

Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu

Waleska Moraes Reis

Simulação Tridimensional do Desempenho Térmico de Sistemas de Pavimento Radiante

Dissertação de Mestrado

Engenharia de Construção e Reabilitação

Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos F. de Almeida

Professor Doutor António Ventura Gouveia

Professor Doutor José Ilo Pereira Filho



Janeiro de 2022

RESUMO

Tendo em vista a constante busca dos indivíduos por espaços que ofereçam conforto termicamente, diversos tipos de climatização artificial foram criados. Contudo, atrelado a estes métodos se faz necessário um elevado gasto energético para sua utilização, gasto este que além de interferir no sistema económico, também impacta diretamente o meio ambiente. Desta forma, o sistema de pavimento radiante hidráulico vem sendo utilizado como opção que possibilita oferecer uma elevada eficiência energética.

O presente trabalho tem como objetivo a melhoria do desempenho térmico destes sistemas a partir do estudo de alguns parâmetros que tem influência direta em seu funcionamento, sendo eles a condutibilidade térmica da betonilha e a temperatura do ar exterior.

Para isto, inicialmente foi criado um modelo numérico tridimensional que fosse o mais próximo possível da realidade e então, a partir de dados experimentais de um estudo anterior, este modelo foi calibrado. Posteriormente, se deu início a análise de sensibilidade dos parâmetros anteriormente citados. A condutibilidade térmica foi avaliada para que fosse possível observar qual o impacto que o aumento desta propriedade proporciona ao sistema. Já a temperatura do ar exterior possibilitou entender como este influencia a temperatura superficial do pavimento e se este método de climatização é indicado para as temperaturas avaliadas nesta pesquisa.

A betonilha otimizada com elevada condutibilidade térmica apresentou melhor comportamento, uma vez que esta propriedade reflete diretamente na rapidez com que a transferência de calor ocorrerá, contudo, a betonilha autonivelante, mesmo que apresentando um perfil de temperatura mais baixo que a anterior, ainda mostrou excelentes resultados, permitindo então sua utilização neste tipo de sistema, já que possui um custo de mercado menor que uma betonilha otimizada. Já na avaliação do segundo parâmetro, foi possível concluir que para temperaturas do ar entre 5°C e 20°C a utilização deste modelo é indicado e, para as temperaturas superiores a 15°C o sistema não necessita ficar ligado por intervalos de tempo muito longo, o que interfere diretamente na eficiência energética do sistema. Além disso, o modelo numérico criado se mostra eficaz para futuras avaliações de outros parâmetros que influencia o funcionamento de um sistema de pavimento radiante hidráulico.

ABSTRACT

In view of the constant search of individuals for spaces that offer thermal comfort, several types of artificial air conditioning were created. However, these methods require a high energy cost for their use, a cost that in addition to interfering with the economic system, also directly impacts the environment. Thus, hydraulic radiant floor systems have been used as an option that makes it possible to offer high energy efficiency.

The present work aims at improving the thermal performance of these systems by studying some parameters that have a direct influence on their operation, namely the thermal conductivity of the screed and the outside air temperature.

For this, initially a three-dimensional numerical model that was as close to reality as possible was created and then based on experimental data from a previous study, this model was calibrated and validated. Subsequently, the sensitivity analysis of the previously mentioned parameters was started. The thermal conductivity was evaluated so that it was possible to observe the impact that an increase in this property has on the system. The outside air temperature, on the other hand, made it possible to understand how it influences the surface temperature of the pavement and whether this method of air conditioning is suitable for the temperatures evaluated in this research.

The optimized screed with high thermal conductivity showed better behavior, since this property directly reflects on the speed with which the heat transfer will occur, however the self-levelling screed, even though it presents a lower temperature profile than the previous one, still showed excellent results and allowing its use in this type of system, since it has a lower market cost than an optimized screed. In the evaluation of the second parameter, it was possible to conclude that for air temperatures between 5°C and 20°C the use of this model is indicated and, for temperatures above 15°C, the system does not need to be turned on for very long periods of time, which directly interferes in the energy efficiency of the system. In addition, the numerical model created proves to be effective for future evaluations of other parameters that influence the operation of a hydraulic radiant floor system.

PALAVRAS CHAVE

Pavimento radiante hidráulico

Conforto térmico

Simulação numérica tridimensional

Femix

Condutibilidade térmica

Temperatura superficial

KEY WORDS

Radiant Floor Heating

Thermal confort

Three-dimensional numerical simulation

Femix

Thermal Conductivity

Surface Temperature

AGRADECIMENTOS

Ao longo de todo meu percurso acadêmico, venho demonstrar meu mais sincero agradecimento a todos que de alguma forma me auxiliaram para que a conclusão de mais esta etapa fosse finalizada em minha vida.

Ao meu orientador, Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida, e meu coorientador Professor Doutor António Ventura Gouveia por toda disponibilidade e incansável ajuda que despenderam desde o início para que a presente dissertação fosse realizada da melhor maneira possível.

Ao meu coorientador Professor Doutor José Ilo Pereira Filho, pela disponibilidade, partilha de conhecimentos e confiança ao longo de toda meu percurso acadêmico.

Ao Professor Doutor Gustavo Lacerda Dias, por todas as palavras de apoio e auxílio prestado durante a realização deste mestrado.

Aos amigos que estiveram comigo durante minha trajetória na Universidade Tecnológica Federal do Paraná e no Instituto Politécnico de Viseu, obrigada por todo apoio prestado e momentos vividos.

Agradeço ainda a oportunidade de participar no Projeto de Investigação “Sistemas de pavimento radiante de elevada eficiência energética - SEERfloor” – financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (PTDC/ECI-COM/3436/2020).

Por fim, um agradecimento especial a minha família, especialmente a minha mãe, meu irmão e meu namorado por sempre acreditarem em mim, por todo amor, motivação e ajuda, a base fundamental para que eu chegasse ao fim deste ciclo.

ÍNDICE

ÍNDICE	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE tabelas.....	xix
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento e motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura base do trabalho	2
2. Sistemas de Pavimentos Radiante.....	4
2.1 Considerações iniciais e enquadramento histórico.....	4
2.2 Modos de transmissão de calor	6
2.2.1 Condução	6
2.2.2 Convecção.....	6
2.2.3 Radiação.....	6
2.3 Composição de um pavimento radiante	7
2.4 Betonilhas.....	8
2.4.1 Exigências funcionais das betonilhas.....	8
2.4.2 Classificação quanto ao tipo de aplicação.....	9
2.4.3 Tipos de betonilha.....	12
2.4.4 Condutibilidade térmica de betonilhas.....	13
2.5 Tipos de pavimento radiante	13
2.5.1 Piso radiante de ar	13
2.5.2 Piso radiante elétrico.....	14
2.5.3 Piso radiante hidráulico.....	15
2.6 Vantagens e Desvantagens	17
3. Simulação numérica.....	20
3.1 Desempenho térmico de pavimentos radiantes	20
3.2 Modelos matemáticos de transferência de calor em pavimentos radiantes.....	20

ÍNDICE GERAL

3.3	Método dos Elementos Finitos	22
3.4	Software	23
3.4.1	Materiais e métodos utilizados	24
3.4.2	Modelação geométrica tridimensional	28
3.5	Plano de simulações	28
4.	Análise e discussão dos resultados	31
4.1	Modelação geométrica tridimensional	31
4.2	Análise de sensibilidade.....	33
4.2.1	Condutibilidade térmica da betonilha.....	33
4.2.2	Temperatura do ar exterior	41
5.	Conclusões.....	55
5.1	Considerações finais	55
5.2	Trabalho futuros.....	56
	Referências	58
	Anexo 1	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Perfil de temperatura para diferentes tipos de aquecimento (Lemos, 2013)	5
Figura 2 - Distribuição da temperatura: Pavimento radiante Vs Radiadores (Lemos, 2013).....	5
Figura 3 – Exemplo de constituição típica de um pavimento radiante (Dias, 2014).....	7
Figura 4 - Betonilha aderente (Couto e Lusomapei, 2007)	9
Figura 5 - Betonilha dessolidarizada (Couto e Lusomapei, 2007)	10
Figura 6 - Betonilha dessolidarizada sobre.....	10
Figura 7 - Betonilha flutuante (Couto e Lusomapei, 2007).....	11
Figura 8 - Betonilha radiante (Couto e Lusomapei, 2007).....	11
Figura 9 - Representação de um pavimento radiante a ar quente (Watson e Chapman, 2002)	14
Figura 10 - Representação de um pavimento radiante elétrico (Warmup, 2010).....	15
Figura 11 - Representação esquemática de um pavimento radiante hidráulico (Warmup, 2010)	16
.....	16
Figura 12 - Composição tubo PEX (MACOP, 2019).....	17
Figura 13 - Exemplos de formas de elementos finitos (Souza, 2003).....	22
Figura 14 - Malha de elementos finitos (Souza, 2003).....	23
Figura 15 - Modelo do pavimento radiante hidráulico adotado	25
Figura 16 - Corte do pavimento radiante hidráulico adotado e condições de fronteira.....	25
Figura 17 - Malha tridimensional do pavimento radiante hidráulico	26
Figura 18 - Pontos de medição T* e S*	27
Figura 19 - Setup experimental - colocação dos tubos e termostatos (Rodrigues, 2019).....	27
Figura 20 - Setup experimental - aspeto final (Rodrigues, 2019)	28
Figura 21 - Perfil de temperatura do Caso A – Aquecimento intermitente.....	29
Figura 22 - Perfil de temperatura do Caso B - Aquecimento contínuo	30
Figura 23 - Temperatura ambiente experimental vs. temperatura ambiente adaptada para a simulação.....	31
Figura 24 - Comparação numérica do modelo de simulação: medições experimentais vs. dados numéricos	32
Figura 25 - Colorações na simulação da temperatura usada para o modelo geométrico tridimensional (t=0h, t=8h, t=12h, t=24h).....	33
Figura 26 – Temperatura no ponto T*, para o cenário de aquecimento intermitente para ambas as betonilhas	34
Figura 27 – Temperatura no ponto S* para o cenário de aquecimento intermitente para ambas as betonilhas	34
Figura 28 – Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento intermitente e com a betonilha autonivelante	35
Figura 29 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento intermitente e com a betonilha otimizada.....	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 30 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento intermitente e com a betonilha autonivelante.....	36
Figura 31 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento intermitente e com a betonilha otimizada	37
Figura 32 - Temperatura no ponto T* para o cenário de aquecimento contínuo para ambas as betonilhas	38
Figura 33 - Temperatura no ponto S* para o cenário de aquecimento contínuo para ambas as betonilhas	38
Figura 34 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento contínuo e com a betonilha autonivelante	39
Figura 35 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento contínuo e com a betonilha otimizada	39
Figura 36 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento contínuo e com a betonilha autonivelante	40
Figura 37 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento contínuo e com a betonilha otimizada	40
Figura 38 - Temperatura no ponto T* para o cenário de aquecimento intermitente para as diferentes temperaturas exteriores	42
Figura 39 - Temperatura no ponto S* para o cenário de aquecimento intermitente para as diferentes temperaturas exteriores	42
Figura 40 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento intermitente para temperatura de 5°C.....	43
Figura 41 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento intermitente para temperatura de 10°C	44
Figura 42 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento intermitente para temperatura de 15°C.....	44
Figura 43 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento intermitente para temperatura de 20°C	45
Figura 44 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento intermitente para temperatura de 5°C.....	45
Figura 45 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento intermitente para temperatura de 10°C	46
Figura 46 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento intermitente para temperatura de 15°C.....	46
Figura 47 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento intermitente para temperatura de 20°C	47
Figura 48 - Temperatura no ponto T* para o cenário de aquecimento contínuo para as diferentes temperaturas exteriores	48
Figura 49 - Temperatura no ponto S* para o cenário de aquecimento contínuo para as diferentes temperaturas exteriores	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 50 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento contínuo para temperatura de 5°C	49
Figura 51 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento contínuo para temperatura de 10°C	50
Figura 52 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento contínuo para temperatura de 15°C	50
Figura 53 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento contínuo para temperatura de 20°C	51
Figura 54 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento contínuo para temperatura de 5°C	51
Figura 55 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento contínuo para temperatura de 10°C	52
Figura 56 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento contínuo para temperatura de 15°C	52
Figura 57 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento contínuo para temperatura de 20°C	53

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos materiais do PRH	24
Tabela 2 - Resumo dos resultados da análise de sensibilidade.....	41
Tabela 3 - Resumo dos resultados da análise de sensibilidade.....	53

1. Introdução

1.1 Enquadramento e motivação

Desde as primeiras civilizações existentes, o homem sempre buscou se sentir confortável em inúmeros aspetos, e entre eles elenca-se a iluminação, acústica, qualidade do ar ambiente e conforto térmico. Dentro desta busca, o conforto térmico se destaca como um dos principais requisitos a serem aprimorados. Assim, no decorrer do tempo diversos tipos de climatização foram sendo desenvolvidos para que o bem-estar do indivíduo seja favorecido (Rastello, 2013).

De acordo com a ASHRAE Standard 55 - 2010, conforto térmico é definido como a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico. Situando-se também no campo subjetivo, ele depende de fatores físicos, psicológicos e fisiológicos e apresenta grandes variações “de pessoa para pessoa”.

Atualmente, as pessoas passam cerca de 90% do seu tempo dentro de edifícios, seja trabalhando ou em suas habitações, e, portanto, toda esta busca se justifica baseando-se na melhoria do bem-estar físico e emocional e na produtividade do indivíduo. Contudo, ressalta-se que a utilização de sistemas de climatizações implica um consumo energético que pode ser muito significativo, especialmente quando a envolvente dos edifícios não está corretamente projetada e/ou executada (Pimenta, 2015).

Em Portugal, foi realizado um inquérito pelo Instituto Nacional de Estatística (Inquérito ao consumo de energia doméstico, 2010) onde, do consumo total de energia gasto, cerca de 22% se associa a climatização de edifícios (21,5% para aquecimento e 0,5% para arrefecimento). Adicionalmente, este indicador apresentou uma taxa de crescimento de 1,5% ao ano entre 1989 e 2009. Grande parte dos sistemas empregues atualmente utilizam a energia elétrica como fonte primária de energia, o que gera não só um aumento de seu consumo e saturação das redes de distribuição, mas também a emissão de gases do efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global (Pimenta, 2015).

Desta forma, começa-se a dar ênfase para sistemas que possibilitem o uso de energias renováveis, que melhorem o desempenho energético do edifício e sua rentabilidade económica. Por este motivo, têm sido publicadas sucessivas legislações que permitam associar estes fatores anteriormente citados. A primeira das quais foi o DL 78/2006, que implementava o Sistema de Certificação Energética e Qualidade do Ar Interior de Edifícios – SCE, e que tornava obrigatória a verificação do Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização de Edifícios – RSECE (DL 79/2006), no caso de edifícios de serviços, e o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios – RCCTE (DL 80/2006), no caso de edifícios de habitação.

Os sistemas de pavimento radiante surgem no mercado como a resposta positiva neste domínio, pois podem ser utilizados tanto recorrendo a fontes tradicionais de energia quanto às renováveis, contribuindo assim para a diminuição do consumo energético e, conseqüentemente, para a eficiência energética dos edifícios. Estes sistemas também apresentam outras vantagens, pois oferecem um aquecimento uniforme, sem movimentação de ar e possuem um gradiente de temperatura na direção vertical negativo. Além disso, possuem um custo de instalação menor (Rodrigues, 2019).

Por se tratar de um método de climatização relativamente recente, existem muitas propriedades que não foram completamente aprofundadas e podem ser estudadas para melhorar cada vez mais o seu desempenho térmico. Tirando partido das potencialidades de uma ferramenta numérica de simulação tridimensional da transferência de calor através do método dos elementos finitos, surge então a ideia de realizar uma análise de sensibilidade de dois parâmetros: a condutividade térmica da betonilha e a temperatura do ar exterior, observando como estes interferem no desempenho do pavimento radiante e como podem influenciar na melhoria deste sistema.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo fundamental a análise do desempenho térmico de um pavimento radiante sob a variação de alguns parâmetros através da simulação numérica tridimensional da transferência de calor baseada em elementos finitos.

Foi adotado como caso de estudo um sistema de pavimento radiante anteriormente estudado em outras dissertações na forma experimental, aproveitando-se os resultados já existentes para a calibração inicial do modelo. Após esta fase, foram feitas simulações para avaliar o impacto da variação de dois parâmetros: a condutibilidade térmica da betonilha e a temperatura do ar exterior.

Para a avaliação do impacto da condutibilidade térmica da betonilha, foram considerados dois valores: o valor médio para uma betonilha autonivelante correntemente utilizada neste contexto, e um valor teórico mais elevado, para simular uma eventual betonilha otimizada especificamente para utilização nestes sistemas.

Já na análise do efeito da temperatura do ar exterior, foram simuladas variações dentro do intervalo de 5 °C a 20 °C, com incrementos de 5°C.

1.3 Estrutura base do trabalho

A presente dissertação foi dividida em 6 distintos capítulos que se interligam entre si de forma sequencial e lógica, onde o capítulo 1 apresenta o tema em estudo e seu respetivo enquadramento, os objetivos que nortearam a pesquisa e assim como a sua estrutura base.

O capítulo 2 aborda uma revisão bibliográfica sobre os sistemas de pavimento radiante, dando maior foco ao modo hidráulico por ser o modelo em estudo. Também apresenta os componentes envolvidos na execução deste sistema e detalha, em maior escala, sobre as betonilhas e uma de suas propriedades (condutibilidade térmica). Finaliza-se este assunto com uma análise das vantagens e desvantagens do emprego deste tipo de climatização em relação a outros existentes no mercado atual.

No capítulo 3 é realizada uma breve descrição sobre o método dos elementos finitos e o software utilizado para as simulações numéricas, bem como os materiais e processos empregues e a exposição do plano de simulações adotado.

No capítulo 4 é apresentado os resultados obtidos a partir das simulações numéricas apresentadas no capítulo anterior e discutidos estes dados, fazendo uma análise de sensibilidade.

O capítulo 5 expõe as conclusões obtidas a partir dos ensaios realizados e volta a correlacionar estes com os objetivos deste trabalho. Além disso, também se apresenta sugestões para futuros trabalhos que possam aprofundar ainda mais esta linha de pesquisa.

O capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas que serviram como base teórica para a sustentação deste trabalho.

Os anexos, por fim, seguem para complementar as informações dos capítulos 3 e 4.

2. Sistemas de Pavimentos Radiante

2.1 Considerações iniciais e enquadramento histórico

A criação de aquecimento por pavimento radiante foi observada por arqueologistas e pesquisadores por volta dos anos 100 a.C. na Coreia. Este sistema consistia em um forno, utilizado para a confecção de alimentos, onde a fumaça resultante deste preparo era transportada por passagens localizadas abaixo do piso de pedra das edificações e, então, era liberada para fora por meio de uma chaminé. Assim, a partir do armazenamento térmico destas lajes, os ambientes eram aquecidos (Olesen, 2002).

Em Roma, durante o século I a.C., foi desenvolvido um sistema de aquecimento semelhante ao utilizado pelos coreanos, sendo denominado por hipocausto. Nesse mesmo período, variações do hipocausto foram encontrados em alguns países do Oriente Médio, como Afeganistão e Síria, e também em outros países como Grécia, China e Japão (Bean et al., 2010).

Segundo estes mesmos autores, no pós-Imperialismo, este tipo de aquecimento caiu em desuso na Europa e entrou em hibernação por muitos séculos, voltando a ser empregue pelos franceses e britânicos, em meados do século XX. Por ter continuamente evoluído em alguns países asiáticos, 90% das residências coreanas utilizam este modelo, já na Europa 50% das residências novas incluíam este sistema na década de 90 (Rastello, 2013).

Os pavimentos radiantes são, em sua maioria, superfícies planas que transferem energia com taxas mínimas de 50% na forma de radiação. Estes sistemas funcionam de forma semelhante a um radiador, transferindo calor através de ondas eletromagnéticas para o pavimento e posteriormente para os objetos e indivíduos que se encontram no ambiente, como explica Teixeira (2010). Desta forma, a energia térmica é transmitida através de ondas eletromagnéticas, transmitidas em linhas retas, podendo ser refletidas (Batista, 2012).

Tendo em consideração que ao instalar este sistema, ele se tornará parte integrante do edifício, não ocupando espaço adicional da zona a climatizar, e que o efeito de inércia é aproveitado para o armazenamento energético, podendo ser utilizado para arrefecimento ou aquecimento, esta tecnologia tem se tornado cada vez mais atrativa para os investidores (Alexandre, 2002).

Pinto (2020) refere que este tipo de climatização pode ser utilizado para espaços interiores em residências, como cozinhas, quartos, salas e casas de banho, e é indicado também para espaços com grande volume e pé direito elevado, como ginásios, igrejas e hangares. Todas as fontes energéticas são compatíveis com este sistema, as tradicionais (caldeiras a gás, lenha entre outros) e as alternativas (sistemas solares ou bombas de calor).

Em seus estudos, Lemos (2013) realizou uma comparação entre diversos tipos de sistemas de aquecimento existentes no mercado a partir da análise da distribuição vertical de temperatura (Figura 1).

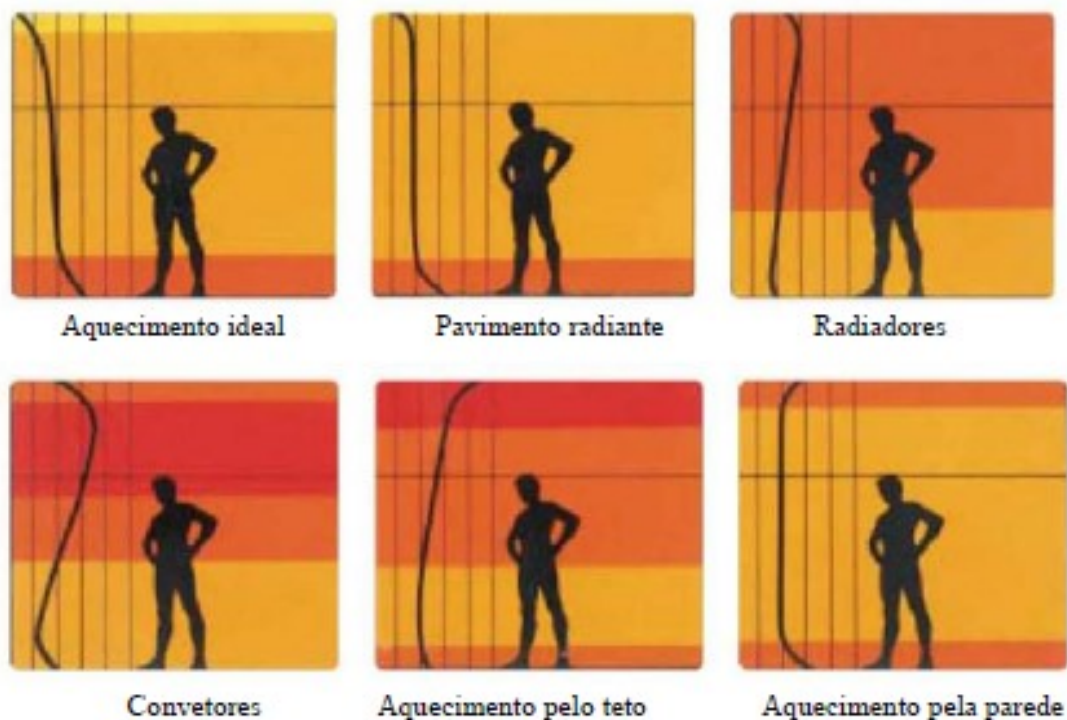


Figura 1 - Perfil de temperatura para diferentes tipos de aquecimento (Lemos, 2013)

Para proporcionar maior sensação de conforto térmico, a temperatura do ar na região inferior do corpo deve ser ligeiramente superior à temperatura do ar na região superior, sendo este fenómeno conhecido por “Pés quentes e cabeça fria”. Verifica-se pela Figura 1 que o aquecimento por pavimento radiante é o que mais se aproxima da curva do perfil ótimo de temperatura.

Pelo modo que acontece a transmissão de calor por este método, ocorre também uma distribuição homogênea da temperatura do ar, o que impede a existência de zonas frias e zonas quentes no mesmo ambiente, oposto do que aconteceria, por exemplo, em um aquecimento por radiadores, como ilustrado na Figura 2 (Lemos, 2013).

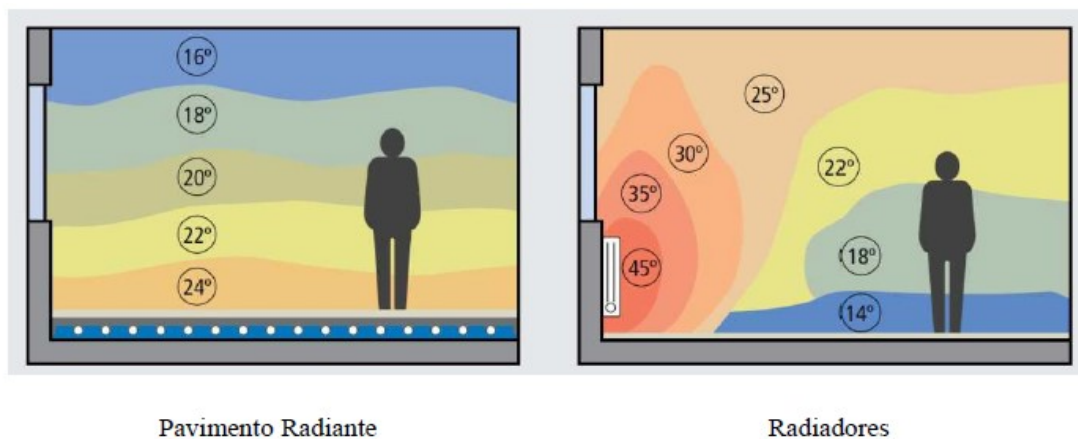


Figura 2 - Distribuição da temperatura: Pavimento radiante Vs Radiadores (Lemos, 2013)

2.2 Modos de transmissão de calor

O sistema de pavimento radiante fornece calor à habitação devido à transferência de calor que acontece entre os diversos componentes do sistema, sempre que houver uma diferença de temperatura, do meio com maior para o de menor temperatura. A transferência de calor pode ocorrer por três mecanismos: primeiramente por condução dentro do meio sólido, e, posteriormente, por convecção e radiação entre as superfícies da envolvente e o ar ambiente (Rastello, 2013).

Para este tipo de aquecimento ser definido como radiante, mais de 50% da energia deve ser transmitida por radiação e o restante pelos dois outros meios. Cada um dos mecanismos de transferência de calor está detalhado nas subsecções seguintes.

2.2.1 Condução

Este modo de transferência de calor está associado a movimentos de natureza microscópica, onde o calor é transferido através de sólidos e líquidos devido a um gradiente de temperatura. O calor flui das moléculas/átomos de maior temperatura para os mais frios. Como exemplo deste fenômeno, Batista (2012) cita um edifício onde ocorre uma diferença entre as temperaturas interna e externa de uma parede.

2.2.2 Convecção

A convecção térmica ocorre em meios fluidos (gases ou líquidos), quando há propagação de calor através da sua diferença de densidade, quando é modificada a sua temperatura. Ou seja, a convecção depende do modo condutivo e da transferência de energia através do movimento de parcelas do fluido, que se movem pela ação de uma força externa (Incropera *et al.*, 2008).

Este movimento pode ocorrer de duas formas: natural, quando o movimento ocorre devido a variação da massa específica resultante da variação da temperatura, por meio da força de impulsão; ou forçada, causada por algum agente externo, como por exemplo um ventilador.

2.2.3 Radiação

De maneira oposta aos dois modos anteriormente citados, a radiação térmica não necessita de nenhum suporte material para acontecer, podendo ocorrer no vácuo. A sua propagação ocorre através de ondas eletromagnéticas das superfícies mais quentes para as mais frias, transformando-se em calor. Segundo (Incropera *et al.*, 2008), todas as formas de matéria emitem continuamente radiação, em todo momento.

Como exemplo deste mecanismo, pode-se descrever um indivíduo que está inserido num ambiente, que estará continuamente emitindo e recebendo radiação. Se as paredes estiverem mais quentes que a temperatura da pessoa, ela irá receber calor por radiação, e vice-versa.

2.3 Composição de um pavimento radiante

A Figura 3 expressa a constituição típica de um pavimento radiante. Estes sistemas apresentam diferentes camadas, onde cada uma possui um determinado propósito e, de acordo com os materiais empregados, o funcionamento do sistema apresentará maior ou menor rendimento (Dias, 2014).

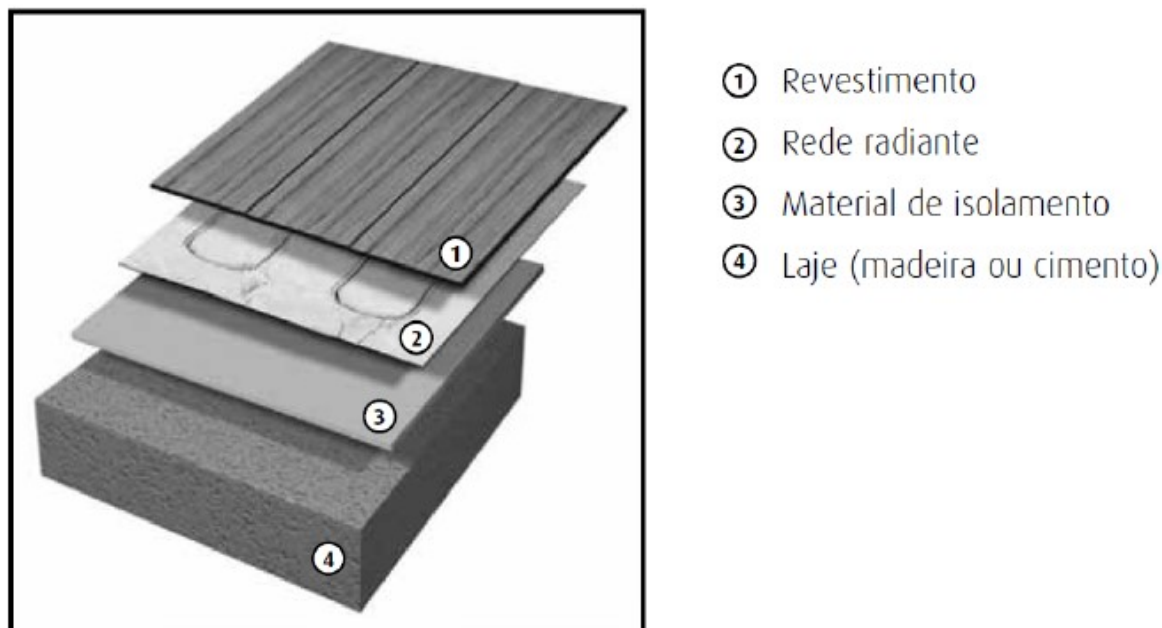


Figura 3 – Exemplo de constituição típica de um pavimento radiante (Dias, 2014)

Lemos (2013) descreve em seu estudo que as tubagens, que estão envolvidas pela argamassa, são isoladas termicamente pela parte inferior que, por sua vez, está em contato com a laje, de forma a reduzir as perdas de calor para os locais não aquecidos. A camada de argamassa tem a função de absorver a energia térmica dissipada pelos tubos, armazenando-a e dissipando-a lentamente para o pavimento através do revestimento.

Apresenta-se, de seguida, uma breve descrição dos componentes constituintes de um sistema de pavimento radiante (Batista, 2012; Dias, 2014):

- **Isolante térmico:** Para que seja evitada a descida do calor para os pavimentos localizados abaixo, é instalado o isolamento. Como referência, são habitualmente considerados isolantes todos aqueles materiais cuja condutibilidade térmica é menor ou igual a $0,065 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$. Nos sistemas de pavimento radiante, geralmente, são utilizados como isolantes o EPS (poliestireno expandido), o XPS (poliestireno extrudido) ou a lã de rocha;
- **Tubagem:** É necessário que os tubos apresentem flexibilidade e bom comportamento em altas temperaturas. No caso dos pavimentos radiantes

hidráulicos é dada preferência por tubos em PEX, podendo ser utilizados em temperaturas até 90 °C;

- **Betonilha:** por ter como função o armazenamento do calor que lhe é transmitido para que, em seguida, o transmita ao revestimento, deve-se ter atenção a espessura desta camada. A inércia térmica é diretamente proporcional ao aumento de sua espessura, mas, em contrapartida, se esta espessura for muito reduzida, a capacidade resistente da camada por ser afetada. Dessa forma, é habitualmente definido como mínimo uma espessura de 2,5 cm, e um valor máximo entre 8 e 10 cm;
- **Revestimento do piso:** pelo sistema de pavimentos radiantes ser compatível com todos os tipos de revestimento, devem ser observados os parâmetros do material na fase de concepção de projeto, como a espessura do revestimento e a sua condutibilidade térmica, para que seja garantida uma boa performance e seja possível estudar o contributo térmico dos revestimentos.

2.4 Betonilhas

De acordo com Couto e Lusomapei (2007), a betonilha, também denominada massame ou argamassa, é um elemento construtivo com espessura variável, confeccionada com ligantes cimentícios. Pode ser aplicada sobre uma base autoportante (aderente), um estrato dessolidarizante (dessolidarizado), sobre um estrato de isolamento térmico e/ou acústico (flutuante) ou incorporada às tubagens onde percorrem água ou resistências elétricas (radiante). Cada um desses métodos será detalhado em subsecções seguintes.

As betonilhas têm como funções o recobrimento do pavimento base, para que seja possível o seu nivelamento sobre uma cota pré-definida, receber o revestimento final ou até mesmo servir como o revestimento final. Desta forma, a constituição desta camada de betonilha dependerá do uso a que se destina, da classe de solicitação em que estará sujeita durante sua vida útil e do seu nível de exposição a elementos químicos (Barros, 2012).

2.4.1 Exigências funcionais das betonilhas

Couto e Lusomapei (2007) especificam requisitos que devem ser cumpridos para um assentamento da betonilha com a qualidade desejável, nomeadamente:

- A superfície deve estar plana e essa verificação é feita utilizando uma régua de pelo menos 2 metros. A tolerância para esta é de 2 milímetros, mas varia em função do tamanho da régua;
- Deve ser assente sob uma superfície perfeitamente lisa e seca, para que não comprometa a aderência da betonilha com o suporte;

- De acordo com o tipo do pavimento que irá ser aplicado, a superfície deve estar lisa ou não. Por exemplo, a secagem e a aderência das betonilhas são favorecidas quanto maior a rugosidade da superfície. Contudo se a betonilha for o revestimento final, a preferência é de que esteja isenta de poros e rugosidades;
- Isento de fissuras, que devem ser conferidas antes da aplicação da camada de betonilha. E, em caso de existirem, estas devem ser seladas com a injeção de resina epoxídica, ou caso forem superficiais, pode ser aplicado uma camada de membrana anti fissuras;
- Deve possuir resistência e espessura adequados ao tipo do uso ao qual estará sujeito;
- Em toda a extensão de sua superfície, a betonilha deverá ser compacta e homogênea. Caso contrário, existirão zonas em que a resistência mecânica será inferior, causando possíveis ruturas e destacamentos;
- A camada aplicada de betonilha deve passar pelo seu período de cura ou já ter passado pela maior parte da retração higrotérmica antes do assentamento de qualquer material sobre ela. Se este período não for respeitado, poderão surgir fenómenos de deformação e fissuras, devido a retração e perda de água da betonilha.

2.4.2 Classificação quanto ao tipo de aplicação

De acordo com Barros (2012) e Couto e Lusomapei (2007) as betonilhas podem ser denominadas em função do tipo de aplicação no suporte, sendo elas:

- Aderente: quando a espessura do pavimento é reduzida (menor que 35 mm), aconselha-se a utilização da betonilha aderente à laje subjacente (Figura 4). Para que se garanta a perfeita execução entre estas envolventes, deve ser aplicada uma aguada de aderência sobre o suporte limpo e isento de qualquer sujidade, misturando-se látex com água e com o mesmo ligante utilizado para a confeção da betonilha.

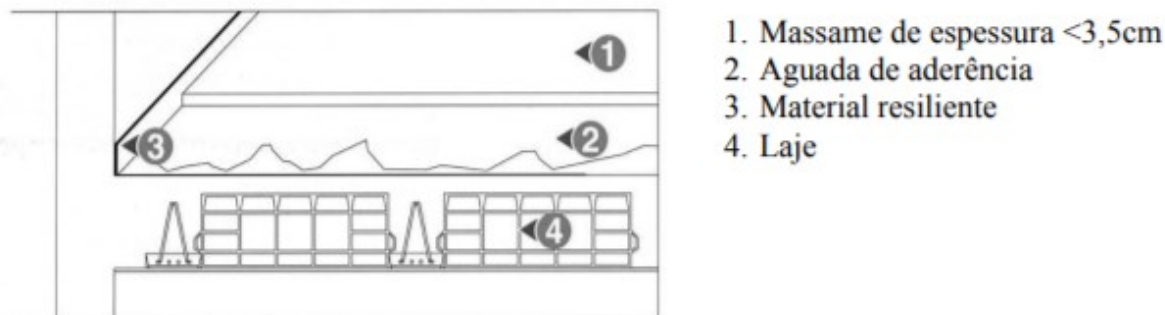


Figura 4 - Betonilha aderente (Couto e Lusomapei, 2007)

- Dessolidarizadas: quando há tráfego de pessoas, esta técnica de aplicação de betonilha é usualmente utilizada. A espessura desta betonilha não deve ser inferior a 35 mm e um estrato separador horizontal, como PVC ou uma folha de polietileno, deve ser utilizado entre o suporte e o massame em todo o perímetro do pavimento e dobrar na parede numa altura de cerca de 10 cm. Além disso, em volta dos pilares e ao longo da extensão das paredes é utilizado um estrato resiliente de 1 cm de espessura. (Figura 5).

Esta técnica apresenta como vantagens a separação das deformações da estrutura com o pavimento, as folhas separadoras criam uma eficaz barreira ao vapor, impedindo assim a subida da humidade do substrato e quando é necessário utilizar enchimentos com elevadas espessuras, pode ser incluída uma camada de betão aligeirado que engloba na sua espessura as canalizações, como ilustra a Figura 6.

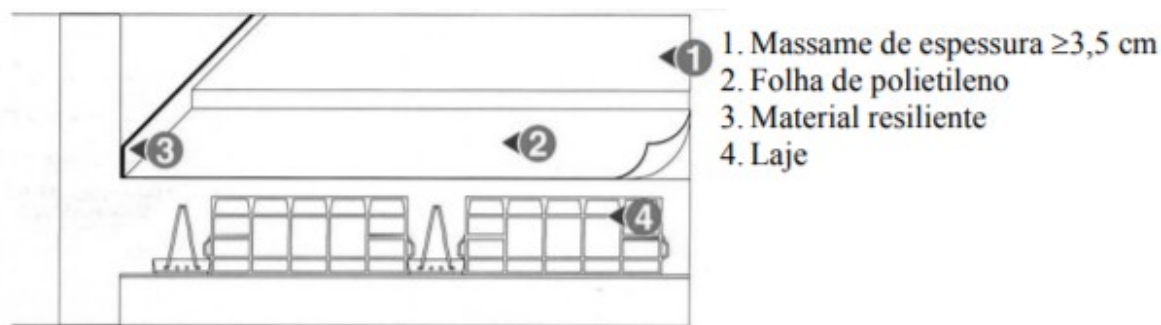


Figura 5 - Betonilha dessolidarizada (Couto e Lusomapei, 2007)

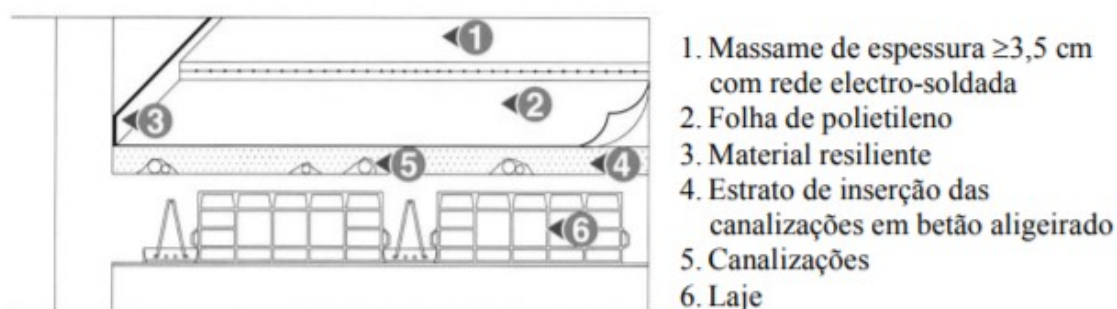


Figura 6 - Betonilha dessolidarizada sobre estrato aligeirado (Couto e Lusomapei, 2007)

- Flutuante: técnica utilizada quando se assenta o massame sobre um estrato de isolamento térmico e/ou acústico. Nesta circunstância, devido à baixa resistência mecânica do suporte e à elevada compressibilidade, a betonilha deve ser cuidadosamente dimensionada e, se necessário, colocar uma rede eletrossoldada a meio

da espessura, de forma a favorecer a distribuição de cargas e evitar o punçamento (Figura 7).

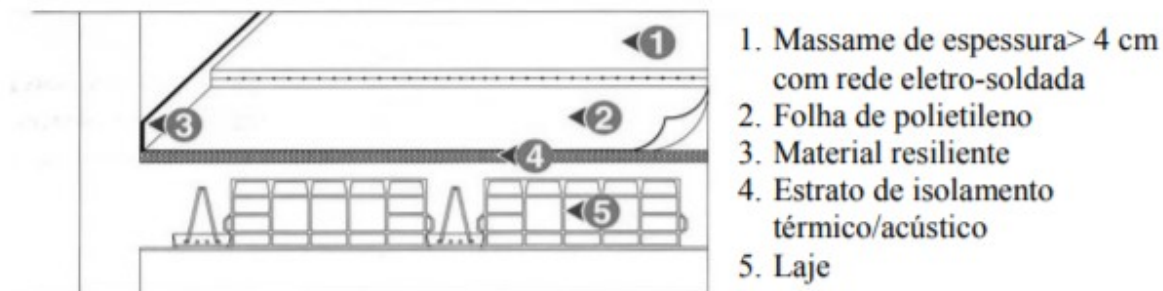


Figura 7 - Betonilha flutuante (Couto e Lusomapei, 2007)

- Radiante: denomina-se betonilha radiante, quando nela se incorporam tubagens em forma de espiral ou serpentinas, que são percorridas por água com o objetivo de arrefecer ou aquecer um ambiente. Esta é a técnica mais utilizada nos pavimentos radiantes.

Para que a transferência de calor ocorra somente na direção que se deseja, as tubagens devem ser posicionadas acima de painéis isolantes e a espessura do massame sobre as serpentinas deve ser a menor possível, mas cumprindo o mínimo de 25 mm, para que a inércia térmica seja baixa, o que leva a um rápido aquecimento/arrefecimento do pavimento.

Além disso, deve ser inserida uma malha eletrossoldada, dimensionada em função da espessura total e das cargas atuantes no pavimento, e a betonilha só deve ser executada após teste de estanqueidade das tubagens.

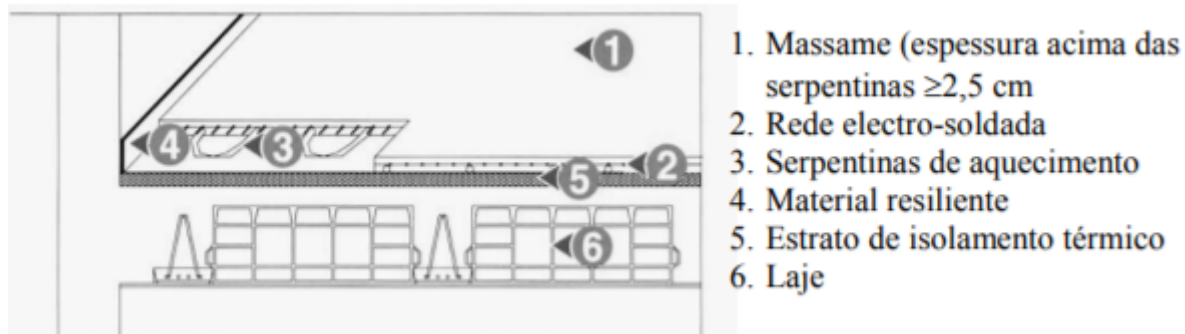


Figura 8 - Betonilha radiante (Couto e Lusomapei, 2007)

2.4.3 Tipos de betonilha

Segundo Pinto (2020) e Barros (2012), as betonilhas podem ser divididas em grupos:

- Tradicionais: são preparadas *in situ*, e consistem numa mistura de cimento ou cal hidráulica, areia e água, sendo o traço mais comum o de 1:4 (cimento:areia). Porém este tipo de betonilha apresenta algumas desvantagens como a sujidade na zona da obra, incerteza quanto às suas características, rendimento de trabalho inferior e o grande espaço necessário para armazenamento dos materiais.
- Modificadas: este grupo caracteriza-se por três tipos principais: as de secagem rápida, as de presa rápida e as de polímeros modificados.
 - Secagem rápida: é indicada para uso em interiores e exteriores e possui secagem rápida e endurecimento em 24 horas, tornando-se completamente seca em 4 dias. Trata-se de uma combinação de cimento, areia e um aditivo superplastificante que reduz a quantidade de água necessária na mistura.
 - Presa rápida: é a mistura de cimento, areia e aditivo à base de alumínio que acelera a presa. Torna-se totalmente seca após um dia e tende a ser resistente ao pisoteio após o decorrer de 1 ou 2 horas.
 - Polimérica: após atingirem a presa, possuem como característica a resistência à água e outros produtos químicos, além de permitirem uma menor espessura do pavimento do que as betonilhas não poliméricas. Sua constituição é formada por grandes quantidades de acetato de polivinilo (PVA) ou de borracha de butadieno estireno (SBR).
- Pré-dosadas: são aquelas argamassas que chegam na obra prontas, necessitando apenas de adição de água. Apesar de terem um custo maior que as tradicionais, podem ser consideradas interessantes dependendo das necessidades da obra, do seu planeamento e dos prazos a serem cumpridos. Estes materiais também conduzem a um melhor desempenho e garantia de homogeneidade das características da betonilha. No mercado, encontram-se disponíveis argamassas pré-misturadas de secagem rápida (4 dias) e de secagem muito rápida (1 dia). Ambas atuam em conformidade com a EN 13813 e possuem retração controlada, além disso possuem outras vantagens como a granulometria correta, facilidade no armazenamento e sem erros de dosagem, entre outros.
- Autonivelante: podem conter como ligante o cimento ou o sulfato de cálcio. Possuem diversas vantagens em relação a betonilha tradicional: permitem cobrir grandes áreas

num curto período de tempo; rapidez na aplicação; capacidade autonivelante; possibilidade de execução de pavimentos sem juntas (contínuos); elevada resistência superficial mesmo com espessuras reduzidas; podem ser aplicadas como dessolidarizadas ou flutuantes. Têm uma espessura média de 25 mm em zonas de uso doméstico e de 40 mm em zonas de uso comercial.

Como desvantagens, apresentam a necessidade de aplicação com mão de obra especializada, consequentemente traduzindo-se num custo de aplicação mais elevado e apresentam menor resistência ao esmagamento.

Quando considerada a utilização de uma betonilha em um pavimento radiante, é importante que este material seja fluído, para que preencha e envolva totalmente o sistema de tubagem, como explica Vieira (2020), eliminando a presença de ar e de vazios, dessa forma não comprometendo a condutibilidade térmica do sistema, propriedade esta que também é necessária e que será explicada no tópico seguinte. Além disso, é desejável que a betonilha tenha alta densidade, uma matriz porosa reduzida e uniforme e resistência mecânica elevada, para que a espessura de aplicação seja menor.

Tendo em consideração o exposto acima, a betonilha que mais se enquadra para a utilização nos sistemas de pavimento radiante seria a autonivelante, pois possibilita aplicação em espessuras menores e, por ser altamente fluído, diminui a percentagem de vazios na mistura. Também permite que o pavimento seja contínuo, ou seja, sem juntas, não interferindo na transferência de calor do conjunto.

2.4.4 Condutibilidade térmica de betonilhas

A condutibilidade térmica pode ser entendida como a propriedade termofísica dos materiais que indica a habilidade de conduzir energia térmica, dessa forma materiais com alta condutibilidade térmica conduzem o calor de forma mais rápida e eficiente, sendo utilizados em dissipadores térmicos. Já os materiais com baixa condutividade térmica são usados quando existe a necessidade de promover o isolamento térmico (Brandão *et al.*, 2014).

O valor da condutibilidade térmica depende diretamente do material em questão e varia de acordo com alguns fatores como: a fase em que o material se encontra (sólido, líquido ou gasoso); a estrutura do material (cristalino ou amorfo); e a sua condutividade elétrica.

2.5 Tipos de pavimento radiante

2.5.1 Piso radiante de ar

Um pavimento radiante de ar utiliza a passagem de ar por dutos que são embebidos na laje do edifício, podendo ter função de aquecimento ou arrefecimento (Figura 9). Este sistema pode ter uma conceção construtiva fechada ou forçar a circulação do ar pelas passagens, fornecendo um suplemento ao ar ambiente (Watson e Chapman, 2002).

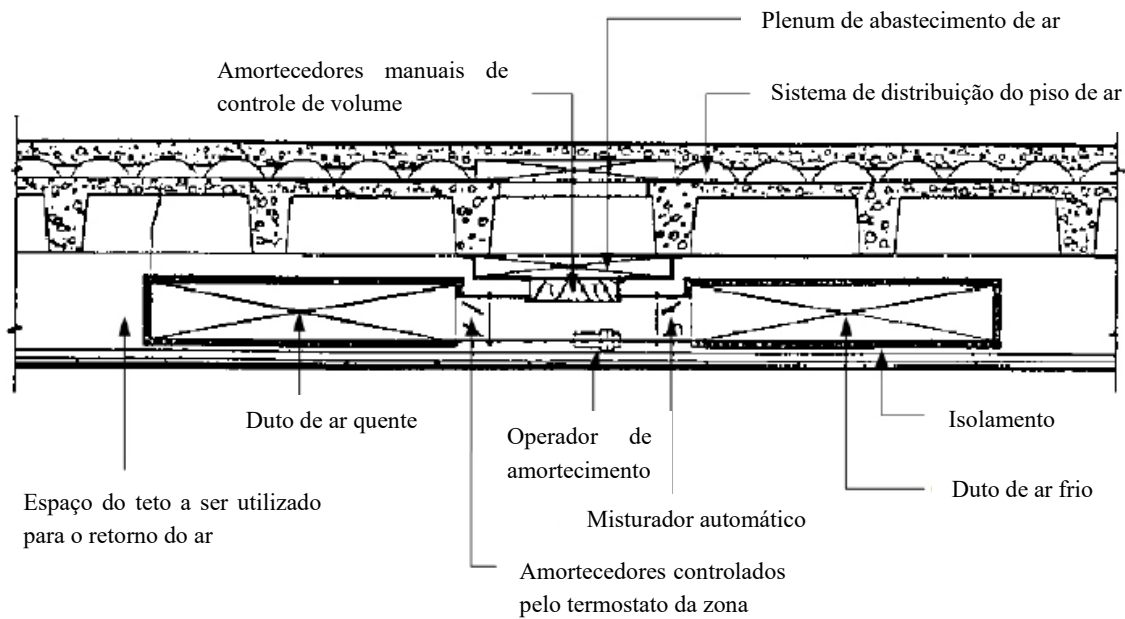


Figura 9 - Representação de um pavimento radiante a ar quente (Watson e Chapman, 2002)

Em seus estudos, Bozkır e Canbazoglu (2004) realizaram uma análise do desempenho térmico de um sistema a partir de um modelo matemático baseado no equilíbrio da transferência de calor entre o fluxo de ar quente nos dutos, o piso e o ar interno. A partir dos resultados obtidos, concluíram que, embora este método de climatização tenha menor eficiência que o piso radiante hidráulico, pode ser uma alternativa quando já existe uma fonte de ar quente no edifício e esta pode ser reaproveitada. Segundo os mesmos autores, devido à utilização de condutas de fluxo de ar ao redor dos tubos, a área efetiva de transferência de calor neste sistema é maior que no caso do piso hidráulico.

Este sistema possui um bom desempenho para regiões com climas amenos e casas bem isoladas, já para climas mais severos as casas devem ter o isolamento ainda mais reforçado para atingirem o mesmo resultado. A distribuição de calor resultante é uniforme em todo o ambiente, não produzindo correntes de ar, nem pontos quentes ou frios (Rastello, 2013).

2.5.2 Piso radiante elétrico

Neste sistema é gerado calor no interior do piso a partir de elementos elétricos com resistências, aquecendo diretamente a massa térmica do pavimento. Distingue-se dos sistemas que usam aquecimento indireto com queima de combustíveis fósseis para aquecer a água, pelo facto de que toda a energia consumida é transformada em calor (Rastello, 2013).

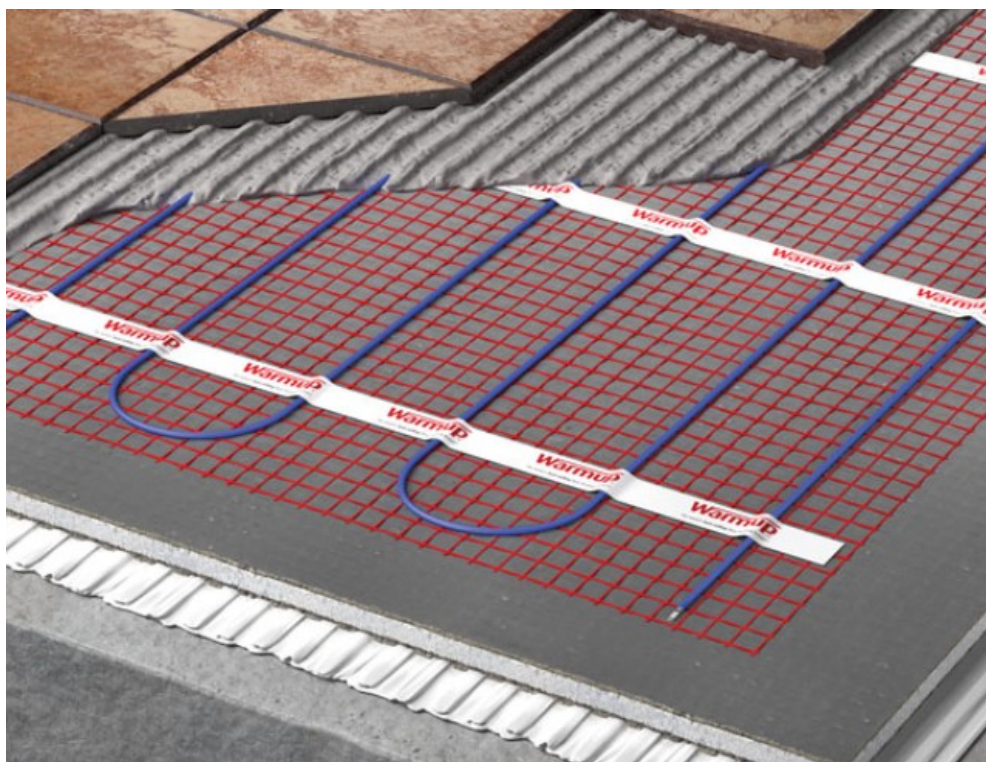


Figura 10 - Representação de um pavimento radiante elétrico (Warmup, 2010)

De acordo com Pinto (2020), por existir uma grande variedade de redes elétricas disponíveis no mercado, estes sistemas adaptam-se a quase qualquer tipo de revestimento de piso. Porém têm um custo de operação elevado e só são eficientes quando utilizados em ambientes devidamente isolados. Mesmo que controlados por termostatos, a perda de calor pode ser frequente e vários fatores podem interferir na eficiência deste sistema, como a condutibilidade térmica dos materiais assentes, o nível de isolamento térmico e, obviamente, o custo da eletricidade.

2.5.3 Piso radiante hidráulico

O sistema de piso radiante hidráulico é o mais utilizado atualmente. Neste sistema é utilizado um fluido que transfere calor através de uma rede de tubagens localizada no interior do pavimento. A temperatura de circulação do fluido tem de ser diferente da do ambiente que se deseja climatizar. Na grande maioria destes sistemas, é utilizada a água como fluido termodinâmico (Pimenta, 2015).

Como explica Olesen (2002), a água é impulsionada através de tubos que ficam envoltos numa camada de argamassa, que tem por função absorver a energia térmica dissipada, transferindo-a homogeneamente para a superfície, que, por sua vez, trocará calor com o ambiente através da radiação e da convecção natural. Conforme a utilização desejada, aquecimento ou arrefecimento, a água irá transferir ou absorver o calor do ambiente.

Para que este método de climatização funcione, é necessário que exista uma fonte de aquecimento ou arrefecimento da água. Para esse fim, podem ser utilizados inúmeros tipos de produção, como bombas de calor, caldeiras, esquentadores ou energias alternativas como os painéis solares (Pimenta, 2015).

A Figura 11 representa uma instalação típica de um piso radiante hidráulico. Para que a transferência de calor aconteça de forma efetiva o revestimento do pavimento deve ser escolhido com cautela. Deve-se ter como preferência aqueles revestimentos cuja condutibilidade térmica seja elevada para que a temperatura seja transferida com maior rapidez desde as tubagens até a superfície do piso (LaVere, 2009).

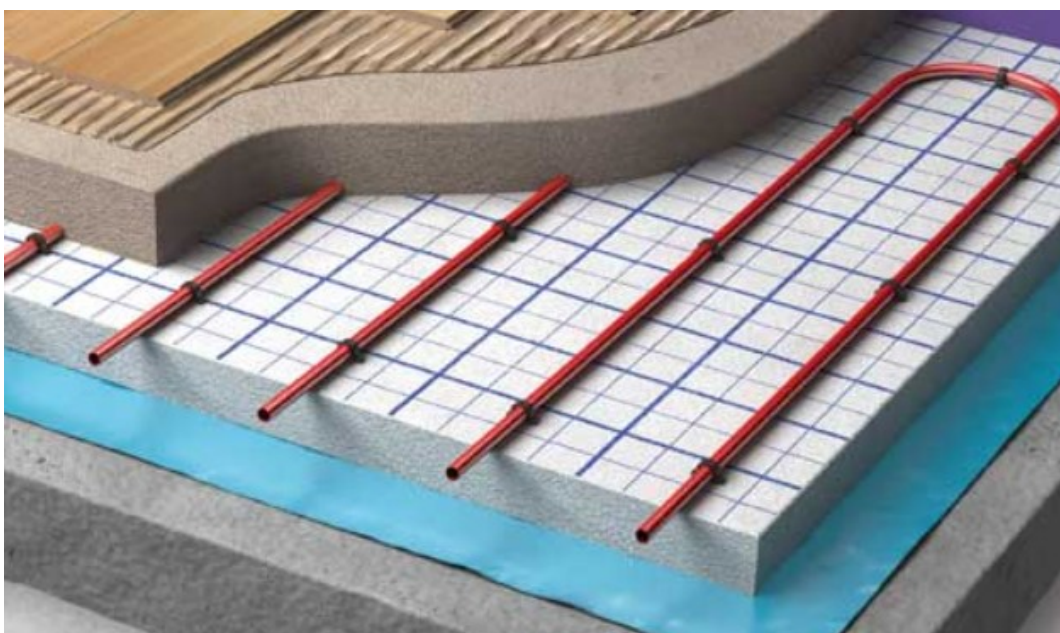


Figura 11 - Representação esquemática de um pavimento radiante hidráulico (Warmup, 2010)

Em seus estudos, LaVere (2009) menciona três fatores de grande valia num sistema de pavimento radiante hidráulico, sendo eles: o tipo de material da tubagem; o método de instalação; e a interação entre esses dois aspetos. O projeto e execução deste tipo de sistema de climatização requer um estudo prévio de todos os elementos envolvidos, assim como uma execução fiel e cuidada.

Ainda segundo o mesmo autor, a conceção, instalação e manutenção deste sistema determinará o seu sucesso ou fracasso. Além do projetista desenvolver um sistema que responda a todos os requisitos e às condicionantes do edifício onde será instalado, também é necessário que a instalação ocorra de forma correta. Adicionalmente, ainda é necessário que a manutenção ocorra quando prevista, para que as condições ótimas de funcionamento se mantenham.

Antigamente, as tubagens utilizadas nos sistemas de pavimento radiante hidráulico eram de cobre ou de polibutileno. Porém, constatou-se alguns problemas decorrentes do uso destes materiais. O cobre por vezes degrada-se quando em contato permanente com a argamassa e

apresenta um custo elevado, e o polibutileno absorve oxigênio através das paredes das tubulações, podendo resultar em fugas e problemas de corrosão (LaVere, 2009).

Como alternativa para estes inconvenientes, surgiram os tubos de polietileno reticulado (PEX), representados na Figura 12. Estes tubos são compostos por três camadas distintas, com as camadas internas e externas compostas pelo PEX e uma camada intermediária de alumínio, que é impermeável ao oxigênio (MACOP, 2019).



Figura 12 - Composição tubo PEX (MACOP, 2019)

Este material permite a execução fácil de curvaturas e pode ser aplicado diretamente sob a argamassa. Apresenta como vantagens a resistência à corrosão, dispõe de propriedades higiênicas por possuir conduta não tóxica e livre de chumbo, cobre e outros íons metálicos que complicariam a escolha do fluido a ser utilizado, são duráveis e não apresentam reatividade com a argamassa (MACOP, 2019).

2.6 Vantagens e Desvantagens

Os sistemas de piso radiante possuem diversas vantagens e desvantagens. De acordo com alguns pesquisadores, Teixeira (2010), Incropera *et al.* (2008) Pinto (2020), Pimenta (2015), Lemos (2013), destacam-se as seguintes:

- Vantagens:

- Promove um ambiente confortável termicamente pois oferece uma distribuição uniforme de calor e elimina correntes de ar que seriam originadas, por exemplo, por aparelhos de ar condicionado;
- A economia de energia é maior pois as fugas e infiltrações são reduzidas, e possui menor perda de calor devido à baixa temperatura, quando comparado com outros sistemas de climatização;

- Uma vez que o aquecimento não ocorre por ventilação/convecção, as necessidades de filtragem do ar não se tornam necessárias;
- É considerado um sistema invisível pois fica no interior do pavimento, não ocupando espaço adicional do ambiente e facilitando os cuidados com limpeza;
- Tem baixa necessidade de manutenção;
- Os ambientes de um edifício podem ter temperaturas diferentes, bastando apenas particionar o sistema;
- Pode ser combinado com fontes de energia alternativa e renováveis, tornando-se mais sustentável;
- Eficiente energeticamente em relação aos sistemas de climatização tradicionais, pois gasta menos energia conferindo o mesmo nível de conforto aos seus ocupantes devido à sua natureza radiante;
- É seguro, uma vez que não existe a possibilidade de queimaduras e ferimentos em crianças e idosos pois não existe o uso de radiadores e grelhas aparentes;
- A necessidade de renovação de ar é reduzida, diminuindo os impactos na temperatura interior;
- É silencioso, não produzindo qualquer tipo de ruído;
- É flexível, pois pode ser dimensionado conforme a tipologia do edifício (residencial, comercial ou de serviço) e aplicado em qualquer tipo de superfície disponível. Além disso, é admitido o uso de qualquer tipo de revestimento aplicado no pavimento.

- Desvantagens:

- O investimento inicial é maior quando comparado a outros tipos de climatização, podendo afastar potenciais utilizadores;
- Por sua instalação ser feita embebida no piso, este é de difícil acesso e remoção, o que gera um custo elevado em qualquer intervenção que venha a ser necessária;
- Podem ocorrer condensações no ambiente, se a superfície climatizada se encontrar próxima à temperatura de ponto de orvalho do ar ambiente. Podem, no entanto, ser instalados sistemas de renovação de ar para minimizar este efeito;
- O seu tempo de resposta é mais lento que os sistemas tradicionais, por se tratar de um sistema massivo e necessita de maior tempo para atingir as condições desejadas. Assim, ele não se torna indicado para lugares com climas amenos e que tenham poucos dias frios no ano;

- Na superfície, as temperaturas podem não ser uniformes. Isso acontece devido ao incorreto dimensionamento do sistema, como espaçamento das tubulações ou capacidade de aquecimento insuficiente para o ambiente.

3. Simulação numérica

3.1 Desempenho térmico de pavimentos radiantes

Este estudo tem, como principal objetivo, a análise tridimensional do desempenho térmico de um pavimento radiante com diferentes tipos de revestimento superficial. Para tal, será executado inicialmente a calibração de um modelo numérico a partir de dados experimentais já obtidos na dissertação de Rodrigues (2019). Além disso, será realizado um estudo paramétrico de duas propriedades relevantes: a condutividade térmica da betonilha e a resistência térmica superficial interior do ambiente.

Após a validação deste modelo, diferentes tipos de revestimento serão avaliados para que se perceba qual a relação destes na temperatura superficial e nas taxas de aquecimento e arrefecimento do sistema. Os dados necessários dos materiais usados nas simulações serão obtidos através de seus respectivos fabricantes e, na inexistência de alguma informação, terá tido como base o ITE 50.

3.2 Modelos matemáticos de transferência de calor em pavimentos radiantes

Em 1822 o físico-matemático, Joseph Fourier, propôs uma lei fundamental que rege a transmissão de calor por condução, gerando-se dessa forma a equação geral da condução de calor (Equação 1). Por ter realizado grandes contribuições ao tratamento analítico desta temática, esta equação ficou denominada como Lei de Fourier (Rastello, 2013).

$$q = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \text{ (Equação 1)}$$

Sendo:

q: taxa de fluxo de calor [W];

λ : condutividade térmica do material [W/m°C];

A: área da seção transversal através da qual o calor flui por condução, medida perpendicularmente à direção do fluxo [m²];

$\frac{\partial T}{\partial x}$: gradiente de temperatura na seção, segundo a coordenada geométrica x.

Ainda segundo a autora, a expressão pode ser entendida que a quantidade de calor que atravessa uma área A, normal à direção do fluxo, na unidade de tempo, é proporcional ao produto da área pelo gradiente térmico.

Podem ser utilizadas duas formas para a resolução de processos de transferência de calor, o modo analítico ou numérico. Rastello (2013) explica que o método analítico consiste em uma

resolução direta da equação diferencial de transmissão de calor por condução. Para isto, são comumente aplicadas simplificações e ferramentas matemáticas que facilitam a sua solução. Já para os métodos numéricos existem vários mecanismos que podem ser utilizados, tais como o método dos elementos finitos, dos volumes finitos ou diferenças finitas.

Para a resolução do problema por métodos analíticos, é necessário assumir que a transferência de calor ocorre de forma unidimensional e, para o dimensionamento de sistemas de calefação do tipo radiante, os resultados obtidos por meio deste não são verossímeis, pois é necessário que a análise ocorra de forma bidimensional ou tridimensional. Sendo assim, é necessário fazer uso de métodos numéricos para os estudos de pisos radiantes. Diversos autores têm tido como alvo a análise de pavimentos radiantes e para que seja possível aumentar sua eficiência, custo-benefício e entre outras características.

Rastello (2013) desenvolveu uma resolução numérica pelo método dos volumes finitos do modelo de transferência de calor no interior de um piso, utilizando da linguagem Matlab. Em sua análise calculou a temperatura superficial do piso para distintas temperaturas de água e diferentes distâncias de tubagens e obteve como resultado a possibilidade de diminuir o custo de instalação em até 40%.

Com base no Método dos Elementos Finitos (MEF) aplicado ao problema de condução de calor, Dias (2014) realizou um estudo paramétrico analisando a influência que as espessuras do revestimento e da camada de betonilha, o diâmetro dos tubos e seus espaçamentos têm na quantidade de calor que é transmitida através do pavimento. E em segundo momento, obteve ábaco de apoio ao projeto para que fosse possível determinar a temperatura de impulsão da água, de acordo com as necessidades térmicas do espaço, para vários revestimento e espaçamentos de tubo.

Sattari e Farhanieh (2006) também utilizaram do MEF para analisar parâmetros que influenciam a performance dos pisos radiantes. Como conclusão de seus estudos, verificaram que o número de tubos, seu diâmetro e o material de que são feitos não possuem efeitos significativos obre o desempenho de aquecimentos nestes sistemas. Os parâmetros mais importantes neste quesito são a espessura e o tipo de revestimento superficial do piso.

Hogan e Blackwell (1986) avaliaram o desempenho de um sistema de calefação por piso a partir de um modelo em regime estacionário com o MEF. Como resultados identificaram que as perdas de calor calculadas usando o método da ASHRAE (atual ASHRAE Standart 55 (2010)) são sobrestimadas.

Zhang e Patê (1986) investigaram as respostas transitórias de um teto com painéis radiantes e respetivo gabinete para uma gama de temperaturas de abastecimento de água quente e taxas de fluxo. Os resultados mostraram que a temperatura do teto é uniforme, a resposta térmica do teto e gabinete foi lenta devido a grande massa térmica no teto, a temperatura do ar não foi inferior

à temperatura da parede e do chão e a resposta transitória foi encontrada em função da temperatura do suprimento de água e não à taxa de fluxo de água.

Ainda que o Método das Diferenças Finitas seja válido para aplicação em formas irregulares, aqueles sistemas que utilizam o Métodos dos Elemento Finitos são preferíveis pela facilidade com que se pode modelar a geometria irregular do elemento. Deste modo, o Método dos Elementos Finitos foi o método escolhido para ser usado nas diferentes simulações numéricas realizadas no presente estudo, e será brevemente detalhado no item a seguir.

3.3 Método dos Elementos Finitos

Souza (2003) refere que o Método dos Elementos Finitos pode ser aplicado como solução de problemas em inúmeros campos como engenharia, setor energético, telecomunicações, forças armadas, saúde; entre outros. Dentro do campo da engenharia, a quantidade de problemas físicos que podem ser analisados também é significativo, como alguns exemplos disso temos: eletrostática; acústica; hidráulica; aerodinâmica; transferência de calor. Assim, tal como referido nos itens anteriores, o presente trabalho se concentrará na solução de um problema tridimensional de transferência de calor com o uso do MEF.

Este método consiste em uma ferramenta numérica aproximada para a análise de meios contínuos, que permite com que problemas complexos se tornem a soma de vários problemas com soluções mais simples. Estes são descritos por meio de equações diferenciais parciais, utilizando condições inicial e de contorno (Souza, 2003).

Ainda segundo o autor, a ideia principal deste procedimento é dividir o domínio do problema em sub-regiões mais simples e de geometrias usuais em função do tipo e dimensão do problema, denominados então de elementos finitos, como ilustrado na Figura 13.

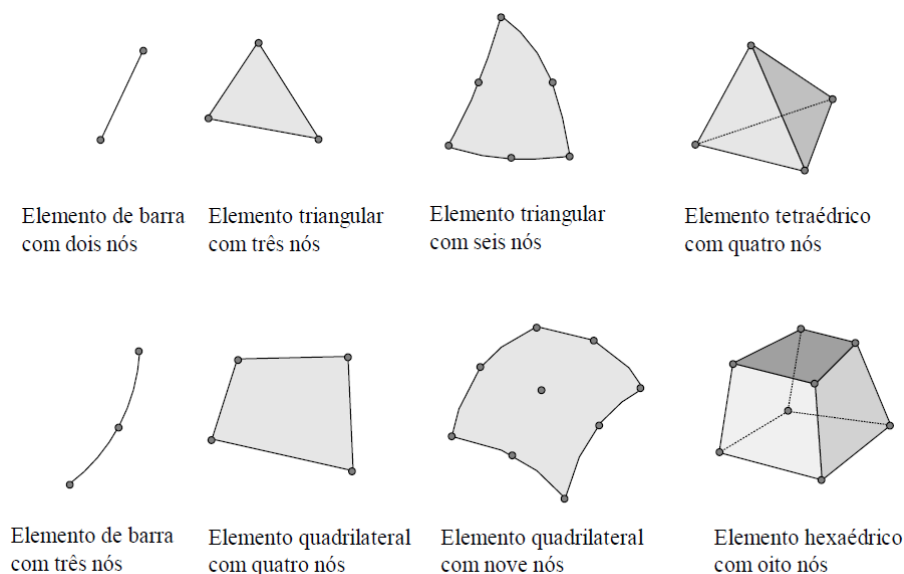


Figura 13 - Exemplos de formas de elementos finitos (Souza, 2003)

Com a discretização do domínio do problema, os elementos finitos ficam conectados entre si através de pontos designados por nós ou pontos nodais. A Figura 14 exibe a formação da malha, caracterizada pelo conjunto destes elementos finitos e nós.

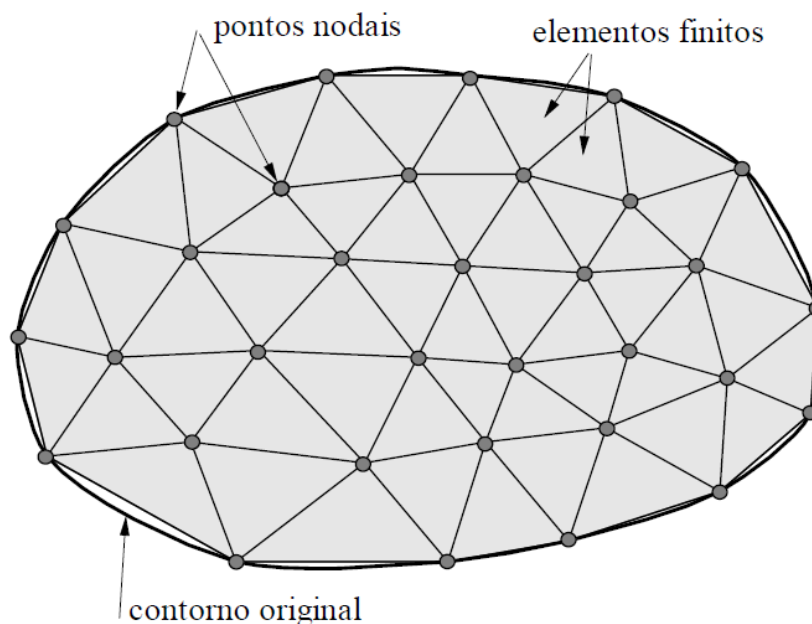


Figura 14 - Malha de elementos finitos (Souza, 2003).

3.4 Software

O software utilizado para a realização deste estudo foi o FEMIX (Gouveia, *et al.*, 2016; Sena-Cruz *et al.*, 2007). Este, consiste num programa genérico que utiliza o Método dos Elementos Finitos para a análise de estruturas. A modelação de um pavimento radiante foi aplicada neste programa para que fossem examinados os fenômenos de transferência de calor e análise de sensibilidade.

No caso tridimensional, a equação de condução do calor em coordenadas cartesianas pode ser representada pela seguinte equação:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{Equação 2})$$

No caso de materiais isotrópicos, a condutividade térmica é a mesma em todas as direções, ou seja, $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$. \dot{Q} é a taxa interna de geração de calor por unidade de volume do volume de controlo infinitesimal, ρ é a massa por unidade de volume e c é o calor específico do material.

Considerando condições de fronteira adequadas, obtém-se a distribuição da temperatura num corpo. Essas condições de fronteira podem ser: temperatura prescrita; fluxo de calor constante; fronteira isolada ou adiabática; condição de convecção e/ou radiação na superfície. Para o caso de fenómenos de temperatura dependentes do tempo, as condições iniciais também devem ser conhecidas. Nas simulações efetuadas no presente trabalho, foram utilizadas temperaturas prescritas para simular a temperatura da água e a condição de convecção na superfície superior da laje. De acordo com Azevedo (2000) o referido programa apresenta um módulo simples de geração de dados e outro módulo de visualização gráfica de dados e resultados. Dessa forma, vem servindo como suporte ao desenvolvimento de projetos que tenham como objetivo uma análise bi- ou tridimensional.

3.4.1 Materiais e métodos utilizados

Foi criado, com recurso ao software SketchUp, uma representação de um pavimento radiante hidráulico (Figuras 15 e 16), que consiste em uma laje de betão onde se assenta um painel de isolamento térmico para que o fluxo de calor ocorra verticalmente. Acima desta envolvente é colocado as tubagens PEX e por fim uma betonilha é executada para finalizar o pavimento.

Os valores utilizados para as propriedades dos materiais consideradas fixas neste estudo estão descritos na tabela abaixo. Nesta etapa também foram definidas as condições de fronteira e limite do sistema, nomeadamente a temperatura do ar relativa ao ambiente exterior e a temperatura da água que aquece o sistema.

Tabela 1 - Propriedades dos materiais do PRH

Material	Massa por unidade de volume (kg/m³)	Condutividade térmica (W/m⁰C)	Calor específico (J/kg⁰C)
Betão	2500	2.0	1000
Isolante	70.5	0.037	1000
Betonilha	2130	-	800

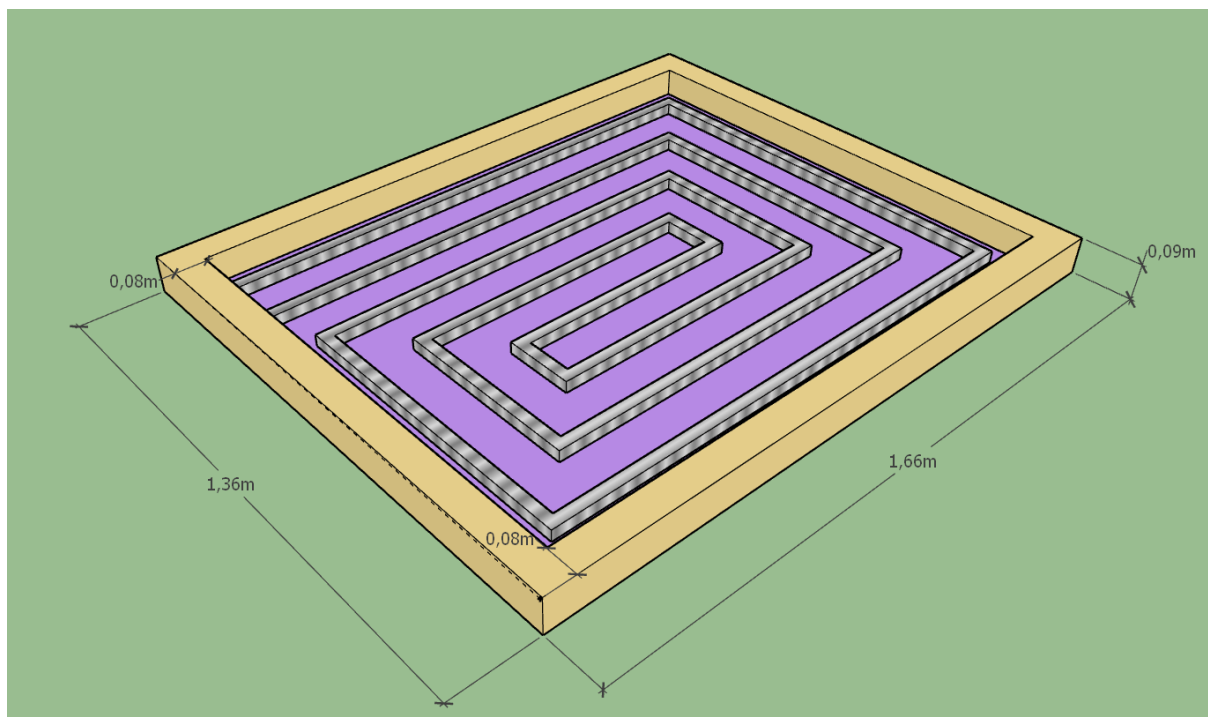


Figura 15 - Modelo do pavimento radiante hidráulico adotado

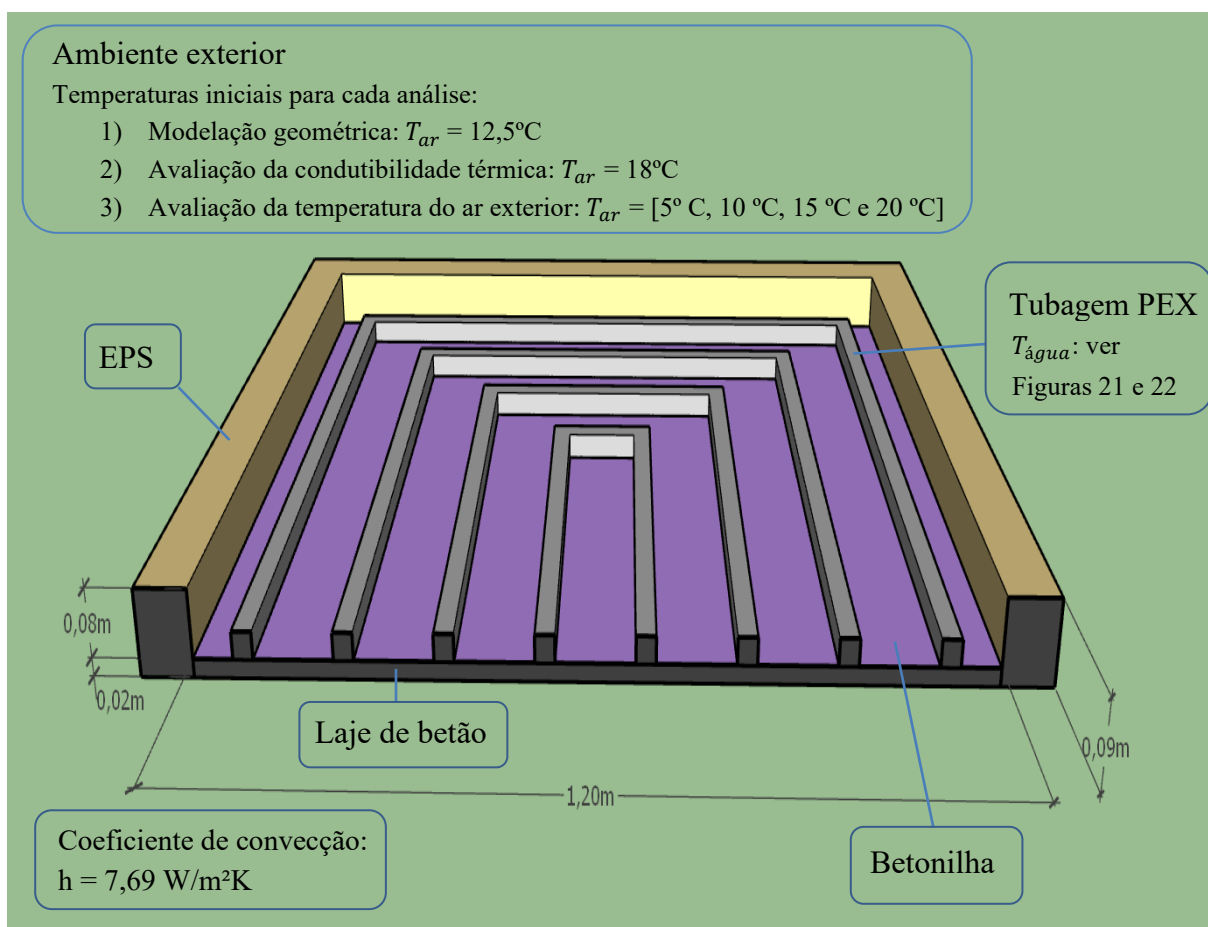


Figura 16 - Corte do pavimento radiante hidráulico adotado e condições de fronteira

A partir disso, foi realizada a discretização deste pavimento utilizando o método dos elementos finitos para que se desse início a criação do ficheiro a ser utilizado no programa Femix. Dessa forma, o pavimento foi discretizado por elementos sólidos de 8 nós, resultando na malha de elementos finitos apresentada na Figura 17.

Neste ficheiro, foi definida a temperatura inicial do sistema e impostos os pontos que teriam temperatura fixa e que correspondem à região das tubagens onde circula a água quente. Introduziram-se ainda as propriedades dos materiais citadas anteriormente, ressaltando-se, no entanto, que a condutividade térmica da betonilha irá variar de acordo com as simulações, conforme será explicado mais adiante neste capítulo.

Por fim, foram detalhados no ficheiro 24 *load cases*, que correspondem às 24 horas de ensaio analisadas. Os valores introduzidos nesta seção correspondem à temperatura da água imposta nos nós correspondentes à localização da tubagem e à temperatura do ar na face sujeita a convecção, cujo coeficiente de convecção foi considerado de $7,69 \text{ W/m}^2\text{K}$. De referir que os valores das temperaturas variam de acordo com cada simulação executada.

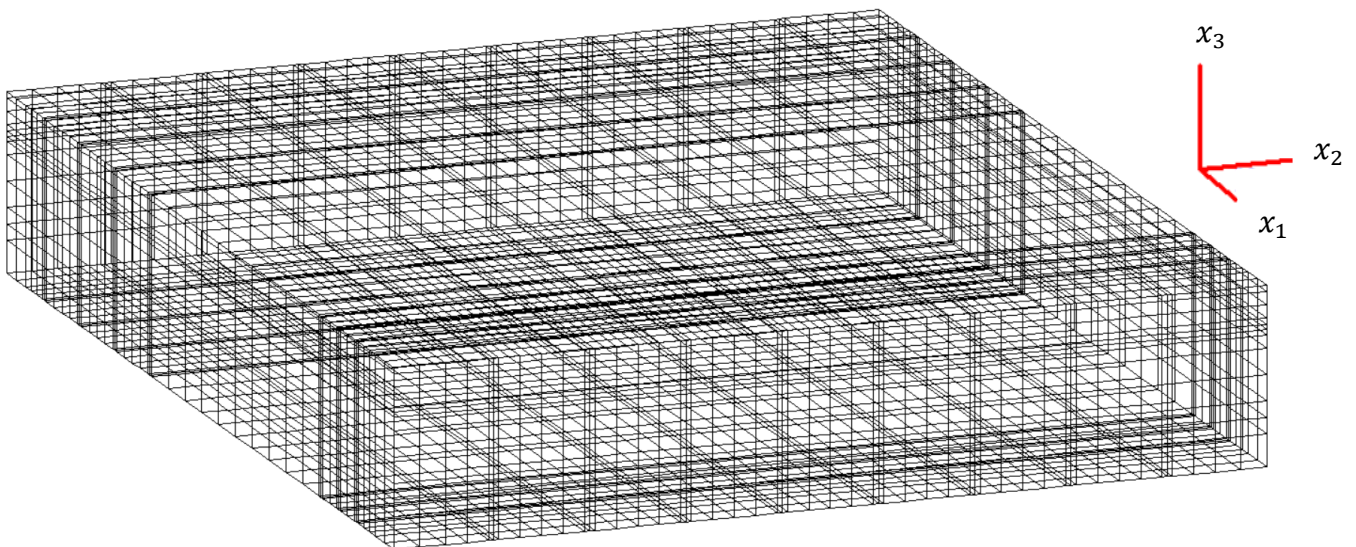


Figura 17 - Malha tridimensional do pavimento radiante hidráulico

Na figura 18 estão representados os pontos onde se fará a medição da temperatura do pavimento. Este pontos foram escolhidos de forma a que ficassem o mais próximo possível dos termostatos utilizados na campanha experimental e com a localização da simulação bidimensional dos trabalhos tidos como base (Pinto, 2020; Rodrigues, 2019).

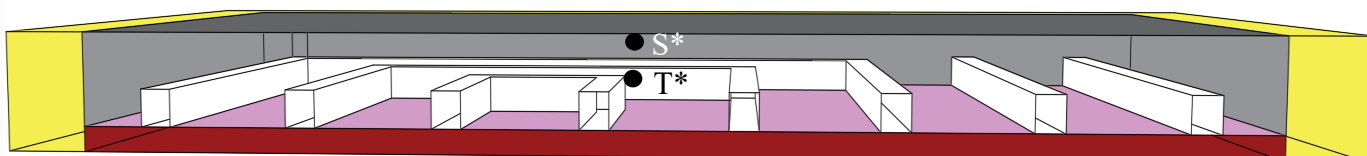


Figura 18 - Pontos de medição T* e S*

Os pontos T* e S* estão localizados respetivamente imediatamente acima dos tubos (coordenadas: 0,9082;0,6465;0,226), e imediatamente abaixo da superfície (coordenadas: 0,9082;0,6465;0,266). E, para que seja facilitada a perceção do posicionamento dos termostatos na campanha experimental de Rodrigues (2019), a imagens representadas nas Figuras 19 e 20 retratam o *setup* experimental das três lajes realizadas.



Figura 19 - Setup experimental - colocação dos tubos e termostatos (Rodrigues, 2019)



Figura 20 - Setup experimental - aspeto final (Rodrigues, 2019)

3.4.2 Modelação geométrica tridimensional

Para a modelação geométrica do pavimento radiante hidráulico no software Femix, foi definida uma envolvente que pudesse retratar os ensaios experimentais e numéricos realizados nas dissertações anteriores (Pinto, 2020; Rodrigues, 2019) da forma mais fiel possível.

Nesta calibração, a temperatura do ar ambiente foi inserida com base nos dados obtidos nos trabalhos anteriores. Nos dados experimentais e numéricos precedente os perfis de temperatura eram registrados em intervalos de 2 minutos, contudo como na pesquisa atual os intervalos foram inseridos de forma horária, as temperaturas também se tornaram de hora em hora. Os perfis utilizados para a temperatura da água que percorre as tubagens foram relativos a um aquecimento intermitente e a um aquecimento contínuo, conforme detalhado na secção seguinte.

3.5 Plano de simulações

Após a calibração numérica do modelo foi realizada uma análise de sensibilidade de dois parâmetros que influenciam a temperatura superficial do pavimento: a condutibilidade térmica da betonilha e a temperatura do ar exterior.

Para os valores da condutibilidade térmica, foram realizados ensaios para duas betonilhas diferentes, uma betonilha autonivelante ($0,8054 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$) e uma betonilha otimizada para possuir alta condutividade ($1,5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$). Em ambos os casos, a temperatura exterior foi fixada

em 18°C, que é considerada uma temperatura de conforto, para que não houvesse mais de uma variável atuando ao mesmo tempo.

Já para a análise da influência da temperatura do ar exterior, foram executados ensaios em que esta variou de 5°C até 20°C com incremento de 5°C, ou seja, foram avaliadas as temperaturas de 5, 10, 15 e 20°C. Neste caso a condutibilidade térmica da betonilha foi fixada em 0,8054 W/m°C (argamassa autonivelante).

Para cada simulação ensaiada, foram tratados dois casos de aquecimento:

- Caso A – Aquecimento intermitente: durante as 8 primeiras horas do ensaio a água que circulou nos tubos foi aquecida até chegar ao máximo de 45°C e em seguida o sistema era desligado e a água dissipa o calor até se atingir um mínimo de 12,5°C, completando-se um ciclo de 24 horas (Figura 21).

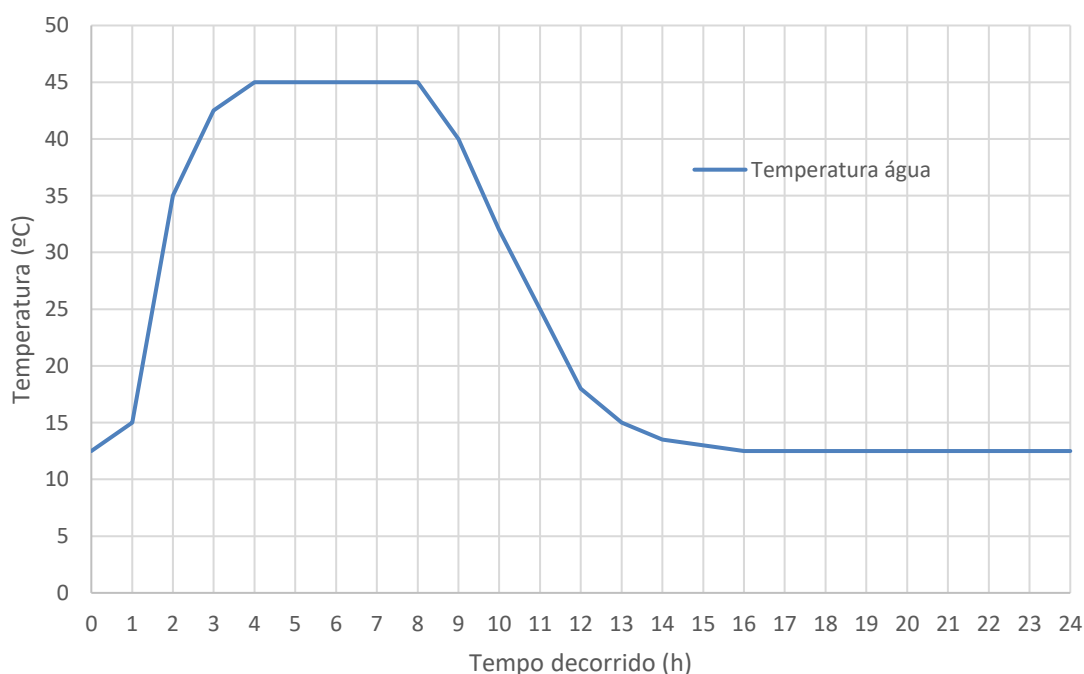


Figura 21 - Perfil de temperatura do Caso A – Aquecimento intermitente

- Caso B – Aquecimento contínuo: a água que está inicialmente a 12,5°C é aquecida até chegar a temperatura de 45°C, onde é mantida constante até que se perfaça as 24 horas do ensaio (Figura 22).

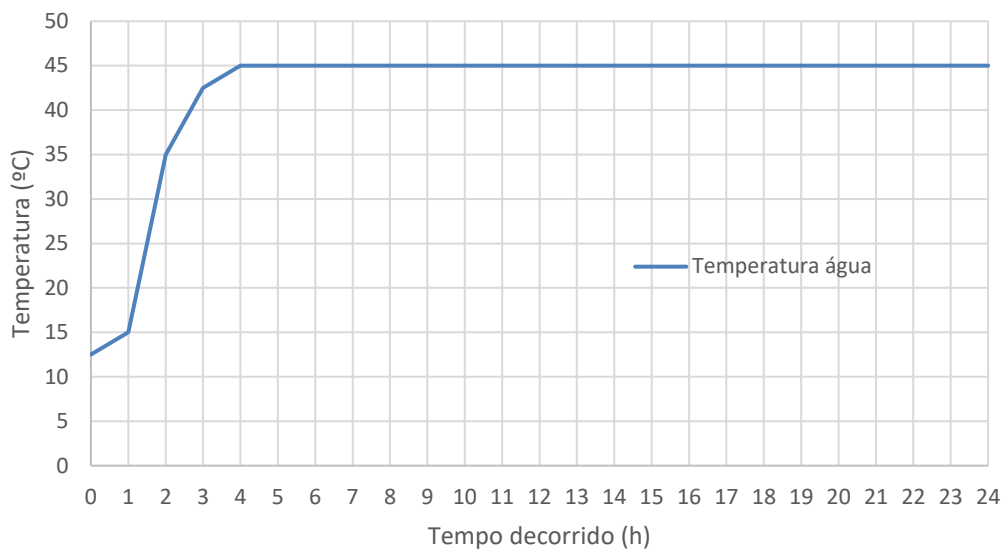


Figura 22 - Perfil de temperatura do Caso B - Aquecimento contínuo

4. Análise e discussão dos resultados

4.1 Modelação geométrica tridimensional

Para a modelação numérica foram utilizados os dados obtidos anteriormente na dissertação de Rodrigues (2019). Para o perfil da temperatura ambiente, foi realizado um ajuste para um intervalo com intervalos horários, como representado na Figura 23. Já a condutibilidade térmica da betonilha considerada foi de $0,5366\text{W/m}^{\circ}\text{C}$, sendo este um valor médio para uma betonilha tradicional, e que resultou dos ensaios experimentais realizados no âmbito da dissertação de Rodrigues (2019).

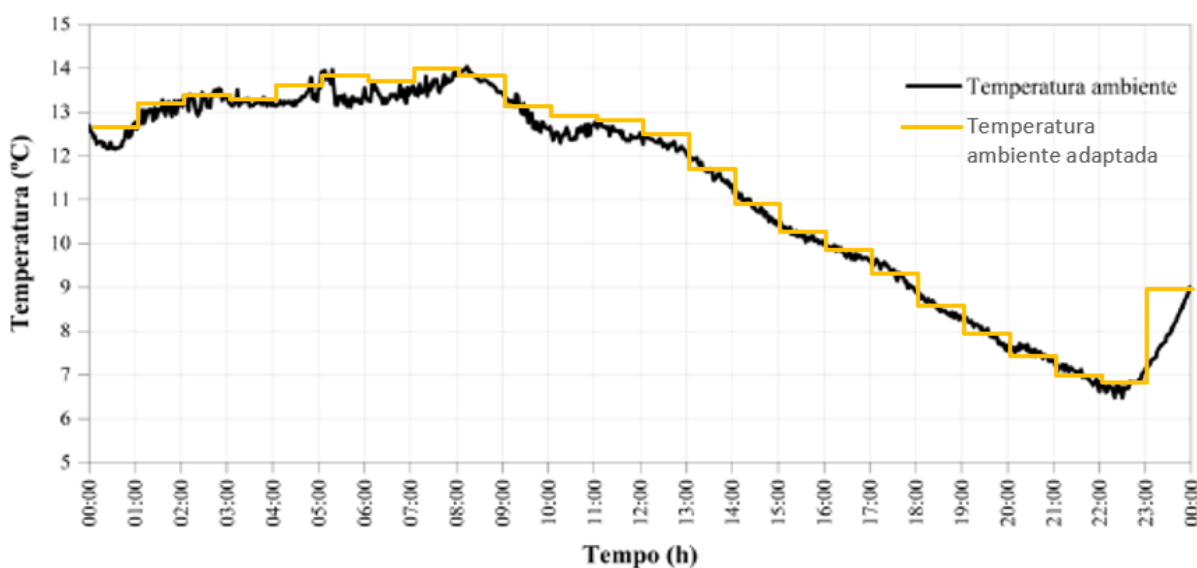


Figura 23 - Temperatura ambiente experimental vs. temperatura ambiente adaptada para a simulação

A Figura 24 apresenta um gráfico com a comparação entre os resultados da simulação tridimensional desta pesquisa com os obtidos nos estudos experimentais feitos por Rodrigues (2019). São apresentadas as variações da temperatura junto ao tubo, T^* , e próximo da superfície, S^* .

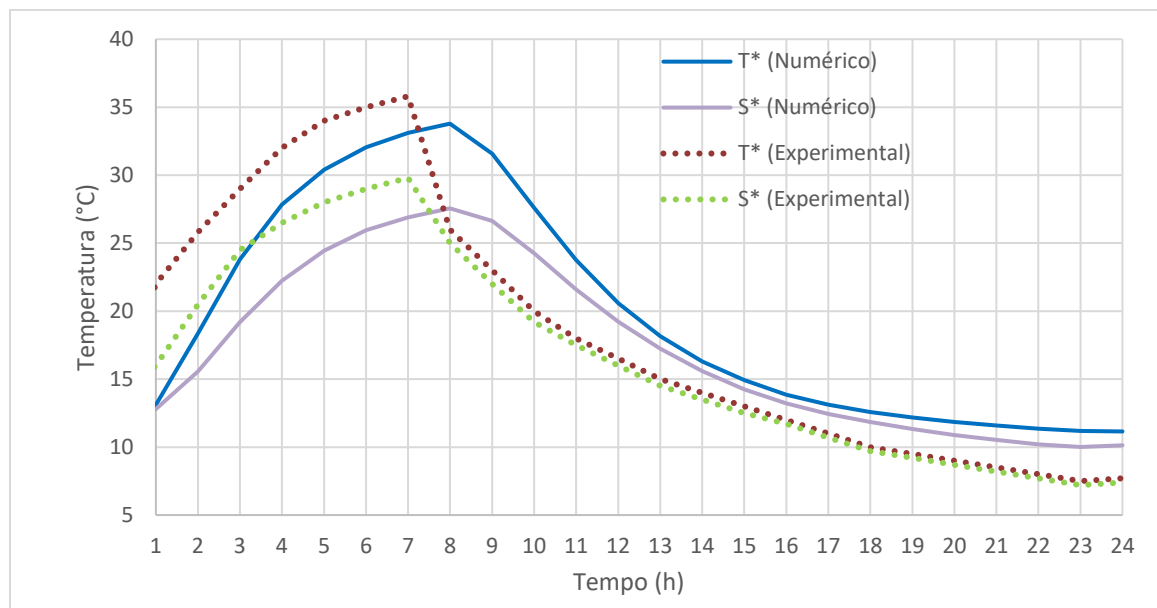


Figura 24 - Comparação numérica do modelo de simulação: medições experimentais vs. dados numéricos

A partir da análise deste gráfico, observa-se que durante o período de aquecimento as curvas T^* experimental e numérica apresentaram um aquecimento com curva quase linear, contudo para T^* numérico o aquecimento ocorreu em maior intensidade. Já durante o período de arrefecimento do sistema, T^* experimental apresentou maior declive, demonstrando um resfriamento mais rápido que T^* numérico, estes tipos de curva evidenciam que o perfil de temperatura numérico traduz um comportamento mais próximo da realidade.

Para S^* experimental, o comportamento da curva também é aproximadamente linear e superior a S^* numérico durante todo o aquecimento e mais abrupto e inferior a curva numérica durante o arrefecimento.

Em ambos os trabalhos, as curvas T^* obtiveram temperaturas superiores que as curvas S^* , demonstrando coerência nos resultados obtidos.

Durante o aquecimento, ambas as curvas do ensaio experimental foram superiores às do numéricos, isto pode ser um indício de que a condutibilidade térmica da betonilha adotada entre estes dois ensaios não era a mesma. No presente trabalho, este valor foi definido a partir da média entre os três valores obtidos nas amostras do trabalho anterior (entre $0,4507 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ e $0,6036 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), ficando definido como $0,5366 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. A partir destas informações, pode-se concluir que a condutibilidade térmica utilizada no ensaio experimental teria valor superior ao usado nesta pesquisa.

Para melhor visualização e entendimento do perfil de temperatura obtido na simulação numérica, a Figura 25 mostra as respectivas colorações nos instantes $t=0\text{h}$, $t=8\text{h}$, $t=12\text{h}$, $t=24\text{h}$, geradas a partir do *software Drawmesh*.

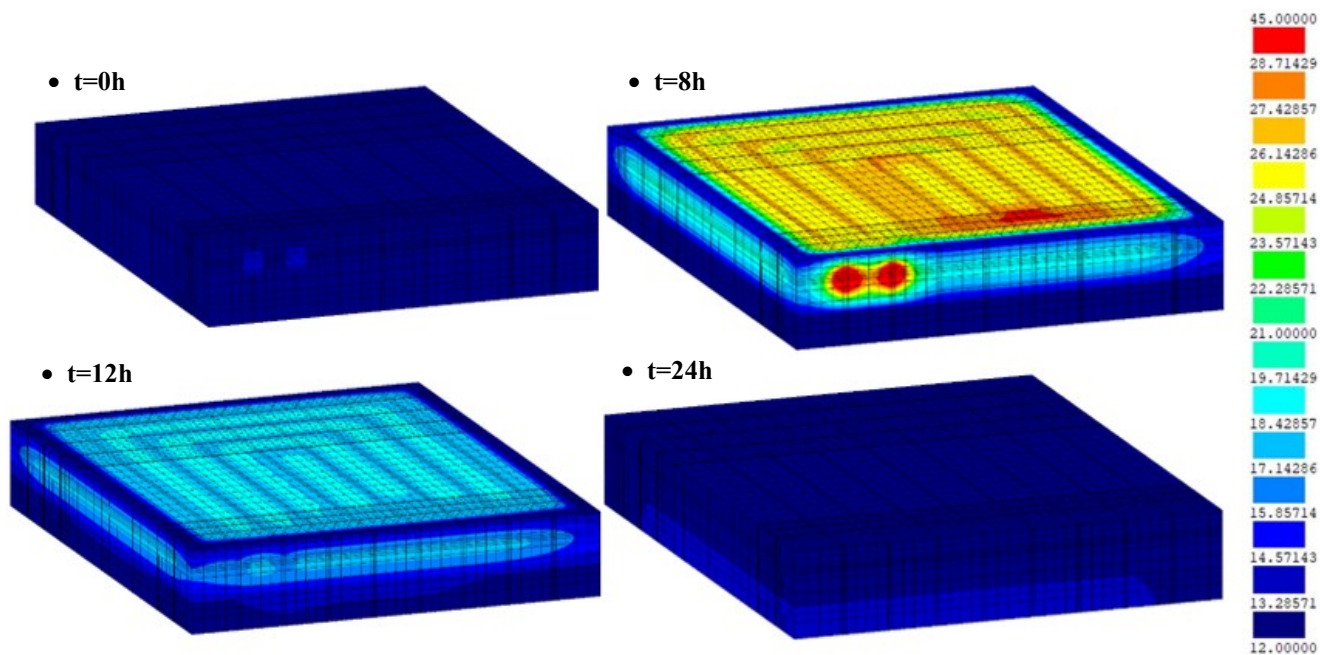


Figura 25 - Colorações na simulação da temperatura usada para o modelo geométrico tridimensional (t=0h, t=8h, t=12h, t=24h)

As diferenças encontradas nos valores das temperaturas de ambos os trabalhos podem, ainda, estar relacionados ao facto dos ensaios experimentais não terem sido executados em ambiente com temperatura controlada. Estas diferenças também ocorreram também entre o experimental e os resultados encontrados por Pinto (2020), que refere ainda as incertezas inerentes às características dos materiais e as diferenças nos valores adotados para a temperatura da água nas tubagens, como potenciais fontes de incerteza.

4.2 Análise de sensibilidade

4.2.1 Condutibilidade térmica da betonilha

- Caso A – Aquecimento intermitente

As Figuras 26 e 27 abaixo mostram os gráficos com a variação da temperatura nos pontos T* e S* para as duas betonilhas simuladas: a autonivelante, que possui condutibilidade térmica de 0,8054 W/m°C; e uma betonilha teórica, otimizada para possuir uma alta condutibilidade (1,5 W/m°C).

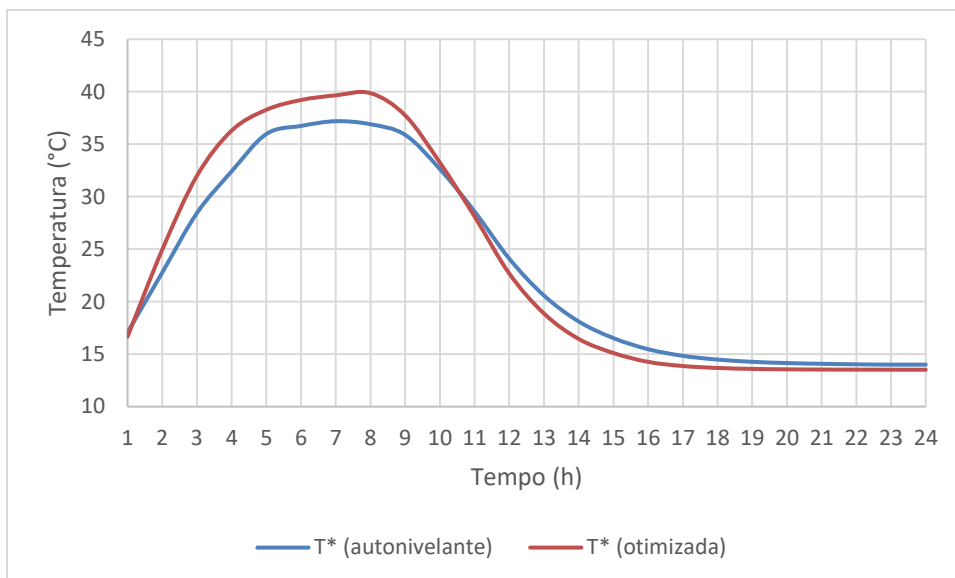


Figura 26 – Temperatura no ponto T*, para o cenário de aquecimento intermitente para ambas as betonilhas

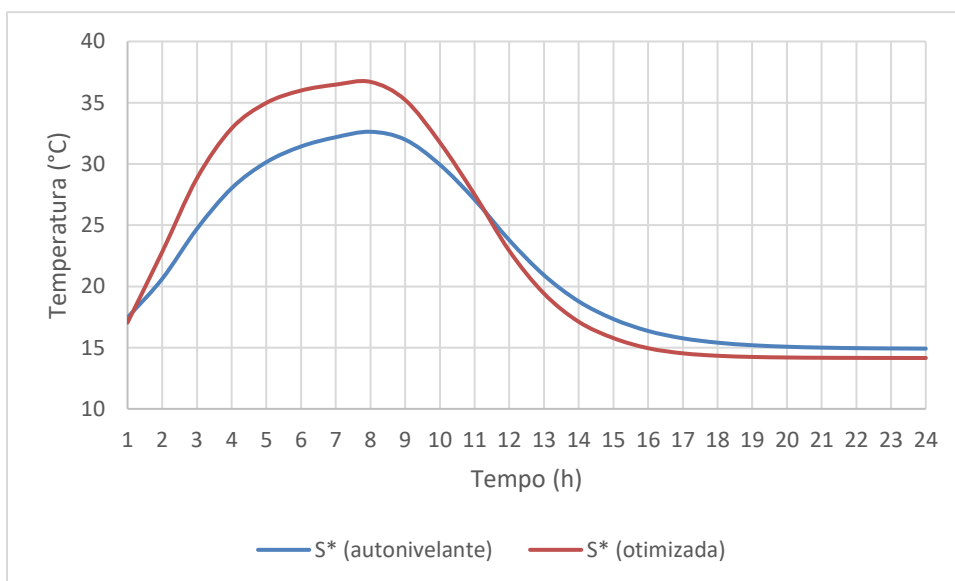


Figura 27 – Temperatura no ponto S* para o cenário de aquecimento intermitente para ambas as betonilhas

A partir da análise destes gráficos fica evidente que a condutibilidade térmica da betonilha tem impacto nas taxas de aquecimento e arrefecimento do sistema e, conseqüentemente, na temperatura no interior da laje. A betonilha otimizada gera uma maior temperatura nos pontos T* e S* sob o mesmo perfil de temperatura da água circulando nos tubos. As temperaturas mais elevadas ocorrem porque quanto maior for a condutibilidade térmica do material, mais rápida e eficiente será a transferência de calor que ocorrerá, o que justifica também a inversão das curvas após o instante $t=11h$, devido ao arrefecimento mais rápido do sistema com maior condutibilidade térmica.

No ponto S* a temperatura máxima atingida foi de 32,62 °C para a betonilha autonivelante e de 36,70 °C para a betonilha otimizada, ambas ocorreram no instante t=8h. Assim, a betonilha otimizada permite um acréscimo de temperatura no ponto S* de aproximadamente 4°C, o que pode ser muito relevante para a eficiência global do sistema. Como seria de esperar, junto ao tubo, ponto T*, a diferença de temperatura é menor, cerca de 2.5 °C no máximo.

Relativamente à diferença entre a temperatura máxima atingida nos pontos de medição T* e S*, obteve 4,28 °C para a betonilha autonivelante e 3,16 °C para a otimizada.

Com auxílio de um programa em *Python*, foram elaboradas imagens 2D com a coloração da temperatura no interior da laje. Foram criadas colorações para a cota imediatamente acima do tubo, correspondente à posição do ponto T*, e imediatamente abaixo da superfície, correspondente ao ponto S*.

Assim, as Figuras 28 a 31 ilustram a coloração do pavimento radiante hidráulico nos instantes t=4h, t=8h, t=12h, e t=16h e possibilitam a visualização das diferenças na temperatura ao longo do sistema e para cada tipo betonilha. Para facilitar a sua interpretação e discussão, em cada figura são ainda apresentados os valores de temperatura máxima, $T_{m\acute{a}x}$, e da temperatura média, $T_{m\acute{e}d}$, em cada superfície.

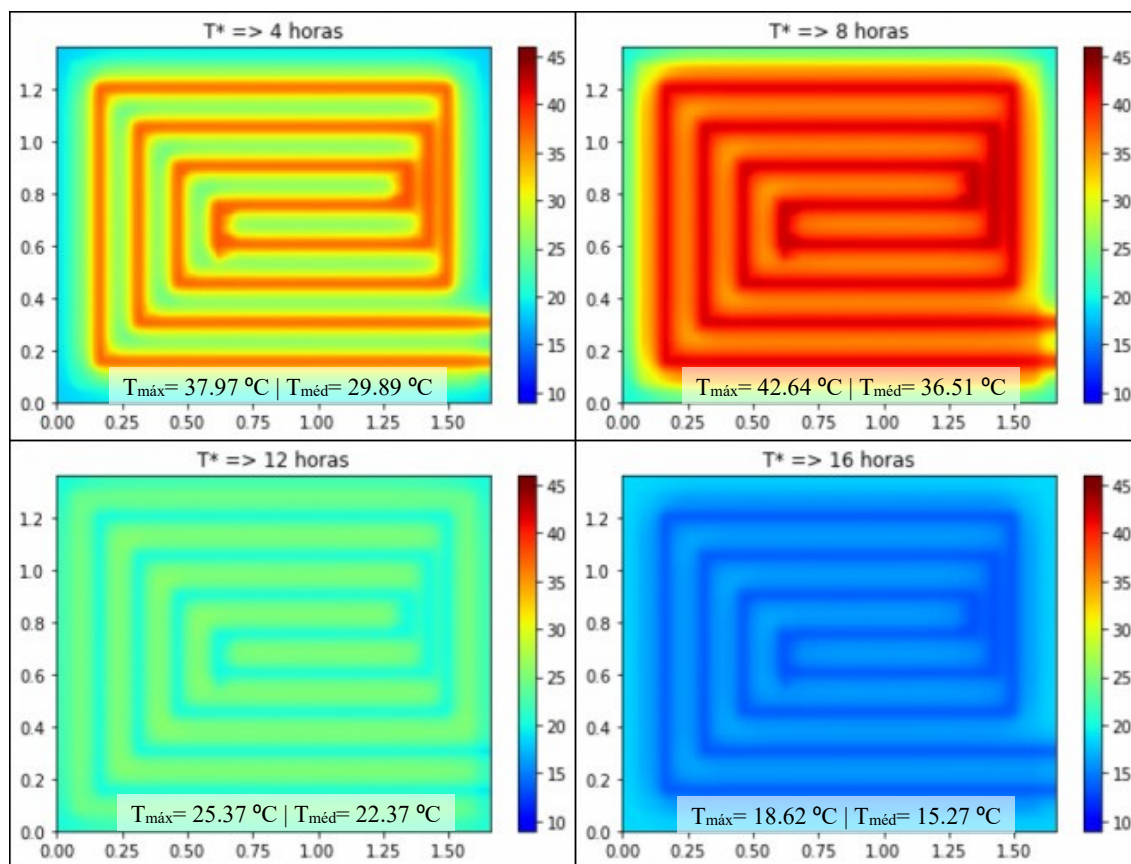


Figura 28 – Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento intermitente e com a betonilha autonivelante

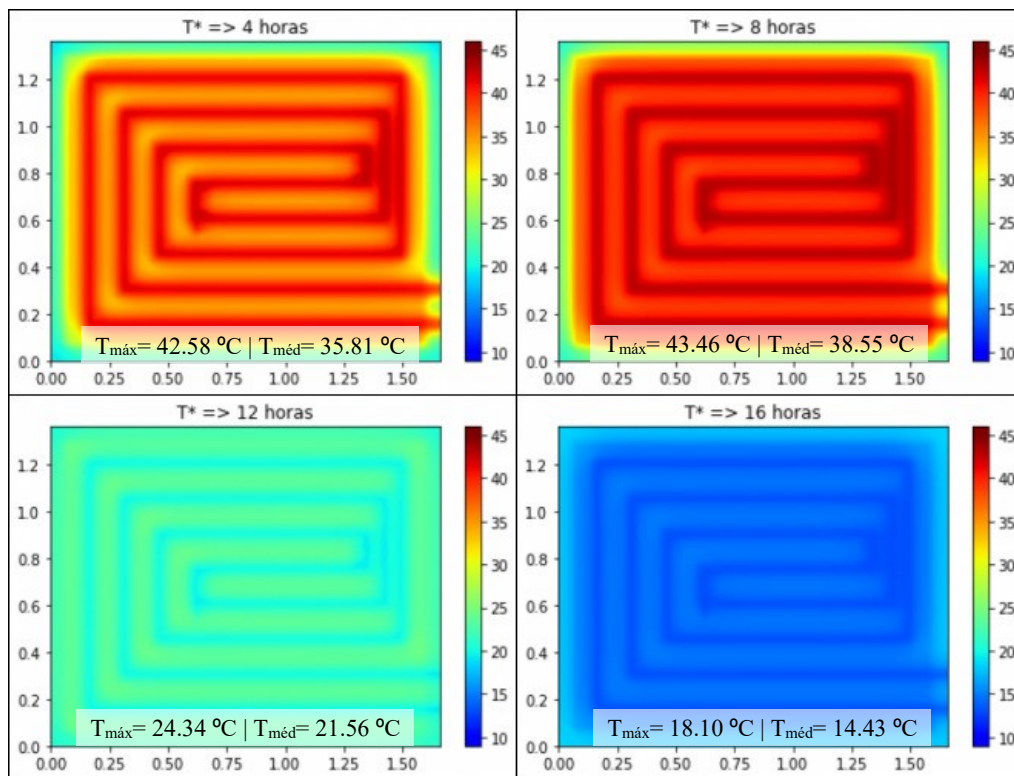


Figura 29 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento intermitente e com a betonilha otimizada

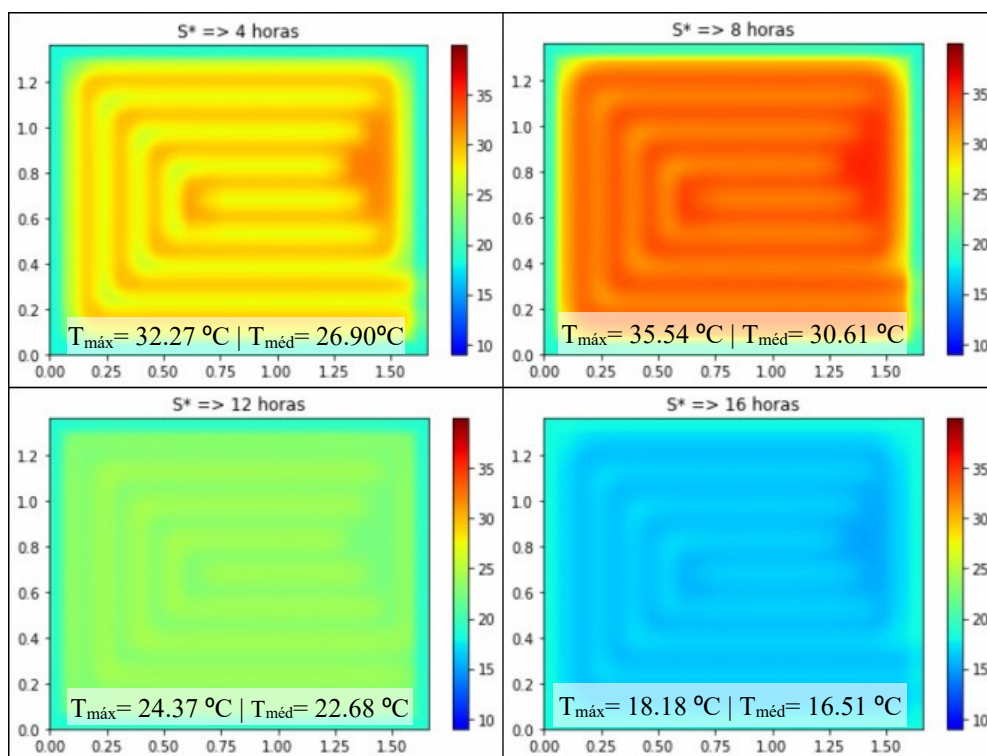


Figura 30 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento intermitente e com a betonilha autonivelante

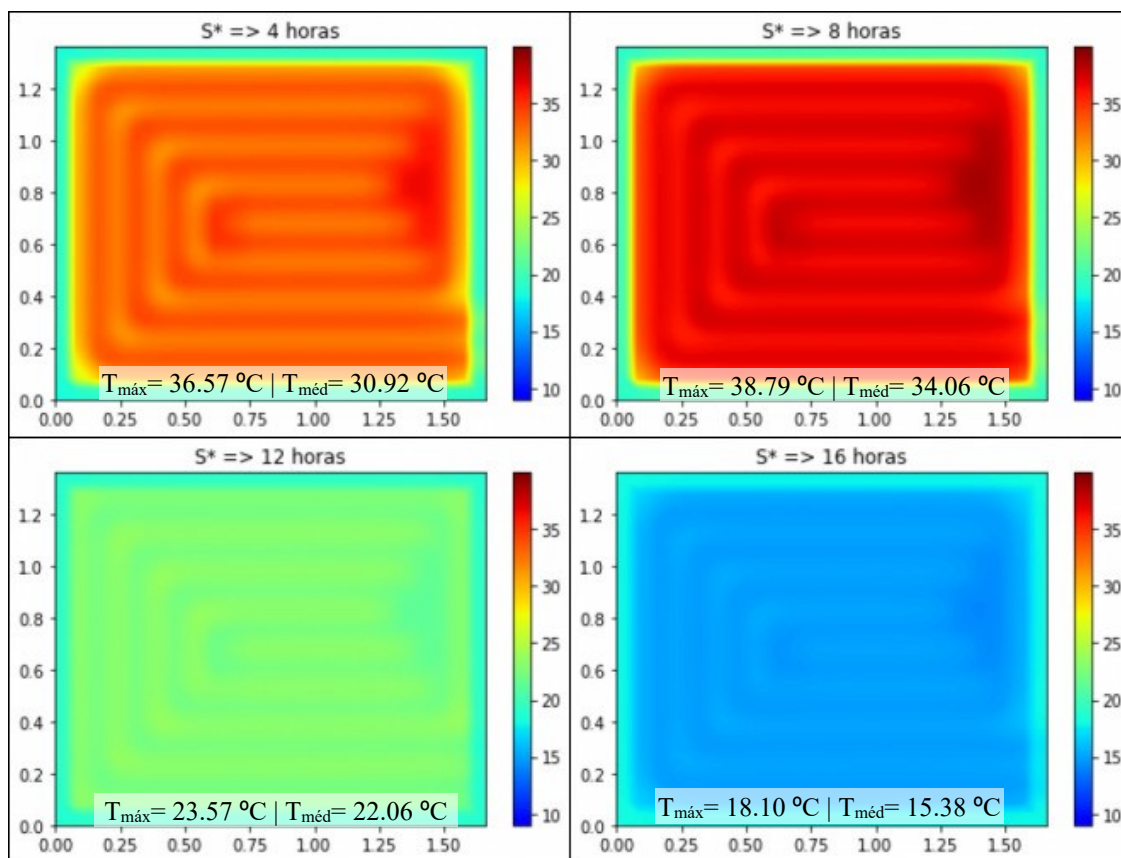


Figura 31 - Temperatura na secção do ponto S^* , para o cenário de aquecimento intermitente e com a betonilha otimizada

Como expectável, na secção correspondente à cota do ponto T^* , a temperatura é fortemente condicionada pela temperatura da água em circulação no tubo e, portanto, quase independente das propriedades da betonilha. Por exemplo no instante $t=8h$ a temperatura máxima aproxima-se muito do valor de 45 °C . Devido à maior condutibilidade térmica da betonilha otimizada, também é possível observar um arrefecimento mais intenso.

Nas imagens da secção S^* , é revelado que, mesmo com a diferença de valor da condutibilidade térmica entre as betonilhas, ambas registraram temperaturas acima de 30 °C para o pico de aquecimento ($t=8h$), conseguindo promover um bom conforto térmico aos seus usuários. Além disso, também fica evidenciada o arrefecimento mais acentuado para a betonilha otimizada.

- Caso B – Aquecimento contínuo

As Figuras 32 e 33 mostram a variação da temperatura nos pontos T^* e S^* , respetivamente, para o cenário de aquecimento contínuo de 24 horas. Da mesma forma que para o cenário de aquecimento intermitente, neste ensaio, as temperaturas obtidas na simulação com a betonilha otimizada foram superiores às da autonivelante.

As temperaturas máximas obtidas na superfície do pavimento foram de 33,27 °C e 36,92 °C, para a betonilha autonivelante e para a otimizada, respetivamente. Já a diferença de temperatura entre pontos T* e S* foi de, 2,23 °C e 3,65 °C na mesma ordem.

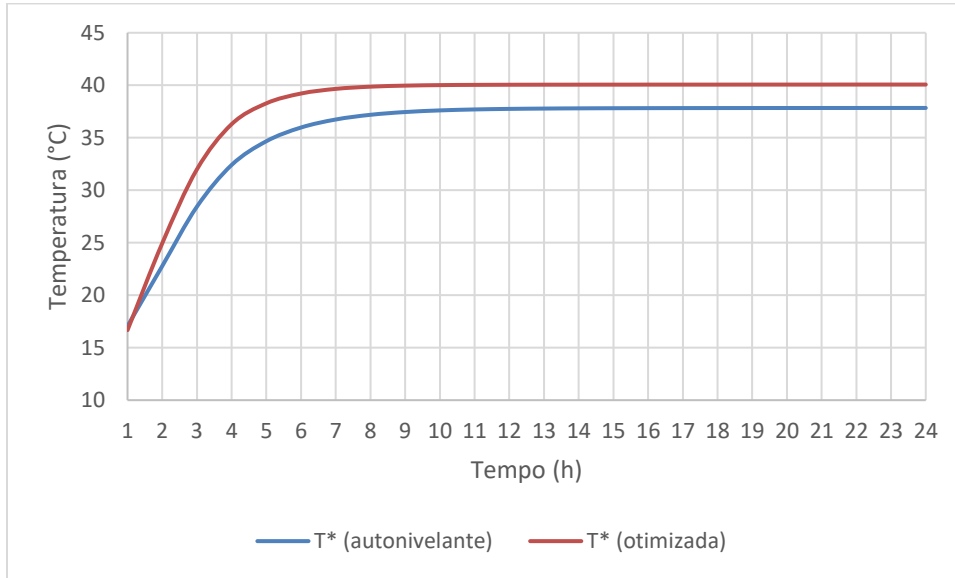


Figura 32 - Temperatura no ponto T* para o cenário de aquecimento contínuo para ambas as betonilhas

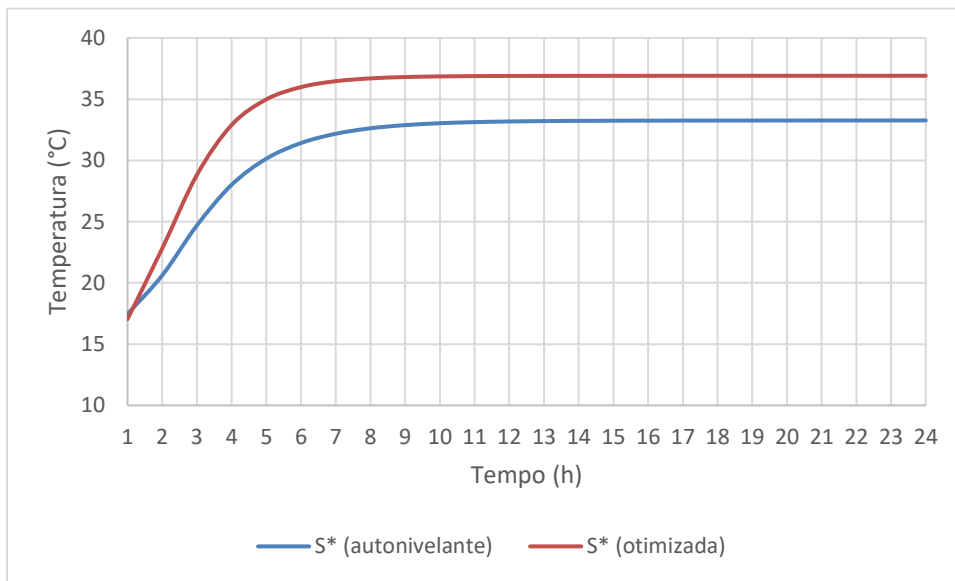


Figura 33 - Temperatura no ponto S* para o cenário de aquecimento contínuo para ambas as betonilhas

Tal como na simulação com aquecimento intermitente, as imagens geradas neste ensaio com a coloração da temperatura nas secções próximas do tubo e junto à superfície também evidenciaram o impacto da condutibilidade térmica no aquecimento do sistema. As Figuras 34 a 37 correspondem à distribuição de temperatura nos instantes t=2h, t=4h, t=8h e t=12h.

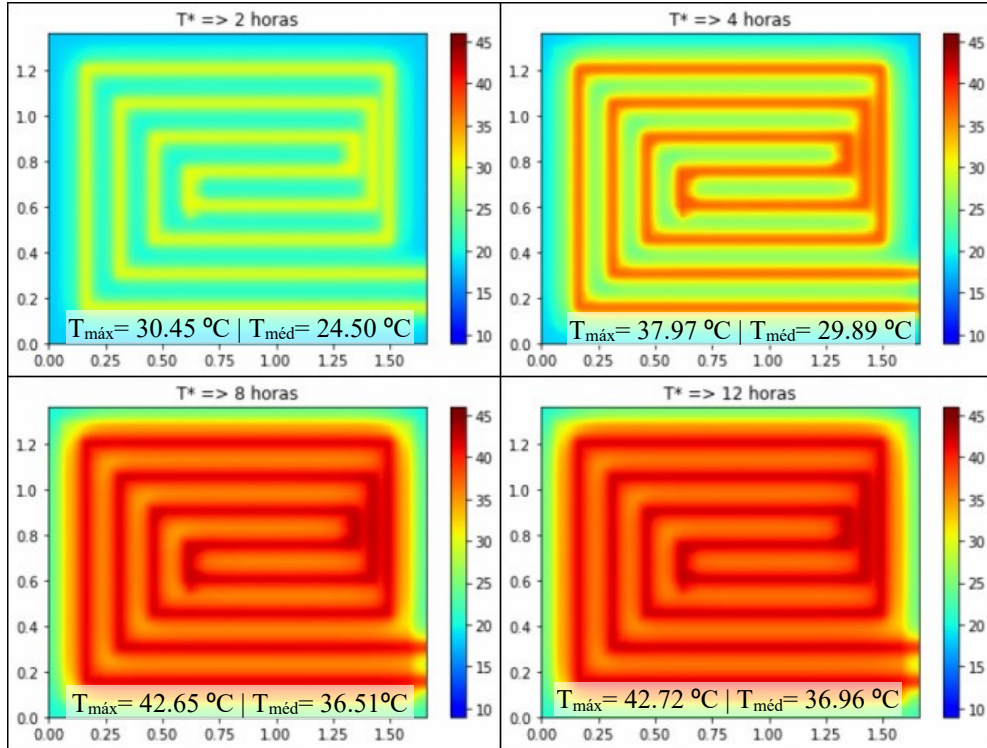


Figura 34 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento contínuo e com a betonilha autonivelante

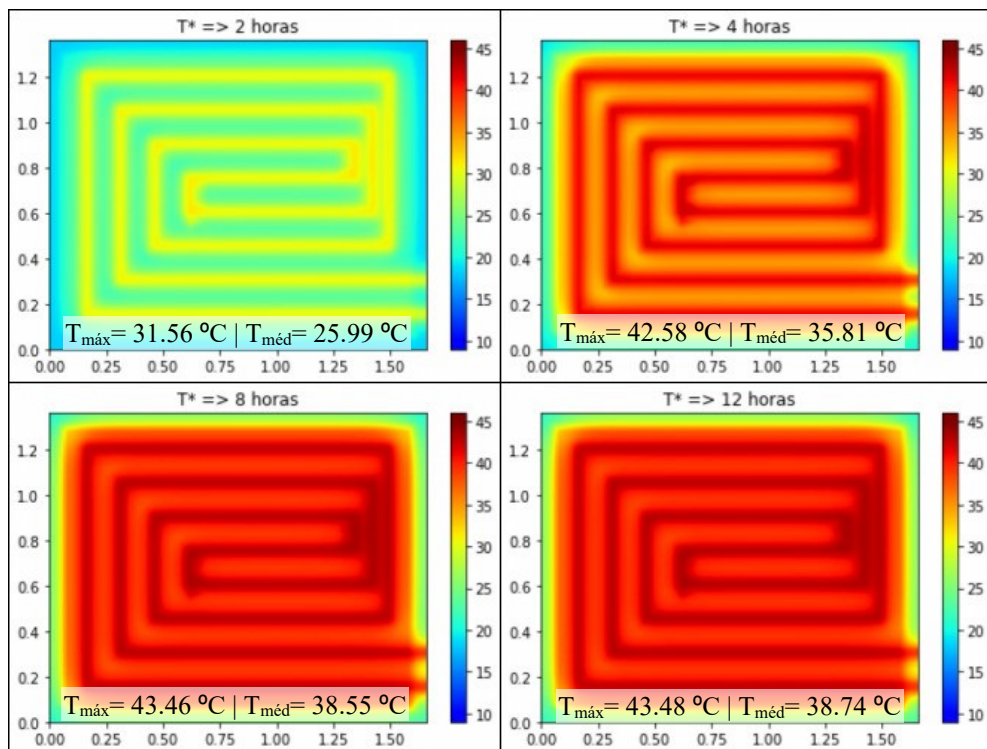


Figura 35 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento contínuo e com a betonilha otimizada

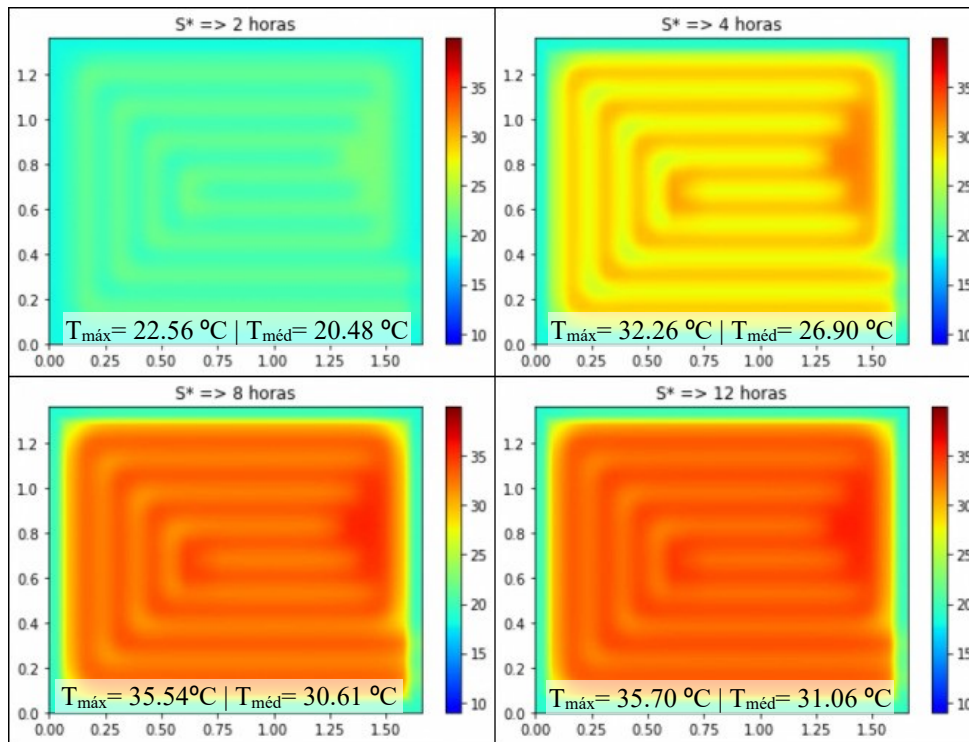


Figura 36 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento contínuo e com a betonilha autonivelante

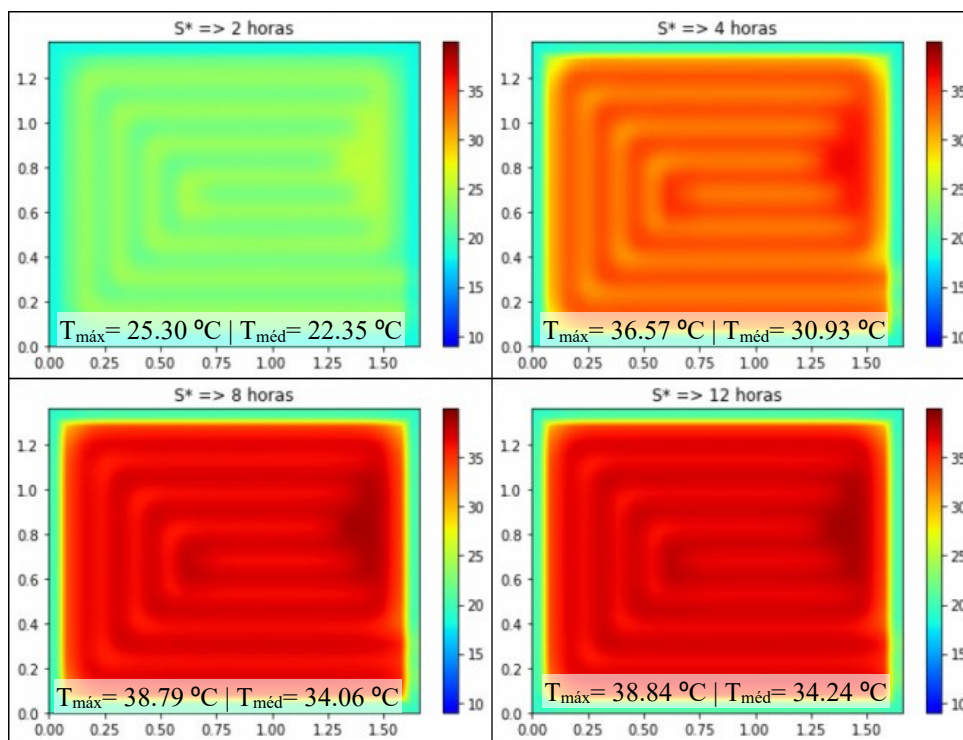


Figura 37 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento contínuo e com a betonilha otimizada

- Síntese

Para resumir os resultados obtidos nestas simulações, a Tabela 2 apresenta as temperaturas máximas e médias atingidas na superfície para cada tipo de betonilha, nos cenários de aquecimento intermitente (caso A) e contínuo (caso B).

Tabela 2 - Resumo dos resultados da análise de sensibilidade da condutibilidade térmica da betonilha

Material	Condutividade térmica (W/m°C)	Aquecimento	T _{máxima} (°C)	T _{média} (°C)
Betonilha autonivelante	0.8054	Caso A	35.54	21.15
		Caso B	35.71	28.92
Betonilha otimizada	1.5	Caso A	38.79	22.03
		Caso B	38.85	32.05

Realizando uma comparação entre os cenários de aquecimento para cada betonilha, observa-se que a temperatura máxima atingida em cada caso (Caso A e Caso B) apresentou-se praticamente igual, com variações desprezíveis, tanto para a autonivelante quanto para a otimizada. Já a temperatura média apresentou uma diferença de valores considerável, com menores valores para o caso A, dessa forma, durante um período de 24 horas, seria necessário religar o sistema para que conforto térmico continuasse no ambiente.

A utilização de uma betonilha otimizada resulta num aumento de cerca de 10% na temperatura média da superfície, demonstrado um melhor desempenho térmico em comparação com a betonilha autonivelante. Contudo, embora a autonivelante tenha apresentado um resultado menor, ainda consegue fornecer uma temperatura de conforto para o pavimento, e possuindo ainda como vantagem, uma maior facilidade de compra e menor custo. Portanto deve-se, para tomada de decisão de escolha, analisar a necessidade térmica do ambiente de emprego e qual será seu custo-benefício.

4.2.2 Temperatura do ar exterior

- Caso A – Aquecimento intermitente

Para a análise de sensibilidade referente ao efeito da temperatura do ar exterior, foram realizadas várias simulações, variando-se a temperatura entre 5 °C e 20 °C, com incrementos de 5 °C. Apesar de os valores mais baixos serem incompatíveis com uma situação de conforto térmico, optou-se por incluí-los nas simulações pois esses resultados permitem suportar e consolidar as conclusões. Assim, das simulações efetuadas resultaram os gráficos das Figuras 38 e 39, que mostram a variação da temperatura nos pontos T* e S*, respetivamente. Como esperado, quanto maior for a temperatura do ar exterior, maior será a temperatura atingida pelo sistema de pavimento radiante.

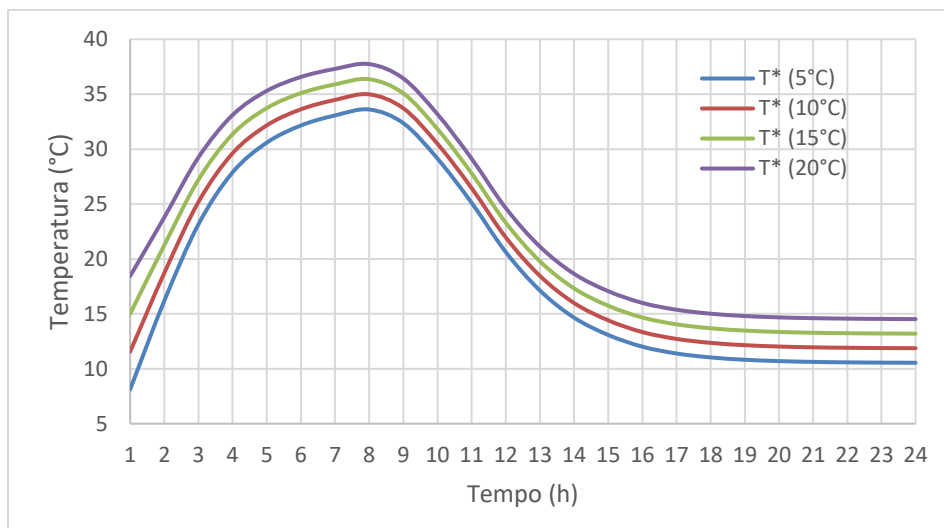


Figura 38 - Temperatura no ponto T* para o cenário de aquecimento intermitente para as diferentes temperaturas exteriores

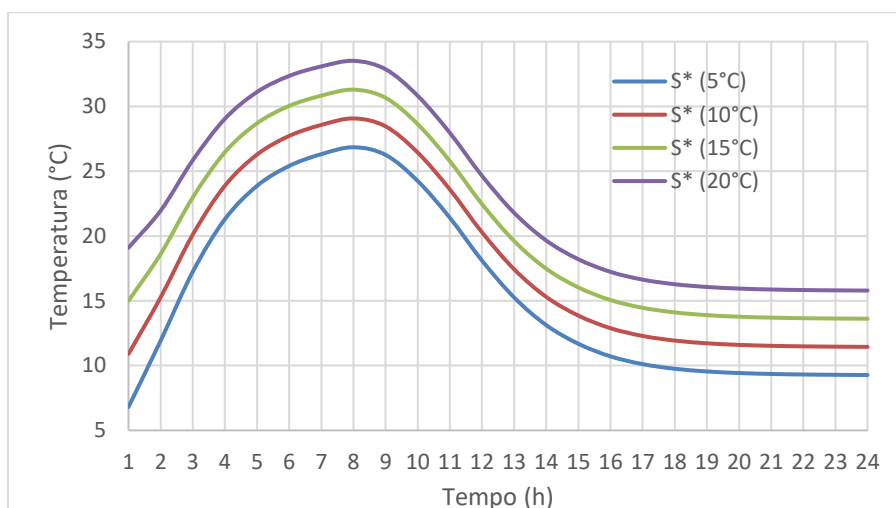


Figura 39 - Temperatura no ponto S* para o cenário de aquecimento intermitente para as diferentes temperaturas exteriores

As temperaturas máximas atingidas no ponto S* foram de 26,85 °C, 29,07 °C, 31,29 °C e 33,51 °C, respetivamente para a temperatura do ar de 5 °C, 10 °C, 15 °C e 20 °C. Na mesma sequência, a diferença de temperatura entre os pontos T* e S* para cada análise foram de 6,75 °C, 5,28 °C, 5,07 °C e 4,22 °C. Como expectável, quanto maior a temperatura do ar exterior menor será a diferença de temperatura entre o ponto logo acima da tubagem e o ponto logo abaixo da superfície.

Portanto, conclui-se que quanto maior for a temperatura do ar exterior ao edifício, maior será a temperatura que o pavimento alcançará, contudo, mesmo para temperaturas baixas, como é o caso do ensaio quando o ar está a 5 °C, a temperatura superficial mantém alguma eficiência e

4 – Análise e Discussão dos Resultados

contribuirá para o conforto térmico aos utilizadores. Neste cenário mais desfavorável, atingiu-se o valor de 26,85 °C.

Para facilitar a visualização dos resultados, foram geradas imagens 2D com a coloração da temperatura nas secções correspondentes à cota dos pontos T* e S*, para os instantes t=2h, t=4h, t=8h e t=24h (Figuras 40 a 47).

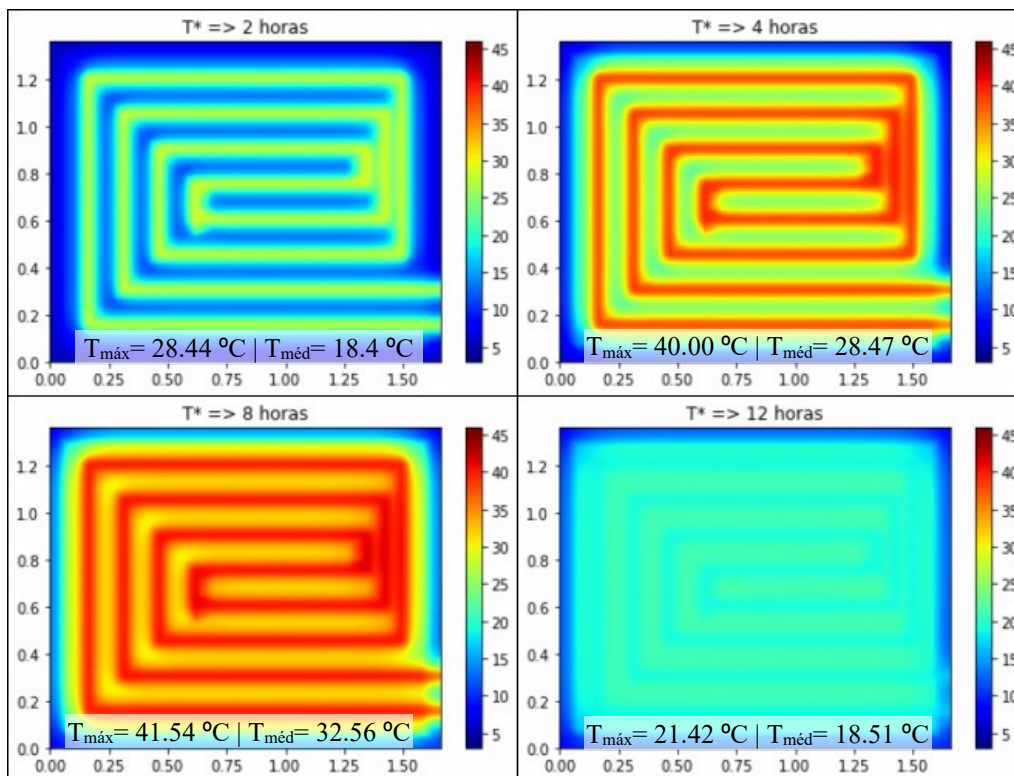


Figura 40 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento intermitente para temperatura de 5°C

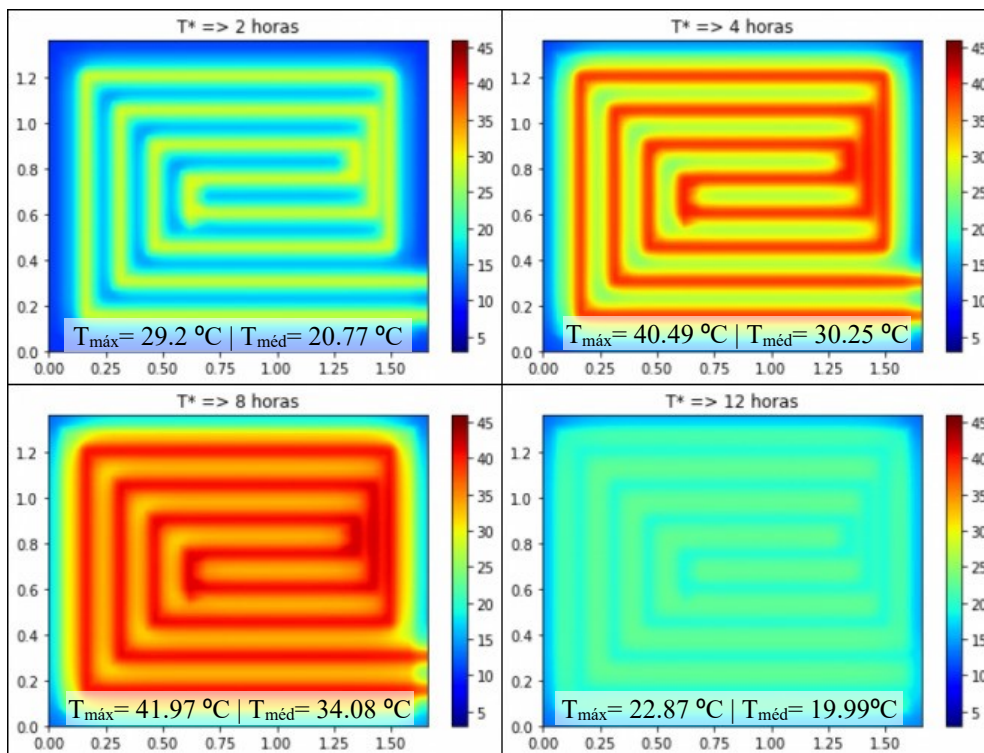


Figura 41 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento intermitente para temperatura de 10°C

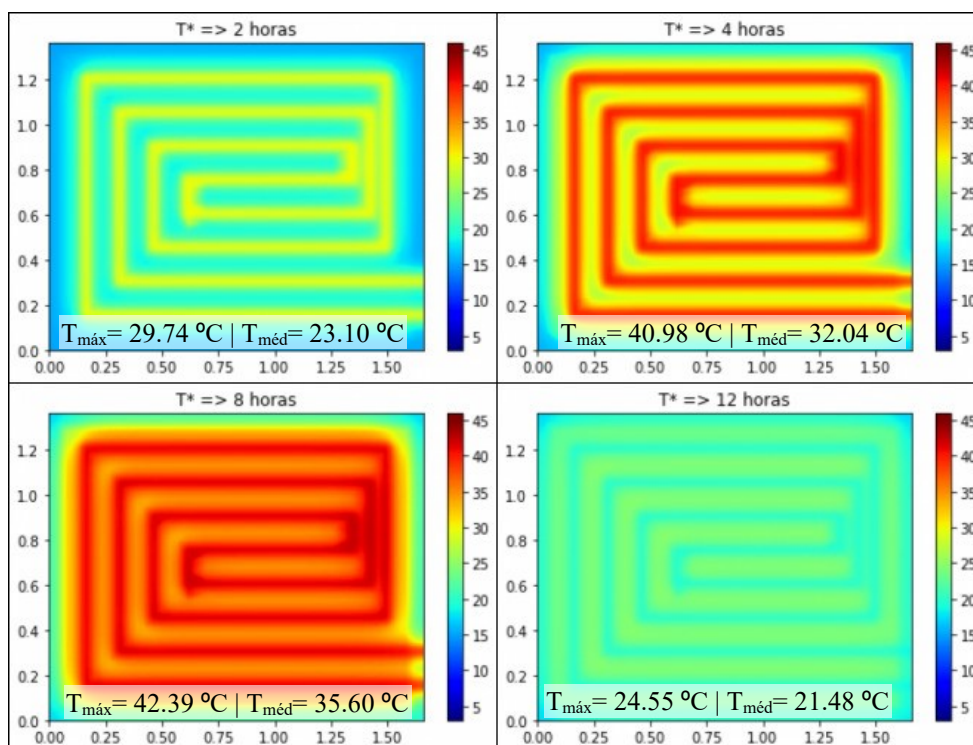


Figura 42 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento intermitente para temperatura de 15°C

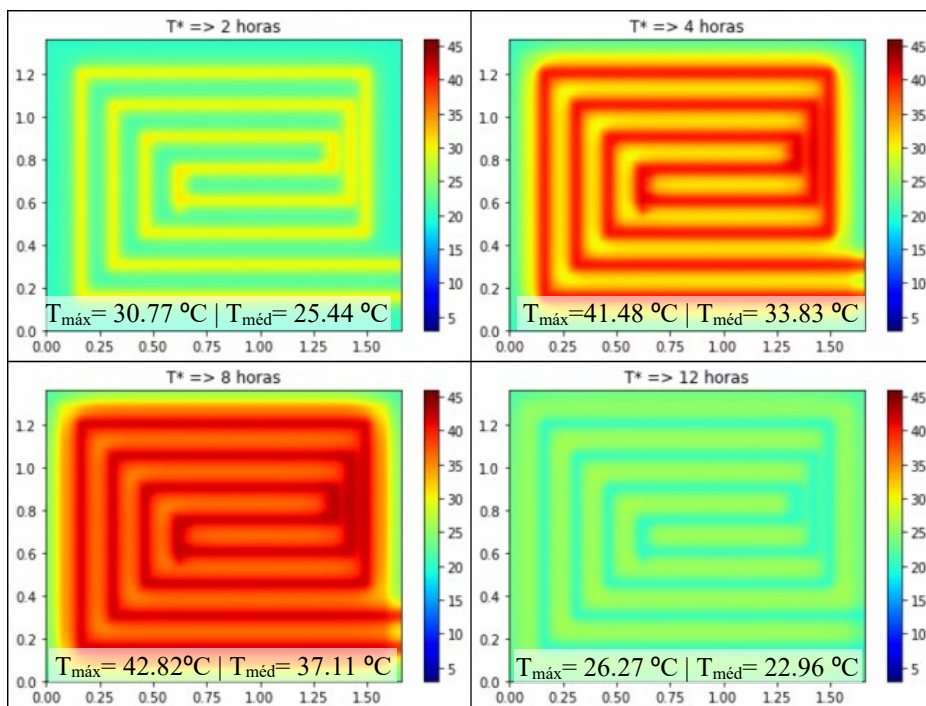


Figura 43 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento intermitente para temperatura de 20°C

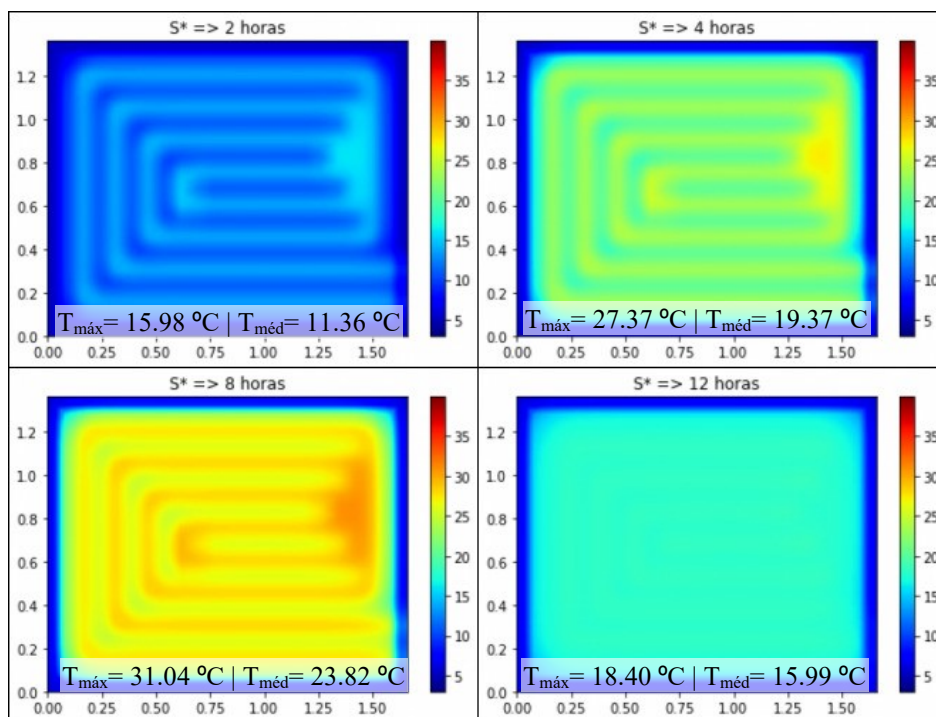


Figura 44 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento intermitente para temperatura de 5°C

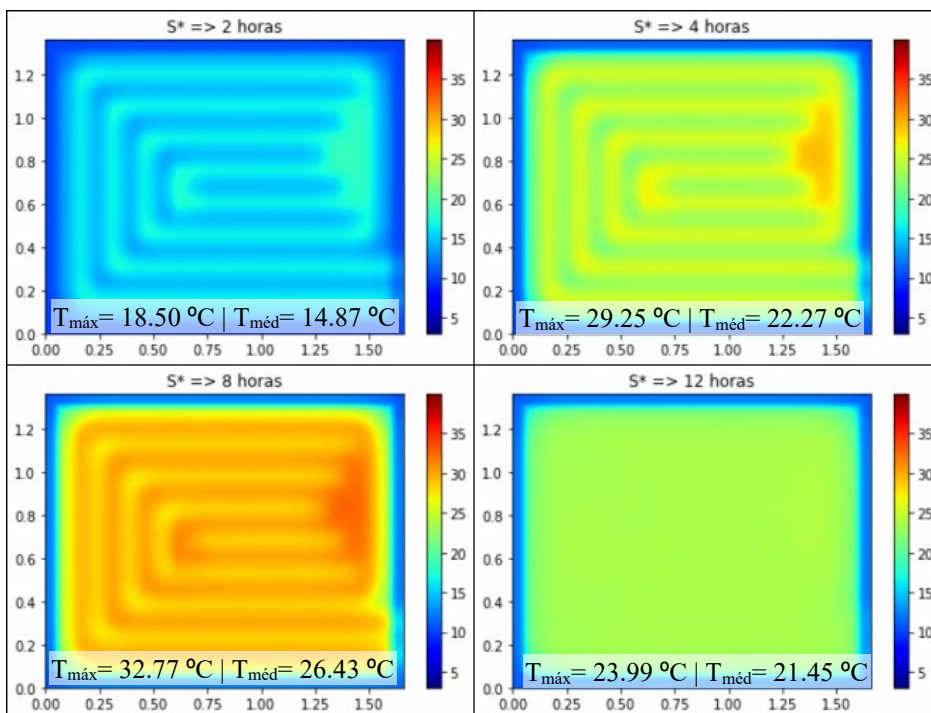


Figura 45 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento intermitente para temperatura de 10°C

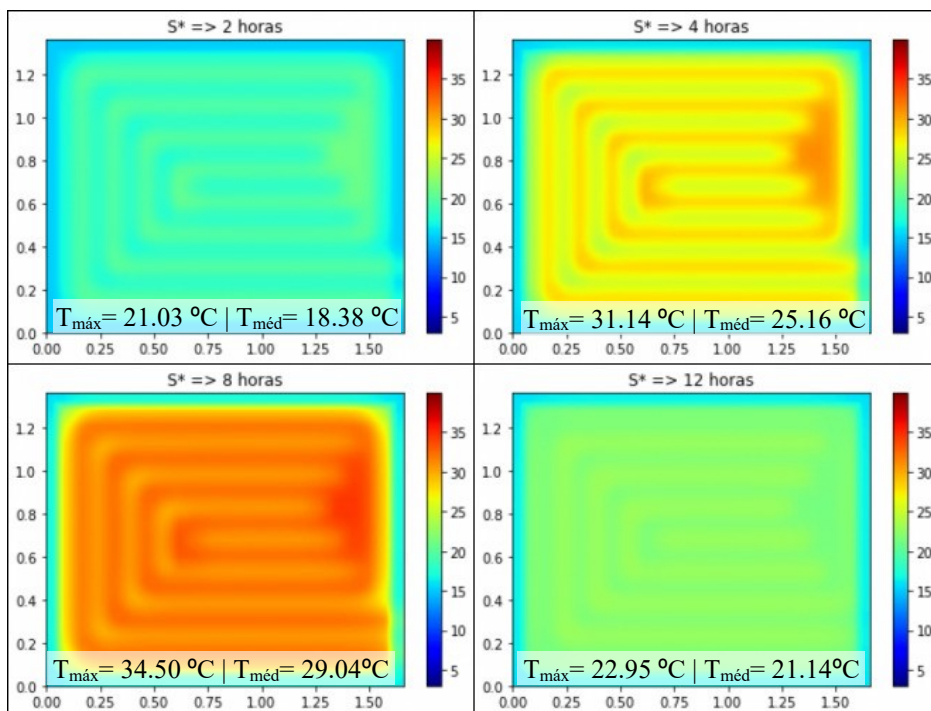


Figura 46 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento intermitente para temperatura de 15°C

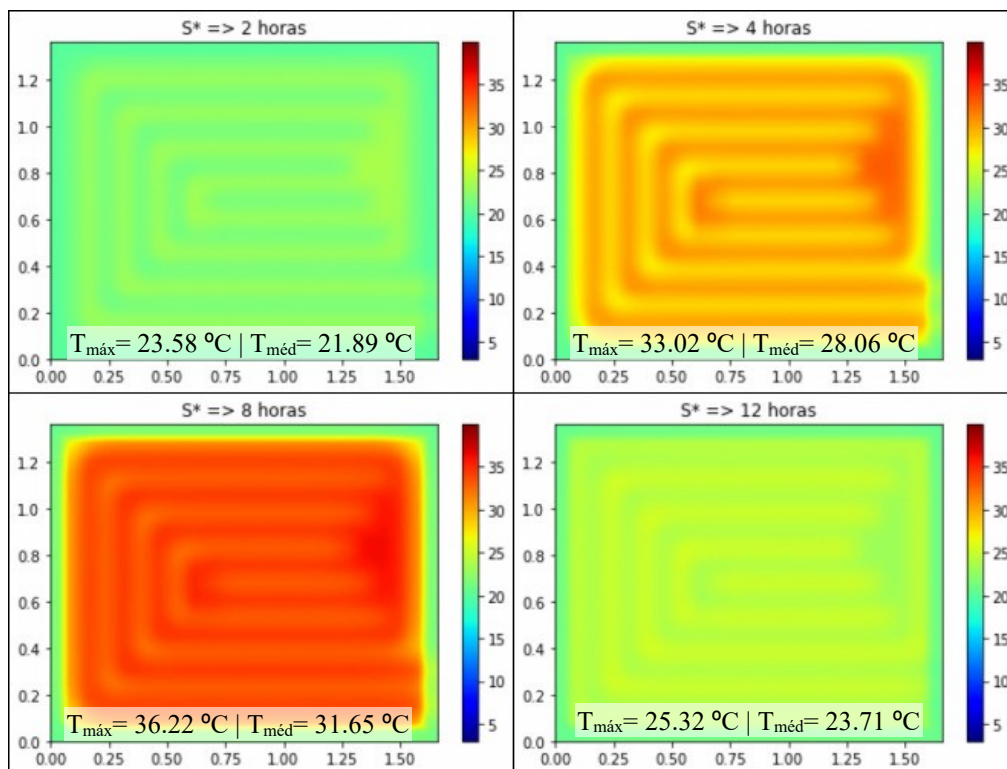


Figura 47 - Temperatura na seção do ponto S*, para o cenário de aquecimento intermitente para temperatura de 20°C

- Caso B – Aquecimento contínuo

Para a simulação realizada com aquecimento contínuo de 24 horas, foram gerados os gráficos mostrados nas Figuras 48 e 49 que, tal como na simulação anterior, evidenciou o impacto negativo da temperatura do ar exterior.

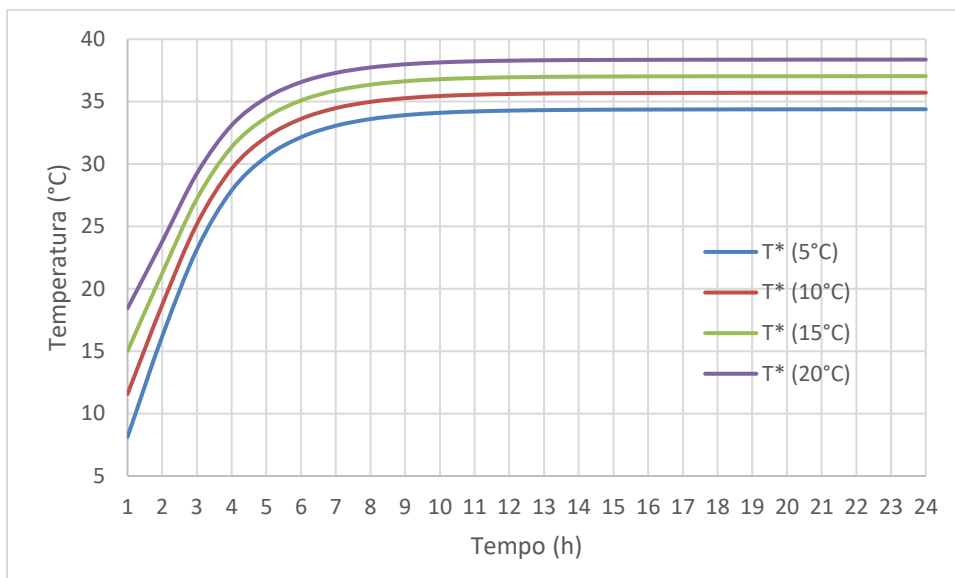


Figura 48 - Temperatura no ponto T* para o cenário de aquecimento contínuo para as diferentes temperaturas exteriores

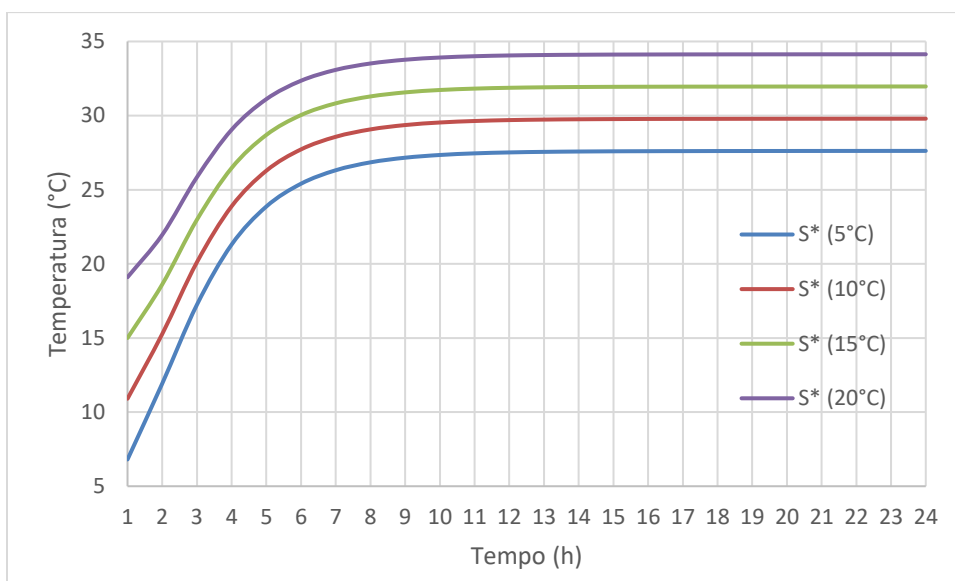


Figura 49 - Temperatura no ponto S* para o cenário de aquecimento contínuo para as diferentes temperaturas exteriores

As temperaturas máximas na superfície do pavimento ocorreram no instante $t=24h$, onde para o ar a 5 °C a temperatura máxima foi de 27,62 °C, para 10 °C foi de 29,79 °C, para 15 °C de 31,96 °C e para 20 °C de 34,14 °C. Já a diferença de temperatura entre os pontos T* e S* foi de 6,77 °C, 5,93 °C, 5,08 °C e 4,24 °C, respetivamente para a temperatura do ar de 5 °C, 10 °C, 15 °C e 20 °C.

Semelhante ao simulado no caso anterior, para todas as temperaturas do ar estudadas, o sistema de pavimento radiante apresentou um bom comportamento e contribuiu para o conforto térmico do ambiente.

4 – Análise e Discussão dos Resultados

As Figuras 50 a 57 mostram as colorações da temperatura simulado nas secções correspondentes às cotas dos pontos T* e S*, nos instantes t=2h, t=4h, t=8h e t=12h.

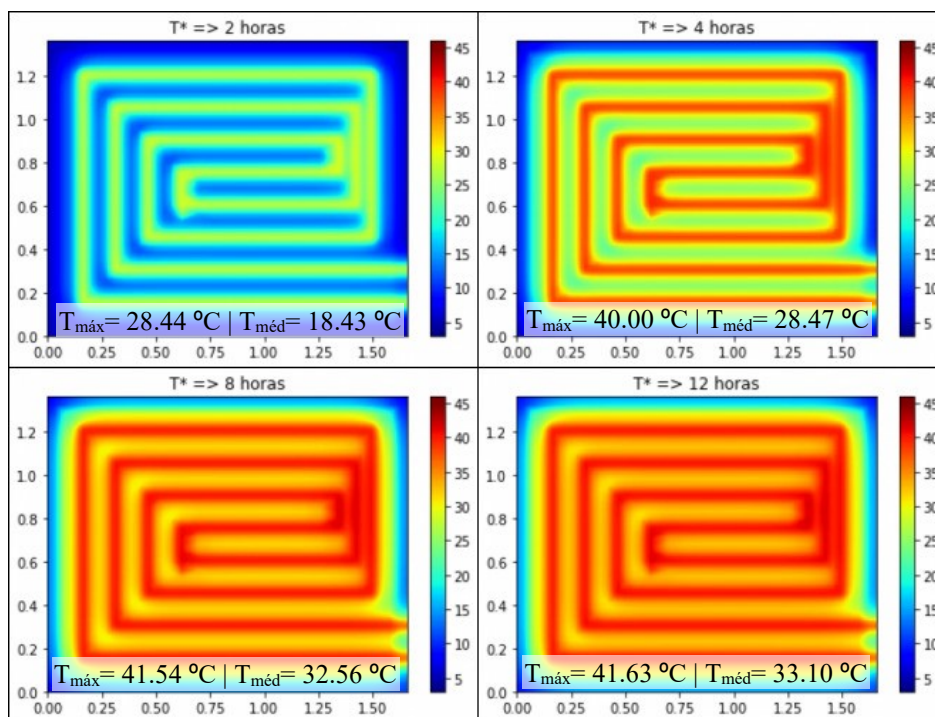


Figura 50 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento contínuo para temperatura de 5°C

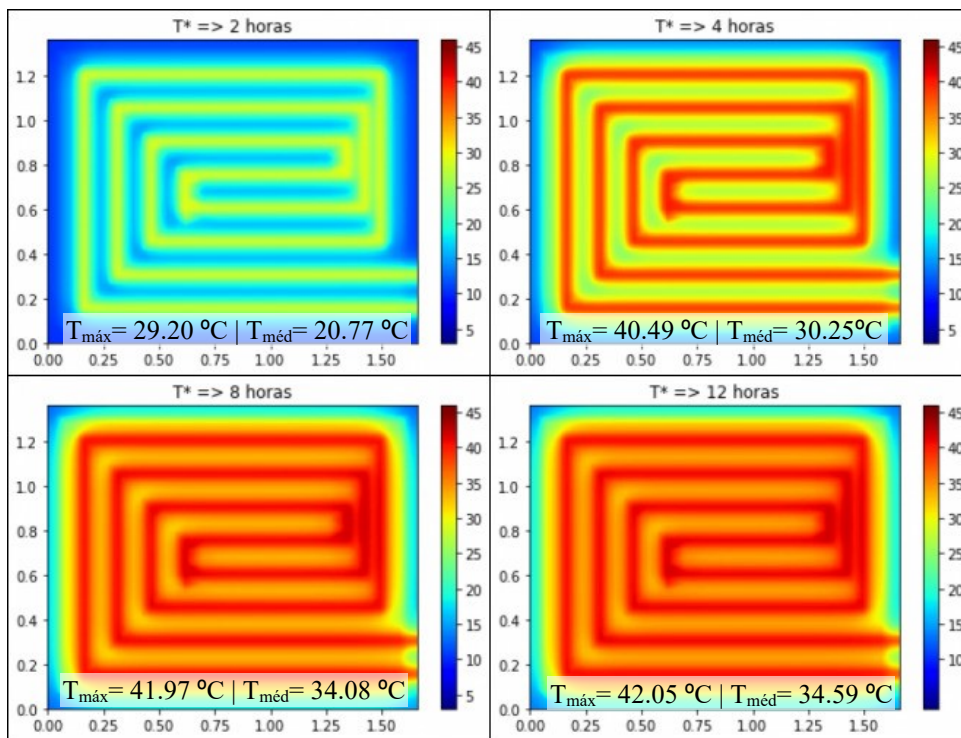


Figura 51 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento contínuo para temperatura de 10°C

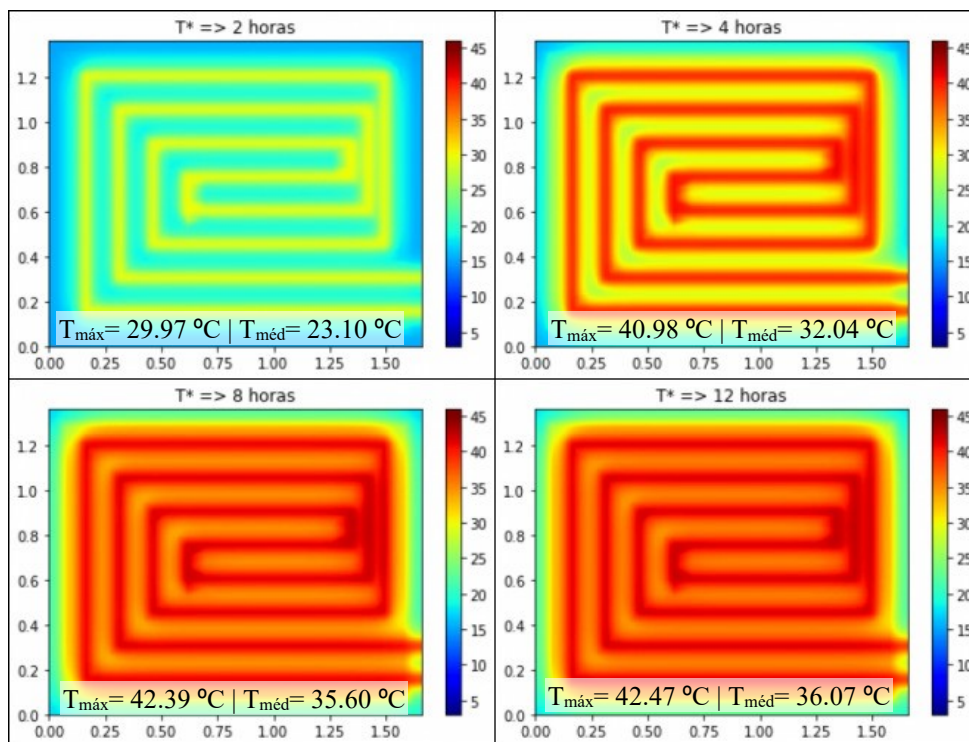


Figura 52 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento contínuo para temperatura de 15°C

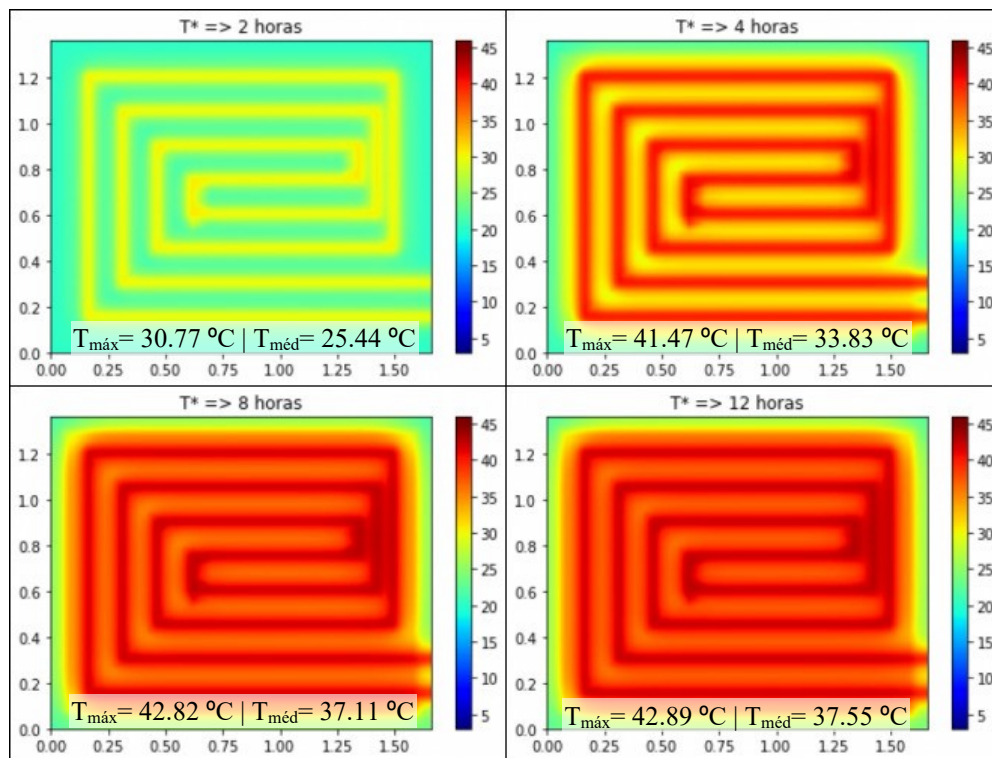


Figura 53 - Temperatura na secção do ponto T*, para o cenário de aquecimento contínuo para temperatura de 20°C

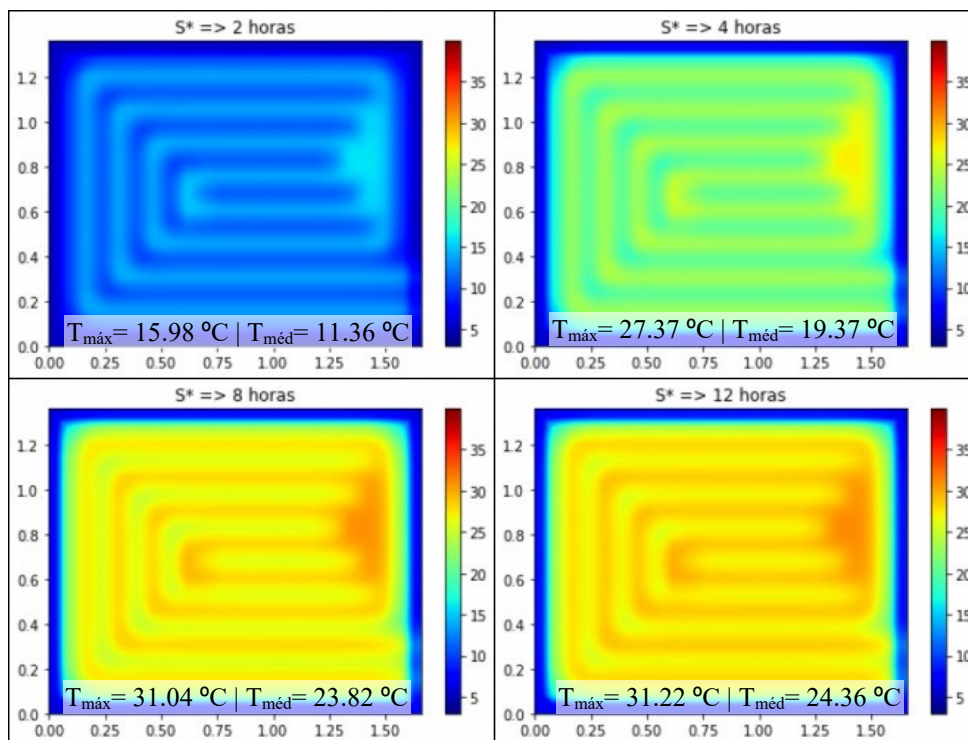


Figura 54 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento contínuo para temperatura de 5°C

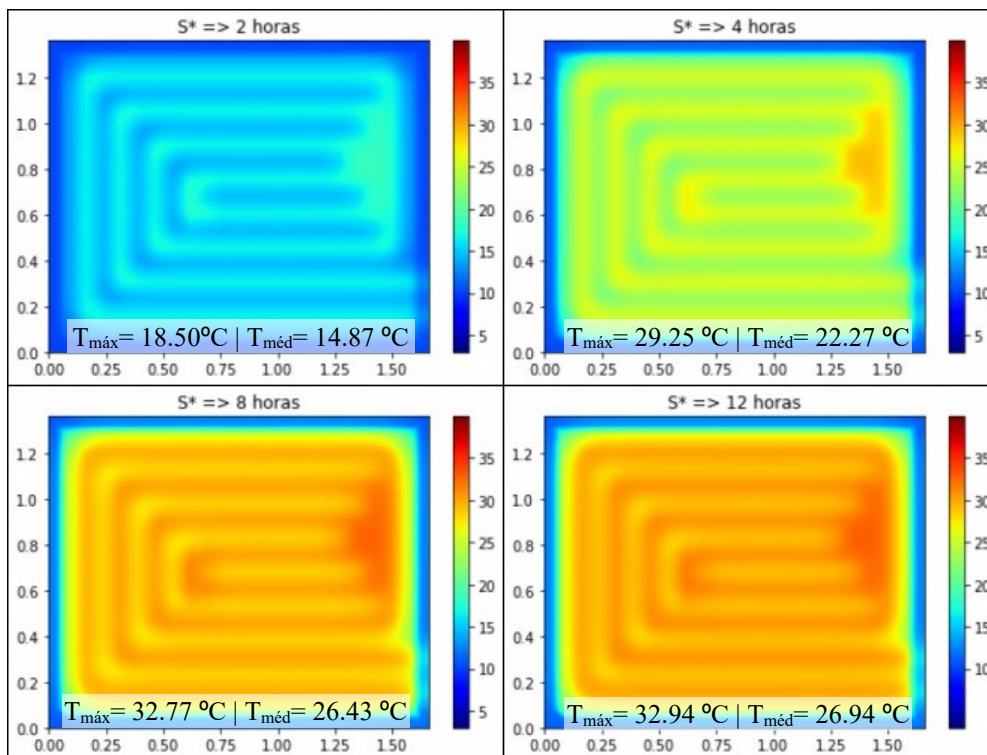


Figura 55 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento contínuo para temperatura de 10°C

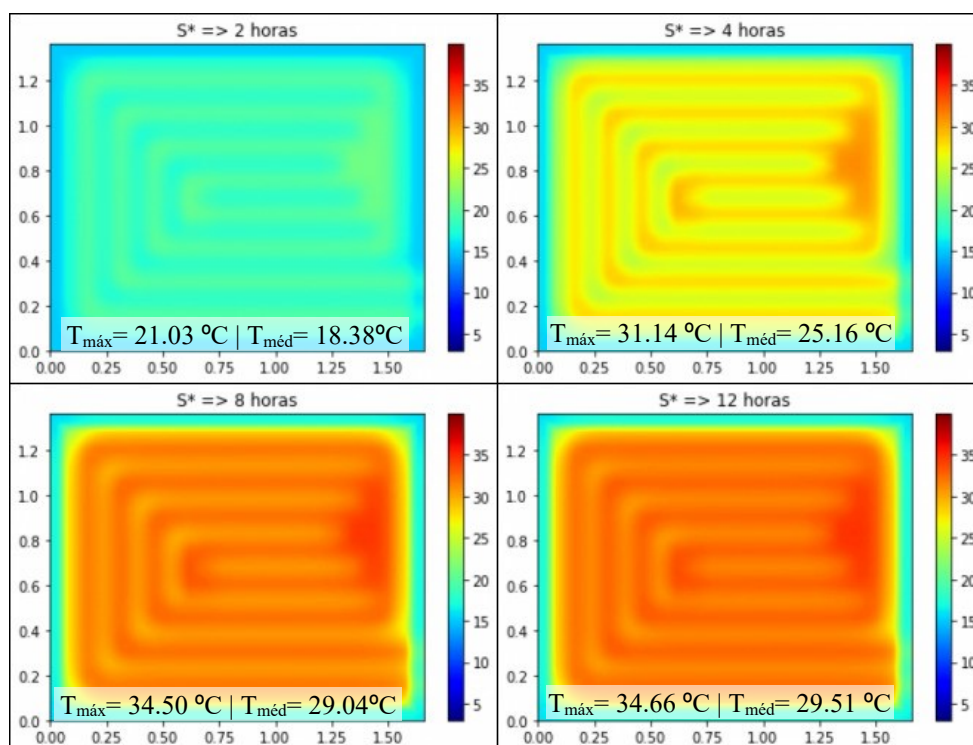


Figura 56 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento contínuo para temperatura de 15°C

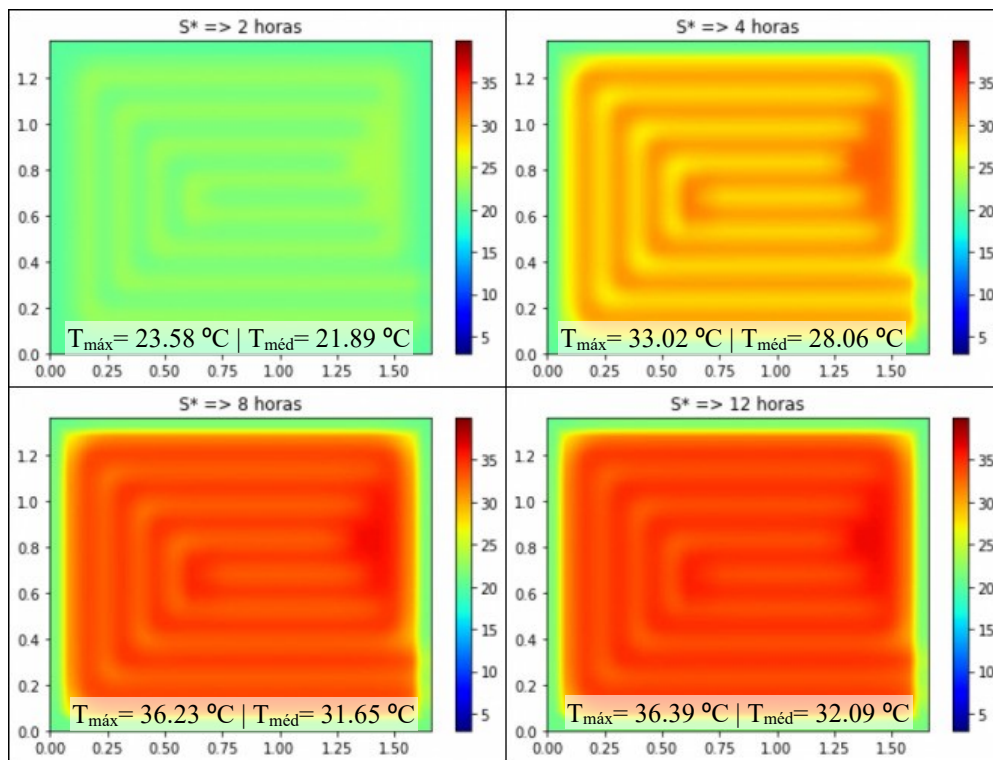


Figura 57 - Temperatura na secção do ponto S*, para o cenário de aquecimento contínuo para temperatura de 20°C

- Síntese

A Tabela 3 expõe, de forma resumida, as temperaturas máximas e médias obtidas na superfície do pavimento, para que seja facilitada a visualização dos resultados encontrados.

Tabela 3 - Resumo dos resultados da análise de sensibilidade da temperatura do ar exterior

Temperatura exterior	Aquecimento	Tmáxima (°C)	Tmédia (°C)
5°C	Caso A	31.04	13.98
	Caso B	31.24	21.75
10°C	Caso A	32.78	17.15
	Caso B	32.96	24.51
15°C	Caso A	34.5	19.49
	Caso B	34.68	27.27
20°C	Caso A	36.23	22.25
	Caso B	36.4	30.02

De forma semelhante ao ensaio anterior, a diferença de temperatura máxima entre o caso A e B para cada simulação foi mínimo para todas as temperaturas exteriores adotadas, mas para a diferença entre as temperaturas médias este valor fica em aproximadamente 7 °C. Verifica-se

também que para temperaturas exteriores menores o sistema tem de estar ligado por um intervalo de tempo maior para garantir uma boa temperatura superficial do pavimento.

A partir dos dados desta tabela, ainda é possível observar que a temperatura média da superfície para 5 °C e 10 °C é relativamente menor que para 15 °C e 20 °C, logo, se o sistema de pavimento radiante for instalado em edifícios submetidos a temperaturas do ar inferiores a estas, pode ser necessário aumentar a temperatura da água nas tubagens.

Em média, houve um aumento de 11,34% da temperatura superficial entre cada temperatura do ar exterior, comprovando assim que quanto maior for a temperatura do ar, maior será a temperatura do pavimento.

5. Conclusões

5.1 Considerações finais

Este trabalho tem como objetivo fundamental a análise do desempenho térmico de um pavimento radiante sob a variação de alguns parâmetros através da simulação numérica tridimensional da transferência de calor baseada em elementos finitos.

Para tal, foi desenvolvido com auxílio do software *Femix* um modelo que representasse o sistema de climatização. Para garantir a aceitação do modelo, realizou-se uma comparação dos resultados obtidos numa simulação com os obtidos e disponibilizados numa dissertação experimental anterior sobre a mesma temática. Em sequência, deu-se início à análise de sensibilidade, que teve como foco avaliar o impacto da variação de dois parâmetros: a condutibilidade térmica da betonilha e a temperatura do ar exterior. Para as simulações realizadas para cada um desses parâmetros, foram comparados dois tipos de aquecimento: o intermitente (caso A), cujo princípio era de um aquecimento nas primeiras 8 horas do ensaio, após o qual o sistema era desligado até perfazer 24 horas; e o aquecimento contínuo (caso B), em que o sistema passava por um aquecimento em todo o período do ensaio (24 horas).

A modelação geométrica tridimensional revelou diferenças nas curvas dos perfis de temperatura quando comparadas com os obtidos pela dissertação experimental. Estas diferenças ocorreram aquando de alguns fatores, onde primeiramente o período de aquecimento dos estudos foram diferentes, sendo o experimental submetido a 7 horas de aquecimento. O ambiente em que a dissertação anterior estava submetida não era controlada, ou seja, era submetida a inúmeras variações térmicas ao decorrer do dia, as condutibilidades térmicas da betonilha considerada nesta dissertação possivelmente possuem valor diferente e existiram diferenças na simplificação geométrica do modelo/malha. Todavia, apesar destas diferenças o modelo demonstrou representar de forma satisfatória o sistema de pavimento radiante hidráulico.

Para a análise do efeito da condutibilidade térmica da betonilha, foram utilizados os valores encontrados referentes a uma betonilha autonivelante corrente e uma betonilha teórica, otimizada para que esta propriedade seja melhorada. Os resultados mostraram que a temperatura na superfície para a betonilha otimizada ($T=33,92\text{ °C}$) foi cerca de 10% maior que para a autonivelante ($T=33,27\text{ °C}$), aumento esperado, uma vez que com o aumento condutibilidade, a transferência de calor ocorre de forma mais rápida, contudo o seu arrefecimento também ocorrerá de forma mais veloz que na betonilha autonivelante.

A temperatura do ar exterior teve como resultados uma maior temperatura superficial do pavimento para maiores temperaturas do ar, onde para o ar com 5 °C , 10 °C , 15 °C e 20 °C obteve-se respetivamente uma superfície com temperatura de $27,62\text{ °C}$, $29,79\text{ °C}$, $31,96\text{ °C}$ e $34,14\text{ °C}$, sendo este aumento, em média, de 11,34% Concluiu-se também, que para todas as

variações de temperatura analisadas nesta pesquisa, o sistema de pavimento radiante se mostrou eficaz para o aquecimento do ambiente.

5.2 Trabalho futuros

Para dar continuidade ao assunto abordado nesta dissertação, alguns tópicos poderiam ser estudados em trabalhos futuros:

- Execução de uma nova campanha experimental inserido em um ambiente com condições controladas, para controlar as fontes de incerteza e, portanto, minimizar a sua interferência nos resultados obtidos;
- Estudo experimental de um pavimento radiante hidráulico com diferentes betonilhas e revestimentos superficiais;
- Análise da influência da temperatura da água nas tubagens, para que seja possível mensurar o gasto energético do sistema e otimizá-lo da forma mais económica possível.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, José Luís Coelho - **Estudo do Comportamento Térmico de um Sistema de Arrefecimento por Piso Radiante**. Porto, Universidade de Porto, 2002.

ASHRAE STANDARD 55 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. 2010.

AZEVEDO, Álvaro F. M. **A UTILIZAÇÃO DE SOFTWARE COMERCIAL NO ENSINO UNIVERSITÁRIO**. VI Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional. 2000.

BARROS, Rui Nuno Almeida De Sá - **Betonilhas para o Revestimento de Pavimentos**. Minho, Universidade do Minho, Out. 2012.

BATISTA, Gilberto Carlos Afonso - **Sistema de controlo, regulação e comando de pisos radiantes hidráulicos**. Covilhã, Universidade da Beira Interior, Out. 2012.

BEAN, Robert; OLESEN, Bjarne W.; KIM, Kwang-Woo - ASHRAE Journal. **History of Radiant Heating & Cooling Systems: Part 2**. Fev. 2010.

BOZKIR, Oguz; CANBAZOGLU, Suat - *Energie and Buildings*, Elsevier. **Unsteady thermal performance analysis of a room with serial and parallel duct radiant floor heating system using hot airflow**. 2004.

BRANDÃO, Hernandes De Souza *et al.* - Unisanta Science and Technology. **Um estudo para determinação da condutividade térmica de sólidos isolantes em condutímetro cilíndrico**. 2014.

COUTO, João Pedro; LUSOMAPEI, Nelson Moreira - CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO. **Caracterização e Exigências Funcionais dos Massames e Argamassas de Regularização**. 2007.

DIAS, Marina Alexandra Portela - **Sistema de aquecimento a água com superfícies radiantes: simulação e verificação de parâmetros de projeto**. Coimbra, Universidade de Coimbra. Jan. 2014.

GOUVEIA, António Ventura; BARROS, Joaquim A. O.; AZEVEDO, Álvaro - **Thermo-mechanical model for the material nonlinear analysis of cement based materials**. California.

HOGAN, R. E.; BLACKWELL, B. F. - ASHRAE Transactions. **Comparison of numerical model with ASHRAE design procedure for warm water concrete floor heating panels**. Disponível em WWW:<URL:<https://www.osti.gov/biblio/7242170>>.

INCROPERA, Frank P. *et al.* - **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6^a ed. [S.l.] : LTC, 2008

Inquérito ao consumo de energia doméstico, 2010.

Referências

LAVERE, Tracy - Engineered Systems Magazine. **In-Floor Radiant Heat For Resorts**. 2009).

LEMOS, Pedro Miguel Lopes - **Viabilidade de utilização do sistema de pavimento radiante na otimização do conforto térmico em Edifícios Antigos**. Braga, Universidade do Minho, Out. 2013.

MACOP - **Tubo PEX**. 2019.

OLESEN, Bjarne W. - ASHRAE Journal. **Radiant Floor Heating In Theory and Practice**. Jul. 2002.

PIMENTA, Francisco José Lourenço - **Modelação de Sistemas Radiantes em EnergyPlus**. Coimbra, Universidade de Coimbra. Set. 2015.

PINTO, Carlos Daniel Carneiro - **ESTUDO DE BETONILHAS DE SISTEMAS DE PAVIMENTO RADIANTE: SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ESTUDOS PARAMÉTRICOS**. Aveiro, Universidade de Aveiro. 2020.

RASTELLO, Maria Carolina Diaz - **Otimização de parâmetros de projeto de tubulações de sistemas de calefação por piso radiante**. São Paulo, Universidade de São Paulo. 2013.

RODRIGUES, L. - **Estudo do desempenho térmico de um piso radiante com diferentes formulações de betonilhas**. Aveiro, Universidade de Aveiro. 2019.

SATTARI, S.; FARHANIEH, B. - Renewable Energy. **A parametric study on radiant floor heating system performance**. 2006.

SENA-CRUZ, José *et al.* - **Numerical Simulation of the Nonlinear Behavior of RC Beams Strengthened with NSM CFRP Strips**. FEUP, Porto, Portugal. 2007.

SOUZA, Remo Magalhães - **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Belém. Mai. 2003.

TEIXEIRA, António Filipe Gonçalves - **Estudo do desempenho térmico de um piso radiante hidráulico com diferentes acabamentos na superfície**. Covilhã, Universidade da Beira Interior. Out. 2010.

VIEIRA, Nuno. **Optimização de sistemas radiantes para pavimentos**. Saint-Gobain Portugal. Dez. 2020.

WARMUP - **Piso radiante elétrico**. 2010.

WARMUP - **Piso radiante hidráulico**. 2010.

Referências

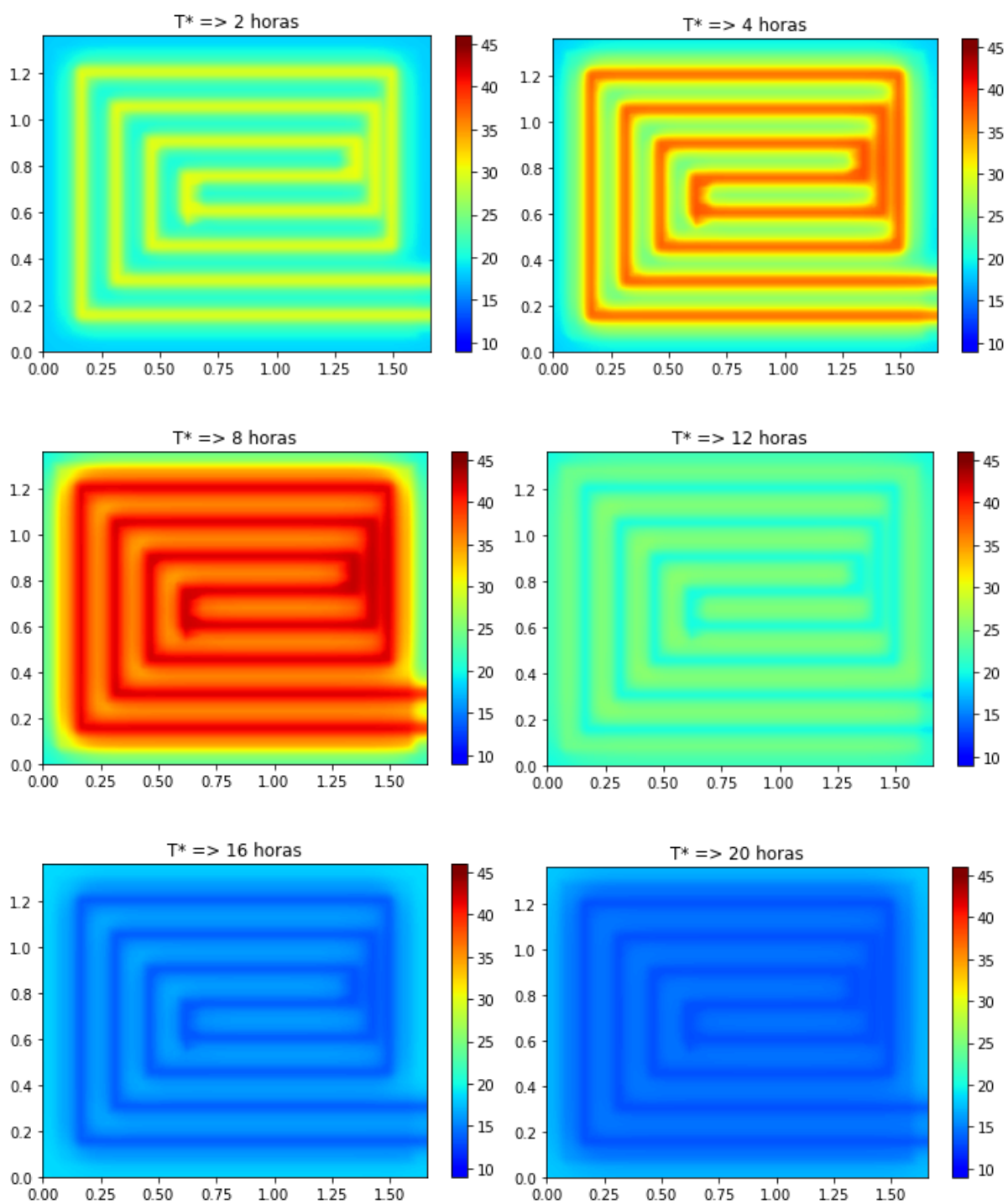
WATSON, Richard D.; CHAPMAN, Kirby S. - **Radiante Heating and Cooling Handbook**. United States of America : McGraw-Hill Professional. 2002

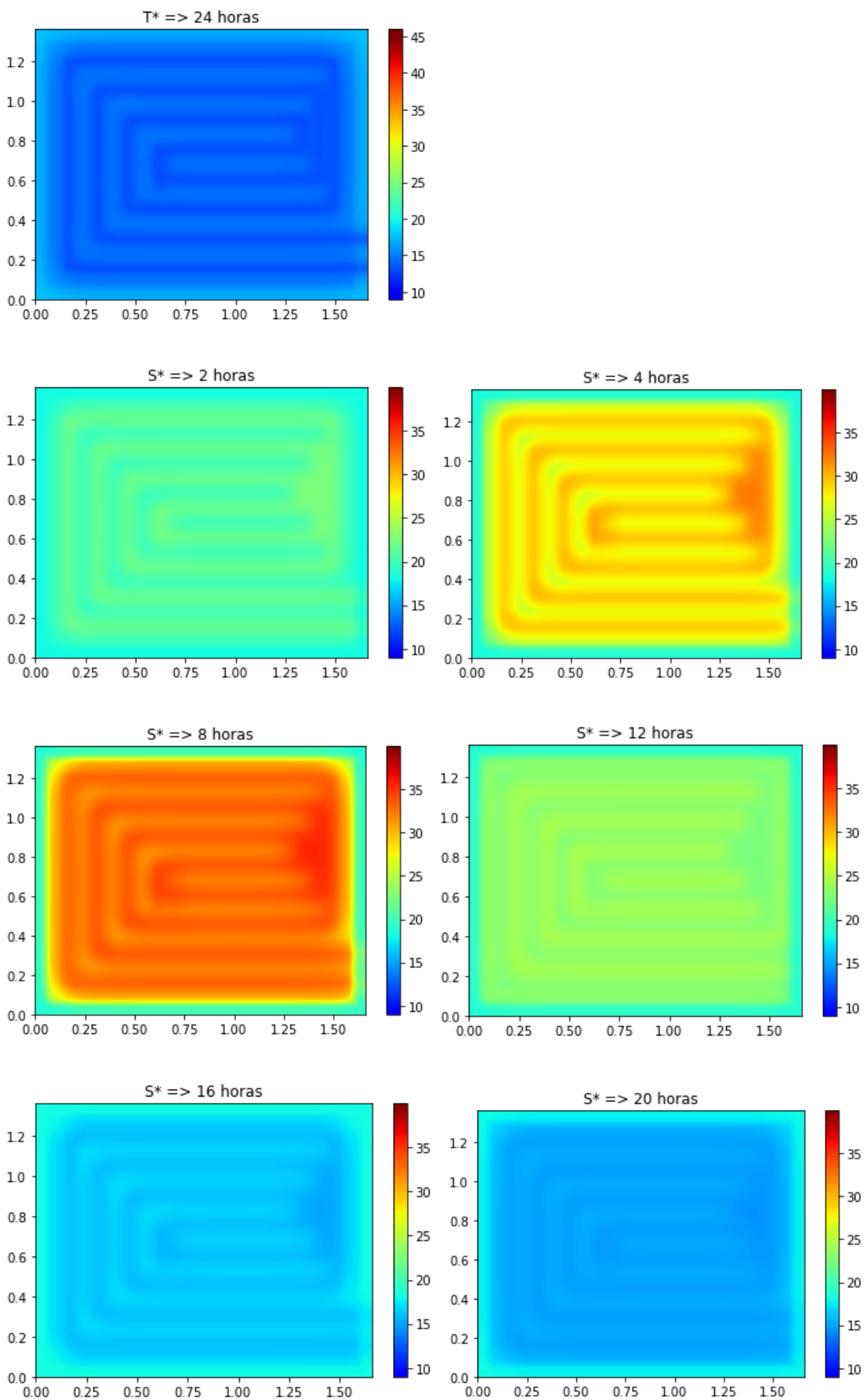
ZHANG, Z.; PATÊ, M. B. - ASHRAE Transactions. **An experimental study of the transient response of a radiant panel ceiling and enclosure**. Disponível em WWW:<URL:<https://www.osti.gov/biblio/6911991-experimental-study-transient-response-radiant-panel-ceiling-enclosure>>.

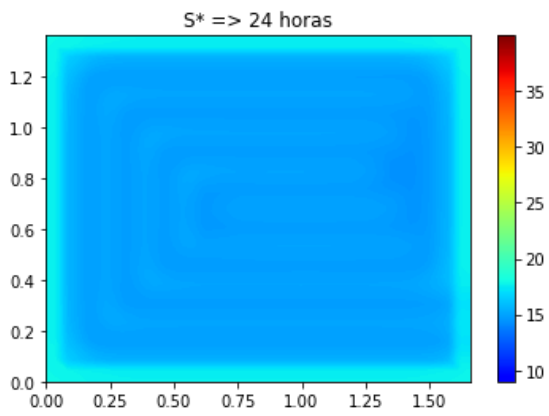
ANEXO 1

1. Argamassa autonivelante

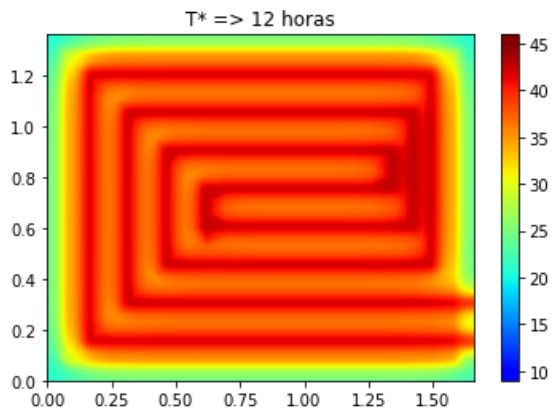
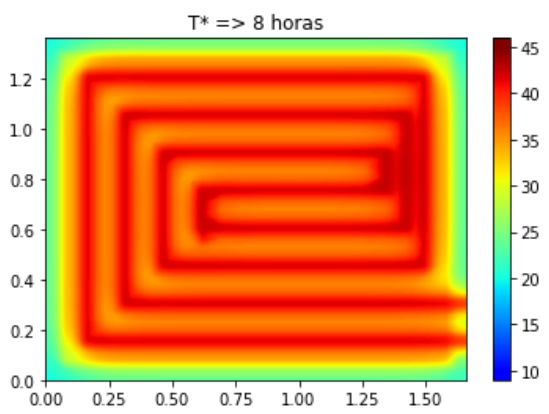
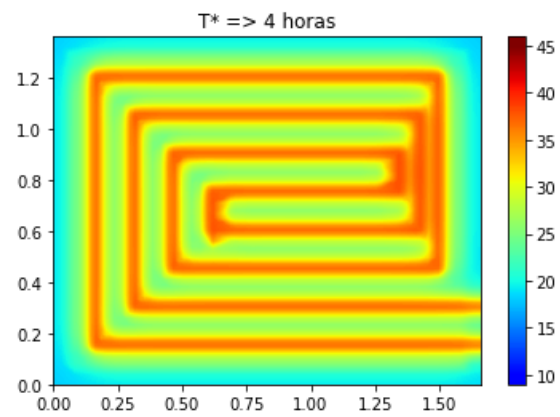
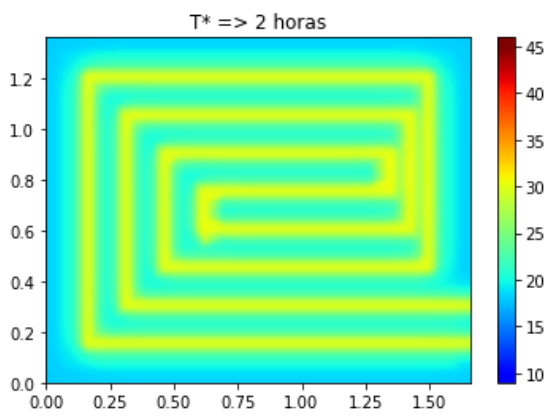
- Caso A

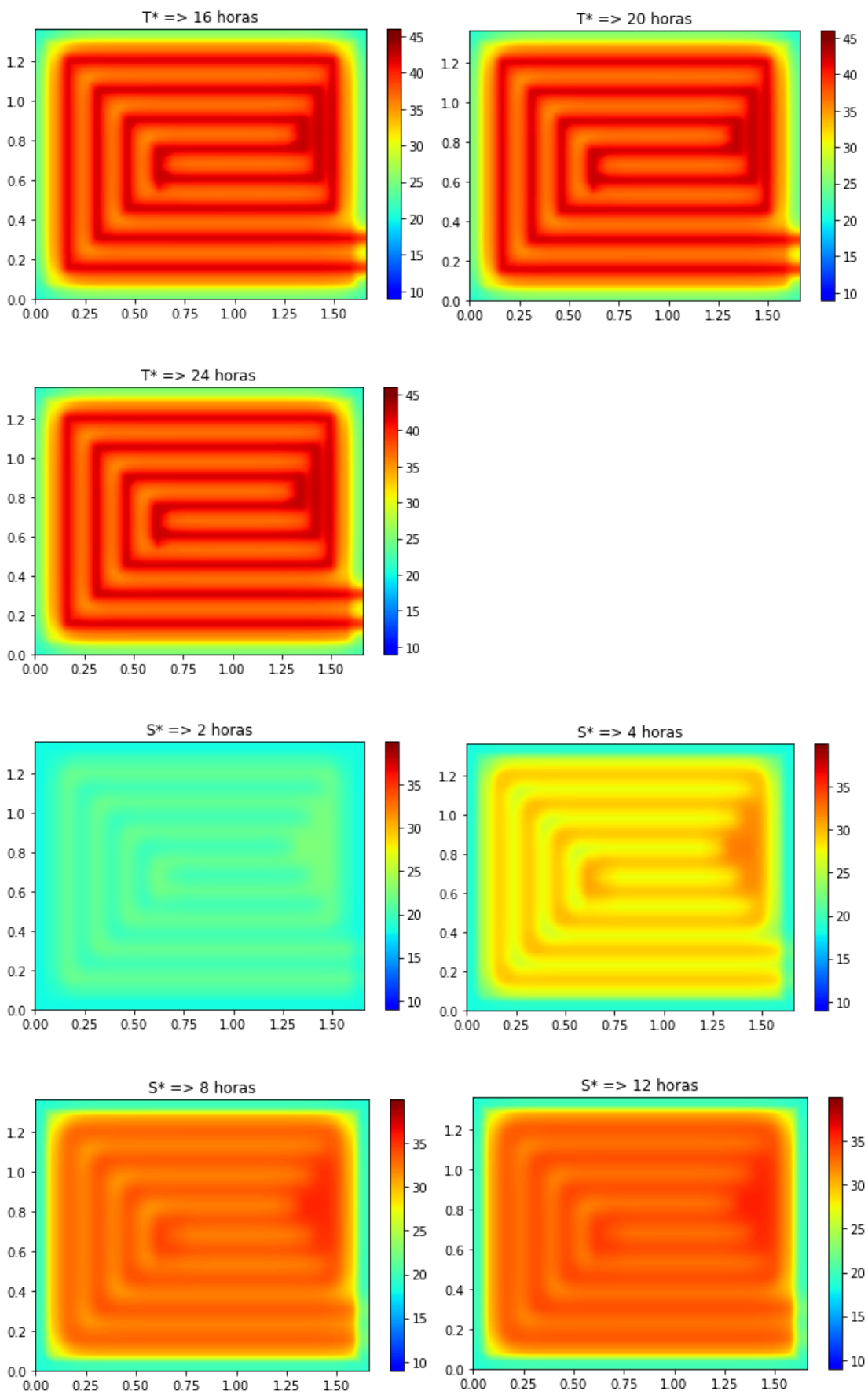


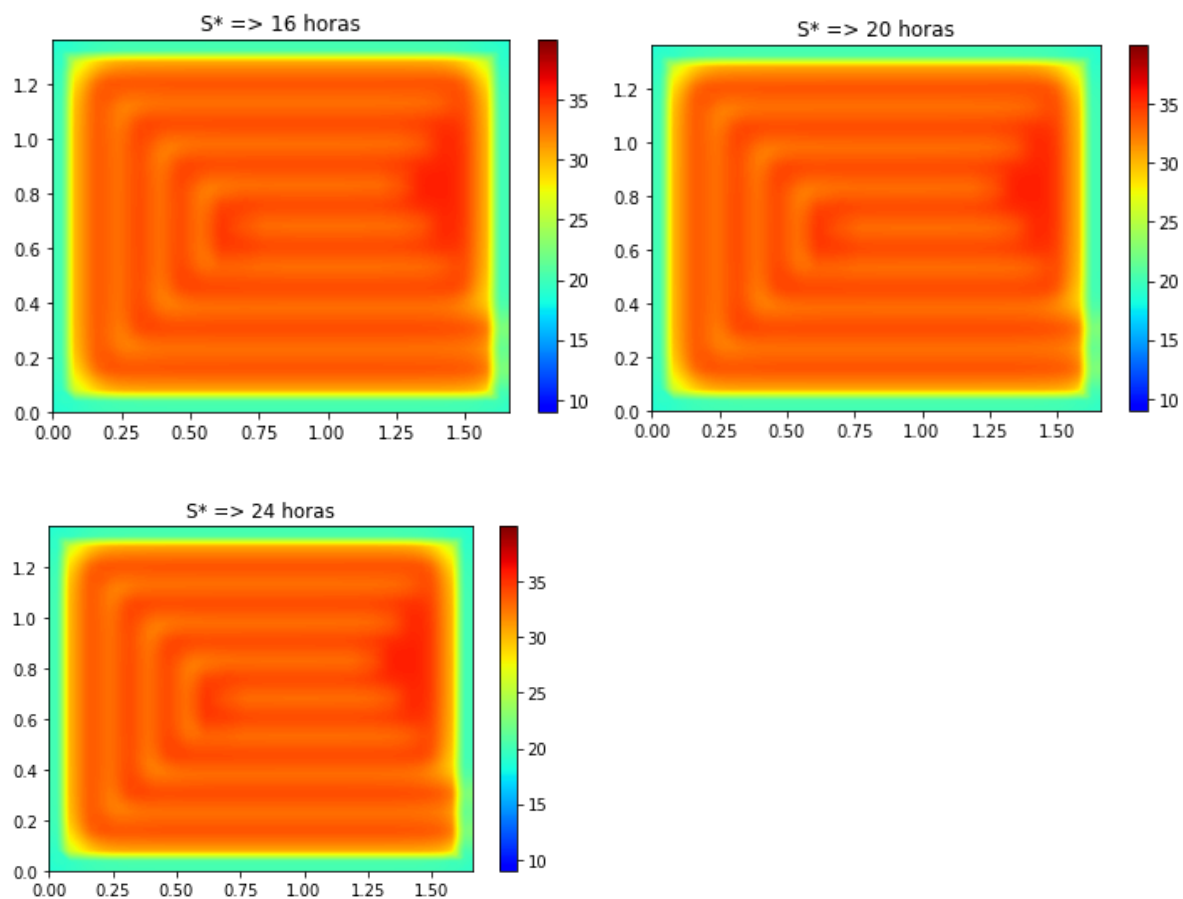




- Caso B

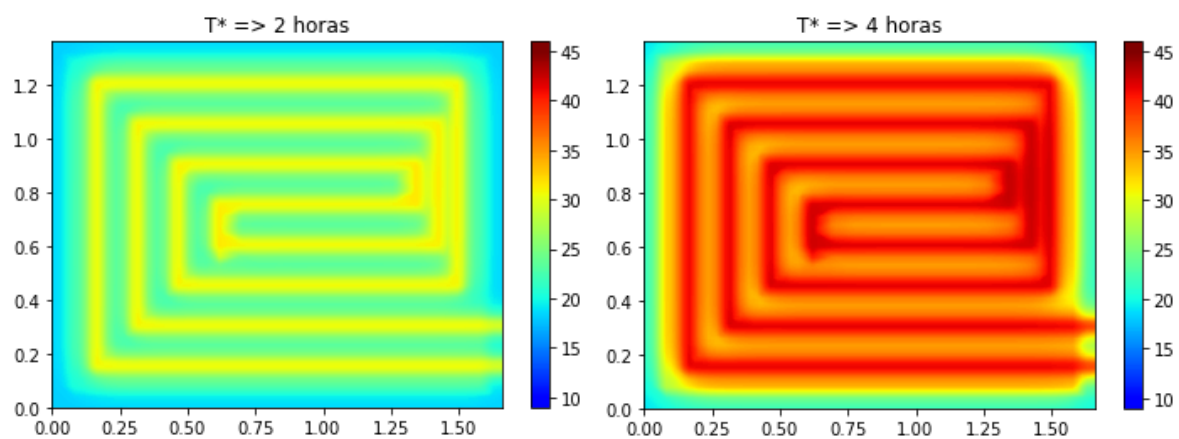


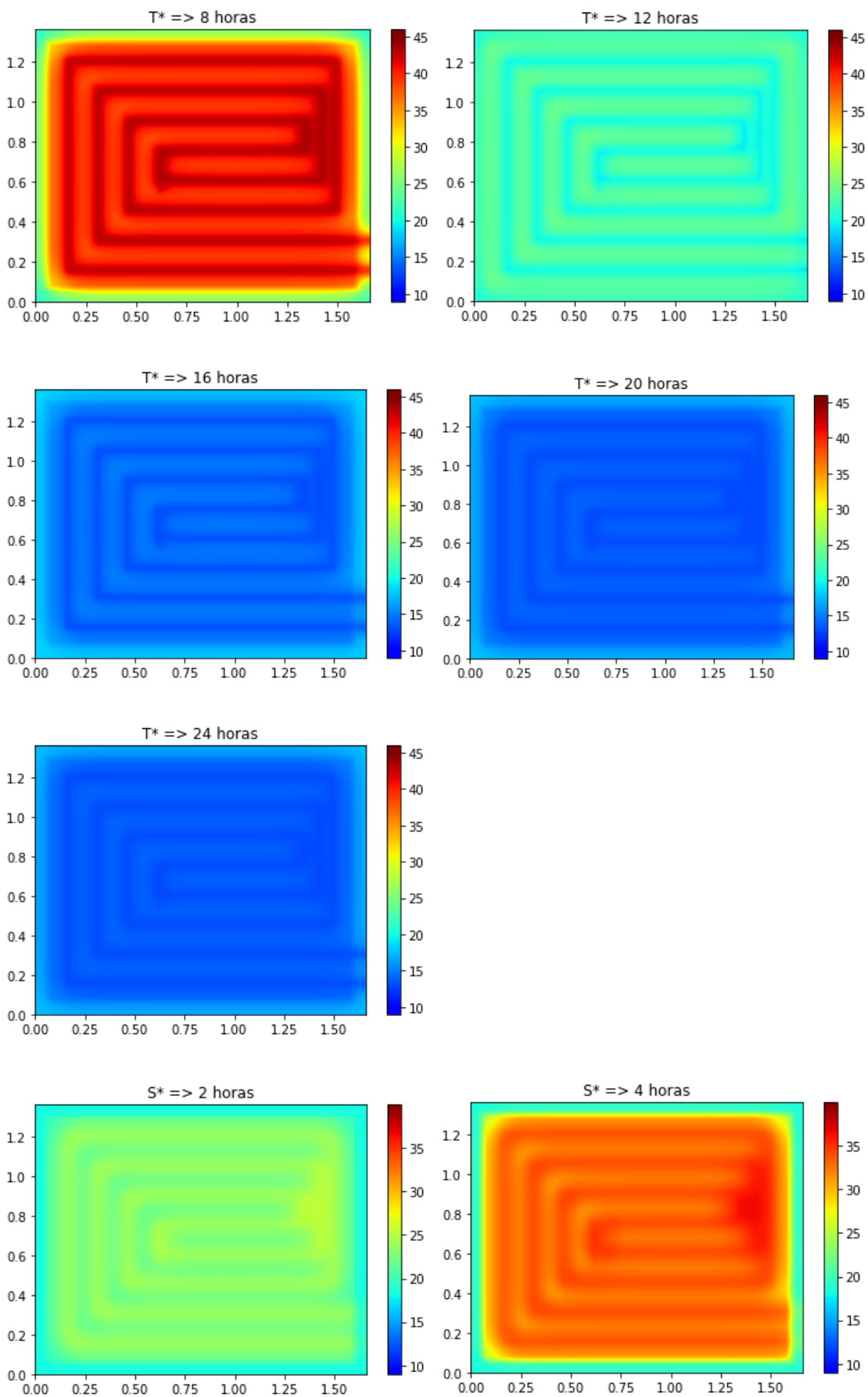


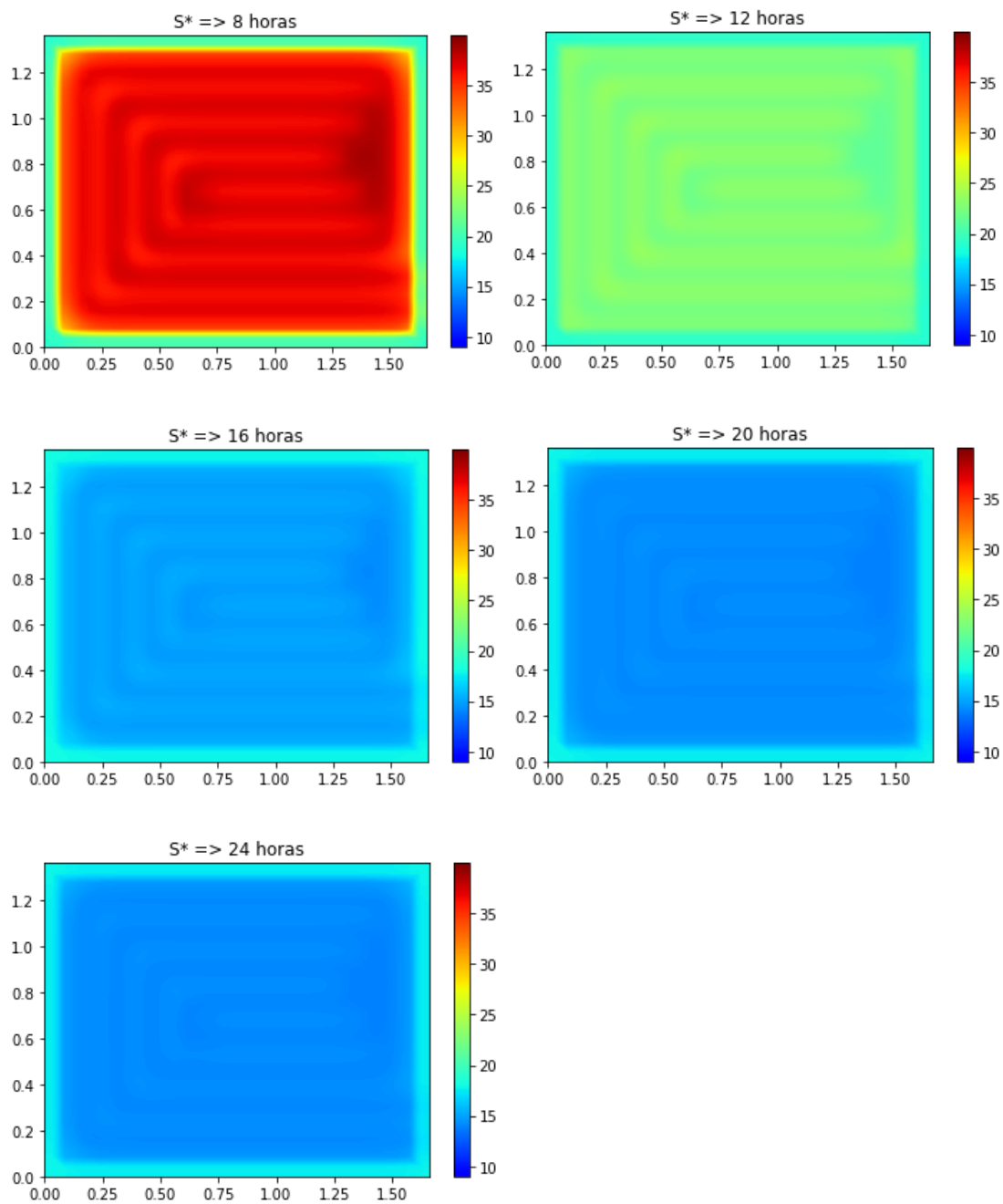


2. Betonilha otimizada

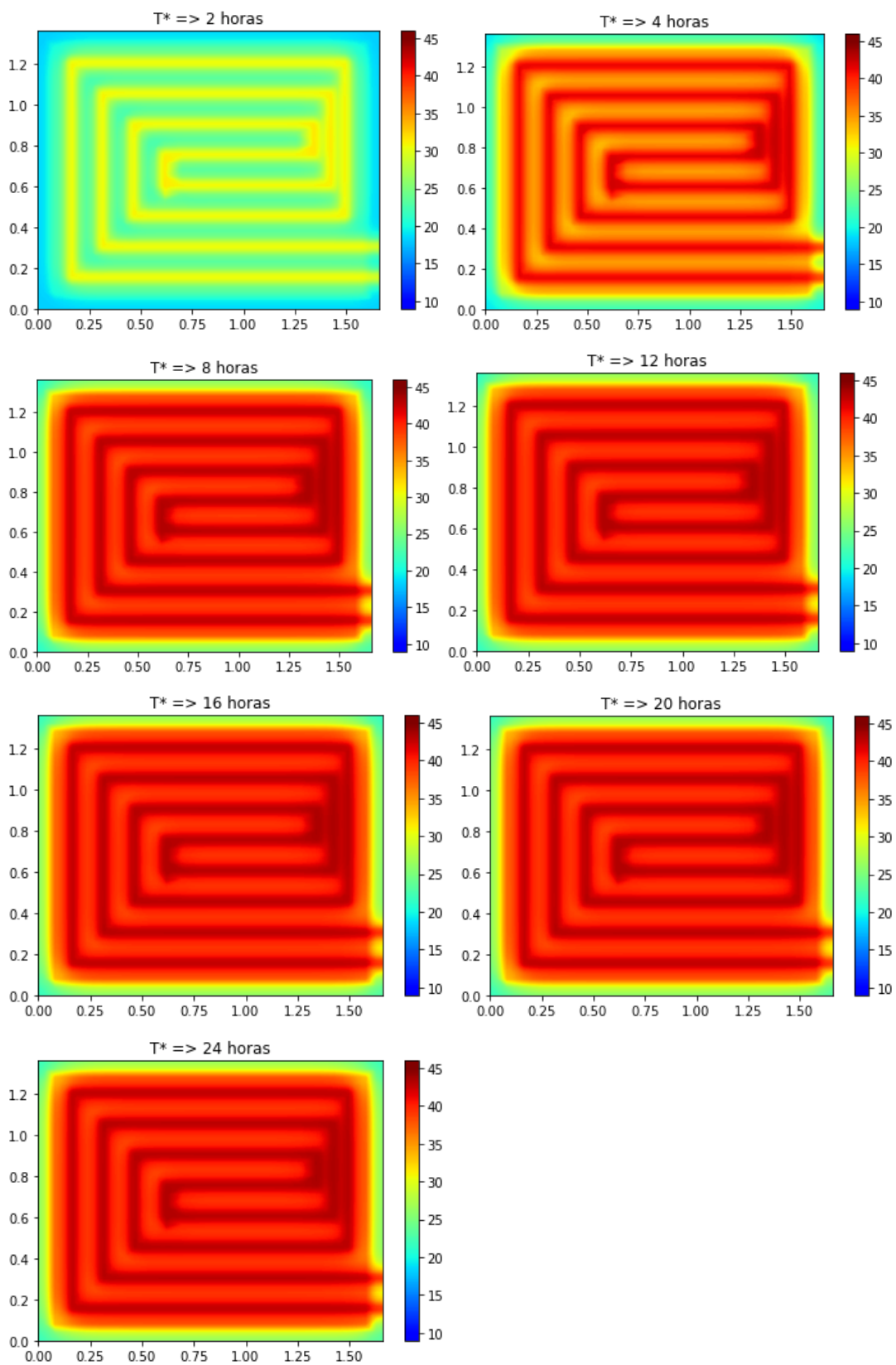
- Caso A

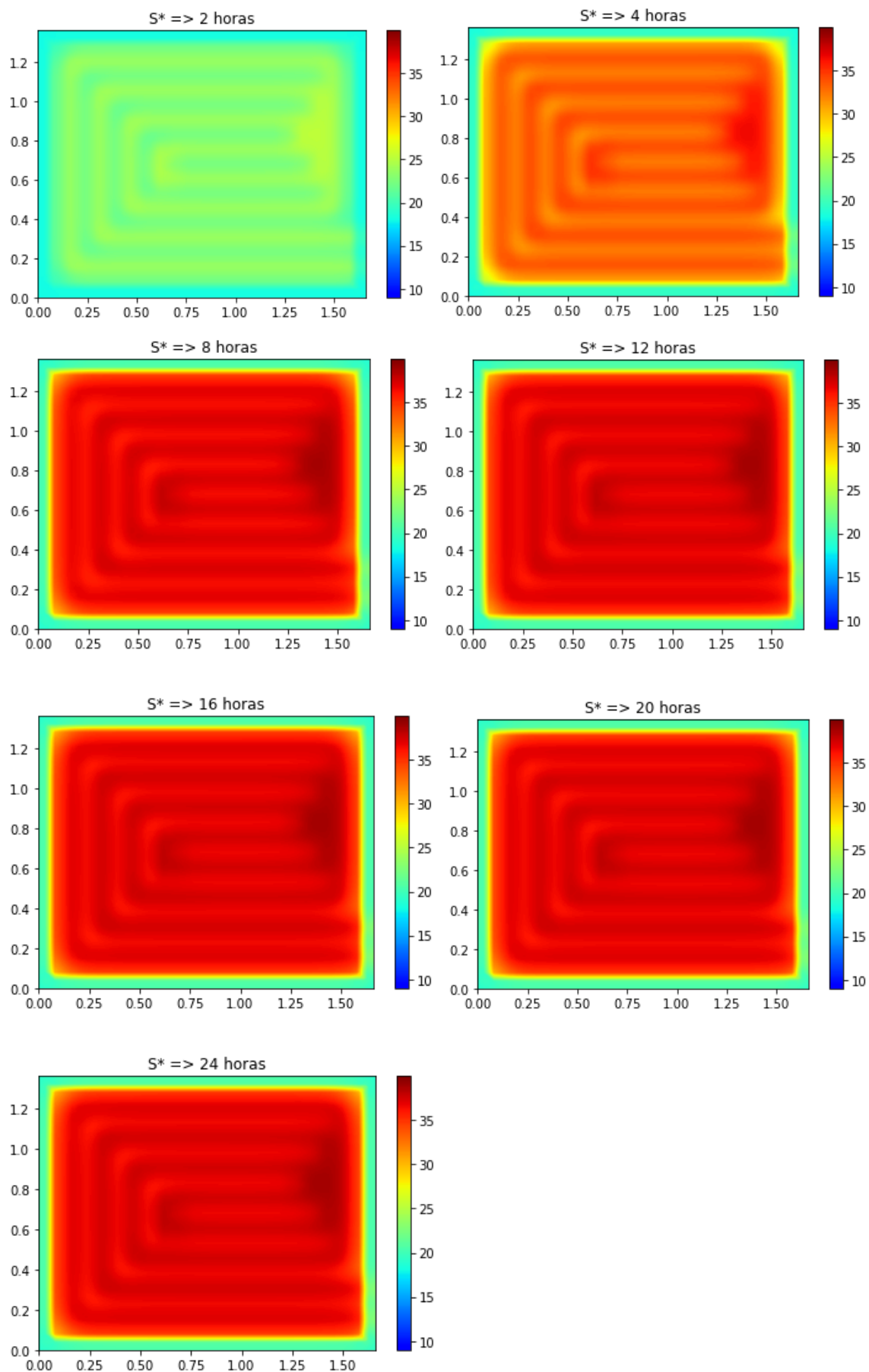






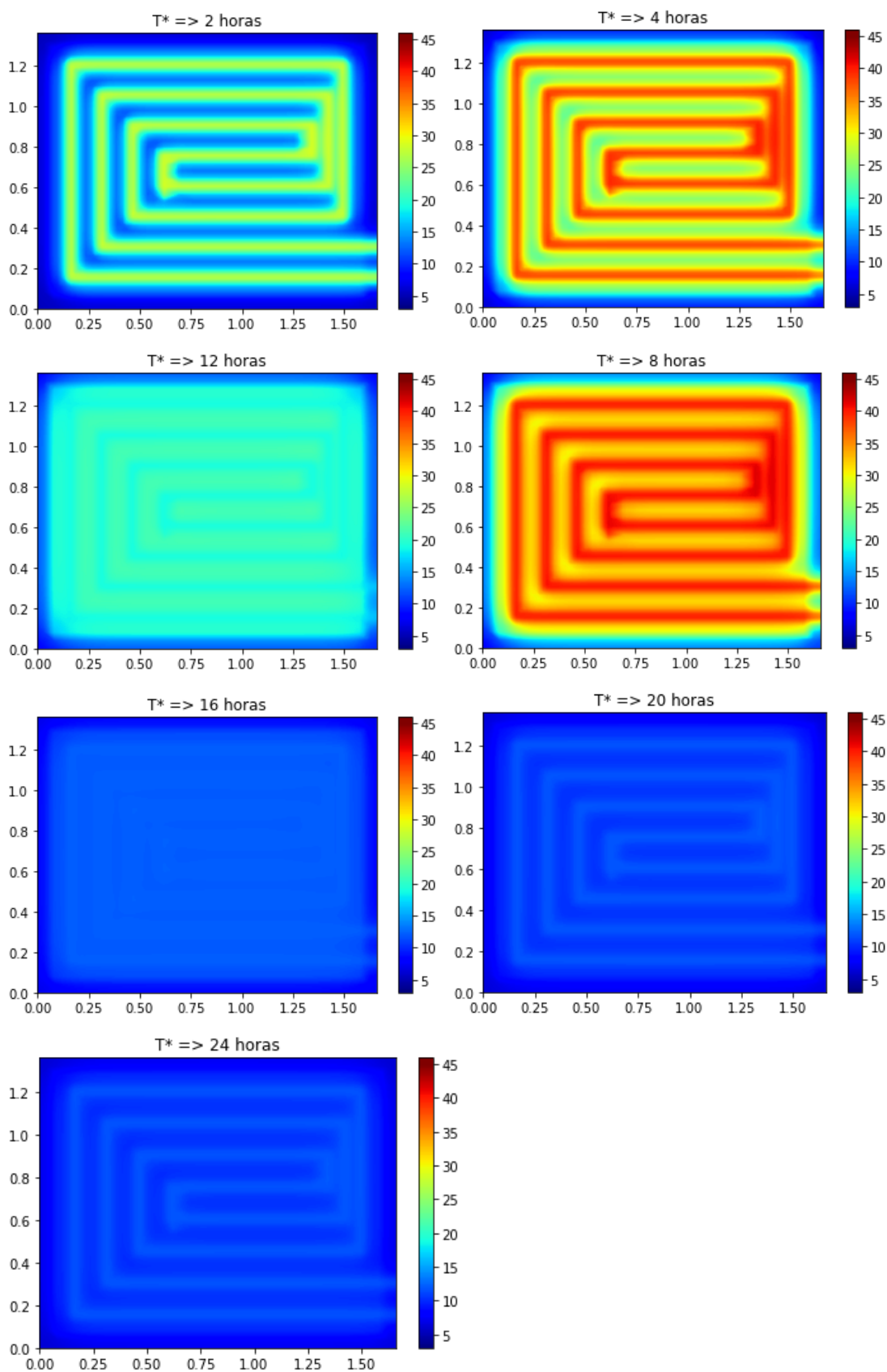
• Caso B

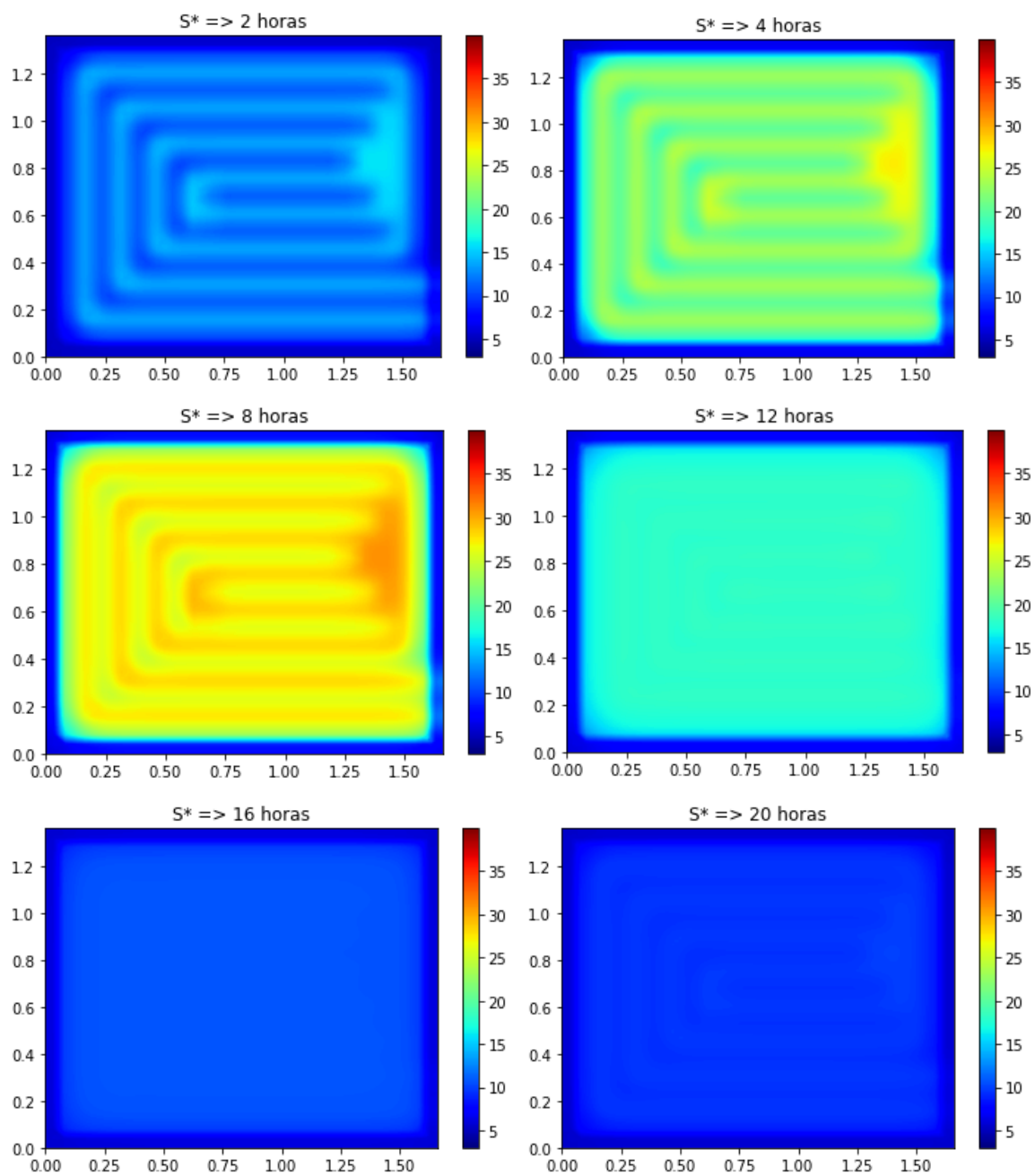


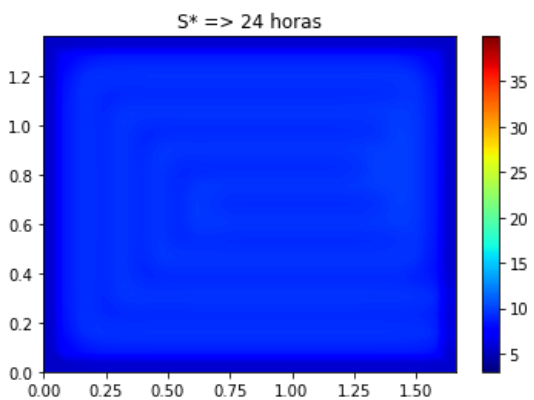


3. Temperatura do ar exterior = 5°C

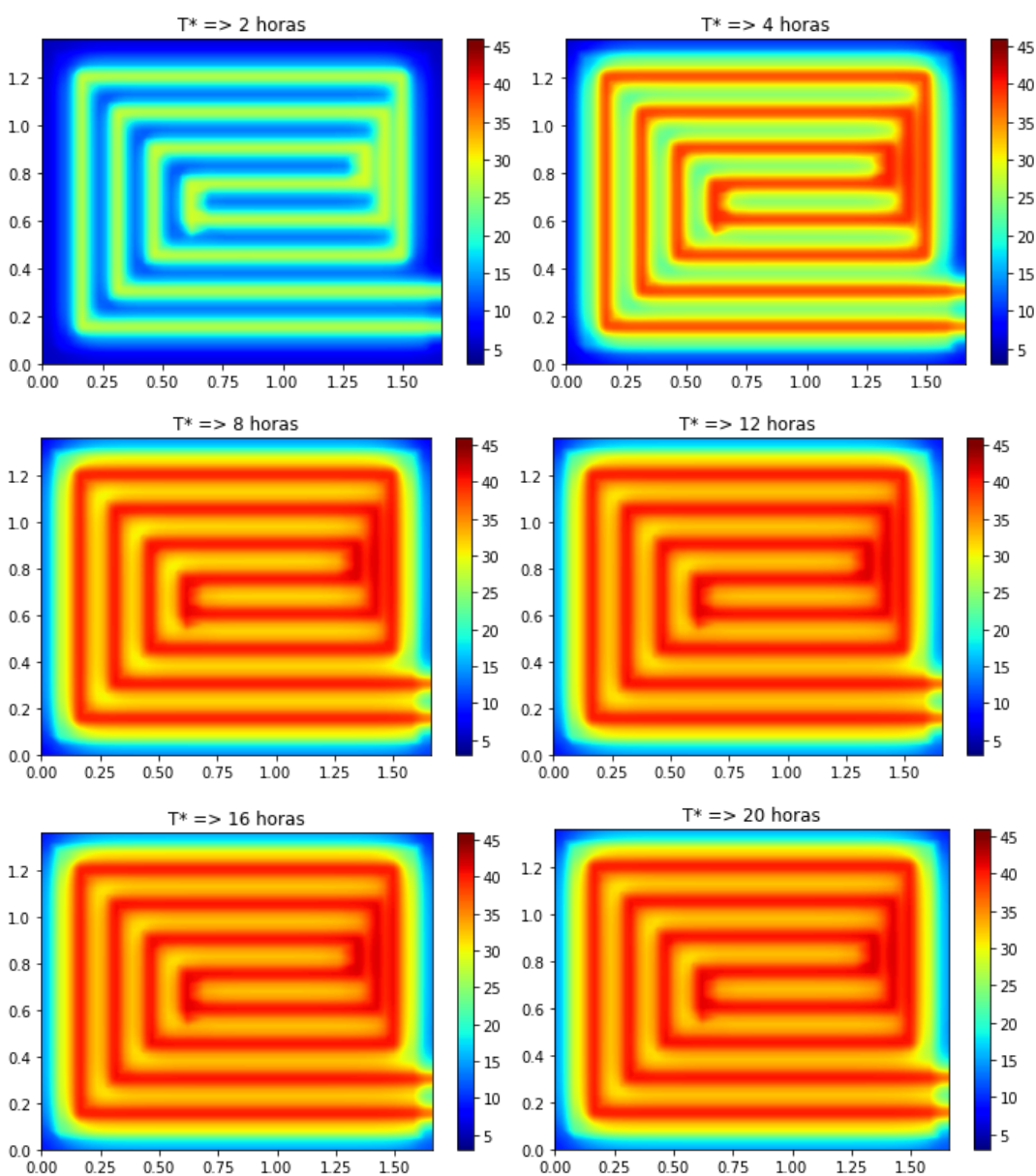
- Caso A

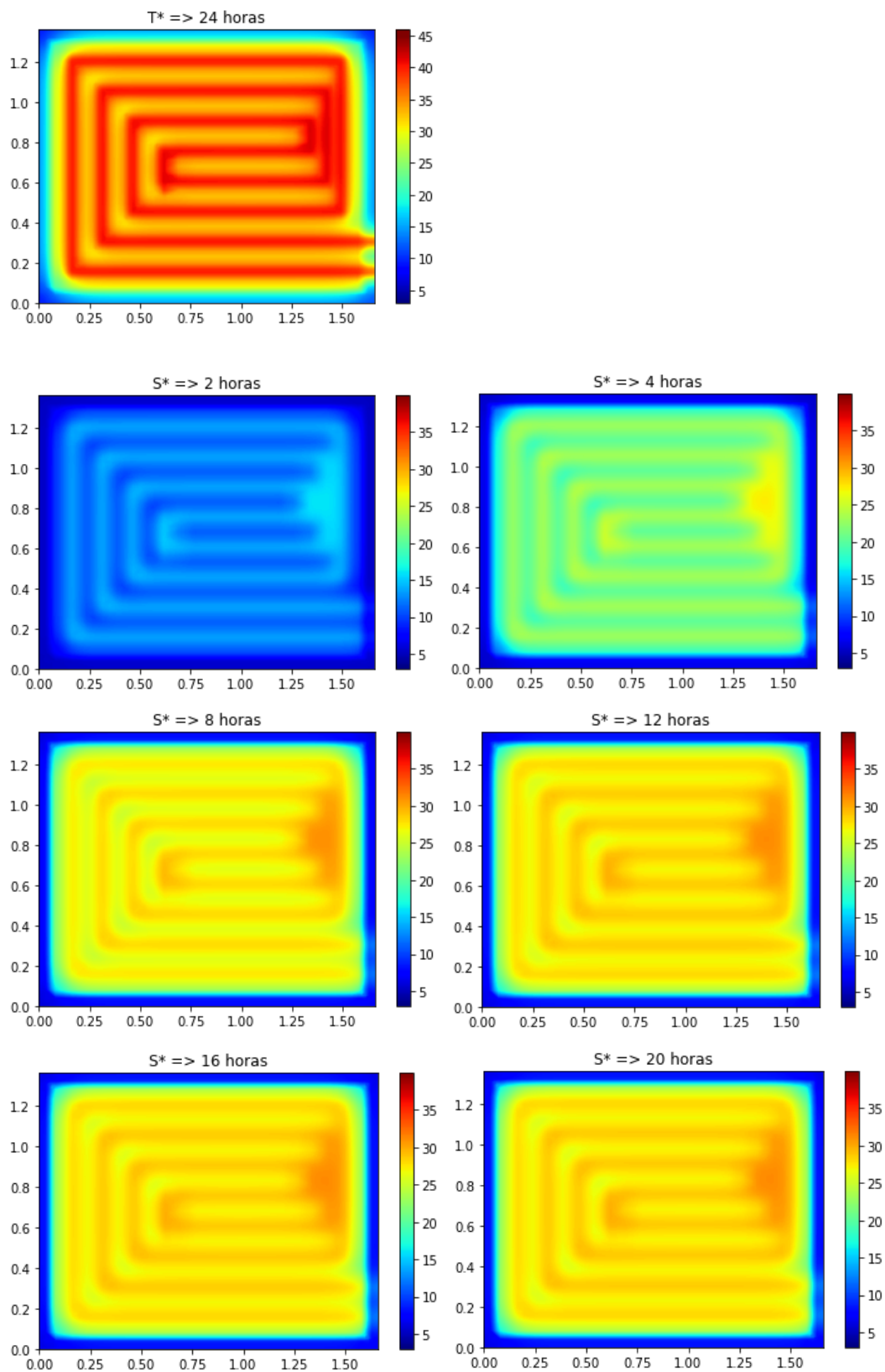


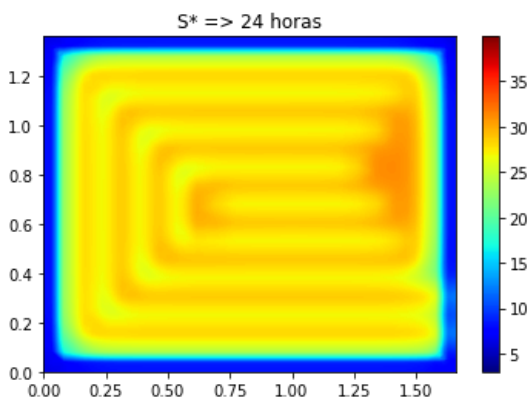




• Caso B

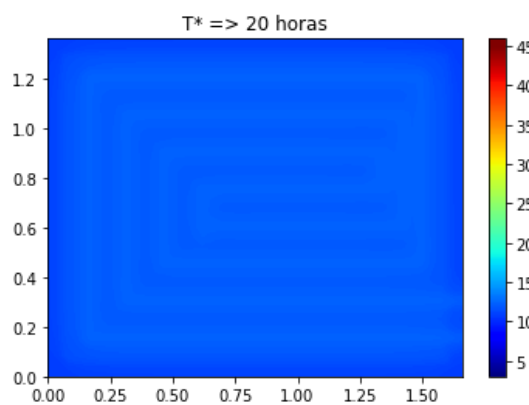
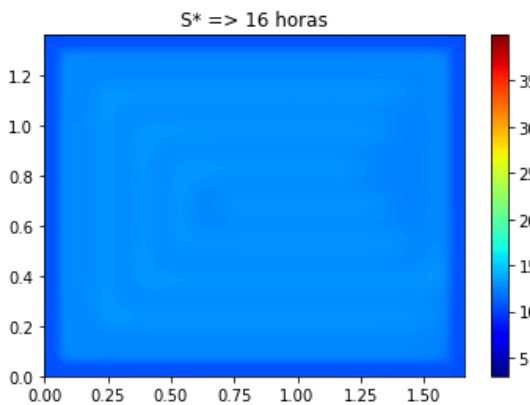
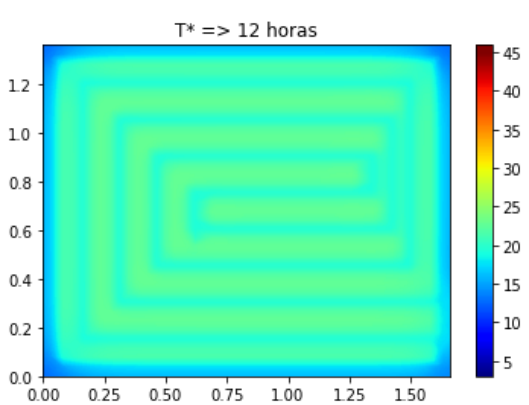
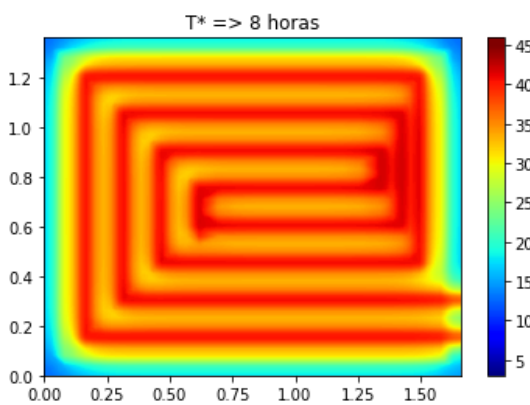
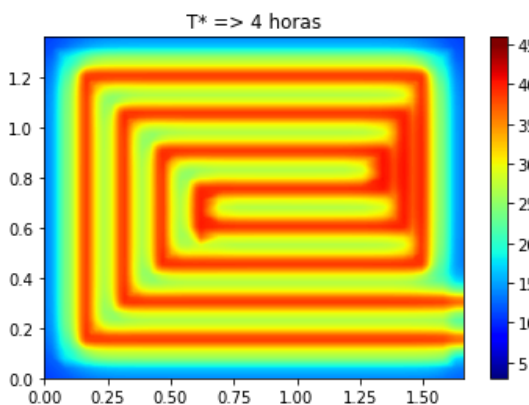
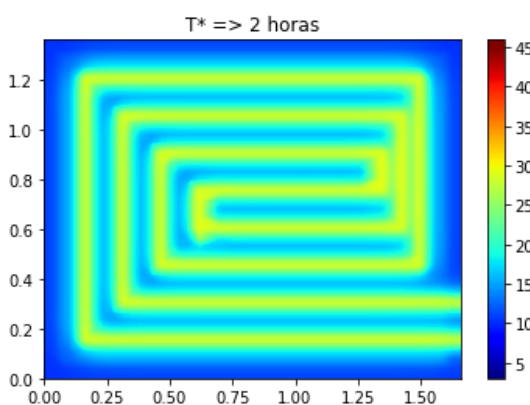


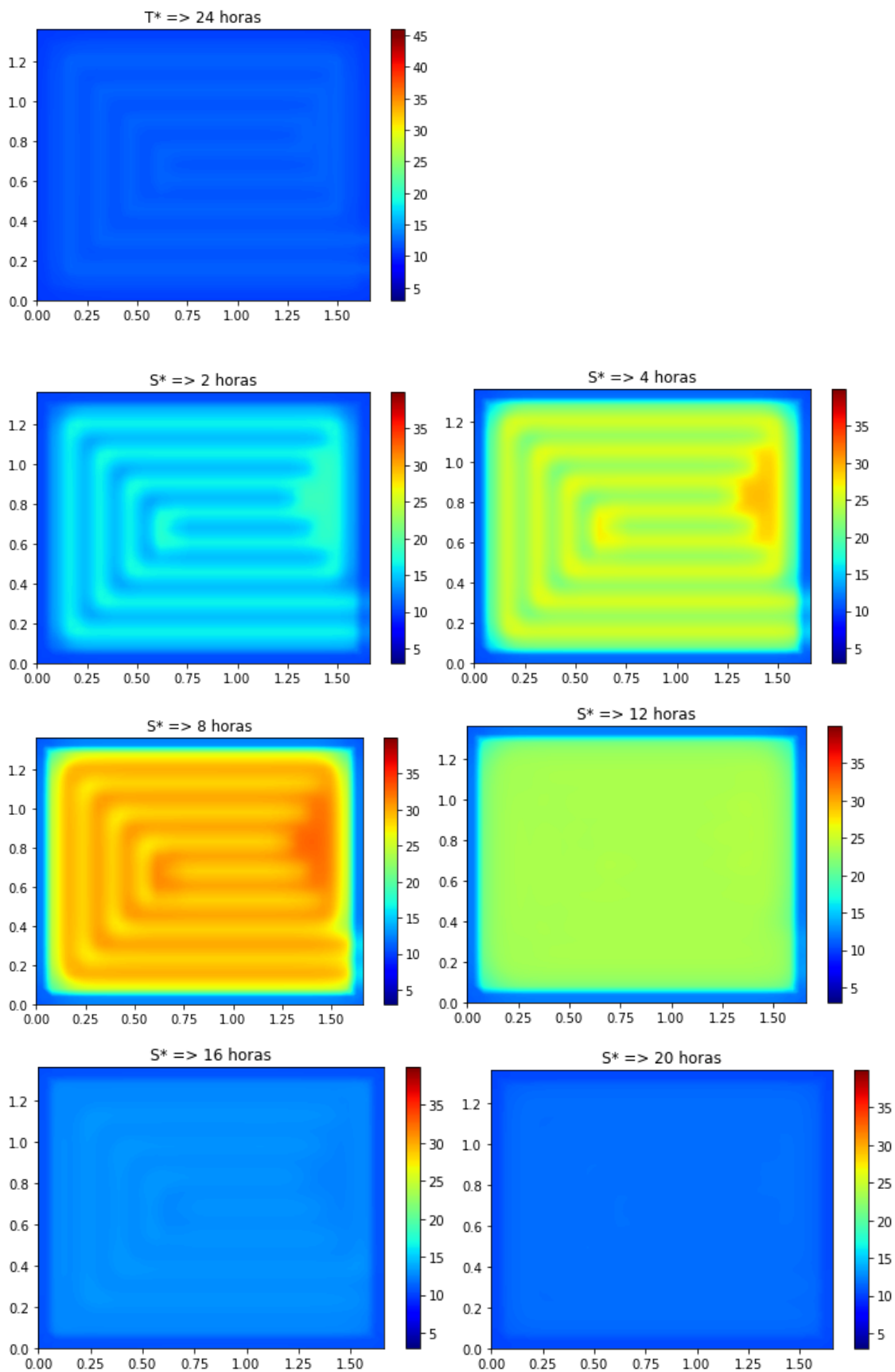


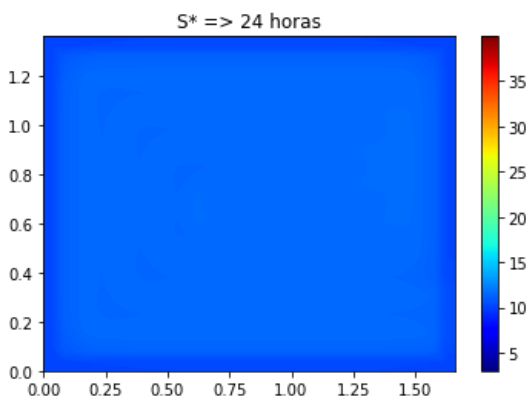


4. Temperatura do ar exterior = 10°C

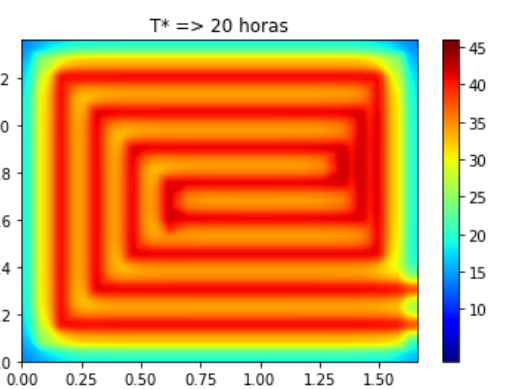
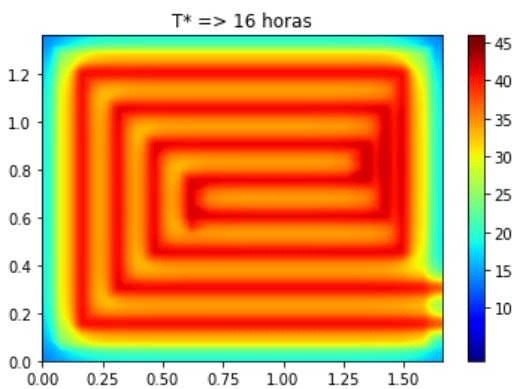
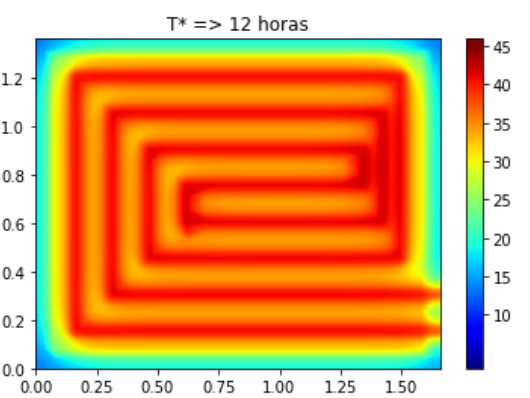
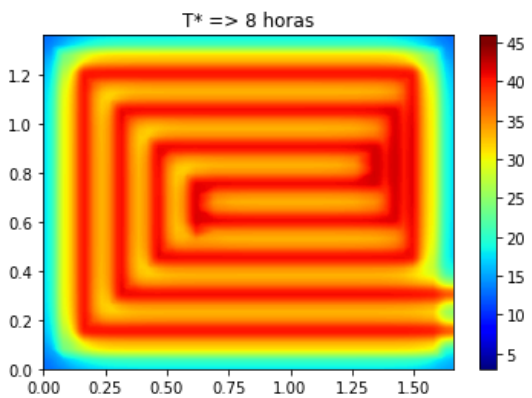
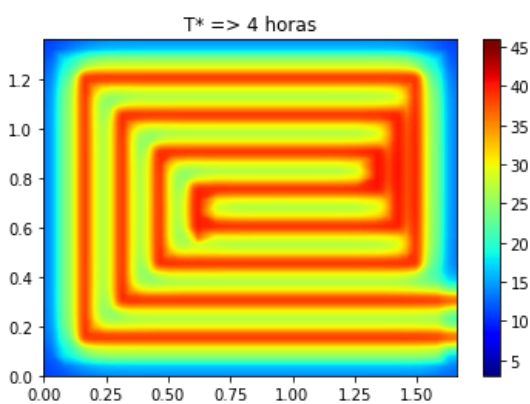
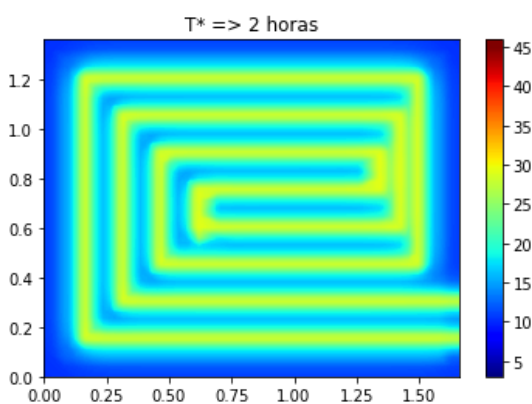
- Caso A

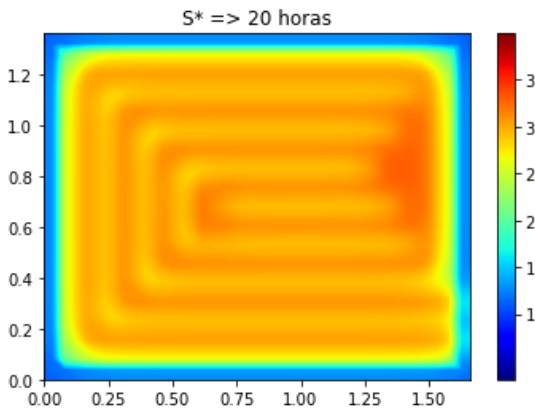
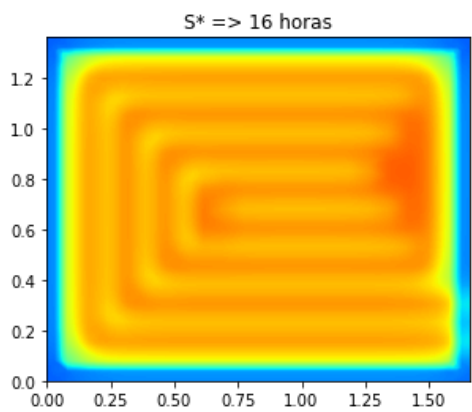
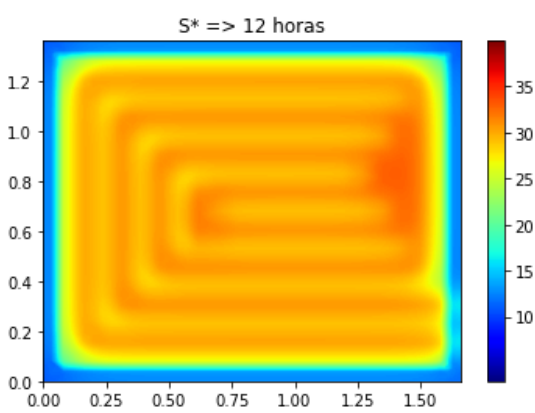
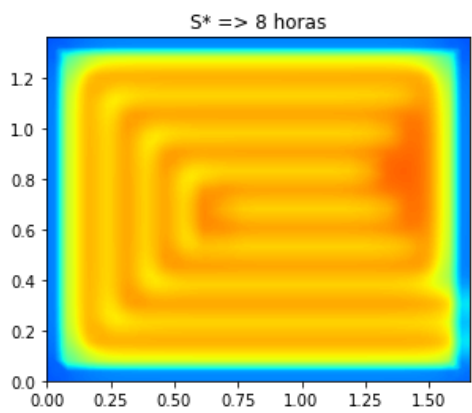
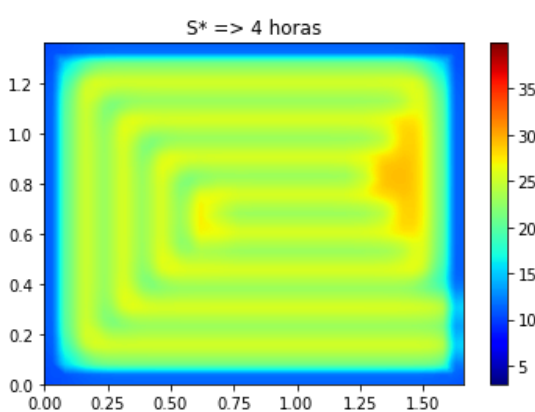
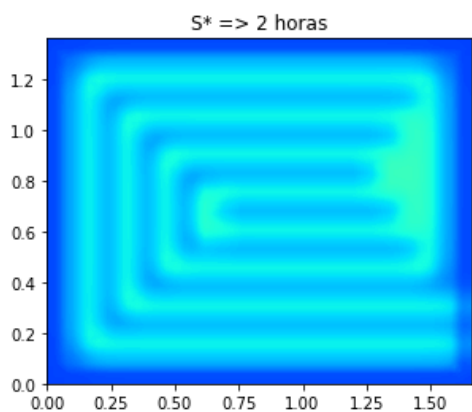
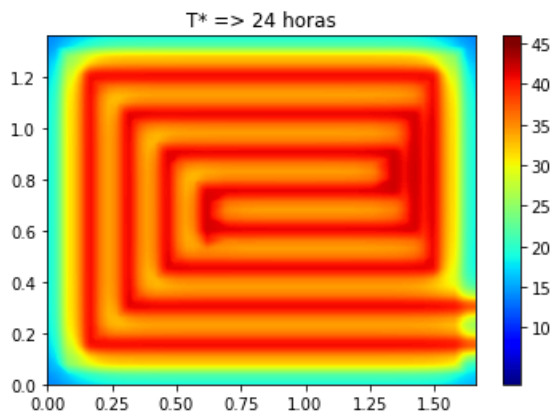


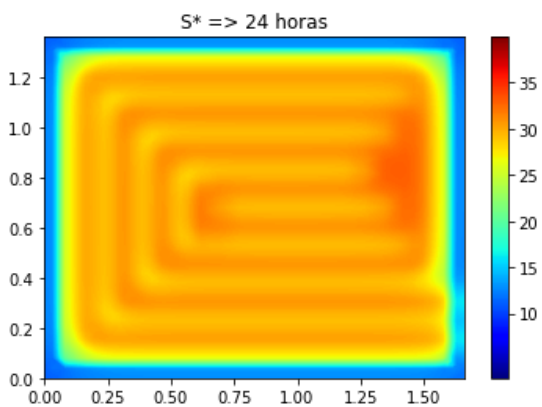




- Caso B

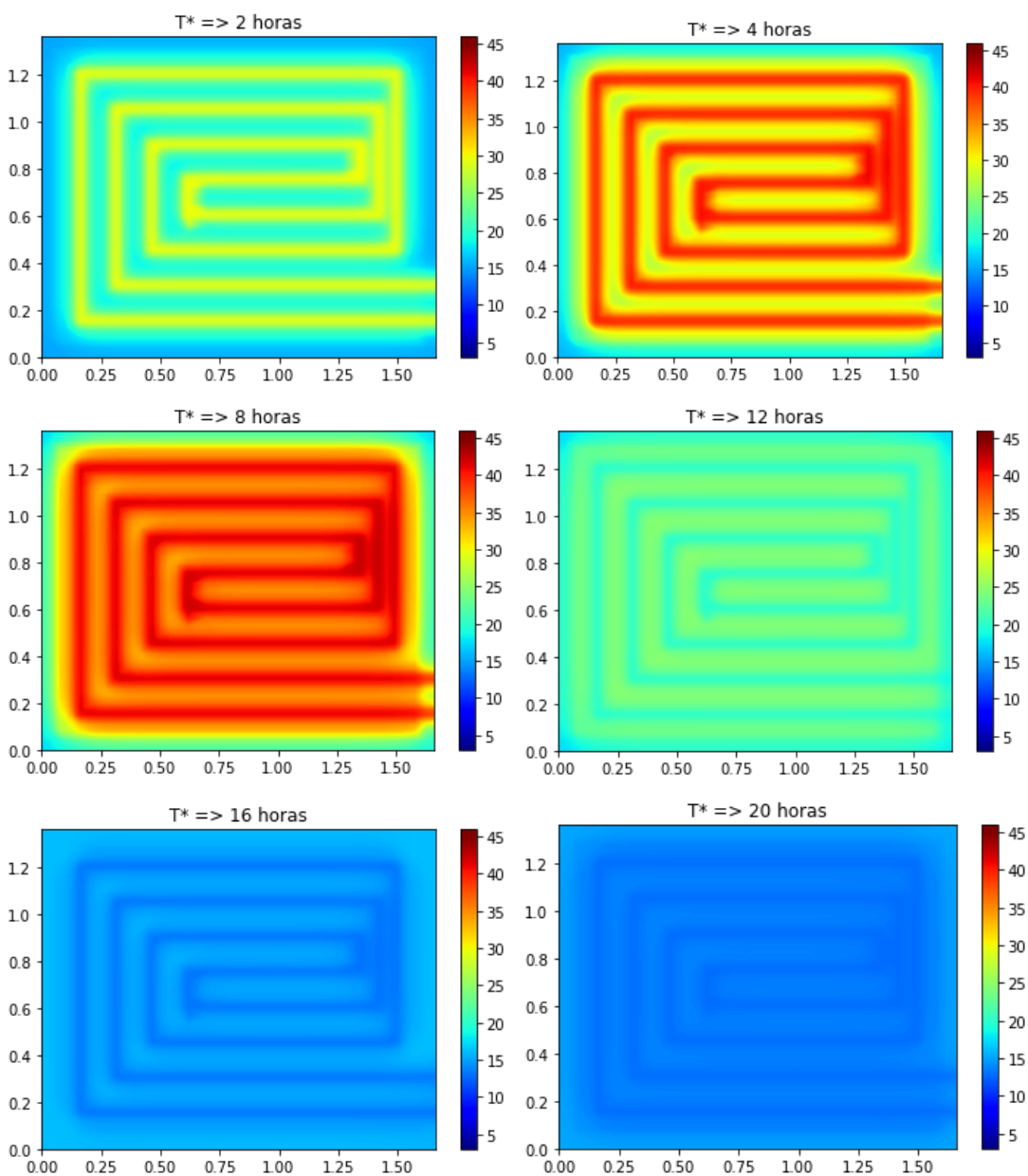


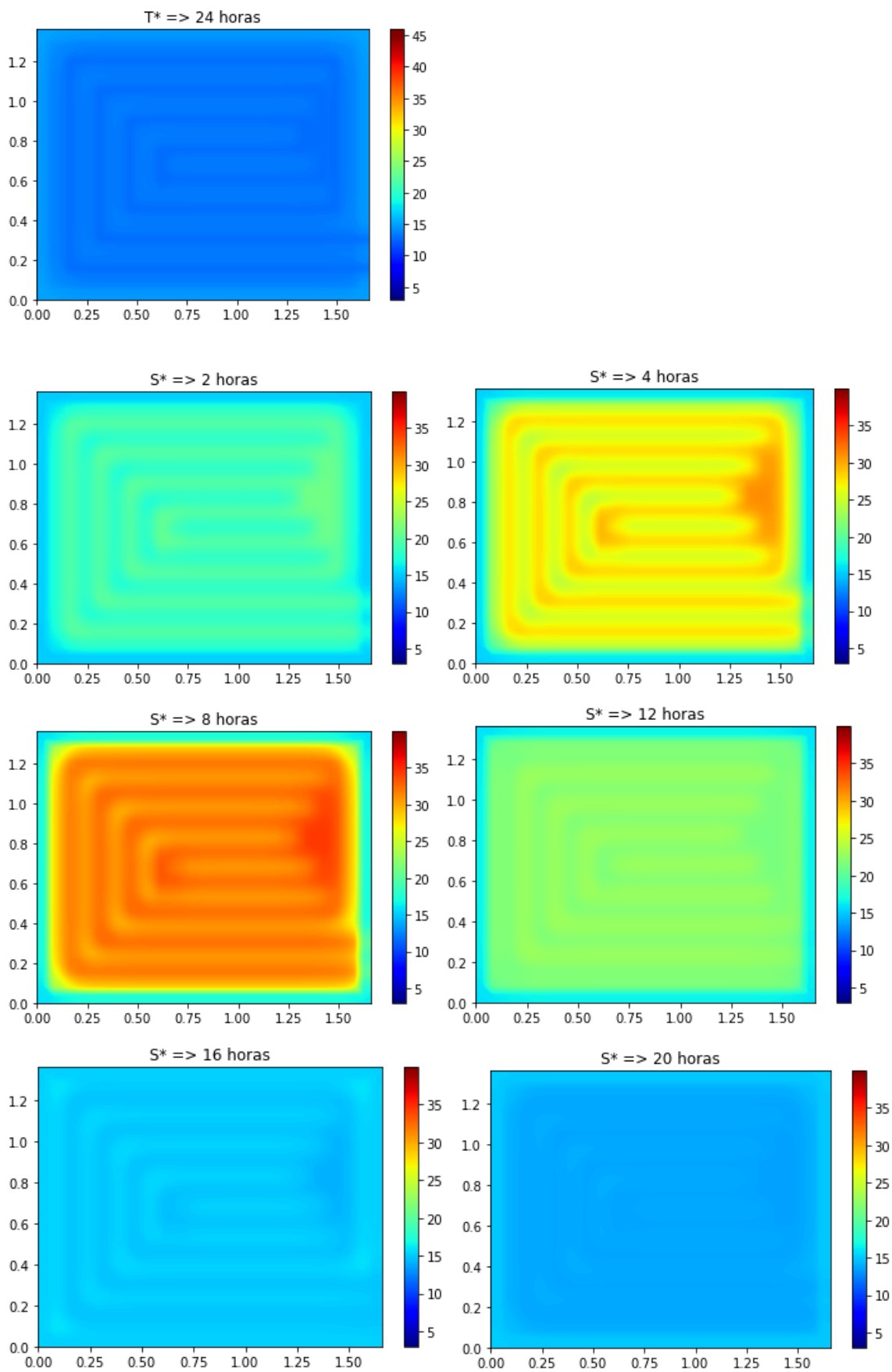


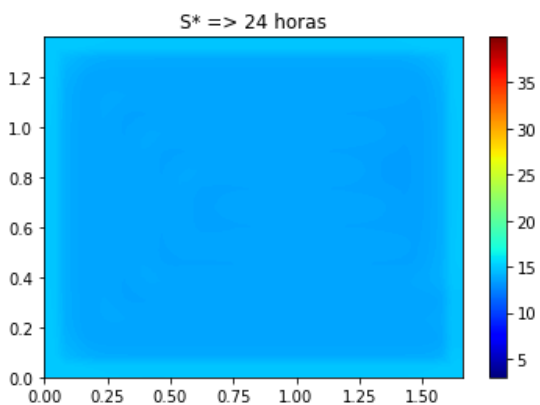


5. Temperatura do ar exterior = 15°C

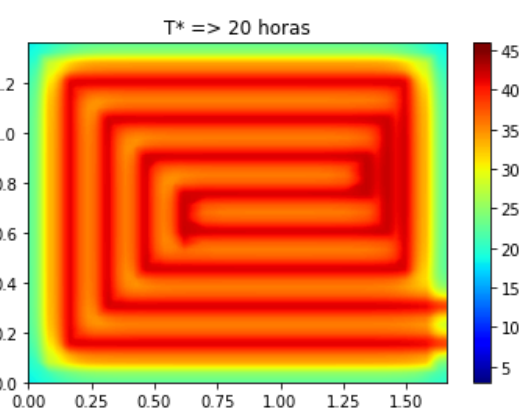
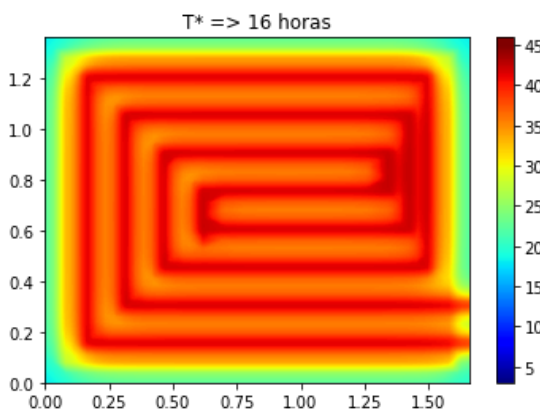
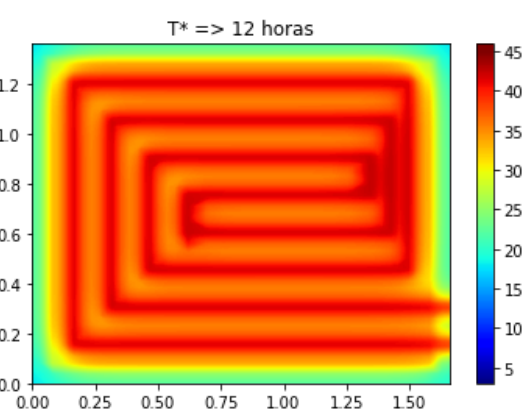
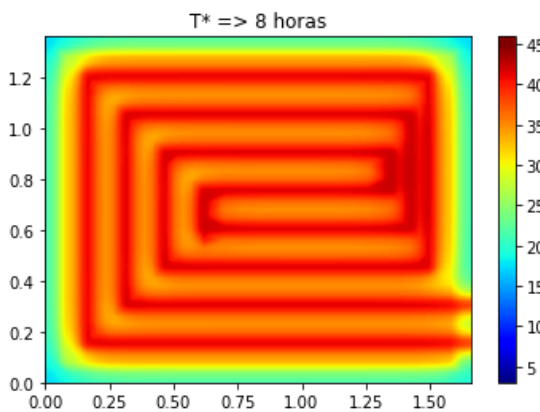
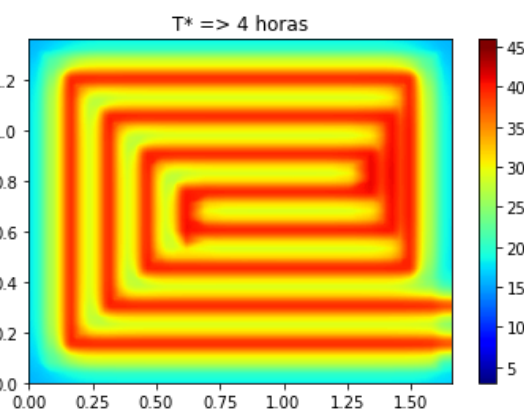
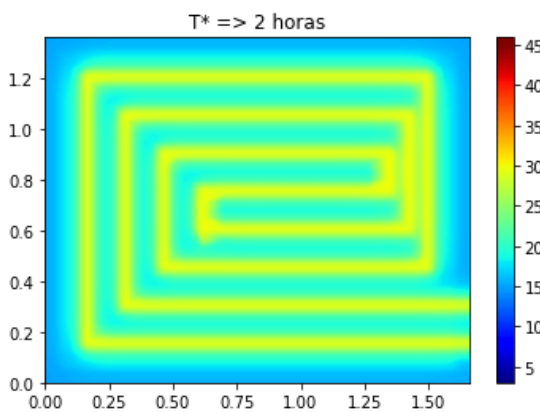
- Caso A

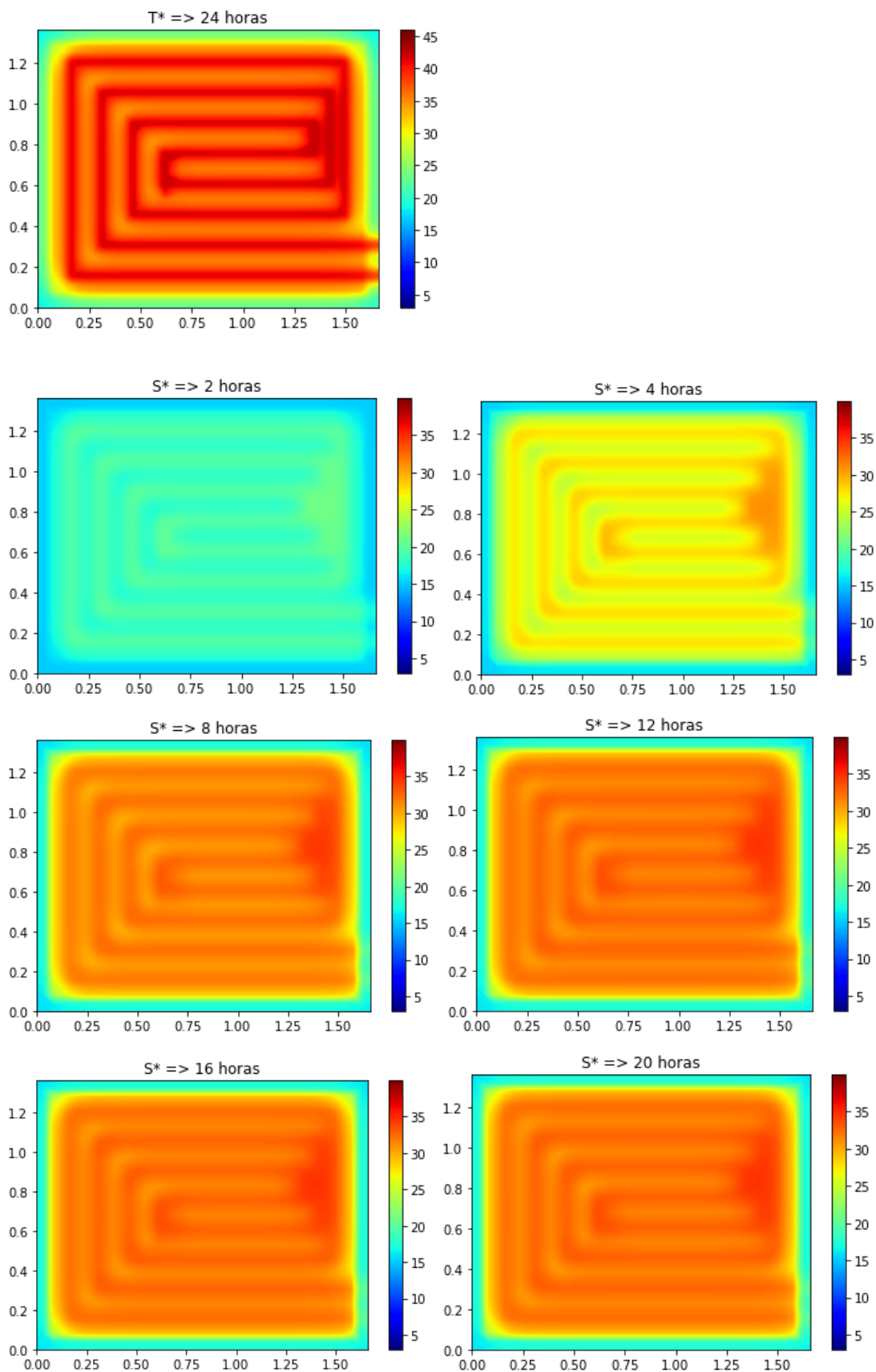


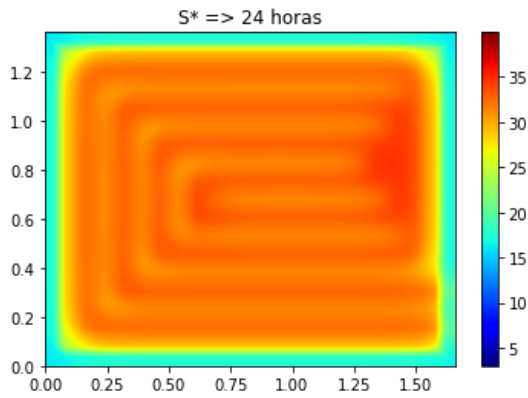




- Caso B

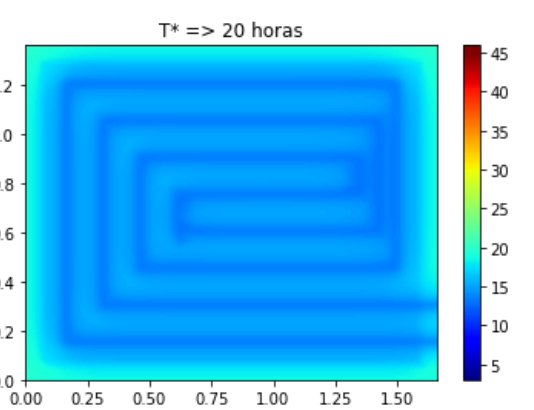
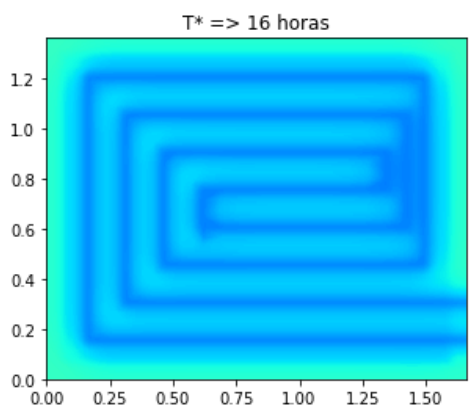
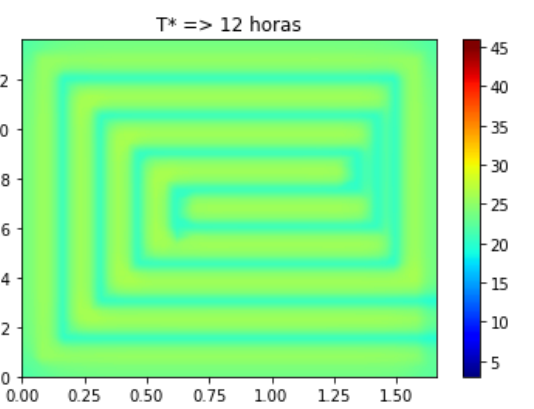
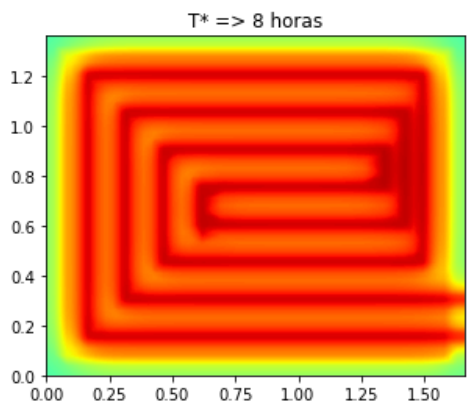
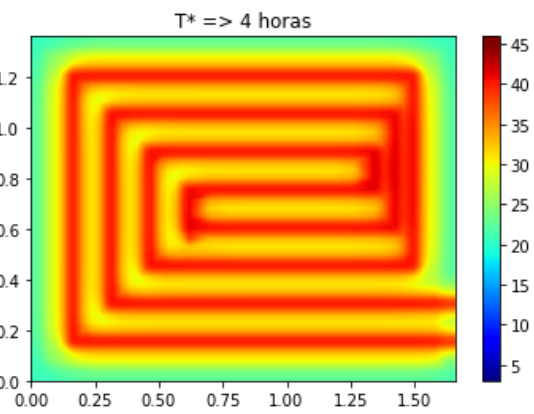
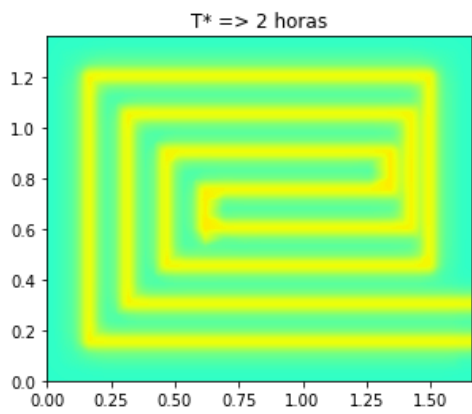


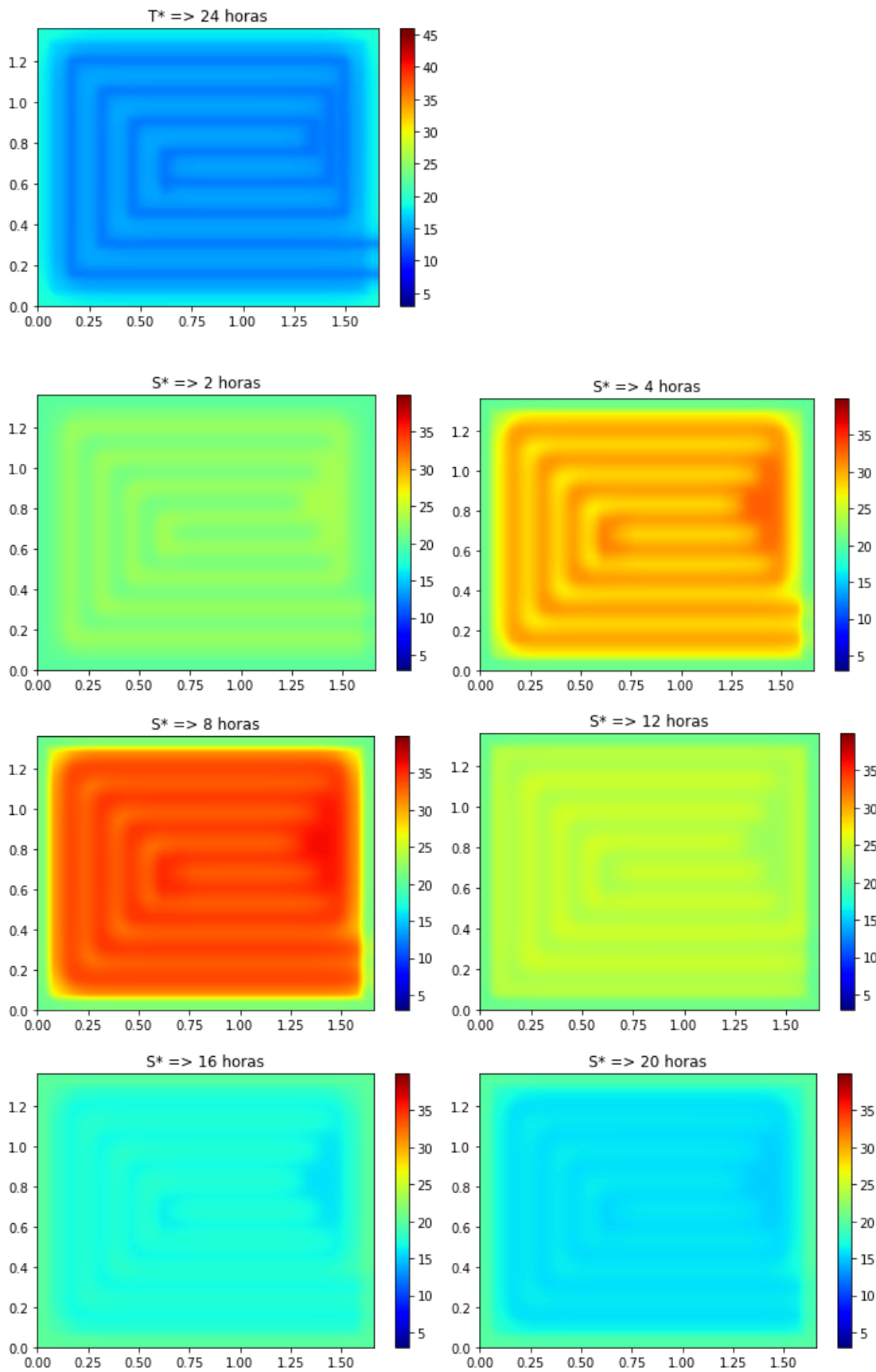


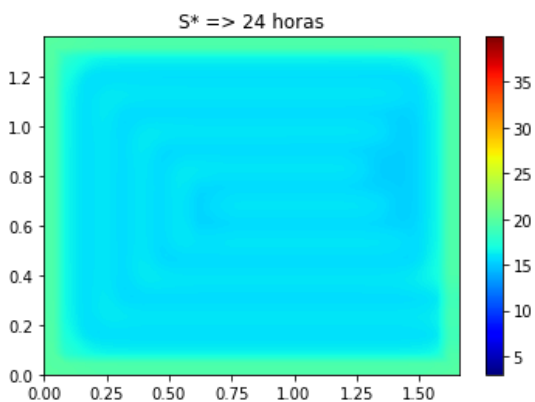


6. Temperatura do ar exterior = 20°C

- Caso A







- Caso B

