



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Estudo do desempenho térmico de um piso radiante hidráulico com diferentes acabamentos na superfície

António Filipe Gonçalves Teixeira

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

Orientador: Prof. Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva (DEM-UBI)
Co-orientador: Prof. Doutor Miguel Costa Santos Nepomuceno (DECA - UBI)

Covilhã, Outubro de 2010

Agradecimentos

Um agradecimento para o meu orientador o Prof. Doutor Pedro Nuno Silva e ao meu Co-orientador o Prof. Doutor Miguel Nepomuceno pela acreditação e possibilidade concedida de realização deste trabalho e ainda apoio, dedicação e principalmente entusiasmo prestado.

Agradecer ao técnico Sr. João Correia do Departamento de Engenharia Electromecânica - Universidade da Beira Interior, pela disponibilidade e ajuda cedida.

Por fim, agradecer aos meus pais, aos meus irmãos, e aos meus amigos, em especial ao meu amigo Rui Ribeiro. Agradecer ainda à minha namorada Eng.^a Sónia Rodrigues e a toda a sua família que me ajudou nos momentos mais críticos, sempre disponíveis como uma grande fonte de energia.

A todas as pessoas indirecta ou directamente intervenientes que contribuíram para a realização deste projecto e na busca dos meus ideais.

O meu sincero bem-haja.

Resumo

Nesta dissertação pretendeu-se estudar o desempenho térmico de um piso radiante hidráulico com diferentes acabamentos.

Construiu-se um provete de um sistema de piso radiante hidráulico em que se fez variar o tipo de acabamento. Estudaram-se quatro tipos de revestimento superficial, o piso flutuante sintético de 7 mm de espessura assente num feltro de 1 mm, o piso flutuante sintético de 7 mm de espessura assente num feltro de 3 mm de espessura, um piso flutuante de madeira com 14 mm de espessura assente num feltro com 3 mm de espessura e o piso cerâmico com 7 mm de espessura assente em cimento cola com 4 mm de espessura.

Na realização dos testes recolheram-se as temperaturas registadas em todas as camadas do piso radiante hidráulico. O estudo foi realizado em regime transitório, fazendo-se variar a temperatura do banho térmico de 20 a 45°C, com intervalos de 5°C. A duração de cada ensaio estende-se até à estabilização das temperaturas, o registo das temperaturas foi feito com intervalos de 15 minutos.

Analisou-se os diferentes revestimentos e foi verificado qual o piso que apresenta uma temperatura à superfície mais elevada ou baixa para cada uma das variações da temperatura no banho térmico. Foi verificado que o revestimento cerâmico tem um comportamento que o coloca como o melhor revestimento superficial. O revestimento cerâmico tem resultados que superam o piso radiante sem revestimento. Com o aumento da temperatura do banho, diminui o tempo de resposta para todos os sistemas, e aumenta o tempo de estabilização.

Visto este estudo não ser realizado numa sala com temperatura ambiente constante, a temperatura pelo qual foi estabilizado todo o provete para dar início à experiência, teve que ser adaptada com o aumento das condições de temperatura ambiente.

Palavras-chave

Desempenho Térmico, Conforto Térmico, Piso Radiante Hidráulico, Aquecimento, Calor, Revestimento de Piso

Abstract

This dissertation intended to study the thermal performance of a hydraulic floor heating with different covers in the surface.

Built up a sample of the hydraulic radiant floor heating system that was varied in the type of covers in the surface. We studied four types of covers in the surface, the synthetic flooring, 7 mm thick superimposed on a felt with 1 mm, synthetic flooring, 7 mm thick superimposed on a felt with 3 mm thick, a floating wooden floor with 14 mm thick superimposed on a felt with 3 mm thick and ceramic floor with 7 mm thick superimposed in cement adhesive with 4 mm thick.

In conducting the tests was gathered from the temperatures recorded in all layers of the hydraulic floor heating. The study was conducted in the transitional regime, making it possible to vary the thermal bath temperature 20°C to 45°C in intervals of 5°C. The duration of each trial extended to the stabilization of temperatures, the recording of temperatures was done at intervals of 15 minutes.

Was analyzed the different covers in the surface, and found that the floor that has a surface temperature will be higher or lower for each of the temperature variations in the thermal bath. It was found that the ceramic tile has a behaviour that places him as the best covers in the surface. The floor has ceramic results that exceed the radiant floor with no covers. With increasing bath temperature, decreases the response time for all systems, and increases the settling time.

Since this study is not conducted in a room with constant temperature, the temperature was stabilized by which the entire specimen to initiate the experiment had to be adapted with increasing ambient temperature conditions.

Keywords

Thermal Performance, Thermal Comfort, Radiant Floor Hydraulic, Heating, Covers in the Surface

Índice

1.Introdução	1
1.1 Perspectiva Geral	1
1.2 O problema em estudo e a sua relevância	2
1.3 Revisão Bibliográfica	2
1.4 Objectivos e contribuição da tese	5
1.5 Visão geral da organização da tese	6
2.Piso Radiante	7
2.1 Pannel radiante	7
2.1.1 Condução	8
2.1.2 Convecção	9
2.1.3 Radiação térmica	9
2.2 O que é o piso radiante	10
2.2.1 Estrutura base de um piso radiante (esquema)	11
2.2.2 Vantagens e inconvenientes do piso radiante	17
2.2.2.1 Vantagens	17
2.2.2.2 Inconvenientes	19
2.2.3 Calor necessário	19
2.3 Diferentes tipos de piso radiante	20
2.3.1 Piso radiante para arrefecimento	21
2.3.2 Piso radiante para aquecimento	21
2.3.3 Piso radiante a ar quente	23

2.3.4 Piso radiante eléctrico	24
2.3.5 Piso radiante hidráulico	25
2.3.6 Piso radiante eléctrico vs hidráulico	28
3 Protótipo Experimental	30
3.1 Material	30
3.1.1. Material para construção do provete	30
3.1.2. Material de leitura de dados	31
3.2 Construção do Provete	31
3.2.1 Procedimentos de execução do provete	31
3.2.1.1 Isolante	31
3.2.1.2 Ramal de tubo e termopares	33
3.2.1.1 Requisitos funcionais	33
3.2.1.1 Selecção dos materiais para execução do ramal da tubagem e da implantação dos termopares.	33
3.2.1.2 Aplicação do ramal e termopares	34
3.2.1.3 Descrição da argamassa	37
3.2.1.3.1 Requisitos funcionais	37
3.2.1.3.2 Materiais seleccionados	37
3.2.1.3.3 Parâmetros de cálculo da argamassa bastarda de cimento, cal e areia	38
3.2.1.3.4 Dosagem da argamassa para 1 m ³	38
3.2.1.3.5 Procedimento da preparação e aplicação da argamassa	38
3.2.1.3.6 Camada de base em argamassa bastarda de cimento, cal hidráulica e areia	40

3.3 Procedimentos para conectar o provete ao banho térmico	40
3.3.1 Procedimentos para a conexão do provete ao banho térmico	41
3.4 Procedimentos de execução do revestimento em piso flutuante	42
3.4.1 Selecção dos materiais para execução do revestimento em piso flutuante	42
3.4.2 Procedimentos de execução do piso flutuante	42
3.4.3 Descrição sumária do piso flutuante.	43
3.4.3.1 Revestimento de piso com pavimento flutuante laminado de 7 mm de espessura, assente sobre subcamada de feltro em polietileno de 1 mm de espessura, sem cola	43
3.4.3.2 Revestimento de piso com pavimento flutuante laminado de 7 mm de espessura, assente sobre subcamada de feltro em polietileno de 3 mm de espessura, sem cola	44
3.4.3.3 Revestimento de piso com pavimento flutuante de madeira maciça densa de 14 mm de espessura, assente sobre subcamada de feltro em polietileno de 2 mm de espessura, sem cola	44
3.5 Procedimentos de execução do revestimento em piso cerâmico	44
3.5.1 Selecção dos materiais para execução do revestimento em piso cerâmico	44
3.5.2 Procedimentos de execução do piso cerâmico	45
3.5.3 Revestimento de piso cerâmico de 7 mm de espessura, assente sobre subcamada de cimento-cola com espessura média de 4 mm	47
3.6 Metodologia experimental dos ensaios	47
4 Ensaios Experimentais e Discussão	49
4.1 Curvas de funcionamento	51
4.1.1 Ensaios a 25°C	51
4.1.2 Ensaios a 30°C	54
4.1.3 Ensaios a 35°C	57

4.1.4 Ensaios a 40°C	60
4.1.5 Ensaios a 45°C	63
4.2 Comentários adicionais	66
5 Conclusões e recomendações para trabalho futuro	67
5.1 Conclusões	67
5.2 Recomendações para trabalho futuro	68
6 Referências Bibliográficas	69

Lista de Figuras

Figura 2.1 Espectro da radiação electromagnética (Incropera e DeWitt, 1998).....	10
Figura 2.2 Gradiente térmico proporcionado pelo piso radiante (Standard hidráulica S.A.U., 2010).	11
Figura 2. 3 Esquema da resistência térmica para um sistema de piso radiante (Watson e Chpman, 2002).	12
Figura 2.4 Composição do piso radiante (Laouadi, 2004).....	13
Figura 2.5 Disposição dos tubos em serpentina (Laouadi, 2004).	14
Figura 2.6 Piso radiante eléctrico com o cabo de aquecimento em serpentina (DEVI, 2010)..	14
Figura 2.7 Aplicação de um piso radiante eléctrico (DEVI, 2010).	15
Figura 2.8 Tubos em espiral (Laouadi, 2004).	15
Figura 2.9 Configuração em dupla serpentina (Standard hidráulica S.A.U., 2010)	16
Figura 2.10 Circuito para zonas frias (Standard hidráulica S.A.U., 2010).	16
Figura 2.11 Aquecimento do ar ambiente numa sala com piso radiante (Standard hidráulica S.A.U., 2010)	17
Figura 2.12 Figura esquemática da aplicação de um piso radiante (Rocatherm, 2010).....	20
Figura 2.15 - Piso radiante a ar quente (Watson e Chpman, 2002).	24
Figura 2.16 Exemplo de aplicação do piso radiante eléctrico com revestimento de madeira ou laminado da marca Warmup (2010).	25
Figura 2.17 Tubo de PE-X com multi-camada (Standard hidráulica S.A.U., 2010)	26
Figura 2.18 Barreira anti-vapor (Standard hidráulica S.A.U., 2010)	27
Figura 2.19 Exemplo típico de uma instalação tubular de um piso radiante hidráulico (Laveré, 2009)	27

Figura 2.20 Instalação do piso radiante num edifício (Solarconnect, 2010).....	28
Figura 3.1 Pormenor da placa isolante XPS (Manual Técnico Iberfibran, 2009).	32
Figura 3.2 Comprimento da tubagem	34
Figura 3.3 Dimensionamento e posicionamento da tubagem em relação às paredes da cofragem.	35
Figura 3.4 Fixação da tubagem.....	35
Figura 3.5 a) Esquema em corte do provete; b) Pormenor da figura evidenciando o diâmetro externo da tubagem e a distância entre o tubo e a superfície da argamassa	36
Figura 3.6 Provete pronto a receber a argamassa	37
Figura 3.7 Betoneira misturadora utilizada para a produção da argamassa.....	39
Figura 3.8 Aplicação da argamassa.	39
Figura 3.9 Provete com a argamassa já seca.	40
Figura 3.10 Ligações entre o interior e o exterior do piso. Termopares 1B, 2 ^a , 2B, 2C e tubo.41	
Figura 3.11 local dos termopares de entrada e de saída do fluido.	41
Figura 3.15 - Piso flutuante 7 mm	43
Figura 3.16 Medições no piso flutuante14 mm	43
Figura 3.17 Geometria final das peças de cerâmica.....	45
Figura 3.18 Aplicação do cimento-cola	46
Figura 3.19 Processo de aplicação da cerâmica no provete.....	46

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Características técnicas do isolante térmico da marca Iberfibran (XPS FibranECO) (Manual Técnico Iberfibran, 2009).....	32
Tabela 3.2 limites da temperatura de operação dos quatro mais comuns tipos de termopares (Omega Engineering, Inc, 2010).....	33
Tabela 3.3 Características técnicas do tubo Cristalflex (Heliflex, 2009)	34
Tabela 4.1 Resultados experimentais para a temperatura de referência de 25 ⁰ C	53
Tabela 4.2 Resultados experimentais para a temperatura de referência de 30 ⁰ C	56
Tabela 4.3 Resultados experimentais para a temperatura de referência de 350C.....	59
Tabela 4.4 Resultados experimentais para a temperatura de referência de 40 ⁰ C	62
Tabela 4.5 Resultados experimentais para a temperatura de referência de 45 ⁰ C	65

Lista de Gráficos

Gráfico 4.1 Curvas de funcionamento diferença de Temperatura/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 25°C.....	51
Gráfico 4.2 Curvas de funcionamento Temperatura superficial/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 25°C	52
Gráfico 4.3 Curvas de funcionamento diferença de Temperatura/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 30°C.....	54
Gráfico 4.4 Curvas de funcionamento Temperatura superficial/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 30°C	55
Gráfico 4.5 Curvas de funcionamento diferença de Temperatura/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 35°C.....	57
Gráfico 4.6 Curvas de funcionamento Temperatura superficial/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 35°C	58
Gráfico 4.7 Curvas de funcionamento diferença de Temperatura/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 40°C.....	60
Gráfico 4.8 Curvas de funcionamento Temperatura Superficial/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 40°C	61
Gráfico 4.9 Curvas de funcionamento diferença de Temperatura/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 45°C.....	63
Gráfico 4.10 Curvas de funcionamento Temperatura Superficial/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 45°C.....	64

1.Introdução

1.1 Perspectiva Geral

Desde os tempos mais remotos que os sistemas de piso radiante tem vindo a ser desenvolvidos, por oferecerem vantagens sobre outros tipos de aquecimento. Este tipo de sistema é preferível para a fisiologia humana em espaços de grandes dimensões tais como ginásios, locais de culto, etc. Segundo Bozkır e Canbazoglu, (2004), isto deve-se ao facto do gradiente de temperatura vertical ser negativo.

Sattari e Farhanieh (2006), defendem que a utilização do piso radiante para aquecimento, como meio de atingir o conforto térmico dos ocupantes, tem vindo a aumentar. O sistema pode usar cabos eléctricos ou tubos de água incorporados no betão.

Com o piso radiante, a temperatura de uma sala pode ser mais confortável visto o fluxo do ar resultante da transferência de calor ser por convecção natural, em que a sua velocidade é menor que 0,1 m/s. Apresenta ainda uma distribuição de temperatura mais homogénea do que nos restantes sistemas de aquecimento. Mesmo em dias frios, quando a temperatura desce subitamente este sistema de aquecimento é o menos afectado devido ao facto do calor ser acumulado no chão que proporciona alguma inércia térmica (Bozkır e Canbazoglu, 2004).

Materiais de armazenamento térmico, tais como concreto ou “gypcrete” (gesso, mistura de concreto) são frequentemente utilizados para sistemas de água quente ou painéis de aquecimento eléctrico. Segundo Athienitis e Chen (2000), a grande capacidade térmica dessa camada contribui para a uniformização da temperatura sobre toda a superfície do piso.

Para os autores Sattari e Farhanieh (2006) em vez do aquecimento do ar e da sua difusão por toda a casa, o calor do piso radiante aquece todos os objectos com que se encontra em contacto e também os ocupantes da habitação. Assim, menos energia é necessária para a transferência de calor directamente aos ocupantes, ao invés de encher a sala inteira com ar aquecido.

Como já referido, o conforto térmico é um factor que melhora em muito a qualidade de vida, daí a importância do estudo de sistemas que permitam obter melhores resultados e assim contribuir para um melhor bem-estar humano.

1.2 O problema em estudo e a sua relevância

Cada vez mais o homem procura e dá mais importância a uma melhor qualidade de vida e o conforto é um factor crucial na qualidade de vida. A procura de melhores soluções é uma constante. No presente trabalho pretende-se contribuir para essa procura, analisando qual a melhor solução e os factores que a proporcionam.

O presente trabalho trata do estudo do desempenho térmico de um piso radiante hidráulico com diferentes tipos de acabamentos. Construiu-se um provete de $(88,0 \times 87,9) \text{ cm}^2$ para simular um sistema de piso radiante hidráulico e fez-se variar o revestimento superficial. Estudaram-se quatro tipos de revestimento superficial, nomeadamente piso flutuante sintético de espessura 7 mm assente sobre um feltro em polietileno com 1 mm de espessura; piso flutuante sintético de espessura 7 mm assente sobre um feltro polietileno com 3 mm de espessura; piso flutuante de madeira de espessura 14 mm assente sobre um feltro em polietileno com 3 mm de espessura; piso cerâmico assente em cimento cola de 7 mm de espessura. Além das variações do piso também se realizou o estudo do provete sem a aplicação de revestimento da superfície.

Os ensaios realizados permitiram comparar o tempo de estabilização de cada caso em estudo, analisar a temperatura máxima atingida, a oscilação entre a temperatura inicial e a máxima e concluir sobre a temperatura do banho térmico que apresenta melhores resultados. Pretendeu-se assim comparar e encontrar uma relação entre os diferentes casos em estudo.

1.3 Revisão Bibliográfica

Este tema tem sido desenvolvido ao longo do tempo. Neste subcapítulo apresenta-se uma breve recolha bibliográfica para permitir o enquadramento do presente estudo em investigações anteriores.

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. desenvolveram um modelo matemático bidimensional para simular um sistema de um piso radiante numa cave de uma casa, 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 (1998) 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 (Athienitis e Chen, 2000) 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 (1997) 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 sofrer alterações, logo a temperatura do piso não é uniforme. A simulação de Athienitis e Chen (2000) 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” com o revestimento superficial de madeira.

Segundo Athienitis e Chen (2000), 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 parecidas. 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 (2004) 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 (2005) 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 (2006) 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 (2006), 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 (2006) 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: desumificação, ventilação e armazenamento térmico.

Mingqing et. al. (2007) desenvolveu 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 (2008) desenvolveram um programa para prever a transferência de calor por convecção para um piso radiante.

Ryu et. al. (2008) 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 os 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 (2008) onde foi analisado, através de um modelo computacional, o calor transferido para o ar ambiente e para as paredes de uma sala.

1.4 Objectivos e contribuição da tese

O objectivo deste trabalho consiste no estudo do desempenho térmico de um piso radiante com diferentes tipos de acabamento. Vão comparar-se quatro tipos de revestimento superficial (piso flutuante sintético assente num feltro em polietileno com duas variações espessura (1 e 3 mm), piso flutuante de madeira com feltro em polietileno de espessura 3 mm e piso cerâmico assente em cimento-cola).

Com este trabalho pretende-se comparar vários tipos de acabamentos de forma a encontrar as melhores soluções e relacionar os diferentes factores que influenciam o desempenho térmico.

1.5 Visão geral da organização da tese

A dissertação é constituída por cinco capítulos. O capítulo 1 apresenta o tema em estudo, o seu enquadramento e desenvolvimento em trabalhos anteriores. Refere ainda a importância deste estudo, os objectivos propostos e contributos que poderá vir a trazer.

O capítulo 2 compreende uma revisão bibliográfica, refere estudos realizados. Neste capítulo referem-se vários tipos de pisos radiantes, dando-se maior importância ao piso radiante hidráulico. As vantagens e desvantagens, limitações e implicações construtivas são abordadas neste capítulo, tais como os diferentes tipos de acabamento e as suas implicações.

No capítulo 3 apresenta-se uma descrição do trabalho experimental realizado. Inicia-se com a descrição do material utilizado e a construção do provete, seguido da aplicação dos diferentes pisos (piso flutuante sintético de 7mm e de madeira de 14mm e piso cerâmico) e diferentes espessuras de isolamento (feltro de polietileno de 1 e 3 mm) no caso de piso flutuante sintético. Por fim descreve-se a metodologia dos ensaios realizados.

O capítulo 4 trata os resultados experimentais, de forma a comparar o desempenho dos diferentes pisos e diferentes espessuras de isolamento no caso do piso flutuante. Após a comparação dos resultados realiza-se ainda a discussão destes.

No capítulo 5 expõem-se as conclusões retiradas neste estudo, recordam-se os objectivos fazendo-se uma reflexão do trabalho e apresentam-se sugestões para trabalhos futuros.

2. Piso Radiante

Todos os anos são construídas ou remodeladas centenas de habitações e grande parte necessita da instalação de um sistema que proporcione conforto térmico (Watson e Chpman, 2002).

Os painéis de aquecimento radiante são usados com o intuito de resolver este problema, seja em espaços comerciais, residenciais ou industriais (Watson e Chpman, 2002)

Cada tipo de painel é aplicado segundo o fim a que se destina e o local onde vai ser aplicado. Tubos hidráulicos, cabos eléctricos ou tapetes são usados para produzir calor a partir do piso onde é instalado (Watson e Chpman, 2002).

Para Watson e Chpman (2002) o aquecimento radiante é determinado pela quantidade de energia calorífica resultante e não pela quantidade de energia consumida. Os painéis radiantes hidráulicos podem receber o fluido a partir de praticamente qualquer fonte projectada para o aquecimento de água, como bombas de calor, caldeiras, combinados de aquecimento por fontes de energia renovável. Os painéis radiantes têm boas prestações de conforto térmico e conservação da energia térmica dos edifícios.

Os proprietários das habitações acabam por optar por um sistema de aquecimento tradicional, mas infelizmente na maioria dos casos, devido a diversos factores, o conforto obtido não corresponde ao esperado.

2.1 Paineis radiantes

Um painel de aquecimento radiante é normalmente uma superfície plana que se define como uma superfície a partir da qual a transferência de energia é no mínimo 50% na forma de radiação. A restante energia na superfície do painel é transferida por convecção (Kreith e Bohn, 2003).

Segundo Kreith e Bohn (2003) estão incluídos nos painéis radiantes os painéis embutidos na parede ou visíveis que podem abranger uma grande ou pequena superfície de qualquer parede, piso ou teto. Os painéis são unidades montadas na superfície ou incorporadas, que podem ter tubulações de água quente, cabos eléctricos, fios e até tapetes.

Para estes autores (Kreith e Bohn, 2003), segundo as leis físicas, a emissão de radiação de uma superfície é independente da orientação da superfície, mas, no entanto, a transferência de calor por convecção tem muita importância quanto à orientação do painel, levando a que a orientação voltada para baixo tenha diferenças significativas em relação a um painel

voltado para cima. Este efeito é visível pela análise do número de Nusselt (Nu) obtendo diferentes coeficientes conectivos (Kreith e Bohn, 2003).

Assim, a orientação aliada a uma melhor transferência de calor por convecção leva a um melhorado conforto térmico. A orientação do sistema é um factor importante para atingir o nível desejado de conforto térmico dos ocupantes, que pode ser determinada por uma combinação de aquecimento convectivo e radiante (Kreith e Bohn, 2003).

A transferência de calor pode ser definida como a transmissão de energia de uma região a outra, resultante de uma diferença de temperatura entre elas (Kreith e Bohn, 2003).

Existem três modos de transmissão de calor distintos: condução, radiação e convecção (Kreith e Bohn, 2003).

2.1.1 Condução

Quando existe um gradiente de temperatura num meio, que pode ser um material sólido, líquido ou gasoso, é usado o termo condução para referir a transferência de calor que ocorre através do material. O calor fluirá da região com temperatura mais alta para a de temperatura mais baixa (Kreith e Bohn, 2003).

A taxa de calor transferido por condução (q_k) é proporcional ao gradiente de temperatura dT/dx multiplicado pela área (A) através da qual o calor é transferido. Nesta relação dT corresponde à temperatura local e x é a distância na direcção do fluxo de calor. A taxa real do fluxo de calor depende da condutibilidade térmica (k) do material. Para um meio homogéneo temos então,

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1) \text{ Lei de Fourier (Kreith e Bohn, 2003).}$$

A condutibilidade térmica é definida pela lei de condução de Fourier que indica a quantidade de calor que fluirá por unidade de tempo, através de uma unidade de área quando o gradiente de temperatura for unitário (Kreith e Bohn, 2003).

No sistema SI, q_k é expresso em W (watts), A em m^2 (metros quadrados), dT em $^{\circ}K$ (Kelvin), x em m (metros) e k em $W/m \cdot ^{\circ}K$ (watts por metro e grau Kelvin). Por seu lado, no sistema inglês é ainda muito utilizado pelos engenheiros a taxa de calor (q_k) expressa em BTU/h (British Thermal Unity por hora) e k em $BTU/h \cdot ft \cdot ^{\circ}F$ (British Thermal Unity por hora pés graus Fahrenheit) (Kreith e Bohn, 2003).

2.1.2 Convecção

A convecção depende de simultaneamente existir transferência de energia atribuída ao movimento molecular, ou seja, modo condutivo e transferência de energia através do movimento de parcelas do fluido, constituídas por um grande número de moléculas, que se movem por acção de uma força externa, como o exemplo da diferença de pressão provocada por uma ventoinha ou um gradiente de densidade como na convecção natural (Kreith e Bohn, 2003).

A taxa de transferência de calor por convecção entre uma superfície e um fluido, pode ser calculada através da relação:

$$q_c = h A \Delta T \quad (2.2)$$

- q_c = Taxa de transferências da calor por convecção [W] ou (BTU/h)
- A = Área de transferência de calor [m^2] ou (ft^2)
- ΔT = Diferença entre a temperatura da superfície T_s e a temperatura do fluido T_∞ em algum local especificado longe da superfície, [K] ou ($^\circ F$)
- h = Coeficiente médio de transferência de calor por convecção sobre a área, [$W/m^2 K$] ou (BTU/h ft^2 $^\circ F$)

2.1.3 Radiação térmica

Segundo Incropera e DeWitt (1998), a transferência de calor por radiação térmica não exige a presença de um meio material, ao contrário das outras formas de transferência anteriores para as quais é exigido um gradiente de temperatura em alguma forma de matéria.

Para o caso de existir um gradiente entre a temperatura de um sólido e a sua vizinhança, mas as redondezas do sólido serem constituídas por vácuo, isto implica que a transmissão de calor sobre a forma de convecção ou condução não possa existir por falta de matéria. No entanto, verifica-se que a temperatura do sólido e da vizinhança tendem a equilibrar-se por acção da emissão de radiação térmica e consequente absorção até que a temperatura da superfície (T_{sup}) seja igual à temperatura da vizinhança (T_{viz}) (Incropera e DeWitt, 1998).

A radiação é emitida a qualquer momento por todas as formas de matéria da sua superfície exposta (Incropera e DeWitt, 1998).

Em teoria, é defendido que a radiação é a propagação de partículas conhecidas como fótons ou quanta. Em alternativa, defende-se que a radiação é a propagação de ondas electromagnéticas. Em ambos atribui-se à radiação as propriedades de uma onda: o comprimento de onda (λ) e a frequência (ν) (Incropera e DeWitt, 1998).

O espectro electromagnético está representado na figura 2.1 onde é referenciada a fracção correspondente à radiação térmica que inclui uma pequena fracção dos raios UV e todo o espectro visível e infravermelho (é aproximadamente $0,1\mu\text{m} \geq \lambda \geq 100\mu\text{m}$).

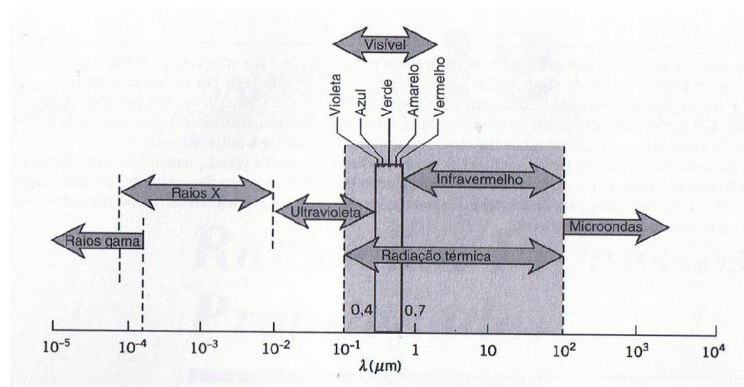


Figura 2.1 Espectro da radiação electromagnética (Incropera e DeWitt, 1998).

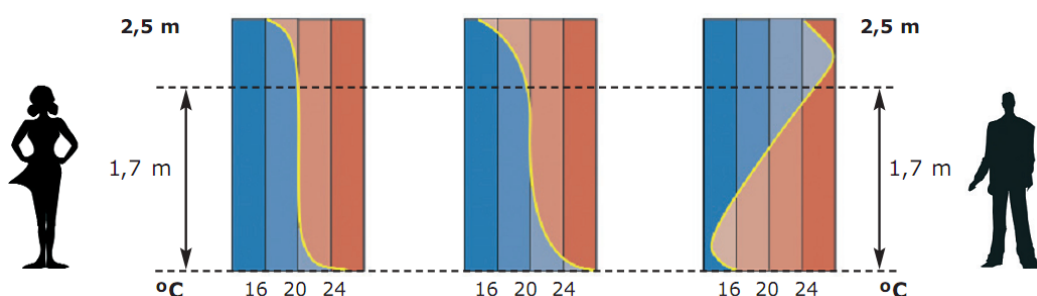
2.2 O que é o piso radiante

O piso radiante funciona de forma semelhante a um radiador que transfere o calor para o pavimento e depois para as pessoas e objectos que se encontram no espaço aquecido.

Segundo Risueño (2007), o calor sobe por convecção natural e à medida que o ar ascende a temperatura vai diminuindo, aquecendo uma altura equivalente à altura máxima dos utilizadores. O aquecimento proporciona condições de conforto para uma altura de 1,8 a 2 metros.

Num espaço de grandes dimensões os sistemas de aquecimento por radiadores são praticamente impossíveis de colocar próximos de todos os utilizadores por falta de espaço físico. Por sua vez, os sistemas de ar quente dependem do volume total da sala e a instalação tende a ficar complexa para chegar a todos os. O ar quente ventilado é uma boa opção mas a velocidade do ar pode tornar-se incomodativa (Risueño, 2007).

A figura 2.2 ilustra a comparação entre a curva ideal de distribuição da temperatura no compartimento e aquela obtida com diferentes sistemas de climatização (aquecimento).



Aquecimento por piso radiante	Aquecimento ideal	Aquecimento por radiadores
Existe uma proximidade na distribuição de calor entre o piso radiante e a solução ideal	Distribuição de calor ideal com a temperatura mais baixa na parte superior. Uma maior sensação de bem-estar, maior conforto térmico.	A temperatura é mais alta na parte superior e mais baixa na parte inferior, um sistema contrário ao sistema de conforto ideal

Figura 2.2 Gradiente térmico proporcionado pelo piso radiante (Standard hidráulica S.A.U., 2010).

2.2.1 Estrutura base de um piso radiante (esquema)

Para Watson e Chpman (2002) o piso radiante tem como objectivo otimizar a transferência de calor, diminuindo as perdas laterais e as perdas nas “costas” do sistema, para aumentar a quantidade de calor na parte frontal direccionada para o local a transmitir energia térmica.

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 2.3 mostra os factores de resistência térmica, representada por R (Watson e Chpman, 2002).

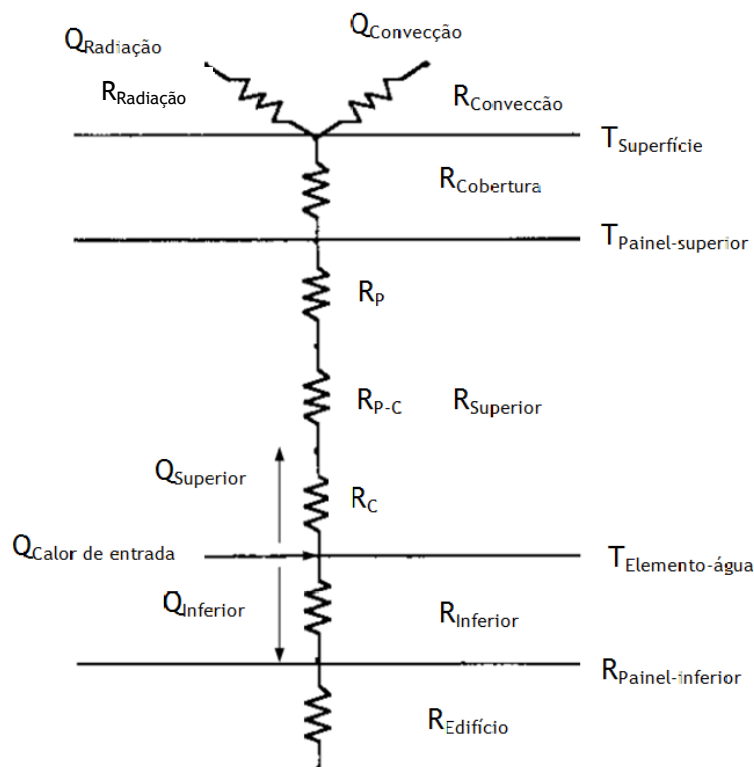


Figura 2. 3 Esquema da resistência térmica para um sistema de piso radiante (Watson e Chpman, 2002).

Na figura 2.3, a simbologia apresentada assume o seguinte significado (Watson e Chpman, 2002):

- $R_{superior}$ - resistência térmica total entre o elemento de aquecimento e a superfície do piso ($R_{superior} = R_c + R_{p-c} + R_p$) 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;
- $R_{cobertura}$ - 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.
- $R_{edificio}$ - resistência térmica total do elemento de construção (teto, piso, etc) parte inferior do painel.
- $R_{radiação}$ - resistência térmica de transferência de calor da radiação.
- $R_{convecção}$ - a resistência térmica de convecção.

Para Laouadi (2004) os sistemas de piso radiante para aquecimento ou para arrefecimento consistem em tubos ou elementos de resistência de aquecimento embutidos no betão ou argamassa, cobertos por uma superfície que pode ser composta de vários materiais, tais como cerâmica ou madeira (figura 2.4).

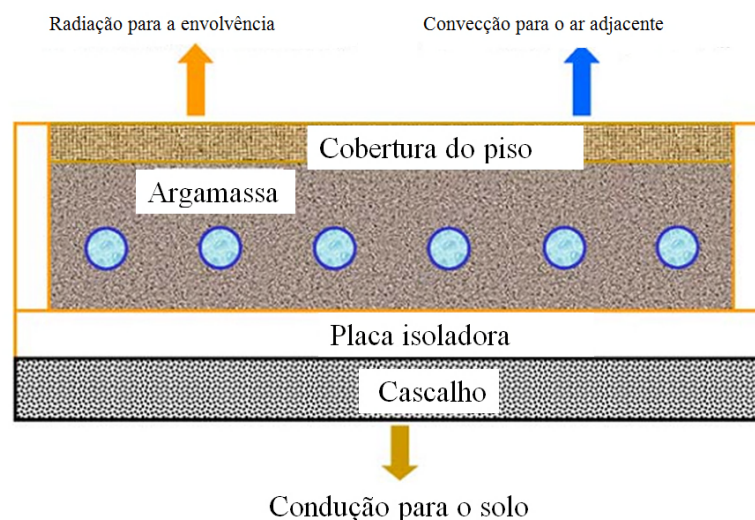


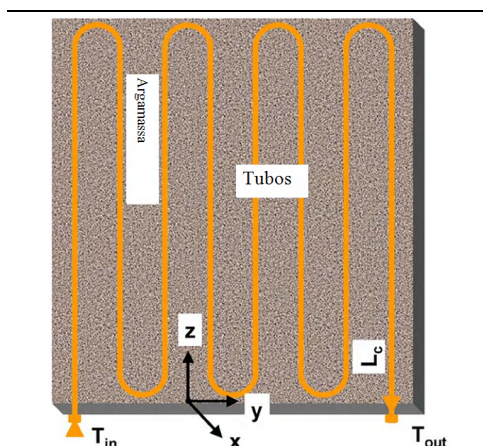
Figura 2.4 Composição do piso radiante (Laouadi, 2004)

A incorporação do sistema tubular dentro da argamassa tem diversos padrões que podem depender da estrutura ou do modo de transferência de calor adotado.

Segundo Laouadi (2004) os padrões mais utilizados consistem na disposição dos tubos em serpentina (figuras 2.5 e 2.6), em espiral (figura 2.8) ou mesmo um combinado dos dois anteriores, de forma a adaptar-se ao lugar onde é disposto (figura 2.10).

No padrão de serpentina, a transferência de calor é essencialmente transversal (perpendicular ao plano da tubulação), enquanto no padrão espiral a transferência de calor é radial (Laouadi, 2004).

Um sistema típico radiante pode igualmente ser constituído de vários circuitos que servem diferentes pisos ou diferentes espaços de superfície. Este tipo de piso é constituído, do ponto de vista construtivo, por painéis isolantes onde é sobreposta a tubagem, envolvida por argamassa e seguida de diferentes tipos de revestimento superficial. É necessário também utilizar uma película para reter a humidade ou vapor (Laouadi, 2004).



L_c - comprimento característico do tubo,
 T_{out} e T_{in} é a temperatura de saída e de entrada, respectivamente

Figura 2.5 Disposição dos tubos em serpentina (Laouadi, 2004).



Figura 2.6 Piso radiante eléctrico com o cabo de aquecimento em serpentina (DEVI, 2010).

A disposição em serpentina, como mostra a figura 2.5, consiste em repartir a tubagem em linhas paralelas. O fluido quente entra numa ponta e sai no lado oposto sem que o fluido de saída se encontre e troque calor com o fluido de entrada. O inconveniente é que o calor não se reparte uniformemente. Este tipo de disposição é o sistema adoptado também para o sistema eléctrico, pois ao contrário do hidráulico que tem variações de temperatura da água, o sistema eléctrico que fornece ao longo do ramal sempre a mesma quantidade de calor. A aplicação do sistema eléctrico é também facilitada por este tipo de disposição do cabo de aquecimento. O piso eléctrico está preparado para ser aplicado em rolos, como se ilustra na figura 2.6, já com o cabo de aquecimento embutido na esteira, já que é indiferente o local de entrada e saída da energia eléctrica (figura 2.7).

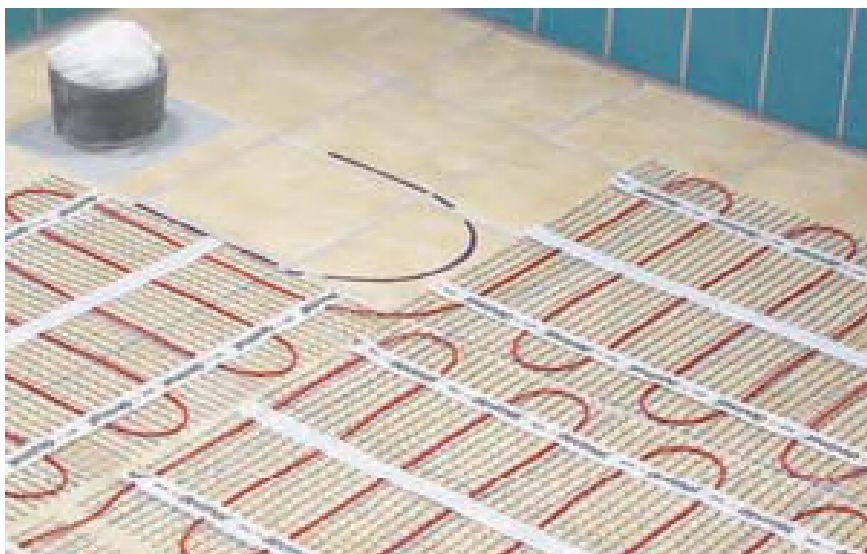


Figura 2.7 Aplicação de um piso radiante eléctrico (DEVI, 2010).

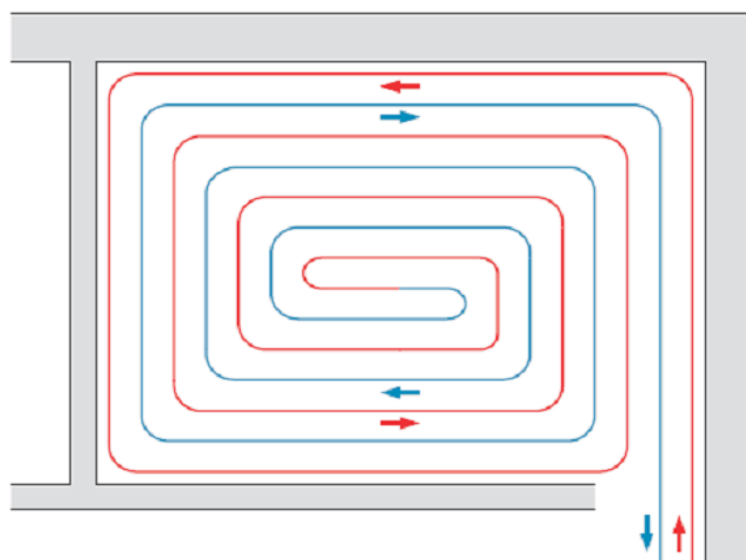


Figura 2.8 Tubos em espiral (Laouadi, 2004).

O sistema espiral (figura 2.8) consiste em realizar uma espiral com a tubagem. Se começar a espiral pelo exterior até ao interior, chega a metade da distância de tubo, e depois a aplicação é feita no sentido contrário, enrolando do interior até ao exterior, mantendo uma distância constante entre tubos. É desta forma que o tubo de entrada de água quente está junto ao tubo da saída do tubo de água fria, que permite uma distribuição mais uniforme.

Outro dos principais sistemas adoptados é o sistema em serpentina dupla, que consiste em distribuir o tubo em linhas paralelas. A figura 2.9 exemplifica este modelo de funcionamento, que é parecido com a distribuição em espiral. O calor é repartido uniformemente, mas os raios de curvatura são pequenos.

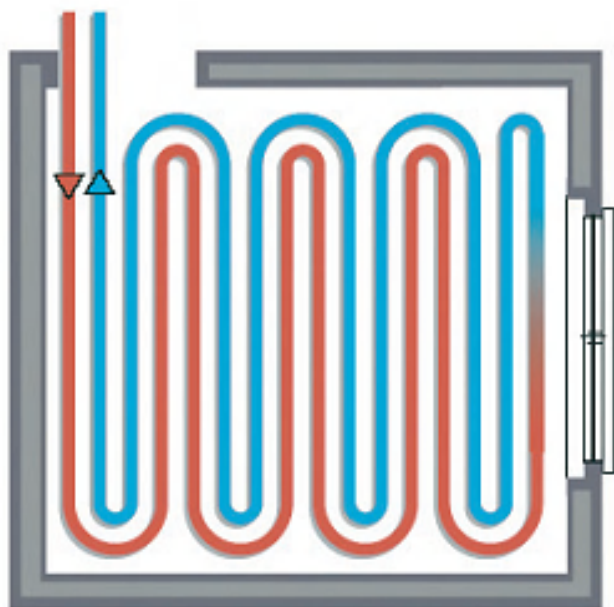


Figura 2.9 Configuração em dupla serpentina (Standard hidráulica S.A.U., 2010)

O circuito apresentado na figura 2.10 corresponde à junção do melhor dos sistemas em espiral e em serpentina. O uso deste tipo de disposição implica já um prévio conhecimento de que existe um lugar onde é especificamente necessário transferir mais calor por se tratar de uma zona fria, como é o caso de um vidro, contrabalançando as perdas de calor com um aumento da temperatura num local específico. Ou seja, a água quente tem entrada directamente para a zona fria do compartimento, transportando todo o seu poder em calor inicial por uma serpentina e só depois passa por um sistema em espiral onde se obtêm uma temperatura mais uniforme.

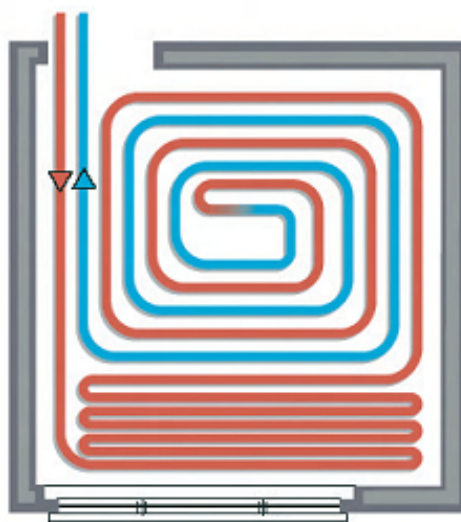


Figura 2.10 Circuito para zonas frias (Standard hidráulica S.A.U., 2010).

2.2.2 Vantagens e inconvenientes do piso radiante

A aplicação de um piso radiante traz diversas vantagens e inconvenientes, dependendo da localização a que se destina. A sua utilização deve ser precedida de uma rigorosa avaliação do impacto nos recursos existentes no local de aplicação.

2.2.2.1 Vantagens

Segundo Risueño (2007), as vantagens proporcionadas pelo piso radiante dependem do modo como é destinado o aquecimento, para onde e para quem é destinado, o modo, onde e como vai ser usado.

O piso radiante proporciona vantagens diferentes em relação ao edifício em que vai ser usado. A sua utilização pode ser destinada para vivendas, colégios, museus, campos de futebol, centros de estágios, escritórios, pavilhões amplos com grande altura do teto, etc. (Risueño, 2007).

Os grandes espaços, com grande altura podem ser aeroportos, estações de metro ou de comboios, centros comerciais, etc. Nestes espaços a utilização do piso radiante pode ter um campo de aplicações mais abrangente que qualquer outro tipo de sistema, o que pode ser explicado simplesmente por este repartir o calor de uma forma mais uniforme. O ar quente tem a tendência de subir por convecção natural e o ar frio de descer (figura 2.11) (Risueño, 2007).

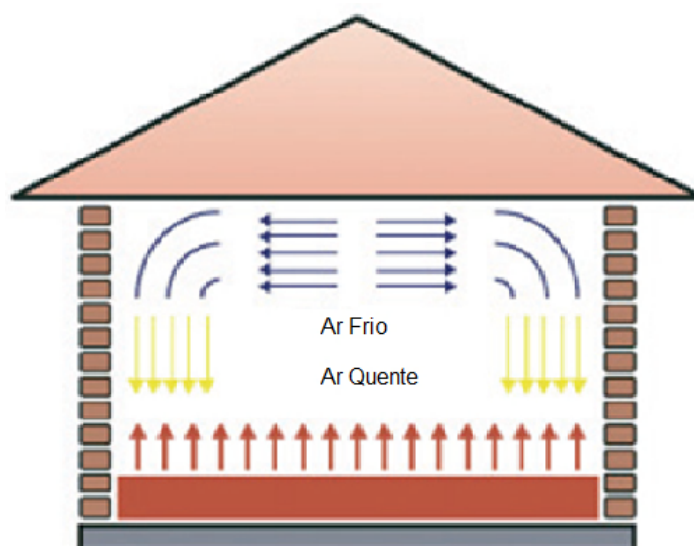


Figura 2.11 Aquecimento do ar ambiente numa sala com piso radiante (Standard hidráulica S.A.U., 2010)

Uma das vantagens do piso radiante é a possibilidade de aquecer grandes salas. Nos anos 90, em Barcelona, um salão do palácio nacional de Montjuic com cerca de 2000 metros quadrados e com uma altura de 32 metros passou de uma sala fria e com pouco uso no inverno para um salão de grandes potencialidades de utilização e isto só foi possível depois da instalação de um sistema de aquecimento por piso radiante hidráulico (Risueño, 2007).

Uma das propriedades do piso radiante é o facto de aumentar a temperatura superficial do piso para temperaturas agradáveis ao toque. Este facto pode resolver alguns problemas e potenciar outros campos de aplicação para além das habitações. Veja-se por exemplo o caso da indústria pecuária. No caso particular dos leitões em que a sua temperatura deve ser mantida a 32°C enquanto a temperatura da mãe destes não deve exceder os 25°C, a instalação do piso radiante pode ser feita no local de dormida (Risueño, 2007).

Outra aplicação no norte da Europa é a utilização deste sistema no campo de jogo por baixo do relvado, com o objectivo reduzir a possibilidade de congelar o campo de jogo (Risueño, 2007).

Vantagens do sistema de piso radiante (Watson e Chpman, 2002 e Piso Radiante, 2010):

- Melhor nível de conforto, porque a carga radiante satisfaz directamente as necessidades com o movimento do ar em níveis normais de ventilação;
- Economia de energia devido a reduzir as perdas de transporte de energia para o local de necessidade e menor perda de calor, devido às temperaturas de bolbo seco do ar não serem superiores ao nível necessário para o conforto térmico dos ocupantes;
- Baixa necessidade de manutenção nos painéis radiantes;
- Não necessita de realizar filtragem do ar como nos sistemas de ar forçado;
- O espaço utilizado pelo equipamento faz parte da estrutura, ficando invisível no piso ou paredes;
- Não tem equipamentos mecânicos no espaço útil;
- A instalação do equipamento não é restringida pelo espaço ocupado, pois pode ser moldado e adaptado a cada situação;
- Possibilidade de aquecimento e arrefecimento hidráulico independente, com o uso de um sistema de quatro passagens, o aquecimento é independente do arrefecimento e não necessita de grandes alterações para passar de aquecimento para arrefecimento;
- Flexibilidade de particionar o sistema, obtendo diferentes temperaturas entre divisões;
- O ruído é mínimo em comparação a sistemas similares de ventilação mecânica;
- Redução do pico de carga devido ao armazenamento da energia de massa térmica nas estrutura e objectos circundantes (mobiliário, paredes, etc.).

- Proporciona um ambiente confortável, dado que não existe variações de temperatura dentro da mesma habitação ou estrutura onde existe este sistema;
- Ausência de riscos de queimaduras e ferimentos para crianças e idosos, pois retira a necessidade de radiadores e grelhas;
- Pode usar qualquer tipo de pavimentação a revestir piso radiante, existe uma grande versatilidade quanto a isso;
- Pode-se conjugar o piso radiante com energias alternativas, como por exemplo os sistemas de painéis solares térmicos ou foto voltaicos;
- Reduz drasticamente as perdas de calor traduzindo-se numa economia de energia;

2.2.2.2 Inconvenientes

O sistema de piso radiante tem também algumas desvantagens que convém ter em conta na altura da escolha do sistema de aquecimento ou arrefecimento (Risueño, 2007).

Dado que a instalação é feita de forma permanente no piso da habitação, este é de difícil remoção ou de difícil acesso à tubagem, dado que esta tem de ser desenvolvida para que não seja necessário o seu acesso para a manutenção. Qualquer trabalho ou aplicação na superfície do piso deve ter sempre em conta que o piso está todo ele com a ramificação da tubagem (Risueño, 2007).

Outro inconveniente é o tempo de resposta para o aquecimento ou para o arrefecimento em comparação com outros sistemas em que a resposta é mais rápida. Esta desvantagem tem especial importância para habitações onde a estadia é de um ou dois dias como no caso de casas de férias (Risueño, 2007).

A escolha do revestimento do é limitada pelo tempo de resposta que é pretendido. No caso de materiais de origem mineral com menor resistência térmica, como a cerâmica ou mármore, a resposta é mais rápida do que no caso de revestimentos provenientes de materiais com menor resistência térmica como a madeira ou tecido (Risueño, 2007).

A temperatura da superfície pode não ser uniforme devido a factores de projecto, de espaçamento de tubulação, insuficiente capacidade de aquecimento ou tão simples o efeito da radiação solar que em certos momentos pode aumentar a temperatura pontualmente.

2.2.3 Calor necessário

Para Risueño (2007) este sistema promove uma repartição do calor por toda a superfície do piso com uma quantidade agradável e confortável. Pelo facto de não existir grandes perdas

de calor por elevação, pois o calor é directamente direccionado para onde ele é mais necessário, ou seja, para os ocupantes, a produção de calor está em funcionamento menos tempo para produzir o mesmo tipo de conforto que os restantes métodos de aquecimento.

Assim, as maiores vantagens são o conforto e o consumo, já que é produzido menos calor para conseguir obter o mesmo ou melhor conforto térmico (Risueño, 2007).

Os novos edifícios devem considerar o piso radiante na sua concepção em termos de conforto, consumo e aquecimento, pois só com uma relação de vantagens e desvantagens da sua aplicação, em relação com outras, é que se terá uma boa e a melhor relação conforto - economia (Risueño, 2007).

O sistema de piso radiante pode utilizar diversas fontes de energia, entre elas, a energia geotérmica. Nestes sistemas, de verão pode-se arrefecer o ar e de inverno produzir aquecimento. A energia geotérmica trás fortes vantagens na aplicação do piso radiante. O subsolo mantém a temperatura no verão abaixo da temperatura ambiente e de inverno a temperatura no subsolo é superior à temperatura no ambiente. Com a utilização de um sistema como é ilustrado na figura 2.12 pode-se aproveitar esta fonte renovável.



Figura 2.12 Figura esquemática da aplicação de um piso radiante (Rocatherm, 2010)

2.3 Diferentes tipos de piso radiante

O piso radiante tem a função de transferir a energia térmica radiante e convectiva para o ambiente circundante, para que este seja considerado confortável pelos utilizadores. Este sistema pode produzir calor ou frio dependendo das necessidades dos ocupantes, bastando para isso que o sistema esteja configurado para esse efeito.

2.3.1 Piso radiante para arrefecimento

Laouadi (2004) desenvolveu *software* bidimensional de simulação do comportamento de um piso radiante para aquecimento e arrefecimento, este foi integrado num *software* de simulação energética unidimensional. O novo *software* prevê a temperatura de trabalho da tubagem e dos materiais envolventes, essenciais para projectar os equipamentos de suporte ao piso radiante (chiller ou caldeira). Além disto, prevê as temperaturas máximas e mínimas para um piso ou um teto radiante para controlar o conforto térmico.

Do mesmo modo que um piso radiante pode ser utilizado para arrefecer o ar ambiente, Miriel et. al. (2002) através do programa TRNSYS, estudaram a possibilidade de usar um painel hidráulico no teto para arrefecimento e utilizá-lo na produção de calor. Com o mesmo sistema é possível ter calor no inverno e frio no verão. Este sistema confere uma melhoria no conforto térmico graças a uma transferência de calor por radiação e a uma velocidade do ar reduzida, o que para a saúde dos ocupantes faz com que o sistema não seja cúmplice da proliferação dos vírus no ar ambiente. A temperatura da superfície do painel no tecto deve ser no mínimo de 17 °C, para evitar o risco de condensação. O sistema em estudo apresentou uma óptima condutibilidade térmica e o teto radiante foi de acção rápida. Este tipo de painéis pode ser usado para aquecimento e para arrefecimento de um edifício. Contudo, a potência é limitada e a sua utilização deve ser projectada para climas temperados. Este modelo de arrefecimento é adequado para escritórios e para prédios que necessitem de uma baixa carga térmica de arrefecimento. O calor transferido tem 80% de radiação e 20% de convecção natural.

2.3.2 Piso radiante para aquecimento

A marca Warmup (2010) indica que a ideia de utilizar o calor radiante para aquecimento superficial de um pavimento a uma baixa temperatura surgiu há 2000 anos no Império Romano, para uso nos seus banhos públicos e grandes residências particulares. Enquanto a tecnologia evoluiu ao longo dos anos, o conceito permaneceu inalterado, aquecer uma grande área a baixa temperatura (21 a 25°C). Esta é considerada a forma mais confortável e eficiente de aquecer o ambiente.

Segundo Scheatzle (2006) os sistemas radiantes são mais eficazes para o caso em que a transferência de calor não se encontra obstruída pelos diversos objectos, como é o caso de um sofá ou outros móveis. Os materiais de que são feitos normalmente estes objectos criam uma barreira térmica que impossibilita a transferência de calor funcionando como isolantes, particularmente para sistemas de refrigeração a sua capacidade é reduzida. O teto de uma habitação é normalmente uma parte mais desobstruída e por isto uma boa opção para a instalação. Por outro lado a instalação de painéis de aquecimento no teto não é tão eficaz

como no caso de um sistema de refrigeração devido à falta da convecção natural. A capacidade de um piso radiante de aquecimento requer menor temperatura superficial em relação ao caso de um sistema de tecto radiante de aquecimento. Este factor pode ser importante se pensarmos em climas mais frios, em que pode haver desconforto térmico devido à assimetria radiante. Do mesmo modo, o arrefecimento do piso fica desconfortável para climas quentes onde a temperatura superficial desceria abaixo do padrão de conforto (68° F/ 20°C). O piso radiante tem uma deterioração dos materiais acelerada devido às grandes flutuações de temperatura ao longo do dia ou do ano. A instalação destes sistemas tem de ser feita com a possibilidade de posteriormente o sistema ser substituído, uma vez que a construção inacessível é um risco (Scheatzle, 2006).

Da análise de dois tipos de revestimento superficial, piso em madeira e em cerâmica, Mingqing et. al. (2007) verificaram que a cerâmica proporciona uma melhor transferência de calor para o ar interior. Por seu lado, o piso de madeira tem a propriedade de ser um bom acumulador de energia térmica que se torna importante no momento em que o sistema se encontra desligado. Este tipo de material ainda tem de ter uma avaliação acerca de segurança e do consumo de energia.

Nas residências, o piso radiante ajuda o proprietário a regular a temperatura, mantendo o espaço confortável. Lavere (2009) defende a utilização deste sistema para o caso de sítios públicos como o caso de hotéis devido à sua necessidade de conforto térmico e com uma grande capacidade de capital. Há muitas áreas públicas, incluindo um restaurante com salas de jantar, uma sala grande, uma sala de estar, ginásio, salão de jogos, átrio, salas de reuniões, salão de festas, infantário, piscina, etc. As áreas de serviço que incluem uma lavandaria, cozinha, vários escritórios, armazenamento de vinhos, sala eléctrica, sala de equipamentos telefónicos e casa das máquinas. Um hotel representa um microcosmo de uma cidade, com vários serviços para atender às necessidades do hóspede. Os grandes espaços abertos são ideais porque o piso radiante aquece ao nível dos ocupantes.

Segundo Lavere (2009), a implementação de um sistema de piso radiante tem os seguintes aspectos positivos:

- O sistema tem uma poupança energética em relação aos tradicionais sistemas AVAC, devido a ser necessária menos energia eléctrica. Como não são utilizadas turbinas para transmitir o ar quente para os ocupantes, os requisitos do fluxo de ar podem ser reduzidos ao montante necessário para fins de ventilação. Menos ar para movimentar economiza energia;
- As zonas aquecidas por piso radiante normalmente tem uma configuração térmica mais baixa, gastam menos energia e os ocupantes continuam confortáveis devido à natureza do calor radiante;

- O sistema devido à sua natureza tem o efeito de não propagar alergias, poeiras ou vírus, já que não tem insuflação de ar e a velocidade deste é reduzida. Devido a este mesmo factor, também o conforto dos ocupantes vai ser melhorado sem que haja o ar a soprar nos ocupantes e sem que exista um ruído dessa insuflação;
- Como não existe material visível, a mobília do quarto ou sala pode ser livremente movimentada sem afectar o sistema de aquecimento.

Quer a escolha recaia sobre os painéis de parede, chão ou no teto, eles são aquecidos de três formas: tubos de água, elementos eléctricos ou canais de ar embutidos no painel. Destes, os canais de ar são os menos utilizados, deixando relevância para os sistemas eléctricos e hidráulico (RPA - Radiant Panel Association, 2010 e Watson e Chpman, 2002).

A escolha deve no final cair sobre os custos da energia e o tamanho do projecto (RPA - Radiant Panel Association, 2010).

2.3.3 Piso radiante a ar quente

O piso de aquecimento radiante por ar quente envolve a produção de ar quente e a sua distribuição através das condutas inseridas no piso radiante. A transferência de calor é feita através das condutas localizadas no piso de betão ou laje (figura 2.15), este pode ser para aquecimento ou arrefecimento. O sistema pode ser em circuito fechado ou pode passar por fornecer um suplemento ao ar ambiente, forçando a sua circulação pelas condutas. Sistemas como este têm sido desenvolvidos para diferentes tipos de construção utilizando o piso, o teto ou ambos (Watson e Chpman, 2002).

Bozkır e Canbazoglu (2004) verificaram que um piso radiante a ar quente tem menor eficiência de aquecimento do que piso radiante hidráulico, mas confere uma alternativa para o caso de vir a constituir um reaproveitamento de uma determinada fonte de ar quente já existente nas instalações. Este sistema tem um desempenho satisfatório para climas amenos e para casas com um bom isolamento térmico. Embora com menos capacidade de aquecimento que nos restantes sistemas de piso radiante, tem os mesmos benefícios, com maior qualidade no aquecimento e mais conforto do que o sistema de aquecimento de ar directo. Também a distribuição do calor nestes sistemas é geralmente uniforme e consistente em toda a sala, não existindo nem pontos quentes nem pontos frios. Por outro, lado a área efectiva de transferência de calor para pisos com ar quente é maior comparativamente com o piso hidráulico, pois o ar quente passa entre a rede de tubulação em forma de condutas debaixo do soalho. O material a usar deve ser preferencialmente mármore ou cerâmica devido ao facto do seu coeficiente de condução de calor ser mais elevado.

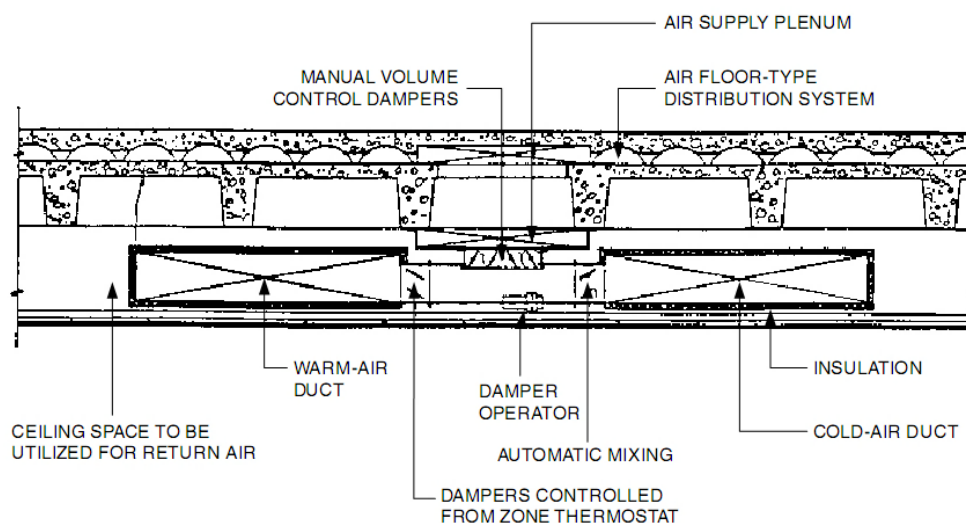


Figura 2.15 - Piso radiante a ar quente (Watson e Chpman, 2002).

O aquecimento por radiação tem sido especialmente valorizado pela utilização bem sucedida em situações muito específicas em conjunto com aquecimento convencional (Watson e Chpman, 2002).

2.3.4 Piso radiante eléctrico

O piso radiante eléctrico utiliza a electricidade para aquecer directamente as resistências eléctricas do piso, com os elementos eléctricos incorporados no chão sob o revestimento do piso (figura 2.16) e com termóstatos colocados na superfície para controlar a temperatura superficial desejada. A temperatura ambiente é também ela controlada por termóstatos nas paredes (RPA - Radiant Panel Association, 2010).

Uma das vantagens do piso radiante eléctrico é dispensar infra-estruturas como chaminés ou sala para caldeiras e armazenamento de combustível, pois facilita logo na construção ficando mais moderna e económica (Piso Radiante, 2010). Neste sistema de aquecimento, toda a superfície é convertida num imenso e eficaz painel acumulador/emissor de calor. O piso radiante eléctrico pode funcionar como acumulador de calor e ser ligado à corrente eléctrica durante a noite, tornando-se mais económico, pois o preço da tarifa nocturna é cerca de metade do preço da energia eléctrica durante o dia (Polisol, 2010).

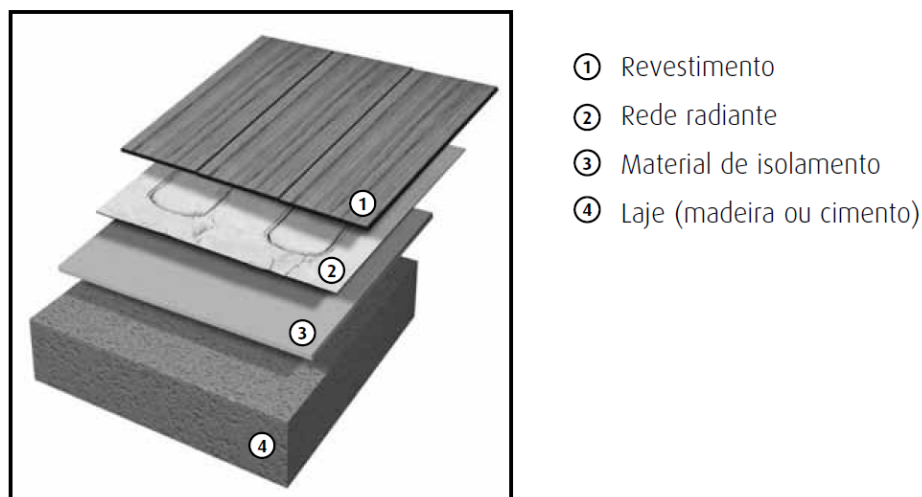


Figura 2.16 Exemplo de aplicação do piso radiante eléctrico com revestimento de madeira ou laminado da marca Warmup (2010).

2.3.5 Piso radiante hidráulico

Os sistemas radiantes hidráulicos para aquecimento realizam a transferência de calor em mais de 50% em energia radiante. A característica distintiva dos demais sistemas de aquecimento é a utilização de um fluido para o transporte desde a fonte de origem térmica até ao local de necessidade de calor (Watson e Chpman, 2002). O sistema opera silenciosamente enquanto a água move-se através do ramal de tubos.

Segundo Lavere (2009), no passado, os materiais utilizados na tubagem foram o cobre ou o polibutileno. O cobre degrada-se se for embutido na argamassa, o polibutileno absorve o oxigénio através das paredes da tubulação, que causa problemas com a corrosão e leva a vazamentos e consequente falha do sistema.

Segundo Watson e Chpman (2002) o piso radiante hidráulico tem como princípio base a utilização de condutas de fluido directamente no chão, normalmente água, como canal de transferência de calor. Os tubos de água têm vindo a ser melhorados, e com o aparecimento do polietileno reticulado ou simplesmente PEX que veio substituir o aço ou os tubos de cobre usados na argamassa. O material recentemente utilizado, segundo Lavere (2009) é polietileno reticulado (PEX) 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 (PEX e copolímero de polipropileno). O PEX 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 PEX (figura 2.17) tenha variações de diferentes marcas, existe uma

característica comum, que é a de oferecerem um desempenho fiável e de longa duração (Watson e Chpman, 2002).



Figura 2.17 Tubo de PE-X com multi-camada (Standard hidráulica S.A.U., 2010)

O tubo ilustrado na figura 2.17 é um tubo de multi-camada, com uma estrutura formada por três capas 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.

Lavere (2009) enumera três factores significativos num piso radiante, nomeadamente, o tipo de material da tubulação, o método de instalação e a interacção entre os dois. O sucesso ou fracasso de um sistema de piso radiante depende de todos os aspectos do processo de construção: a concepção, a instalação e a manutenção. A não realização de qualquer uma destas fases pode ter consequências dramáticas. Assim a experiência do técnico para a instalação e para a manutenção do equipamento é muito importante. Um técnico experiente é mais provável que tenha protocolos para proteger a tubulação de danos, tais como pregos para instalações em vigas ou tubo dobrado em instalações. O engenheiro e os instaladores podem projectar e instalar os melhores pisos radiantes do mundo, mas é o pessoal de manutenção que deve manter o sistema na condição óptima de funcionamento. Manutenção da caldeira, manutenção da bomba, inspecção visual regular, registo completo dos dados e a análise dos dados são aspectos importantes para a manutenção de um sistema de piso radiante. A atenção aos dados recolhidos e a sua análise pode evitar falhas catastróficas (Lavere, 2009).

Sempre que o piso possa transmitir humidade, é necessário colocar entre o piso e o revestimento superficial do piso uma barreira anti-vapor (figura 2.18). Este material tem a

missão de evitar a passagem de humidade para a superfície. Watson e Chpman (2002) revelam que a pressão nominal no piso para aquecimento é definida pela norma ANSI/NFS 14.



Figura 2.18 Barreira anti-vapor (Standard hidráulica S.A.U., 2010)

Para conseguir a transferência de calor eficaz para um bom sistema operacional, as escolhas possíveis de revestimento do piso são limitadas (figura 2.19). A melhor opção para revestimentos de pavimentos sobre uma laje radiante é uma superfície de baixa resistência térmica e não carpete (Lavere, 2009). O desempenho do piso radiante hidráulico é afectado pela sobreposição de qualquer tipo de material que altere a transferência de calor como é o exemplo de carpetes, móveis, paredes, etc., o que afecta a taxa de calor transferida para o espaço condicionado (Watson e Chpman, 2002).

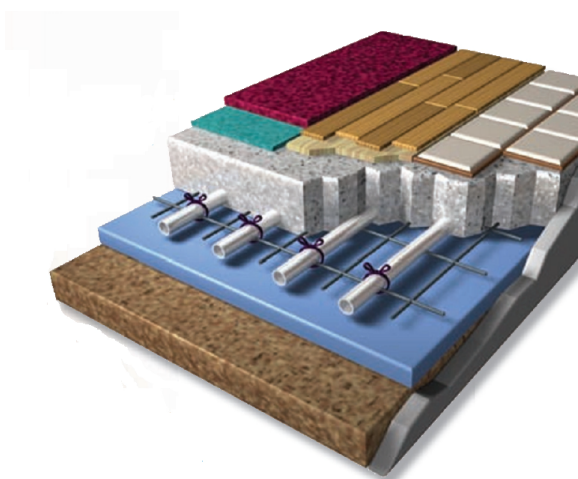


Figura 2.19 Exemplo típico de uma instalação tubular de um piso radiante hidráulico (Lavere, 2009)

O projecto como ilustra a figura 2.20 requer um estudo prévio de todos os factores e uma execução fiel das necessidades de material e instalações do isolamento envolvente (Lavere, 2009).

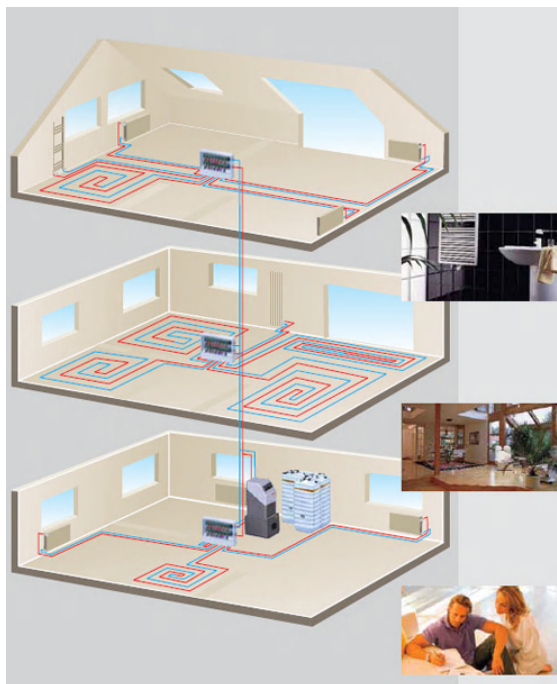


Figura 2.20 Instalação do piso radiante num edifício (Solarconnect, 2010)

O aquecimento por piso radiante hidráulico baseia-se num circuito de tubos embutidos na argamassa, com um termóstato que regula a temperatura ambiente, através da circulação de um fluido termodinâmico. O aquecimento deste pode ser feito através de uma caldeira, gás, electricidade ou energia solar (Piso Radiante, 2010).

Este sistema de aquecimento é confortável e é o que mais se achega ao aquecimento fisiologicamente ideal. Pois o piso radiante é o que se aproxima ao perfil de temperatura ideal do corpo, dado que a temperatura perto do chão é ligeiramente superior à altura da cabeça. A pessoa sente-se mais confortável quando a temperatura dos pés é ligeiramente superior à temperatura da cabeça, traduzindo-se num maior conforto e sensação de bem-estar. Este resultado adquire-se com o piso radiante com temperaturas inferior a 28°C (Piso Radiante, 2010).

Depois de instalado, o sistema tem obrigatoriamente que ter manutenção, devido à degradação do material ou melhoramentos que possam ser possíveis de ser feitos no futuro. Desta forma a instalação do piso radiante parte do princípio que a canalização fica embutida na laje. No caso de haver vazamentos, roturas, entre outros, é necessário verificar toda a instalação, que não é de fácil acesso.

2.3.6 Piso radiante eléctrico vs hidráulico

A RPA - Radiant Panel Association (2010) alega que os painéis eléctricos, com a electricidade como fonte de calor, são bastantes simples de instalar e com um custo menor do que o piso

hidráulico. Segundo a marca Warmup (2010) apresenta vantagens em relação ao seu mais próximo concorrente comercial, o piso radiante hidráulico, mas tendo em conta todos os autores antes referidos pode-se contrapor e revelar pontos fortes.

A Warmup (2010) defende que a eficiência energética do sistema eléctrico, por ter a instalação separada por cada divisão, o que possibilita controlar os locais onde se deseja que seja aquecido, leva a um menor gasto energético. Os sistemas eléctricos têm uma mais rápida resposta de aquecimento, o que diminui a necessidade de pré-aquecimento, consumindo energia eléctrica para iniciar o aquecimento durante menos tempo. O consumo é contínuo apenas durante o período de utilização. Em contrapartida os sistemas hidráulicos necessitam de um maior tempo de pré-aquecimento para atingir a temperatura desejada. Por outro lado, o piso radiante hidráulico consegue superar esta desvantagem com a utilização de sistemas de válvulas de controlo de caudal ou misturadores de água, que conseguem adequar a temperatura da água canalizada a cada necessidade e a cada divisão.

O piso radiante hidráulico necessita de acomodar a tubagem da água, que resulta na necessidade de subir os pavimentos em pelo menos 5 cm. No caso do piso eléctrico, este não necessita de mais de 3 cm, ou seja as alterações estruturais são menores nestas instalações. O custo da instalação inicial do piso eléctrico segundo a marca Warmup (2010) é muito mais económico devido à simples aplicação, reduzindo os custos iniciais. A instalação do sistema de água é mais morosa que o sistema radiante o eléctrico. No entanto a utilização de sistemas de piso radiante hidráulico torna-se mais vantajosa se acoplado a este sistema estiver um outro de fontes renováveis como é o caso de aquecimento solar, energia geotérmica, etc. O custo inicial para o piso hidráulico torna-se mais elevado mas no entanto torna-se mais vantajoso ao longo dos anos de utilização, pois como não necessita de elevadas temperaturas, pode utilizar água directamente aquecida de fontes renováveis.

Nos sistemas de aquecimento por água quente torna-se necessária uma regular limpeza de resíduos dos tubos de forma a minimizar problemas na circulação de água. Os sistemas de aquecimento radiante eléctricos não possuem partes móveis e não requerem manutenção além do desgaste natural dos sistemas de suporte, como é o caso do termóstato.

3 Protótipo Experimental

A construção deste protótipo tem como finalidade principal a análise do comportamento térmico de diferentes tipos de revestimento da superfície num piso radiante.

Pretende-se monitorizar a evolução das temperaturas superficiais para relacionar com o conforto térmico, afim de poder determinar qual o revestimento da superfície do piso a utilizar. Efectuar-se a recolha de dados ao longo de uma evolução temporal, com períodos de 15 minutos, que demonstre qual a solução mais aconselhável para aplicação e o tempo de resposta resultante na temperatura da superfície para cada diferente tipo de revestimento superficial.

3.1 Material

3.1.1. Material para construção do provete

Para a construção do provete utilizaram-se os seguintes materiais:

- MDF branco;
- Isolante XPS (poliestireno extrudido);
- Mangueira flexível sem reforço de diâmetro externo de 11 mm;
- Argamassa bastarda de cimento, cal e areia;
- Cola quente;
- Pistola de cola quente;
- Feltro de polietileno de 3 e 1 mm de espessura;
- Piso flutuante laminado AC3 com 7 mm de espessura;
- Piso flutuante de madeira com 14 mm de espessura;
- Ladrilhos cerâmicos (450 x 450) mm² com 7mm de espessura;
- Régua e esquadro;
- Marcador;
- Pregos de aço;
- Braçadeira;
- Espátula de dentes;
- Martelo de borracha;
- Cimento cola;
- Berbequim;
- Serra eléctrica;
- Fita-cola de alumínio;

- Craveira.

3.1.2. Material de leitura de dados

Para efectuar a leitura dos dados utilizou-se o seguinte material:

- Termopares tipo K e T;
- Termómetro digital;
- Cronómetro;
- Psicrómetro;
- Banho térmico.

3.2 Construção do Provete

3.2.1 Procedimentos de execução do provete

Para o provete foi necessário construir previamente uma cofragem em MDF branco¹ (espessura de 10 mm na lateral e 160 mm de espessura na base) com as dimensões (890 x 889 x 70) mm².

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

3.2.1.1 Isolante

Foi escolhido um isolante XPS (Poliestireno extrudido) com 3 cm de espessura disponível no mercado, da marca Iberfibran, com a característica de ter ranhuras que facilitam a ligação da argamassa ao XPS. As placas de isolante foram dimensionadas para serem acondicionadas dentro da cofragem.

¹ Painéis de MDF folheados a melamina branca

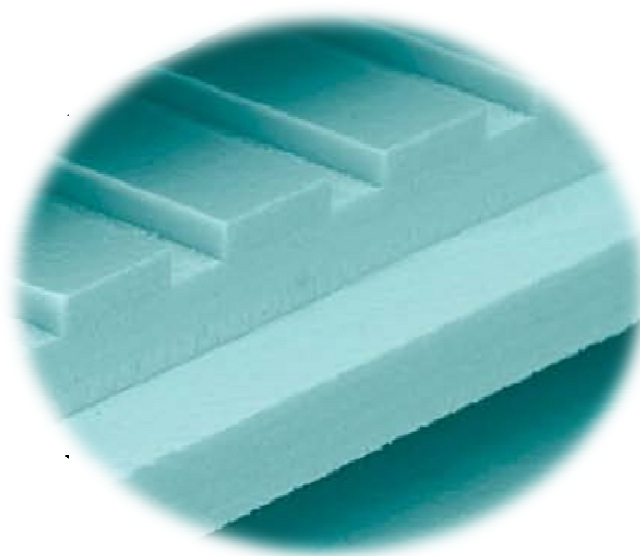


Figura 3.1 Pormenor da placa isolante XPS (Manual Técnico Iberfibran, 2009).

As características do XPS fornecido pelo fabricante encontram-se descritas na tabela 3.1. Embora não estejam descritas as características para a espessura de 3 cm contém valores de referência para espessuras mais elevadas.

Tabela 3.1 Características técnicas do isolante térmico da marca Iberfibran (XPS FibranECO) (Manual Técnico Iberfibran, 2009).

TIPO ESPESURA mm	ACABAMENTO	DIMENSÕES (mm)	Nº PLACAS/ ATADO	PELE (SIM/NÃO)	[EN12667] RESISTÊNCIA TÉRMICA (m ² ·K/W)	[EN12667] CONDUTIBILIDADE TÉRMICA (W/m·K)	[EN826] RESISTÊNCIA COMPRESSÃO (kPa)	[EN13501-1] REACÇÃO FOGO (EUROCLASSE)	[EN1604] ESTABILIDADE DIMENSIONAL	[EN13164] CÓDIGO DE DESIGNAÇÃO
WL 30	M/F 	2600 x 600	14	SIM	0,85	0,035	>200	E	<2%	XPS-EN 13164-T1-CS(10/Y)200-DS(TH)
WL 40			10		1,10					
WL 50			8		1,40					
WL 60			7		1,70					
WL 70			6		2,00					
WL 80			5		2,25					
RF 30	ES 	1250 x 600	14	SIM	0,80	0,036	>300	E	<2%	XPS-EN 13164-T1-CS(10/Y)300-DS(TH)
RF 40			10		1,10					
RF 50			8		1,35					
RF 60			7		1,65					
RF 70			6		1,90					
RF 80			5		2,10					
TE 40	ES 	1250 x 600	10	SIM	*1	0,036	>300	E	<2%	XPS-EN 13164-T1-CS(10/Y)300-DS(TH)
TE 45			9							
TE 50			8							
TE 60			7							
TE 70			6							
TE 80			5							

* Segundo a norma EN 13164, produto com a espessura não uniforme, a respectiva resistência térmica não é declarada.

3.2.1.2 Ramal de tubo e termopares

3.2.1.1 Requisitos funcionais

O tubo tem de apresentar flexibilidade suficiente para curvar sem apresentar estrangulamentos da passagem do fluido, ter uma durabilidade suficiente para o tempo de realização da experiência e ter um custo reduzido.

Os termopares têm de ser indicados para fazer leituras da temperatura superficiais e internas, garantindo a leitura da temperatura para casos de aumento ou diminuição brusca de temperatura.

Observando as tabelas dos limites para os principais tipos de termopares, como é indicado num resumo pela tabela 3.2 verifica-se que os mais indicados são do tipo K, E e T.

Tabela 3.2 limites da temperatura de operação dos quatro mais comuns tipos de termopares (Omega Engineering, Inc, 2010)

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%

3.2.1.1 Selecção dos materiais para execução do ramal da tubagem e da implantação dos termopares.

Nesta fase foi utilizado tubo multiuso - mangueira flexível Cristalflex com o comprimento de 13 metros, fixado com cola quente e pregos de aço.

Foram também aplicados três termopares do tipo K, um por cada zona, um termopar no tubo e um no centro do isolante.

3.2.1.2 Aplicação do ramal e termopares

A escolha do tipo de tubo a utilizar recaiu sobre a tubagem disponível no laboratório Cristalflex - Mangueira flexível sem reforço (tabela 3.3), com um diâmetro externo de 11mm.

Tabela 3.3 Características técnicas do tubo Cristalflex (Heliflex, 2009)

				JARDIM/MULTIUSO · GARDEN/MULTIUSO JARDIN/ALL-PURPOSE · JARDÍN/À USAGES MULTIPLES					
Grupo/Group	Código / Code Ø Int. Inside (mm)	Comp. Length (m)	Cor Color	Equivalência Equivalence (pulg./inches)	Ø Ext. Outside (mm)	Peso Weight (Kg/m)	Qt. Paleta Qty. Pallet	Metro Meter €	Unid. Unit. €
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

Foi determinado que a disposição da tubagem seria em espiral, com um bom aproveitamento do espaço, sem correr riscos de condicionar a passagem do fluido de trabalho (água). As dimensões são apresentadas nas figuras 3.5 e 3.6.

Efectuou-se o desenho da passagem do circuito da tubagem com o marcador e régua. Este desenho serviu como guia na altura de aplicação do tubo.

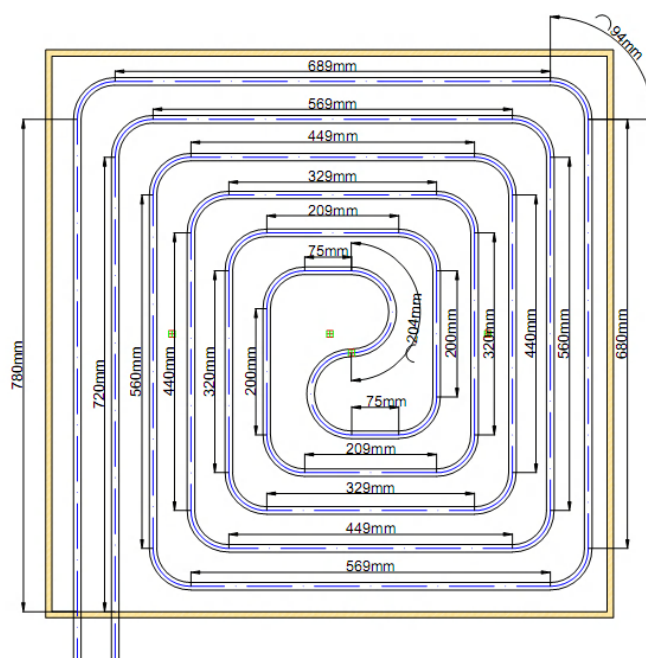


Figura 3.2 Comprimento da tubagem

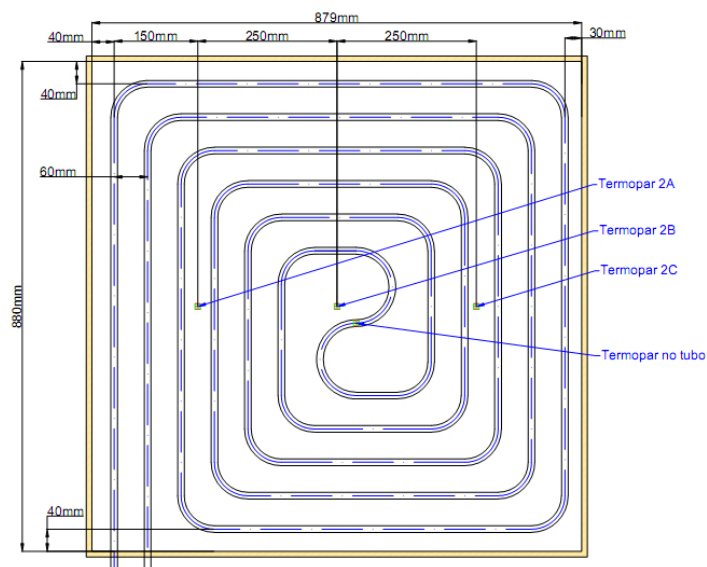


Figura 3.3 Dimensionamento e posicionamento da tubagem em relação às paredes da cofragem.

Com um berbequim furou-se a cofragem para possibilitar colocar os tubos de entrada e saída da água e também o local pelo qual os fios dos termopares fazem a ligação do exterior para o interior do provete, como é mostrado nas figuras 3.2 e 3.3.

Com a ajuda de uma pistola de cola quente, a tubagem foi fixada às placas de isolante já devidamente colocadas no interior da cofragem. As curvaturas da tubagem, dado a falta de saliências de direcção no isolante, foram fixadas e reforçadas, além de ser necessário a colocação temporária de pregos de aço para uma melhor fixação e melhor curvatura (figura 3.4). Na colocação da tubagem teve-se o especial cuidado de deixar, em média, 1m de tubo fora da cofragem, considerado suficiente para conectar ao banho térmico com margem de segurança.

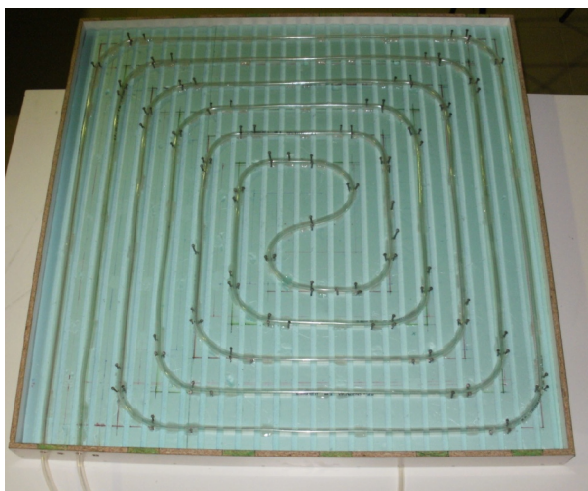


Figura 3.4 Fixação da tubagem.

Após a secagem da cola e garantida a fixação de toda a tubagem ao isolante, todos os pregos foram removidos. Foi determinada a posição dos termopares interiores e foram posicionados quatro termopares do tipo K, como se ilustrou na figura 3.3. Os termopares foram identificados por zona (zona A, zona B, zona C, distanciadas de 250 mm entre a zona B e as zonas A e C) e por secção em altura (figura 3.5). A fronteira isolante/cofragem corresponde à secção 1, a fronteira isolante/argamassa que corresponde à secção 2, a fronteira argamassa/feltro de polietileno ou argamassa/temperatura ambiente ou argamassa/cimento cola à secção 3, a fronteira feltro de polietileno/piso flutuante corresponde à secção 4 e, por fim, a fronteira revestimento superficial ambiente é a secção 5.

Nesta fase da instalação foram colocados três termopares do tipo K (2A, 2B,2C) e um termopar do tipo K no ponto de viragem do ramal da tubagem na fronteira tubo/argamassa (2 tubo) na secção 2 e o único termopar da secção 1 na zona B (1B).

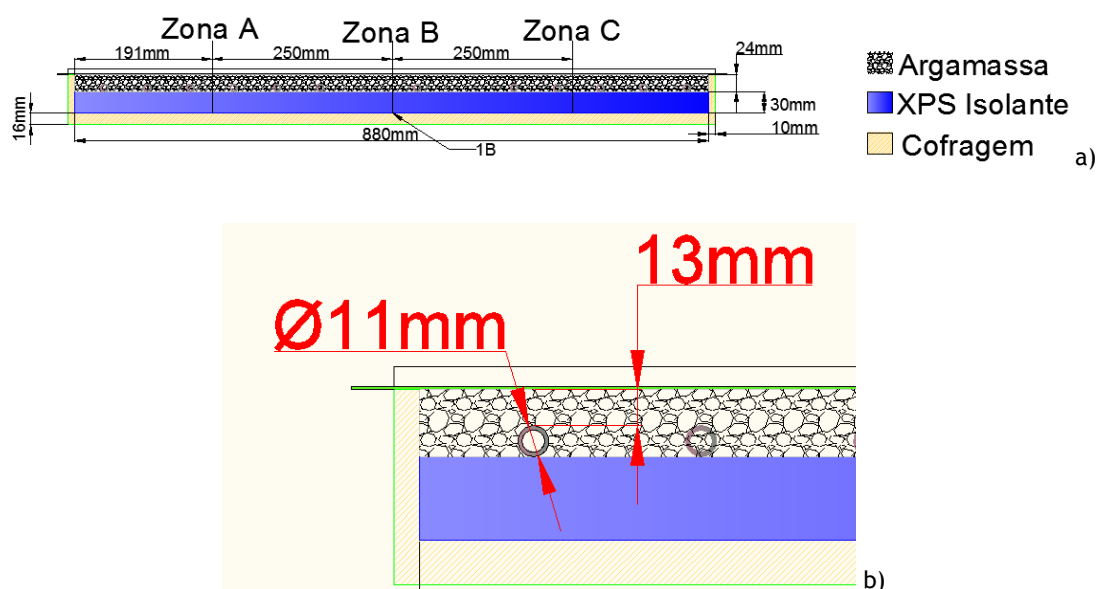


Figura 3.5 a) Esquema em corte do provete; b) Pormenor da figura evidenciando o diâmetro externo da tubagem e a distância entre o tubo e a superfície da argamassa

Estando todo este processo completo (figura 3.6), seguiu-se a aplicação da argamassa.



Figura 3.6 Provete pronto a receber a argamassa

3.2.1.3 Descrição da argamassa

3.2.1.3.1 Requisitos funcionais

A argamassa a aplicar deveria corresponder aos seguintes requisitos funcionais:

- Grande plasticidade e elevada trabalhabilidade para a regularização com régua;
- Baixa refracção plástica e de secagem e elevada resistência à compressão e flexão, uma vez que a placa é de espessura muito reduzida e tem de ser manuseada em diferentes ensaios, sem quebrar.

3.2.1.3.2 Materiais seleccionados

Para dar resposta aos requisitos funcionais definidos no item anterior, seleccionaram-se os seguintes materiais constituintes da argamassa:

- Cimento portland de calcário Cecil: CEM II/B-L32, 5N, com massa volúmica: $\delta=3040 \text{ kg/m}^3$ e baridade: $B= 1140 \text{ kg/m}^3$;
- Cal Hidráulica: NHL 5, com massa volúmica: $\delta=2500 \text{ kg/m}^3$ e baridade: $B= 600 \text{ kg/m}^3$;
- Superplastificante da SIKA ViscoCrete 3002HE, com massa volúmica: $\delta=1050 \text{ kg/m}^3$;
- Areia do Rio de grão intermédio (a areia disponível apresenta algum défice de finos), com massa volúmica: $\delta=2610 \text{ kg/m}^3$ e baridade: $B= 1380 \text{ kg/m}^3$;
- Fibras Têxteis da Fivitex, com massa volúmica: $\delta=910 \text{ kg/m}^3$. Estas fibras são adicionadas à mistura já calculada, na dosagem de 3 kg/m^3 de argamassa;
- Água potável.

3.2.1.3.3 Parâmetros de cálculo da argamassa bastarda de cimento, cal e areia

Os parâmetros adoptados para o cálculo da argamassa foram os seguintes:

- Razão W/C $\approx$ 0,35 (em massa);
- Traço (em volume aparente e para materiais secos): 1:0,5:3;
- Volume de vazios: 0,030 m³/m³ de argamassa.

3.2.1.3.4 Dosagem da argamassa para 1 m³

Do cálculo efectuado resultou a seguinte dosagem em massa (materiais secos) para produzir 1m³ de argamassa:

- Cimento CEM II/B-L32, 5N: 445,4 kg;
- Cal hidráulica NHL 5: 117,1 kg;
- ViscoCrete 3002 HE: 5,79 kg;
- Areia do rio: 1617,7 kg;
- Água: 155,9 litros;
- Fibras Fivitex: 3 kg.

Para a execução do piso radiante produziu-se, em laboratório uma amassadura de 25 litros de argamassa. As proporções utilizadas foram as seguintes:

- Cimento CEM II/B-L32, 5N: 11,14 kg;
- Cal hidráulica NHL 5: 2,93 kg;
- ViscoCrete 3002 HE: 0,145 kg;
- Areia do rio: 40,44 kg;
- Água: 3,90 litros;
- Fibras Fivitex: 0,075 kg.

3.2.1.3.5 Procedimento da preparação e aplicação da argamassa

A mistura dos componentes da argamassa (amassadura) foi feita Laboratório de Tecnologia e ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura (DECA) da UBI com o recurso a uma betoneira misturadora de eixo vertical que se ilustra na figura 3.7.



Figura 3.7 Betoneira misturadora utilizada para a produção da argamassa

Uma vez obtida uma mistura com a consistência e fluidez necessária para aplicar na cofragem, fez-se o transporte da argamassa por meio de baldes para o local de execução do pavimento.

Com a ajuda de uma colher de pedreiro e uma talocha fez-se uma aplicação cuidada para não cortar ou inviabilizar nenhum termopar aplicado. O acabamento foi efectuado com uma régua de madeira lisa e desempenada, conferindo à superfície um aspecto plano e devidamente preparado para receber as diferentes formas de revestimento superficial conforme se ilustra na figura 3.8.

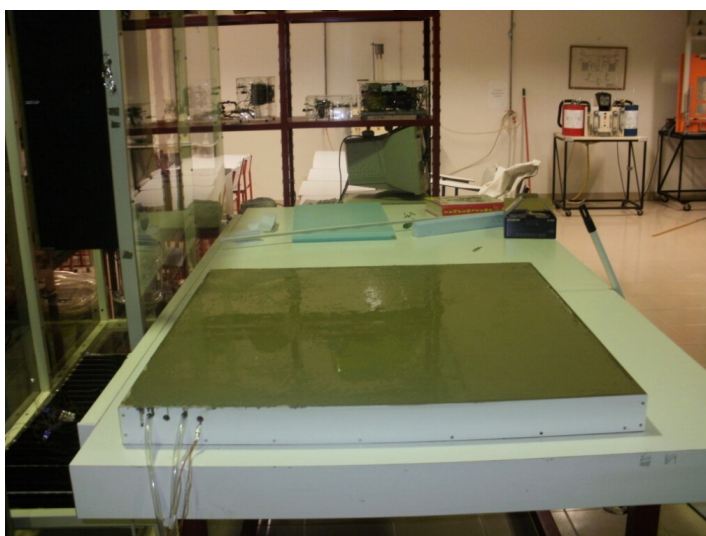


Figura 3.8 Aplicação da argamassa.

Depois de seca a argamassa foram colocados três termopares do tipo K sobre a superfície, tal com exemplifica a figura 3.12. Com o auxílio de fita-cola de alumínio é fixado um termopar por cada zona e devidamente etiquetado e referenciado com 3A, 3B, 3C.

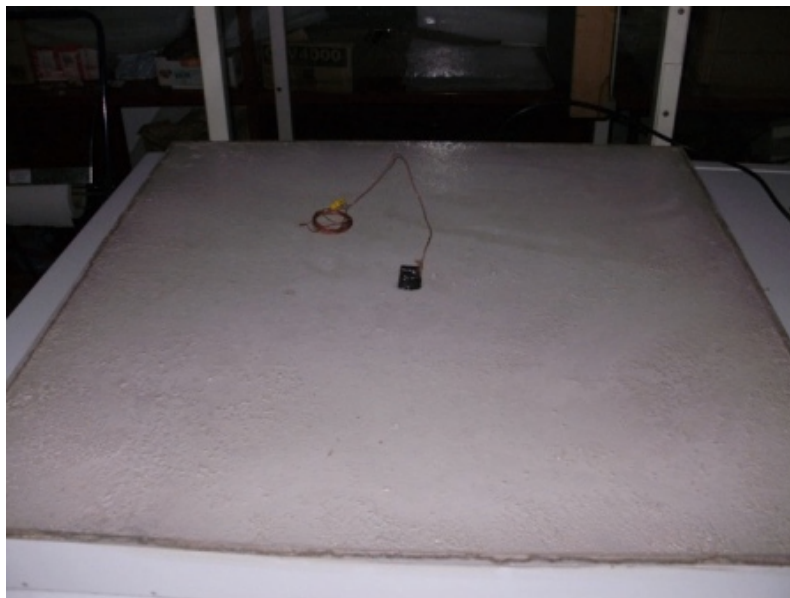


Figura 3.9 Provete com a argamassa já seca.

3.2.1.3.6 Camada de base em argamassa bastarda de cimento, cal hidráulica e areia

A camada de base que envolve a tubagem de transporte do fluido do piso radiante tem uma espessura média de 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 3 kg/m³ para controlo da 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 em 1,8 W/(m °C). Considerando que a camada acima da tubagem possui uma espessura média de 1,3 cm, a resistência térmica dessa camada é estimada em $R = 0,013 / 1,8 = 0,007 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$.

3.3 Procedimentos para conectar o provete ao banho térmico

Assim que o provete se encontrou pronto para ser utilizado, foi necessário realizar os testes de fluxo hidráulico e testar os termopares que ficaram embebidos na argamassa.

3.3.1 Procedimentos para a conexão do provete ao banho térmico

O tubo de entrada no provete foi conectado à saída de água no banho térmico enquanto o tubo de saída do provete foi conectado à entrada de água no banho térmico (figura 3.10). Ao mesmo tempo foram colocados os termopares de entrada e saída correspondentes à entrada e saída da água do provete (figura 3.11).

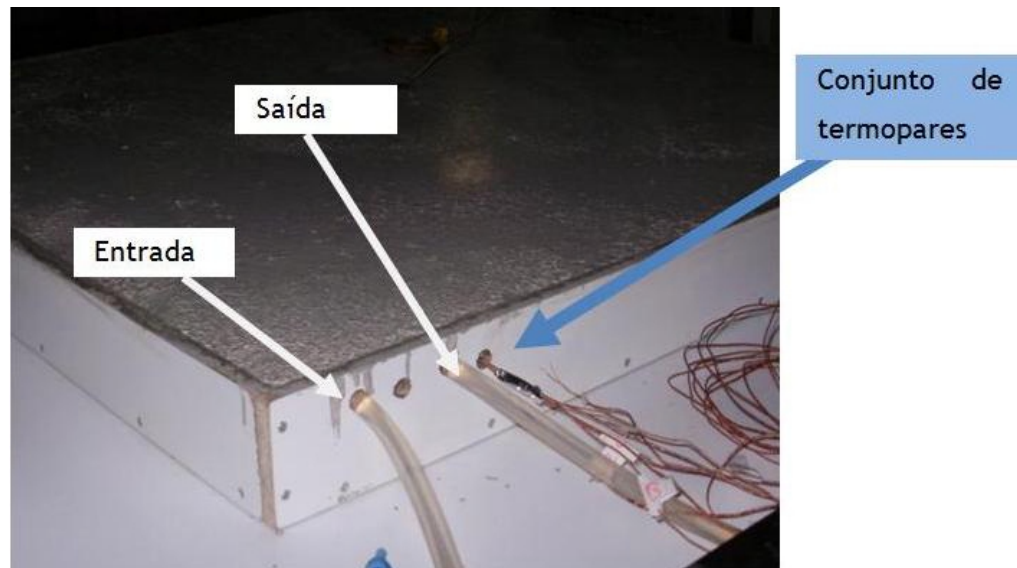


Figura 3.10 Ligações entre o interior e o exterior do piso. Termopares 1B, 2ª, 2B, 2C e tubo.



Figura 3.11 local dos termopares de entrada e de saída do fluido.

3.4 Procedimentos de execução do revestimento em piso flutuante

3.4.1 Selecção dos materiais para execução do revestimento em piso flutuante

Para a execução do revestimento de piso flutuante foram seleccionados os seguintes materiais:

- Piso flutuante laminado (sintético) com espessura média 7 mm do tipo AC3;
- Piso flutuante de madeira com espessura média de 14 mm com uma área superficial de 150x1200mm;
- Feltro de polietileno com duas espessuras, de 3 mm e de 1 mm;
- Termopares tipo T;
- Fita-cola de alumínio.

3.4.2 Procedimentos de execução do piso flutuante

Previamente à execução do pavimento flutuante (7 ou 14 mm), foi verificada a esquadria, as dimensões da base a ser revestida e a localização exacta dos termopares, procurando-se obter o melhor posicionamento com o menor número de cortes possível e tentando sempre evitar o posicionamento dos termopares numa junta ou união.

O feltro de polietileno (1 ou 3 mm) foi colocado sobre a superfície do provete, cobrindo toda a área para estudo e ficando sempre em média 10 cm para fora do provete. Depois de colocado, foram fixados com fita-cola de alumínio três termopares do tipo J para ler a temperatura do feltro nas três zonas já referenciados como 4A, 4B e 4C.

Foram cortadas duas peças do piso flutuante (7 ou 14mm) longitudinalmente com uma serra eléctrica com disco preparado para cortar madeira. As peças cortadas ficaram posicionadas na lateral do provete. A geometria final das peças que compõem o piso flutuante e a localização dos termopares é ilustrada nas figuras 3.15 e 3.16. No final foram fixados três termopares do tipo J na superfície do piso com as referências de 5A, 5B e 5C.



Figura 3.15 - Piso flutuante 7 mm



Figura 3.16 Medições no piso flutuante 14 mm

3.4.3 Descrição sumária do piso flutuante.

3.4.3.1 Revestimento de piso com pavimento flutuante laminado de 7 mm de espessura, assente sobre subcamada de feltro em polietileno de 1 mm de espessura, sem cola

Revestimento de piso em pavimento flutuante laminado, com massa volúmica aparente seca de aproximadamente 500 kg/m^3 , coeficiente de condutibilidade térmica estimado em $0,13 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$ 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 $0,050 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$ e espessura média de 1 mm. A resistência térmica média estimada para o conjunto do pavimento (laminado e feltro) é de aproximadamente $0,074 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$.

3.4.3.2 Revestimento de piso com pavimento flutuante laminado de 7 mm de espessura, assente sobre subcamada de feltro em polietileno de 3 mm de espessura, sem cola

Revestimento de piso em pavimento flutuante laminado, com massa volúmica aparente seca de aproximadamente 500 kg/m^3 , coeficiente de condutibilidade térmica estimado em $0,13 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$ 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 $0,050 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$ e espessura média de 3 mm. A resistência térmica média estimada para o conjunto do pavimento (laminado e feltro) é de aproximadamente $0,114 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$.

3.4.3.3 Revestimento de piso com pavimento flutuante de madeira maciça densa de 14 mm de espessura, assente sobre subcamada de feltro em polietileno de 2 mm de espessura, sem cola

Revestimento de piso em pavimento flutuante de madeira maciça densa, com massa volúmica aparente seca de aproximadamente $750 \text{ a } 870 \text{ kg/m}^3$, coeficiente de condutibilidade térmica estimado em $0,23 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$ e espessura média de 14 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 $0,050 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$ e espessura média de 3 mm. A resistência térmica média estimada para o conjunto do pavimento (madeira e feltro) é de aproximadamente $0,121 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$.

3.5 Procedimentos de execução do revestimento em piso cerâmico

3.5.1 Selecção dos materiais para execução do revestimento em piso cerâmico

Para a execução do revestimento de piso foram seleccionados os seguintes materiais:

- Ladrilhos cerâmicos com área superficial de $(450 \times 450) \text{ mm}^2$ e espessura média de 7 mm;
- Argamassa de assentamento de produção industrial, correntemente designada de “cimento-cola”;
- Termopares tipo T.

3.5.2 Procedimentos de execução do piso cerâmico

Previamente à execução do pavimento, foram verificadas a esquadria, as dimensões da base a ser revestida e a localização exacta dos termopares, procurando-se obter o melhor posicionamento com o menor número de cortes possível. Em consequência, duas das peças cerâmicas foram cortadas sensivelmente em duas partes iguais, com recurso a uma serra eléctrica com disco de corte diamantado. A geometria final das peças cerâmicas é ilustrada na figura 3.17 e a localização dos termopares segue o mesmo critério adoptado para os sistemas anteriores, tal como é ilustrado na figura 3.7.



Figura 3.17 Geometria final das peças de cerâmica

O cimento cola (cerca de 5 kg) foi misturado num balde com recurso a um misturador mecânico, adicionando-se a água (cerca de 1,2 L) até que fosse obtida a homogeneidade e consistências pretendidas para a mistura.

A aplicação das peças cerâmicas foi efectuada pelo método convencional, que consiste em colocar o cimento cola apenas na base de assentamento, encontrando-se a peça cerâmica limpa e seca aquando da sua aplicação.

O cimento cola foi espalhado com o lado liso da espátula de dentes, comprimindo-a contra a base num ângulo de aproximadamente 45°, formando uma camada uniforme. De seguida, foi usado o lado dentado da espátula de dentes sobre a camada de argamassa, para formar cordões uniformes que facilitassem o nivelamento e a fixação das peças cerâmicas, conforme se ilustra na Figura 3.18.

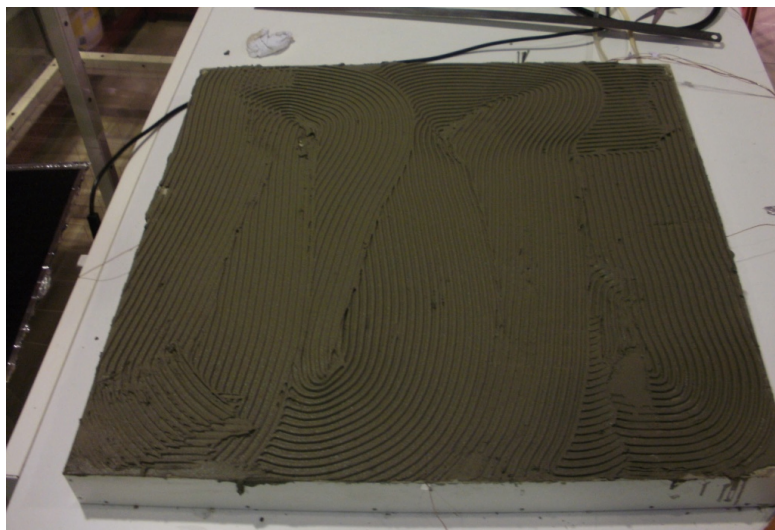


Figura 3.18 Aplicação do cimento-cola

As peças cerâmicas foram colocadas o mais próximo possível da sua posição final sobre os cordões de cimento cola, ajustando-se de seguida o seu posicionamento através de um ligeiro movimento de rotação e translação. Durante a colocação das peças, os cordões foram esmagados pressionando-se ligeiramente as peças cerâmicas e percutindo-as com leves pancadas de um martelo de borracha, formando assim uma camada uniforme e garantindo o contacto pleno do cimento cola com o verso da peça cerâmica. A largura de junta pode ser garantida com o recurso a espaçadores plásticos. Contudo, neste caso, considerou-se dispensável a sua utilização dada a reduzida dimensão da área a ladrilhar. A espessura final da camada de cimento-cola foi de cerca de 4 mm e a largura das juntas de assentamento situou-se próximo dos 3 mm. Por opção, as juntas de assentamento não foram seladas, por se considerar pouco relevante para o objectivo do trabalho. O aspecto final do piso cerâmico pode ser observado na Figura 3.19. No final colocou-se os termopares tipo T correspondentes à zona correspondente.

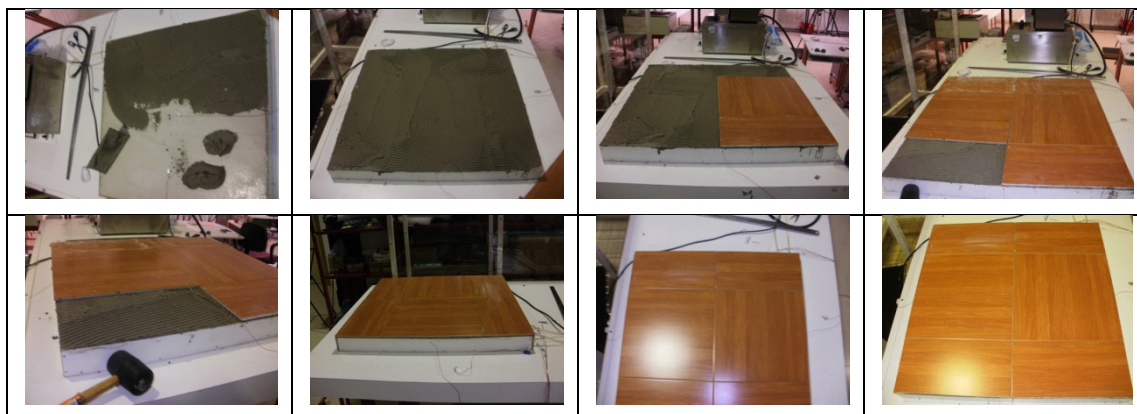


Figura 3.19 Processo de aplicação da cerâmica no provete

3.5.3 Revestimento de piso cerâmico de 7 mm de espessura, assente sobre subcamada de cimento-cola com espessura média de 4 mm

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

3.6 Metodologia experimental dos ensaios

Realizaram-se ensaios de desempenho térmico para as seguintes combinações de acabamentos:

- 1- Sem revestimento superficial;
- 2- Piso flutuante sintético de 7 mm com isolamento hidrófugo de feltro com 1 mm;
- 3- Piso flutuante sintético de 7 mm com isolamento hidrófugo de feltro com 3 mm;
- 4- Piso flutuante de madeira de 14 mm com isolamento hidrófugo de feltro com 3 mm;
- 5- Piso cerâmico de 7 mm assente com 4 mm de cimento-cola.

Para dar início aos testes foi sempre necessário preparar o psicrómetro, preparar a bancada de leitura dos termopares e normalizar a temperatura no piso. Para se poder obter resultados comparáveis entre si, é necessário que o ponto de partida seja igual para todos os ensaios.

O sistema tem a função de transferir calor para o ambiente e para que os ensaios possam ter condições iniciais equiparáveis, foi necessário realizar testes de preparação para escolher qual a temperatura pela qual todos os pontos de leitura devem ser iniciados. No final dos testes chegou-se à conclusão que atendendo à temperatura ambiente registada na sala de laboratório nos dias antecedentes, o melhor ponto de partida foi estabilizar a temperatura no piso até que todos os pontos de medição estivessem à temperatura de 20°C . Com o desenrolar das experiências e com o aumento da temperatura ambiente, foi necessário adaptar este valor, caso que aconteceu com o revestimento superficial de cerâmica que levou à necessidade de elevar a temperatura inicial para 25°C .

O processo de estabilização pode ser moroso levando horas até que os diversos pontos de temperatura atingissem valores muito próximos da temperatura definida como ponto de partida. Este processo foi realizado com a leitura da temperatura no termómetro digital até que os valores fossem muito próximos dos pretendidos. Pode-se comentar que este processo pode levar entre uma a quatro horas de espera pelo ajuste da temperatura.

Assim que a temperatura é considerada estável, sem grandes oscilações com o decorrer do tempo, é que se pode dar início ao teste e respectivo registo de temperatura numa folha de cálculo EXCEL.

O início de cada teste precedia da leitura da temperatura de bolbo seco e da temperatura de bolbo húmido. Seguidamente aumentou-se a temperatura no equipamento de banho térmico para 25°C. Este foi considerado o ponto inicial de aquecimento do piso radiante e foi neste momento que se iniciou o temporizador, contando espaços temporais de quinze minutos.

Em cada quinze minutos todos os termopares disponíveis foram lidos seguindo uma ordem específica e invariável, começando nos termopares da superfície e descendo de nível, deixando para último a temperatura de saída (ordem de leitura: 5A - 5B - 5C - 4A - 4B - 4C - 3A - 3B - 3C - 2A - 2B - 2C - TUBO - 1B - ENTRADA - SAÍDA). Desta forma tem-se o mínimo espaço temporal possível entre cada medição. Por estar apenas disponível um termómetro digital de leitura única e tempo de leitura de cada termopar leva perto de um minuto, não era possível realizar leituras num espaço temporal mais reduzido.

Ao longo do teste foram registadas alterações da temperatura de bolbo seco e húmido.

O teste só finalizava quando o piso atingia uma temperatura estável, os valores registados começavam a ficar inalterados ou com ligeiras alterações, as quais justificavam que a temperatura interna e superficial do piso estava estável. O tempo para estabilizar cada teste podia variar, de três a quatro horas.

Dado como finalizado o teste, o piso ficava a libertar calor até ao próximo ensaio. Nos ensaios seguintes variou-se apenas a temperatura de aquecimento do piso.

O período de testes para cada variação de revestimento superficial foi longo, pois era necessário realizar um teste para cada temperatura, no final do teste era necessário voltar à temperatura inicial em todos os pontos de leitura. Para não criar condensações e choques térmicos, o piso era deixado a libertar a temperatura de forma natural. A temperatura para aquecimento teve cinco gradientes, de 20 a 25°C, de 20 a 30°C, de 20 a 35°C, de 20 a 40°C e de 20 a 45°C.

Para cada teste foram usadas as indicações acima referidas, divergindo em tipo de piso e em gradiente de temperatura do banho térmico.

4 Ensaios Experimentais e Discussão

O Laboratório de Transmissão de Calor da Universidade da Beira Interior foi o local eleito para a construção, aplicação dos diversos revestimentos superficiais e respectivos ensaios. O ar residente não teve tratamento acrescido pela realização da experiência. Embora o local seja privilegiado por não ser sujeito a variações significativas na temperatura ambiente, estas também se fizeram sentir com o aumento significativo da temperatura no exterior, e consequentemente o interior do edifício que alberga o laboratório.

A realização dos ensaios prevê estudar o comportamento térmico de cada revestimento superficial e relaciona-lo com as restantes configurações. Isto, pode levar a resultados com os quais se consiga identificar qual a melhor solução para utilização com o aquecimento por piso radiante hidráulico.

Para o tratamento de dados são apresentados um gráfico onde é relacionada a diferença de temperatura (DT) com o tempo e outro onde relaciona a média da temperatura superficial de cada revestimento com o tempo. Os valores apresentados no eixo DT referem-se à diferença entre a média da temperatura superficial de cada revestimento e a média da temperatura registada no pesicrómetro (4.3), correspondente à temperatura de bulbo seco durante cada ensaio. No eixo correspondente à temperatura superficial o cálculo é feito com o registo das temperaturas à superfície de cada revestimento através das equações (4.1) e (4.2).

Descrição:

Designação	Simbologia
Temperatura na superfície	T_{sup}
Temperatura ambiente	T_{amb}
Diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura superficial	DT
Temperatura no termopar: 3A; 3B; 3C; 5A; 5B; 5C	$T(3A); T(3B); T(3C); T(5A); T(5B); T(5C)$

Designação	Simbologia
Pavimento sem revestimento superficial	Sem cobertura
Pavimento flutuante de 7 mm e feltro em polietileno de 1 mm	PF 7-1
Pavimento flutuante de 7 mm e feltro em polietileno de 3 mm	PF 7-3
Pavimento flutuante de 14 mm e feltro em polietileno de 3 mm	PF 14-3
Pavimento Cerâmico de 7 mm e cimento cola de 4 mm	PC 7-4

Temperatura superficial:

Para o caso sem revestimento superficial:

$$\frac{() () () }{ } (4.1)$$

Para os casos com revestimento superficial:

$$\frac{() () () }{ } (4.2)$$

Diferença de temperatura:

Para todos casos, sem e com revestimento superficial:

$$= - (4.3)$$

4.1 Curvas de funcionamento

4.1.1 Ensaios a 25°C

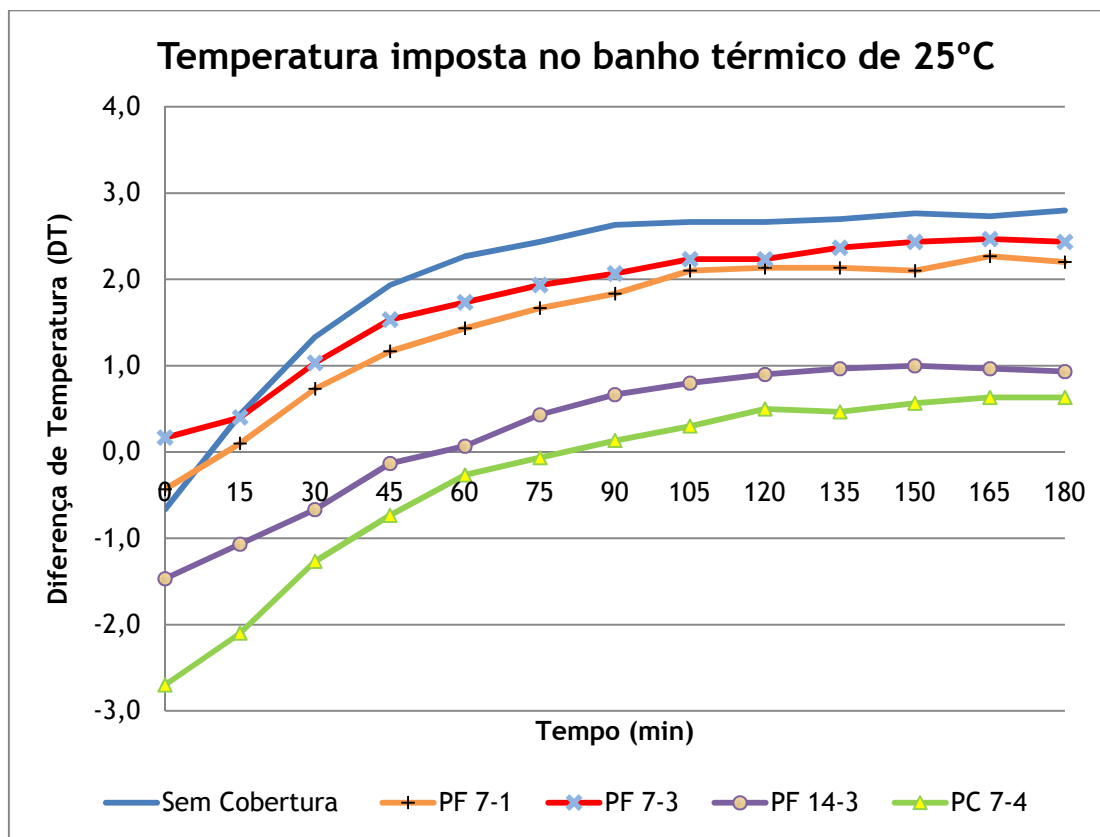


Gráfico 4.1 Curvas de funcionamento diferença de Temperatura/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 25°C

No gráfico 4.1 verifica-se que nos ensaios a diferença de temperatura tem uma subida entre 2 e 3°C. À excepção do revestimento PF 7-3, todos os ensaios apresentam valores iniciais de DT negativos. Os casos particulares do PC 7-4 e do PF 14-3 são mais notórios o que é fruto de uma T_{amb} mais elevada.

A evolução da DT ao longo do tempo segue trajectos muito semelhantes, estando estáveis a partir dos 120 minutos. Os revestimentos que se aproximam entre si nos valores de DT, ao longo do tempo podem ser divididos em dois grupos. O primeiro grupo é constituído pelas configurações: Sem cobertura, PF 7-1 e PF 7-3, apresenta um DT inicial próximo de zero, ou seja, os ensaios foram realizados com T_{amb} próxima da temperatura inicial do provete. O segundo grupo (PF 14-3 e PC 7-4) reflete uma T_{amb} superior à temperatura inicial do provete.

Através da análise do gráfico 4.1 todos os revestimentos até atingirem um DT igual a zero não estão a produzir calor para o ar ambiente mas apenas a aumentar a temperatura interna do piso.

Para os restantes ensaios, em que a T_{amb} esteve próxima da temperatura inicial do provete (20°C). A diferença de temperatura para as configurações PF 7-1, PF 7-3 e Sem Cobertura tem na primeira hora um aumento de 2°C , com um aumento pouco significativo nos minutos seguintes.

Em suma, verifica-se que a temperatura ambiente é um factor importante para determinar o tempo necessário para a libertação de calor.

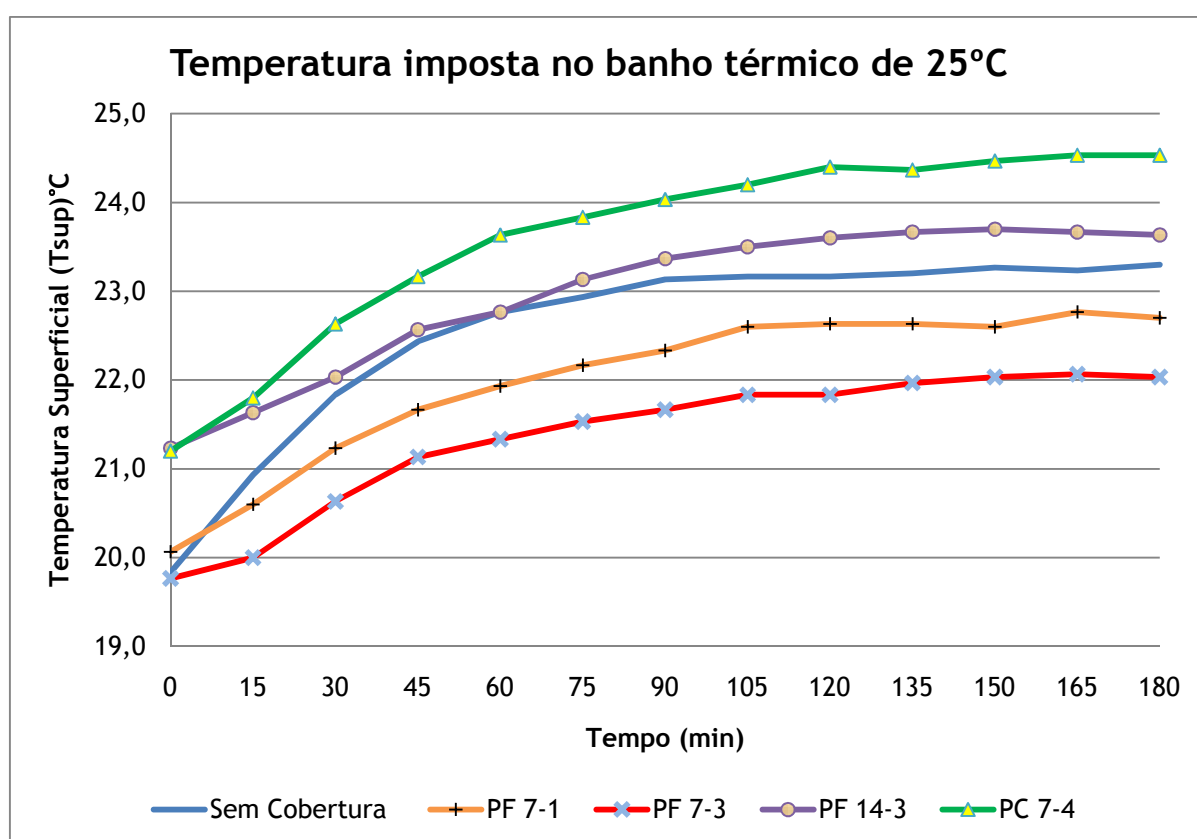


Gráfico 4.2 Curvas de funcionamento Temperatura superficial/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 25°C

Analisando o gráfico 4.2 verifica-se que após os primeiros 120 minutos a T_{sup} dos diferentes revestimentos de piso fica estável.

A resistência térmica mais baixa corresponde ao provete Sem Cobertura, era esperado que a T_{sup} fosse mais elevada para este caso. Pela observação do gráfico o revestimento com maior T_{sup} final corresponde ao PC 7-4. Este efeito deve-se às condições da T_{amb} , que como já foi referido, ser superior à temperatura inicial do provete, o mesmo se verifica no PF 14-3.

Nos restantes casos o aumento da T_{sup} segue o esperado, o que apresenta uma maior temperatura é o que possui menor resistência térmica.

A configuração de PF 7-3 apresenta os piores resultados, leva mais tempo a atingir estabilidade para uma menor temperatura. A T_{sup} é menor com o aumento da espessura do feltro

Tabela 4.1 Resultados experimentais para a temperatura de referência de 25°C

Tempo (min)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
Sem revestimento superficial ($T_{amb}=20,5^{\circ}\text{C}$)													
T_{sup} ($^{\circ}\text{C}$)	19,8	20,9	21,8	22,4	22,8	22,9	23,1	23,2	23,2	23,2	23,3	23,2	23,3
DT ($^{\circ}\text{C}$)	-0,7	0,4	1,3	1,9	2,3	2,4	2,6	2,7	2,7	2,7	2,8	2,7	2,8
Entrada	19,8	24,7	24,6	24,6	24,8	24,7	24,8	24,7	24,7	24,7	24,7	24,8	24,7
Flutuante de 7 mm e feltro de polietileno de 1 mm ($T_{amb}=20,5^{\circ}\text{C}$)													
T_{sup} ($^{\circ}\text{C}$)	20,1	20,6	21,2	21,7	21,9	22,2	22,3	22,6	22,6	22,6	22,6	22,8	22,7
DT ($^{\circ}\text{C}$)	-0,4	0,1	0,7	1,2	1,4	1,7	1,8	2,1	2,1	2,1	2,1	2,3	2,2
Entrada	19,8	24,7	24,8	24,8	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,8	24,7	24,7	24,7
Flutuante de 7 mm e feltro de polietileno de 3 mm ($T_{amb}=19,6^{\circ}\text{C}$)													
T_{sup} ($^{\circ}\text{C}$)	19,8	20,0	20,6	21,1	21,3	21,5	21,7	21,8	21,8	22,0	22,0	22,1	22,0
DT ($^{\circ}\text{C}$)	0,2	0,4	1,0	1,5	1,7	1,9	2,1	2,2	2,2	2,4	2,4	2,5	2,4
Entrada	19,8	24,8	24,7	24,8	24,8	24,7	24,8	24,8	24,8	24,7	24,7	24,7	24,7
Flutuante de 14 mm e feltro de polietileno de 3 mm ($T_{amb}=22,7^{\circ}\text{C}$)													
T_{sup} ($^{\circ}\text{C}$)	21,2	21,6	22,0	22,6	22,8	23,1	23,4	23,5	23,6	23,7	23,7	23,7	23,6
DT ($^{\circ}\text{C}$)	-1,5	-1,1	-0,7	-0,1	0,1	0,4	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9
Entrada	19,9	24,7	24,7	24,7	24,8	24,7	24,9	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8
Cerâmica $T_{amb}=23,9^{\circ}\text{C}$													
T_{sup} ($^{\circ}\text{C}$)	21,2	21,8	22,6	23,2	23,6	23,8	24,0	24,2	24,4	24,4	24,5	24,5	24,5
DT ($^{\circ}\text{C}$)	-2,7	-2,1	-1,3	-0,7	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6
Entrada	19,9	24,8	24,7	24,7	24,7	24,8	24,8	24,8	24,7	24,8	24,8	24,9	24,9

Em suma, verifica-se que a T_{amb} influencia o desempenho do revestimento superficial, com uma T_{amb} superior à temperatura inicial do provete, verificou-se uma maior temperatura superficial final. Para os casos em que a T_{amb} está mais próxima da temperatura inicial do piso os resultados seguem o esperado comparando com as diferentes resistências térmicas.

4.1.2 Ensaios a 30°C

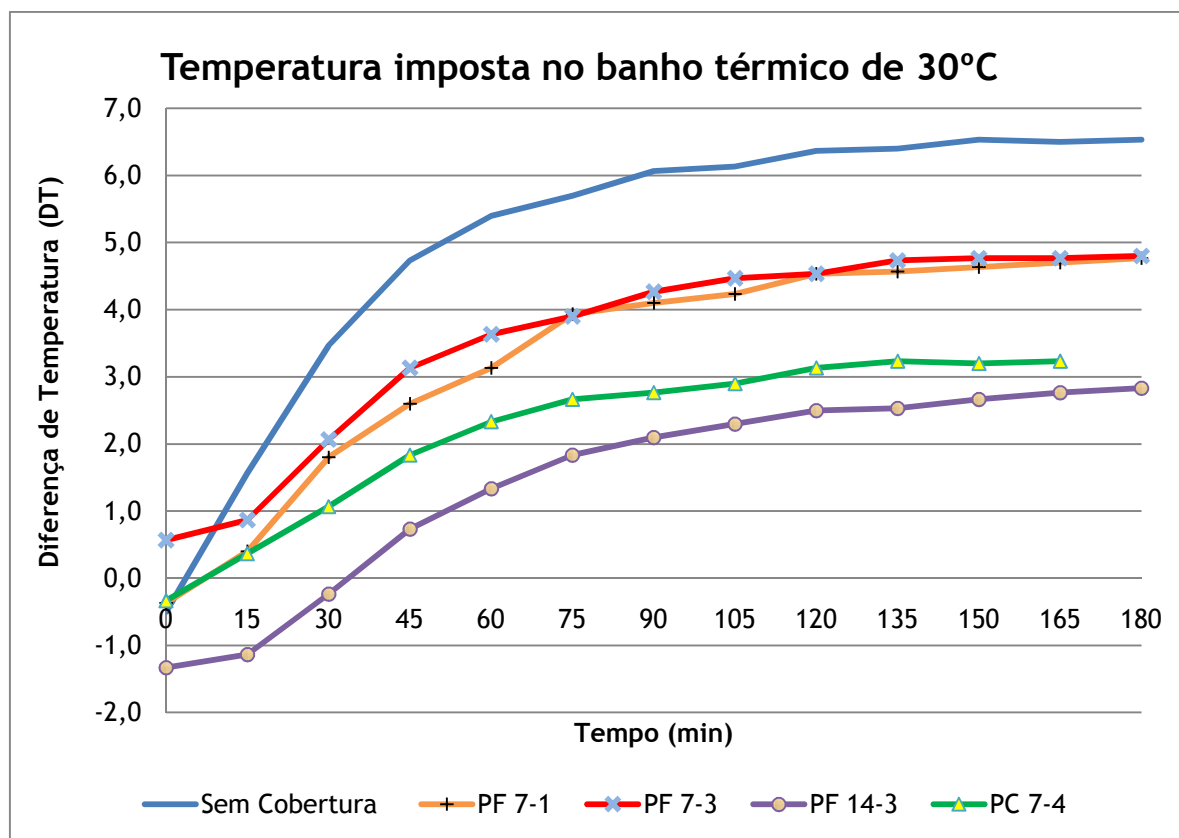


Gráfico 4.3 Curvas de funcionamento diferença de Temperatura/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 30°C

No gráfico 4.3 verifica-se que nos ensaios a diferença de temperatura tem uma subida entre 3,5 e 7°C. No caso do PF 14-3 o DT inicial apresenta o valor mais negativo, a T_{amb} é a mais elevada.

A evolução da DT ao longo do tempo segue trajetórias muito semelhantes, adquirindo estabilidade a partir dos 120 minutos. O provete sem cobertura apresenta a DT mais elevada, distando devido a ter a resistência térmica mais baixa, o que permite uma maior transferência de calor.

A curva da DT do revestimento PF 7-1 encontra a curvatura do revestimento PF 7-3, isto indica, que embora ligeira, existe um aumento na DT devido à aplicação feltro.

A maior diferença de temperatura pertence ao piso sem cobertura, com DT próximo dos 7°C. Os pisos que mais se aproximam deste valor são as configurações PF 7-1 e PF 7-3, obtendo valores finais muito próximos.

É necessário ter em conta que o piso PC 7-4 foi testado em condições de temperatura ambiente mais elevada que os restantes pisos, o que levou a ter que considerar uma temperatura inicial na superfície de 25°C. Assim, o máximo que esta configuração poderia obter na DT seria de 5°C, este valor não foi atingido, no entanto, atinge valores superiores a 3°C.

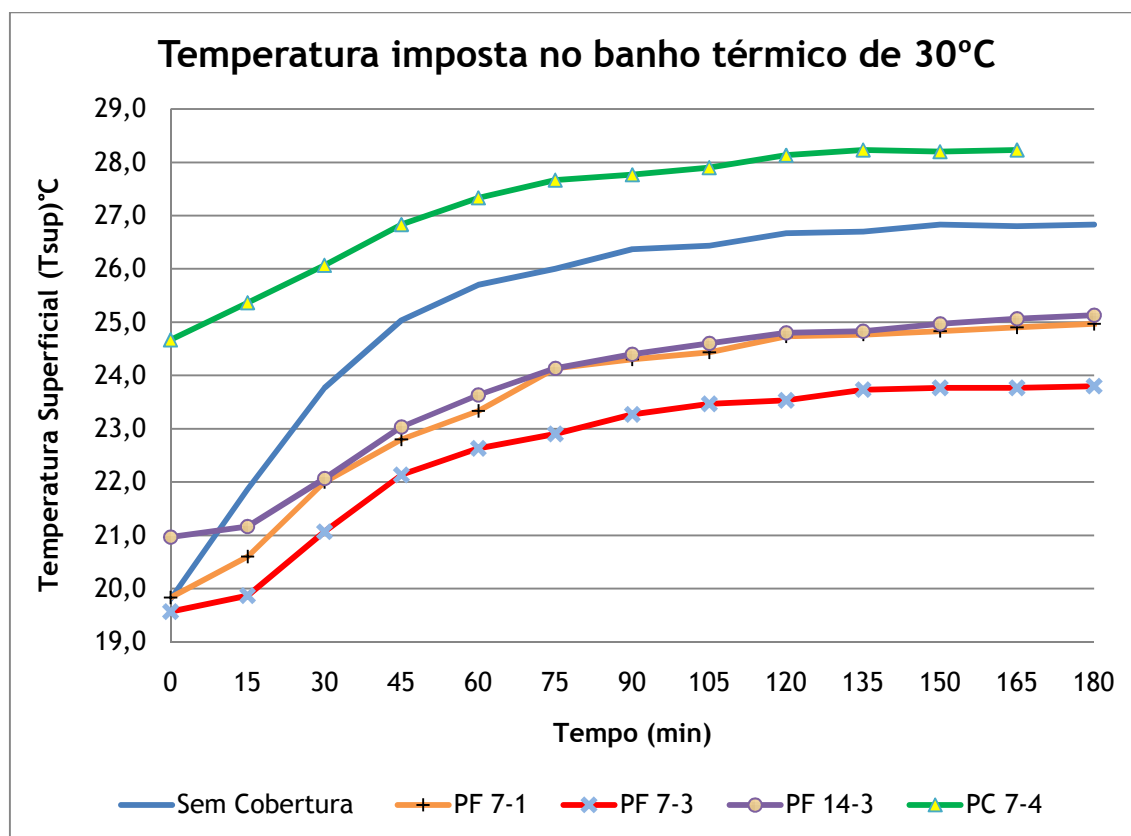


Gráfico 4.4 Curvas de funcionamento Temperatura superficial/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 30°C

Através do gráfico 4.4 observa-se que o revestimento com melhor desempenho é o PC 7-4, com uma temperatura máxima na superfície de 28,2°C. Pelo contrário o pior desempenho verifica-se no PF 7-3. Após os primeiros 120 minutos a T_{sup} dos diferentes revestimentos de piso fica estável.

Comparando a prestação dos revestimentos flutuantes, o PF 14-3 é o que apresenta resultados superiores ao PF 7-3, apesar de ter uma resistência térmica mais elevada, tal facto pode dever-se à diferença da T_{amb} (a T_{amb} do PF 14-3 foi de 3,3°C superior à T_{amb} do PF 7-3).

Relativamente aos revestimentos PF 7-3 e PF 7-1, a utilização do feltro de um milímetro para uma temperatura no circuito hidráulico de 30°C leva a uma diferença da T_{sup} de 1,2°C no final de 180 minutos.

Para uso doméstico o revestimento PC 7-4 apresenta temperaturas próximas do limite da temperatura aceitável para o conforto humano. Para este conjunto de experiências nenhum dos revestimentos excedeu a temperatura limite de conforto térmico humano, de 29°C, segundo ASHRAE (1997).

Tabela 4.2 Resultados experimentais para a temperatura de referência de 30°C

Tempo (min)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
Sem revestimento superficial ($T_{amb} = 20,3^{\circ}\text{C}$)													
Tsup (°C)	19,8	21,9	23,8	25,0	25,7	26,0	26,4	26,4	26,7	26,7	26,8	26,8	26,8
DT (°C)	-0,5	1,6	3,5	4,7	5,4	5,7	6,1	6,1	6,4	6,4	6,5	6,5	6,5
Entrada	19,8	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,8	29,8	29,6	29,8	29,8	29,7
Flutuante de 7 mm e feltro de polietileno de 1 mm ($T_{amb} = 20,2^{\circ}\text{C}$)													
Tsup (°C)	19,8	20,6	22,0	22,8	23,3	24,1	24,3	24,4	24,7	24,8	24,8	24,9	25,0
DT (°C)	-0,4	0,4	1,8	2,6	3,1	3,9	4,1	4,2	4,5	4,6	4,6	4,7	4,8
Entrada	19,8	29,7	29,6	29,7	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,7	29,8	29,8
Flutuante de 7 mm e feltro de polietileno de 3 mm ($T_{amb} = 19^{\circ}\text{C}$)													
Tsup (°C)	19,6	19,9	21,1	22,1	22,6	22,9	23,3	23,5	23,5	23,7	23,8	23,8	23,8
DT (°C)	0,6	0,9	2,1	3,1	3,6	3,9	4,3	4,5	4,5	4,7	4,8	4,8	4,8
Entrada	19,9	29,6	29,6	29,8	29,7	29,7	29,6	29,7	29,7	29,8	29,8	29,8	29,8
Flutuante de 14 mm e feltro de polietileno de 3 mm ($T_{amb} = 22,3^{\circ}\text{C}$)													
Tsup (°C)	21,0	21,2	22,1	23,0	23,6	24,1	24,4	24,6	24,8	24,8	25,0	25,1	25,1
DT (°C)	-1,3	-1,1	-0,2	0,7	1,3	1,8	2,1	2,3	2,5	2,5	2,7	2,8	2,8
Entrada	19,9	29,5	29,6	29,6	29,7	29,7	29,7	29,7	29,8	29,7	29,7	29,8	29,7
Cerâmica ($T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$)													
Tsup (°C)	24,7	25,4	26,1	26,8	27,3	27,7	27,8	27,9	28,1	28,2	28,2	28,2	
DT (°C)	-0,3	0,4	1,1	1,8	2,3	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	3,2	3,2	
Entrada	24,8	29,7	29,7	29,8	29,8	29,7	29,8	29,9	29,8	29,8	29,7	29,8	

Em suma, como verificado nos ensaios a 25°C o PC 7-4 apresenta o melhor desempenho. Também nestes ensaios a 30°C se verificou a importância da T_{amb} . O revestimento PC 7-4 que possui uma resistência térmica superior ao provete sem cobertura, consegue atingir uma T_{sup} mais elevada, no entanto este apenas eleva a temperatura 3,5°C, enquanto o provete sem cobertura eleva a temperatura 7°C.

4.1.3 Ensaio a 35°C

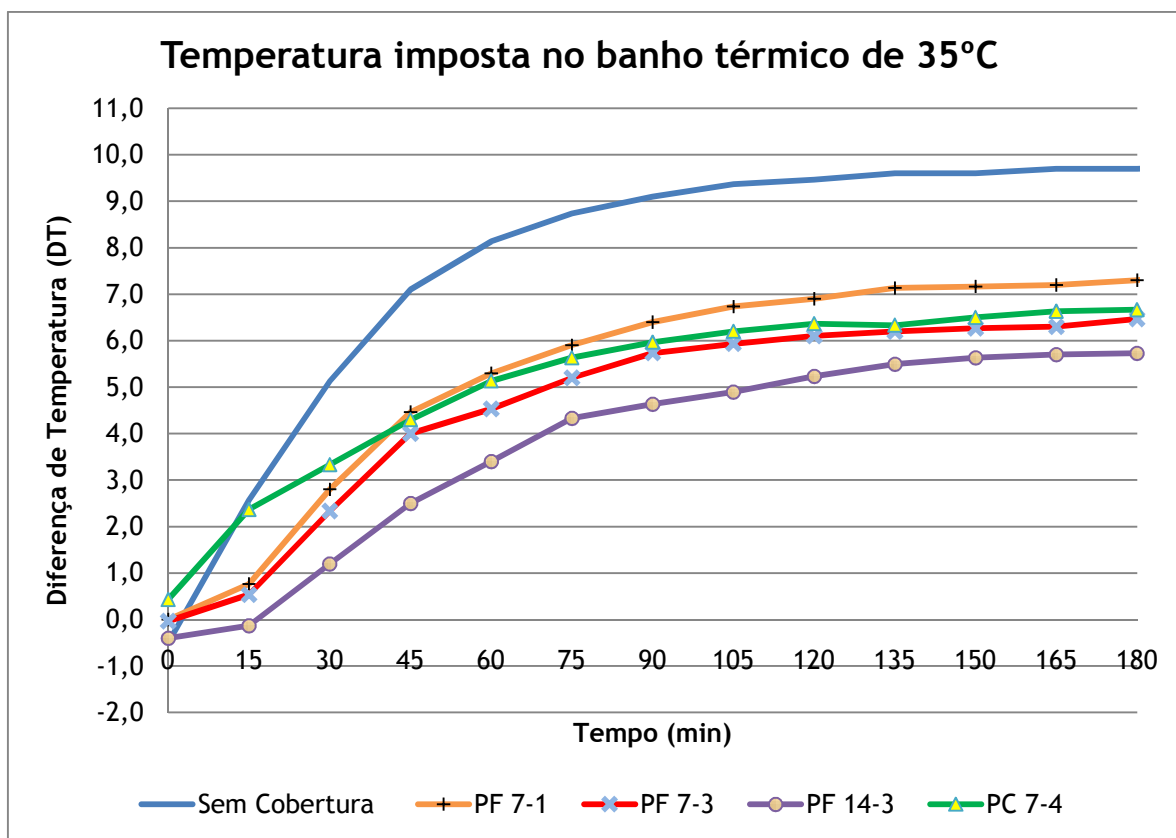


Gráfico 4.5 Curvas de funcionamento diferença de Temperatura/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 35°C

No gráfico 4.5 observa-se que no início dos ensaios a T_{amb} encontrou-se próxima da T_{sup} para todos os pisos.

A maior variação de DT corresponde ao provete sem cobertura, com um aumento de 10,2°C, pelo contrário, o PF 14-3 apresenta a menor variação, 6,2°C. Tal facto vai ao encontro da comparação com a resistência térmica dos diferentes revestimentos.

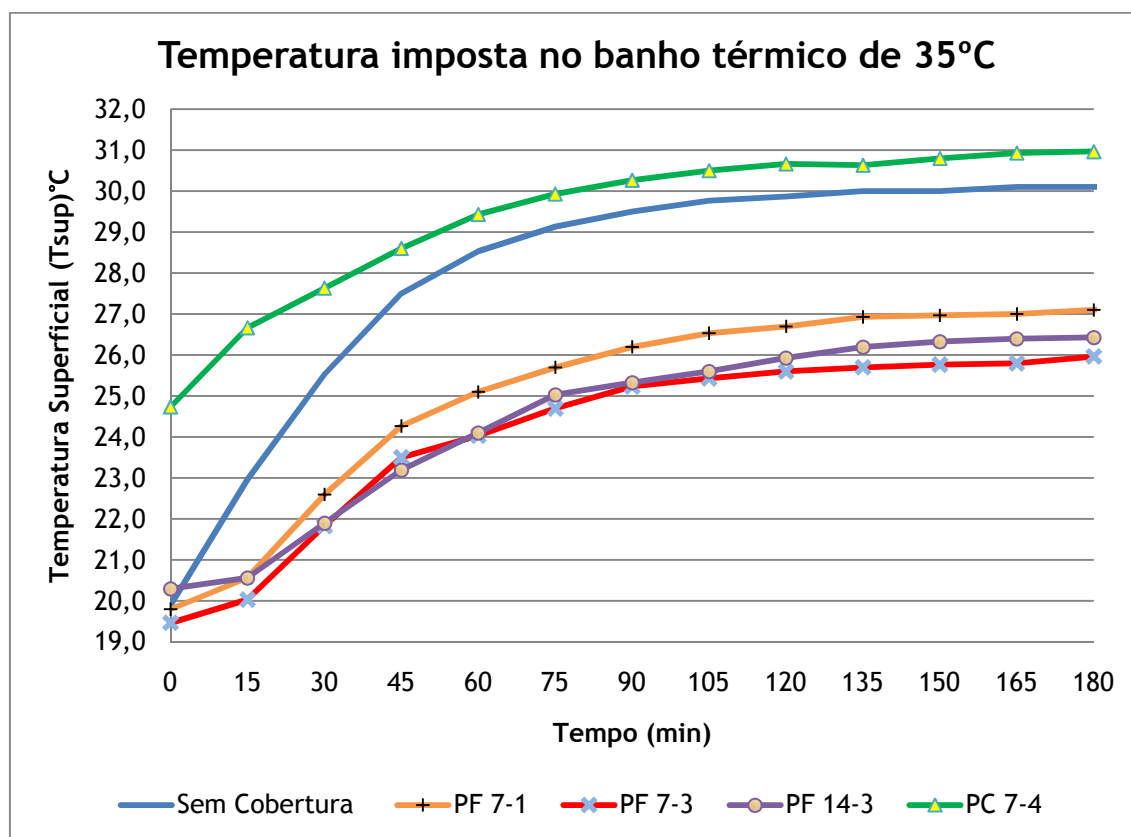


Gráfico 4.6 Curvas de funcionamento Temperatura superficial/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 35°C

Através do gráfico 4.6 verifica-se que a T_{sup} nos revestimentos estabiliza a partir de 135 minutos.

A T_{sup} mais elevada corresponde ao revestimento PC 7-4. Este revestimento apresenta o melhor desempenho mas para uso doméstico esta solução supera o valor máximo admitido para o conforto térmico no período de 45 a 60 minutos. Esta solução apresenta-se rentável na medida de possibilitar uma diminuição do tempo de aquecimento do piso. No entanto o piso radiante hidráulico destina-se a diversas aplicações e não só ao uso doméstico, assim, consoante a aplicação esta solução pode ser a mais eficiente.

Os revestimentos de piso flutuante atingem no máximo 27°C para este banho térmico, existe uma perda de cerca de 8°C com a aplicação destes.

Tabela 4.3 Resultados experimentais para a temperatura de referência de 350C

Tempo (min)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
Sem revestimento superficial ($T_{amb} = 20,4^{\circ}\text{C}$)													
Tsup ($^{\circ}\text{C}$)	19,9	23,0	25,5	27,5	28,5	29,1	29,5	29,8	29,9	30,0	30,0	30,1	30,1
DT ($^{\circ}\text{C}$)	-0,5	2,6	5,1	7,1	8,1	8,7	9,1	9,4	9,5	9,6	9,6	9,7	9,7
Entrada	19,8	34,5	34,7	34,6	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7
Flutuante de 7 mm e feltro de polietileno de 1 mm ($T_{amb} = 19,8^{\circ}\text{C}$)													
Tsup ($^{\circ}\text{C}$)	19,8	20,6	22,6	24,3	25,1	25,7	26,2	26,5	26,7	26,9	27,0	27,0	27,1
DT ($^{\circ}\text{C}$)	0,0	0,8	2,8	4,5	5,3	5,9	6,4	6,7	6,9	7,1	7,2	7,2	7,3
Entrada	19,9	34,7	34,7	34,8	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7	34,8
Flutuante de 7 mm e feltro de polietileno de 3 mm ($T_{amb} = 19,5^{\circ}\text{C}$)													
Tsup ($^{\circ}\text{C}$)	19,5	20,0	21,8	23,5	24,0	24,7	25,2	25,4	25,6	25,7	25,8	25,8	26,0
DT ($^{\circ}\text{C}$)	0,0	0,5	2,3	4,0	4,5	5,2	5,7	5,9	6,1	6,2	6,3	6,3	6,5
Entrada	19,9	34,7	34,4	34,6	34,8	34,7	34,7	34,8	34,6	34,7	34,7	34,8	34,8
Flutuante de 14 mm e feltro de polietileno de 3 mm ($T_{amb} = 20,7^{\circ}\text{C}$)													
Tsup ($^{\circ}\text{C}$)	20,3	20,6	21,9	23,2	24,1	25,0	25,3	25,6	25,9	26,2	26,3	26,4	26,4
DT ($^{\circ}\text{C}$)	-0,4	-0,1	1,2	2,5	3,4	4,3	4,6	4,9	5,2	5,5	5,6	5,7	5,7
Entrada	19,8	34,5	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7	34,8	34,7	34,7	34,7	34,7
Cerâmica ($T_{amb} = 24,3^{\circ}\text{C}$)													
Tsup ($^{\circ}\text{C}$)	24,7	26,7	27,6	28,6	29,4	29,9	30,3	30,5	30,7	30,6	30,8	30,9	31,0
DT ($^{\circ}\text{C}$)	0,4	2,4	3,3	4,3	5,1	5,6	6,0	6,2	6,4	6,3	6,5	6,6	6,7
Entrada	24,8	34,7	34,7	34,7	34,7	34,6	34,7	34,7	34,8	34,8	34,8	34,7	34,7

Em suma, este banho térmico já apresenta soluções que ultrapassam os 29°C , o que implica o desconforto térmico ao ser humano, segundo ASHRAE (1997). O revestimento com melhor desempenho continua a ser o PC 7-4.

4.1.4 Ensaios a 40°C

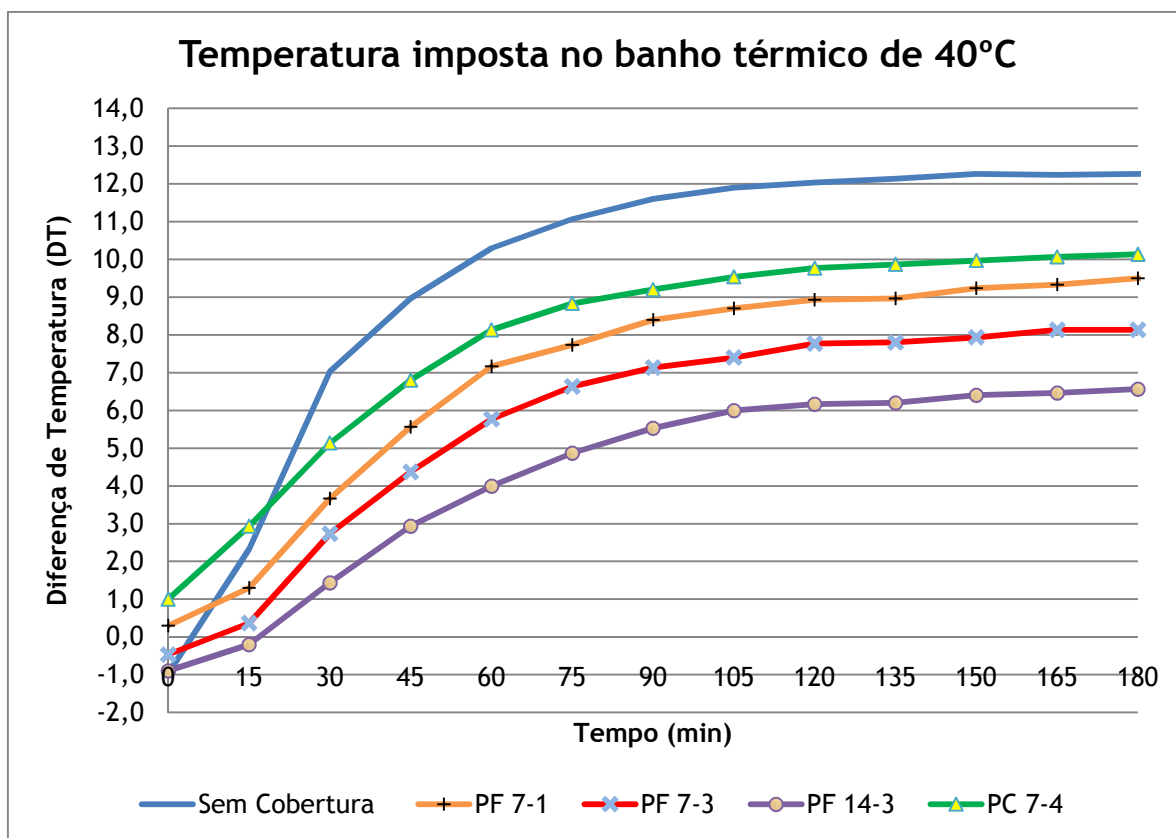


Gráfico 4.7 Curvas de funcionamento diferença de Temperatura/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 40°C

Analisando o gráfico 4.7 observa-se que a DT está estável para todos os piso a partir de 150 minutos.

Existe uma relação inversa entre a resistência térmica de cada piso e os resultados finais da DT. Quanto menor é a resistência térmica do revestimento, maior é a DT (T_{amb} não varia ao longo do tempo).

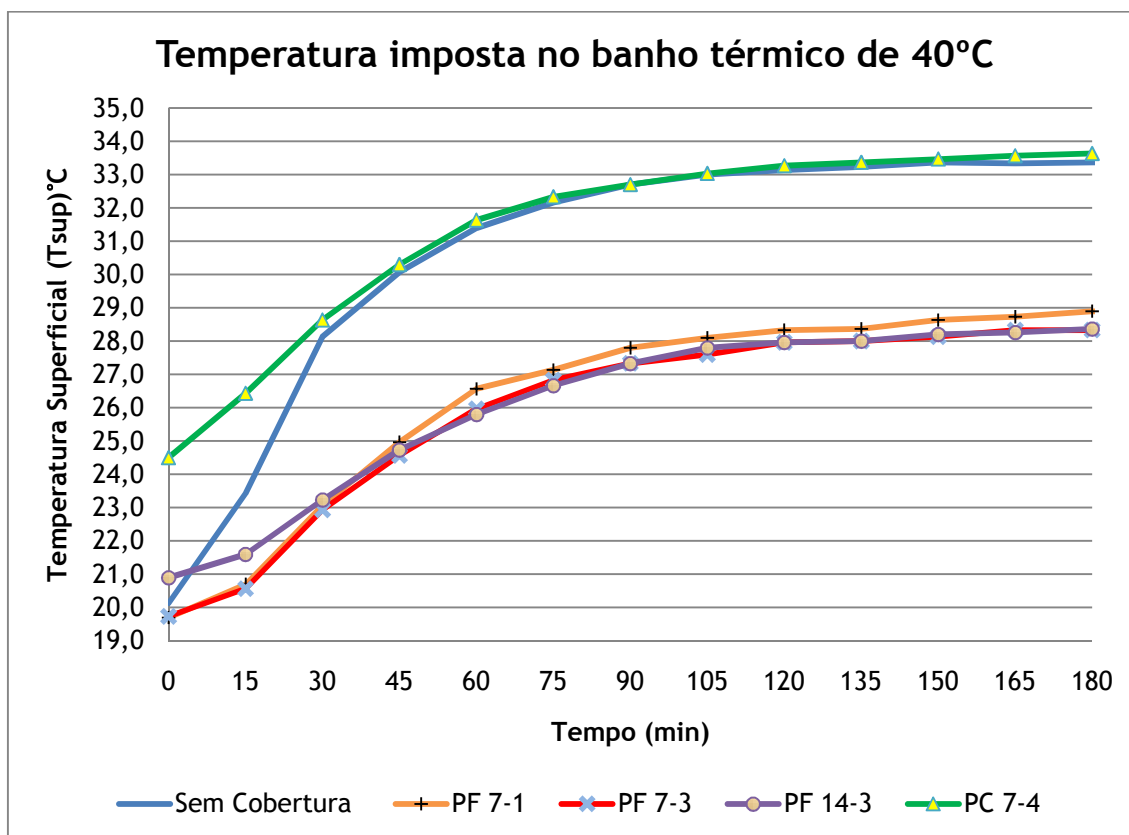


Gráfico 4.8 Curvas de funcionamento Temperatura Superficial/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 40°C

Verifica-se que, com o aumento da temperatura do banho térmico, a curvatura do PC 7-4 tem-se aproximado da curvatura do provete sem cobertura. De igual modo os revestimentos com piso flutuante atingem T_{sup} semelhantes entre eles.

Com este banho a T_{sup} dos revestimentos em estudo estabiliza aos 135 minutos. Neste caso continua a ser o PC 7-4 a apresentar uma T_{sup} final mais elevada.

Tabela 4.4 Resultados experimentais para a temperatura de referência de 40°C

Tempo (min)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
Sem revestimento superficial ($T_{amb}=21,1^{\circ}\text{C}$)													
Tsup (°C)	20,1	23,4	28,1	30,1	31,4	32,2	32,7	33,0	33,1	33,2	33,4	33,3	33,4
DT (°C)	-1,0	2,3	7,0	9,0	10,3	11,1	11,6	11,9	12,0	12,1	12,3	12,2	12,3
Entrada	19,9	39,5	39,7	39,6	39,6	39,6	39,7	39,7	39,6	39,6	39,6	39,5	39,6
Flutuante de 7 mm e feltro de polietileno de 1 mm ($T_{amb}=19,4^{\circ}\text{C}$)													
Tsup (°C)	19,7	20,7	23,1	25,0	26,6	27,1	27,8	28,1	28,3	28,4	28,6	28,7	28,9
DT (°C)	0,3	1,3	3,7	5,6	7,2	7,7	8,4	8,7	8,9	9,0	9,2	9,3	9,5
Entrada	19,9	39,4	39,5	39,6	39,5	39,6	39,6	39,6	39,5	39,6	39,6	39,5	39,7
Flutuante de 7 mm e feltro de polietileno de 3 mm ($T_{amb}=20,2^{\circ}\text{C}$)													
Tsup (°C)	19,7	20,6	22,9	24,6	26,0	26,8	27,3	27,6	28,0	28,0	28,1	28,3	28,3
DT (°C)	-0,5	0,4	2,7	4,4	5,8	6,6	7,1	7,4	7,8	7,8	7,9	8,1	8,1
Entrada	19,9	39,6	39,4	39,7	39,7	39,6	39,7	39,6	39,6	39,7	39,7	39,6	39,6
Flutuante de 14 mm e feltro de polietileno de 3 mm ($T_{amb}=21,8^{\circ}\text{C}$)													
Tsup (°C)	20,9	21,6	23,2	24,7	25,8	26,7	27,3	27,8	28,0	28,0	28,2	28,3	28,4
DT (°C)	-0,9	-0,2	1,4	2,9	4,0	4,9	5,5	6,0	6,2	6,2	6,4	6,5	6,6
Entrada	19,8	39,5	39,4	39,6	39,7	39,7	39,6	39,6	39,6	39,6	39,7	39,6	39,7
Cerâmica ($T_{amb}=23,5^{\circ}\text{C}$)													
Tsup (°C)	24,5	26,4	28,6	30,3	31,6	32,3	32,7	33,0	33,3	33,4	33,5	33,6	33,6
DT (°C)	1,0	2,9	5,1	6,8	8,1	8,8	9,2	9,5	9,8	9,9	10,0	10,1	10,1
Entrada	24,7	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,5	39,6	39,6	39,5	39,5

Em suma, para temperaturas do banho térmico mais elevadas, a distância entre a temperatura do banho e a T_{sup} final aumenta, existe uma maior dissipação de calor para o ar ambiente. A espessura do feltro tem vindo a perder relevância, tal como o tipo de material e espessura do revestimento flutuante, visto os casos em estudo apresentarem resultados equiparáveis.

4.1.5 Ensaios a 45°C

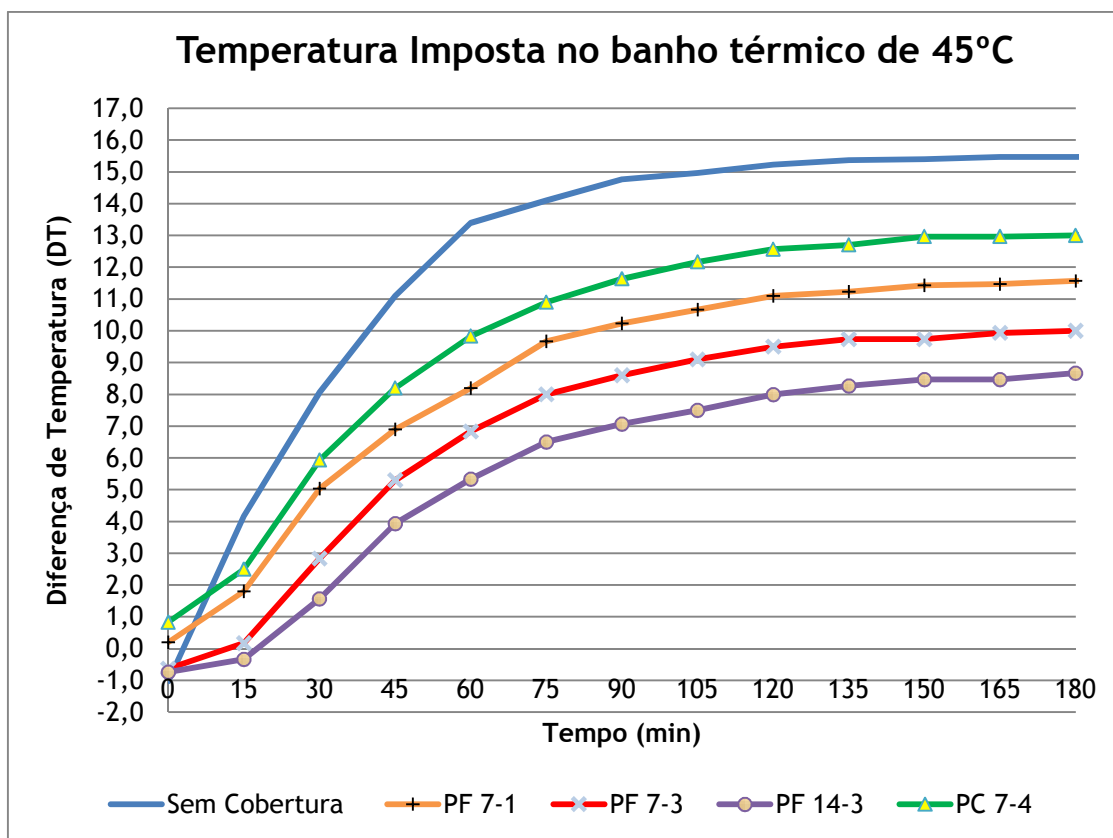


Gráfico 4.9 Curvas de funcionamento diferença de Temperatura/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 45°C

A análise do gráfico 4.9 permite concluir o que foi verificado no gráfico 4.7, apenas o tempo de estabilização é de 135 minutos.

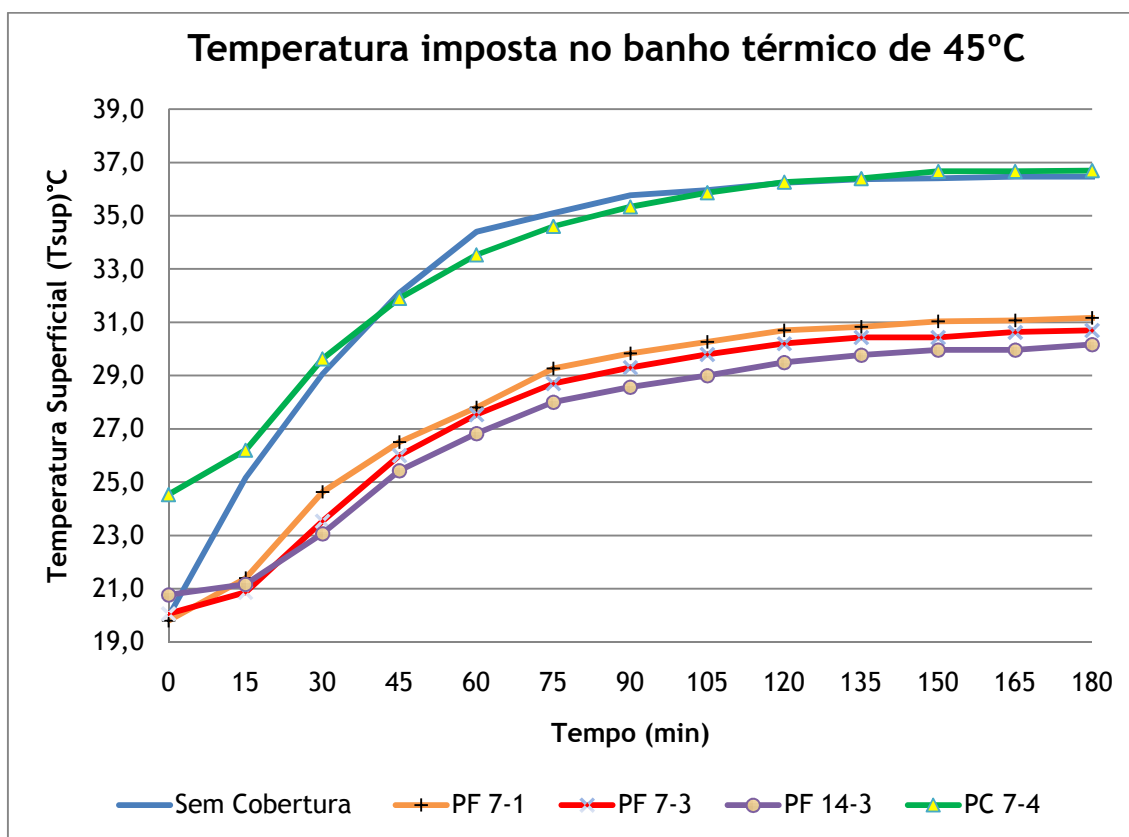


Gráfico 4.10 Curvas de funcionamento Temperatura Superficial/Tempo, com o banho térmico a uma temperatura de 45°C

A T_{sup} tende a estabilizar o seu valor máximo ao fim de 150 minutos para os revestimentos em estudo. Continua a ser o PC 7-4 a apresentar uma T_{sup} final mais elevada (36,7°C).

São verificados no gráfico 4.10 resultados da evolução das curvas do T_{sup} /Tempo semelhantes aos analisados no gráfico 4.9.

Tabela 4.5 Resultados experimentais para a temperatura de referência de 45°C

Tempo (min)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
Sem revestimento superficial ($T_{amb} = 21^{\circ}\text{C}$)													
Tsup (°C)	20,0	25,2	29,1	32,1	34,4	35,1	35,8	36,0	36,2	36,4	36,4	36,5	36,5
DT (°C)	-1,0	4,2	8,1	11,1	13,4	14,1	14,8	15,0	15,2	15,4	15,4	15,5	15,5
Entrada	19,8	44,3	44,5	44,6	44,5	44,5	44,6	44,6	44,6	44,6	44,6	44,6	44,5
Flutuante de 7 mm e feltro de polietileno de 1 mm ($T_{amb} = 19,6^{\circ}\text{C}$)													
Tsup (°C)	19,8	21,4	24,6	26,5	27,8	29,3	29,8	30,3	30,7	30,8	31,0	31,1	31,2
DT (°C)	0,2	1,8	5,0	6,9	8,2	9,7	10,2	10,7	11,1	11,2	11,4	11,5	11,6
Entrada	20	44,5	44,5	44,6	44,6	44,6	44,6	44,7	44,5	44,6	44,6	44,5	44,5
Flutuante de 7 mm e feltro de polietileno de 3 mm ($T_{amb} = 20,7^{\circ}\text{C}$)													
Tsup (°C)	20,1	20,9	23,5	26,0	27,5	28,7	29,3	29,8	30,2	30,4	30,4	30,6	30,7
DT (°C)	-0,6	0,2	2,8	5,3	6,8	8,0	8,6	9,1	9,5	9,7	9,7	9,9	10,0
Entrada	19,8	44,4	44,5	44,6	44,6	44,6	44,6	44,5	44,6	44,6	44,6	44,6	44,5
Flutuante de 14 mm e feltro de polietileno de 3 mm ($T_{amb} = 21,5^{\circ}\text{C}$)													
Tsup (°C)	20,8	21,2	23,1	25,4	26,8	28,0	28,6	29,0	29,5	29,8	30,0	30,0	30,2
DT (°C)	-0,7	-0,3	1,6	3,9	5,3	6,5	7,1	7,5	8,0	8,3	8,5	8,5	8,7
Entrada	19,9	44,5	44,6	44,6	44,6	44,6	44,6	44,6	44,5	44,6	44,6	44,7	44,6
Cerâmica ($T_{amb} = 23,7^{\circ}\text{C}$)													
Tsup (°C)	24,5	26,2	29,6	31,9	33,5	34,6	35,3	35,9	36,3	36,4	36,7	36,7	36,7
DT (°C)	0,8	2,5	5,9	8,2	9,8	10,9	11,6	12,2	12,6	12,7	13,0	13,0	13,0
Entrada	24,8	44,4	44,5	44,6	44,5	44,5	44,5	44,5	44,5	44,5	44,5	44,6	44,6

Em suma, tal como verificado nos casos anteriores o PC 7-4 é o revestimento com o qual se obtém melhores resultados. Com o aumento da temperatura do banho térmico verifica-se uma maior dissipação de energia, o que pode ser explicado pelo aumento da DT.

4.2 Comentários adicionais

Durante a realização dos ensaios observaram-se os seguintes aspectos:

- O banho térmico tem uma fonte de ar quente que pode influenciar a temperatura superficial;
- O provete apresenta um aumento da temperatura da periferia para o centro. A temperatura na superfície para as zonas A e C sente-se mais elevada, simplesmente ao toque, que na zona B. Isto deve-se à configuração do ramal utilizada. A zona central tem mais espaço sem tubagem pela necessidade de inverter o sentido;
- As temperaturas internas e superficiais (no plano 2 e 3) tendem a ter valores muito próximos, não existindo uma grande variação no plano vertical;
- Os valores da temperatura de entrada e de saída do fluido são sempre muito próximos, este caso deve-se por esta configuração do ramal funcionar como um permutador em contra corrente e o provete ter dimensões inferiores a 1m^2 ;
- A recolha dos dados realizou-se com a utilização de um termómetro digital o que levou à necessidade de ler as temperaturas uma a uma, que criou uma diferença de tempo entre a recolha da temperatura do primeiro e último termopar. Para minimizar erros, a sequência da recolha das temperaturas dos termopares foi sempre igual. Uma forma de reduzir este erro seria a utilização de um termómetro electrónico;
- O pico de aumento de temperatura é verificado na primeira hora de realização de cada ensaio. A partir deste ponto, para diferentes temperaturas no banho, correspondem diferentes fases de ganho de estabilidade na T_{sup} .

5 Conclusões e recomendações para trabalho futuro

5.1 Conclusões

Da análise de todos os gráficos apresentados no capítulo 4, conclui-se que o revestimento PC 7-4 é o que permite obter melhores resultados. A utilização deste revestimento revelou melhores prestações que no provete sem cobertura, isto apesar da resistência térmica do revestimento PC 7-4 ser superior. Esta conclusão pode indicar que a cerâmica promove a transferência de calor e o aumento da temperatura superficial. Este resultado vai de encontro a estudos já realizados, Risueño (2007) concluiu que no caso de materiais de origem mineral como a cerâmica ou a mármore a resposta é mais rápida que o caso de revestimentos provenientes de materiais como a madeira ou tecido por ter uma menor resistência térmica. Também Mingqing et. al. (2007) com a análise de dois tipos de revestimento, madeira e cerâmica verificou o mesmo, a cerâmica proporciona uma melhor transferência de calor para o ar interior.

Neste estudo verificou-se que o aumento da temperatura do banho térmico implica o aumento do tempo de estabilização da T_{sup} .

Conclui-se ainda que a T_{amb} é um factor importante na consideração da temperatura do banho a utilizar e na determinação do tempo necessário para atingir a T_{sup} pretendida.

Da análise da prestação dos revestimentos flutuantes conclui-se que quanto maior é a temperatura do banho térmico, menor é a diferença de resultados entre eles. Ou seja, diminui a influência da espessura do feltro e do revestimento flutuante. A diferença da resistência térmica dos revestimentos flutuantes para temperaturas de banho térmico mais elevadas não é visível.

Neste estudo conclui-se que o aumento da temperatura do banho térmico permite uma maior dissipação de energia, o que pode ser explicado pelo aumento da DT. Para temperaturas do banho térmico mais elevadas, a distância entre a temperatura do banho e a T_{sup} final aumenta, existe uma maior dissipação de calor para o ar ambiente.

Como o provete utilizado tem menos de 1 m^2 e os ensaios foram realizados numa sala de grandes dimensões a influência deste na T_{amb} não se fez sentir, daí o estudo centrar-se na análise da T_{sup} .

5.2 Recomendações para trabalho futuro

Com a evolução deste trabalho pode sugerir-se para trabalho futuro:

- A realização de testes para os pisos analisados numa sala acondicionada, estudando o comportamento destes revestimentos em condições de temperatura ambiente estipuladas, para as diversas estações e determinada zona geográfica;
- Realização de testes para outros revestimentos superficiais de piso;
- Estudo de diferentes configurações do ramal da tubagem e utilização de outros materiais na tubagem;
- Analisar o efeito de objectos que sobrepõem o revestimento superficial, simulando os mais variados materiais e disposições;
- Analisar com recurso à termografia o efeito da passagem do fluido pela tubagem, os pontos de maior fonte de calor;
- Estudo do melhor revestimento a acumular mais energia térmica, ou seja após acondicionamento da sala, quanto tempo esta demora a retomar a temperatura ambiente.
- Estudo do desempenho de um piso radiante usando um protótipo em que o piso ocupa toda a divisão.

6 Referências Bibliográficas

ASHRAE, *ASHRAE Handbook*, Fundamentals. Atlanta, GA, 1997

Athienitis, A. K. e Chen, Y. , *The Effect of Solar Radiation on Dynamic Thermal Performance of Floor Heating Systems*, Elsevier, 25 de Janeiro 2000

Baskin, Evelyn, *Evaluation of Hydronic Forced-Air and Radiant Slab Heating and Cooling Systems*, ASHRAE Transactions: Symposia, pp. 525-534, 2005

Bozkır, O., Canbazoglu, S. , *Unsteady thermal performance analysis of a room with serial and parallel duct radiant floor heating system using hot airflow*, Energie and Buildings, Elsevier, 10 de Janeiro, 2004

Chen Y. e 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

Ho, S. Y., Hayes, R. E. e Wood, R. K., *Simulation of the dynamic behaviour of a hydronic floor heating system*, Departamento de Engenharia Química da Universidade de Alberta, Edmonton, Alberta T6G 2G6, Canadá, Heat Recovery Systems & CHP Vol. 15. No. 6, pp. 505-519, Pergamon, Elsevier Science Ltd, 1994

Incropera, Frank P., DeWitt, David P., *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*, School of Mechanical Engineering Purdue University, tradução de Sergio Stamile Soares, Rio de Janeiro, LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 4ª edição, 1998

Karadag, Refet, e Akgöbek, Ömer, *The prediction of convective heat transfer 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

Kilic, Muhsin e 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

Kreith, Frank, Bohn, Mark S., *Princípios de Transferência de Calor*, Tradução de All Tasks, Revisão técnica de Flávio Maron Vichi e Maria Teresa Castilho, São Paulo, Pioneira Thomson Learning, 2003

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

Lavere, Tracy, *In-floor radiant heat for resorts*, Engineered Systems, pp. 28-30, September 2009

Mingqing , S., Xinying, M., Xiaoying, W., Zuofu, H. e 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

Miriel, J., Serres, L., Trombe, A., *Radiant ceiling panel heating-cooling systems: experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumptions*, Civil Engineering Research Group (GRGC) e Laboratoire d'Etudes Thermiques et Mecaniques, França, Applied Thermal Engineering 22 ,1861-1873, Elsevier Science, 2002

Risueño, Manuel Tórtola, *Ventajas e inconvenientes del suelo radiante respecto a otros sistemas de calefaccio*, Artigo técnico, pp. 58-62, Dezembro de 2007

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

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

Scheatzle, David (Life Member ASHRAE) *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

Watson, Richard D., Chpman, Kirby S., *Radiante Heating and Cooling Handbook*, McGraw-Hill Handbooks, United States of America, 2002

Zaheer-uddin, M., Zhang, Z. L., Cho, S. H. *Augmented control strategies for radiant floor heating systems*, International Journal of Energy Research, pp. 79-92, 2002

Endereços Electrónicos:

Cabhilt, *Pavimento Radiante Eléctrico*, in: www.cabhilt.com (acedido a 13/02/2010)

Asturcantabro Instalaciones, *Calefacción por suelo radiante. Un sistema económico y confortable*, Asturcantabro Instalaciones, in: www.asturcantabro.es (acedido a 15/09/2010)

DEVI, *Elevado e inteligente conforto - Sistemas de aquecimento por piso radiante*, Manual técnico, in: www.devi.com (acedido a 03-03-2010)

Donoso, José Pedro, *Transferência de calor por radiação*, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, in: www.ifsc.usp.br (acedido a 20/04/2010)

Heliflex, *Tabela de preços*, in: www.heliflex.pt (acedido a 2-12-2009)

Manual Técnico IberFibran, *Aplicação de poliestireno extrudido na envolvente dos edifícios*, in: www.iberfibran.pt (acedido a 2-12-2009)

Omega Engineering, Inc., *Thermocouples - An Introduction*, in: www.omega.com (acedido a 16-04-2010)

Piso Radiante, *Piso Radiante eléctrico*, in: www.pisoradiante.org (acedido a 10/03/2010)

Polisol, *Electricidade e Energia Solar, Lda., Tipos de piso radiante*, in: www.polisol.pt (acedido a 20/02/2010)

Präs, Alberto Ricardo, *Formas de Radiação: Emissores de Luz*, in: www.fisica.net (acedido a 20/04/2010)

Rocatherm, Sistemas de aquecimento, *Aquecimento por piso radiante e piso radiante eléctrico*, in: www.rocatherm.com.br (acedido a 15/06/2010)

RPA - Radiant Panel Association, *The Basics of Radiant* in: www.radiantpanelassociation.org (acedido a 25-9-2010)

Solarconnect, Energia solar, Climatização e Domótica, *Piso radiante*, in: www.solarconnect-energias.com (acedido a 15/01/2010)

Standard hidráulica S.A.U., *Sistema de calefacción por Suelo Radiante*, Manual técnico e de instalação in: www.standardhidraulica.com (acedido a 15-06-2010)

Warmup, *Vantagens dos sistemas de aquecimento radiante eléctricos em relação aos sistemas de água*, in: www.warmup.pt (acedido a 05-06-2010)