



**FCTUC** DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **Sistemas de aquecimento a água com superfícies radiantes: simulação e verificação de parâmetros de projeto**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na  
Especialidade de Construções

Autor

**Marina Alexandra Portela Dias**

Orientador

**Luís Manuel Cortesão Godinho**

**Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, Janeiro, 2014**

## **AGRADECIMENTOS**

No fim de mais uma etapa, não posso esquecer todas as pessoas que, de alguma forma, foram importantes no meu percurso académico:

Os meus sinceros agradecimentos ao Professor Luís Manuel Cortesão Godinho e ao Professor Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes, meus orientadores, pela disponibilidade e pelos conhecimentos que me transmitiram, imprescindíveis para a realização do meu trabalho.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais e à minha irmã, por todo o esforço, pelo apoio e motivação que me transmitiram, não apenas ao longo do meu percurso académico, como em todas as fases da minha vida. Obrigado por acreditarem sempre em mim!

Aos meus amigos, que sempre me apoiaram, agradeço por me acompanharem ao longo desta etapa, sem eles este caminho teria sido bem mais difícil.

## RESUMO

O conforto térmico que os edifícios proporcionam aos seus ocupantes é um aspeto de grande importância. Por essa razão, sempre houve grandes investimentos por parte de muitas empresas com o objetivo de encontrar materiais e sistemas que contribuíssem para o aumento do conforto térmico dos edifícios.

O sistema de pavimento radiante é um dos exemplos de sistemas de aquecimento que surgiram nas últimas décadas. Por se tratar de um sistema recente, existem alguns aspetos que ainda não foram totalmente analisados.

Este trabalho tem como objetivos fazer um estudo paramétrico e obter ábacos de apoio a projeto, com base em modelação com o Método dos Elementos Finitos, aplicado ao problema de condução de calor. É utilizada a modelação de um sistema de pavimento radiante, através do *software Matlab*.

No estudo paramétrico, é analisada a influência que as espessuras e propriedades térmicas do revestimento do pavimento e da camada de betonilha, o diâmetro dos tubos e o espaçamento entre tubos têm na quantidade de calor que é transmitida através do pavimento.

Numa segunda fase do trabalho são obtidos ábacos, que permitem determinar a temperatura de impulsão da água, de acordo com as necessidades térmicas dos espaços, para vários revestimentos de pavimento e vários espaçamentos entre tubos.

Percebeu-se que, considerando individualmente os parâmetros estudados, a condutibilidade térmica do revestimento e o espaçamento entre tubos são os parâmetros que mais influenciam o comportamento térmico do sistema de pavimento radiante. E concluiu-se que a resistência térmica é o principal parâmetro a que se deve ter atenção no momento do dimensionamento.

Este trabalho é enquadrado na Iniciativa Energia para a Sustentabilidade da Universidade de Coimbra e apoiado pelo projeto Energy and Mobility for Sustainable Regions - EMSURE (CENTRO-07-0224-FEDER-002004).

## **ABSTRACT**

The thermal comfort that buildings provide to their inhabitants is extremely important. Therefore, there have always been great investments by many companies in order to find materials and systems that contribute to the increase in thermal comfort of buildings.

The radiant floor heating system is one of the examples of these systems that have emerged in the last decades. Since this is a recent system there are some aspects that have not been fully analyzed.

The aim of this paper is to make a parametric study and obtain abacus for project support, based on numerical modelling with the Finite Element Method applied to the problem of heat conduction. A modelling of a radiant floor heating system is used, through Matlab software.

The parametric study analyzes the influence that thickness and thermal properties of floor surface and screed layer, pipe diameter and the spacing between tubes have in the amount of heat that is transmitted through the floor.

In the second stage of this study, abacus for determining the entry flow temperature of the water are obtained, according to the thermal requirements of each room, for various floor coverings and spacings between tubes.

It was noticed that, considering the studied parameters individually, the thermal conductivity of the floor and the spacing between tubes are the parameters that most influence in the thermal behavior of the radiant floor heating system. However, it is concluded that the relationship between the thickness and thermal conductivity, in other words, the thermal resistance, is the main parameter that must be taken into account in the design stage.

This work has been framed under the Initiative Energy for Sustainability of the University of Coimbra and supported by the Energy and Mobility for Sustainable Regions - EMSURE - Project (CENTRO-07-0224-FEDER-002004).

---

## ÍNDICE

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento e Motivação .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Estrutura da Dissertação .....	2
2	Revisão Bibliográfica.....	4
2.1	Introdução .....	4
2.2	Componentes do Pavimento .....	4
2.3	Métodos de cálculo expeditos.....	7
2.4	Estudos recorrendo a modelos numéricos e experimentais .....	12
3	Método de Cálculo .....	15
3.1	Introdução ao Método dos Elementos Finitos (MEF) .....	15
3.2	Formulação Numérica.....	16
3.2.1	Problema de condução de calor.....	16
3.2.2	Aplicação do MEF ao problema da condução de calor.....	18
3.3	Verificação do algoritmo .....	19
4	Aplicação do Modelo ao Sistema de Pavimento Radiante.....	22
4.1	Introdução .....	22
4.2	Estudo Paramétrico .....	22
4.3	Estudo de uma solução construtiva com soalho flutuante .....	44
5	Obtenção de ábacos de apoio a projeto .....	47
5.1	Introdução .....	47
5.2	Validação dos ábacos.....	47
5.3	Ábacos de auxílio ao dimensionamento .....	50
6	Conclusões e Trabalhos Futuros .....	59
6.1	Conclusões .....	59
6.2	Trabalhos Futuros .....	61
	Referencias Bibliográficas.....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação da estrutura do sistema de pavimento radiante (adaptado de (Solius, 2013)).	5
Figura 2.2 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água (UPONOR, 2006).	9
Figura 2.3 – Ábaco de cálculo da temperatura média da água, para $e = 83\text{mm}$ (RDZ, 2011).	10
Figura 2.4 – Ábaco de cálculo da temperatura média da água, para $e = 166\text{ mm}$ (RDZ, 2011).	11
Figura 2.5 – Ábaco de cálculo da temperatura média da água, para $e = 249\text{ mm}$ (RDZ, 2011).	11
Figura 3.1 – Diferentes tipos de elementos finitos, para problema bidimensional (Adaptado de (Sousa, 2003)).	15
Figura 3.2 – Malha de elementos finitos, para um problema bidimensional (Adaptado de (Sousa, 2003)).	16
Figura 3.3 – Fluxo de calor que atravessa um elemento infinitesimal (Sousa, 2003).	17
Figura 3.4 – Elemento finito triangular.	19
Figura 3.5 – Representação do problema.	20
Figura 4.1 – Esquema do pavimento de referência.	23
Figura 4.2 – Distribuição da temperatura no pavimento de referência.	24
Figura 4.3 – Distribuição da temperatura no pavimento para $\lambda_r = 0,15\text{ W/m.}^\circ\text{C}$ .	25
Figura 4.4 – Distribuição da temperatura no pavimento para $\lambda_r = 0,25\text{ W/m.}^\circ\text{C}$ .	26
Figura 4.5 – Distribuição da temperatura no pavimento para $\lambda_r = 0,41\text{ W/m.}^\circ\text{C}$ .	26
Figura 4.6 – Distribuição da temperatura no pavimento para $\lambda_r = 1,04\text{ W/m.}^\circ\text{C}$ .	27
Figura 4.7 – Distribuição da temperatura no pavimento para $S_r = 0,01\text{ m}$ .	28
Figura 4.8 – Distribuição da temperatura no pavimento para $S_r = 0,015\text{ m}$ .	29
Figura 4.9 – Distribuição da temperatura no pavimento para $S_r = 0,02\text{ m}$ .	29
Figura 4.10 – Distribuição da temperatura no pavimento para $S_r = 0,025\text{ m}$ .	30
Figura 4.11 – Distribuição da temperatura no pavimento para $\lambda_b = 1\text{ W/m.}^\circ\text{C}$ .	31
Figura 4.12 – Distribuição da temperatura no pavimento para $\lambda_b = 1,2\text{ W/m.}^\circ\text{C}$ .	32
Figura 4.13 – Distribuição da temperatura no pavimento para $\lambda_b = 1,4\text{ W/m.}^\circ\text{C}$ .	32
Figura 4.14 – Distribuição da temperatura no pavimento para $\lambda_b = 1,7\text{ W/m.}^\circ\text{C}$ .	33
Figura 4.15 – Distribuição da temperatura no pavimento para $S_b = 0,04\text{ m}$ .	34
Figura 4.16 – Distribuição da temperatura no pavimento para $S_b = 0,06\text{ m}$ .	34
Figura 4.17 – Distribuição da temperatura no pavimento para $S_b = 0,08\text{ m}$ .	35
Figura 4.18 – Distribuição da temperatura no pavimento para $S_b = 0,1\text{ m}$ .	35
Figura 4.19 – Distribuição da temperatura no pavimento para $\phi = 0,014\text{ m}$ .	36

---

Figura 4.20 – Distribuição da temperatura no pavimento para $\phi=0,016$ m.....	37
Figura 4.21 – Distribuição da temperatura no pavimento para $\phi=0,017$ m.....	37
Figura 4.22 – Distribuição da temperatura no pavimento para $\phi=0,020$ m.....	38
Figura 4.23 – Distribuição da temperatura no pavimento para $\phi=0,025$ m.....	38
Figura 4.24 – Distribuição da temperatura no pavimento para $e=0,1$ m. ....	39
Figura 4.25 – Distribuição da temperatura no pavimento para $e=0,2$ m.....	40
Figura 4.26 – Distribuição da temperatura no pavimento para $e=0,3$ m. ....	40
Figura 4.27 – Distribuição da temperatura no pavimento para $e=0,5$ m. ....	41
Figura 4.28 – Distribuição da temperatura no pavimento para $e=0,6$ m. ....	41
Figura 4.29 – Distribuição da temperatura de superfície, para $e=0,3$ m. ....	42
Figura 4.30 – Distribuição da temperatura de superfície, para $e=0,6$ m. ....	42
Figura 4.31 – Distribuição da temperatura, para o revestimento flutuante em madeira sem aplicação de Ethafoam (à esquerda) e com aplicação de Ethafoam (à direita). ....	45
Figura 4.32 – Distribuição da temperatura, para o revestimento em soalho sem aplicação de Ethafoam (à esquerda) e com aplicação de Ethafoam (à direita). ....	45
Figura 5.1 – Ábaco de cálculo de temperatura média da água, com $e =0,088$ m.....	48
Figura 5.2 – Ábaco de cálculo de temperatura média da água, com $e =0,166$ m.....	49
Figura 5.3 – Ábaco de cálculo de temperatura média da água, com $e =0,249$ m.....	49
Figura 5.4 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para vários tipos de revestimento. ....	51
Figura 5.5 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para um revestimento de Parquet com 12 mm de espessura.....	53
Figura 5.6 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para um revestimento de Parquet com 15 mm de espessura.....	53
Figura 5.7 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para um revestimento de Parquet com 22 mm de espessura.....	54
Figura 5.8 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para um revestimento em Soalho. ....	54
Figura 5.9 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para um revestimento em Mosaico. ....	55
Figura 5.10 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para um revestimento em Mármore. ....	55
Figura 5.11 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para um revestimento em Tijoleira.....	56
Figura 5.12 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para um revestimento de Cortiça. ....	56
Figura 5.13 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para um revestimento de Linóleo.....	57

---

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1– Características dos revestimentos (UPONOR, 2006).....	6
Quadro 4.1 - Solução estrutural do sistema de pavimento radiante. ....	23
Quadro 4.2 – Resultados da temperatura média da água para cada uma das condutibilidades térmicas do revestimento consideradas. ....	25
Quadro 4.3 – Resultados da temperatura média da água para cada uma das espessuras do revestimento consideradas.....	28
Quadro 4.4 – Resultados da temperatura média da água para cada uma das condutibilidades térmicas da camada de betonilha consideradas. ....	31
Quadro 4.5 – Resultados da temperatura média da água para cada uma das espessuras da camada de betonilha consideradas.....	33
Quadro 4.6 – Resultados da temperatura média da água para cada um dos diâmetros considerados. ....	36
Quadro 4.7 – Resultados da temperatura média da água para cada um dos espaçamentos entre tubos considerados.....	39
Quadro 4.8 – Constituição do pavimento. ....	44
Quadro 5.1 – Informação sobre o sistema de pavimento radiante (RDZ, 2011).....	47
Quadro 5.2 – Constituição do sistema de pavimento radiante. ....	51



## **ABREVIATURAS**

EPS – Poliestireno Expandido

MEF – Método dos Elementos Finitos

PEX – Polietileno Reticulado

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

XPS – Poliestireno Extrudido

## **SIMBOLOGIA**

$A$  – Área

$e$  – Espaçamento entre tubos

$K_a$  – Coeficiente de transmissão térmica da camada sobre os tubos

$q$  – Fluxo de calor

$Q$  – Fonte de calor

$Q$  – Carga térmica de aquecimento

$Q_i$  – Ganho interno de calor

$Q_t$  – Carga térmica de transmissão de calor

$Q_v$  – Carga térmica de ventilação

$S$  – Espessura

$S_b$  – Espessura da camada de betonilha

$S_i$  – Espessura do isolamento térmico

$S_r$  – Espessura do revestimento do pavimento

$S_t$  – Espessura do tubo

$\alpha$  – Coeficiente de transmissão de calor superficial

$\varphi$  – Diâmetro do tubo

$\lambda$  – Condutibilidade térmica

$\lambda_b$  – Condutibilidade térmica da betonilha

$\lambda_i$  – Condutibilidade térmica do isolamento térmico

$\lambda_r$  – Condutibilidade térmica do revestimento do pavimento

$\theta_{int}$  – Temperatura interior

$\theta_{imp}$  – Temperatura de impulsão da água

$\theta_{ma}$  – Temperatura média da água

$\theta_s$  – Temperatura de superfície

$\theta_{se}$  – Temperatura da superfície exterior

$\theta_{si}$  – Temperatura da superfície interior

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento e Motivação

Numa sociedade cada vez mais exigente como a atual, a procura de condições de conforto é cada vez maior. Desta forma, o conforto ambiental interior que os edifícios proporcionam aos seus ocupantes sempre foi, e continua a ser, uma preocupação, tanto nos seus locais de trabalho como nos locais de lazer, influenciando a produtividade e a saúde destes ocupantes.

O conforto das pessoas depende, essencialmente, da térmica, da iluminação, da acústica e da qualidade do ar do ambiente interior dos edifícios (Pinto, 2000).

Olhando para a vertente térmica dos edifícios, percebe-se que a evolução tecnológica e económica deu um grande contributo para o surgimento de novos materiais, técnicas de construção e, sistemas de climatização e de ventilação, que garantam um bom desempenho térmico dos edifícios.

Contudo, o conforto térmico que os sistemas de climatização e de ventilação proporcionam só poderá ser totalmente atingido se, durante a conceção dos sistemas, as necessidades térmicas dos edifícios forem estudadas, para posteriormente se determinar a quantidade de calor que se deve introduzir no ambiente interior.

Acontece que alguns sistemas de climatização são recentes, como é o caso dos sistemas de pavimento radiante hidráulicos, e ainda não foram totalmente aprofundados. Desta forma, existem ainda algumas dúvidas sobre quais os parâmetros que influenciam o desempenho térmico destes sistemas, e de que forma o fazem. De igual modo, ainda existe alguma dificuldade em determinar a temperatura da água das tubagens, para muitas soluções construtivas de pavimentos.

Existem alguns ábacos, desenvolvidos por fabricantes deste tipo de sistemas, que permitem determinar diretamente a temperatura da água que circula nos tubos, contudo não se sabe até que ponto esses ábacos podem ser aplicados a determinados tipos de pavimentos.

A modelação matemática deste tipo de sistemas permite perceber melhor como funcionam e quais os fatores que condicionam o seu desempenho térmico, bem como determinar parâmetros de projeto, de acordo com a constituição de cada pavimento.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivos principais:

- O estudo da influência de vários parâmetros, que caracterizam o sistema de pavimento radiante, no desempenho térmico do sistema;
- Obtenção de ábacos que permitam determinar, de uma forma direta, o valor da temperatura da água, que circula nos tubos do sistema de pavimento radiante, quando entra no sistema, por forma a satisfazer as necessidades térmicas de projeto.

Com recurso à aplicação informática *Matlab* e a uma implementação do Método dos Elementos Finitos, modelar-se-á uma representação do perfil transversal do pavimento que se pretende estudar. Posteriormente, será possível simular a distribuição da temperatura ao longo da espessura do pavimento e obter as temperaturas médias da água nos tubos e à superfície do pavimento.

Primeiramente será realizado um estudo paramétrico onde são analisados os seguintes parâmetros:

- Espessura do revestimento e da camada de betonilha do pavimento;
- Condutibilidade térmica do revestimento e da camada de betonilha do pavimento;
- Diâmetro dos tubos;
- Espaçamento entre os tubos.

Numa segunda fase, serão obtidas curvas de ábacos existentes na literatura, que relacionam as necessidades térmicas dos espaços com a temperatura que a água deve ter para satisfazer essas necessidades. Deste modo, conseguir-se-á saber com que precisão se consegue obter os valores das curvas através do modelo implementado. Seguidamente obter-se-ão curvas para sistemas de pavimento radiante que apresentam diferentes características, que possam servir de apoio na fase de execução do projeto deste tipo de sistemas de aquecimento.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

O primeiro capítulo deste trabalho consiste numa introdução ao tema, explicando os motivos que levaram à sua escolha e a sua importância, e expondo os objetivos do trabalho e a sua estrutura.

No segundo capítulo, é feita uma revisão bibliográfica, onde se indicam os métodos que são geralmente usados na determinação da temperatura da água que circula no sistema de

pavimento radiante, e estudos que foram feitos por alguns autores, sobre sistemas de pavimento radiante.

No terceiro capítulo, é feita uma pequena introdução ao Método dos Elementos Finitos, explicando de uma forma simples o que é este método, em que se baseia e os seus campos de aplicação. Seguidamente é exposto o problema de condução de calor, e é apresentado o Método dos Elementos Finitos aplicado ao problema da condução de calor. Por fim, é feita a verificação do algoritmo, através da comparação dos resultados de um problema simples, obtidos pelo método numérico e pelo método analítico.

No quarto capítulo é aplicado o modelo desenvolvido no capítulo três, num estudo que tem como objetivo principal perceber como vários parâmetros, do sistema de pavimento radiante, influenciam o desempenho térmico dos sistemas de pavimento radiante.

No quinto capítulo são desenvolvidos ábacos que possam servir de apoio a projeto, ou seja, que possam ser usados no processo de dimensionamento, para a determinação da temperatura da água do sistema de pavimento radiante.

No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e expostos alguns trabalhos que se julga serem interessantes desenvolver em projetos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Introdução

As condições térmicas adversas foram sempre uma preocupação para o homem, que tem tentado contornar esta situação, inicialmente com recurso ao fogo e, com o avançar dos tempos, com recurso a outras técnicas de aquecimento.

Na Roma antiga eram usados sistemas de aquecimento, designados de hipocaustos, que consistiam no aquecimento do ar que circulava em espaços sob os pavimentos e, que depois era conduzido através das paredes, saindo através de orifícios que se encontravam nas paredes. O ar era aquecido por fornos que se encontravam abaixo do pavimento onde circulava o ar (Godinho, 2009). Os primeiros sistemas que consistiam na circulação de água quente foram criados por engenheiros russos, no século XVIII (Godinho, 2009). O conceito destas técnicas é semelhante ao conceito dos sistemas de pavimento radiante, que hoje em dia existem.

O sistema de pavimentos radiantes hidráulico é um sistema de aquecimento, que consiste em fazer circular água aquecida num circuito de tubagens, que vai diminuindo de temperatura, pois a sua energia térmica vai sendo libertada para o pavimento que, por sua vez, transmite energia para o espaço a aquecer (Godinho, 2009).

A eficácia do sistema de pavimento radiante depende muito da temperatura de impulsão da água (temperatura da água à saída da caldeira); esta, por sua vez, depende das necessidades de aquecimento do local e da estrutura do sistema de pavimento radiante (Lopes, 2009).

Neste capítulo são apresentados métodos de cálculo normalmente usados para determinar a temperatura da água, e estudos realizados por alguns autores sobre o sistema de pavimento radiante. Mas antes, é essencial perceber qual é a estrutura de um sistema de pavimento radiante e os materiais geralmente usados, bem como as suas características térmicas.

### 2.2 Componentes do Pavimento

Os pavimentos são compostos por camadas de diferentes materiais. As camadas têm distintas contribuições no funcionamento dos sistemas de pavimento radiante, que podem ser mais ou menos favoráveis, dependendo das características dos materiais que constituem cada uma.

Através da Figura 2.1 pode perceber-se como é a solução estrutural, mais típica, de um pavimento com um sistema de pavimento radiante integrado.

O revestimento é a camada superior do pavimento, e é através desta camada que a energia é transmitida para o ambiente interior, por convecção. Essa energia é transmitida ao revestimento, pela camada de betonilha que se encontra sob este. Na camada de betonilha, está incorporada a tubagem por onde circula a água quente, e tem como principal objetivo armazenar a energia térmica que lhe é transmitida pela água na tubagem. Para impedir que a energia térmica se perca para locais não aquecidos, é colocada uma camada de isolamento térmico entre a camada de betonilha e a laje de betão.

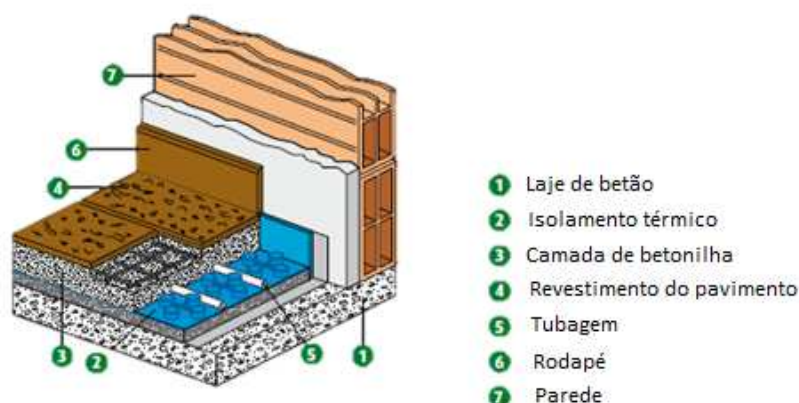


Figura 2.1 – Representação da estrutura do sistema de pavimento radiante (adaptado de (Solius, 2013)).

De seguida, é abordada cada uma das componentes da estrutura do sistema de pavimento radiante:

- Revestimentos de pavimento

O sistema de pavimento radiante é compatível com todos os tipos de revestimento de pavimento. A espessura ( $S$ ) e condutibilidades térmicas ( $\lambda$ ) são os parâmetros que interessam conhecer sobre os revestimentos, pois através destes valores consegue-se estudar o contributo térmico dos revestimentos. No Quadro 2.1 apresentam-se alguns desses tipos de revestimentos, assim como as suas características.

Quadro 2.1– Características dos revestimentos (UPONOR, 2006).

Revestimento	S (m)	$\lambda$ (W/m.°C)
Parquet 12	0,012	0,13
Parquet 15	0,015	0,14
Parquet 22	0,022	0,14
Soalho	0,020	0,95
Tijoleira	0,020	1,00
Mármore	0,030	3,00
Mosaico	0,025	0,42
Cortiça	0,010	0,07
Linóleo	0,002	0,17

- Camada de betonilha

A camada de revestimento assenta sobre uma camada de betonilha, que por sua vez incorpora o circuito de tubagem, e tem um papel importante no desempenho térmico do pavimento porque armazena o calor que lhe é transmitido pela água que circula nos tubos, para posteriormente o transmitir ao revestimento. Deste modo, a espessura desta camada é um parâmetro a que se deve ter atenção na fase de dimensionamento do sistema de pavimento radiante, já que a inércia térmica do sistema aumenta à medida que a espessura da betonilha aumenta e, por outro lado, espessuras muito reduzidas podem pôr em causa a capacidade resistente da betonilha (UPONOR, 2006). Por isso, esta camada pode ter uma espessura máxima que varia entre 8 e 10 cm (Godinho, 2009), com um mínimo de 2,5 cm (MAPEI, 2012).

Como a betonilha é uma argamassa, considera-se que a sua condutibilidade térmica varia entre 1,3 e 1,8 W/m.°C (Santos e Matias, 2006).

- Isolamento térmico

O isolamento térmico é integrado no sistema de pavimento radiante para evitar que o fluxo de calor se dirija para espaços não climatizados (Giacomini, 2004). São considerados como isolantes térmicos os materiais com condutibilidades térmicas inferiores ou iguais a 0,065 W/m.°C (Santos e Matias, 2006). O poliestireno expandido (EPS), a lã de rocha e o poliestireno extrudido (XPS) são os tipos de materiais geralmente usados como isolamento térmico nos sistemas de pavimento radiante. Os valores da condutibilidade térmica do poliestireno expandido e da lã de rocha variam de 0,055 a 0,037 W/m.°C, e de 0,045 a 0,042 W/m.°C, respetivamente. O poliestireno extrudido assume uma condutibilidade térmica de 0,037 W/m.°C (Santos e Matias, 2006).



- Tubagem

A tubagem em sistemas de pavimento radiante tem de apresentar alguma flexibilidade (Godinho, 2009) e um bom comportamento a altas temperaturas, e por isso, opta-se, na maioria das vezes, por usar tubagem em PEX. Este material pode ser utilizado com temperaturas até aos 90 °C (RDZ, 2011).

Consultando os catálogos de alguns fabricantes de sistemas de pavimento radiante percebe-se que os diâmetros dos tubos usados nestes sistemas variam, normalmente, entre os 14 mm e os 20 mm. Para além das dimensões dos tubos onde a água circula, também o espaçamento entre esses tubos é um parâmetro a ter atenção. Esta distância normalmente assume valores de 15, 16, 20, 24 ou 30 cm (UPONOR, 2006).

### **2.3 Métodos de cálculo expeditos**

A integração de sistemas de aquecimento nos edifícios tem como objetivo aumentar o conforto térmico nos edifícios, mas esse conforto depende muito do processo de dimensionamento destes sistemas (Holopainen et al., 2007). A temperatura da água que tem de entrar no circuito de tubagens é um dos fatores a determinar num processo de dimensionamento de um sistema de aquecimento radiante, de forma que as necessidades térmicas sejam satisfeitas.

A carga térmica reflete as necessidades de aquecimento, ou seja, reflete a energia que deve ser produzida pelo sistema de aquecimento de forma a compensar as perdas de energia do local, mantendo o conforto térmico interior (UPONOR, 2006). A carga térmica deve ser conhecida previamente, devendo seguir-se um método de cálculo adequado (veja-se, por exemplo, o especificado no Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de Abril (RCCTE)). Numa abordagem simples, mas adequada à análise deste método, a carga térmica pode ser dada por (UPONOR, 2006):

$$Q = Q_i + Q_t + Q_v \quad (1)$$

em que:

Q – Carga térmica de aquecimento (W)

Q<sub>i</sub> – Ganho interno de calor (W)

Q<sub>t</sub> – Carga térmica de transmissão de calor (W)

Q<sub>v</sub> – Carga térmica de ventilação (W).

Dividindo a carga térmica pela área da superfície do local fica a conhecer-se o fluxo de calor que tem de ser transferido por unidade de área da superfície do pavimento para o ambiente interior. Mas, para além das perdas térmicas, o calor transmitido pela água do sistema tem de garantir uma determinada temperatura no interior do espaço.

Conhecidas as exigências térmicas do local é possível determinar a temperatura média da água que circula na tubagem do sistema de pavimento radiante através da Equação (2), se se conhecer a composição do pavimento, ou seja, as várias camadas do pavimento e o material de cada camada (UPONOR, 2006),

$$q = K_a \cdot (\theta_{ma} - \theta_{int}) \quad (2)$$

em que:

$q$  – Fluxo de calor transferido da superfície do pavimento para o ambiente interior ( $W/m^2$ )

$K_a$  – Coeficiente de transmissão térmica da camada sobre os tubos ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$\theta_{ma}$  – Temperatura média da água ( $^\circ C$ )

$\theta_{int}$  – Temperatura interior ( $^\circ C$ ).

O coeficiente de transmissão térmica da camada sobre os tubos é dado por (UPONOR, 2006):

$$K_a = 1 / \left[ \sum \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha} \right] \quad (3)$$

em que:

$S$  – Espessura de cada camada (m)

$\lambda$  – Condutibilidade térmica do material de cada camada ( $W/m \cdot ^\circ C$ )

$\alpha$  – Coeficiente de transmissão de calor da superfície do pavimento ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ), este coeficiente varia entre 10 e 12  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ .

As expressões anteriores correspondem a assumir uma transferência de calor unidimensional, que não fornece resultados credíveis no dimensionamento deste tipo de sistemas, por se tratar de configurações bidimensionais ou tridimensionais (Godinho, 2009). É, por isso, necessário fazer uso de métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos, o Método dos Volumes Finitos ou o Método das Diferenças Finitas (Jin et al., 2010). Por se tratar de métodos de cálculo complexos e de mais difícil aplicação, usualmente recorre-se a ábacos que facilitam a determinação da temperatura da água.

Na Figura 2.2 representa-se um ábaco que pode ser usado na determinação da temperatura de impulsão da água, em função das necessidades térmicas internas e do tipo de revestimento do

pavimento. Este ábaco fornece a diferença entre a temperatura de impulsão da água e a temperatura superficial do pavimento, logo é necessário calcular o valor da temperatura de superfície primeiramente. A partir da Equação (4) pode calcular-se esse valor (Godinho, 2009):

$$q = \alpha (\theta_s - \theta_{int}) \quad (4)$$

em que:

$q$  – Fluxo de calor transferido da superfície do pavimento para o ambiente interior ( $W/m^2$ )

$\alpha$  – Coeficiente de transmissão de calor da superfície do pavimento ( $W/m^2\text{°C}$ ), este coeficiente varia entre 10 e 12  $W/m^2\text{°C}$ .

$\theta_s$  – Temperatura superficial ( $\text{°C}$ )

$\theta_{int}$  – Temperatura interior ( $\text{°C}$ ).

Por questões de conforto dos ocupantes, a temperatura média superficial do pavimento não deve ultrapassar os 30  $\text{°C}$  (UPONOR, 2006).

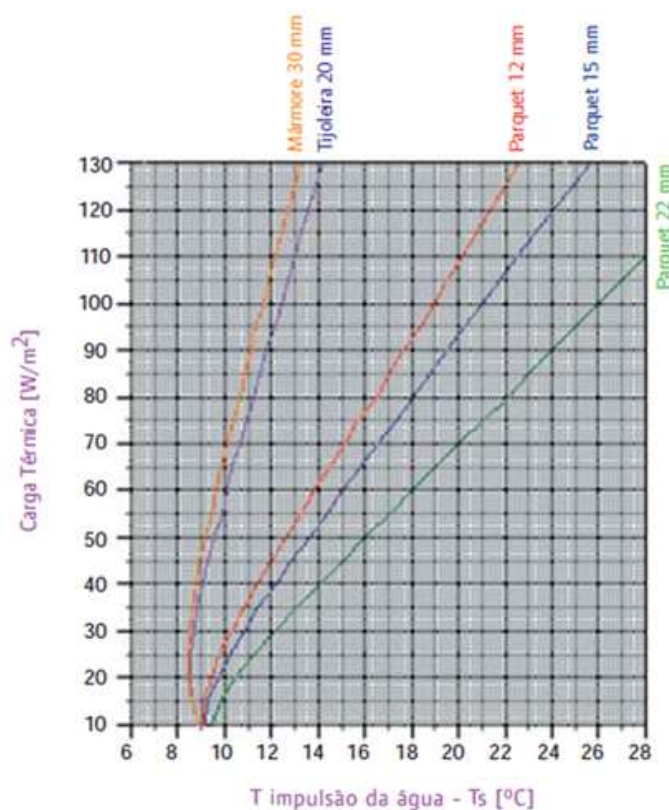


Figura 2.2 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água (UPONOR, 2006).

Deve ter-se em atenção que este ábaco apenas abrange sistemas de pavimento radiante em que o espaçamento entre tubos é de 20 cm e considerando que a diferença entre as temperaturas de impulsão e retorno é de 10 °C (Godinho, 2009).

Existem outros ábacos que auxiliam na determinação da temperatura da água nas tubagens dos sistemas de pavimento radiante, como os que se apresentam na Figura 2.3, na Figura 2.4 e na Figura 2.5, que podem ser consultados no catálogo da RDZ (2011). É de notar que estes ábacos foram executados para soluções específicas de sistemas de pavimento radiante; desta forma deve ter-se em atenção as informações dadas pelo fabricante quando se pretende usar estes ábacos.

Destes ábacos pode estimar-se a diferença entre a temperatura média da água e a temperatura interior do local, em função das necessidades térmicas do local e da resistência térmica do revestimento do pavimento.

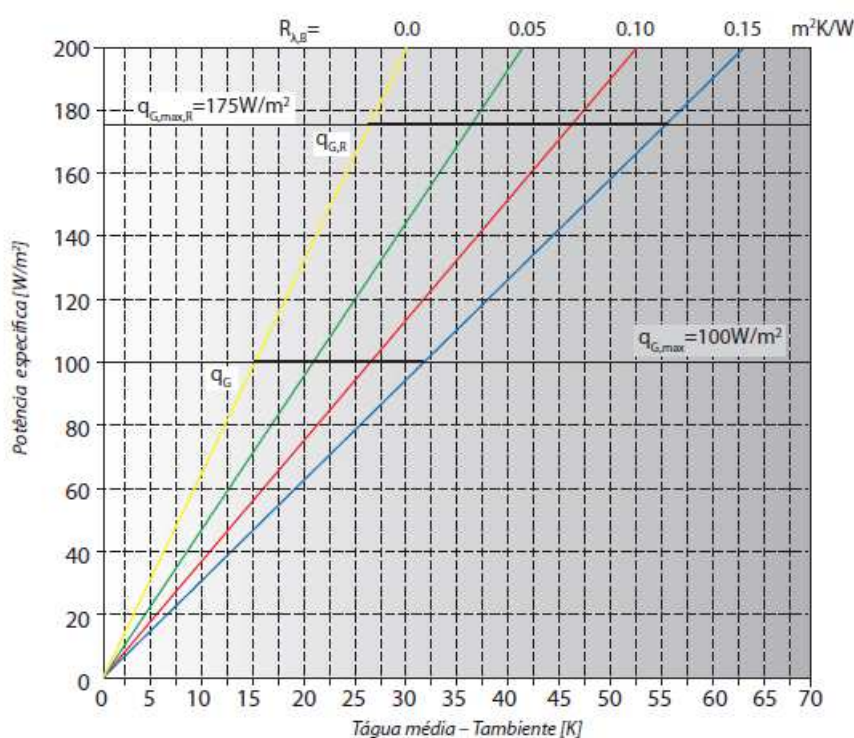


Figura 2.3 – Ábaco de cálculo da temperatura média da água, para  $e = 83mm$  (RDZ, 2011).

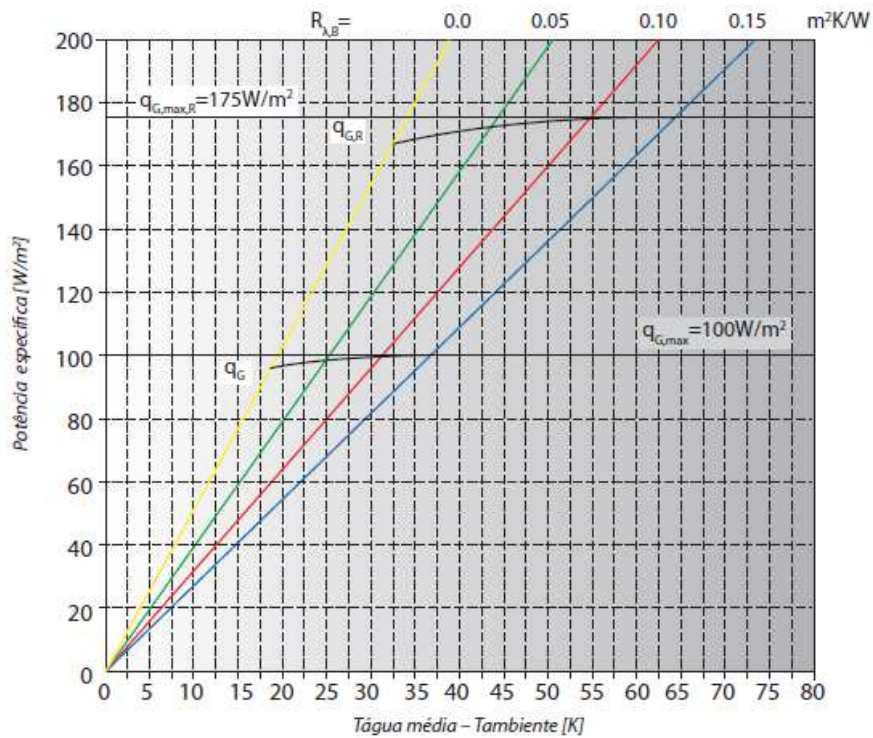


Figura 2.4 – Ábaco de cálculo da temperatura média da água, para  $e = 166$  mm (RDZ, 2011).

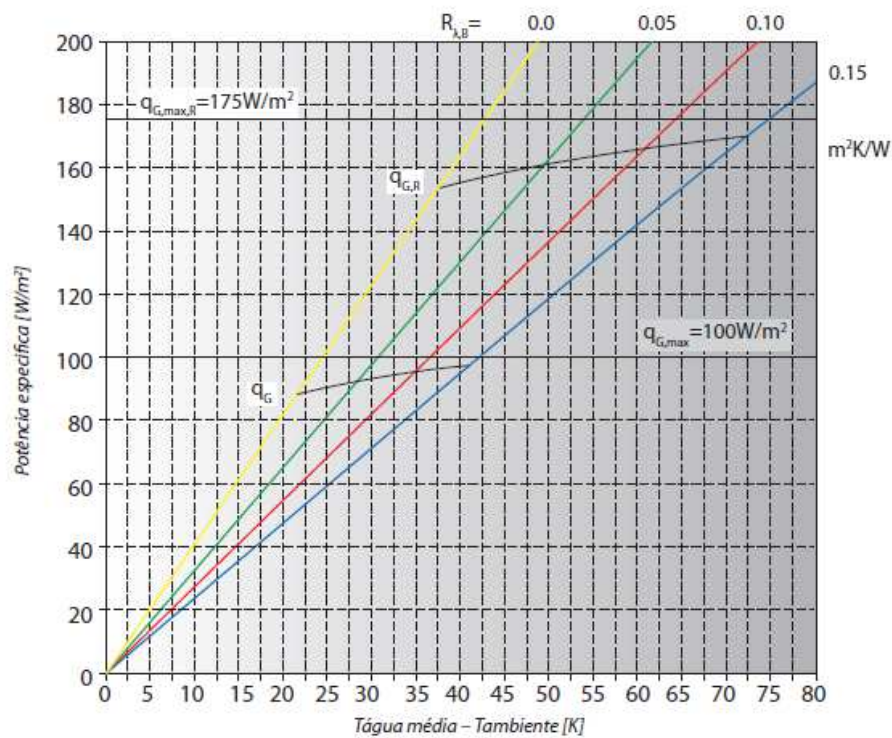


Figura 2.5 – Ábaco de cálculo da temperatura média da água, para  $e = 249$  mm (RDZ, 2011).

## 2.4 Estudos recorrendo a modelos numéricos e experimentais

Os sistemas de pavimento radiante têm sido alvo de análise por parte de muitos investigadores. Perceber como ocorre a transmissão de calor no pavimento e que parâmetros influenciam esse fenómeno é importante, para que na fase de projeto as escolhas das componentes do pavimento e as suas características permitam um bom funcionamento do sistema de aquecimento.

Sattari e Farhanieh (2006) estudaram a influência que alguns parâmetros de projeto têm na performance dos sistemas de pavimento radiante, utilizando o Método dos Elementos Finitos. Verificaram que o número de tubos, o diâmetro destes e o material de que são feitos não têm efeitos significativos sobre o desempenho do sistema de aquecimento por pavimento radiante, e perceberam que a espessura e o tipo de material da camada de revestimento são os parâmetros mais importantes no sistema de aquecimento, sendo a espessura o parâmetro que provoca efeitos mais significativos.

Os sistemas de pavimento radiante têm a vantagem de serem versáteis, pois são compatíveis com qualquer tipo de revestimento. Das conclusões obtidas por Sattari e Farhanieh (2006) percebe-se que o tipo de revestimento é um fator condicionante no desempenho do sistema de pavimento radiante. Assim é preciso perceber que tipos de revestimentos proporcionam uma maior ou menor eficiência do pavimento, porque os revestimentos podem apresentar valores de condutibilidade térmica muito diferentes.

De uma forma geral, os revestimentos mais comuns podem ser de madeira, cerâmicos ou em pedra natural. Os pavimentos de madeira têm características distintas de isolamento térmico, quando comparados com revestimentos de outro tipo de materiais. Esta particularidade pode não ser desejável em algumas situações, no entanto, permite que este tipo de revestimentos tenha a capacidade de manter por mais tempo o ambiente aquecido, conseguindo-se ter o sistema desligado por mais tempo, ao contrário dos revestimentos cerâmicos que são revestimentos que arrefecem muito rapidamente após serem desligados. Este tipo de revestimento é comumente usado sobre sistemas de pavimento radiante por apresentarem uma baixa resistência térmica (Lopes, 2009).

Seo et al. (2011) estudaram a influência do desempenho térmico de pisos de madeira na conservação de energia de sistemas de pavimento radiante. Investigaram formas de melhorar a condutibilidade térmica dos revestimentos de madeira e perceberam que revestimentos de madeira com maior densidade e com menor espessura apresentam mais condutibilidade térmica. Concluíram também que a quantidade de energia que é transferida da superfície do pavimento para o ambiente depende da espessura e do método de instalação do revestimento.

Para além dos materiais que constituem os revestimentos dos pavimentos, os materiais das restantes camadas também têm influência no comportamento térmico do pavimento. É interessante estudar o comportamento dos sistemas de pavimento radiante, integrando novos materiais, como é o caso dos PCM (*Phase Change Materials*).

Os PCM são substâncias que durante o dia recebem o calor proveniente do exterior, que provoca a sua liquefação, armazenando o calor, e durante a noite a diminuição das temperaturas no exterior leva a que os PCM passem ao estado sólido e, assim, libertem calor (Engenhariacivil@, 2013).

Ansuini et al. (2011), estudaram a influência que os materiais de mudança de fase têm no desempenho dos sistemas de pavimento radiante. Estes autores criaram um protótipo de um sistema de pavimento radiante, num quarto, onde integraram uma camada de PCM. Além disso, desenvolveram um modelo 2D, do mesmo pavimento, com base no Método dos Elementos Finitos. Concluíram que existem vantagens económicas no uso dos PCM, no arrefecimento dos espaços no verão, sem que haja interferência com o aquecimento, que o sistema de pavimento radiante proporciona, no período de inverno.

Existem, no entanto, outros parâmetros que interessa estudar mais pormenorizadamente, como a temperatura superficial dos pavimentos, pois é o parâmetro que mais afeta a capacidade de aquecimento do sistema de aquecimento, devendo garantir-se que esta temperatura se mantém inferior a 29 °C, no Inverno, por questões de conforto (Jin et al., 2010).

Jin et al. (2010) propuseram uma nova fórmula, que permite determinar a temperatura da superfície do pavimento onde se insere o sistema de aquecimento por pavimento radiante, assumindo que o pavimento é composto por duas camadas, e perceberam que esta fórmula fornece valores que estão de acordo com valores obtidos experimentalmente e numericamente. Os autores perceberam que a temperatura da superfície do pavimento só é significativamente influenciada pela condutibilidade térmica das camadas que constituem o pavimento, quando essa condutibilidade térmica assume valores inferiores a 2 W/m.°C.

Outros autores também desenvolveram métodos de cálculo para determinar a temperatura da superfície do pavimento, como Zhang et al. (2012). Para além destes parâmetros, também determinaram um método para calcular o fluxo total de calor que o pavimento transmite para o meio, possibilitando conhecer a capacidade de aquecimento do pavimento, e um método de cálculo para determinar as temperaturas máxima e mínima à superfície do pavimento, permitindo perceber qual a uniformidade da temperatura na superfície do pavimento.

Os métodos numéricos que permitem determinar parâmetros de projeto são ferramentas essenciais, no entanto a performance dos sistemas de pavimento radiante ainda não foi totalmente avaliada em *softwares* que possibilitem simular o comportamento destes sistemas.

Holopainen et al. (2007) analisaram uma rede nodal irregular, com o método de equilíbrio de calor por diferenças finitas, num modelo de simulação que possibilitava a determinação de vários parâmetros de projeto e analisar a distribuição da temperatura nas várias camadas do pavimento.

A partir dos estudos e das conclusões a que vários autores chegaram, é possível conhecer algumas limitações em relação à aplicabilidade dos sistemas de pavimento radiante e as soluções construtivas e tipos de materiais que favorecem ou não o desempenho dos sistemas.



## 3 MÉTODO DE CÁLCULO

### 3.1 Introdução ao Método dos Elementos Finitos (MEF)

Tal como referido no capítulo anterior, alguns parâmetros necessários para o dimensionamento são difíceis de determinar. Neste trabalho, proceder-se-á à modelação e simulação de um sistema de pavimento radiante, permitindo de uma forma fácil e rápida determinar os parâmetros pretendidos.

O estudo é realizado com o auxílio do *software Matlab* e o Método dos Elementos Finitos é o método de cálculo usado.

O Método dos Elementos Finitos é um método numérico aproximado, usado na análise de meios contínuos, que se baseia na discretização de um meio contínuo em diversos elementos mais simples. De uma forma resumida, um problema complexo torna-se a soma de vários problemas mais simples (Sousa, 2003).

Os elementos mais simples em que divide o problema original, são elementos de dimensões finitas, por isso são chamados de elementos finitos. Estes podem assumir várias geometrias; na Figura 3.1 apresentam-se alguns exemplos de elementos finitos que podem ser usados no domínio, para discretização do problema bidimensional apresentado neste trabalho.

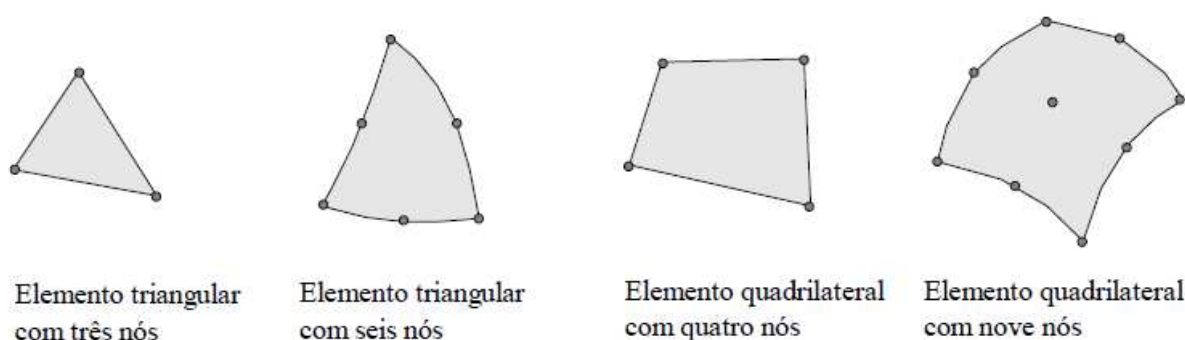


Figura 3.1 – Diferentes tipos de elementos finitos, para problema bidimensional (Adaptado de (Sousa, 2003)).

Na discretização de um problema, os elementos finitos são interligados por nós, formando uma malha de elementos finitos como a que se pode observar na Figura 3.2.

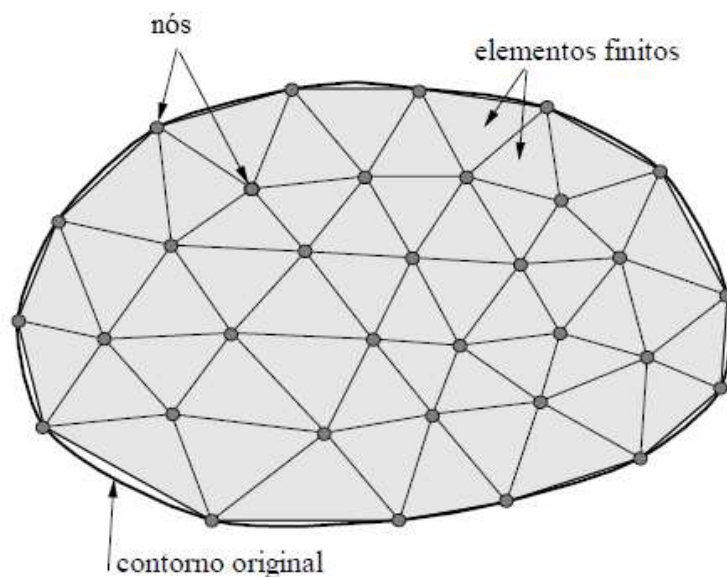


Figura 3.2 – Malha de elementos finitos, para um problema bidimensional (Adaptado de (Sousa, 2003)).

Como foi já referido, o Método dos Elementos Finitos é um método aproximado, mas a solução que este método fornece pode ser bastante próxima da solução exata do problema, dependendo da quantidade, do tamanho e do tipo de elementos da malha, bem como da quantidade de nós. Quanto mais elementos constituírem a malha, e quanto menores forem esses elementos, maior é a exatidão da solução do problema fornecida pelo método (Sousa, 2003).

A engenharia estrutural é a área onde mais se emprega o Método dos Elementos Finitos, mas outras áreas da engenharia também fazem uso deste método nas suas análises. Este método abrange atualmente bastantes áreas, como por exemplo: transferência de calor, eletromagnetismo, elastodinâmica, acústica, fadiga, hidráulica, aerodinâmica, etc. (Sousa, 2003).

Neste trabalho é usado o Método dos Elementos Finitos aplicado à condução de calor, pois pretende-se analisar como o calor se propaga através de um pavimento.

## 3.2 Formulação Numérica

### 3.2.1 Problema de condução de calor

Num meio bidimensional, num regime estacionário sem variação no tempo, consegue-se determinar a equação da condução de calor, considerando-se um elemento infinitesimal, de

lados  $dx$  e  $dy$  e espessura unitária, com uma fonte de calor interna  $Q$  e atravessado por fluxo de calor em duas faces,  $q_x$  e  $q_y$ , como se pode observar na Figura 3.3:

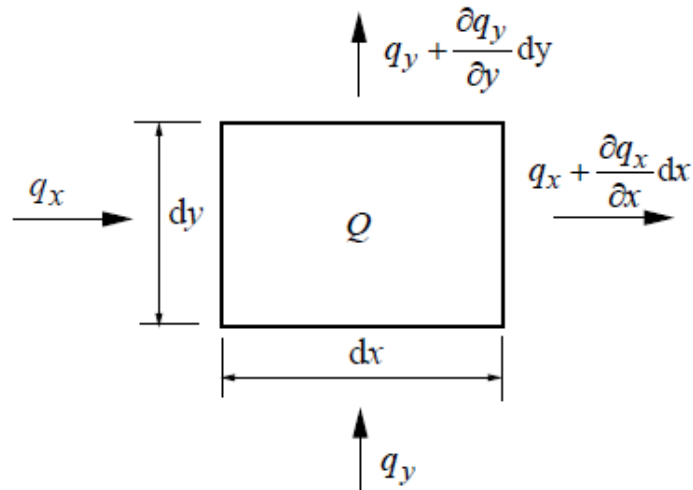


Figura 3.3 – Fluxo de calor que atravessa um elemento infinitesimal (Sousa, 2003).

Se se considerar que apenas existe transferência de calor através no plano do elemento infinitesimal, o equilíbrio de energia pode ser expresso da seguinte forma:

$$Q dx dy + q_x dy + q_y dx = \left( q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) dy + \left( q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) dx \quad (5)$$

Ou seja, a soma do fluxo de calor que entra no elemento com o calor que é produzido internamente, é igual à soma do fluxo de calor que sai do elemento. Obtém-se, assim, a equação diferencial que governa o problema de condução de calor.

Passando todos os termos da equação para o primeiro membro da equação, e dividindo a equação por  $dx dy$ , obtém-se a equação da condução de calor em regime estacionário:

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} + Q = 0 \quad (6)$$

No caso de fluxo unidimensional, a transmissão de calor é regida pela Lei de Fourier, segundo o qual o fluxo de calor numa direção  $x$  é proporcional à variação da temperatura  $\theta$  nessa mesma direção, onde a constante de proporcionalidade é a condutibilidade térmica ( $\lambda$ ):

$$q_x = -\lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (7)$$

Considerando um fluxo bidimensional, o vetor de fluxo ( $q$ ) de calor depende do gradiente de temperatura ( $\nabla\theta$ ):

$$\bar{q} = -\lambda \nabla \theta \quad (8)$$

onde,  $\bar{q} = \begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \end{Bmatrix}$

Considerando as equações (8) e (6), e que se trata de um meio isotrópico e homogéneo, pode escrever-se a equação de condução de calor da seguinte forma (Equação de Poisson):

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + Q = 0 \quad (9)$$

No problema apresentado neste trabalho, não existe nenhuma fonte de calor interna, ou seja,  $Q = 0$ , resultando (Lei de Laplace):

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0 \quad (10)$$

Na resolução da equação que governa o problema de condução de calor é necessário ter em conta as condições de fronteira do problema. Nos problemas de condução de calor existem duas condições de fronteiras fundamentais (Sousa, 2003):

- Imposição de temperatura – Neste caso, indica-se o valor da temperatura numa determinada zona do contorno;
- Imposição do fluxo de calor – Neste caso, considera-se um fluxo de calor num elemento infinitesimal, numa determinada zona do contorno.

### 3.2.2 Aplicação do MEF ao problema da condução de calor

O primeiro passo, para resolver o problema proposto neste trabalho, é criar a malha de elementos finitos e definir os nós da malha.

O MEF permite resolver a equação que governa o problema de condução de calor, através de um sistema de equações algébricas, definido por:

$$\bar{\bar{K}} \bar{\theta} = \bar{F} \quad (11)$$

em que,  $\bar{\bar{K}}$  representa a matriz de condutividade, e  $\bar{F}$  representa o vetor de fluxos de calor nos nós da malha. As incógnitas do problema são as temperaturas em cada um dos nós da malha, representadas pelo vector  $\bar{\theta}$  (Nikishkov, 2004).

No presente trabalho, a discretização dos modelos analisados é realizada recorrendo a elementos triangulares de três nós, como o indicado na Figura 3.4.

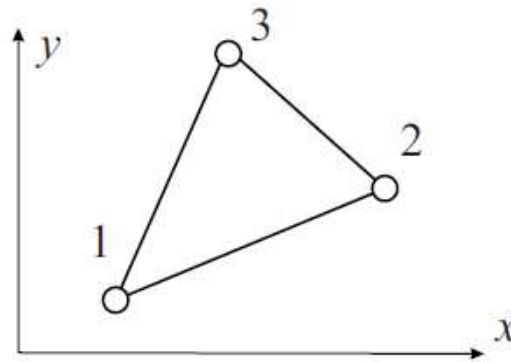


Figura 3.4 – Elemento finito triangular.

Para este tipo de elementos, a matriz de condutividade elementar pode ser determinada de forma expedita por:

$$\bar{K}_e = \frac{\lambda}{4A} \begin{bmatrix} b_1^2 + c_1^2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_2^2 + c_2^2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 \\ b_1 b_3 + c_1 c_3 & b_2 b_3 + c_2 c_3 & b_3^2 + c_3^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

onde, A representa a área do elemento, e sendo:

$$a_i = x_{i+1}y_{i+2} - x_{i+2}y_{i+1},$$

$$b_i = y_{i+1} - y_{i+2} \quad (13)$$

$$c_i = x_{i+2} - x_{i+1}$$

$$A = \frac{1}{2}(x_2y_3 + x_3y_1 + x_1y_2 - x_2y_1 - x_3y_2 - x_1y_3)$$

O vetor de fluxos de calor nos nós do elemento ( $F_e$ ) pode ser obtido por integração ao longo das suas faces (Nikishkov, 2004).

### 3.3 Verificação do algoritmo

Antes de aplicar o método numérico apresentado anteriormente, ao problema proposto no presente trabalho, é necessário verificar que este método devolve resultados realmente confiáveis. Neste caso, propõe-se a resolução de um problema simples por duas vias, pelo método numérico e por um método analítico. Considere-se um elemento de espessura unitária, e composto por duas camadas de materiais diferentes, com condutibilidades térmicas de 1 e 0,1 W/m.°C. Cada camada tem 0,5 m de espessura. Pretende-se determinar a temperatura num ponto médio do elemento, impondo-se diferentes temperaturas de cada lado do elemento,

respectivamente, de 20 °C e 0 °C, e considerando-se que o fluxo de calor é nulo nas faces superior e inferior do elemento. Este problema está ilustrado na Figura 3.5.

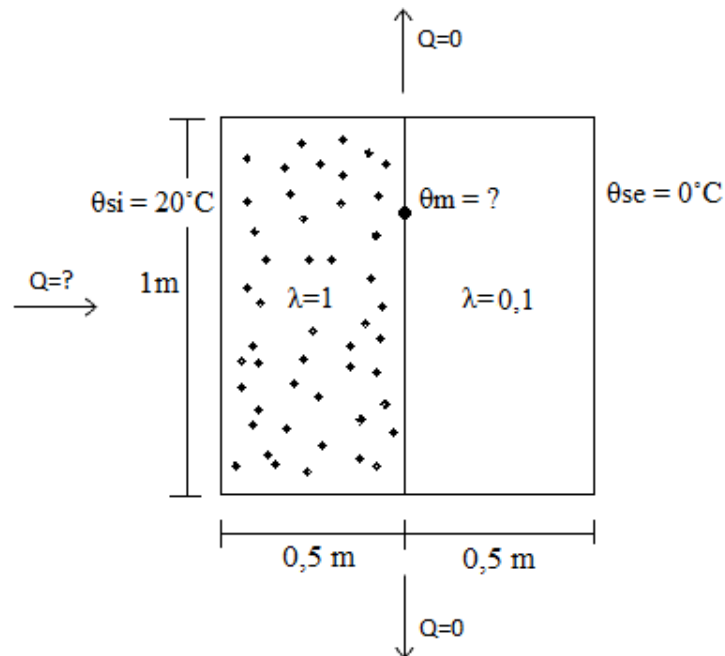


Figura 3.5 – Representação do problema.

- Método numérico (MEF)

Recorrendo ao *software* é possível modelar o elemento em estudo e, através do MEF, é possível resolver o problema apresentado. Resultou uma malha com 512 elementos finitos triangulares, e obteve-se uma temperatura no ponto médio de 18,18 °C e um fluxo de calor que atravessa as camadas de 3,636 W.

- Método Analítico

O método analítico baseia-se na Lei de Fourier, e considera que o fluxo de calor é unidimensional e perpendicular ao elemento, e ainda que a temperatura é constante ao longo de cada uma das faces (Rodrigues e Piedade, 1993):

$$Q = \frac{1}{\sum \frac{s}{\lambda}} A (\theta_{si} - \theta_{se}) \quad (14)$$

onde,

S – espessura de cada camada (m)

$\lambda$  – condutibilidade térmica do material de cada camada (W/m.°C)

A – área da superfície que o fluxo atravessa (m<sup>2</sup>)

$\theta_{si}$  – temperatura da superfície interior (°C)

$\theta_{se}$  – temperatura da superfície exterior (°C).

Aplicando a expressão (14) ao problema representado na Figura 3.5, pode determinar-se o fluxo de calor e a temperatura no ponto médio do elemento:

$$Q = \frac{1}{\sum \frac{S}{\lambda}} A (\theta_{si} - \theta_{se}) = \frac{1}{\frac{0,5}{1} + \frac{0,5}{0,1}} \times 1 \times (20 - 0) = 3,636W$$

Conhecido o fluxo de calor que atravessa o elemento, é possível determinar a temperatura no ponto médio ( $\theta_m$ ):

$$Q = \frac{\lambda}{S} A (\theta_{si} - \theta_m) \Leftrightarrow 3,636 = \frac{1}{0,5} \times 1 \times (20 - \theta_m) \Leftrightarrow \theta_m = 18,18 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Observa-se que os valores obtidos pelo método numérico coincidem com os valores obtidos analiticamente, podendo concluir-se que o método numérico apresentado pode ser adotado na resolução do problema exposto neste trabalho.

## 4 APLICAÇÃO DO MODELO AO SISTEMA DE PAVIMENTO RADIANTE

### 4.1 Introdução

A simulação do sistema de pavimento radiante através do método numérico já definido pode ajudar a analisar o comportamento térmico do sistema, para diversas soluções construtivas do pavimento e diferentes necessidades de aquecimento. Esse comportamento depende de vários parâmetros que caracterizam o sistema de pavimento radiante, e é esse comportamento que se quer perceber nesta primeira fase do trabalho.

### 4.2 Estudo Paramétrico

O estudo paramétrico é realizado para um pavimento de referência, com parâmetros previamente definidos. Procedendo à alteração sucessiva dos valores de cada um desses parâmetros, consegue-se fazer uma análise da distribuição do calor pelas várias camadas e, perceber a variação da temperatura da água, para cada parâmetro. Desta forma, é possível conhecer os parâmetros a que se deve dar mais atenção no dimensionamento do sistema de pavimento radiante, e quais os valores desses parâmetros que proporcionam um melhor desempenho do sistema de pavimento radiante.

Antes de iniciar a análise, definiu-se um coeficiente de transmissão térmica superficial de  $12 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , uma temperatura interior de  $20 \text{ °C}$  e um fluxo de calor de  $60 \text{ W/m}^2$ .

A solução estrutural do sistema de pavimento radiante a estudar (pavimento de referência) é apresentada no Quadro 4.1, e representada na Figura 4.1.

As características do pavimento de referência foram selecionadas tendo em consideração a informação que se recolheu anteriormente e, que se pode consultar no ponto 2.2 do presente trabalho.



Quadro 4.1 - Solução estrutural do sistema de pavimento radiante.

<b>Revestimento</b>	Material	Mosaico
	$\lambda_r$ (W/m.°C)	0,41
	$S_r$ (m)	0,025
<b>Betonilha</b>	$\lambda_b$ (W/m.°C)	1,40
	$S_b$ (m)	0,04
	Material	Poliestireno Expandido (EPS)
<b>Isolamento Térmico</b>	$\lambda_i$ (W/m.°C)	0,045
	$S_i$ (m)	0,04
	$\varphi$ (m)	0,016
<b>Tubagem</b>	$S_t$ (m)	0,0018
	$e$ (m)	0,20

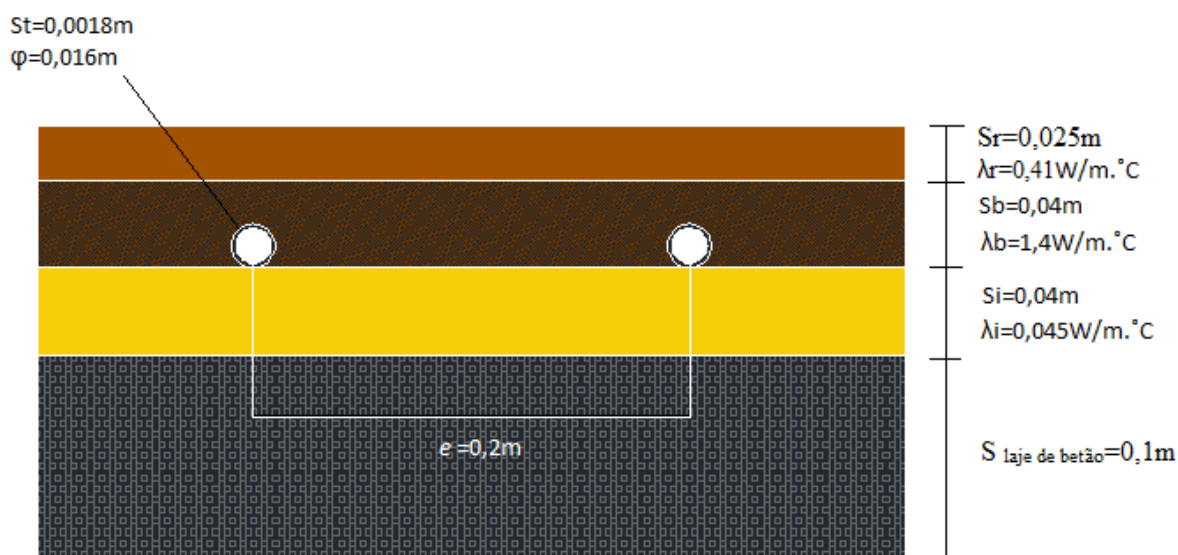


Figura 4.1 – Esquema do pavimento de referência.

Antes de proceder à análise dos resultados obtidos pelas várias simulações pode observar-se, na Figura 4.2, o comportamento do pavimento de referência, que tem as características apresentadas no Quadro 4.1.

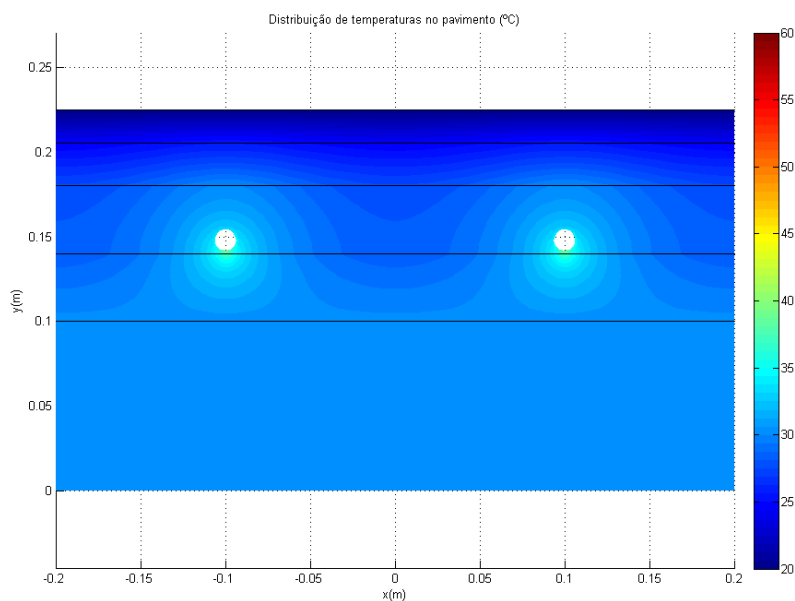


Figura 4.2 – Distribuição da temperatura no pavimento de referência.

Para o pavimento de referência obtém-se uma temperatura da água de 35,30 °C. E pode observar-se uma distribuição uniforme da temperatura no pavimento.

De seguida, são apresentados os valores que se assumiram para os vários parâmetros, e os valores das temperaturas da água que dependem de cada um desses valores. Também se pode observar a distribuição da temperatura no pavimento, associados a cada um dos valores considerados.

Neste trabalho, não é estudada a influência da espessura e da condutibilidade térmica do isolamento térmico, no desempenho térmico do pavimento. Porque na modelação numérica do problema apresentado trabalho, considerou-se que o isolamento térmico impede totalmente a transmissão do fluxo de calor para a camada que representa a laje de betão.

- Condutibilidade térmica do revestimento

Considerando o pavimento de referência, definido no Quadro 4.1, e alterando apenas a condutibilidade térmica do revestimento para os valores indicados no Quadro 4.2, obtêm-se os valores das temperaturas médias da água correspondentes a cada valor de condutibilidade térmica do revestimento, também apresentados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Resultados da temperatura média da água para cada uma das condutibilidades térmicas do revestimento consideradas.

$\lambda_r$ (W/m.°C)	$\theta_{\text{média água}}$ (°C)
0,15	41,75
0,25	37,70
0,41	35,30
0,60	34,09
1,04	32,94

Pode observar-se na Figura 4.3, na Figura 4.4, na Figura 4.5 e na Figura 4.6 como a variação da temperatura no pavimento é influenciada pela condutibilidade térmica do revestimento.

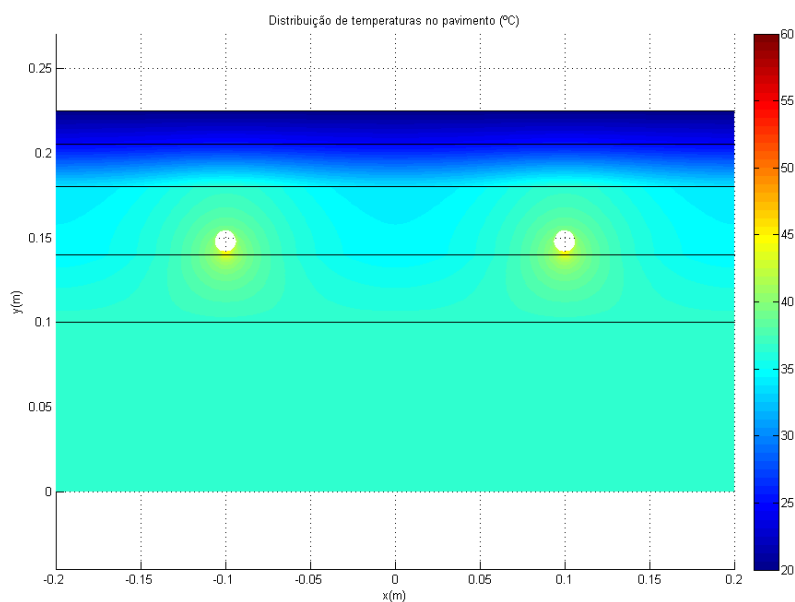


Figura 4.3 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $\lambda_r = 0,15$  W/m.°C.

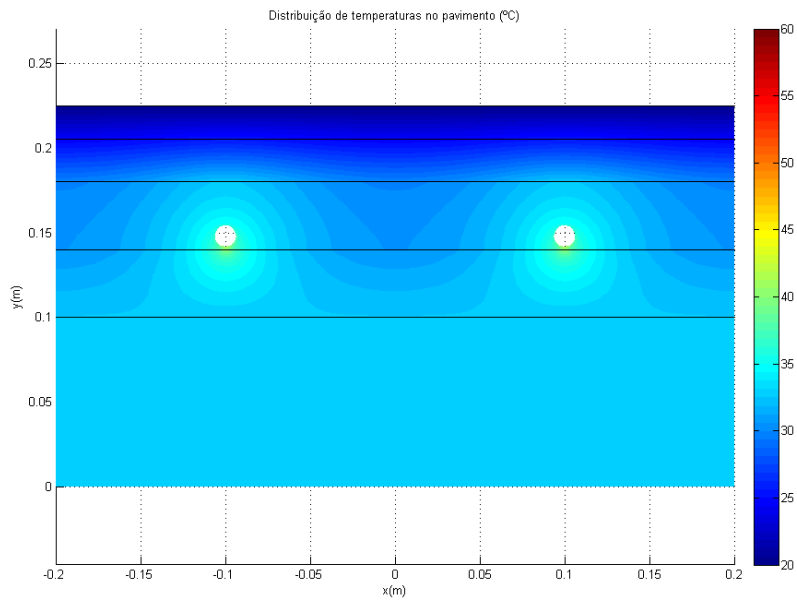


Figura 4.4 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $\lambda_r=0,25$  W/m.°C.

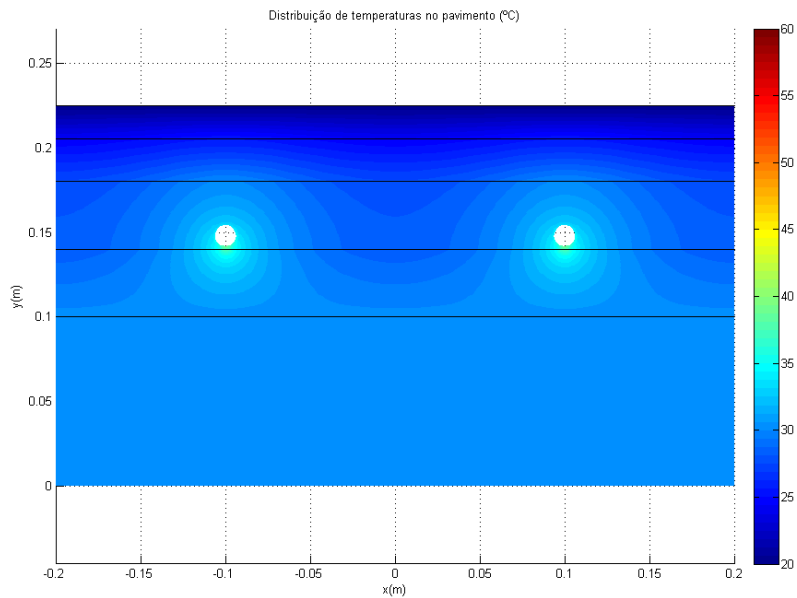


Figura 4.5 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $\lambda_r=0,41$  W/m.°C  
(Pavimento de referência).

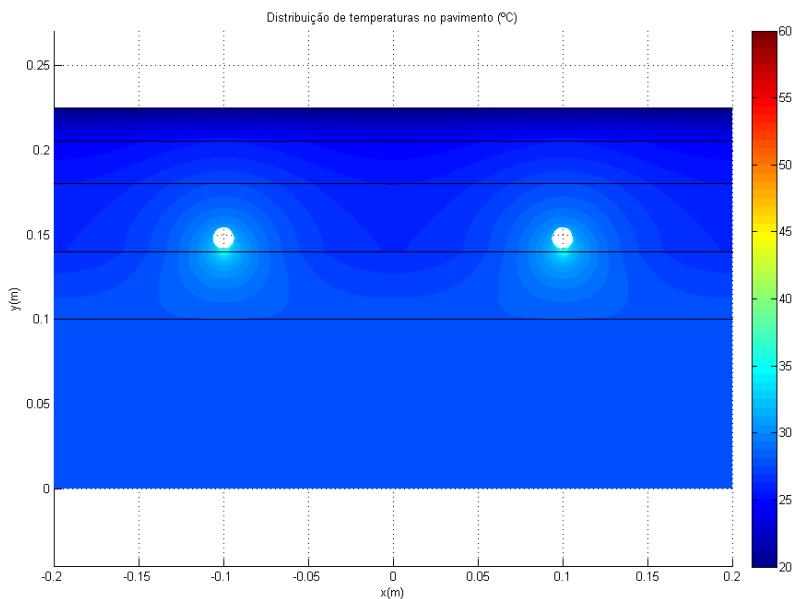


Figura 4.6 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $\lambda_r = 1,04 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ .

Observa-se uma influência significativa da condutibilidade térmica do revestimento nos valores da temperatura média da água apresentados no Quadro 4.2. Comparando as temperaturas médias da água para revestimentos compostos por materiais com maiores condutibilidades térmicas ou compostos por materiais com condutibilidades térmicas mais baixas, verifica-se que, no segundo caso as temperaturas médias da água são mais elevadas. Este resultado era esperado visto que a quantidade de calor que consegue atravessar os revestimentos com menor condutibilidade é inferior em comparação com a quantidade de calor que atravessa os de maior condutibilidade e, desta forma, é necessário produzir mais energia térmica para satisfazer as mesmas necessidades do ambiente interior.

Em consequência da dificuldade que o calor tem em atravessar os revestimentos com baixa condutibilidade térmica, ocorre uma concentração de calor na superfície inferior do revestimento, podendo observar-se uma distinção perfeita das zonas de maior concentração de calor (Figura 4.3 e Figura 4.4). Já na presença de revestimentos com maior condutibilidade térmica observa-se uma maior uniformidade da temperatura ao longo do pavimento (Figura 4.5 e Figura 4.6).

- Espessura do revestimento

Para estudar o contributo que a espessura do revestimento pode ter na transmissão de calor através do pavimento, procedeu-se da mesma forma que para o estudo da condutibilidade térmica do revestimento; ou seja, simulou-se o comportamento do pavimento com a estrutura

apresentada no Quadro 4.1, para diferentes espessuras do revestimento. Os valores das temperaturas médias da água, resultantes destas simulações, são apresentados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Resultados da temperatura média da água para cada uma das espessuras do revestimento consideradas

$S_r$ (m)	$\theta_{\text{média água}}$ (°C)
0,01	33,11
0,015	33,84
0,02	34,57
0,025	35,30

Na Figura 4.7, Figura 4.8, Figura 4.9 e Figura 4.10 pode ver-se como a temperatura varia ao longo do pavimento, influenciada pela espessura do revestimento indicadas no Quadro 4.3.

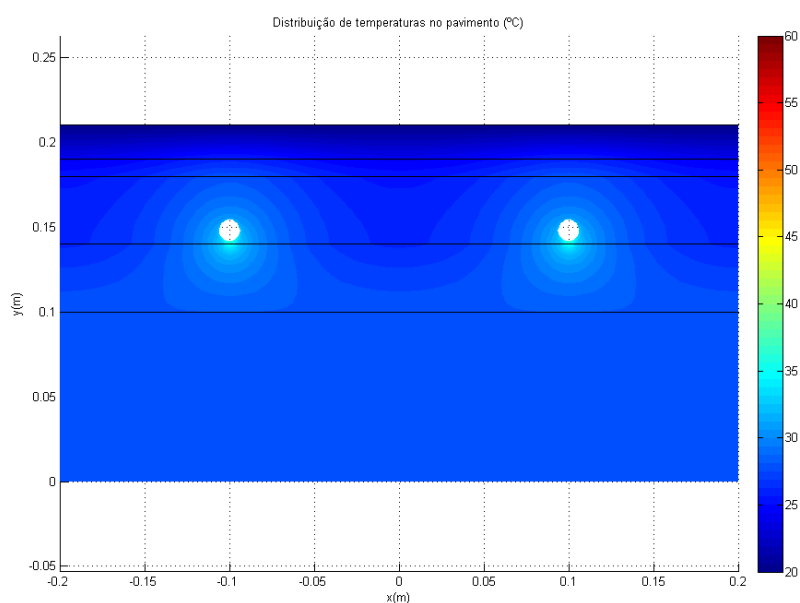


Figura 4.7 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $S_r = 0,01$  m.

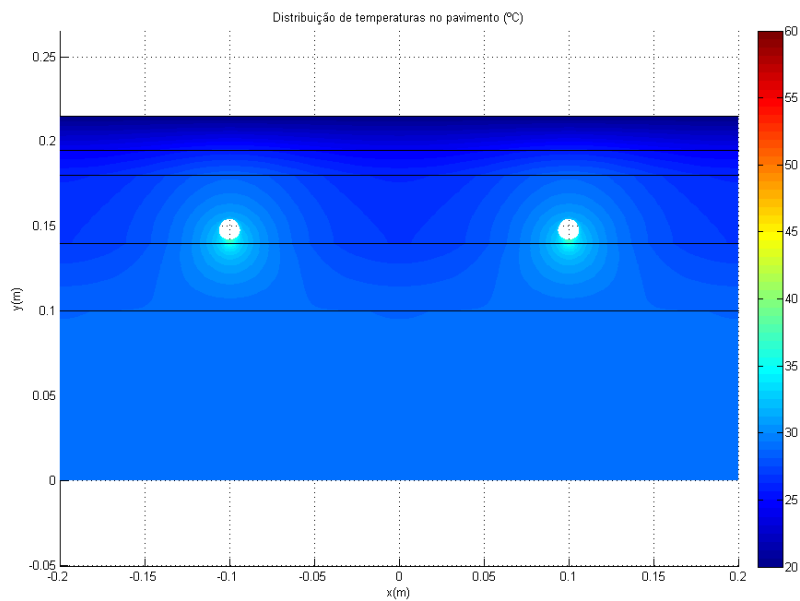


Figura 4.8 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $S_r = 0,015$  m.

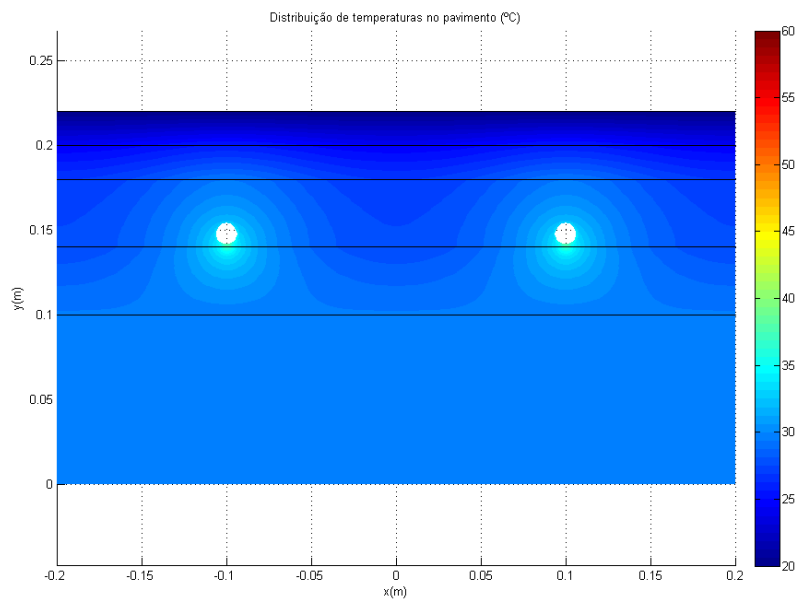


Figura 4.9 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $S_r = 0,02$  m.

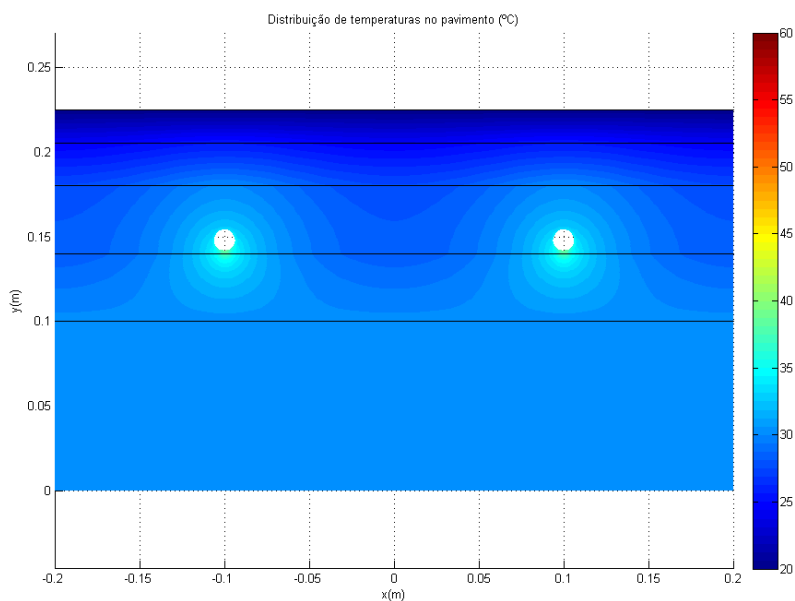


Figura 4.10 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $S_r = 0,025$  m.  
(Pavimento de referência).

Analisando os valores do Quadro 4.3, percebe-se que o aumento da espessura do revestimento obriga a um aumento da temperatura da água que circula na tubagem, isto porque a distância que o fluxo de calor tem de percorrer vai aumentando. Assim, é necessário produzir mais energia térmica, quando se trata de revestimentos com maior espessura, para que a quantidade de calor que atinge a superfície do revestimento seja igual à quantidade de calor para espessuras menores.

Embora se verifique esta tendência, a verdade é que a variação da temperatura é pouco significativa, e este facto reflete-se também nas distribuições de temperatura resultantes do modelo numérico (Figura 4.7, Figura 4.8, Figura 4.9 e Figura 4.10), pois verifica-se uma distribuição uniforme ao longo do pavimento, para todos os casos.

- Condutibilidade térmica da camada de betonilha

No Quadro 4.4 podem-se consultar os valores da condutibilidade térmica da betonilha que foram usados neste estudo paramétrico, bem como a temperatura média da água obtida nas simulações, para cada um desses valores.



Quadro 4.4 – Resultados da temperatura média da água para cada uma das condutibilidades térmicas da camada de betonilha consideradas.

$\lambda_b$ (W/m.°C)	$\theta_{\text{média água}}$ (°C)
1	37,12
1,2	36,07
1,4	35,30
1,7	34,47

Na Figura 4.11, Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14, pode perceber-se a influência que tem a condutibilidade térmica da betonilha no desempenho do sistema de pavimento radiante, através da distribuição de temperatura no pavimento.

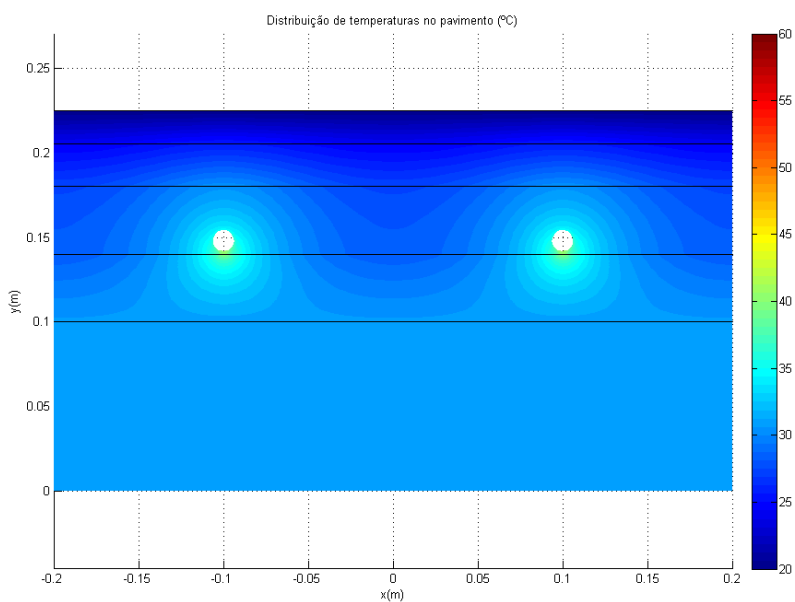


Figura 4.11 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $\lambda_b = 1$  W/m.°C.

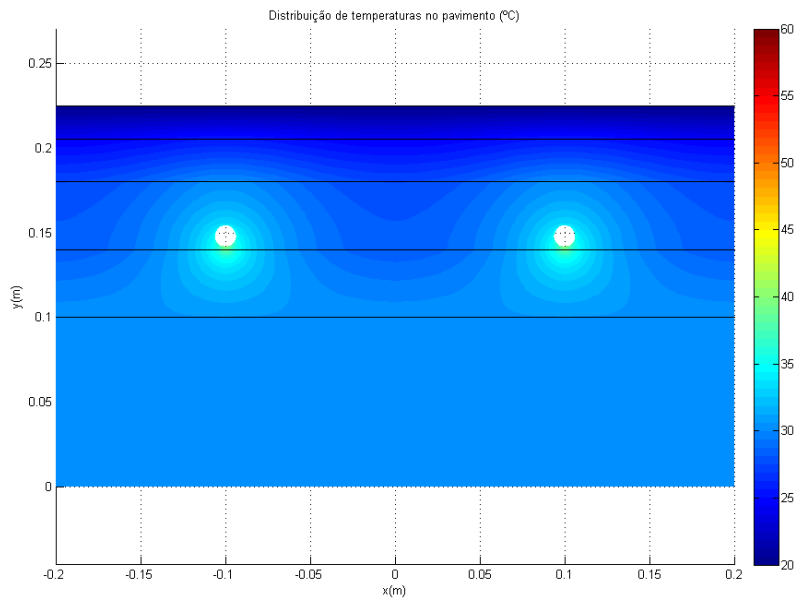


Figura 4.12 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $\lambda_b = 1,2 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ .

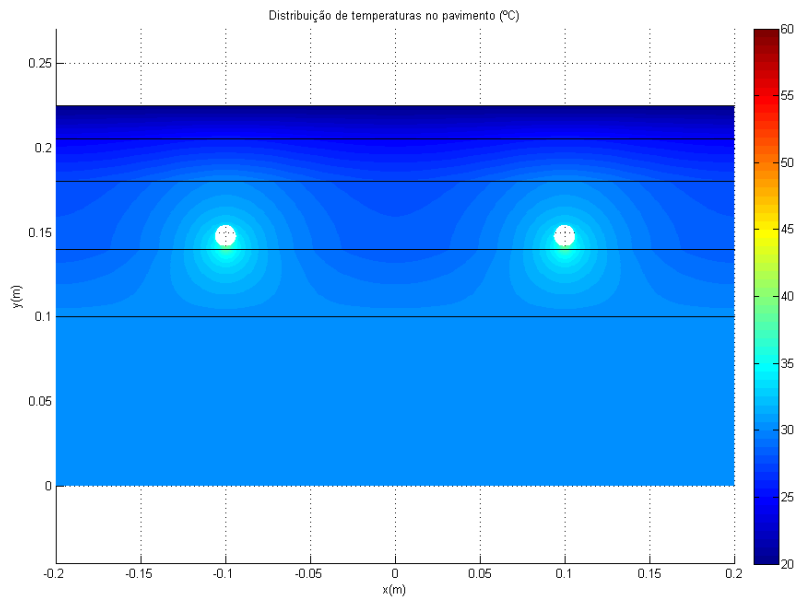


Figura 4.13 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $\lambda_b = 1,4 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$   
(Pavimento de referência).

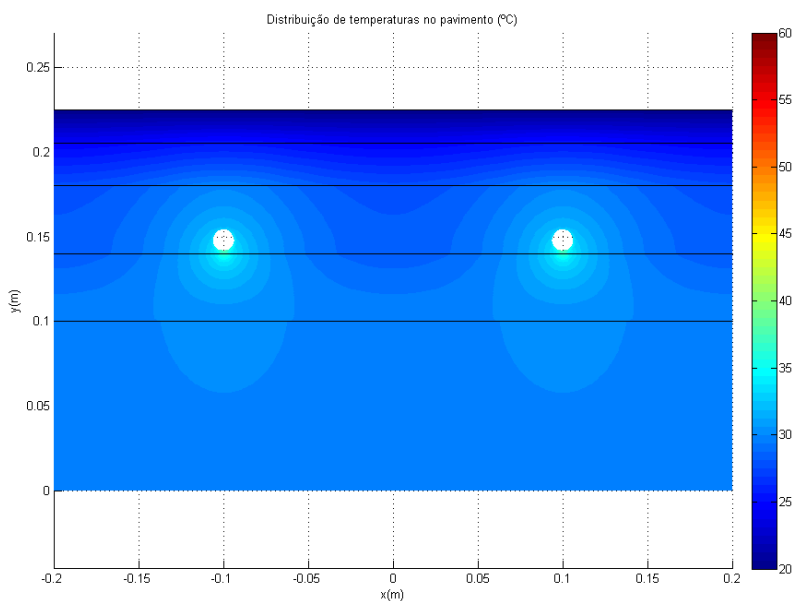


Figura 4.14 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $\lambda_b = 1,7 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ .

Com o aumento da condutibilidade térmica da betonilha vai sendo menor a necessidade de produzir energia térmica, porque quanto maior for a condutibilidade térmica da betonilha maior quantidade de calor consegue atravessar a camada de betonilha. Todavia, percebe-se pela análise da Figura 4.11, Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14 que o parâmetro aqui avaliado não interfere, de forma muito significativa, com a distribuição da temperatura ao longo do pavimento.

- Espessura da camada de betonilha

Outro parâmetro que importa estudar é a espessura da camada de betonilha. Os valores deste parâmetro que foram considerados no estudo podem ser consultados no Quadro 4.5, bem como os valores da temperatura média da água, influenciada por este parâmetro.

Quadro 4.5 – Resultados da temperatura média da água para cada uma das espessuras da camada de betonilha consideradas.

$S_b$ (m)	$\theta_{\text{média água}}$ (°C)
0,04	35,30
0,06	35,98
0,08	36,79
0,1	37,63

As distribuições da temperatura ao longo do pavimento, condicionadas pela espessura da camada de betonilha, podem analisar-se na Figura 4.15, Figura 4.16, Figura 4.17 e Figura 4.18.

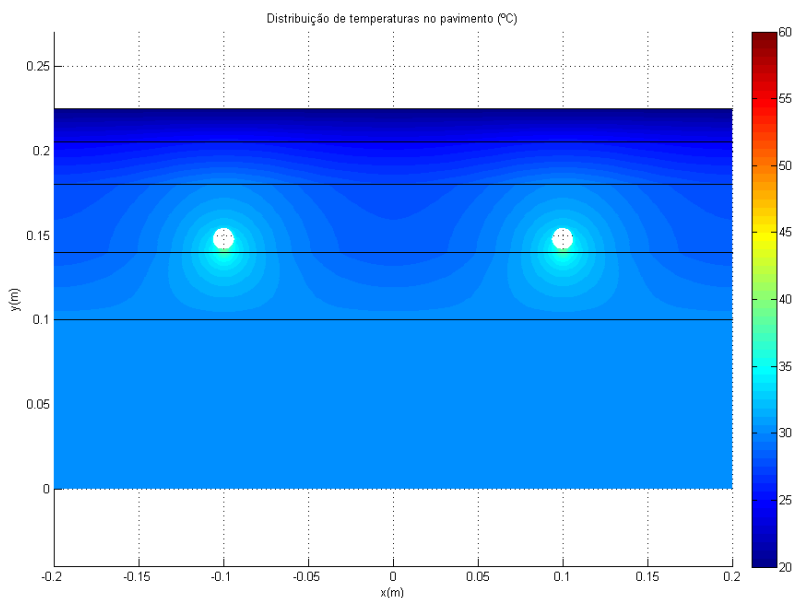


Figura 4.15 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $S_b = 0,04$  m (Pavimento de referência).

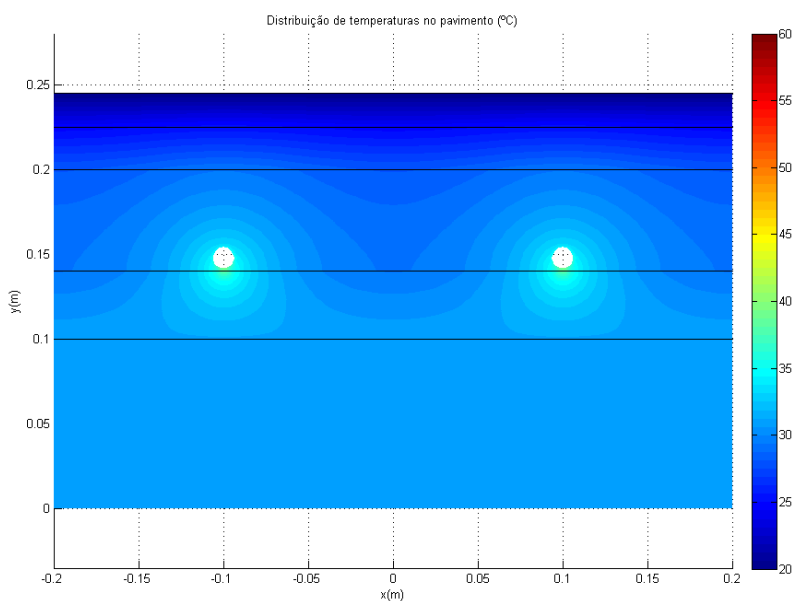


Figura 4.16 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $S_b = 0,06$  m.

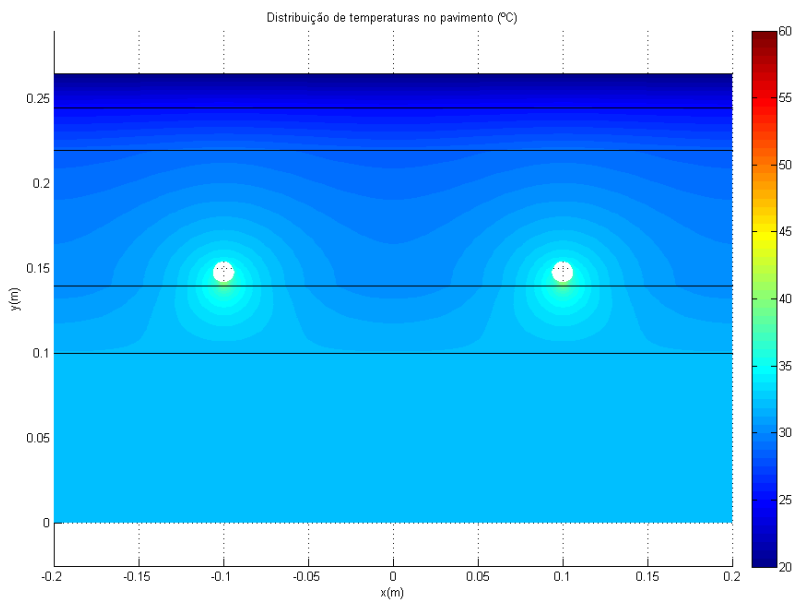


Figura 4.17 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $S_b = 0,08$  m.

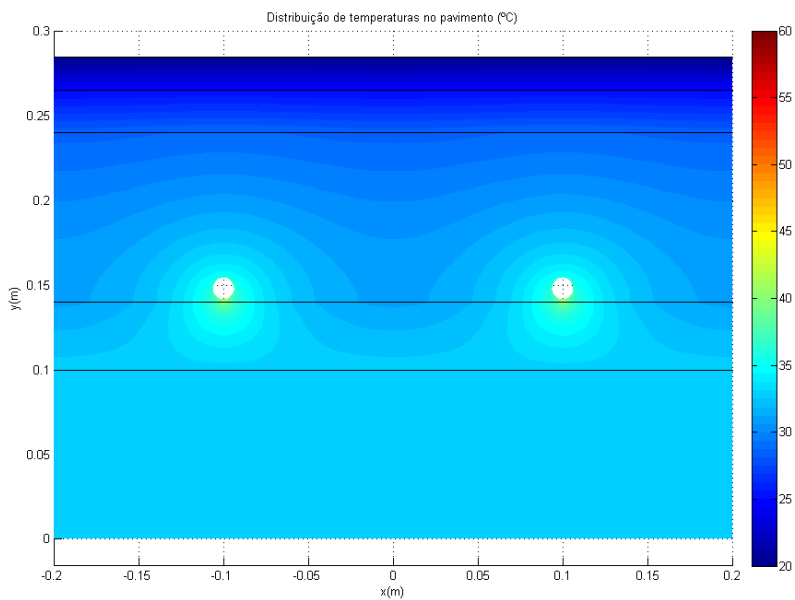


Figura 4.18 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $S_b = 0,1$  m.

A temperatura média da água aumenta com o aumento da espessura da camada de betonilha, devido ao maior percurso que o fluxo de calor tem de percorrer para chegar à superfície;

assim sendo, há necessidade de aumentar a energia térmica a ser fornecida ao pavimento. Desta forma, com o aumento dos valores do parâmetro aqui em análise, vai sendo cada vez mais evidente uma distinção das zonas de diferentes temperaturas (Figura 4.15, Figura 4.16, Figura 4.17 e Figura 4.18).

- Diâmetro do tubo

Adotando os diâmetros indicados no Quadro 4.6, e considerando a solução estrutural apresentada no Quadro 4.1, pode estudar-se a influência que este parâmetro tem no desempenho do sistema de pavimento radiante.

Quadro 4.6 – Resultados da temperatura média da água para cada um dos diâmetros considerados.

$\varphi$ (m)	$\theta_{\text{média água}}$ (°C)
0,014	35,76
0,016 (	35,30
0,017	35,05
0,020	34,40
0,025	33,58

Na Figura 4.19, Figura 4.20, Figura 4.21, Figura 4.22 e Figura 4.23 apresentam-se as distribuições de temperatura no pavimento, referentes a cada um dos diâmetros adotados.

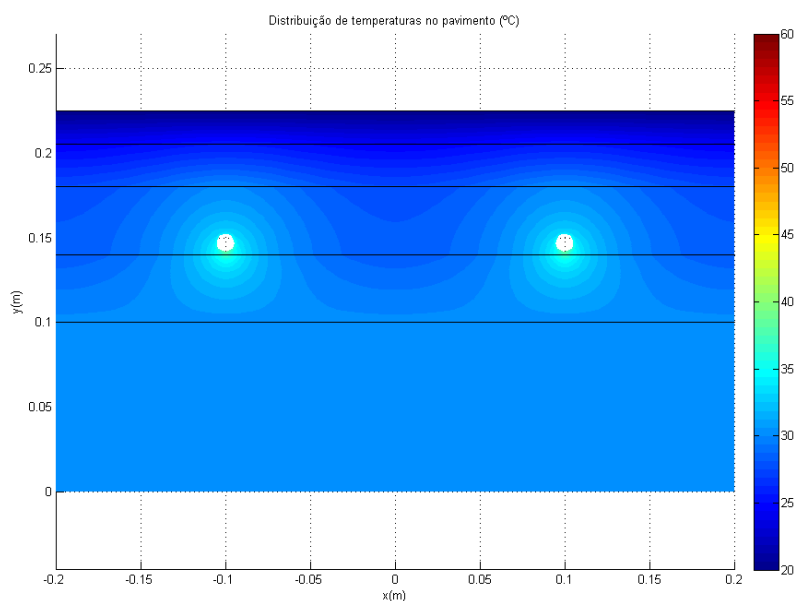


Figura 4.19 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $\varphi=0,014$  m.

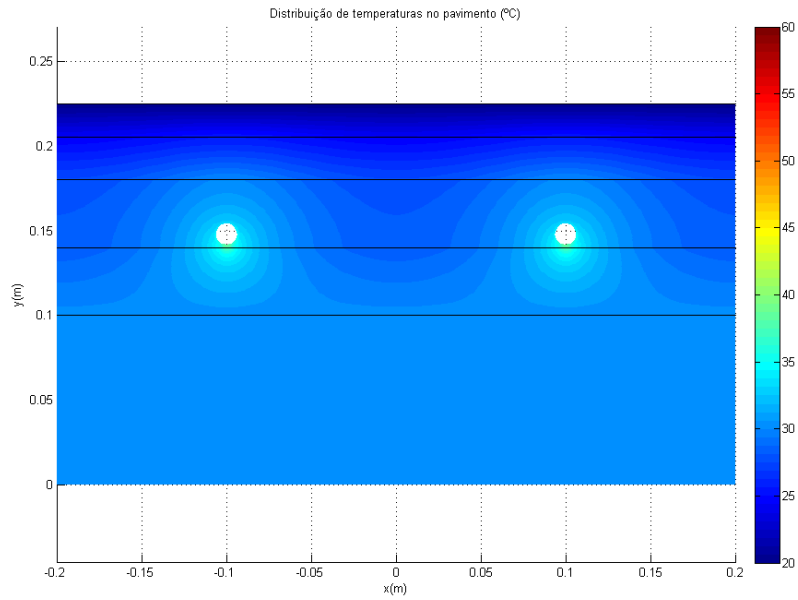


Figura 4.20 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $\phi=0,016$  m (Pavimento de referência).

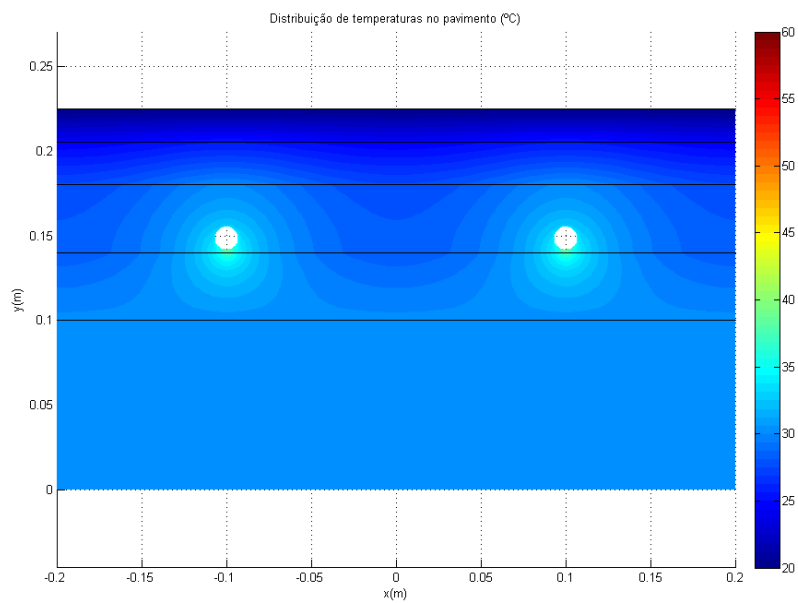


Figura 4.21 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $\phi=0,017$  m.

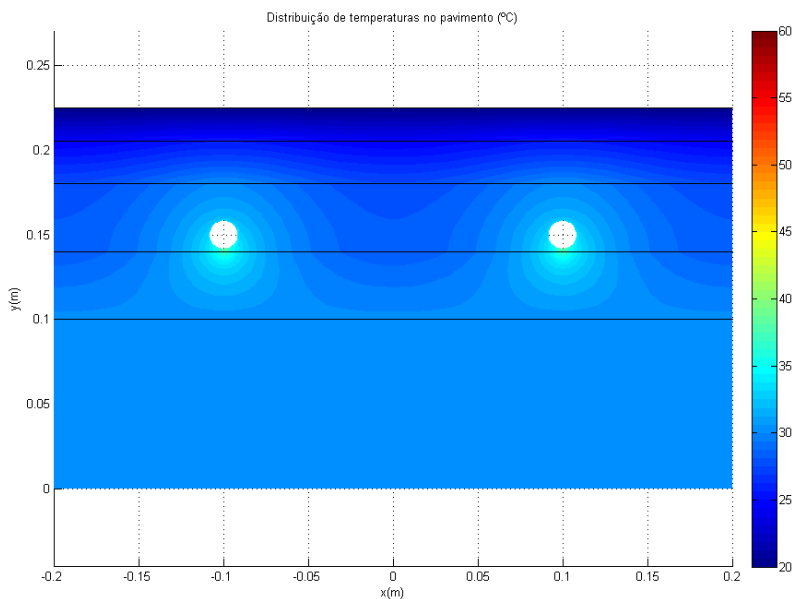


Figura 4.22 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $\phi=0,020$  m.

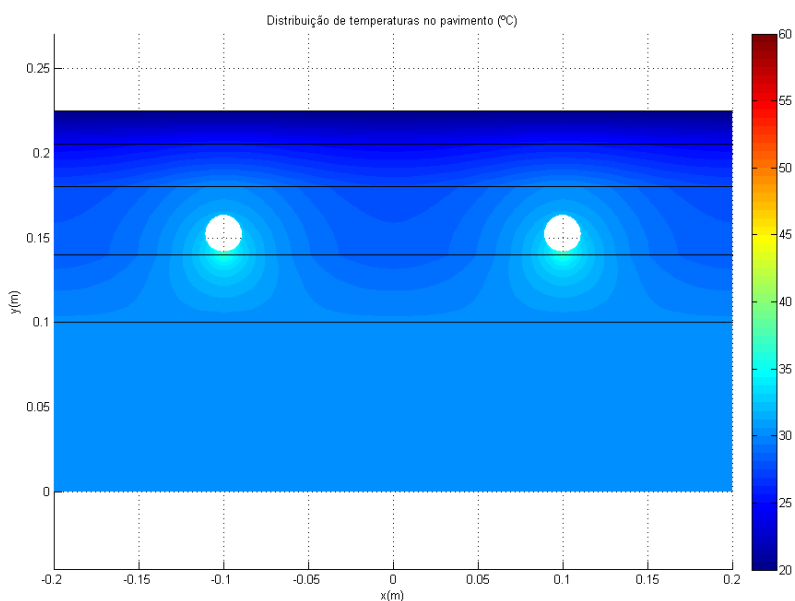


Figura 4.23 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $\phi=0,025$  m.

Analisando os perfis transversais do pavimento, para cada diâmetro de tubo, não se verificam grandes alterações na distribuição da temperatura ao longo do perfil. No entanto, percebe-se pelo Quadro 4.6 que, para os menores diâmetros, a temperatura média da água tem de ser superior à temperatura média da água para diâmetros maiores. Isto acontece porque no caso



de tubos de diâmetros pequenos a área de tubo que está em contacto com a betonilha é menor, havendo menos quantidade de calor a ser transmitida à betonilha, e assim, maior necessidade de aumentar a temperatura da água.

- Espaçamento entre tubos

Mantendo a solução estrutural apresentada no Quadro 4.1 e modificando apenas os espaçamentos entre tubos, obtêm-se os valores das temperaturas médias da água, que se podem consultar no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 – Resultados da temperatura média da água para cada um dos espaçamentos entre tubos considerados

$e$ (m)	$\theta_{\text{média água}} (^{\circ}\text{C})$
0,1	31,81
0,2	35,30
0,3	39,84
0,5	50,49
0,6	56,14

De seguida apresentam-se as distribuições das temperaturas para diferentes espaçamentos, na Figura 4.24, Figura 4.25, Figura 4.26, Figura 4.27 e Figura 4.28.

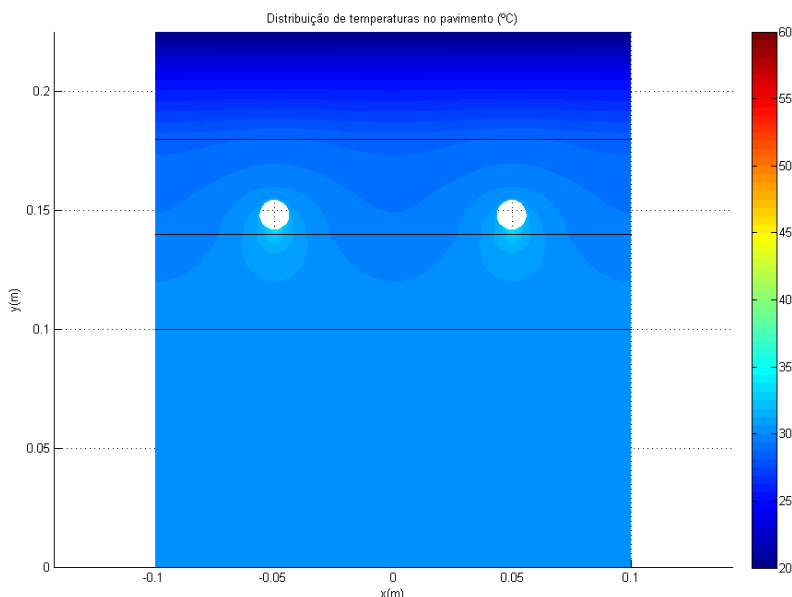


Figura 4.24 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $e=0,1$  m.

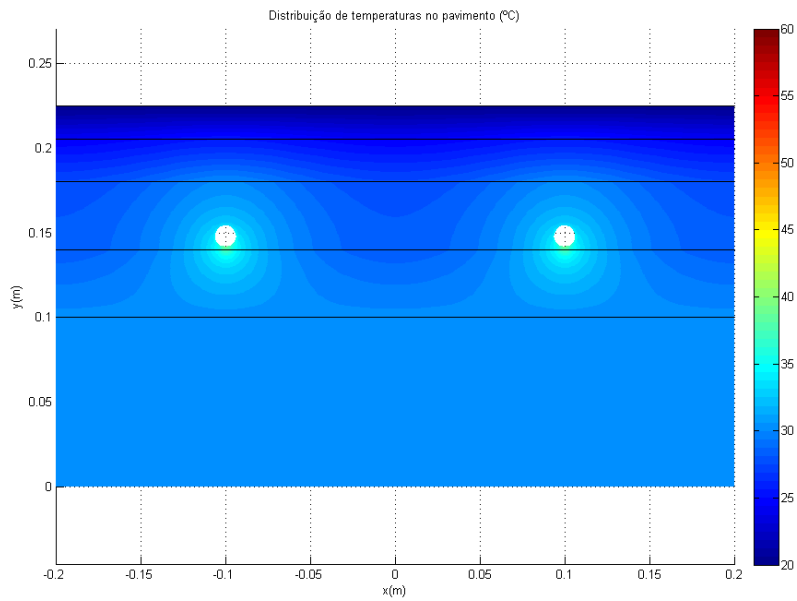


Figura 4.25 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $e=0,2$  m (Pavimento de referência).

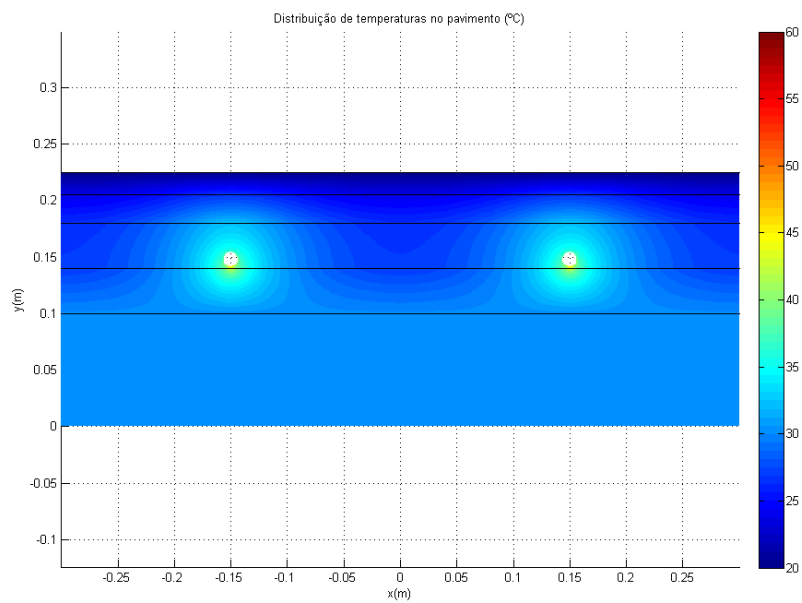


Figura 4.26 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $e=0,3$  m.

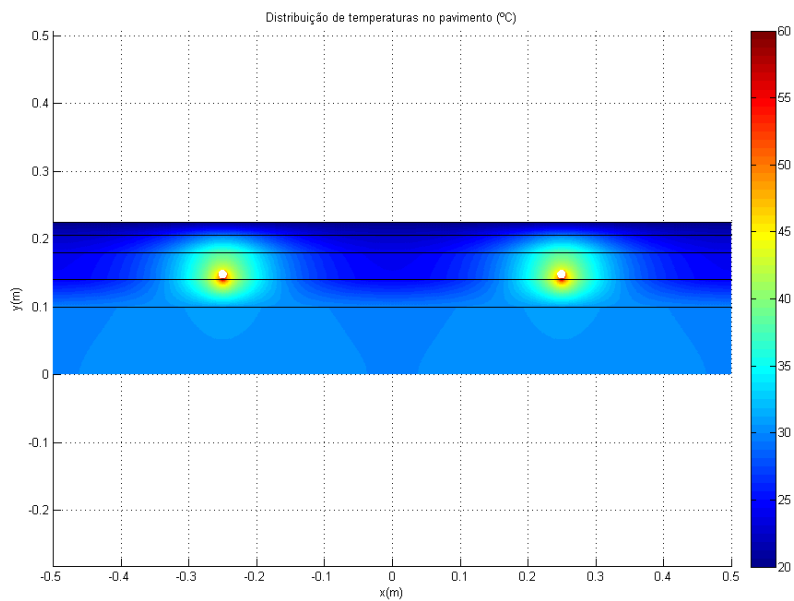


Figura 4.27 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $e=0,5$  m.

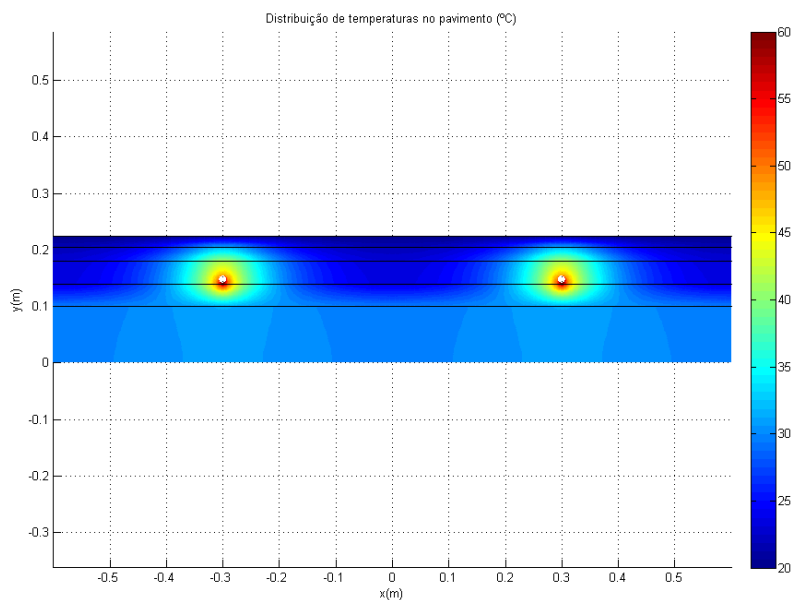


Figura 4.28 – Distribuição da temperatura no pavimento para  $e=0,6$  m.

Em primeira análise, verifica-se que este parâmetro tem uma grande influência na temperatura média da água. Quando os tubos se encontram muito distanciados, torna-se mais difícil o

calor atingir a zona que se encontra a meia distância, e desta forma tem de ser produzida mais energia térmica. Por outro lado, a zona da superfície sobre os tubos apresenta valores muito elevados de temperatura. Através da Figura 4.29 e da Figura 4.30, que correspondem à distribuição da temperatura na superfície do pavimento quando o espaçamento entre tubos é de 0,3 m e 0,6 m, respetivamente, pode observar-se essa tendência. Na primeira figura, observa-se uma temperatura quase uniformemente distribuída, enquanto que na segunda se verificam picos de temperatura que coincidem com a localização dos tubos.

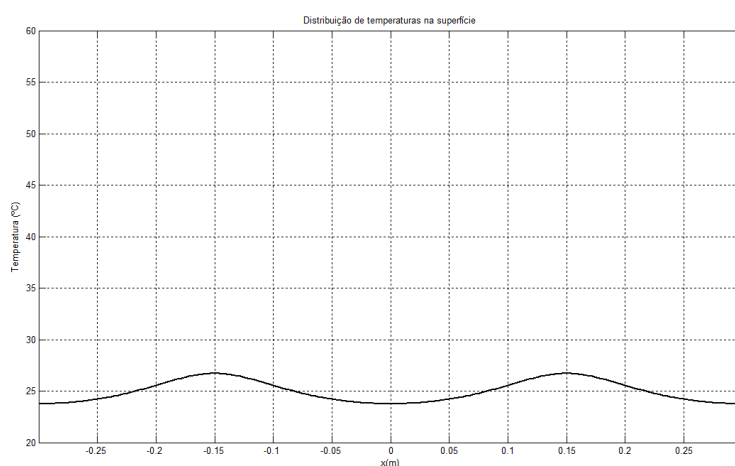


Figura 4.29 – Distribuição da temperatura de superfície, para  $e=0,3$  m.

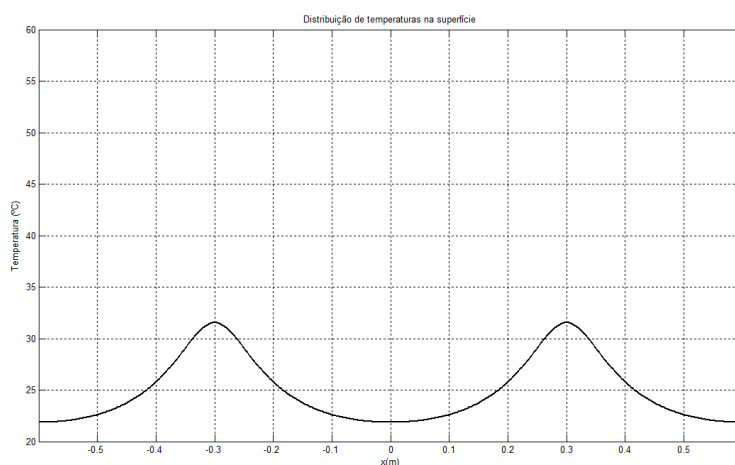


Figura 4.30 – Distribuição da temperatura de superfície, para  $e=0,6$  m.

Avaliando de uma forma geral os resultados obtidos pelas simulações aqui apresentadas, pode concluir-se que a condutibilidade térmica do revestimento e o espaçamento entre tubos são os fatores que mais influenciam a performance do sistema de pavimento radiante, mas é para o

espaçamento entre tubos que se verificam as maiores variações da temperatura média da água, quando se analisam os parâmetros individualmente.

Os revestimentos podem ser de materiais muito diferentes, logo podem assumir um leque muito variado de condutibilidades térmicas. Essa é também, uma razão para uma influência tão significativa deste parâmetro, no desempenho térmico dos sistemas de pavimento radiante, pois pode levar a que a temperatura da água assuma desde valores baixos, se a condutibilidade térmica for elevada, até valores significativamente elevados, se a condutibilidade térmica for baixa.

Por outro lado, a espessura dos revestimentos, não provoca grandes oscilações na temperatura média da água, nem conduz a valores muito elevados da temperatura.

Desta forma, se se adotar, por exemplo, um revestimento com uma condutibilidade térmica baixa, o ideal será que esse revestimento não seja muito espesso, para evitar que a temperatura da água tenha de ser muito elevada. Em suma, há que ter muita atenção na escolha do revestimento do pavimento, de forma a conseguir obter uma boa relação entre condutibilidade térmica e espessura.

Já o conjunto de condutibilidades térmicas que normalmente a betonilha assume é muito mais restrito, daí que os valores da temperatura média da água não variem muito para este parâmetro. Por este motivo, este não será um dos parâmetros mais preocupante na fase de dimensionamento. Já a espessura da camada de betonilha é um parâmetro a ter em atenção, porque não provoca grandes variações das temperaturas médias da água, mas interfere significativamente com a distribuição de calor ao longo do pavimento. De facto, quando assume valores um pouco mais elevados é necessário produzir mais energia térmica, mas muita dessa energia acaba por se concentrar na zona inferior da camada, ou seja, é produzida mais energia do que a que chega à superfície do pavimento.

As dimensões dos tubos, como já se tinha mencionado, não provocam grandes alterações no desempenho térmico do sistema de pavimento radiante. É no entanto preciso ter atenção ao espaçamento entre os tubos, pois verifica-se que grandes espaçamentos obrigam a temperaturas da água muito elevadas e não proporciona uma temperatura uniforme ao longo da superfície do pavimento, havendo zonas onde o calor é excessivo, tornando-se incómodo para os ocupantes do espaço.

No dimensionamento de um sistema de pavimento radiante, o ideal é haver uma boa conjugação entre as espessuras das camadas e os valores das condutibilidades térmicas dos materiais. Em geral, o espaçamento dos tubos não deve ser muito superior a 0,3 m.

### 4.3 Estudo de uma solução construtiva com soalho flutuante

No mercado existem muitos materiais que permitem melhorar o desempenho das soluções construtivas, tanto a nível térmico como acústico. Neste ponto pretende-se analisar o comportamento térmico de um pavimento que, para além de ter incorporado um sistema de pavimento radiante, tem uma camada adicional de um material que contribui para melhorar o desempenho acústico. O sistema analisado é usualmente designado por soalho flutuante.

A camada adicional da solução construtiva é uma espuma de polietileno, que tem como características principais o amortecimento de vibrações, uma boa absorção aos ruídos de impacto e uma resistência à compressão elevada. Este material apresenta uma baixa condutibilidade térmica, podendo contribuir para uma melhoria do isolamento térmico, embora este contributo possa ser desvalorizado se apresentar espessuras reduzidas. (Lopes, 2008). Este material é normalmente usado em pavimentos com revestimento em madeira, e sobretudo quando estes apresentam espessuras muito reduzidas.

Neste trabalho é considerado o Ethafoam 222-E, que é uma manta de espuma de polietileno extrudido, comercializado pela empresa DOW, e este produto apresenta espessuras de 3 ou 5 mm e uma condutibilidade térmica de 0,04 W/m°C. (Dow).

São estudadas duas soluções diferentes, uma para um revestimento flutuante em madeira, com 0,01 m de espessura e uma condutibilidade térmica de 0,23 W/m.°C, e uma solução para um revestimento em soalho, com 0,02 m de espessura e uma condutibilidade térmica de 0,95 W/m.°C. Neste estudo, as características das restantes camadas que compõem o pavimento apresentam-se no Quadro 4.8:

Quadro 4.8 – Constituição do pavimento.

<b>Ethafoam</b>	$\lambda$ (W/m.°C)	0,04
	S (m)	0,003
<b>Betonilha</b>	$\lambda_b$ (W/m.°C)	1,40
	$S_b$ (m)	0,04
<b>Isolamento Térmico</b>	Material	Poliestireno Expandido (EPS)
	$\lambda_i$ (W/m.°C)	0,045
	$S_i$ (m)	0,04
<b>Tubagem</b>	$\varphi$ (m)	0,016
	$S_t$ (m)	0,0018
	$e$ (m)	0,20

Considere-se um fluxo de calor de 60 W/m<sup>2</sup>, uma temperatura interior de 20 °C e um diferencial de temperaturas entre a ida e o retorno de 10 °C.

Na Figura 4.31 e Figura 4.32 pode comparar-se o comportamento térmico do pavimento sem e com a camada de Ethafoam, para a solução com revestimento flutuante e para a solução um revestimento em soalho, respectivamente.

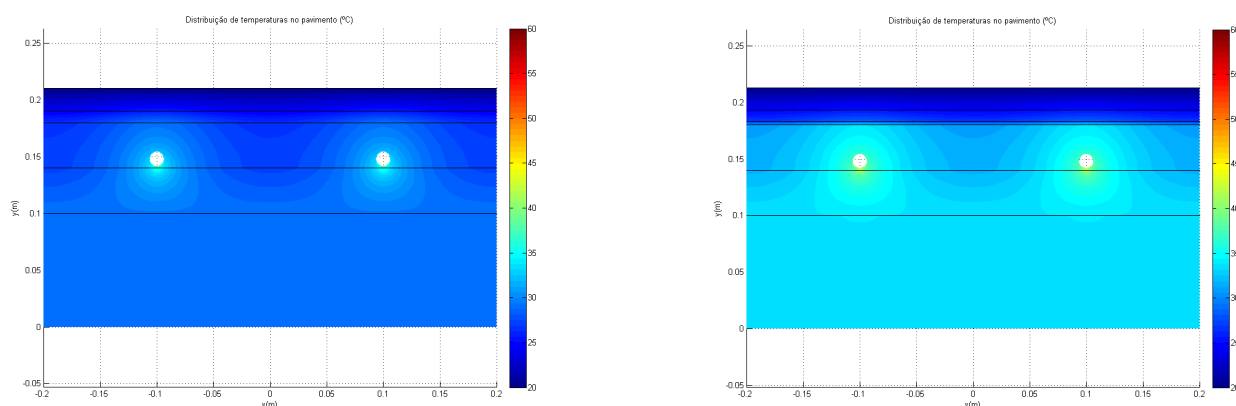


Figura 4.31 – Distribuição da temperatura, para o revestimento flutuante em madeira sem aplicação de Ethafoam (à esquerda) e com aplicação de Ethafoam (à direita).

A temperatura média da água, para o pavimento sem a camada de Ethafoam, é de 34,29 °C, enquanto para o pavimento com a camada de Ethafoam, é de 38,86 °C. O aumento de temperatura, devido à aplicação de Ethafoam, ocorre porque este material apresenta características de isolamento térmico, logo é necessário produzir mais energia para compensar a quantidade de calor que esta camada impede que seja transmitida. Desta forma, pode verificar-se uma maior concentração de calor nas camadas abaixo da camada de Ethafoam, comparando com a distribuição de calor no pavimento sem esta camada.

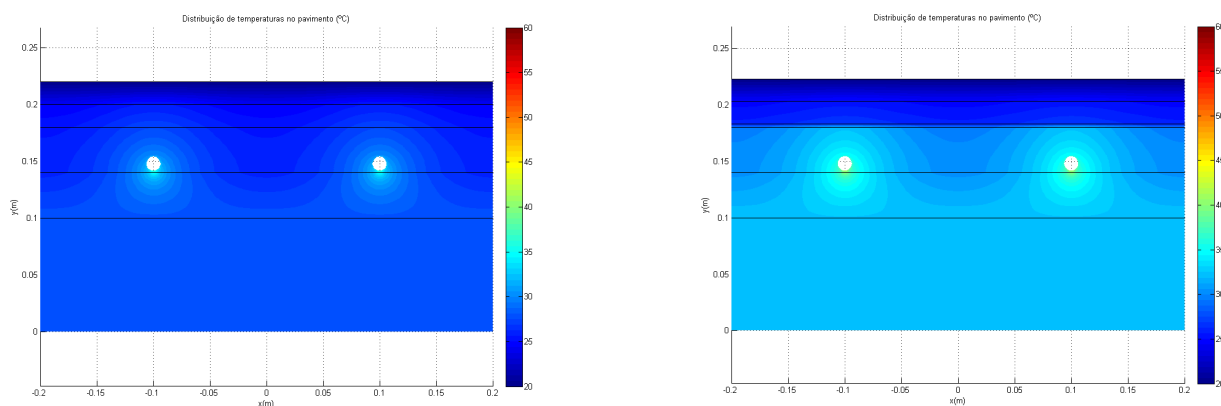


Figura 4.32 – Distribuição da temperatura, para o revestimento em soalho sem aplicação de Ethafoam (à esquerda) e com aplicação de Ethafoam (à direita).

A temperatura média da água, para o pavimento sem a camada de Ethafoam, é de 32,79 °C, enquanto para o pavimento com a camada de Ethafoam, é de 37,47 °C. Nesta solução verifica-se o mesmo comportamento que para o caso anterior (Figura 4.31). O facto de as temperaturas para esta solução serem mais baixas do que para a primeira, deve-se às características de cada um dos revestimentos, ou seja, ao facto de o soalho permitir a transferência de maior quantidade de calor que o revestimento flutuante.

Para ambas as soluções verifica-se uma diferença da temperatura média da água muito semelhante, entre o caso que não tem camada de Ethafoam e o que tem essa mesma camada. Na primeira solução a camada de Ethafoam obriga a um aumento de temperatura de 4,57 °C, e na segunda solução a um aumento de 4,68 °C.

Conclui-se que, efetivamente, o Ethafoam influencia significativamente as características de isolamento térmico de um pavimento. Contudo, aplicar este material num pavimento com um sistema de pavimento radiante parece não ser uma opção interessante.



## 5 OBTENÇÃO DE ÁBACOS DE APOIO A PROJETO

### 5.1 Introdução

O cálculo da temperatura da água do sistema de pavimento radiante é um dos passos do dimensionamento deste tipo de sistemas, e um dos cálculos mais difíceis e complexos (Godinho, 2009). Usualmente recorre-se a ábacos que possibilitam a determinação da temperatura da água de uma forma direta. No ponto 2.3 deste trabalho foram apresentados alguns ábacos, que podem ser usados na determinação da temperatura da água que circula nas tubagens do sistema e, como se percebeu, alguns desses ábacos foram construídos para sistemas de pavimento radiante com características particulares. Pretende-se, agora, obter ábacos que correspondam a sistemas de pavimento radiante com características diferentes, de forma a aumentar a informação disponível para um correto dimensionamento.

### 5.2 Validação dos ábacos

Para verificar, a fiabilidade dos ábacos desenvolvidos neste trabalho, cujos valores são determinados com o auxílio do modelo desenvolvido através do *software Matlab*, tenta-se, primeiramente, comparar com os ábacos indicados no ponto 2.3 deste trabalho, representados nas Figura 2.3, Figura 2.4 e Figura 2.5.

No catálogo da RDZ (2011), que fornece os ábacos de dimensionamento, as informações fornecidas sobre a solução construtiva do sistema de pavimento radiante, usadas para obter os ábacos, estão indicadas no Quadro 5.1:

Quadro 5.1 – Informação sobre o sistema de pavimento radiante (RDZ, 2011).

Betonilha	$\lambda_b$ (W/m.°C)	1,20
	$S_b$ (m)	0,07
Isolamento térmico	$\lambda_i$ (W/m.°C)	0,035
	$S_i$ (m)	0,039
Tubagem	$\varphi$ (m)	0,017
	$S_t$ (m)	0,002

Relativamente ao revestimento do pavimento, apenas se conhecem as resistências térmicas que este assume (0,05, 0,10 e 0,15 m<sup>2</sup>C/W).

Assumindo-se que o revestimento tem 0,015 m de espessura, pois não é um valor indicado no catálogo, e impondo uma temperatura interior de 20°C, obtêm-se os ábacos apresentadas na Figura 5.1, na Figura 5.2, e na Figura 5.3.

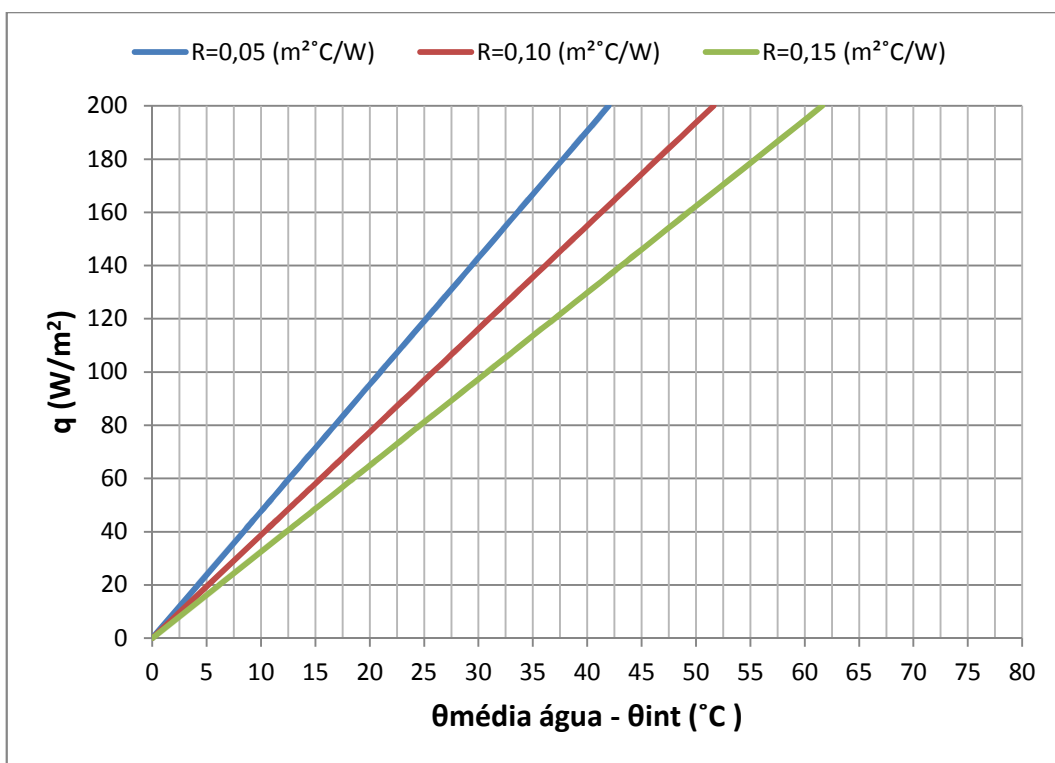


Figura 5.1 – Ábaco de cálculo de temperatura média da água, com  $e = 0,088$  m.

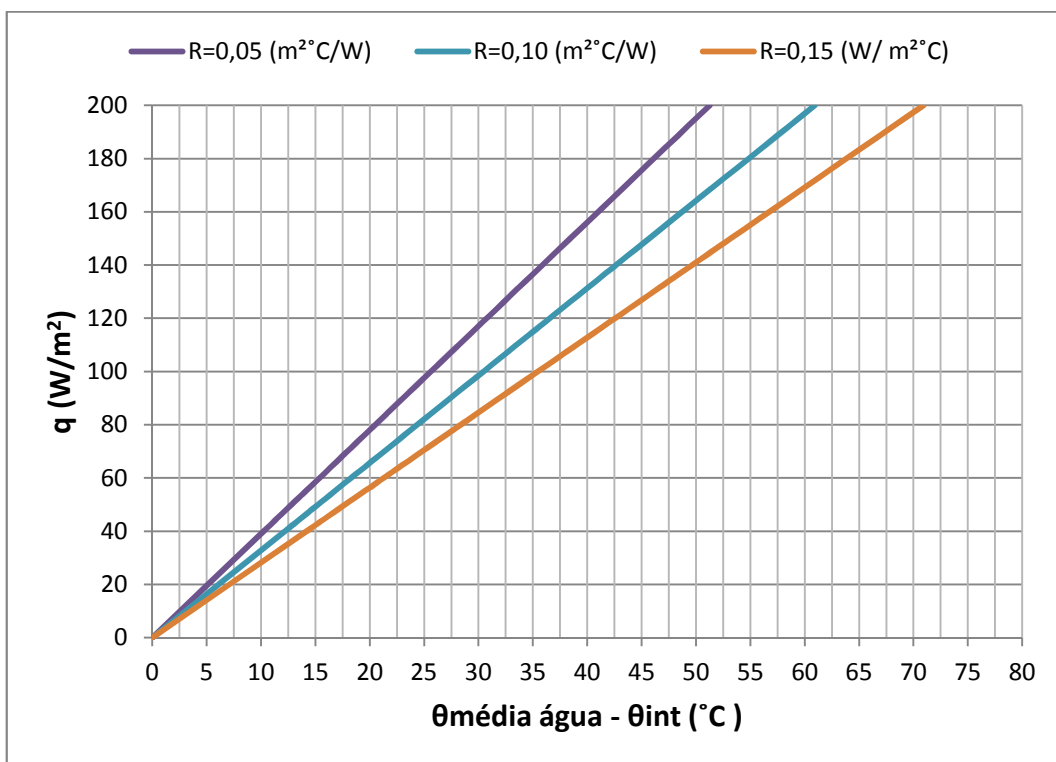


Figura 5.2 – Ábaco de cálculo de temperatura média da água, com  $e = 0,166$  m.

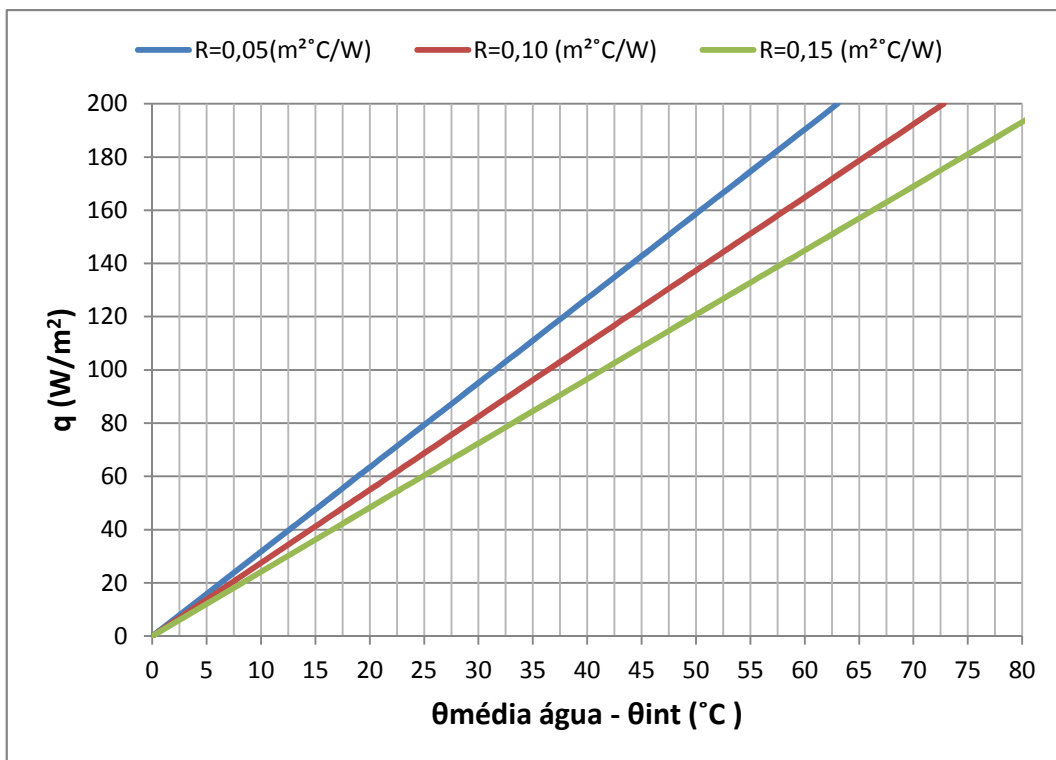


Figura 5.3 – Ábaco de cálculo de temperatura média da água, com  $e = 0,249$  m.

Comparando os ábacos aqui apresentados (Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3) e os fornecidos pelo fabricante (Figura 2.3, Figura 2.4, Figura 2.5) observa-se uma grande semelhança entre os valores que resultaram do modelo numérico e os que se obtêm dos ábacos originais.

Nas curvas que correspondem a revestimentos de maior resistência térmica, existe uma maior discrepância entre os valores obtidos do programa e os valores dos ábacos originais. Esta discrepância também vai sendo mais significativa à medida que os diferenciais de temperatura vão aumentando.

A falta de informação sobre o método usado para determinar os ábacos do fabricante, o não conhecimento do revestimento considerado por parte deste e o facto de não se saber se teve em consideração a condutibilidade térmica do material da tubagem, são algumas condições que condicionam os resultados obtidos neste trabalho.

Efetivamente, consegue-se demonstrar que o modelo numérico representa de uma forma fidedigna o comportamento do sistema de pavimento radiante, tornando-se uma boa ferramenta para determinar a temperatura média da água.

### **5.3 Ábacos de auxílio ao dimensionamento**

Do estudo paramétrico realizado no ponto 4.2 do presente trabalho concluiu-se que a condutibilidade térmica do revestimento e o espaçamento entre tubos são os parâmetros que maior influência têm sobre o desempenho do sistema de pavimento radiante, por conseguinte julga-se ser útil a criação de ábacos que permitam determinar a temperatura da água de acordo com vários revestimentos de pavimento e para diferentes espaçamentos entre tubos. Por esta razão, pretende-se, nesta fase do trabalho, obter ábacos através dos quais se possa estimar o diferencial de temperaturas entre a temperatura de impulsão da água e a temperatura superficial, em função do fluxo de calor entre a superfície do pavimento e o ambiente interior e do espaçamento entre tubos, para revestimentos de pavimento específicos.

Os ábacos aqui apresentados, foram desenvolvidos para uma temperatura interior de 20 °C, um diferencial de temperaturas entre a ida e o retorno da água de 10 °C, um coeficiente de transmissão de calor da superfície do pavimento de 12 W/m<sup>2</sup>°C e de acordo com a constituição do sistema de pavimento radiante apresentada no Quadro 5.2. No Quadro 2.1 apresentam-se os revestimentos para os quais se pretende desenvolver os ábacos de auxílio a projeto, assim como as suas características.

Quadro 5.2 – Constituição do sistema de pavimento radiante.

Betonilha	$\lambda_b$ (W/m.°C)	1,40
	$S_b$ (m)	0,04
Isolamento térmico	Material	Poliestireno Expandido (EPS)
	$\lambda_i$ (W/m.°C)	0,045
	$S_i$ (m)	0,04
Tubagem	$\phi$ (m)	0,017
	$S_t$ (m)	0,002

Na Figura 5.4, podem comparar-se os comportamentos térmicos do sistema de aquecimento radiante, de acordo com os revestimentos de pavimento, para um espaçamento entre tubos de 0,2 m.

É de notar que este ábaco não pode ser comparado com o ábaco da Figura 2.2, pois não se conhece a constituição e parâmetros do sistema de pavimento radiante, que serviram de base na determinação do ábaco.

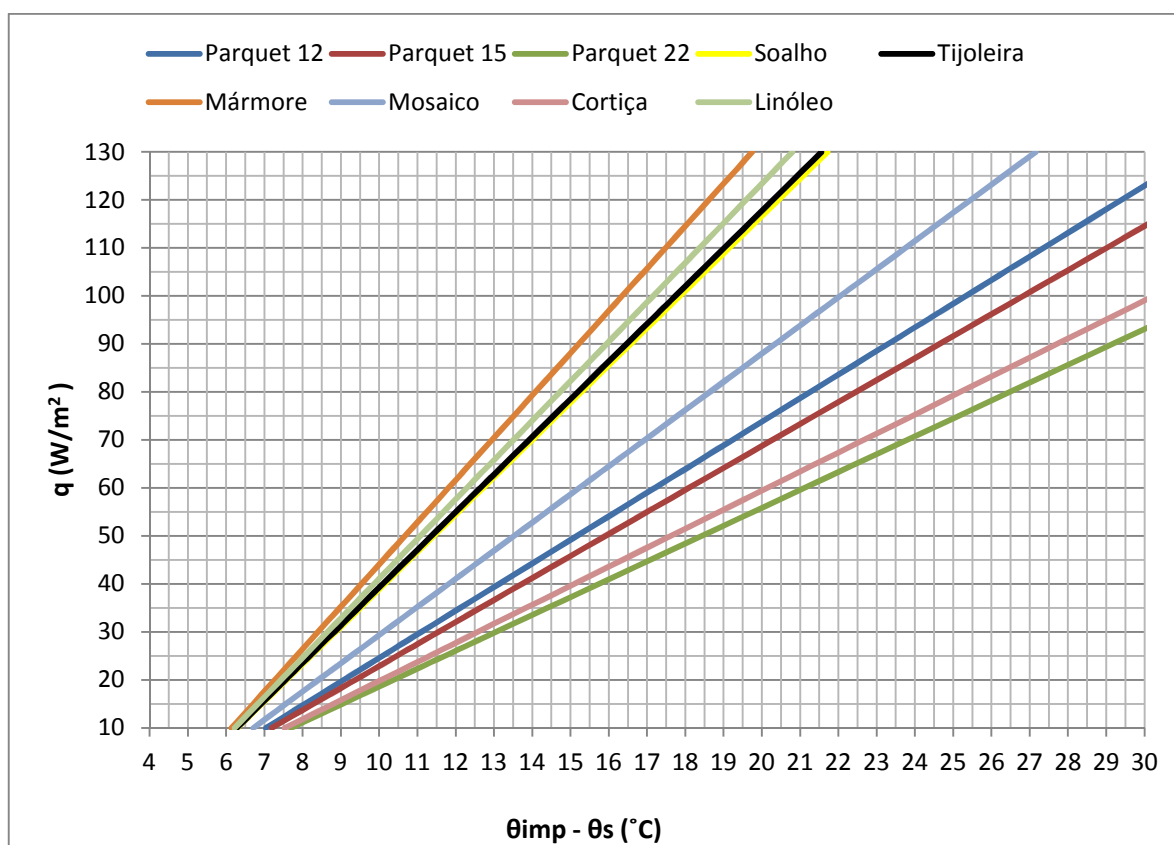


Figura 5.4 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para vários tipos de revestimento.

Analisando a Figura 5.4, percebe-se que as curvas referentes ao mármore, ao linóleo, à tijoleira e ao soalho, têm um comportamento muito semelhante, e que estes revestimentos não exigem uma produção de calor tão elevada como os restantes revestimentos.

O mármore é o revestimento mais espesso e o que impõe as temperaturas da água mais baixas, mesmo comparando com o linóleo, que, de entre todos os revestimentos, é o que apresenta a menor espessura. Mas, por outro lado, o mármore apresenta uma condutibilidade térmica muito elevada, a maior entre todos os revestimentos, fazendo com que o calor tenha maior facilidade em ser transmitido, daí o comportamento térmico que apresenta. Analogamente, era esperado que o revestimento de cortiça, cuja condutibilidade térmica é a mais baixa, fosse o revestimento que exigisse os maiores valores da temperatura da água, mas isto não acontece. O Parquet 22 é o que exige maiores temperaturas da água, mesmo apresentando uma condutibilidade térmica maior que o revestimento de cortiça. Por esta análise, percebe-se que o desempenho térmico de um revestimento depende da relação entre a sua espessura e a sua condutibilidade térmica, ou seja, depende da sua resistência térmica.

Desta forma, o diferencial de temperaturas, entre a temperatura de impulsão da água e a temperatura superficial do pavimento, é menor para os revestimentos que apresentam menores resistências térmicas.

Para além de ser interessante, obter um ábaco que permita determinar a temperatura de impulsão da água num sistema de pavimento radiante, de acordo com os vários revestimentos, acha-se também pertinente obter ábacos que possibilitem determinar esta temperatura, mas agora para espaçamentos de tubos diferentes, por se tratar de um parâmetro que já se entendeu ter uma influência significativa no comportamento do sistema de pavimento radiante.

Nas Figura 5.5, Figura 5.6, Figura 5.7, Figura 5.8, Figura 5.9, Figura 5.10, Figura 5.11, Figura 5.12 e Figura 5.13, são apresentados ábacos que permitem conhecer o diferencial de temperaturas, entre a temperatura de impulsão e a temperatura de superfície do pavimento, para cada revestimentos apresentado no Quadro 2.1, de acordo espaçamentos de tubos de 0,15, 0,2 e 0,3 m.

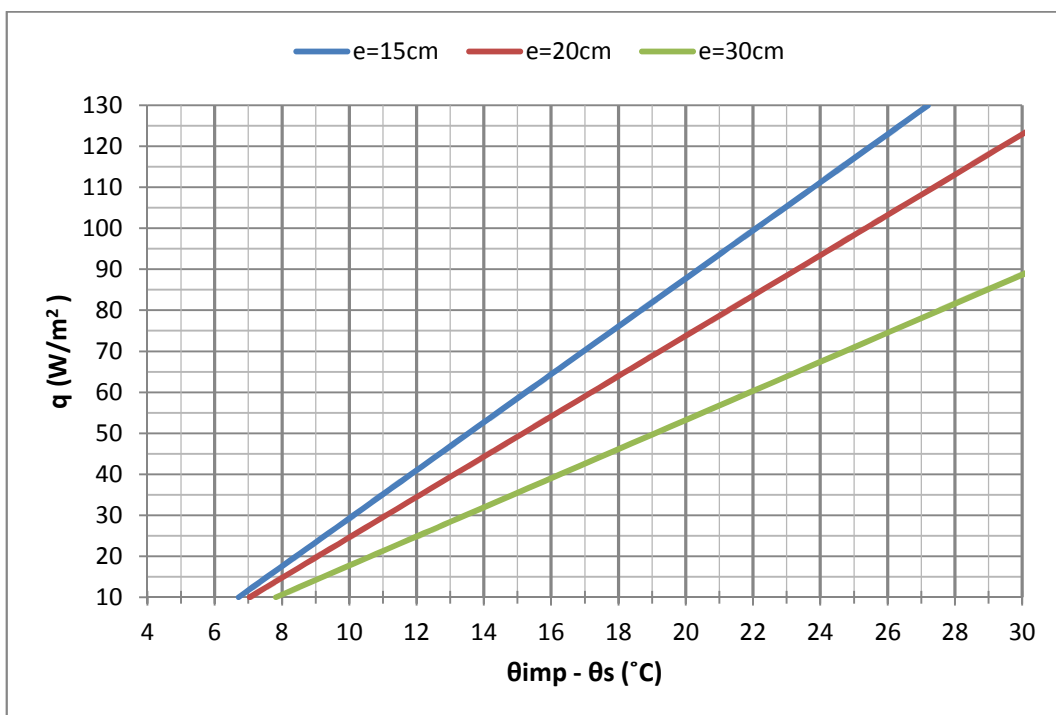


Figura 5.5 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para um revestimento de Parquet com 12 mm de espessura.

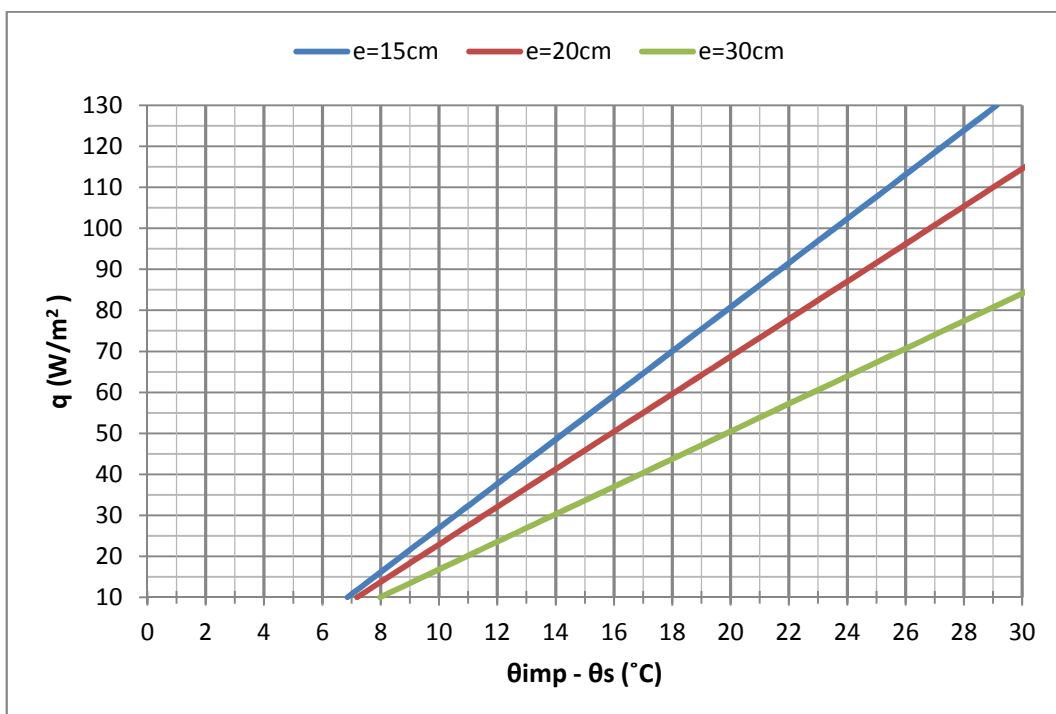


Figura 5.6 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para um revestimento de Parquet com 15 mm de espessura.

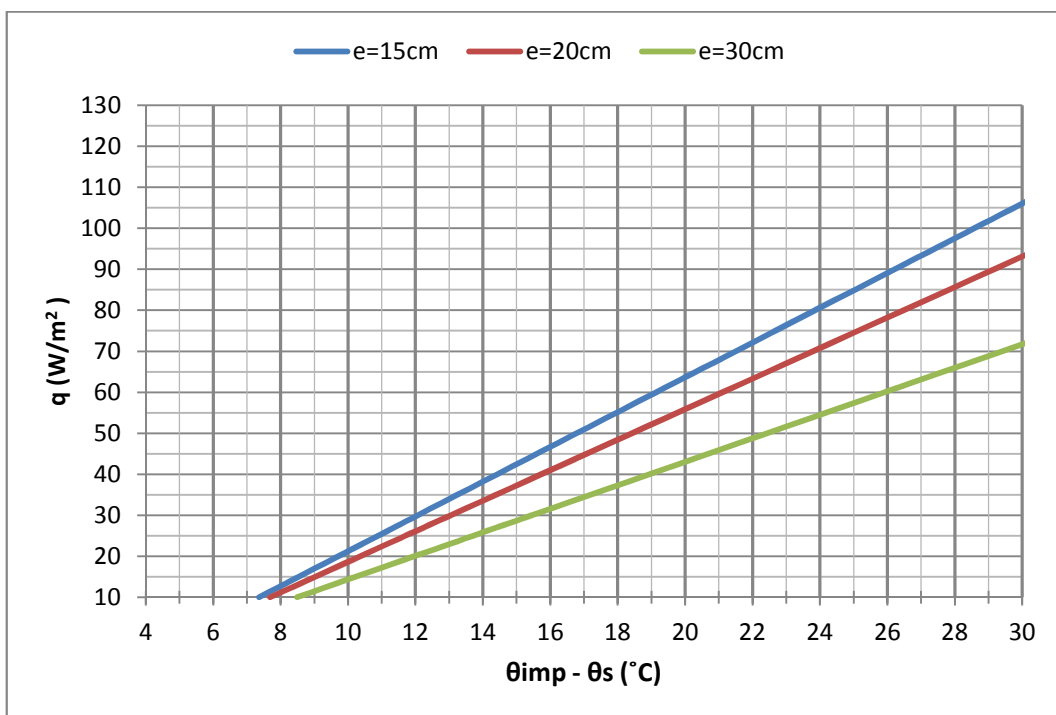


Figura 5.7 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para um revestimento de Parquet com 22 mm de espessura.

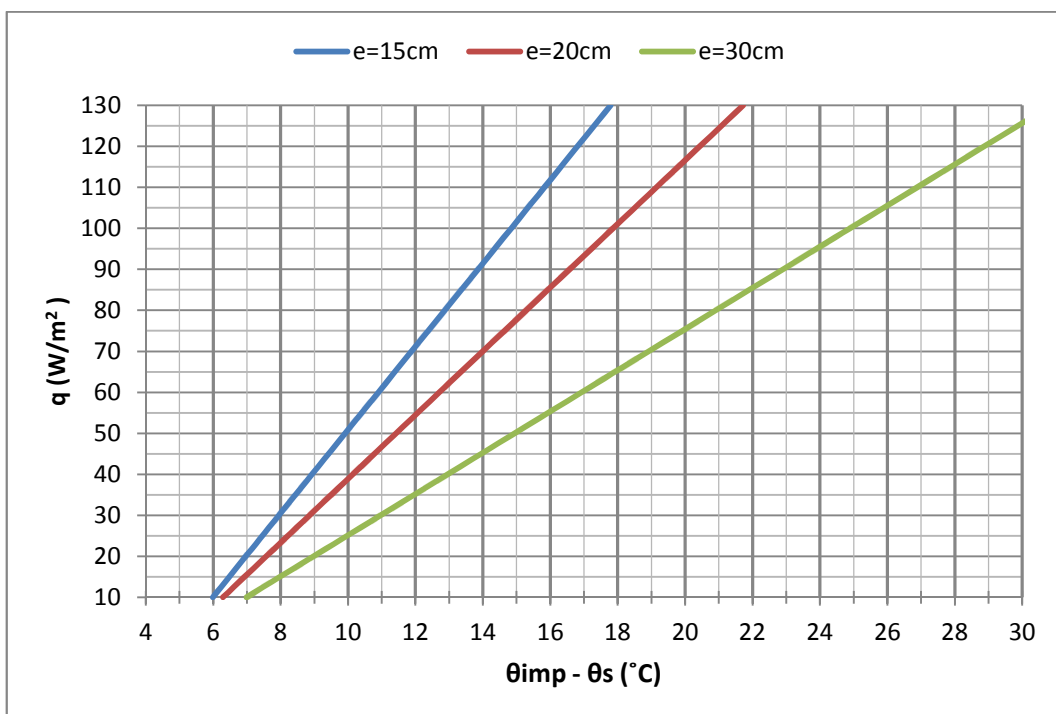


Figura 5.8 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para um revestimento em Soalho.



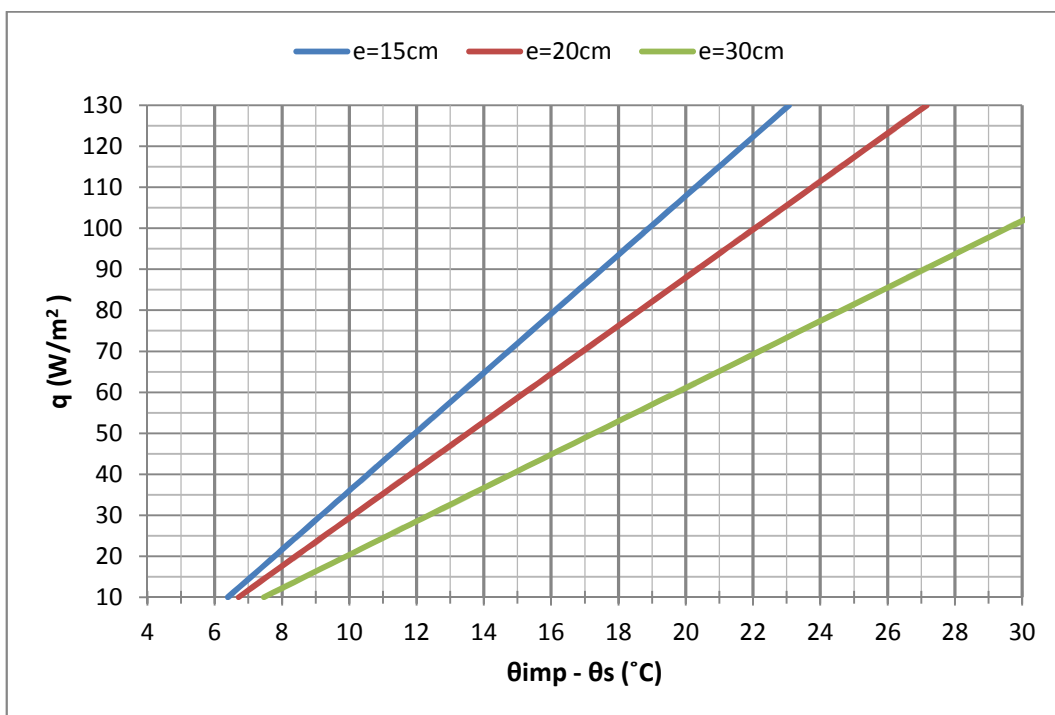


Figura 5.9 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para um revestimento em Mosaico.

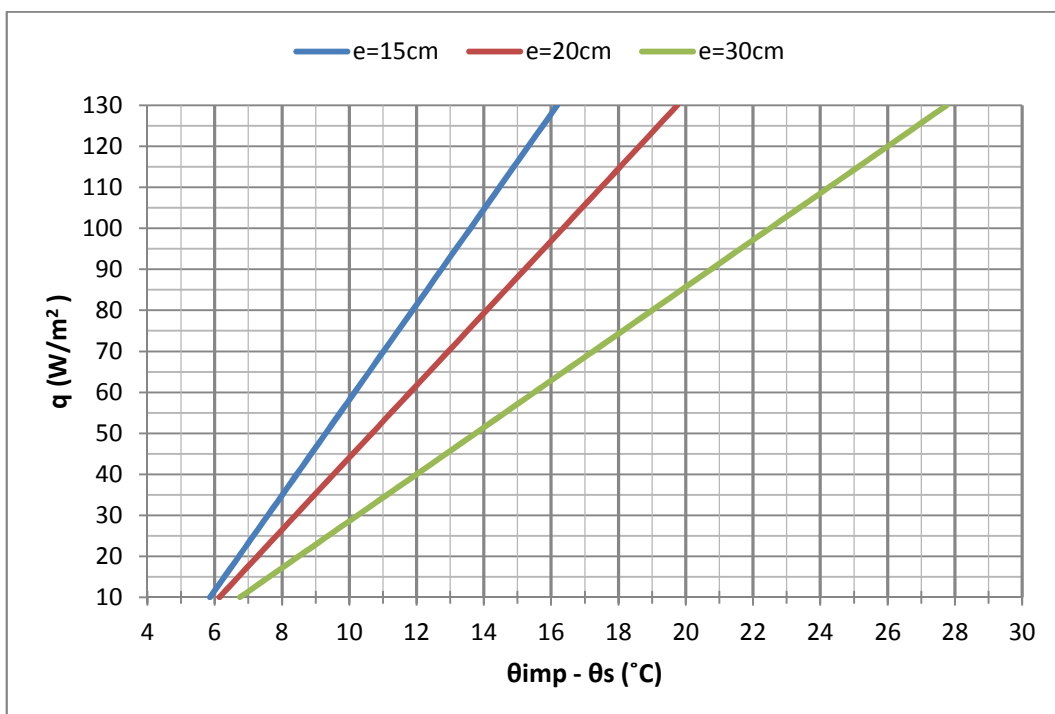


Figura 5.10 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para um revestimento em Mármore.

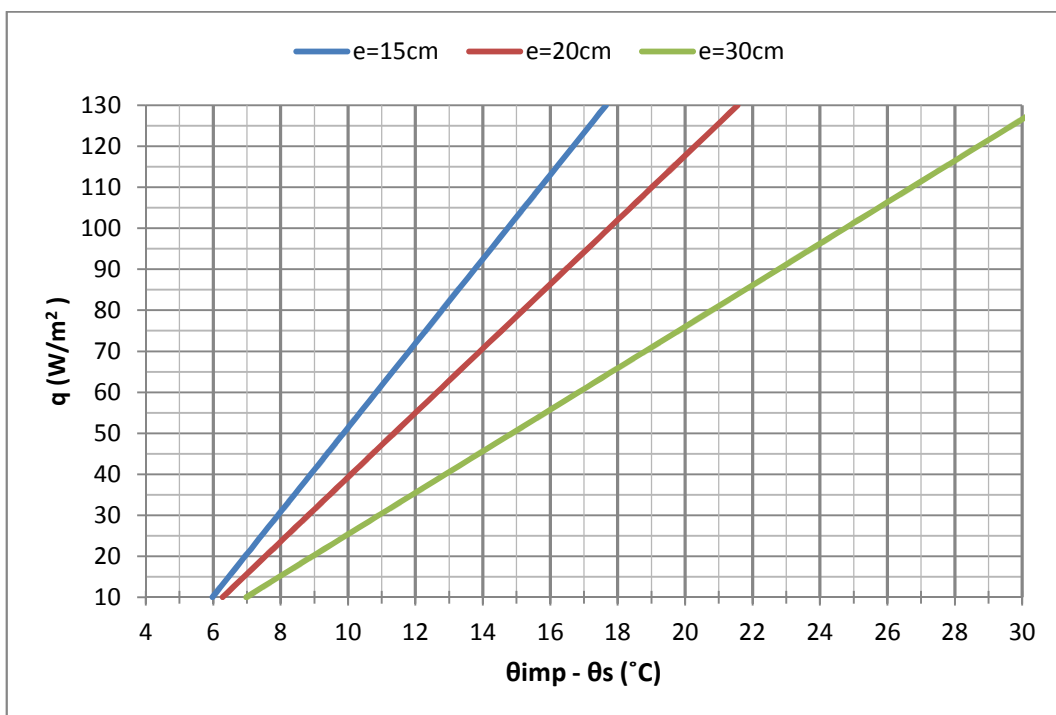


Figura 5.11 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para um revestimento em Tijoleira.

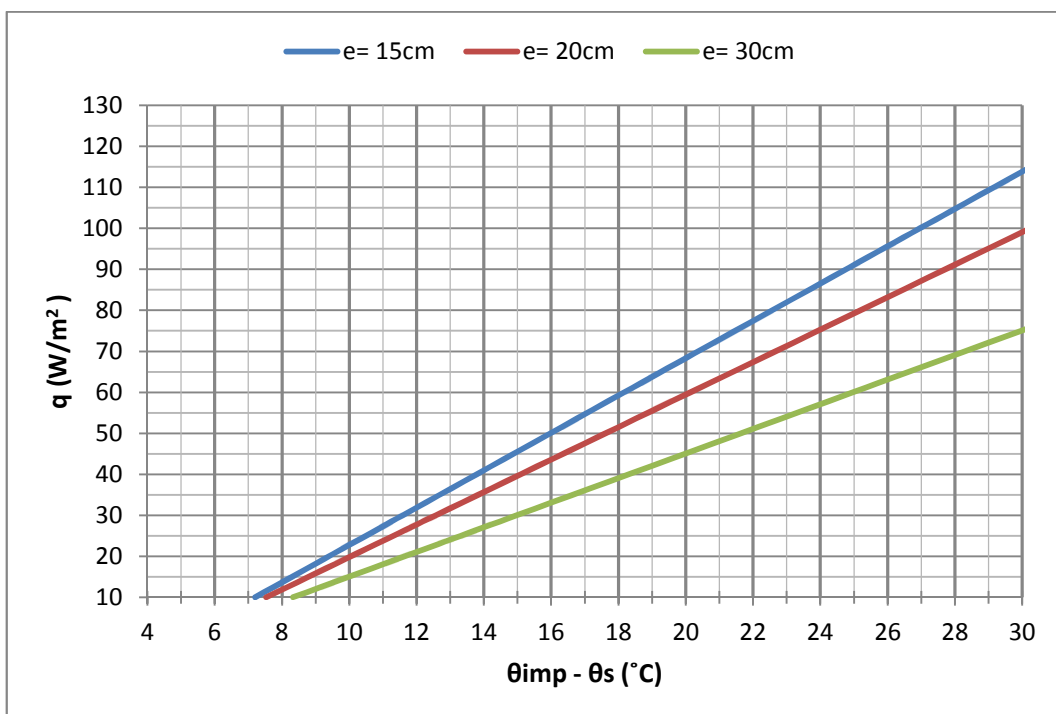


Figura 5.12 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para um revestimento de Cortiça.

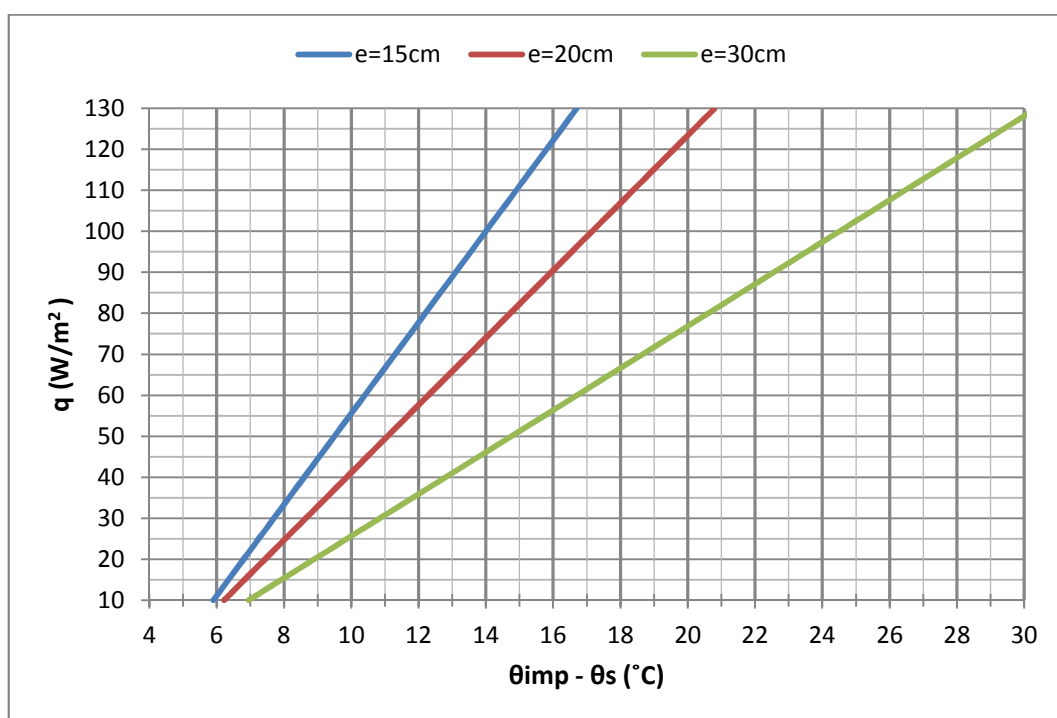


Figura 5.13 – Ábaco de cálculo da temperatura de impulsão da água, para um revestimento de Linóleo.

Pelos ábacos observa-se, como no ponto 4.2, que quanto maior o espaçamento entre tubos, mais elevada tem de ser a temperatura da água.

Nos ábacos referentes aos revestimentos com resistências térmicas inferiores a cerca de  $0,05 \text{ m}^2\text{C/W}$ , como é o caso do mármore, do linóleo, do soalho e da tijoleira, pode observar-se que a curva referente ao espaçamento de 0,3 m se afasta bastante das outras duas curvas. Constata-se que para os espaçamentos de 0,15 m e 0,2 m, os valores das temperaturas da água são muito mais baixos, dos valores obtidos para o espaçamento de 0,3 m.

Por outro lado, os revestimentos que oferecerem mais resistência à passagem do calor (Parquet 12, Parquet 15, Parquet 22, Mosaico, Cortiça), obrigam a que a temperatura da água assumira valores elevados, mesmo para pequenos espaçamentos entre tubos. Desta forma, nos ábacos referentes a estes revestimentos, não se verifica uma grande disparidade entre o comportamento das curvas referentes a maiores e menores espaçamentos.

Depreende-se que, quando se utiliza um revestimento com uma resistência térmica elevada, não convém que a distância entre os tubos do sistema de pavimento radiante seja muito grande. Contudo, se na fase de projeto, se optar por um espaçamento entre tubos elevado, deve-se ter atenção à resistência térmica do revestimento a aplicar, pois não será recomendável que este tenha uma resistência muito elevada.

Um maior espaçamento entre tubos permite que o comprimento da tubagem seja menor, o que pode ser económico, na fase de construção. No entanto, como se concluiu, grandes espaçamentos entre tubos obrigam a uma maior produção de energia, para satisfazer as necessidades térmicas do espaço, e assim o sistema de aquecimento por pavimento radiante, tornar-se-á, a longo prazo, uma solução onerosa.

Conclui-se que, usar sistemas de pavimento radiante com espaçamentos entre tubos de 0,3 m ou mais, não é a opção mais viável. Quando se trata de revestimentos com resistências térmicas significativamente elevadas, os tubos, que constituem o sistema de pavimento radiante, não devem distar muito entre si.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões

Os sistemas de climatização, dos quais fazem parte os sistemas de pavimento radiante, dão um grande contributo para o conforto térmico nos edifícios. Sendo o conforto térmico um fator bastante importante para o bem-estar dos ocupantes de um edifício, é compreensível a procura por sistemas de climatização com cada vez melhor qualidade.

Para se poder melhorar a eficiência dos sistemas de climatização, é necessário perceber como estes se comportam de acordo com vários cenários. O estudo destes sistemas, permite perceber quais as suas limitações e as características que devem ser aperfeiçoadas.

Neste trabalho, os sistemas de pavimento radiante são objeto de estudo. Para se tentar conhecer melhor os fatores que influenciam o comportamento térmico dos sistemas de pavimento radiante, foi feito um estudo paramétrico. Todo o trabalho foi realizado com o auxílio do *software Matlab*, usando como método de cálculo, o Método dos Elementos Finitos.

O estudo paramétrico permitiu perceber qual o contributo individual dos parâmetros estudados (condutibilidades térmicas e espessuras do revestimento e da camada de betonilha, diâmetro dos tubos e espaçamento entre tubos).

Concluiu-se que a condutibilidade térmica do revestimento e o espaçamento entre tubos são parâmetros que têm muita influência no desempenho térmico, pois são os parâmetros para os quais se observam maiores variações na distribuição de calor no pavimento e, nos valores da temperatura média da água.

Mas é necessário ter particular atenção ao espaçamento entre tubo, quando assume valores elevados. Porque, para além de implicar que a temperatura da água seja muito elevada, também afeta, de forma significativa, a distribuição da temperatura ao longo da superfície do pavimento. Podendo provocar algum desconforto térmico, aos ocupantes do espaço, por existirem zonas do pavimento com temperaturas muito superiores a outras.

Verificou-se que o aumento das espessuras do revestimento e da camada de betonilha conduzem a um aumento da temperatura da água. Por outro lado, observou-se uma diminuição da temperatura da água, com o aumento do diâmetro dos tubos. No entanto, as

variações na temperatura da água, que se verificaram devido a estes três parâmetros, são pouco significativas.

Numa segunda fase do presente trabalho, determinaram-se ábacos que possam servir de apoio a projeto. Já existem, na literatura, ábacos que permitem determinar alguns parâmetros de projeto. Mas, muitos desses ábacos são mais direcionados para sistemas de pavimento radiante com características particulares.

Um primeiro ábaco, obtido neste trabalho, pode possibilitar a determinação do diferencial de temperaturas, entre a temperatura de impulsão da água e a temperatura superficial do pavimento, de acordo com as necessidades térmicas do local e para vários tipos de revestimento de pavimento.

Da análise do ábaco, pode concluir-se que o desempenho térmico dos sistemas de pavimento radiante, depende significativamente da relação entre a espessura e a condutibilidade térmica (resistência térmica) do revestimento do pavimento. Aos revestimentos com menores resistências térmicas, correspondem menores valores do diferencial de temperatura, entre a temperatura de impulsão da água e a temperatura superficial.

Outros ábacos foram obtidos, que permitem determinar o diferencial de temperaturas, entre a temperatura de impulsão da água e a temperatura superficial. Estes ábacos relacionam as necessidades térmicas do local, o tipo de revestimento do pavimento e o espaçamento entre os tubos.

Concluiu-se, através desses ábacos, que em sistemas de pavimento radiante, quando se usam revestimento com materiais de resistência térmica elevada, o espaçamento entre tubos não deve ser muito grande. Percebeu-se também que, optar por espaçamentos entre tubos de cerca de 0,3 m, ou superior, pode não ser a opção mais económica.

Foi estudado, também, um pavimento com uma solução estrutural diferente. Considerou-se uma camada adicional de espuma de polietileno, entre o revestimento do pavimento e a camada de betonilha. Percebeu-se que adicionar esta camada, a uma solução construtiva, não é a opção mais interessante, porque na presença desta camada, a temperatura da água é elevada, comparando com a mesma solução construtiva sem esta camada.

Em suma, os objetivos principais do presente trabalho foram atingidos. Conseguiu-se perceber, de uma forma geral, o comportamento térmico geral de um sistema de pavimento radiante e em que medida as características do pavimento condicionam este comportamento. Adicionalmente, foram obtidos alguns ábacos que relacionam vários parâmetros importantes no dimensionamento dos sistemas de pavimento radiante.

## 6.2 Trabalhos Futuros

O estudo do presente trabalho, foi realizado considerando apenas uma pequena secção, de um sistema de pavimento radiante. Num trabalho futuro, pode ser estudado o comportamento térmico de um sistema de pavimento radiante, mas considerando as dimensões e características de um pavimento real.

Futuramente, pode ser interessante fazer uma análise do comportamento de sistemas de pavimento radiante, integrados em pavimentos com soluções estruturais diferentes das soluções que normalmente são usadas.

Outro trabalho que poderá ser elaborado, consiste em implementar um modelo numérico que, com o auxílio de um *software*, permita fazer uma análise dinâmica do comportamento térmico de um sistema de pavimento radiante. Podendo simular-se a distribuição, ao longo do tempo, da temperatura no pavimento e, quando atingisse uma determinada temperatura superficial, poder observar a temperatura no pavimento a diminuir. Poderá simular-se, assim, o comportamento de um sistema de pavimento radiante, de forma mais realista.

Também pode ser interessante estudar a distribuição do calor, libertado por um sistema de pavimento radiante, num compartimento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ansuini, R., Larghetti, R., Giretti, A., et al. (2011). "Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control." *Energy and Buildings*, Vol. 43, Issue 11, pp. 3019-3026.

Dow - Ficha técnica-"Ethafoam - Impact sound insulation". Dow. Disponível em: <http://www.kofinas.gr/cert/ethaf.pdf> (acedido em 19/11/2013).

Engenhariacivil@ (2013). <http://www.engenhariacivil.com/paredes-gesso-conservam-energia>. (acedido em: 29/10/2013).

Giacomini (2004) - Comunicação Técnica - "Como Projectar e Realizar Instalações de Climatização por Pavimento Radiante para Aquecimento e Arrefecimento". Disponível em <http://www.giacomini.pt/media/download/produtos/notas-tecnicas/Pavimento-Radiante.pdf> (acedido em 29/10/2013).

Godinho, L. (2009). "Instalações de ventilação e climatização – apontamentos de apoio às aulas de Instalações Técnicas em Edifícios", DEC-FCTUC.

Holopainen, R., Tuomaala, P. e Piippo, J. (2007). "Uneven gridding of thermal nodal networks in floor heating simulations." *Energy and Buildings*, Vol. 39, Issue 10, pp. 1107-1114.

Jin, X., Zhang, X. e Luo, Y. (2010). "A calculation method for the floor surface temperature in radiant floor system." *Energy and Buildings*, Vol. 42, Issue 10, pp. 1753-1758.

Lopes, J. (2009). "Avaliação de Desempenho de Soalhos Compósitos Industrializados - Estudo de Caso". Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.

Lopes, R. (2008). "Estudo de caso: Membrana resiliente de baixo custo para isolamento de ruídos de percussão, com recurso a borracha reciclada de pneus". Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.

MAPEI (2012) - "Realização de Betonilhas para o Assentamento de Pavimentos - Caderno Técnico". Disponível em [http://www.mapei.com/public/PT/menu/QT\\_BETONILHAS.pdf](http://www.mapei.com/public/PT/menu/QT_BETONILHAS.pdf). (acedido em 16/10/2013).

Nikishkov, G. P. (2004). "INTRODUCTION TO THE FINITE ELEMENT METHOD". University of Aizu, Aizu Wakamatsu, Japan.

Pinto, A. (2000). Seminário Ambiente em edifícios urbanos. Módulo 4 - Ventilação e climatização, Parte III: Sistemas de climatização e ventilação mecânica. LNEC. Lisboa: pp. 337-400.



RCCTE - Regulamento de Características de Comportamento Térmico dos Edifícios - Dec-Lei nº 80/2006 de 4 de Abril.

RDZ (2011) - "Catálogo - Aquecimento por pavimento", RDZ invisible heating and cooling.

Rodrigues, A. e Piedade, A. (1993). "Térmica de Edifícios - Elementos sobre a transmissão do calor".  
Santos, C. e Matias, L. (2006). "Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios". Lisboa:LNEC, ITE 50.

Sattari, S. e Farhanieh, B. (2006). "A parametric study on radiant floor heating system performance." *Renewable Energy*, Vol. 31, Issue 10, pp. 1617-1626.

Seo, J., Jeon, J., Lee, J., et al. (2011). "Thermal performance analysis according to wood flooring structure for energy conservation in radiant floor heating systems." *Energy and Buildings*, Vol. 43, Issue 8, pp. 2039-2042.

Solius (2013). "Sistemas Radiantes - Aquecimento e Refrescamento." Solius - Intelligent energy. Disponível em: <http://www.solius.pt/sistradiantes/> (acedido em 11/10/2013).

Sousa, R. M. (2003). O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor. Departamento de Engenharia Civil. Pará, Universidade Federal do Pará.

UPONOR (2006). "Aplicação de aquecimento radiante e climatização - Manual Técnico".