura das resistências.

Para a insuflação de ar quente recorreu-se apenas a uma resistência eléctrica da unidade de tratamento de ar para o aquecimento do ar, resistência esta que foi controlada por o sistema de controlo de temperatura da Cole Palmer. O ar quente foi insuflando com um caudal de $0,13 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para o arrefecimento do ar a insuflar para a câmara, recorreu-se ao sistema de refrigeração da Unidade de tratamento de ar, o qual não possui regulação de temperatura, daí ter-se recorrido de novo ao sistema de controlo de temperatura em conjunto com uma resistência eléctrica para assim se controlar o valor final da temperatura do ar insuflado.

O ar frio foi insuflado com um caudal de $0,13 \text{ m}^3/\text{s}$.

O equipamento utilizado para controlo da temperatura da unidade de tratamento de ar (Cole Parmer Digi Sense Temperature Controller) regulou a temperatura de uma das resistências de aquecimento a partir dos valores obtidos a partir de um termopar tipo K colocado na entrada de ar para a câmara climática. O termopar tipo K foi colocado na entrada do ar para a câmara para assim se garantir que a temperatura imposta no equipamento seria exactamente a temperatura do ar insuflado.



Figura 4.13 - Equipamento de controlo de temperatura Cole Parmer Digi Sense [71]

4.4 Equipamentos de aquisição de dados

Foram utilizados três equipamentos de aquisição de dados, para medição e registo de temperaturas, medição e registo da humidade relativa no interior da câmara climática e equipamento de medição e registo dos parâmetros de conforto térmico. Estes equipamentos foram ligados a um computador, que a partir da utilização dos respectivos softwares serviu como *interface*.

4.4.1 Equipamento para medição e registo de temperaturas

Como referido anteriormente usou-se termopares tipo K para medição de temperaturas tanto na câmara climática como no piso radiante. Estes termopares foram posteriormente ligados a um sistema de processamento de sinal e medição de temperatura de alta velocidade da marca OMEGA, mais propriamente o equipamento Multiscan 1200 (Figura 4.14). Como interface foi usado o software CHARTVIEW da mesma marca.



Figura 4.14 - OMEGA Multiscan 1200 [72]

Ao aparelho de processamento de sinal foram ligados 24 termopares utilizados para medir temperaturas tanto no piso radiante como também no interior da câmara (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 Lista de termopares utilizados

Termopar	Localização
T entrada	Temperaturas de entrada e saída da água no piso
T saída	
1 B	Zona central do piso (B) entre a cofragem e o isolante
Tubo 1	Colocado na parte superior do tubo em contacto com a argamassa.
2 A	Colocados entre o isolante e a argamassa.
2 B	
2 C	
3 A	Colocados entre a argamassa (ou feltro de polietileno*) e o piso.
3 B	
3 C	
4 A	Colocados entre o feltro de polietileno piso
4 B	
4 C	
5 A	Colocados na superfície do piso
5 B	
5 C	
Altura 1	Colocados ao longo da altura da câmara climática
Altura 2	
Altura 3	
Altura 4	
Altura 5	
Superfície Lateral	Colocado no centro da superfície lateral da câmara climática
Superfície frontal	Colocado no centro da superfície frontal da câmara climática
Superfície Superior	Colocado no centro da superfície superior da câmara climática

*apenas para o piso com acabamento em piso radiante

4.4.2 Equipamento para medição de humidade relativa

Para a medição da humidade relativa recorreu-se ao equipamento Rotronic de medição de humidade relativa/temperatura constituído pelo Data Logger NT3 equipado com uma central de ligação DS-U2 (Figura 4.15) e com um sensor Hygroclip S. Este equipamento foi utilizado em conjunto com o software HW4.



Figura 4.15 - Rotronic NT3 com central de ligação DS-U2 [73]

O sensor de temperatura/humidade relativa Hygroclip S (Figura 4.16) foi instalado no interior da câmara climática numa das paredes laterais a uma altura de 660 mm da superfície do piso.



Figura 4.16 - Sensor temperatura/humidade relativa Hygroclip S [74]

4.4.3 Equipamento para medição dos parâmetros de conforto térmico

Para medir todos os parâmetros necessários para avaliar o conforto térmico recorreu-se ao equipamento 1221 da INNOVA e respectivo software. Este equipamento compreende um Data Logger, uma sonda de velocidade do ar, uma sonda de temperatura operativa, uma sonda de temperatura do ar e uma sonda WBGT. Este equipamento foi colocado no centro da superfície do piso radiante como mostra a Figura 4.17.



Figura 4.17 - Equipamento INNOVA 1221 instalado na câmara climática

A sonda de velocidade do ar [m/s] que se utilizou neste trabalho (Figura 4.18) funciona segundo o princípio do anemómetro da temperatura diferencial constante. Esta sonda foi projectada para medir velocidades interiores, pelo que a gama de valores de velocidade do ar são baixos. Devido à natureza dos escoamentos do ar em interiores, a sonda permite a medição do referido parâmetro omnidireccionalmente.

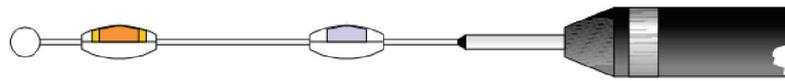


Figura 4.18 - Sonda de velocidade do ar [75]

A sonda de temperatura operativa permite avaliar o efeito que os objectos e as superfícies têm no corpo. Normalmente, a quantidade de calor libertada por um corpo humano por radiação é aproximadamente a mesma quantidade que se perde por convecção. Logo, uma simples medição da temperatura do ar é um mau indicador da temperatura ambiente. A temperatura operativa [°C] leva em conta as transferências de calor por radiação e por convecção e, por isso, é um muito melhor indicador da temperatura. Para tal recorreu-se à Sonda de Temperatura Operativa - MM0060, que se apresenta na Figura 4.19.

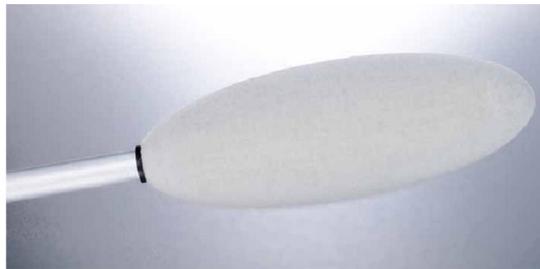


Figura 4.19 - Sonda de Temperatura Operativa MM0060 [76]

A sonda de temperatura operativa foi colocada na vertical de forma a simular um utilizador em pé. A posição desta sonda depende da simulação pretendida, ou seja consoante a posição do utilizador que queremos simular será a posição da sonda de temperatura operativa como mostra a Figura 4.20.



Figura 4.20 - Posição da sonda consoante a posição do utilizador [77]

A sonda de temperatura do ar utilizada (Figura 4.21) permite medir a temperatura do ar [°C] com a mínima interferência da energia transmitida por radiação, que é um dos parâmetros exigidos pela norma ISO 7730 para avaliar o ambiente térmico.



Figura 4.21 - Sonda de Temperatura do ar [78]

A sonda WBGT (Figura 4.22) compreende três sondas separadas. Cada uma das sondas é constituída por resistências de platina extremamente sensíveis que permitem calcular a temperatura de globo, a temperatura de bolbo húmido e ainda a temperatura do ar (todas elas em °C). Conhecendo estes parâmetros é possível determinar o índice WBGT.

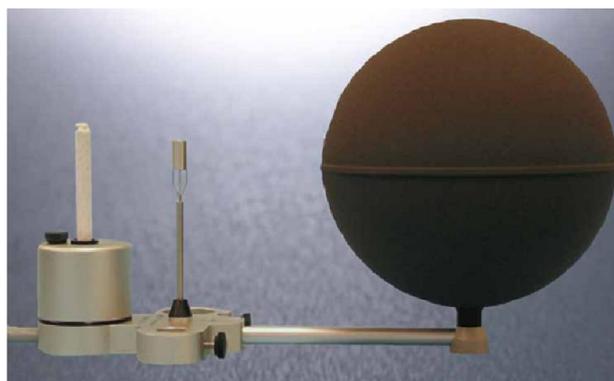


Figura 4.22 - Sonda WBGT [79]

O Data Logger Type 1221 (Figura 4.23) permite registar a avaliação do conforto térmico num dado local. Pode se utilizado em variados espaços com ou sem ligação a outro hardware como por exemplo um computador. Este equipamento possui ainda uma bateria para que se possa utilizar em locais onde a energia eléctrica não esteja disponível. Depois do registo dos valores, o Data Logger transmite os valores para o computador onde são guardados numa folha de cálculo.



Figura 4.23 - Data Logger Type 1221 [80]



5. Análise e discussão de resultados

Os ensaios realizados tiveram como objectivo caracterizar o comportamento do piso radiante com diferentes tipos de acabamento superficial e o impacto do seu funcionamento nas condições térmicas internas da câmara climática assim como também avaliar a evolução dos índices de conforto térmico ao longo dos vários ensaios.

5.1 Ensaio preliminares

Para se delinear correctamente o plano de ensaios finais foram realizados diferentes tipos de ensaios preliminares especificamente para se definir o tempo necessário para a estabilização da temperatura do piso, tempo de estabilização da temperatura da câmara para uma temperatura pretendida e consequentemente o tempo necessário para a realização de cada ensaio.

Estes ensaios preliminares foram realizados para essencialmente se definir os seguintes aspectos:

- Tempo de estabilização do piso, tanto para arrefecimento como para aquecimento e o seu efeito na temperatura da câmara.
- Tempo de estabilização da temperatura da câmara para um valor de temperatura pretendido, com recurso apenas a uma unidade de tratamento de ar ou em funcionamento simultâneo com o piso radiante.

A partir da análise destes dois aspectos foi possível determinar o tempo de duração de um ensaio.

Para além da determinação do tempo necessário para a realização dos ensaios, estes ensaios preliminares serviram também como teste à montagem experimental da qual faz parte o piso radiante. Durante os ensaios foram analisados e monitorizados constantemente o funcionamento de todos os componentes tais como:

- Termopares
- Unidade de Tratamento de ar
- Banho Térmico
- Isolamento

Esta análise à montagem experimental foi útil para a detecção de problemas no seu funcionamento como também para melhoramentos na mesma. De todos os melhoramentos efectuados, salienta-se a colocação de mais termopares no primeiro caso nas paredes



interiores da câmara de forma a se confirmar a estabilização da mesma e no segundo caso ao longo da altura da câmara para a caracterização da estratificação da temperatura.

5.2 Descrição dos ensaios experimentais

Para cada tipo de acabamento de superfície foram feitos ensaios em modo de aquecimento e de arrefecimento, ou seja, aquecendo e arrefecendo a câmara através da utilização do piso radiante.

Tanto para os ensaios em modo de aquecimento como em modo de arrefecimento foram testadas várias temperaturas de funcionamento do piso, a fim de se poder caracterizar o funcionamento do piso com variação da temperatura de funcionamento do mesmo.

Para caracterizar o funcionamento do piso radiante registou-se a evolução das temperaturas das várias secções do piso ao longo do tempo, enquanto para a análise térmica da câmara climática ao longo do tempo registou-se as temperaturas do ar ao longo da altura da câmara, as temperaturas das superfícies interiores da câmara e humidade relativa. Para a análise da evolução dos índices de conforto térmico ao longo do tempo foram registados todos os parâmetros necessários para a caracterização de conforto térmico segundo a norma ISO 7730.

5.2.1 Estabilização da instalação experimental

Nos ensaios preliminares definiu-se que para a estabilização completa da instalação experimental seriam necessárias 7 horas. A estabilização da instalação experimental engloba a estabilização da temperatura da superfície do piso, do ar interior e das paredes da câmara climática.

Foram definidas duas temperaturas de estabilização para os dois modos de funcionamento do piso, aquecimento e arrefecimento. Para o modo de aquecimento definiu-se uma temperatura de estabilização de 14°C, enquanto para o modo de arrefecimento definiu-se uma temperatura de 31°C.

As temperaturas de estabilização da instalação foram escolhidas com o objectivo de simular as condições de uma habitação no inverno e no verão, ou seja 14°C para uma habitação no Inverno e 31°C para uma habitação no Verão.

Para além da temperatura de estabilização, também foi considerada a humidade relativa. Como a unidade de ar condicionado não possuía um sistema de controlo de humidade relativa, optou-se por abrir a câmara climática entre os ensaios (aproximadamente 17 horas) com o objectivo de a câmara atingir o mesmo valor de humidade relativa que o laboratório, para que assim aquando o início do processo de estabilização a câmara possuísse um valor de humidade relativa semelhante para todos os ensaios.

Para a estabilização de todo o sistema utilizou-se a unidade de tratamento de ar e o piso radiante em simultâneo.

Para se garantir que a instalação experimental estava estabilizada antes do início de cada ensaio, foram registados 1 hora antes de cada ensaio os valores de temperatura de todas as secções do piso, da temperatura do ar da câmara, das superfícies interiores da câmara, humidade relativa assim como todos os parâmetros registados pelo equipamento de medição de conforto térmico.

5.2.2 Procedimento experimental

O procedimento experimental foi idêntico tanto para os ensaios em modo de aquecimento como para o modo de arrefecimento. O procedimento experimental para os ensaios finais foi definido a partir dos resultados preliminares.

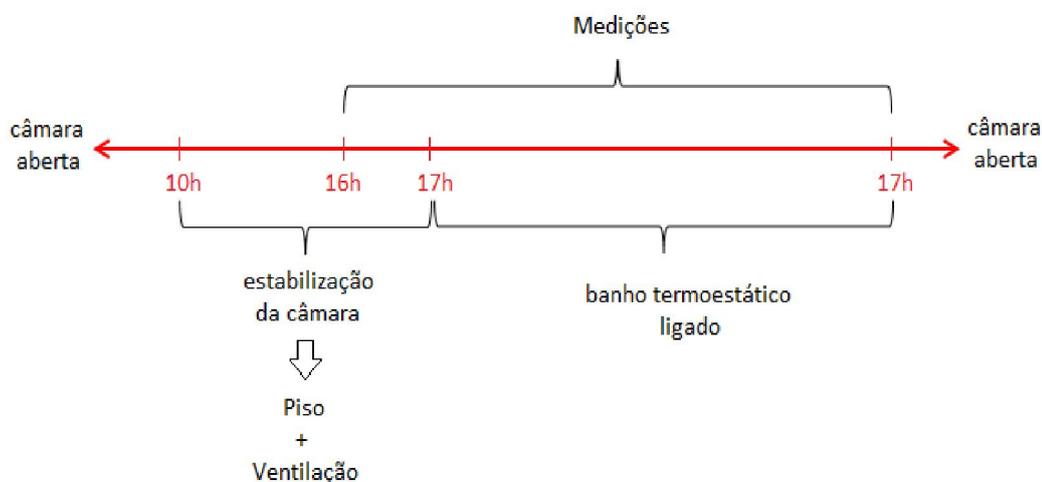


Figura 5.1 - Esquema de tempos do procedimento experimental

O procedimento experimental foi o seguinte:

- Após se verificar que a temperatura e a humidade relativa da câmara climática possuíam os mesmos valores que a temperatura e humidade relativa do laboratório fechou-se a câmara, montavam-se as mangueiras do ar condicionado e ligava-se o banho térmico e a unidade de tratamento de ar na temperatura de estabilização para o respectivo ensaio. No banho térmico a temperatura era definida no próprio equipamento, enquanto na unidade de tratamento de ar utilizou-se o equipamento Digi Sense da Cole Parmer para regular a temperatura das resistências e assim se conseguir a temperatura de insuflação pretendida. Para os ensaios em que se requeria uma temperatura de estabilização de 14°C era necessário ligar o sistema de refrigeração da unidade de tratamento de ar em conjunto com as resistências (10h).



- Seis horas após o início da estabilização e 1 hora antes do início do ensaio do piso, dá-se início ao registo dos valores de temperatura, humidade relativa e parâmetros de conforto térmico, usando-se os softwares respectivos para cada aparelho de aquisição de dados e instalados num computador (16h).
- Sete horas após o início da estabilização da câmara é dado o início ao ensaio. Para tal são desligadas as mangueiras de insuflação e isoladas as entradas/saídas de ar da câmara. Depois de isolada é redefinida a temperatura de funcionamento do banho térmico para a temperatura de ensaio do piso, ou seja, a temperatura de insuflação de água (17h).
- Vinte e quatro horas após o início do ensaio termina o registo de dados da instalação experimental e a câmara é então aberta de novo para que se possa repetir o processo.

5.2.3 Ensaio de aquecimento

Para o ensaio de aquecimento a instalação experimental foi estabilizada a 14°C, de forma a reproduzir a temperatura de uma habitação no inverno e assim poder se simular o processo de aquecimento.

Na escolha de temperaturas de ensaio foi tida em conta as temperaturas aconselhadas por normas internacionais para a superfície do piso, ou seja um mínimo de 18°C/19°C e um máximo de 29°C para espaços ocupados por pessoas em pé ou com actividades sedentárias e com calçado.

Devido ao facto da utilização de piso radiante em edifícios ser maioritariamente com o propósito de aquecimento, deu-se então mais ênfase aos ensaios de aquecimento para que assim pudesse analisar mais pormenorizadamente a reacção do piso à variação da temperatura de funcionamento, daí a escolha de 5 valores para a temperatura de insuflação de água.

As temperaturas escolhidas foram 20°C, 22°C, 24°C, 26°C e 28°C. Estas temperaturas têm um Δt idêntico entre elas e estão compreendidas no intervalo de temperaturas da superfície do piso recomendadas pelas normas internacionais, para que a temperatura do piso criasse um ambiente de conforto térmico no interior da câmara.

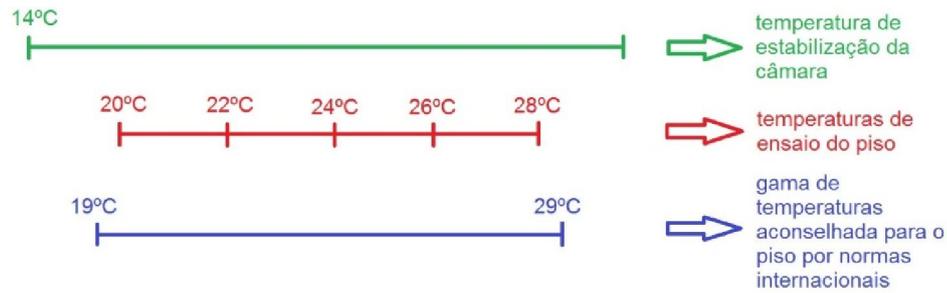


Figura 5.2 - Esquema de temperaturas para um ensaio de aquecimento

5.2.4 Ensaio de arrefecimento

Para os ensaios de arrefecimento a instalação experimental foi estabilizada a uma temperatura de 31°C de forma a reproduzir uma habitação no Verão e assim poder se simular o processo de arrefecimento.

A escolha da gama de temperaturas de ensaio do piso foi feita tendo em conta vários factores e parâmetros:

- Temperaturas recomendadas pelas normas internacionais - como aconteceu para a escolha das temperaturas de ensaio do piso em modo de aquecimento, também estas teriam que ficar dentro da gama indicada pelas normas internacionais (mínimo de 18°C/19°C e um máximo de 29°C) para que se pudesse garantir as condições de conforto térmico.
- Resultado dos ensaios preliminares - nos ensaios preliminares concluiu-se que num ensaio de longa duração e com uma curta diferença de temperatura entre a temperatura de estabilização e de ensaio as condições no interior da câmara ficavam fora da zona de conforto térmico.
- Temperatura da água numa situação real - numa situação real a água mesmo no verão encontra-se a temperaturas baixas o que seria ideal para o arrefecimento de um piso radiante o qual tem como um dos seus objectivos baixar os custos de climatização dos edifícios. Ou seja não faz sentido simular temperaturas de arrefecimento em que se utilize água com valores superiores à água da rede, pois a mesma teria que ser aquecida e assim seriam aumentados os custos de funcionamento do piso.

Tendo em conta os aspectos anteriormente referidos, escolheu-se apenas duas temperaturas de ensaio para o funcionamento do piso em modo de arrefecimento, 18°C e 20°C.

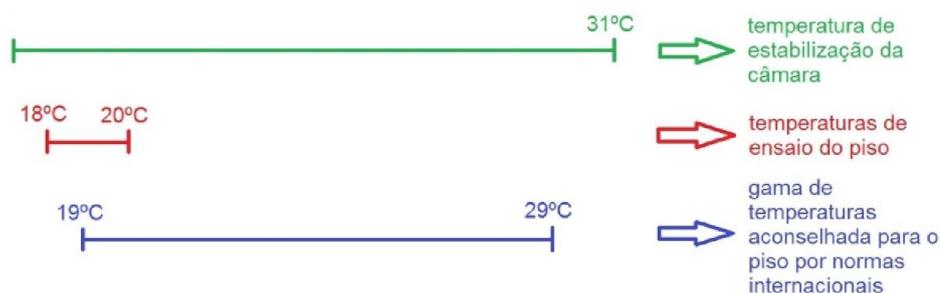


Figura 5.3 - Esquema de temperaturas para um ensaio de arrefecimento

5.3 Análise do desempenho térmico do piso radiante com diferentes acabamentos

Para esta análise foram tidos em conta os ensaios feitos ao piso radiante com a superfície em cerâmica e piso flutuante tanto para o modo de aquecimento como para o modo de arrefecimento. Para facilitar a observação dos resultados foram construídos gráficos que demonstram a evolução das temperaturas da superfície do piso para várias temperaturas de insuflação da água, assim como a evolução da diferença entre o valor de temperatura de insuflação da água e a temperatura da superfície do piso.

Estes gráficos permitem assim observar o tempo de estabilização da temperatura do piso, assim como o seu valor.

5.3.1 Ensaios de aquecimento

Na análise dos resultados de aquecimento foram analisados os cinco ensaios para cada acabamento de superfície do piso (cinco temperaturas de insuflação de água) em modo de aquecimento, 20°C, 22°C, 24°C, 26°C e 28°C.

Como se pode observar pelo gráfico da Figura 5.4, o comportamento da temperatura da superfície do piso de cerâmica é semelhante para as várias temperaturas de insuflação de água. De realçar que a temperatura final da superfície do piso ultrapassa a temperatura de insuflação da água nos ensaios para 20°C e 22°C. Como se pode também observar pelo gráfico da Figura 5.4 o valor de temperatura no período de estabilização (e - 00:00 a 00:00) é coincidente para todos os ensaios, ou seja, o piso estava estabilizado e as condições de início do ensaio foram idênticas, validando assim os resultados finais. Apesar de o gráfico não ser apresentado, foi também analisado o comportamento das temperaturas das secções inferiores da construção do piso, as quais apresentam um comportamento idêntico ao da temperatura da superfície, mas com valores superiores consoante a sua proximidade às tubagens.

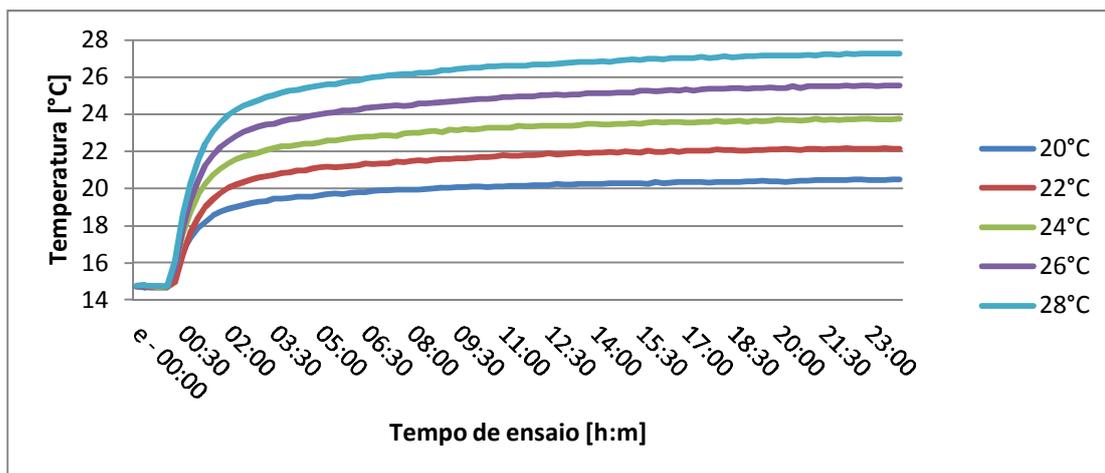


Figura 5.4 - Gráfico da Evolução das temperaturas da superfície do piso (secção 5) ao longo do tempo para os vários ensaios de aquecimento acabamento da superfície em cerâmica

Como tinha acontecido com os ensaios de aquecimento para o piso com acabamento em cerâmica, também todos os ensaios de aquecimento para o acabamento da superfície com piso flutuante (gráfico da Figura 5.5) tiveram um comportamento idêntico entre si. O comportamento da temperatura nas secções inferiores ao da superfície do piso também foi analisado posteriormente e apresentava um comportamento idêntico ao da superfície do piso.

De novo, o valor da temperatura no tempo de estabilização foi semelhante para todos os ensaios, criando-se assim as mesmas condições iniciais e garantindo-se a estabilização da instalação antes do início do ensaio. De salientar que as temperaturas da superfície tanto para o acabamento em piso flutuante como para o piso com acabamento em cerâmica apresentaram valores de temperatura semelhantes, isto apesar de a resistência térmica conjunto feltro+piso em madeira ser superior ao do conjunto cimento cola+cerâmica ($0,114 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W} > 0,009 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$ respectivamente).

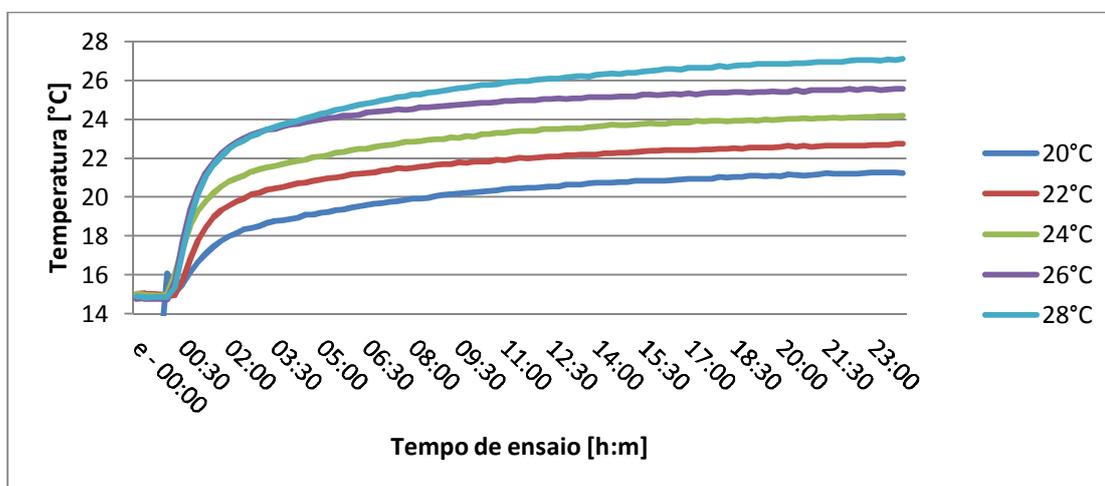


Figura 5.5 - Gráfico da Evolução das temperaturas da superfície do piso (secção 5) ao longo do tempo para os vários ensaios de aquecimento para o acabamento da superfície em piso radiante



O gráfico da Figura 5.6 mostra a diferença entre o valor da temperatura de insuflação da água e a temperatura da superfície do piso para os vários ensaios de aquecimento do piso com acabamento em cerâmica. Essencialmente este gráfico mostra que quanto maior for a temperatura de insuflação, maior será a diferença para a temperatura da superfície do piso, isto tendo em conta que a câmara climática se encontra inicialmente a aproximadamente 14°C. Esta diferença tende a diminuir ao longo do tempo, atingindo mesmo valores próximos de zero. Supostamente, como a temperatura da superfície do piso no final do ensaio é superior à temperatura de insuflação da água, o valor deveria dar negativo. O mesmo não acontece pelo simples facto de haver variações no funcionamento do banho térmico, fazendo-o insuflar água com uma temperatura superior à seleccionada.

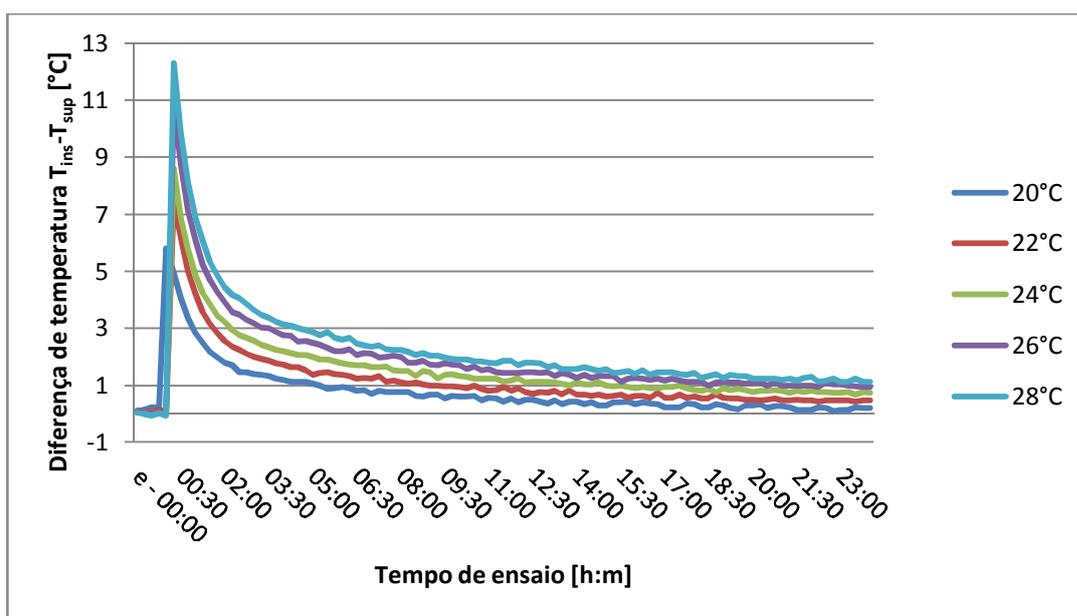


Figura 5.6 - Gráfico da Evolução da diferença de temperaturas da superfície (secção 5) do piso e de insuflação de água ao longo do tempo para os vários ensaios de aquecimento acabamento da superfície em cerâmica

Ao contrário do que aconteceu nos ensaios de aquecimento para a superfície com acabamento em cerâmica, nos ensaios para o acabamento em piso flutuante, a diferença entre a temperatura de insuflação da água e a temperatura da superfície do piso atingiu valores negativos (gráfico da Figura 5.7), ou seja, a superfície atingiu temperaturas superiores à da temperatura da água insuflada. Os valores da referida diferença de temperaturas apresentam um comportamento idêntico para todos os valores de insuflação, como já tinha acontecido para os ensaios com superfície com acabamento em cerâmica apesar de a diferença aumentar proporcionalmente ao aumento da temperatura de insuflação.

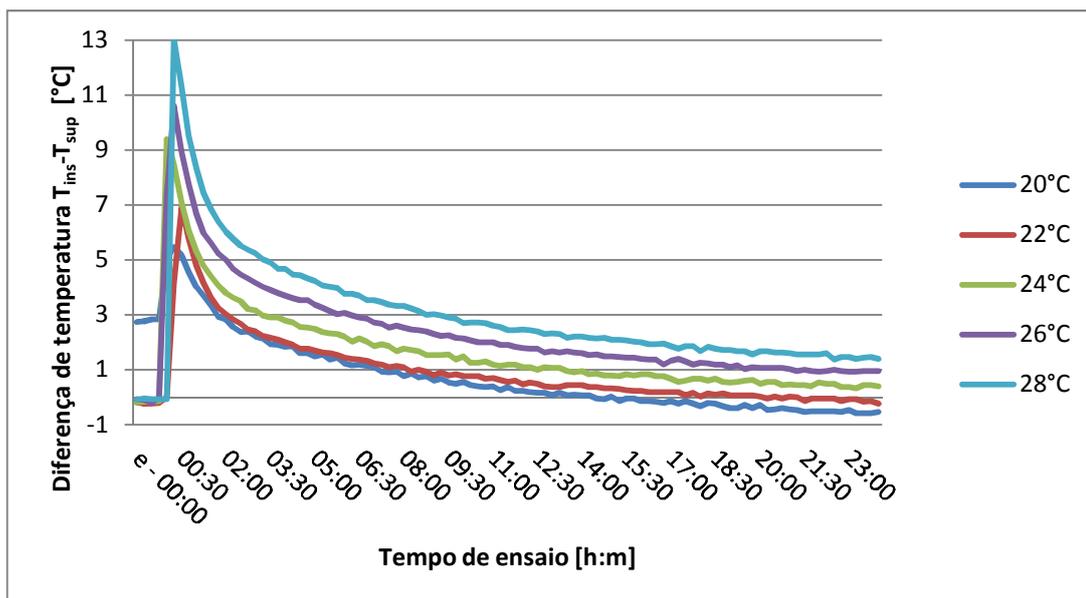


Figura 5.7 - Gráfico da Evolução da diferença de temperaturas da superfície (secção 5) do piso e de insuflação de água ao longo do tempo para os vários ensaios de aquecimento acabamento da superfície em piso flutuante

5.3.2 Arrefecimento

Na análise do piso em modo de arrefecimento foram analisados os ensaios com uma temperatura de insuflação de 20°C e 18°C para cada acabamento de superfície do piso.

Como já tinha acontecido nos ensaios de aquecimento do piso, também para o arrefecimento as temperaturas da superfície do piso apresentam comportamentos semelhantes para as duas temperaturas de insuflação da água.

Nos ensaios de arrefecimento para o piso com acabamento da superfície em cerâmica (Figura 5.8) a temperatura da superfície do piso estabiliza num valor aproximadamente 1°C acima do valor da temperatura de insuflação.

Pode-se observar pelo gráfico da Figura 5.8 que a temperatura da instalação se encontrava estabilizada no início do ensaio pelo facto das temperaturas antes de o ensaio serem semelhantes para ambos os valores de insuflação, validando-se assim os valores finais.

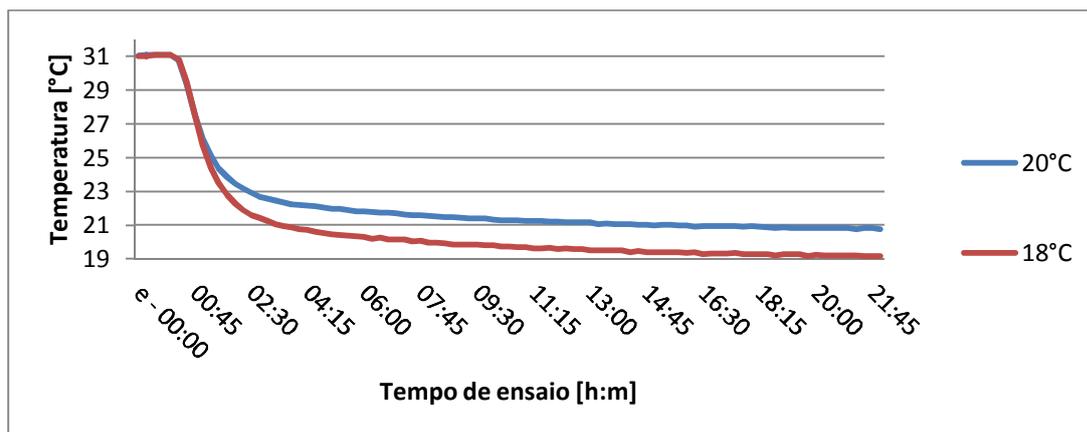


Figura 5.8 - Gráfico da Evolução das temperaturas da superfície do piso (secção 5) ao longo do tempo para os vários ensaios de arrefecimento acabamento da superfície em cerâmica

Para o piso com acabamento da superfície com piso flutuante (Figura 5.9), o comportamento do valor da temperatura na superfície é semelhante ao do acabamento testado anterior apesar de com este tipo de acabamento a temperatura estabilizar em valores cerca de 2°C superiores relativamente ao do valor de insuflação da água. Este resultado vem de encontro aos valores de resistência térmica dos dois acabamentos, no qual o piso flutuante apresenta um valor superior ao da cerâmica.

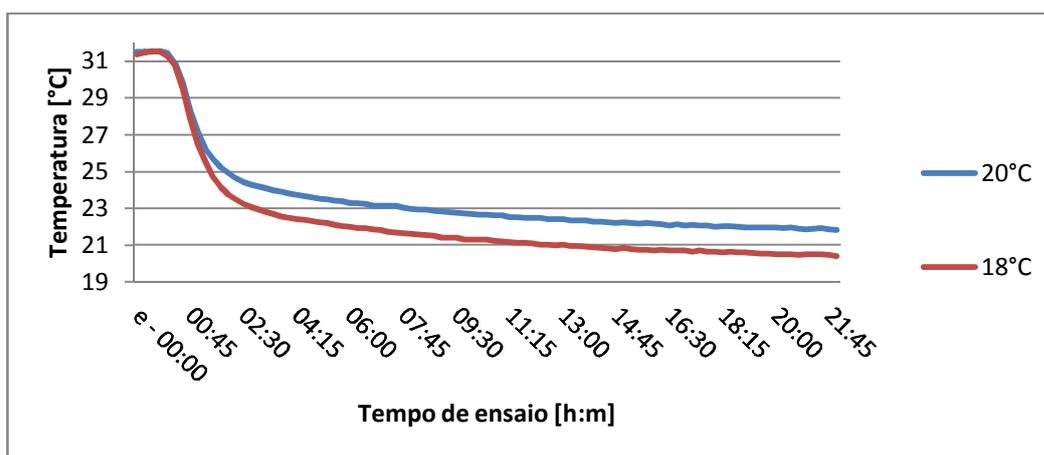


Figura 5.9 - Gráfico da Evolução das temperaturas da superfície do piso (secção 5) ao longo do tempo para os vários ensaios de arrefecimento para o acabamento da superfície em piso radiante

A partir do gráfico da Figura 5.10 pode-se constatar que quanto menor for a temperatura de insuflação e maior a diferença para a temperatura da câmara (31°C), maior será a diferença entre a temperatura de insuflação de água e temperatura da superfície do piso.

Esta diferença tende a aproximar-se de zero, ou seja o valor da superfície do piso é idêntica à temperatura de insuflação.

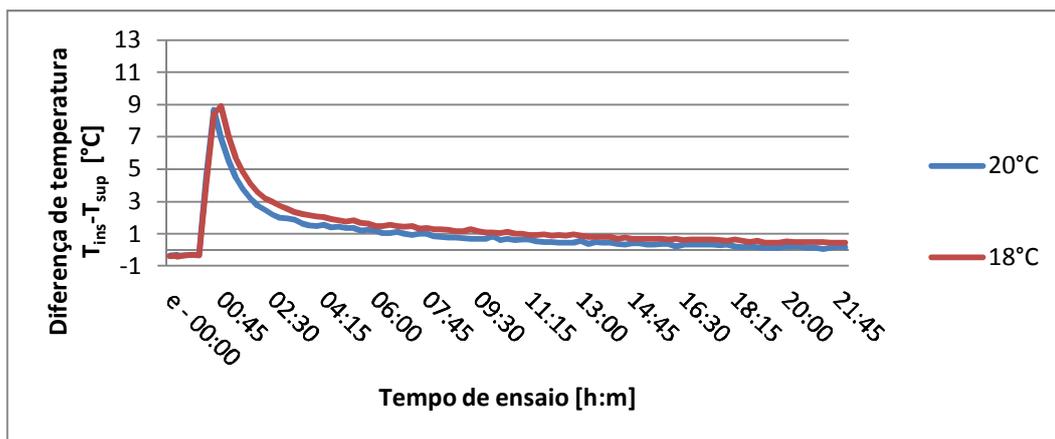


Figura 5.10 - Gráfico da Evolução da diferença de temperaturas entre superfície (secção 5) do piso e a temperatura de insuflação de água ao longo do tempo para os vários ensaios de arrefecimento com acabamento da superfície em cerâmica

Mais uma vez pelo gráfico da Figura 5.11, e como também já se tinha observado que para o mesmo tipo de acabamento mas em modo de aquecimento, a diferença entre temperaturas de insuflação faz variar também o valor de estabilização da diferença de temperatura entre a água insuflada e a superfície do piso, ao contrário do que acontece para o piso com acabamento em cerâmica que para ambos os modos de funcionamento (aquecimento e arrefecimento) aparenta tender para um valor semelhante para todas as temperaturas de insuflação.

De realçar que o valor da diferença de temperatura da água e superfície do piso é maior para este caso (Figura 5.11) e que o mesmo tende para valores próximos de 1.

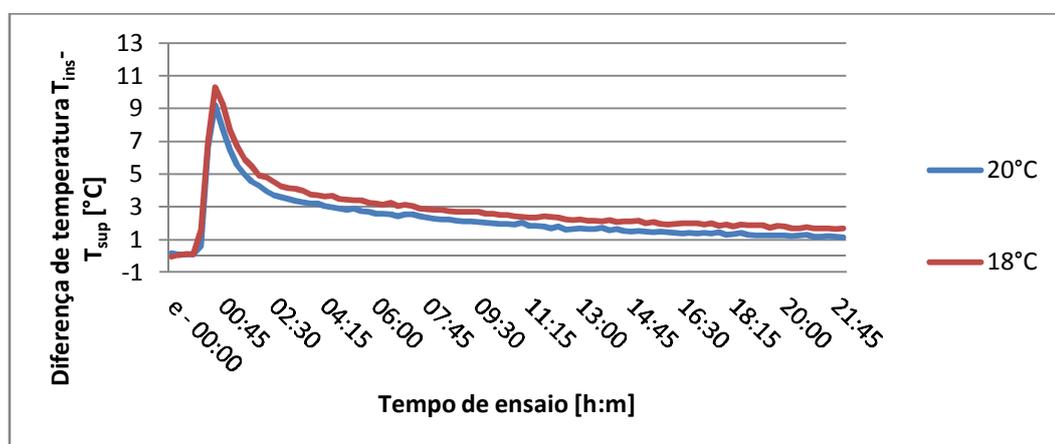


Figura 5.11 - Gráfico da Evolução da diferença de temperaturas entre superfície (secção 5) do piso e a temperatura de insuflação de água ao longo do tempo para os vários ensaios de arrefecimento com acabamento da superfície em piso flutuante

Pode concluir-se que a partir desta análise que o piso com acabamento em cerâmica tem melhor rendimento no modo de arrefecimento, pois a diferença entre a temperatura da água insuflada e a superfície do piso é menor do que com acabamento em piso flutuante. Valor



este que tende para aproximadamente 0 °C. Este resultado pode ser justificado pelo facto de o acabamento em cerâmica apresentar menor resistência térmica relativamente ao acabamento em piso flutuante.

5.4 Análise do comportamento térmico da câmara

No estudo do comportamento térmico da câmara analisou-se, a evolução do valor de humidade relativa ao longo do ensaio assim como o comportamento térmico das superfícies constituintes da câmara e a relação entre a temperatura da superfície do piso e as temperaturas média radiante e do ar para um ensaio de referência.

Esta análise teve como objectivo avaliar o impacto do piso com diferentes acabamentos nas condições térmicas da câmara.

Para a análise do comportamento dos valores da temperatura das superfícies interiores da câmara climática optou-se por analisar apenas um ensaio para cada modo de funcionamento e para cada acabamento do piso. Isto porque concluiu-se a partir dos resultados que o comportamento da temperatura das superfícies interiores da câmara é idêntico para todos os valores de temperaturas de insuflação, variando o seu valor final consoante a variação da temperatura de insuflação.

5.4.1 Aquecimento

Como referido anteriormente, um dos maiores problemas destes ensaios foi a estabilização do valor de humidade relativa e o mesmo ser idêntico para todos os ensaios de forma a se ter as mesmas condições iniciais. Este problema pode ser observado no gráfico da Figura 5.12, que mostra que para os ensaios de aquecimento do piso com acabamento da superfície em cerâmica os valores iniciais da humidade relativa não estavam estabilizados, nem tinham o mesmo valor. Os valores no final do ensaio ficaram compreendidos entre 38% e 40%.

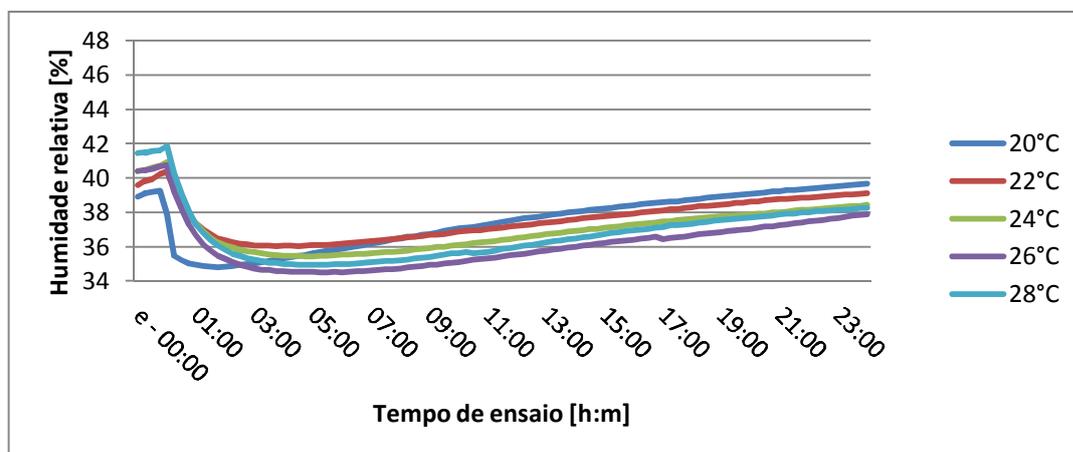


Figura 5.12 - Gráfico da Evolução do valor de humidade relativa ao longo do tempo para os vários ensaios de aquecimento para o piso com acabamento em cerâmica



Como no gráfico anterior, também para os ensaios de aquecimento mas com acabamento em piso flutuante (Figura 5.13), a humidade relativa apresentou valores iniciais diferentes para todos os valores de insuflação da água, valores estes que não estavam estabilizados.

Os valores iniciais de humidade relativa para este caso (Figura 5.13) foram superiores relativamente ao acabamento do piso em cerâmica do piso, embora no final tenham ficado compreendidos entre 38% e 40% como no caso anterior (Figura 5.12).

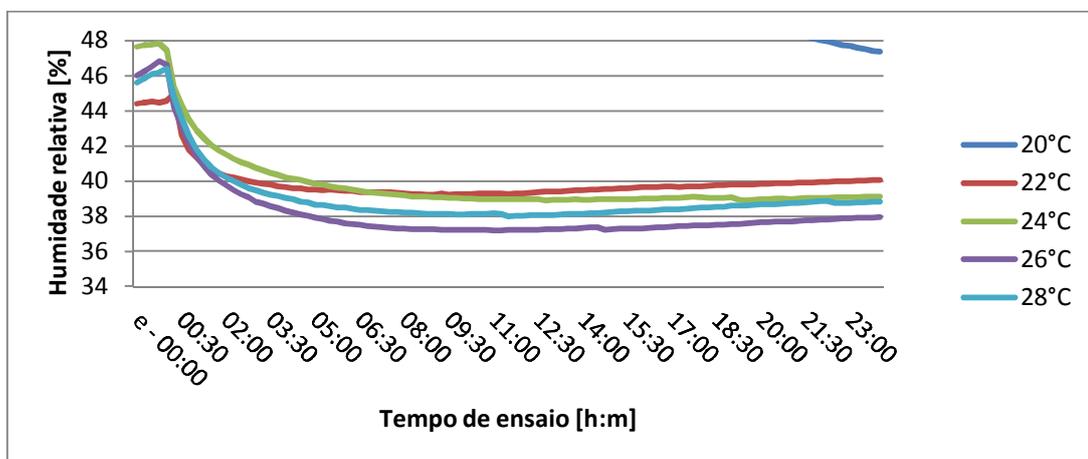


Figura 5.13 - Gráfico da Evolução do valor de humidade relativa ao longo do tempo para os vários de ensaio de aquecimento para o piso com acabamento em piso flutuante

Para a análise do comportamento dos valores da temperatura das superfícies interiores da câmara climática no modo de aquecimento escolheu-se o ensaio com uma temperatura de insuflação de 28°C, pois este é o valor máximo de insuflação de todos os ensaios de aquecimento realizados.

No gráfico da Figura 5.14 pode-se observar que todas as superfícies internas da câmara apresentam uma temperatura semelhante e com o mesmo comportamento ao longo do tempo do ensaio, aproximando-se da temperatura da superfície do piso na parte final do ensaio.

Também pelo gráfico 5.14 se pode confirmar que a temperatura da instalação experimental se encontrava estabilizada, pois as temperaturas no início do ensaio para todas as superfícies tinham sensivelmente o mesmo valor.

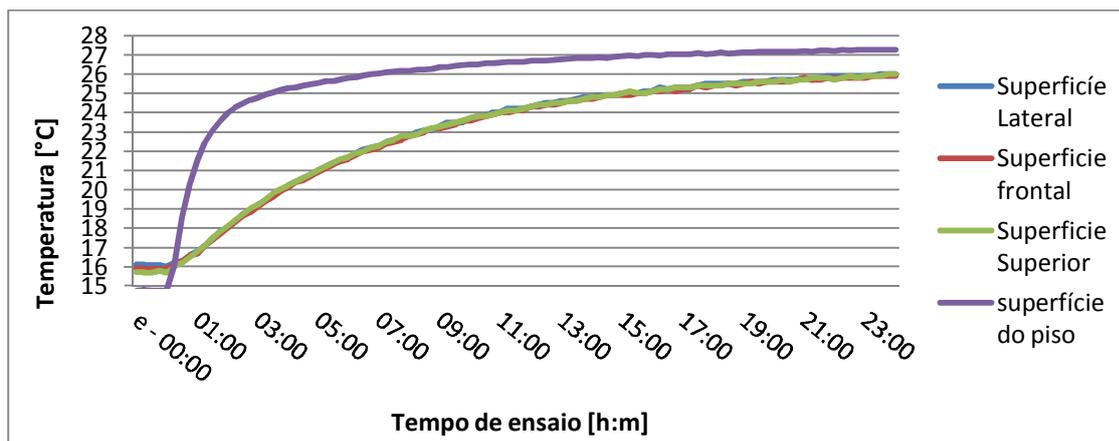


Figura 5.14 - Gráfico da Evolução do valor da temperatura das superfícies internas da câmara climática ao longo do tempo para o ensaio de aquecimento com uma temperatura de insuflação de 28°C e piso com acabamento em cerâmica

O gráfico da Figura 5.15 para os ensaios de aquecimento do piso com acabamento em piso flutuante mostra que as temperaturas das superfícies interiores apresentaram valores e comportamentos idênticos ao observado no caso anterior (gráfico 5.14).

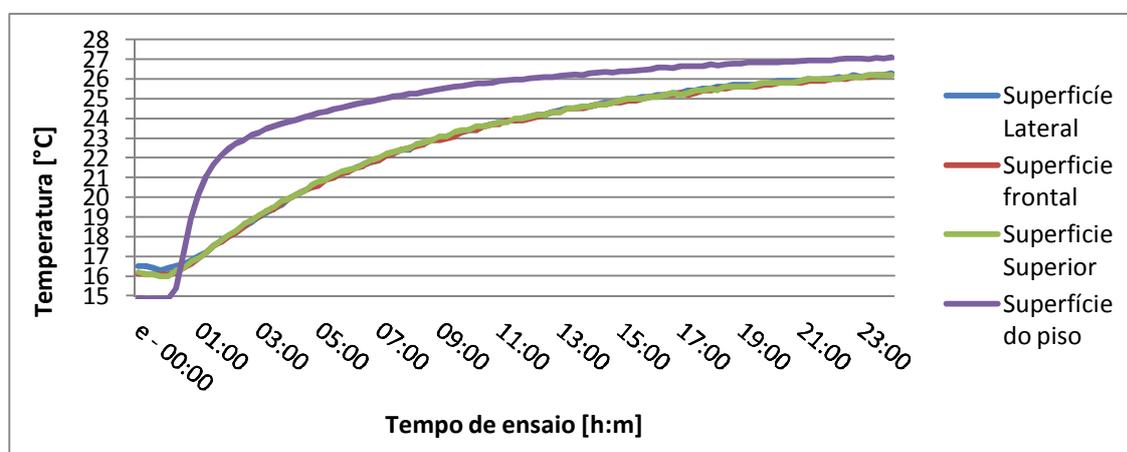


Figura 5.15 - Gráfico da Evolução do valor da temperatura das superfícies internas da câmara climática ao longo do tempo para o ensaio de aquecimento com uma temperatura de insuflação de 28°C e piso com acabamento em piso flutuante

No gráfico da Figura 5.16 onde é feita a comparação do comportamento do valor da temperatura média radiante e temperatura média do ar dentro da câmara climática para um ensaio de aquecimento com acabamento e piso flutuante, pode-se observar que os mesmos são idênticos, aproximando-se do valor da temperatura do piso no final do ensaio.

Comparando-se o gráfico da Figura 5.14 com o gráfico da figura 5.16 podemos constatar que os valores das superfícies interiores da câmara são idênticos aos valores de temperatura média radiante e temperatura média do ar.

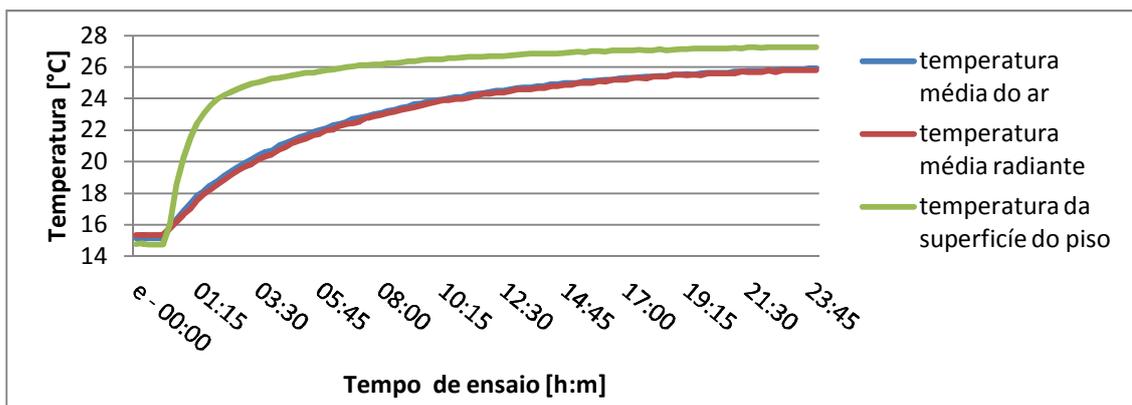


Figura 5.16 - Gráfico da Evolução do valor da temperatura da temperatura média do ar, temperatura média radiante e temperatura média da superfície do piso ao longo do tempo para o ensaio de aquecimento com uma temperatura de insuflação de 28°C e piso com acabamento em cerâmica

A análise anterior (Figura 5.16) é a mesma para o gráfico da Figura 5.17, mas neste caso para o piso com acabamento em piso flutuante.

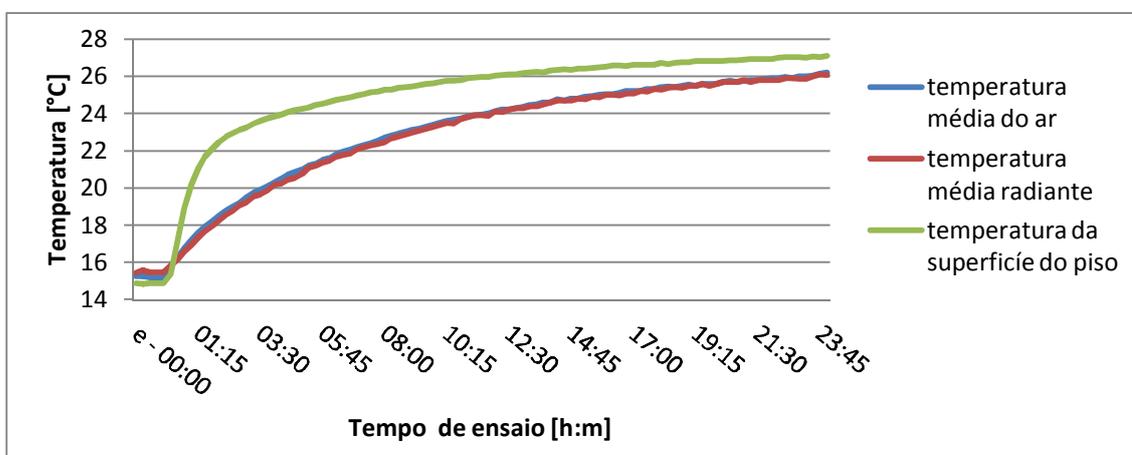


Figura 5.17 - Gráfico da Evolução do valor da temperatura da temperatura média do ar, temperatura média radiante e temperatura média da superfície do piso ao longo do tempo para o ensaio de aquecimento com uma temperatura de insuflação de 28°C e piso com acabamento em piso flutuante

A partir da análise das condições térmicas no interior da câmara climática para ambos os acabamentos do piso e em modo de aquecimento verifica-se que ambos apresentam valores e comportamentos idênticos para as temperaturas analisadas (temperatura média do ar e temperatura média radiante).

Em termos de humidade relativa, apenas se pode observar que em ambos os acabamentos as temperaturas finais convergiram para valores compreendidos entre 38°C e 40°C.

A diferença nos valores iniciais de humidade relativa para os dois conjuntos de ensaios deve-se ao facto de os ensaios terem sido feitos em dias diferentes, ou seja valores de humidade



relativa diferentes no laboratório onde decorreu os ensaios, e aos quais a câmara esteve sujeita entre cada ensaio durante a sua estabilização.

5.4.2 Arrefecimento

Como havia acontecido para o mesmo acabamento de piso mas em modo de aquecimento, como mostra o gráfico da Figura 5.18 não foi possível estabilizar os valores de humidade relativa para os dois valores de temperatura de insuflação.

Apesar dos diferentes valores iniciais de humidade relativa, os dois ensaios de arrefecimento do piso com acabamento em cerâmica apresentaram temperaturas com valores e comportamentos semelhantes.

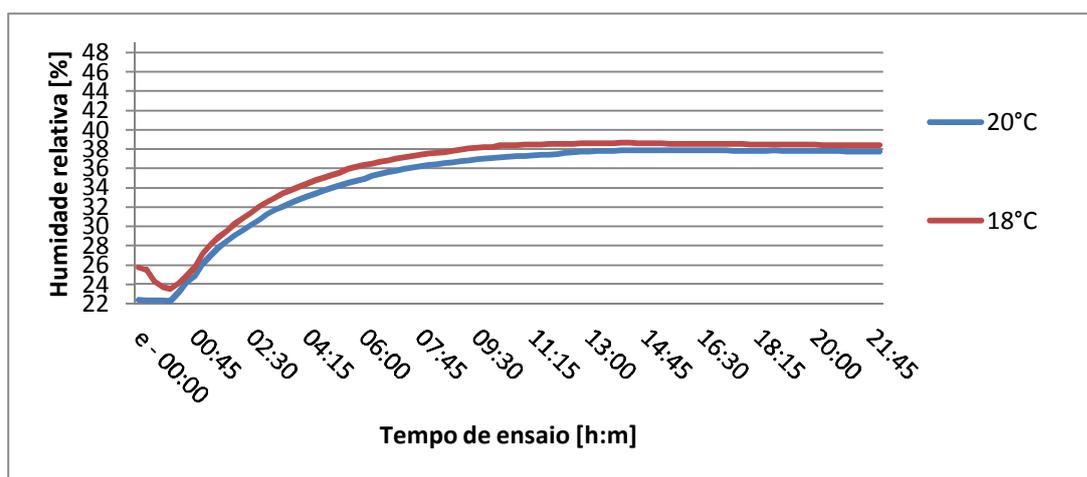


Figura 5.18 - Gráfico da Evolução do valor de humidade relativa ao longo do tempo para os vários de ensaio de arrefecimento para o piso com acabamento em cerâmica

Como no gráfico anterior, também para o caso do gráfico da Figura 5.19, os dois ensaios de arrefecimento do piso com acabamento em cerâmica apresentaram temperaturas com valores e comportamentos semelhantes, apesar dos diferentes valores iniciais de humidade relativa.

Os valores para este caso (Figura 5.19) são superiores (cerca de 10%) aos do ensaio para o acabamento em cerâmica, ou seja, ao contrário do que aconteceu nos ensaios de aquecimento para os dois tipos de acabamento do piso, os valores finais de humidade relativa não convergiram para a mesma gama de valores.

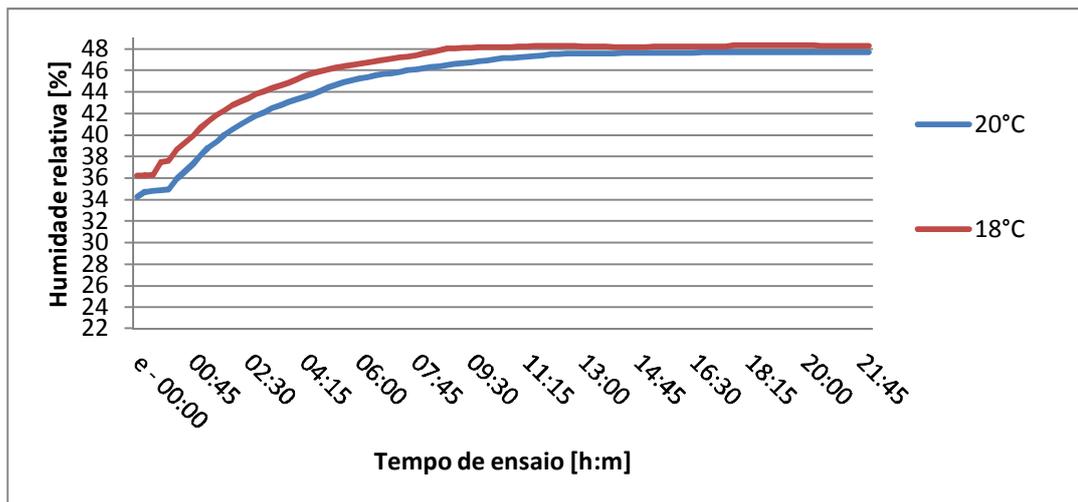


Figura 5.19 - Gráfico da Evolução do valor de humidade relativa ao longo do tempo para os vários de ensaio de arrefecimento para o piso com acabamento em piso flutuante

Ao invés do que aconteceu no caso de aquecimento para o piso com o mesmo acabamento, neste caso (Figura 5.20), embora tenham mantido o mesmo comportamento e valores entre si, os valores das superfícies internas da câmara não se aproximaram tanto do valor da temperatura da superfície do piso.

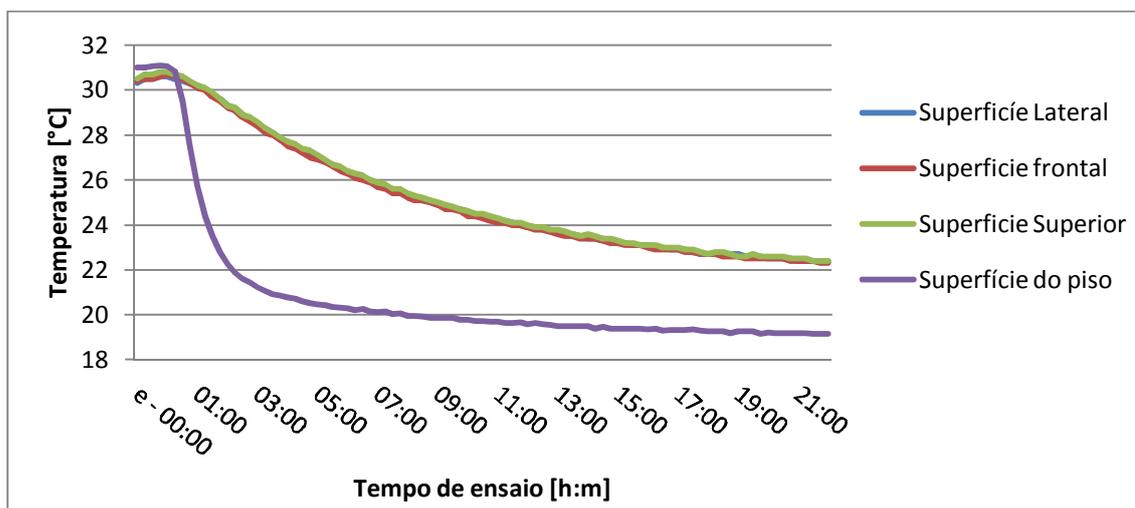


Figura 5.20 - Gráfico da Evolução do valor da temperatura das superfícies internas da câmara climática ao longo do tempo para o ensaio de arrefecimento com uma temperatura de insuflação de 18°C e piso com acabamento em cerâmica

Também para o caso ilustrado no gráfico da Figura 5.21, as temperaturas das superfícies não se aproximaram dos valores da temperatura do piso, sendo esta diferença ainda maior do que para a mesma situação de funcionamento mas com um acabamento em cerâmica, mesmo tendo em conta que a temperatura da superfície do piso para este último caso é ligeiramente superior.

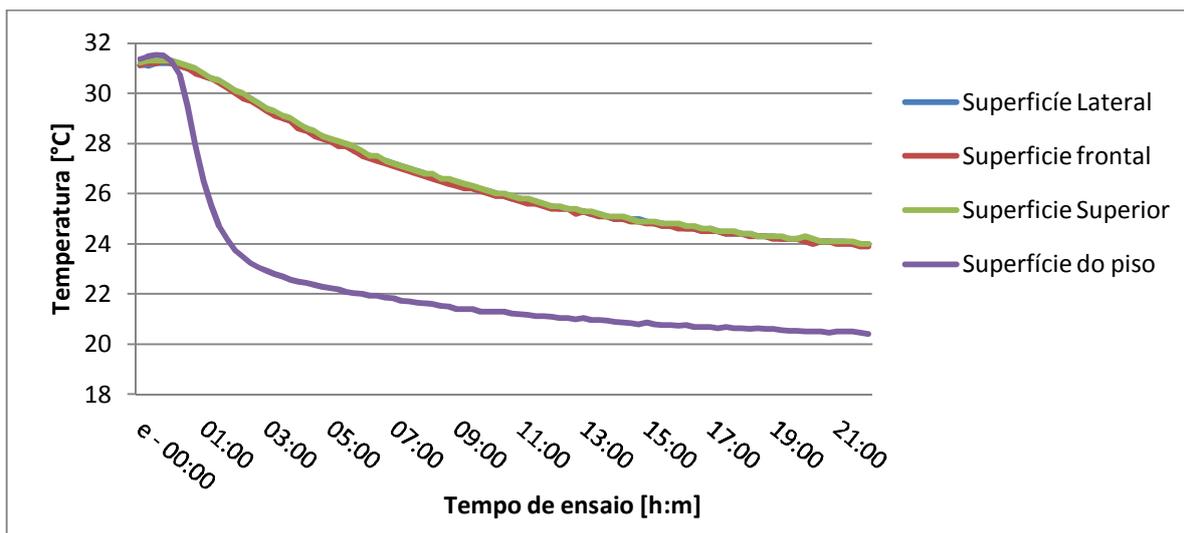


Figura 5.21 - Gráfico da Evolução do valor da temperatura das superfícies internas da câmara climática ao longo do tempo para o ensaio de arrefecimento com uma temperatura de insuflação de 18°C e piso com acabamento em piso flutuante

Como já havia acontecido nos ensaios de aquecimento para ambos os acabamentos da superfície, nos ensaios de arrefecimento (Figura 5.14 e 5.15) as temperaturas médias do ar e radiante apresentam o mesmo valor e comportamento que as temperaturas das superfícies interiores da câmara climática.

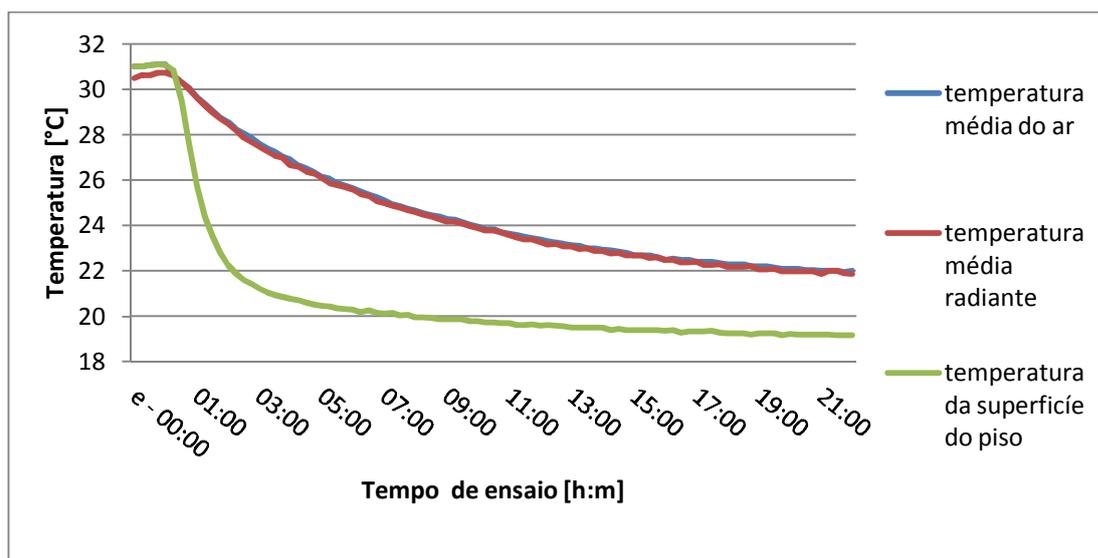


Figura 5.21 - Gráfico da Evolução do valor da temperatura da temperatura média do ar, temperatura média radiante e temperatura média da superfície do piso ao longo do tempo para o ensaio de arrefecimento com uma temperatura de insuflação de 18°C e piso com acabamento em cerâmica

Comparando o gráfico da Figura 5.21 com o gráfico da Figura 5.22 pode-se constatar que a diferença entre a temperatura média radiante e do ar é ligeiramente superior para o piso com acabamento da superfície em piso flutuante.

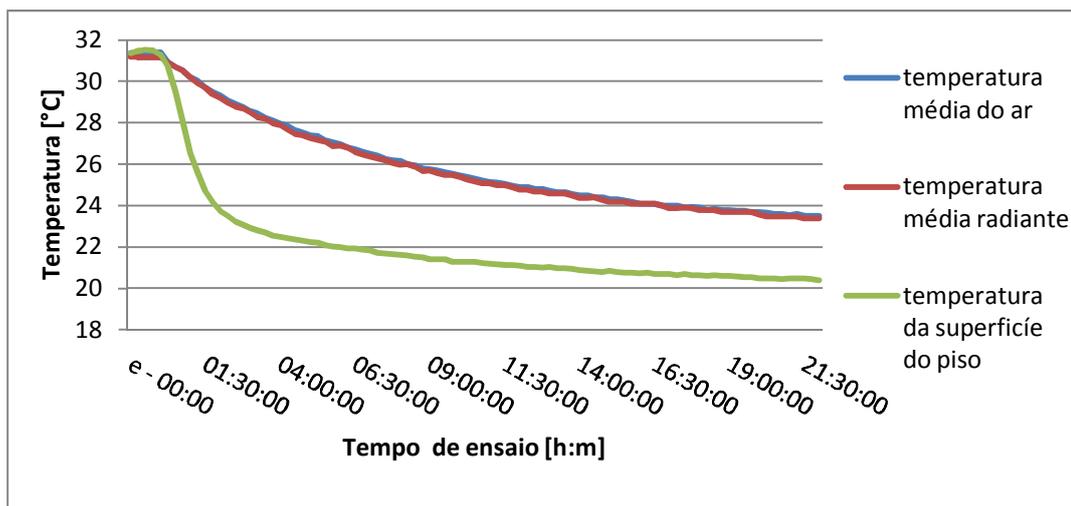


Figura 5.22 - Gráfico da Evolução do valor da temperatura da temperatura média do ar, temperatura média radiante e temperatura média da superfície do piso ao longo do tempo para o ensaio de arrefecimento com uma temperatura de insuflação de 18°C e piso com acabamento em piso flutuante

O facto de o valor da temperatura das superfícies interiores ser semelhante ao valor da temperatura do ar no interior da câmara vem provar que o isolamento térmico da câmara impede as trocas de calor entre o interior e o exterior. Este caso valida a consideração da câmara climática como volume de controlo.

5.5 Análise dos índices de conforto térmico

Um dos objectivos deste trabalho foi caracterizar a influência do funcionamento do piso radiante com diferentes acabamentos de superfície nos índices de conforto térmico da câmara.

Esta caracterização foi feita a partir do estudo dos índices de conforto térmico no final de cada ensaio e posteriormente de um ensaio para cada modo de funcionamento do piso (aquecimento e arrefecimento) e tipo de acabamento da superfície.

Os parâmetros necessários para o cálculo dos índices de conforto térmico e os próprios índices foram calculados com recurso a folhas de cálculo do EXCEL auxiliadas pelo programa informático BASIC. Os parâmetros calculados foram os indicados pela norma ISO 7730.

Os índices médios de resistência da roupa usada pelos ocupantes foram distintos para os dois tipos de funcionamento do piso (aquecimento e arrefecimento), sendo considerado vestuário leve de verão para o caso de arrefecimento e vestuário de inverno para ambiente interior, com os valores de $I_{vest} = 0,5$ clo e $I_{vest} = 1$ clo respectivamente.

A taxa metabólica foi determinada de acordo com a tabela A.1 da Norma ISO-7730: 1994, pressupondo que a actividade desenvolvida dentro do espaço estudado, corresponde a uma



actividade sedentária. A taxa metabólica adoptada é, para ambos os casos de funcionamento e de acabamento de superfície, 1,20 met, equivalente a 70 W/m² que corresponde a uma actividade sedentária.

5.5.1 Ensaios de aquecimento

Para a análise dos índices de conforto térmico no interior da câmara para o funcionamento do piso em modo de aquecimento, primeiro foi analisado o valor dos mesmos no final de cada ensaio para as diferentes temperaturas de funcionamento e posteriormente foi analisado um ensaio de referência para cada acabamento de superfície, tendo esta última análise o objectivo de caracterizar o funcionamento do piso ao longo do tempo para uma determinada temperatura de insuflação. A temperatura escolhida para esta última análise foi de 28°C devido a ser a temperatura máxima de insuflação da água. Posteriormente confrontou-se os resultados das análises anteriores entre os diferentes acabamentos.

A tabela 5.1 apresenta os valores considerados para o cálculo dos índices de conforto térmico para os ensaios de aquecimento do piso com acabamento em cerâmica:

Tabela 5.1 - Valores utilizados para o cálculo dos índices de conforto térmico no final (24h) dos ensaios de aquecimento para o piso com acabamento em cerâmica

	M	W	I _{vest}	T _a	T _r	P _a	V _a
	[met]	[met]	[clo]	[°C]	[°C]	[Pascal]	[m/s]
20°C	1,2	0	1	21,4	21,4	1011	0
22°C	1,2	0	1	22,3	22,3	1049	0
24°C	1,2	0	1	23,2	23,2	1089	0
26°C	1,2	0	1	24,7	24,6	1175	0
28°C	1,2	0	1	25,9	25,8	1278	0

O gráfico da Figura 5.23 mostra os valores dos índices de conforto térmico no final de cada ensaio de aquecimento para o piso com acabamento em cerâmica. Neste mesmo gráfico (Figura 5.23) pode-se observar que a distribuição dos índices ao longo da curva de Fanger não tem a mesma proporção que a diferença entre os valores de temperatura de insuflação.

Pode-se também observar que para este tipo de acabamento (gráfico 5.23) apenas os ensaios com uma temperatura de funcionamento de 20°C, 22°C e 24°C (este último já no limite), se encontram dentro da zona dos parâmetros ideais de conforto térmico, ou seja as temperaturas de 26°C e de 28°C são demasiado elevadas para uma pessoa com este tipo de actividade e tipo de vestuários (actividade sedentária e roupa de inverno para espaço interior).



Recorda-se que no final dos ensaios a temperatura da superfície do piso se encontra estabilizada, sendo o seu valor próximo do da temperatura de insuflação, como se pode observar nos resultados anteriores.

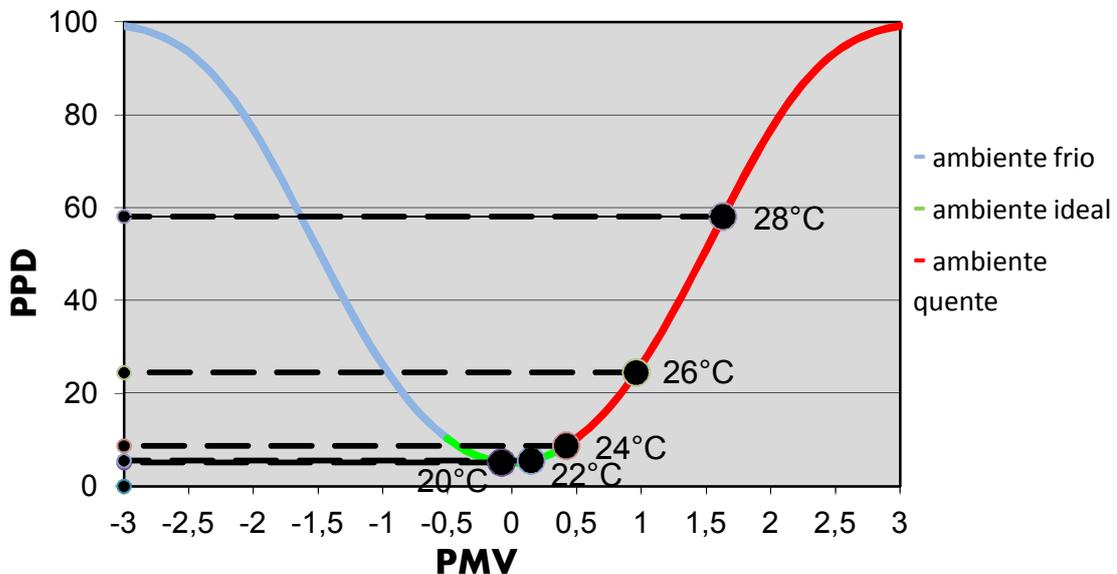


Figura 5.23 - Índices de conforto térmico no final dos ensaios de aquecimento (24h) para o piso radiante com acabamento em cerâmica

Como se pode observar pelo gráfico da Figura 5.24 (piso radiante com acabamento em cerâmica), as condições de conforto térmico no interior da câmara climática apresentavam-se estabilizadas.

Também através da análise do gráfico da Figura 5.24, pode-se rapidamente concluir que uma temperatura de insuflação de 28°C é demasiado elevada para a criação de condições de conforto térmico, pois quando a temperatura do piso atinge um valor próximo da temperatura de insuflação (consequentemente o ar interior atinge também mesmo valor) os índices de conforto térmico indicam um ambiente demasiado quente dentro da câmara, estando cerca de 60% dos ocupantes descontentes, isto apesar das normas internacionais referirem uma temperatura da superfície do piso de no máximo até 29°C para actividade sedentária como vimos anteriormente.

De realçar que só ao fim de 4 horas é que são reunidas as condições de conforto térmico no interior da câmara, com menos de 10% dos ocupantes descontentes.

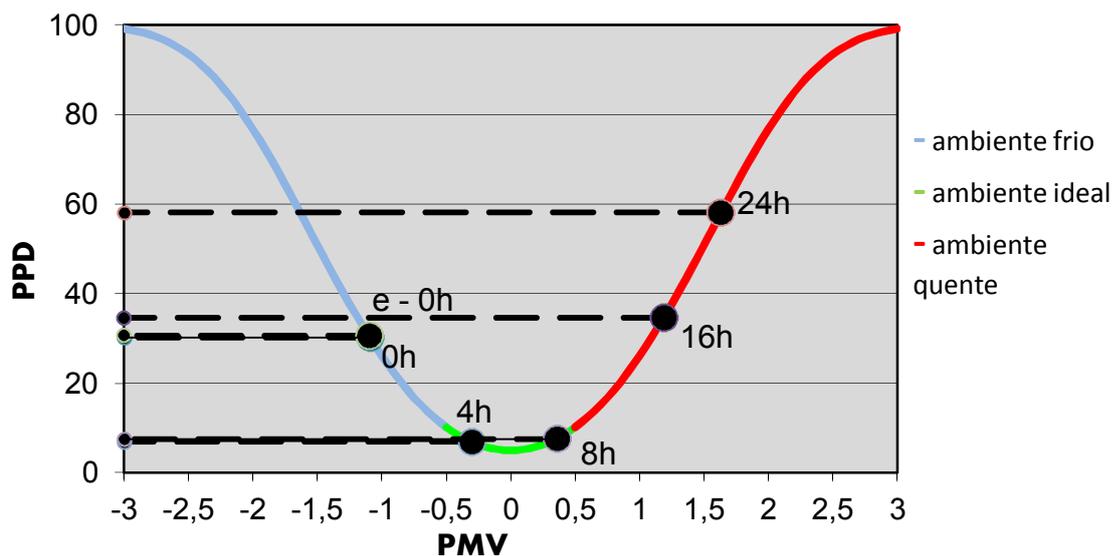


Figura 5.24 - Distribuição do PMV vs PPD ao longo do tempo para um ensaio de aquecimento com uma temperatura de insuflação de 28°C e piso com acabamento de superfície em cerâmica

A tabela 5.2 apresenta os valores considerados para o cálculo dos índices de conforto térmico para os ensaios e aquecimento do piso com acabamento em piso flutuante:

Tabela 5.2 - Valores utilizados para o cálculo dos índices de conforto térmico no final (24h) dos ensaios de aquecimento para o piso com acabamento em cerâmica

	M	W	I _{vest}	T _a	T _r	P _a	V _a
	[met]	[met]	[clo]	[°C]	[°C]	[Pascal]	[m/s]
20°C	1,2	0	1	22,7	22,6	1302	0
22°C	1,2	0	1	23,6	23,5	1163	0
24°C	1,2	0	1	24,3	24,3	1188	0
26°C	1,2	0	1	25,1	25,0	1209	0
28°C	1,2	0	1	26,2	26,1	1320	0

No caso do gráfico 5.25, apenas para as temperaturas de 20°C e de 22°C é que a câmara possuiu condições ideais de conforto térmico, sendo todas as outras temperaturas demasiado elevadas criando um ambiente quente para o utilizador.



Comparativamente com o mesmo tipo de ensaio para o piso com acabamento em cerâmica, este ensaio (Figura 5.25) apresentou uma resposta mais rápida das condições da câmara para a mesma gama de temperaturas de funcionamento.

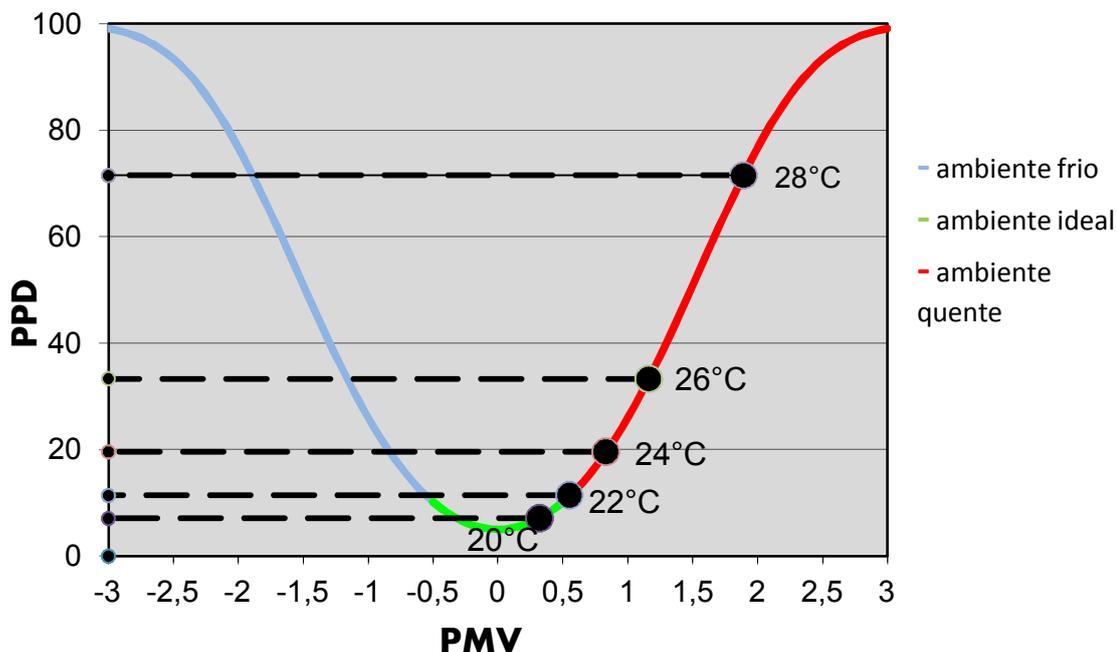


Figura 5.25 - índices de conforto térmico no final dos ensaios de aquecimento (24h) para o piso radiante com acabamento em piso radiante

Para o caso apresentado no gráfico da Figura 5.26, nota-se que a resposta dos índices de conforto dentro da câmara foi ligeiramente mais rápida que no caso anterior (Figura 5.24), ou seja a temperatura da superfície do piso flutuante aproximou-se mais rapidamente do valor da temperatura de insuflação, reflectindo-se nas condições interiores da câmara.

Como aconteceu para o caso anterior (Figura 5.24), também neste caso (Figura 5.26) os 28°C da temperatura de insuflação se revelaram demasiado elevados para a criação de um ambiente de conforto térmico.

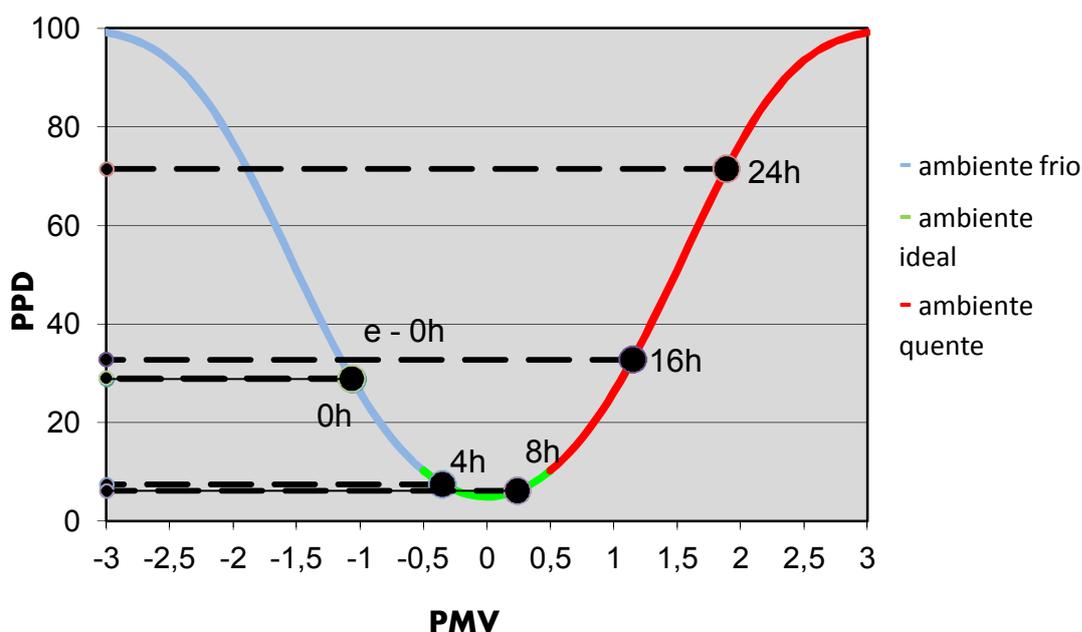


Figura 5.26 - Distribuição do PMV vs PPD ao longo do tempo para um ensaio de aquecimento com uma temperatura de insuflação de 28°C e piso com acabamento de superfície em piso flutuante

5.5.2 Ensaios de arrefecimento

Para a análise da evolução dos índices de conforto térmico no interior da câmara para o funcionamento do piso em modo de arrefecimento, foram analisados dois ensaios de referência para cada acabamento de superfície. A temperatura escolhida foi de 18°C devido a ser a temperatura mínima de insuflação da água para este caso.

A tabela 5.3 apresenta os dados obtidos e considerados para o cálculo dos índices de conforto térmico para os ensaios de arrefecimento com um acabamento da superfície do piso em cerâmica.

Tabela 5.3 - Valores utilizados para o cálculo dos índices de conforto térmico no final (22h) dos ensaios de arrefecimento para o piso com acabamento em cerâmica

	M	W	I _{vest}	T _a	T _r	P _a	V _a
	[met]	[met]	[clo]	[°C]	[°C]	[Pascal]	[m/s]
18°C	1,2	0	0,5	22,6	22,6	1034	0
20°C	1,2	0	0,5	22,0	21,9	1014	0

O gráfico da Figura 5.27 mostra que apenas a temperatura de 20°C é ideal para se criar as condições de conforto térmico no interior da câmara climática, mesmo estando a



temperatura de 18°C dentro da gama de valores aconselhado pelas normas internacionais e esta não ser a temperatura real da superfície do piso, como vimos nos resultados anteriores.

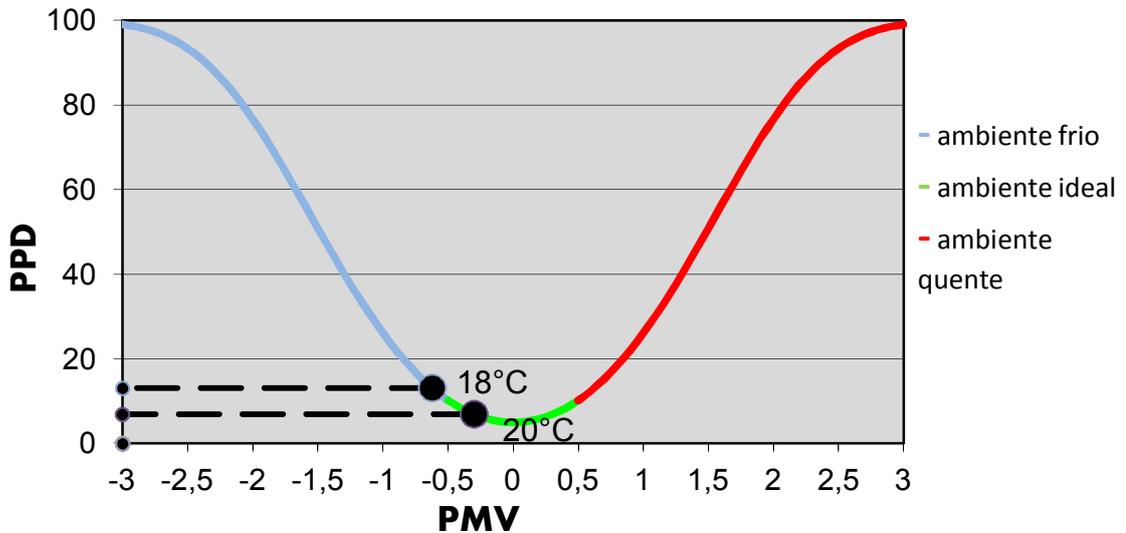


Figura 5.27 - índices de conforto térmico no final dos ensaios de arrefecimento (22h) para o piso radiante com acabamento em cerâmica

Analisando-se o gráfico da Figura 5.28, verifica-se que as condições de conforto térmico no interior da câmara aquando do início do ensaio estavam estabilizadas.

Pelo gráfico da Figura 5.28 pode-se concluir que só foi atingido um ambiente térmico ideal no interior da câmara entre as 8h e as 12h.

Como se observou na análise anterior das temperaturas no interior da câmara, as mesmas só se aproximaram da temperatura de insuflação da água no final do ensaio, que como podemos concluir pela análise do gráfico da Figura 5.28 fica no limiar das condições de conforto térmico ideais.

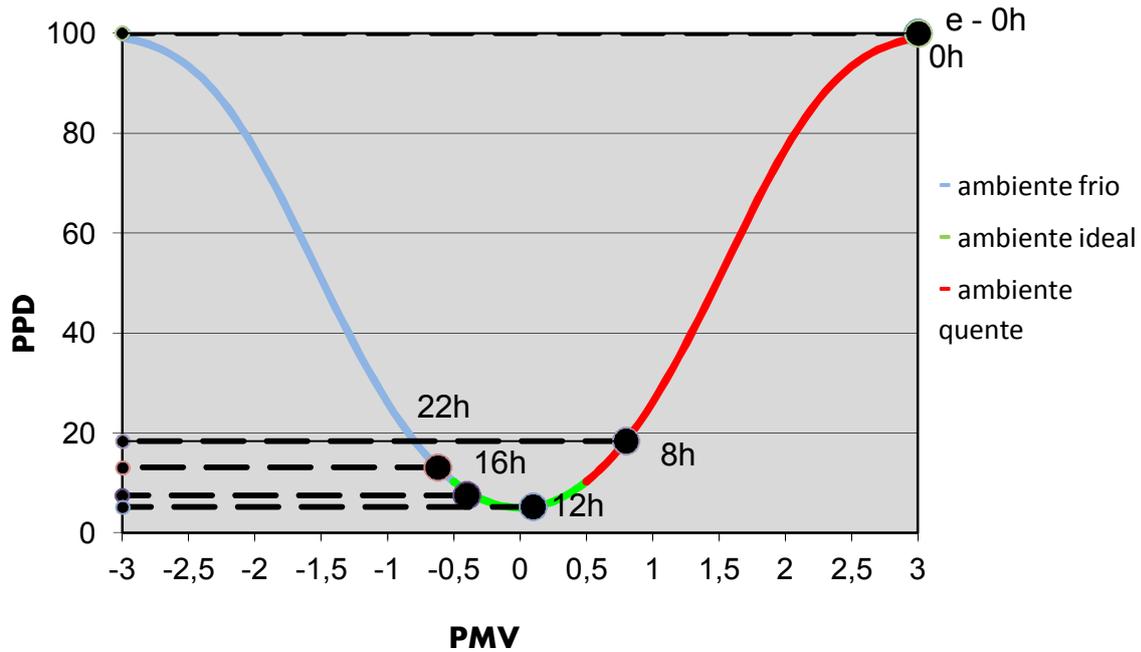


Figura 5.28 - Distribuição do PMV vs PPD ao longo do tempo para um ensaio de arrefecimento com uma temperatura de insuflação de 18°C e piso com acabamento de superfície em cerâmica

A tabela 5.4 mostra os valores obtidos e considerados para o cálculo dos índices de conforto no interior da câmara climática para os ensaios de arrefecimento para o piso com acabamento em piso flutuante.

Tabela 5.4 - Valores utilizados para o cálculo dos índices de conforto térmico no final (22h) dos ensaios de arrefecimento para o piso com acabamento em piso flutuante

	M	W	I _{vest}	T _a	T _r	P _a	V _a
	[met]	[met]	[clo]	[°C]	[°C]	[Pascal]	[m/s]
18°C	1,2	0	0,5	24,2	24,1	1435	0
20°C	1,2	0	0,5	23,5	23,4	1397	0

Observa-se pelo gráfico da Figura 5.29 que o desempenho em termos de conforto térmico do piso com acabamento em piso flutuante foi inferior ao do caso da Figura 5.27, pois apenas a temperatura de 18°C foi suficiente para se criar um ambiente térmico ideal no interior da câmara.

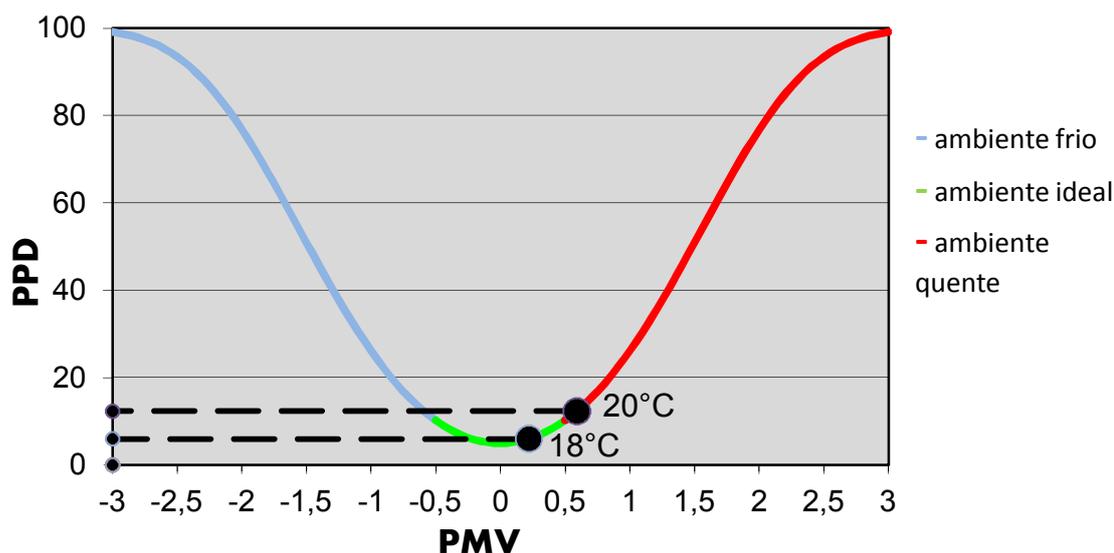


Figura 5.29 - índices de conforto térmico no final dos ensaios de arrefecimento (22h) para o piso radiante com acabamento em piso flutuante

Na análise do gráfico da Figura 5.30, destaca-se o facto de a câmara com o piso com acabamento em piso flutuante só atingir as condições ideais de conforto térmico após as 16h de funcionamento, ou seja um tempo considerável comparado com o caso da Figura 5.28. Este facto pode ser mais uma vez explicado por o conjunto madeira + feltro ter maior resistência térmica quando comparado com o conjunto cimento cola + cerâmica.

Tendo em conta que para o caso da Figura 30 apenas no final do ensaio é que a temperatura do piso estabilizou, então pode-se concluir que este valor de temperatura de insuflação é aceitável.

Relembra-se que para ambos os ensaios de arrefecimento a temperatura da superfície do piso teve uma diferença no mínimo de aproximadamente 1°C relativamente á temperatura de insuflação para o caso do acabamento em cerâmica, enquanto que para o caso do piso com acabamento em piso flutuante a mesma diferença foi de aproximadamente 2,5°C, isto para os ensaios com uma temperatura de insuflação de 18°C, garantindo-se assim uma temperatura da superfície do piso dentro dos valores recomendados pelas normas internacionais (18°C/19°C).

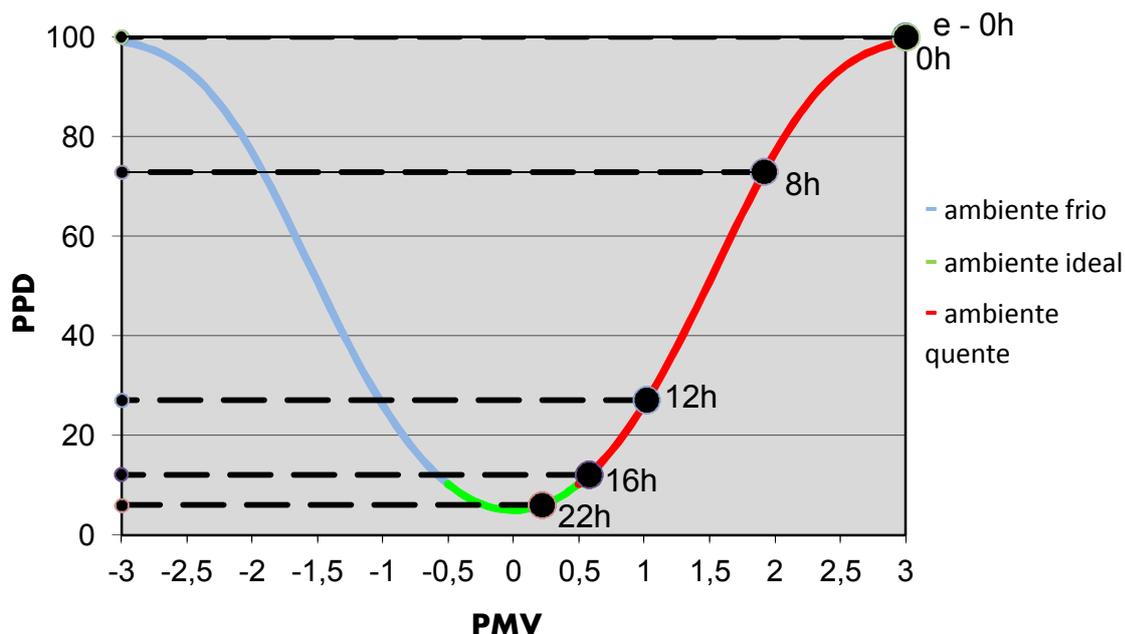


Figura 5.30 - Distribuição do PMV vs PPD ao longo do tempo para um ensaio de arrefecimento com uma temperatura de insuflação de 18°C e piso com acabamento de superfície em piso flutuante

5.5.3 Efeito do vestuário e metabolismo nos índices de conforto térmico

Recorrendo-se à análise da evolução dos índices de conforto térmico ao longo do tempo para um ensaio de aquecimento com o acabamento da superfície em piso flutuante e com uma temperatura de insuflação de 20°C, alterou-se a taxa metabólica e resistência da roupa do ocupante com o objectivo de se analisar o impacto das mesmas nos índices de conforto térmico.

Tabela 5.5 - Valores utilizados para o cálculo dos índices de conforto térmico para o ensaio de aquecimento (temperatura de insuflação = 20°C) do piso radiante com acabamento da superfície em piso flutuante

	M	W	I _{vest}	T _a	T _r	P _a	V _a
	[met]	[met]	[clo]	[°C]	[°C]	[Pascal]	[m/s]
0h	1,2	0	1	15,6	15,3	1532	0
4h	1,2	0	1	17,7	17,5	1760	0
8h	1,2	0	1	19,6	19,6	1537	0
16h	1,2	0	1	21,7	21,7	1342	0
24h	1,2	0	1	22,7	22,6	1302	0



O caso do gráfico da Figura 5.31 serve como referência, tendo como taxa de metabolismo MET=1,2 e um valor de resistência da roupa de CLO=1.

Neste caso e para as condições de referência, são atingidas as condições ideais de conforto térmico ~4h após o início do ensaio mantendo-se nessas condições até ao final do ensaio (24h). Este gráfico (Figura 5.31) mostra que os 20°C de temperatura de insuflação de água no piso são ideais para estes valores de vestuário e de taxa de metabolismo.

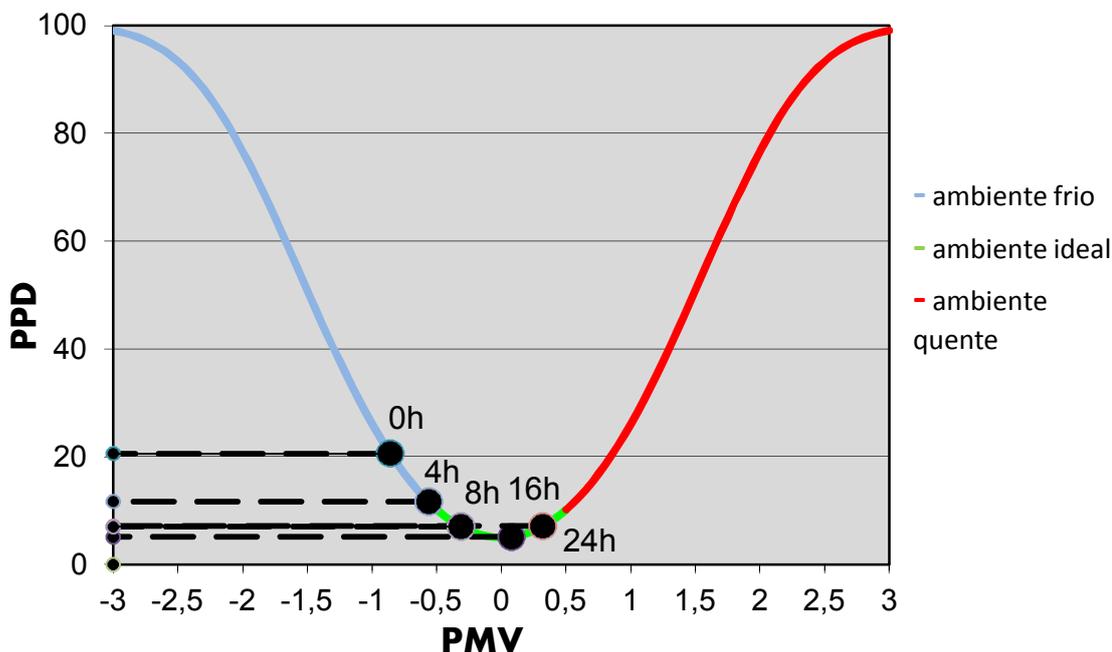


Figura 5.31 - Distribuição do PMV vs PPD ao longo do tempo para um ensaio de aquecimento com uma temperatura de insuflação de 20°C e piso com acabamento de superfície em piso flutuante (MET=1,2; $I_{vest}=1$)

Para o caso do gráfico da Figura 5.32 considerou-se a actividade do ocupante trabalho leve (MET=1,8) em vez de actividade sedentária (MET=1,2), mantendo-se todos os outros parâmetros e temperaturas.

Como se pode observar, uma diferente actividade que implique um aumento da taxa de metabolismo relativamente ao caso de referência vai implicar também um aumento dos valores dos índices de conforto térmico, ou seja pode implicar que para as mesmas temperaturas no interior da câmara o ambiente passe de ideal a um ambiente quente, que foi o caso do gráfico da Figura 5.32 em relação às condições de referência do gráfico 5.31.

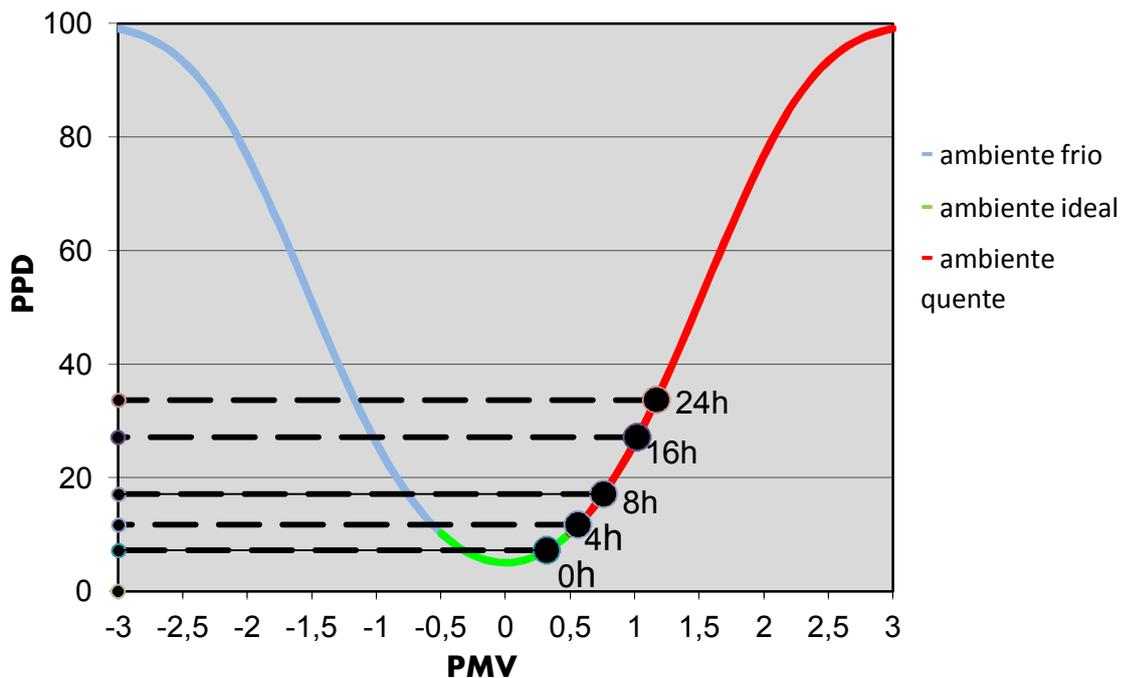


Figura 5.32 - Distribuição do PMV vs PPD ao longo do tempo para um ensaio de aquecimento com uma temperatura de insuflação de 20°C e piso com acabamento de superfície em piso flutuante (MET=1,8; $I_{vest}=1$)

Para o caso apresentado no gráfico 5.33 alterou-se índice da resistência do vestuário, neste caso considerou-se vestuário leve de Verão com um índice $I_{vest}=0,5$ clo. Ou seja, estamos a reduzir a resistência do vestuário do ocupante, o que faz com que o seu corpo esteja mais sensível a alterações de temperatura. Esta redução na resistência do vestuário faz com que o corpo do ocupante possua menos isolamento térmico fazendo com que o mesmo sinta mais frio como mostra o gráfico da Figura 5.33.

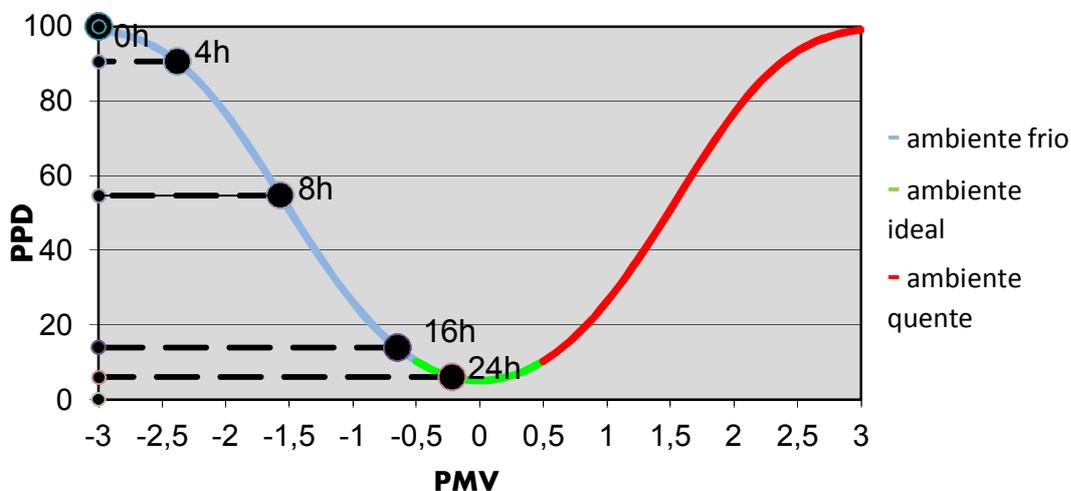


Figura 5.33 - Distribuição do PMV vs PPD ao longo do tempo para um ensaio de aquecimento com uma temperatura de insuflação de 20°C e piso com acabamento de superfície em piso flutuante (MET=1,2; $I_{vest}=0,5$)



6. Conclusões

As conclusões deste trabalho foram dispostas segundo o tipo de análise de desempenho do piso radiante. As análises dos ensaios efectuados incidiram principalmente no funcionamento do piso radiante em modo de aquecimento, em modo de arrefecimento e análise do impacto do funcionamento do piso radiante nos índices de conforto térmico no interior da câmara climática.

6.1 Funcionamento do piso em modo de aquecimento

A partir da análise do comportamento da temperatura das superfícies, de qualquer tipo dos acabamentos testados e para qualquer temperatura de insuflação, observa-se que só ao fim de várias horas de funcionamento (aproximadamente 19h) é que o valor de temperatura estabiliza, atingindo-se em média um valor idêntico ao da temperatura da água insuflada. Ou seja como o valor da diferença entre a temperatura de insuflação e a temperatura superfície tende para zero, pode-se considerar que se atinge o rendimento máximo por essa altura.

Ambos os acabamentos da superfície apresentam desempenhos idênticos ao longo do tempo, sendo impossível definir qual dos dois apresenta temperaturas médias mais elevadas na superfície.

Esta análise do desempenho comparativo dos dois tipos de acabamento da superfície foi dificultada pelos diferentes valores de humidade relativa dentro da câmara para cada ensaio (Figuras 5.12 e 5.13) e também pelo facto de o banho térmico não manter as mesmas temperaturas de funcionamento para todos os ensaios.

Apesar de não ter sido apresentado neste trabalho, foram obtidos dados do funcionamento de todas as secções de construção do piso para ambos os tipos de acabamento da superfície do piso, dados esses que permitiram concluir que o comportamento da temperatura de todas as secções de construção do piso acompanhava o comportamento da temperatura da superfície, enquanto que o seu valor era mais alto consoante a proximidade da secção à tubagem.

Os valores de humidade relativa apesar de começarem com valores diferentes entre os ensaios com acabamento em cerâmica e piso flutuante tenderam para a mesma gama de valores. Isto deveu-se ao facto de se ter estabilizado o valor de humidade relativa da câmara climática pelo valor de humidade relativa do laboratório onde estava montada a instalação experimental. Como os ensaios foram feitos em dias diferentes e como o ambiente do laboratório não é controlado, o valor variou consoante os valores de humidade relativa ambientes.



Em termos de comportamento das temperaturas das superfícies internas da câmara, nada se pode concluir para ambos os tipos de acabamento pois ambos apresentaram valores idênticos. O mesmo se aplica a temperatura média do ar interior e temperatura média radiante que tiveram valores e comportamentos semelhantes ao das temperaturas das superfícies internas da câmara climática.

O facto de as temperaturas das superfícies interiores da câmara apresentarem valores semelhantes ao do ar no interior da câmara demonstra que não existe transferência de calor entre o interior e o exterior da câmara, podendo assim a câmara climática ser considerada como volume de controlo, como havia sido no início dos ensaios.

6.2 Funcionamento do piso em modo de arrefecimento

Em modo de arrefecimento o piso com acabamento em cerâmica apresentou um desempenho superior ao piso com acabamento da superfície em piso flutuante. Este facto é facilmente observado nas temperaturas de superfície que ambos os pisos com diferentes acabamentos atingem no final dos respectivos ensaios, tendo o piso com acabamento em cerâmica uma diferença mínima de cerca de 1°C entre a superfície do piso e água insuflada para ambos os ensaios enquanto que o piso com acabamento em piso flutuante atinge um mínimo de aproximadamente 1,5°C para ambos os ensaios.

De realçar que os valores de humidade relativa foram sempre diferentes ao longo dos ensaios para ambos os acabamentos, facto que pode ter influenciado os resultados finais.

Os valores e comportamento das temperaturas das superfícies interiores da câmara climática, temperatura média do ar e temperatura média radiante foram idênticos entre si e para ambos os acabamentos da superfície, sendo assim impossível assim tirar conclusões sobre a comparação dos dois tipos de acabamento da superfície.

Como aconteceu para os ensaios de aquecimento, também em modo de arrefecimento as superfícies interiores da câmara apresentaram valores de temperatura semelhantes entre si e idênticas ao valor da temperatura do ar interior, ou seja não houve trocas de calor entre o interior e o exterior da câmara climática durante os ensaios devido ao isolamento térmico da câmara.

6.3 Conforto térmico

Relativamente aos resultados da análise do conforto térmico no interior da câmara, no modo de aquecimento foram inconclusivos, devido á proximidade dos valores dos índices de conforto térmico entre os dois tipos de acabamentos. O resultado esperado seria que o piso de cerâmica atingisse temperaturas superiores devido ao valor da sua resistência térmica ser



inferior ao do piso flutuante, e conseqüentemente atingir-se o conforto térmico no interior da câmara mais rapidamente comparativamente ao outro tipo de acabamento.

No modo de arrefecimento o piso radiante com acabamento em cerâmica demonstrou ter um rendimento superior, pois atingiu os índices ideais de conforto térmico mais rapidamente que o piso flutuante. Este desempenho deve-se mais uma vez ao seu valor de resistência térmica que permitiu que este piso atingisse temperaturas finais mais próximas da temperatura de insuflação da água.

Através da análise dos índices de conforto térmico para os resultados obtidos conclui-se que as temperaturas aconselhadas pelas normas internacionais para a superfície do piso radiante não são sinónimo de conforto térmico no espaço climatizado, revelando-se as mesmas demasiado elevadas. Segundo os resultados obtidos as temperaturas deveriam ser mais baixas o que faria com que se reduzisse o consumo energético do piso.

Tanto para o piso com acabamento em cerâmica como com acabamento em piso flutuante a diferença entre a temperatura do ar interior e temperatura das paredes foi inferior aos 3°C aconselhado pela norma ISSO 7730.

Com este trabalho mostrou-se que regular a temperatura de funcionamento do piso não é o suficiente para que este funcione correctamente, ou seja, que crie condições de conforto térmico, mesmo que opere segundo a gama de temperaturas aconselhada pelas normas internacionais.

Neste trabalho mostrou-se a importância de certos factores como a actividade desenvolvida no interior do espaço climatizado ou o tipo de vestuário do utilizador, factores estes que são essenciais para se definir a temperatura ideal de funcionamento do piso radiante.

Pode-se concluir a partir deste trabalho que o sistema ideal de controlo de um piso radiante, deveria se reger directamente por um sistema de cálculo dos índices de conforto térmico para o espaço a climatizar. Sistema este que teria de ter em conta parâmetros tais como o tipo de actividade ou vestuário do utilizador. Este tipo de controlo ia evitar gastos energéticos desnecessários por parte do piso radiante assim como uma melhoria substancial nas condições de conforto térmico dos espaços onde fosse instalado.





Referências bibliográficas

- [1] Fanger, P.O. *Thermal Comfort - Analysis and Applications in Environmental Engineering*, Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1982.
- [2] Department of Economic and Social Affairs of the United Nations (DESA); *World Population Prospects The 2006 Revision*, Organização das Nações Unidas, Nova Iorque, 2007.
- [3] Pinheiro, M. D., *Ambiente e Construção Sustentável*, Instituto do Ambiente, Amadora, 2006.
- [4] Frota, A. B., Schiffer, S. R., *Manual do Conforto Térmico*, Studio Nobel, São Paulo, 1987.
- [5] *Eficiência Energética nos Edifícios*, Direcção Geral de Energia - Ministério da Economia, Fevereiro, 2002.
- [6] Almeida, H. S., *Análise do Conforto Térmico de Edifícios utilizando as abordagens analítica e adaptativa*, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Outubro de 2010.
- [7] Comissão Europeia (CE), *Directiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios*, Jornal Oficial das Comunidades Europeias (JOCE), L1, Abril de 2003.
- [8] Ho, S. Y., Hayes, R. E. e Wood, R. K., *Simulation of the dynamic behaviour of a hydronic floor heating system*, Canadá, 1994.
- [9] Chen, Y., Athienitis, A. K., *A 3-D numerical investigation of the effect of cover materials on heat transfer in floor heating systems*, ASHRAE Transactions 104(2), pp. 1350-1355, 1998.
- [10] Athienitis, A. K., Chen, Y., *The Effect of Solar Radiation on Dynamic Thermal Performance of Floor Heating Systems*, Elsevier, 25 de Janeiro 2000.
- [11] ASHRAE, *ASHRAE Handbook, Fundamentals*, Atlanta, GA, 1997.
- [12] Bozkır, O., Canbazoglu, S., *Unsteady thermal performance analysis of a room with serial and parallel duct radiant floor heating system using hot airflow*, *Energy and Buildings*, Elsevier, 10 de Janeiro 2004.
- [13] Baskin, Evelyn, *Evaluation of Hydronic Forced-Air and Radiant Slab Heating and Cooling Systems*, *ASHRAE Transactions: Symposia*, pp. 525-534, 2005.



- [14] Sattari, S., Farhanieh, B., *A parametric study on radiant floor heating system performance*, Tehran, Iran, *Technical note, Renewable Energy, Elsevier, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology*, 2006.
- [15] Scheatzle, David, *Combining Radiant and Convective Systems with Thermal Mass for a More Comfortable Home*, *ASHRAE Transactions: Symposia*, ©2006, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., CH-06-1-1 (RP-1140), pp 253-268, 2006.
- [16] Mingqing, S., Xinying, M., Xiaoying, W., Zuofu, H., Zhuoqiu, L., *Experimental studies on the indoor electrical floor heating system with carbon black mortar slabs*, Department of Engineering Structures and Mechanics, School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China, Elsevier, 2007.
- [17] Karadag, Refet, Akgöbek, Ömer, *The prediction of convective heattransfer in floor-heating systems by artificial neural networks*, Department of Mechanical Engineering, University of Harran, 63300 Sanliurfa, Turkey, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 35 312-325, Elsevier, 2008.
- [18] Ryu, Seong-Ryong, Rhee, Kyu-Nam, Yeo, Myoung-Souk Kim, Kwang-Woo, *Strategies for flow rate balancing in radiant floor heating systems*, *Building Research & Information* 36(6), 625-637, Taylor & Francis, 2008.
- [19] Kilic, Muhsin, Sevilgen, Gökhan, *Modelling airflow, heat transfer and moisture transport around a standing human body by computational fluid dynamics*, Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering and Architecture, Uludag University, Bursa, Turkey, 1159-1164, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Elsevier, 2008.
- [20] Scheatzle, D. G., *A proposed combination radiant/ convective system for an Arizona residence*, *T ASHRAE* 102 (1): 676-684, 1996.
- [21] Schiller, G.E., *A comparison of measured & predicted thermal comfort in office buildings*, *T ASHRAE* 96(1): 609-622. 1990.
- [22] Lin, C., Auslander, D., Federspiel, C., *Multi-sensor single actuator control of HVAC Systems*, 2nd International Conference for Enhanced Building Operations, Richardson, Texas, Oct 14-18, 2002.
- [23] Freire, R. Z., Oliveira, G. H. C., Mendes, N., *Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings*, *ABCM Symposium Series in Mechatronics* 3: 839-848, 2008.



- [24] Conceicao, E. Z. E., Lucio, M. M. J. R., *Thermal study of school buildings in winter conditions*, Building and Environment 43 (2008): 782-792, 2008.
- [25] Zhang, Z., Pate, M.B., *A new approach for designing heating panels with embedded tubes*, T ASHRAE 95(1): 231-238, 1989.
- [26] Berglund, L., Rascati, R. Markel, M. L., *Radiant heating control for comfort during transient conditions*, T ASHRAE 88(2): 765-775, 1982.
- [27] Athienitis, A. K., Shou, J. G., *Control of radiant heating based on the operative temperature*, T ASHRAE 97(2): 787-794, 1991.
- [28] ASHRAE, *2009 ASHRAE HANDBOOK: Fundamentals (SI)*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, 2009.
- [29] Fanger, P. O., *Thermal Comfort, Analysis and Application in Environment Engineering*, Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.
- [30] Olesen, B. W., *International standards and ergonomics of the thermal environment*, Applied Ergonomics 26(4): 293-302, 1995.
- [31] Jones, B. W., *Capabilities and limitations of thermal models for use in thermal comfort standards*, Energy and Buildings 34 (2002): 653-659, 2002.
- [32] Sakoi, T., Tsuzuki, K., Kato, S., Ooka, R., Song, D., Zhu, S., *Thermal comfort, skin temperature distribution, and sensible heat loss distribution in the sitting posture in various asymmetric radiant field*, Building and Environment 42: 3984-3999, 2007.
- [33] Corgnati, S. P., Fabrizio, E., Filippi, M., *The impact of indoor thermal conditions, system controls and building types on the building energy demand*, Energy and Buildings 40 (4): 627-636, 2008.
- [34] Kalisperis, L. N., Steinman, M., Summers, L. H., Olesen, B., *Automated design of radiant heating systems based on MRT*, T ASHRAE 96(1): 1288-1295, 1990.
- [35] Ling, M. D. F., Deffenbaugh, J. M., *Design strategies for low temperature radiant heating systems based on thermal comfort criteria*, T ASHRAE 96(1): 1296-1305, 1990.
- [36] SCHMID, Aloísio Leoni et al. ANSAY, Samuel Soares; PEREIRA, Mauro César. *Aquecimento de pisos: revisão bibliográfica e estudo teórico do desempenho em regime transitório sob custo de energia variável no tempo*, In: VIII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído - ENCAC, Maceió, 2005.



- [37] KWD., *KWD market and charts: plumbing and heating Europe 2001/2002*, KWD, Informationszentrale Kunst-staffe, 2001.
- [38] Watson, Richard D., Chapman, Kirby S., *Radiant Heating and Cooling Handbook*, McGraw-Hill Handbooks, United States of America, 2002
- [39] Luxmagna, *Piso Radiante*, em: www.luxmagna.pt , (acedido a 12-08-2011).
- [40] House Energy, *Radiant Heating*, em: www.house-energy.com, (acedido a 07-08-2011).
- [41] LARSEN, S. Flore, *Colectores solares de aire para calefacción mediante piso acumulador*, Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, Argentina, v. 11, 2007.
- [42] Bryant, Charles W., *How Radiant Floor Heating Works*, em: www.howstuffworks.com, (acedido a 12-08-2011).
- [43] Standard hidráulica S.A.U., *Sistema de calefacción por Suelo Radiante*, Manual técnico e de instalação, em: www.standardhidraulica.com, (acedido a 17-08-2011).
- [44] *Hydronic cooling*, Energy Source Builder 9(53), <http://tinyurl.com/esb1997>, 1997.
- [45] Dieckmann, J., K., Roth, J., Brodrick., *Dedicated outdoor air systems*, ASHRAE Journal 45(3):58 - 59.
- [46] Dieckmann, J., K. Roth, J., Brodrick, *Radiant ceiling cooling*, ASHRAE Journal 46(6):42-43.
- [47] Roth, K., J., Dieckmann, R. Zogg, J., Brodrick., *Chilled beam cooling*, ASHRAE Journal 49(9):84 - 86.
- [48] Laouadi, Abdelaziz, *Development of a radiant heating and cooling model for building energy simulation software*, *Indoor Environment Research Program*, Institute for Research in Construction, Canada, Building and Environment 39 421 -431, Elsevier, 2004.
- [49] Woodson, R. D., *Complete Construction, Radian Floor Heating*, McGraw-Hill Publishing, 1999.
- [50] Canada Mortgage and Housing Corporation, *Hydronic Radiant Floor Heating*, em: www.cmhc-schl.gc.ca, (acedido a 08-07-2011).



- [51] ISO Standard 7730, *Moderate thermal environments—determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*, Geneva: International Organization for Standardization, 1994.
- [52] ANSI/ASHRAE Standard 55-1992, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.
- [53] CEN (1994) EN 1264: *Floor Heating – Systems and Components*, European Committee for Standardization.
- [54] Incropera, Frank P., DeWitt, David P., *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*, School of Mechanical Engineering Purdue University, tradução de Sérgio Stamile Soares, Rio de Janeiro, LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 4ª edição, 1998.
- [55] Olesen, Bjarne W., *Radiant Floor Heating In Theory and Practice*, 2002.
- [56]. *Economic efficiency of building installations. Energy effort of benefit transfer for water heating systems*, VDI 2067, Part 20, 2000
- [57] Olesen, B. W., *Control of floor heating and cooling systems*, CLIMA-2000, 2001.
- [58] Olesen, B. W., *Thermal comfort in a room heated by different methods*, ASHRAE Transactions 86(1):34-48, 1980.
- [59] Lebrun, J., Marret D., *Heat losses of buildings with different heating systems*, Proceedings of the International Conference on Energy Use Management, 1977.
- [60] Lebrun, J., Marret, D., *Thermal comfort and energy consumption in winter conditions—continuation of the experimental study*, ASHRAE Transactions 85(2):190-204, 1979.
- [61] ISO 7730 - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*, Genebra, 1994.
- [62] ISO 7933 - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *Hot environments - analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rate*, Genebra, 1989.
- [63] ISO 8996 - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *Ergonomics of thermal environments - determinations of metabolic heat production*, Genebra, 1989.



[64] ISO 9920 - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *Ergonomics estimation of thermal characteristics of clothing ensemble*, Genebra, 1993.

[65] Heliflex, Tabela de preços, in: www.heliflex.pt (acedido a 24-07-2011)

[66] Manual Técnico IberFibran, Aplicação de poliestireno extrudido na envolvente dos edifícios in: www.iberfibran.pt (acedido a 13-08-2011)

[67] Teixeira, A., *Estudo do desempenho térmico de um piso radiante hidráulico com diferentes acabamentos na superfície*, 2010.

[68] Omega Engineering, Inc., *Thermocouples -An Introduction*, in: www.omega.com (acedido a 16-07-2011).

[69] Huber, *unistat cc*, in: www.hubber-online.com (acedido a 21-06-2011).

[70] Jorge, L., *Análise do Comportamento Térmico de paredes da Envolvente externa de Edifícios*, 2011.

[71] Cole Parmer, *Digi-Sense® Advanced Temperature Controller, 230V*, em: www.jms-cp.com.au, (acedido a 12-06-2011).

[72] Omega, *High Speed Temperature & Process Signal Measurement System*, em: www.omega.fr, (acedido a 05-07-2011).

[73] Instrumart, Rotronic HygroLog NT Series Dataloggers, em: www.instrumart.com, (acedido a 28-07-2011).

[74] Rotronic, *HygroClip S Rotronic temperature and humidity probe*, em <http://059217.en.b2b168.com>, (acedido a 05-06-2011).

[75] INNOVA, MM0038 Product Data Sheet, em: www.lumasenseinc.com (acedido a 19-08-2011).

[76] INNOVA, MM0060 Product Data Sheet, em: www.lumasenseinc.com (acedido a 19-08-2011).

[77] *Thermal Comfort*, INNOVA AIR Tech Instruments, Copenhagen, 2002.

[78] INNOVA, MM0034 Product Data Sheet, em: www.lumasenseinc.com (acedido a 19-08-2011).



[79] INNOVA, MM0030 Product Data Sheet, em: www.lumasenseinc.com (acedido a 19-08-2011).

[80] INNOVA, 1221 Manual, em: www.lumasenseinc.com (acedido a 19-08-2011).