

**Contributo para o estudo de um patamar mínimo de inércia térmica
em edifícios em reabilitação**

Francisco Manuel Sequeira Rodrigues Ferreira Duarte

Dissertação do MIEM

Orientador: Prof. Eduardo Oliveira Fernandes

Co-Orientador: Pedro Correia da Silva



FEUP

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Março 2013

À Maria Adelaide dos Prazeres, avó Lai

Resumo

Em climas com grande amplitude térmica, a utilização adequada da inércia térmica na envolvente dos edifícios, permite atenuar o impacto da variabilidade do clima na temperatura operativa interior de um edifício. A inércia térmica tem o potencial de contribuir activamente para a redução da amplitude térmica do ambiente interior e mesmo para a redução do uso de energia para aquecimento e arrefecimento.

O principal objectivo deste trabalho é a definição de patamares mínimos de inércia térmica em edifícios residenciais de forma a garantir condições de conforto térmico para os seus ocupantes durante a estação de aquecimento. Para tal, foram utilizadas duas ferramentas de modelação térmica distintas: o software ANSYS Thermal para analisar a distribuição de temperatura numa parede ou parte de uma parede sujeita à incidência de radiação solar, encontrando-se isolada nas restantes cinco faces; considerou-se o software de simulação térmica de edifícios EnergyPlus para avaliar o impacto da inércia térmica na(s) superfície(s) de contorno interior (paredes no todo ou em parte, pavimento e tecto) na temperatura operativa de um espaço de um edifício residencial localizado no Porto, durante a estação de aquecimento.

A modelação do comportamento térmico de uma parede permitiu comparar soluções construtivas massivas com soluções utilizadas em reabilitação utilizando materiais leves (e.g. gesso cartonado). No caso em que incide uma radiação solar de 100W/m^2 durante uma hora, a libertação da radiação solar absorvida pela parede massiva é feita durante um período de cerca de 12 a 24h enquanto que na parede reabilitada este período é de 3 a 6h.

Os resultados obtidos na simulação do comportamento térmico de um espaço permitem concluir que a amplitude da temperatura operativa interior é reduzida de forma mais significativa através do aumento da área dos elementos “massivos” da envolvente do que através do aumento da espessura ou da massa volúmica do material de construção da envolvente.

A variação da massa térmica mostra que a influência da inércia térmica tem maior efeito no comportamento térmico interior para superfícies que recebem radiação solar directa, podendo resultar numa amplitude térmica diária até 2°C inferior, quando comparada com uma superfície equivalente sem radiação solar incidente.

A Contribute to the study of a minimum level of thermal inertia in rehabilitation buildings

Abstract

In climates with high thermal variance, the correct use of thermal inertia in the enveloping of buildings mitigates the impact of climate variability in its thermal indoor behavior. In addition, thermal inertia has the potential to actively contribute to the reduction of the indoor thermal amplitude, and also to the reduction of the energy consumption for heating or cooling purposes.

The main objective of this work is to define minimum levels of thermal inertia in housing, so as to ensure thermal comfort for the occupants during the heating season. With that purpose, two calculations tools were used: ANSYS Transient Thermal to the study the temperature of a single wall as a result of incident solar radiation; EnergyPlus was used to evaluate the impact of the thermal inertia of the inner surroundings (in all the envelope or in single walls, such as the ceiling) in the operative temperature of a residential area located in Oporto, throughout the heating season.

The study of the thermal behavior of a single wall managed to compare massive constructions with rehabilitation solutions with lightweight materials (e.g. plasterboard). In the case study of an incident solar radiation of $100\text{W}/\text{m}^2$ for one hour, the heat release to the environment in the massive wall is concluded in a period of 12 to 24 hours, while the release of the same total amount of heat in the wall with light rehabilitation materials is concluded in 3 to 6 hours.

The simulation results for the thermal behavior of a residential area allow concluding that the indoor amplitude of the operative temperature is more significantly reduced by the increase of the envelope elements massive area, compared to the reduction achieved by the increase of the thickness or the density of the construction materials used.

The variation of the thermal mass shows that thermal inertia has greater effect in the indoor thermal behavior for surfaces that receive direct radiation, which may result in a reduction in indoor thermal amplitude up to 2°C inferior, when compared to the impact of an equivalent surface without incident solar radiation.

Agradecimentos

Ao Professor Eduardo Oliveira Fernandes, orientador desta dissertação, pela dedicação, colaboração e entusiasmo demonstrado ao longo de todo o semestre.

Ao meu co-orientador, Pedro Correia da Silva, por toda a sua disponibilidade e orientação, sem a qual não seriam atingidos os resultados pretendidos.

À Mariana Abrunhosa pela sua ajuda e pela facilidade que concedeu na utilização do seu material bibliográfico.

Aos meus colegas e amigos Rui Teixeira e Ricardo Pascoal pelas numerosas e frutuosas discussões.

Aos meus pais e irmãos por todo o apoio, carinho e compreensão.

A todo o grupo do Desafio Único pelos momentos de descontração proporcionados.

A todas as outras pessoas e amigos que de alguma forma contribuíram para a realização deste relatório.

Índice de Conteúdos

Lista de Figuras	1
Lista de tabelas	7
1 Introdução	9
1.1 Enquadramento do tema.....	9
1.2 Estrutura do trabalho.....	10
2 Revisão bibliográfica	11
2.1 Conforto térmico.....	11
2.2 Sistemas solares passivos.....	12
2.3 Inércia térmica em edifícios.....	14
2.4 Reabilitação de edifícios residenciais.....	16
3 Modelação do comportamento térmico de uma parede isolada	17
3.1 Caracterização das envolventes	18
3.1.1 Parede de betão.....	18
3.1.2 Parede de Tijolo	19
3.1.3 Modelos de paredes reabilitadas	20
3.2 Condições de fronteira	21
3.3 Metodologia.....	22
3.4 Resultados	22
3.4.1 Temperatura das superfícies.....	22
3.4.1.1 Uma hora de radiação	23
3.4.1.2 Duas horas de radiação.....	24
3.4.2 Potência calorífica	24
3.4.3 Diagrama de temperaturas.....	26
3.4.4 Modelos de reabilitação	28
3.4.4.1 Temperatura da superfície interior	28
3.4.4.2 Potência calorífica.....	29
3.5 Resumo da análise da caracterização térmica de uma parede isolada	30
4 Análise da influência da inércia térmica no comportamento térmico de um espaço	31
4.1 Caracterização do clima.....	32
4.2 Caracterização do espaço.....	34
4.2.1 Geometria	34
4.2.2 Materiais utilizados.....	34
4.2.3 Estrutura da envolvente	35
4.2.4 Condições de fronteira e ganhos internos.....	36
4.3 Metodologia.....	37
4.4 Resultados	38
4.4.1 Orientação Sul	39
4.4.1.1 Resultados diários	39
4.4.1.1.1 Envolvente interior com inércia mínima.....	39
4.4.1.1.2 Envolvente interior com pavimento ou cobertura massivos.....	41
4.4.1.1.3 Envolvente interior com pavimento e cobertura massivos.....	44
4.4.1.1.4 Envolvente interior massiva.....	45

4.4.1.1.5	Comparação entre patamares	47
4.4.1.2	Resultados sazonais.....	48
4.4.2	Orientação Oeste	51
4.4.2.1	Resultados diários	51
4.4.2.1.1	Envolvente interior com inércia mínima.....	52
4.4.2.1.2	Envolvente interior com pavimento ou cobertura.....	54
4.4.2.1.3	Comparação entre patamares	56
4.4.2.2	Resultados sazonais – Estação de aquecimento	57
4.4.3	Orientação Norte	59
4.4.3.1	Resultados diários	59
4.4.3.1.1	Envolvente interior com inércia mínima.....	60
4.4.3.1.2	Envolvente interior com pavimento massivo.....	61
4.4.3.1.3	Comparação entre patamares	62
4.4.3.2	Resultados sazonais.....	63
4.4.4	Orientação Este	66
4.4.4.1	Resultados diários	66
4.4.4.1.1	Envolvente interior de inércia mínima.....	67
4.4.4.1.2	Envolvente interior com pavimento ou cobertura massivas.....	68
4.4.4.2	Resultados sazonais.....	70
4.5	Comparação de resultados entre orientações.....	71
4.6	Discussão de resultados	73
4.6.1	Resumo dos principais resultados	73
4.6.2	Definição do patamar mínimo de inércia térmica	74
5	Conclusões.....	79
5.1	Comportamento térmico de uma parede isolada	79
5.2	Influência da inércia térmica no comportamento de um espaço	79
5.3	Patamares mínimos de inércia térmica	80
5.4	Sugestões para trabalhos futuros	81
6	Referências e Bibliografia	83

Lista de Figuras

Figura 1 – Comparação entre o modelo de conforto de Fanger e o modelo de conforto adaptativo.

Figura 2 - Representação de um ganho indirecto, [Gonçalves 1986].

Figura 3 - Representação de um ganho directo. [Gonçalves 1986].

Figura 4 - Exemplo de um sistema de ganho directo, escola de S.george-Wallasey, Inglaterra. [<http://magoonconcretestudy.wordpress.com> 2011].

Figura 5 - Representação em corte, e fachada principal da Casa Termicamente Optimizada [Fernandes 1988].

Figura 6 - Distribuição da percentagem de poupança energética para o aumento de espessura de quatro envolventes diferentes, dois tipos de betão (SCB e HSB) com isolamento térmico posicionado pelo interior ou pelo exterior (W1 e W2) [Al-Sanea 2012].

Figura 7 - Esquema resumo das simulações realizadas.

Figura 8 – Dimensões e constituição da parede de Betão. 1 - Reboco, 2 - Betão.

Figura 9 - Redimensionamento da parede de betão com representação da malha. 1 - Reboco, 2 - Betão.

Figura 10 - Representação da estrutura e malha do tijolo com as respectivas dimensões.

Figura 11 - Representação da parede de betão após reabilitação. 1 - Betão e 2 - Reboco.

Figura 12 - Representação da parede de Tijolo após reabilitação.

Figura 13 - Esquema em formato de árvore representativo da sequência da modelação térmica.

Figura 14 – Distribuição da temperatura da superfície interior e da superfície isolada para a parede de betão e de tijolo, durante 24 horas. A radiação incidente tem 100W de potência e uma duração de uma hora.

Figura 15 – Distribuição da temperatura da superfície interior e da superfície isolada para a parede de betão e de tijolo, durante 24 horas. A radiação incidente tem 100W de potência e uma duração de duas horas.

Figura 16 - Distribuição da potência calorífica libertada pela superfície interior para a parede de betão e de tijolo, durante 24 horas. A radiação incidente tem 100W de potência e uma duração de uma hora.

Figura 17 -Distribuição da potência calorífica libertada pela superfície interior para a parede de betão e de tijolo, durante 24 horas. A radiação incidente tem 100W de potência e uma duração de duas horas.

Figura 18 - Evolução da temperatura da parede de betão ao longo de 24 horas, para uma radiação incidente de 100 W/m², durante 2 horas.

Figura 19 - Evolução da temperatura ao longo de 24 horas, com uma radiação incidente de 100 W/m² durante duas horas.

Figura 20 - Distribuição da temperatura da superfície interior para a envolvente de betão e betão após reabilitação, durante 24 horas. A radiação incidente tem 100W de potência e uma duração de uma hora.

Figura 21 - Distribuição da temperatura da superfície interior para a envolvente de tijolo e tijolo após reabilitação, durante 24 horas. A radiação incidente tem 100W de potência e uma duração de uma hora.

Figura 22 - Distribuição da potência calorífica libertada pela superfície interior para a parede de betão e betão após reabilitação, durante 24 horas. A radiação incidente tem 100W de potência e uma duração de uma hora.

Figura 23 - Distribuição da potência calorífica libertada pela superfície interior para a parede de tijolo e tijolo após reabilitação, durante 24 horas. A radiação incidente tem 100W de potência e uma duração de uma hora.

Figura 24 - Sequência da variação da massa térmica.

Figura 25 - Distribuição da temperatura e radiação global para a cidade do Porto, nos meses de aquecimento.

Figura 26 - Distribuição da temperatura exterior e radiação solar para os dias característicos de Janeiro.

Figura 27 - Distribuição da temperatura exterior e radiação solar para os dias característicos de Dezembro.

Figura 28 - Geometria da sala com as respectivas dimensões e numeração de superfícies.

Figura 29 - Tipologia de uma parede simples de fachada, isolamento térmico pelo interior [LNEC 2006]

Figura 30 - Esquema em formato de árvore ilustrativo da sequência de simulações.

Figura 31 – Distribuição da temperatura operativa para o modelo base de inércia mínima, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Sul.

Figura 32 – Distribuição da temperatura operativa para o modelo base de inércia mínima, nos dias característicos de Dezembro. Orientação Sul.

Figura 33 – Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de pavimento, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Sul.

Figura 34 – Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras do pavimento, nos dias característicos de Dezembro. Orientação Sul.

Figura 35 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de cobertura, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Sul.

Figura 36 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras do cobertura, nos dias característicos de Dezembro. Orientação Sul.

Figura 37 - Comparação entre as amplitudes térmicas diárias referentes às configurações do pavimento e da cobertura. A espessura varia entre 0 e 30 centímetros, para três diferentes densidades. Resultados para o dia 21 de Janeiro, orientação Sul.

Figura 38 – Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras da combinação do pavimento e da cobertura, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Sul.

Figura 39 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras da combinação do pavimento e da cobertura, nos dias característicos de Dezembro. Orientação Sul.

Figura 40 – Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de toda a envolvente, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Sul.

Figura 41 – Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de toda a envolvente, nos dias característicos de Dezembro. Orientação Sul.

Figura 42 – Distribuição da temperatura operativa para diferentes áreas expostas, com espessura constante de 15 centímetros de betão padrão. Resultados para os dias característicos de Janeiro, orientação Sul.

Figura 43 – Distribuição da temperatura operativa para diferentes áreas expostas, com espessura constante de 15 centímetros de betão padrão. Resultados para os dias característicos de Janeiro, orientação Sul.

Figura 44 - Evolução do valor médio da amplitude térmica diária segundo um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para as superfícies do pavimento, cobertura e metade da cobertura na estação de aquecimento, orientação Sul.

Figura 45 - Relação entre o valor médio da amplitude térmica interior e exterior para um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para as superfícies do pavimento, cobertura e metade da cobertura na estação de aquecimento, orientação Sul.

Figura 46 - Evolução do valor médio da amplitude térmica diária segundo um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para os quatro patamares principais na estação de aquecimento, orientação Sul.

Figura 47 - Distribuição da temperatura média sazonal para dois patamares principais, pavimento massivo e envolvente massiva. Orientação Oeste.

Figura 48 - Distribuição da temperatura operativa para o modelo base de inércia mínima, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Oeste.

Figura 49 - Distribuição da temperatura operativa para o modelo base de inércia mínima, nos dias característicos de Dezembro. Orientação Oeste.

Figura 50 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de cobertura, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Oeste.

Figura 51 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de cobertura, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Oeste.

Figura 52 - Comparação entre as amplitudes térmicas diárias referentes às configurações do pavimento e da cobertura. A espessura varia entre 0 e 30 centímetros, para três diferentes densidades. Resultados para o dia 21 de Janeiro, orientação Oeste.

Figura 53 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes áreas expostas, com espessura constante de 15 centímetros de betão padrão. Resultados para os dias característicos de Janeiro, orientação Oeste.

Figura 54 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes áreas expostas, com espessura constante de 15 centímetros de betão padrão. Resultados para os dias característicos de Janeiro, orientação Oeste.

Figura 55 - Evolução do valor médio da amplitude térmica diária segundo um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para as superfícies do pavimento, cobertura e metade da cobertura massivas na estação de aquecimento, orientação Oeste.

Figura 56 - Relação entre o valor médio da amplitude térmica interior e exterior para um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para as superfícies do pavimento, cobertura e metade da cobertura massivas na estação de aquecimento, orientação Oeste.

Figura 57 - Evolução do valor médio da amplitude térmica diária segundo um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para os quatro patamares principais na estação de aquecimento, orientação Oeste.

Figura 58 - Distribuição da temperatura média sazonal para dois patamares principais, pavimento massivo e envolvente massiva. Orientação Oeste.

Figura 59 - Distribuição da temperatura operativa para o modelo base de inércia mínima, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Norte.

Figura 60 - Distribuição da temperatura operativa para o modelo base de inércia mínima, nos dias característicos de Dezembro. Orientação Norte.

Figura 61 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de cobertura, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Norte.

Figura 62 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de cobertura, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Norte.

Figura 63 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes áreas expostas, com espessura constante de 15cm de betão padrão. Resultados para os dias característicos de Janeiro, orientação Norte.

Figura 64 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes áreas expostas, com espessura constante de 15cm de betão padrão. Resultados para os dias característicos de Dezembro, orientação Norte.

Figura 65 - Evolução do valor médio da amplitude térmica diária segundo um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para as superfícies do pavimento, cobertura e metade da cobertura massivos na estação de aquecimento, orientação Norte.

Figura 66 - Relação entre o valor médio da amplitude térmica interior e exterior para um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para as superfícies do pavimento, cobertura e metade da cobertura massivos na estação de aquecimento, orientação Norte.

Figura 67 - Evolução do valor médio da amplitude térmica diária segundo um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para os quatro patamares principais na estação de aquecimento, orientação Norte.

Figura 68 - Distribuição da temperatura média sazonal para dois patamares principais, pavimento massivo e envolvente massiva. Orientação Norte

Figura 69 - Distribuição da temperatura operativa para o modelo base de inércia mínima, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Este.

Figura 70 - Distribuição da temperatura operativa para o modelo base de inércia mínima, nos dias característicos de Dezembro. Orientação Este.

Figura 71 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de cobertura, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Este.

Figura 72 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de cobertura, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Este.

Figura 73 - Comparação entre as amplitudes térmicas diárias referentes às configurações do pavimento e da cobertura. A espessura varia entre 0 e 30 centímetros, para três diferentes densidades. Resultados para o dia 21 de Janeiro, orientação Este.

Figura 74 - Evolução do valor médio da amplitude térmica diária segundo um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para as superfícies do pavimento, cobertura e metade da cobertura massivas na estação de aquecimento, orientação Este.

Figura 75 – Comparação entre temperaturas operativas para as quatro orientações, com base nos principais patamares. Dias característicos de Janeiro.

Figura 76 - Distribuição da temperatura operativa para duas espessuras do pavimento massivo, no dia 20 de Janeiro. Orientação Sul.

Figura 77 - Amplitude média diária para a estação de aquecimento correspondente aos modelos de pavimento massivo de betão pesado e pavimento massivo com 5cm de cobertura massiva. Orientação Sul.

Figura 78 - Amplitude média diária para a estação de aquecimento correspondente aos modelos de pavimento massivo com cobertura massiva e pavimento massivo com 5cm de envolvente massiva, ambos de betão padrão. Orientação Sul.

Figura 79 - Distribuição da temperatura operativa média para os dois patamares mínimos definidos, durante a estação de aquecimento. Orientação Sul.

Figura 80 - Amplitude média diária para a estação de aquecimento correspondente ao modelo de pavimento massivo de betão pesado. Orientações Oeste, Norte e Este.

Lista de tabelas

Tabela 1 - Propriedades térmicas dos materiais da parede de Betão [LNEC 2006].

Tabela 2 - Propriedades térmicas dos constituintes da parede de tijolo e respectivas dimensões da malha. [1,3,5]

Tabela 3 - Propriedades térmicas dos constituintes de reabilitação e respectiva dimensão da malha [LNEC 2006].

Tabela 4 - Resumo das condições de fronteira definidas para a parede de Betão.

Tabela 5 - Resumo das condições de fronteira definidas para a parede de Tijolo.

Tabela 6 - Correspondência entre o número de identificação e o nome da superfície.

Tabela 7 – Características térmicas dos Materiais utilizados na envolvente [LNEC 2006].

Tabela 8 – Propriedades e tipologia do envidraçado utilizado [RCCTE 1989].

Tabela 9 - Lista de materiais constituintes da fachada exterior, respectivas espessuras e coeficiente de transmissão térmico global [LNEC 2006]

Tabela 10 - Lista de ganhos internos [ASHRAE 2010].

Tabela 11 - Correspondência entre RA e as superfícies que serão simuladas.

Tabela 12 - Temperaturas operativas médias correspondentes aos patamares mínimos das quatro orientações.

1 Introdução

1.1 Enquadramento do tema

Em Portugal o sector dos edifícios representa cerca 30% do consumo total de energia primária do país e 62% do consumo de electricidade [DGGE 2005]. O sector residencial com, aproximadamente, 3,3 milhões de edifícios, contribuiu com 17% do consumo de energia primária e representando cerca de 29% do consumo de electricidade. Nos edifícios residenciais, as necessidades de aquecimento e arrefecimento correspondem a cerca de 25% da energia final [DGGE 2005]. Assim, o uso de energia associado ao controlo do conforto térmico do ambiente interior representa, em média, um quarto do uso total de energia de uma habitação, evidenciando assim a necessidade de otimizar a eficiência térmica dos edifícios.

De forma a minimizar os gastos energéticos e, simultaneamente, garantir o conforto térmico, um edifício deve ser concebido de forma a que [Guedes 1987]:

- As necessidades energéticas para o conforto sejam reduzidas ao mínimo, tirando partido das condições exteriores, do isolamento térmico e do controlo das infiltrações;
- As necessidades energéticas que não são satisfeitas com ganhos internos associados à utilização de equipamentos e à presença de ocupantes, sejam atingidas com recurso à radiação solar;
- Os ganhos no Verão sejam controlados recorrendo a dispositivos de sombreamento e ao aumento da ventilação.

Foi com base nestes pressupostos que começaram a ser concebidos, na década de 80, edifícios com sistemas que tiram proveito dos ganhos provenientes da energia solar [Gonçalves 1986]. Estes sistemas, denominados de sistemas solares passivos, são definidos como parte integrante do edifício, funcionando como colectores solares e acumuladores de calor [Gonçalves 1986]. Os dois elementos básicos constituintes de um sistema solar passivo são os vãos envidraçados, para captação de energia solar, e a massa térmica, para armazenamento e restituição da energia solar incidente para o ambiente interior.

Em Portugal desenvolveu-se o projecto pioneiro da Casa Termicamente Optimizada (CTO), construída no Porto no início da década de 80, que teve como principal objectivo o estudo e o desenvolvimento de tecnologias solares passivas para aplicação aos edifícios em Portugal [Fernandes 1983]. A sua construção teve como princípios base o planeamento da sua forma, orientação e materiais constituintes de acordo com a sua localização e clima. Uma das principais inovações integradas na CTO foi o significativo aproveitamento dos ganhos solares no sentido de melhorar o seu comportamento térmico, com o uso de elementos massivos em

toda a sua envolvente assim com a introdução de alguns elementos inovadores como é o exemplo das paredes Trombe. Os conhecimentos testados e adquiridos na CTO foram ainda de especial importância para a elaboração dada primeira versão do Regulamento das Características de Comportamento Térmico em Edifícios, que estabeleceu exigências de conforto térmico no interior dos edifícios, sem dispêndio excessivo de energia [RCCTE 1989].

Aliado ao conceito de sistema solar passivo está a massa térmica, como foi enunciado anteriormente. O nome de massa térmica é atribuído à massa dos elementos da envolvente como resultado da sua influência na variação da temperatura interior. O comportamento térmico de um espaço interior é influenciado não só pelas propriedades térmicas da massa da envolvente, mas também pela área, espessura e localização desses elementos “massivos” [Balaras 1995]. Ou seja, a variação da temperatura de um espaço interior depende da capacidade da massa térmica de armazenar calor e, da forma como este, posteriormente, é libertado. O efeito da massa térmica no comportamento térmico de edifícios é ainda influenciado pelas condições climáticas, inerentes à sua localização.

As variáveis climáticas que mais influenciam o comportamento térmico do ambiente interior de edifícios, em termos de transferências de calor, são a temperatura do ar exterior e a radiação solar [Gonçalves 2004]. A temperatura do ar determina a quantidade de perdas por condução através da envolvente, entre o interior e o exterior. A radiação solar incidente tem como potencial efeito o aumento da temperatura interior, sendo considerado um ganho solar. Sempre que a radiação solar incide nas paredes exteriores, considera-se que o aquecimento do ambiente interior é feito através de um ganho indirecto. Quando incide directamente nos elementos da envolvente interior, transmitida através de janelas ou clarabóias, é considerado um ganho directo [Gonçalves 1986]. Ambas as definições serão exploradas de forma mais detalhada no Capítulo 2.

O presente trabalho tem como objectivo caracterizar o efeito da inércia térmica como um sistema de ganhos directos em edifícios residenciais, durante a estação de aquecimento. Assim, pretende-se estudar, através da utilização de ferramentas de modelação térmica, a influência da inércia térmica no comportamento térmico de edifícios, de forma a definir-se, para um caso de estudo particular, um patamar mínimo de inércia térmica que seja uma garantia de condições de conforto térmico para os seus ocupantes.

1.2 Estrutura do trabalho

O presente trabalho divide-se em cinco capítulos.

No capítulo 1 é feito o enquadramento do tema e é apresentado o problema em estudo.

No capítulo 2 são revistos os principais conceitos relacionados com o efeito da inércia térmica em edifícios.

No capítulo 3 é analisado o comportamento térmico de diferentes paredes, como resultado da alteração da radiação solar incidente.

No capítulo 4 é analisada a influência da variação da inércia térmica de um espaço unicelular na distribuição da sua temperatura operativa interior, com base em resultados obtidos por ferramentas de modelação térmica de edifícios.

Finalmente no capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões do trabalho.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Conforto térmico

O conforto térmico no interior de uma habitação é uma condição essencial para o bem-estar dos seus ocupantes. O conforto térmico pode ser definido como a sensação de comodidade e satisfação, relacionada com a temperatura. Trata-se então do equilíbrio entre a temperatura corporal e temperatura do ambiente circundante.

O conforto térmico, segundo o modelo “de Fanger” para espaços climatizados, pode ser avaliado de acordo com seis variáveis diferentes. Destas, duas variáveis estão directamente relacionadas com o próprio indivíduo. A actividade metabólica, que está ligada à actividade do ocupante, e o nível de vestuário. As restantes variáveis dependem do ambiente interior e são a temperatura ambiente (T_a), a temperatura média radiante (T_s), a velocidade do ar (v) e a humidade relativa (ϕ). As duas temperaturas, ambiente e média radiante, dizem respeito, respectivamente, à temperatura do ar e à temperatura média ponderada das superfícies que envolvem um indivíduo. Estas duas temperaturas permitem obter a temperatura operativa, usando factores de ponderação relativos ao contributo da radiação e da convecção no conforto térmico. Assim sendo, a temperatura operativa é utilizada como indicador de conforto.

Para além do conceito de conforto em espaços climatizados, existe ainda um modelo alternativo para espaços não climatizados que se denomina de conforto adaptativo [ASHRAE 2010]. Neste modelo admite-se um intervalo de temperaturas operativas interiores em função da variação da temperatura exterior. Considera-se, com este modelo, que os ocupantes se adaptam activamente à variação das condições exteriores, alterando, por exemplo, o seu nível de vestuário. A Figura 1 ilustra as diferenças enunciadas anteriormente. Enquanto que o modelo de Fanger, representado à esquerda, avalia a percentagem de pessoas descontentes relativamente às condições de conforto pré-definidas, numa escala rígida de -3 a +3, o modelo adaptativo, à direita, verifica uma variação do intervalo de temperaturas operativas de conforto, consoante a temperatura do ar exterior.

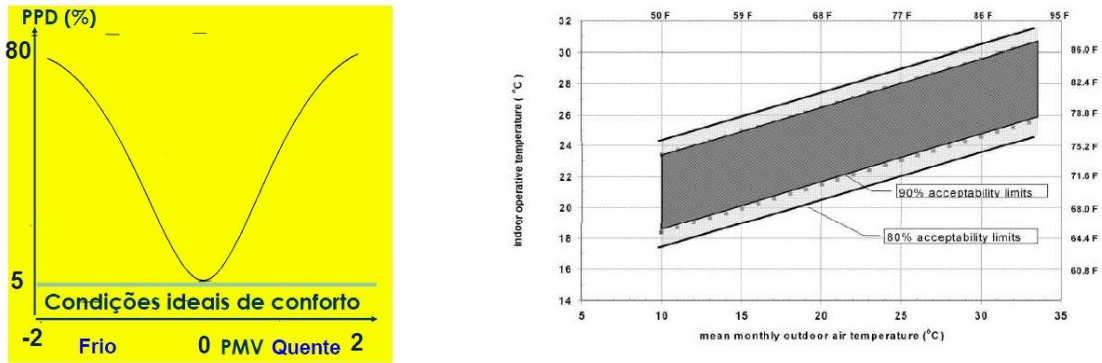


Figura 1 – Representação do modelo de conforto de Fanger, à esquerda, e do modelo de conforto adaptativo, à direita.

2.2 Sistemas solares passivos

Um sistema solar passivo é caracterizado como sendo um elemento da envolvente de um edifício cujo objectivo é aproveitar a energia solar para melhorar o comportamento térmico dos edifícios [Guedes 1987]. Conforme a localização da massa térmica, os sistemas solares passivos podem ser classificados como sistemas de ganho directo e sistemas de ganho indirecto.

Nos sistemas de ganho indirecto a massa térmica do sistema encontra-se entre a superfície de ganho e o espaço interno a aquecer, Figura 2. Neste caso, verifica-se um desfasamento temporal entre o aumento de temperatura interior e o ciclo da radiação solar que incide no exterior. Este desfasamento resulta do processo de transferência de calor por condução que ocorre entre a superfície que recebe a radiação solar directa e a superfície em contacto com o espaço interior, que por sua vez liberta o calor por radiação e convecção.

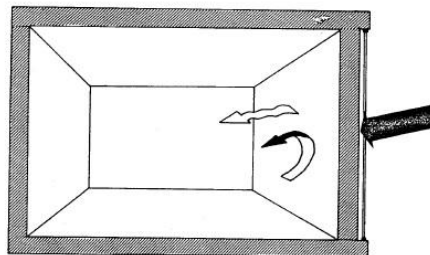


Figura 2 - Representação de um ganho indirecto, [Gonçalves 1986].

Um dos primeiros exemplos de um sistema de ganho indirecto é a casa Trombe em Odeillo, França, construída em 1967, e concebida por Félix Trombe e Jacques Michel [Gonçalves 1986]. As paredes de Trombe são constituídas por paredes maciças com a superfície exterior pintada de preto de forma a aumentar a absorção de radiação solar, sobre a qual é colocado um vidro duplo [Gonçalves 1986].

Nos sistemas de ganho directo, o espaço dispõe de vãos envidraçados que possibilitam a incidência de radiação nas superfícies interiores, como representado na Figura 3. Ou seja, as superfícies que recebem radiação solar estão directamente em contacto com o espaço a

aquecer. Como resultado, a temperatura interior do espaço varia de acordo com a radiação solar incidente nas superfícies interior, que é posteriormente libertada por processos de radiação e convecção [Gonçalves, 1986].

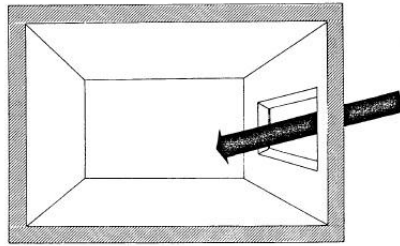


Figura 3 - Representação de um ganho directo. [Gonçalves 1986].

Um exemplo de aplicação dos sistemas de ganho directo é a escola de S.George-Wallasey, Inglaterra, construída em 1962. A Figura 4 ilustra a sua fachada principal, que é totalmente envidraçada. A dimensão e o ângulo do sombreamento permitem maximizar os ganhos directos na estação de aquecimento e simultaneamente reduzir os mesmos na estação de arrefecimento [Gonçalves 1986].



Figura 4 - Exemplo de um sistema de ganho directo, escola de S.George-Wallasey, Inglaterra. [http://magoonconcretetestudy.wordpress.com 2011].

A Casa Termicamente Optimizada (CTO), construída no início da década de 80, destaca-se como uma experiência pioneira na utilização de sistemas solares passivos em edifícios. A CTO teve como princípios, a experimentação de tecnologias solares passivas com o objectivo de garantir as condições de conforto apenas com recurso às condições climáticas exteriores. A sua construção teve então como princípio base o projectar de acordo com o clima, maximizando o aproveitamento da radiação solar, para um melhor comportamento térmico, minimizando, simultaneamente, as perdas térmicas para o exterior [Fernandes 1988]. Com base no princípio enunciado foram assim introduzidos os sistemas solares passivos, a sua forma e orientação foi pensada de modo a funcionar como um “colector solar integral”, e projectado o isolamento térmico. A Figura 5 representa a CTO em corte, onde é possível observar-se estrutura apresentada anteriormente.

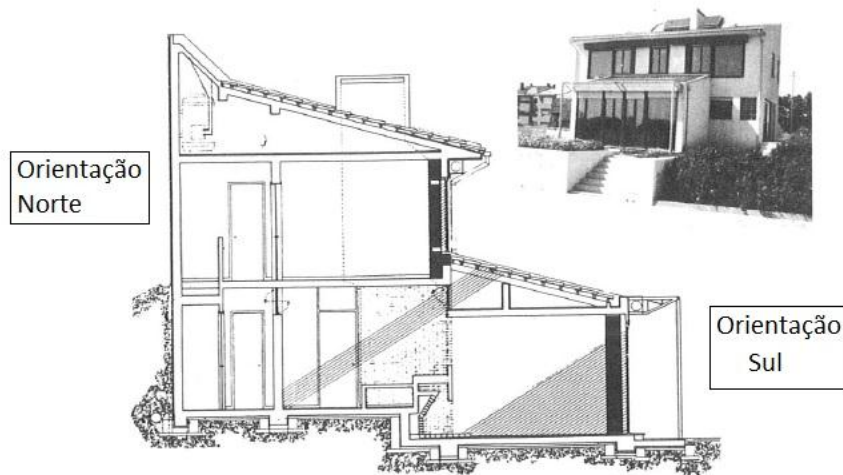


Figura 5 - Representação em corte e fachada principal da Casa Termicamente Optimizada [Fernandes 1988].

A sua construção tornou possível a recolha e análise de dados reais, contribuindo para a evolução deste tipo de sistemas. Entre outras temáticas, foi estudado o comportamento térmico das paredes Trombe e a inércia térmica de paredes maciças. O estudo das paredes trombe revelou um aumento significativo dos ganhos solares sem recurso a grandes áreas de envidraçado, aumentando a temperatura interior. Simultaneamente verificou-se uma redução das perdas térmicas [Gonçalves 1986].

M. Guedes [Guedes 1987] estudou o efeito da inércia térmica em paredes maciças onde se verifica uma relação entre a variação da espessura e do tipo de material constituinte da parede, com a temperatura do ar interior resultante. Mostrou-se que o calor armazenado pelas paredes e o valor restituído ao espaço interior varia com a espessura e tipo de material da parede. Para cada material de construção definiu-se uma espessura óptima para além da qual o calor armazenado diminui ou se mantém constante. Os resultados obtidos na CTO permitiram concluir que a influência da inércia térmica na temperatura interior é afectada por dois factores: a variação das propriedades térmicas do material constituinte da parede e a variação da espessura do material [Guedes 1987].

2.3 Inércia térmica em edifícios

A inércia térmica pode ser descrita como a capacidade de um dado material em absorver e armazenar calor. As variáveis climáticas exteriores têm um grande peso para o efeito da inércia térmica na temperatura interior, como se pode deduzir do princípio de “construir com o clima”. As variáveis de maior relevo são a variação da temperatura exterior, que determina a intensidade e direcção do fluxo de calor entre o interior e o exterior, e a radiação solar incidente que aumenta os ganhos internos.

Os estudos realizados para climas, ou estações, com uma reduzida amplitude da temperatura do ar exterior, concluem que a alteração da massa térmica não tem um efeito significativo na distribuição da temperatura interior [Al-Sanea 2011, Williamson 2011, Kosny 2001, Dodoo 2011].

Para climas com grande amplitude térmica, um grande número de estudo conclui que o aumento da massa térmica resulta numa diminuição da amplitude térmica interior [Al-Sanea 2012, Gregory 2007, Ogoli 2002, Ballaras 1995, Zeng 2010, Kalogirou 2001]. A redução da amplitude interior, além de potencialmente melhorar as condições de conforto térmico [Gregory 2007, Ogoli 2002, Zeng 2010], verifica uma redução do consumo energético para o aquecimento. Os resultados obtidos registaram uma redução entre 8 e 47% [Al-Sanea 2012, Balaras 1995, Kosny 2001, Kalogirou 2001, Williamson 2011].

K.Gregory estudou a relação entre a quantidade de radiação incidente nas superfícies interiores e a influência da massa térmica na variação da temperatura interior. Concluiu, que quanto maior a quantidade de radiação transmitida para o interior, através do aumento da área envidraçada, maior será a influência da massa térmica no comportamento térmico interior [Gregory 2007].

A contribuição das propriedades térmicas do material das paredes na variação da temperatura do ar interior tem sido objecto de vários estudos. Os resultados destes estudos revelam que os materiais pesados, com densidade elevada, melhoram o comportamento térmico dos edifícios uma vez que a temperatura sofre menores variações [Al-Sanea 2012, Ogoli 2002, Gregory 2007, Williamson 2011].

A. Al-Sanea [Al-Sanea 2012], num estudo mais recente, mostrou também a existência de uma relação entre a variação da espessura das paredes e o efeito da inércia térmica na temperatura interior. Tal como M.Guedes [Guedes 1987], os resultados do aumento progressivo da espessura permitiram definir um valor de espessura crítica, entre 15 e 20cm. Para este intervalo de espessuras de material, a redução da variação da temperatura interior resultante corresponde a uma poupança energética relativa de 95% [Al-Sanea 2012]. A Figura 6 ilustra as principais conclusões do trabalho [Al-Sanea 2012]. As quatro curvas apresentadas correspondem a quatro envolventes diferentes, duas com construções de betões de diferentes densidades (SCB - Solid concrete block e HCB - Hallow concrete block), uma com isolamento térmico com aplicação no exterior (W1) e outra com isolamento térmico interior (W2). O estudo conclui que, uma envolvente com isolamento exterior, e com uma envolvente de maior densidade, garantem uma menor amplitude térmica interior e que reduz as necessidades energéticas de aquecimento.

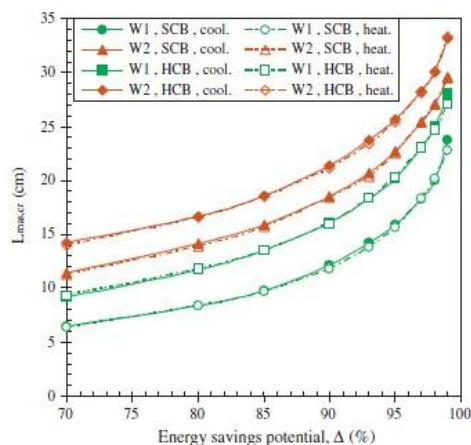


Figura 6 - Distribuição da percentagem de poupança energética para o aumento de espessura de quatro envolventes diferentes, dois tipos de betão (SCB e HSB) com isolamento térmico posicionado pelo interior ou pelo exterior (W1 e W2) [Al-Sanea 2012].

2.4 Reabilitação de edifícios residenciais

Em Portugal, o número de habitações reabilitadas representa apenas 6,2% do total de construções existentes. Contudo, o número de habitações que necessita de intervenção é elevado, representando, aproximadamente, 34% do parque habitacional [Confederação Portuguesa da Construção e do Imobiliário 2010].

O principal objectivo da reabilitação é aumentar o ciclo de vida do edifício e simultaneamente dotá-lo de maior adaptabilidade às funções a que está destinado. Dentro da problemática da reabilitação geral do edifício interessa também encontrar soluções que permitam melhor o desempenho térmico e otimizar a eficiência energética dos edifícios [Henriques 2007]. Nas intervenções em edifícios antigos a primeira opção a considerar deve ser a conservação dos revestimentos existentes, se necessário recorrendo a reparações pontuais, ou, se tal se justificar pelo valor do edifício ou do seu revestimento, a operações de consolidação [Veiga 2003].

As principais soluções de reabilitação utilizadas, na actualidade, envolvem a reconstrução ou recuperação da envolvente interior com recurso a materiais leves. O processo convencional de recuperação de edifícios antigos utiliza por excelência o gesso cartonado, como constituinte principal da parede ou como revestimento [Lopes 2011]. As soluções construtivas envolvem a aplicação do gesso por painéis, que podem ser de estrutura simples (dois painéis separados por uma caixa de ar), ou de estrutura múltipla com dupla caixa-de-ar (dois ou mais painéis separados por duas caixas de ar). Quando a parede em degradação é recuperada através de revestimento, a aplicação dos painéis é feita directamente sobre a parede, com separação por caixa-de-ar simples [PLADUR 2012].

As soluções de reabilitação apresentadas verificam uma massa térmica reduzida. A sua aplicação em habitações resulta numa baixa inércia térmica da envolvente que, como consequência, pode ter consequências negativas no comportamento térmico interior.

3 Modelação do comportamento térmico de uma parede isolada

O presente capítulo tem como objectivo analisar o comportamento térmico de diferentes paredes isoladas como resposta à incidência de radiação. Este estudo foi considerado primário ao estudo do comportamento térmico de um espaço interior, realizado no capítulo seguinte.

O comportamento da parede face à radiação incidente foi analisado com base na distribuição da temperatura da superfícies e na distribuição da potência calorífica. Foram escolhidas duas paredes com diferentes materiais constituintes, de diferentes propriedades térmicas, e três intensidades diferentes de radiação. As diferentes intensidades de radiação, assim como os diferentes períodos de duração, têm como objectivo representar a incidência de radiação solar numa parede interior de um espaço.

Para cada parede foram simuladas as três intensidades, e para cada intensidade foram feitas igualmente três simulações a que corresponde um período de incidência crescente. A Figura 7 resume a sequência dos casos de estudo descritos. Após a sequência apresentada, foram realizadas dois outros casos, representando duas situações de reabilitação.

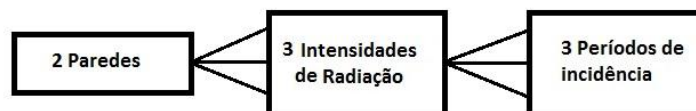


Figura 7 - Esquema resumo das simulações realizadas.

A modelação do comportamento térmico de cada parede foi feita através de simulações realizadas no *software* Ansys14, utilizando a solução de cálculo Transient Thermal [“Thermal Analysis Guide” 2009]. Este software permite efectuar a análise térmica transiente de um objecto através da execução de alguns procedimentos. Em primeiro lugar, a definição dos materiais, a definição da geometria e a dimensão da malha de elementos finitos de acordo com a geometria do objecto. Em segundo lugar, a definição da temperatura inicial e das condições de fronteira para cada superfície. Por último, são definidas as variáveis em análise.

De seguida são apresentados os pressupostos com que foi baseada a modelação do comportamento térmico de paredes isoladas. Em primeiro lugar, são caracterizadas as paredes consideradas e os materiais utilizados. Em segundo lugar, serão definidas as condições de fronteira para cada modelo. Por último, será descrita a metodologia da análise.

3.1 Caracterização das envolventes

3.1.1 Parede de betão

A parede de betão é composta por 200 milímetros (mm) de espessura de betão e um revestimento de 15 mm de espessura de reboco, representada na Figura 8. As propriedades térmicas dos materiais encontram-se na Tabela 1.

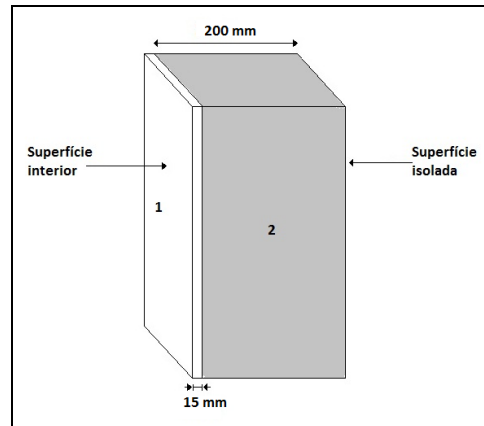


Figura 8 – Dimensões e constituição da parede de Betão. 1 - Reboco, 2 - Betão.

Tabela 1 - Propriedades térmicas dos materiais da parede de Betão [LNEC 2006].

Material	Massa volúmica aparente seca, ρ [kg/m ³]	Condutibilidade térmica, λ [W/(m.°C)]	Calor específico, C_p [J/(kg.K)]	Dimensão da malha [m]
Betão estrutural	1650	0,84	840	0,0075
Reboco	1900	1,3	1046	0,001

As propriedades da parede são uniformes ao longo da largura e da altura. Assim sendo, e juntamente com as condições de fronteira definidas no subcapítulo seguinte, a transferência de calor por condução verifica-se apenas na direção da espessura. Como resultado, a temperatura varia também apenas ao longo da espessura da parede, necessitando o modelo de uma sensibilidade nesta direção. De modo a aumentar a sensibilidade da resposta, sem ultrapassar o limite de nós permitido pelo software, revelou-se vantajosa a alteração de algumas dimensões da parede. O valor da espessura foi mantido constante e restantes medidas foram diminuídas de modo a possibilitar o aumento do número de nós da malha. A Figura 9 ilustra a malha ao longo da espessura da parede. A parede simulada terá então 10mm de altura, 215 mm de largura (15 mm de reboco e 200 de betão) e 1mm de largura. Na direção do fluxo térmico contabilizam-se 55 nós.

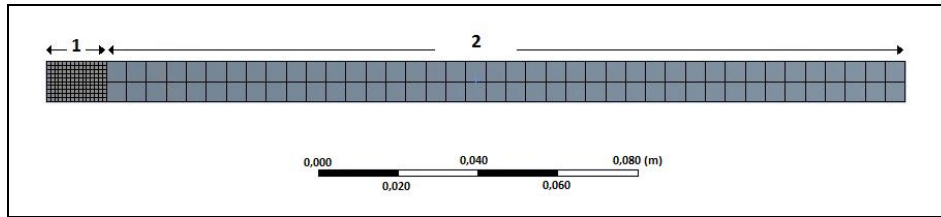


Figura 9 - Redimensionamento da parede de betão com representação da malha. 1 - Reboco, 2 - Betão.

3.1.2 Parede de Tijolo

A parede de tijolo é constituída por tijolo e reboco. As dimensões e configuração da parede estão representadas na Figura 10. De modo a ter em conta os processos de transferência de calor que ocorrem no interior do tijolo, as dimensões do modelo cumprem a norma EN 771-1:2011 [Ficha técnica Preceram 2011]. Apenas a altura foi diminuída a metade por questões de simetria. As propriedades térmicas e dimensões da malha estão apresentadas na Tabela 2.

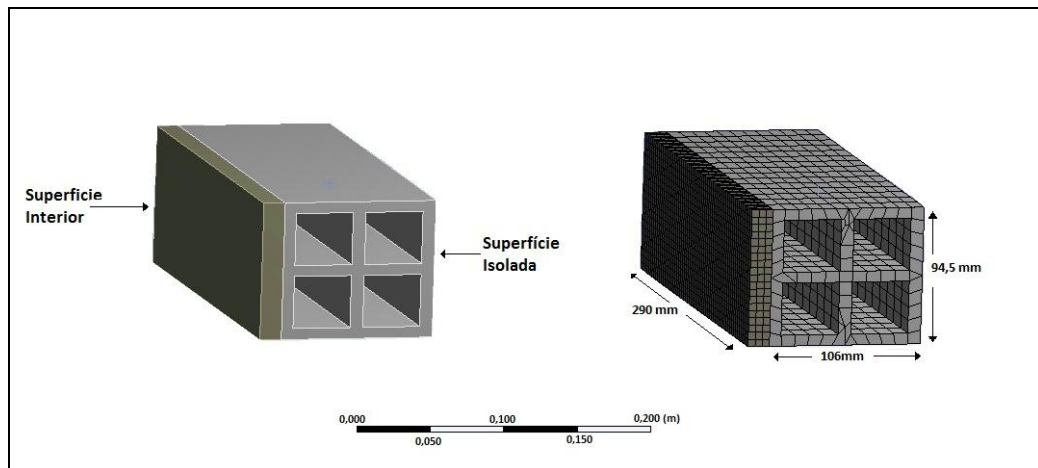


Figura 10 - Representação da estrutura e malha do tijolo com as respectivas dimensões.

Tabela 2 - Propriedades térmicas dos constituintes da parede de tijolo e respectivas dimensões da malha. [1,3,5]

Material	Massa volúmica aparente seca, ρ [kg/m ³]	Condutibilidade térmica, λ [W/(m.°C)]	Calor específico, C_p [J/(kg.K)]	Dimensão da malha [m]
Tijolo11	1740	0,50	920	0,02
Reboco	1900	1,30	1046	0,005
Ar ($\bar{T} = 24,5$)	1,024	0,025	1007	0,02

3.1.3 Modelos de paredes reabilitadas

Os modelos de reabilitação têm como base os dois modelos anteriores. Ao modelo inicial, parede de Betão e parede de Tijolo, é adicionada uma camada de 15 milímetros de gesso cartonado. O espaçamento entre a parede e a nova camada é feito através de estruturas metálicas, dispostas na horizontal, e tem a dimensão de 20 milímetros [PLADUR 2012]. A Figura 11 e a Figura 12 representam os dois modelos de reabilitação, respectivamente, uma parede de betão após reabilitação e uma parede de tijolo após reabilitação.

As propriedades térmicas do gesso cartonado e do ar estão resumidas na Tabela 3.

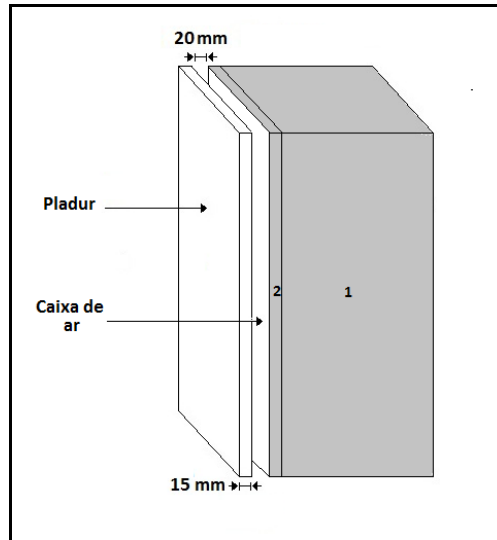


Figura 11 - Representação da parede de betão após reabilitação. 1 - Betão e 2 - Reboco.

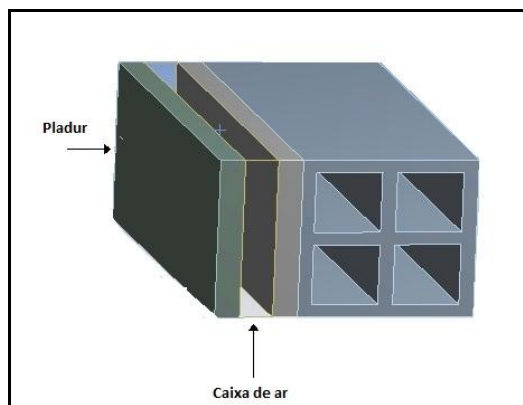


Figura 12 - Representação da parede de Tijolo após reabilitação.

Tabela 3 - Propriedades térmicas dos constituintes de reabilitação e respectiva dimensão da malha [LNEC 2006].

Material	Massa volúmica aparente seca, ρ [kg/m ³]	Condutibilidade térmica, λ [W/(m.°C)]	Calor específico, C_p [J/(kg.K)]	Dimensão da malha [m]
Gesso cartonado	875	0,25	840	0,005
Ar ($\bar{T} = 24,5$)	1,024	0,025	1007	0,02

3.2 Condições de fronteira

A Tabela 4 apresenta o resumo das condições de fronteira definidas. Todas as condições de fronteira foram consideradas constantes ao longo da simulação.

No instante inicial a parede encontra-se em equilíbrio térmico com o ambiente. O valor da temperatura inicial foi definido com base nas condições de conforto adaptativo de norma ISO 7730 [ASHRAE 2010] e o critério aplicado para a definir foi que permanecesse dentro do intervalo de conforto para uma grande gama de temperaturas exteriores. A temperatura inicial definida foi de 22 graus.

O coeficiente de convecção natural foi calculado de acordo com o estudo de H.B.Awbi, [Awbi 1999], para o caso em que a parede considerada está a ser aquecida.

$$h = 1,823.(D)^{-0.121} .(\Delta T)^{0,293} \quad [\text{Awbi 1999}]$$

O valor do coeficiente depende do valor do perímetro hidráulico (D) e do valor da amplitude térmica da superfície (ΔT). Foi admitido um valor para a temperatura final de forma a realizar uma primeira iteração. O valor final, atingido ao fim da segunda iteração, foi de 2,82 W/m².K.

A convecção no interior do tijolo foi definida de forma diferente. Por definição, a convecção é o processo de transferência de calor entre uma superfície sólida e o fluido ou gás adjacente, onde o efeito da condução e da velocidade do fluido actuam em conjunto. Quanto maior a velocidade de fluido maior o coeficiente de convecção. Para o caso em estudo, a renovação do ar interior dentro do tijolo foi considerada nula, ou seja, a velocidade interior $v = 0 \text{ m/s}$. Assim sendo, pode considerar-se nulo o coeficiente de convecção, onde o principal processo de transferência de calor sólido-fluido é a condução [Cengel 2002].

Tabela 4 - Resumo das condições de fronteira definidas para a parede de Betão.

Superfície	Temperatura inicial, T _i [°C]	Convecção Natural, h [W/m ² .K]	Emissividade (para o ambiente), α	Emissividade (entre superfícies)
Superfície interior	22	2,82	0,85	-
Restantes superfícies	22	Termicamente isoladas		

Tabela 5 - Resumo das condições de fronteira definidas para a parede de Tijolo.

Superfície	Temperatura inicial, T _i [°C]	Convecção Natural, h [W/m ² .K]	Emissividade (para o ambiente), α	Emissividade (entre superfícies)
Superfície interior	22	2,82	0,85	-
Superfícies dos espaços ocios	22	0	-	0,94
Restantes superfícies	22	Termicamente isoladas		

Para os dois modelos de reabilitação, a camada de ar introduz apenas a radiação entre as superfícies do pladur e do reboco. A renovação do ar entre as superfícies foi igualmente considerada nula.

3.3 Metodologia

O objectivo da modelação térmica da parede é estudar o comportamento térmico das duas paredes, betão e tijolo, durante um período de 24 h, como resposta à incidência de radiação. De modo a aumentar progressivamente a quantidade de calor transmitido a cada uma das paredes, foram realizadas três simulações correspondentes a três intensidades de radiação diferentes. Por ordem crescente de intensidade, 20 W/m^2 , 50 W/m^2 e 100 W/m^2 . De modo a aumentar a sensibilidade para a distribuição da libertação de calor que se verifica durante as 24 h da análise, para cada uma das intensidades foram simulados três intervalos de exposição à radiação. Por ordem crescente de duração, 0,5 h, 1 h e 2 h. A Figura 13 ilustra a metodologia descrita.

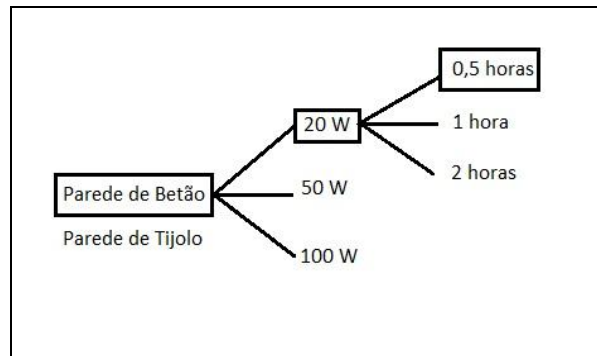


Figura 13 - Esquema em formato de árvore representativo da sequência da modelação térmica.

3.4 Resultados

Os resultados para os dois modelos principais estão representados da Figura 14 à Figura 17. Embora tenham sido feitas 18 simulações com diferentes configurações apenas serão apresentados os resultados relativos à intensidade de radiação de 100 W/m^2 , para 1 hora e 2 horas de incidência. Em primeiro lugar serão apresentados os resultados relativos à distribuição da temperatura das duas superfícies, interior e isolada, Figura 14 e Figura 15. Em segundo lugar os resultados relativos à distribuição da potência calorífica libertada pela superfície interior Figura 16 e Figura 17.

3.4.1 Temperatura das superfícies

A Figura 14 apresenta os resultados para a distribuição da temperatura das superfícies, interior e isolada, relativos à simulação de intensidade de 100 W/m^2 de radiação e 1 hora de incidência, para os dois modelos. A Figura 15 apresenta a distribuição para uma duração de 2 horas de incidência de radiação, segundo os mesmos parâmetros.

3.4.1.1 Uma hora de radiação

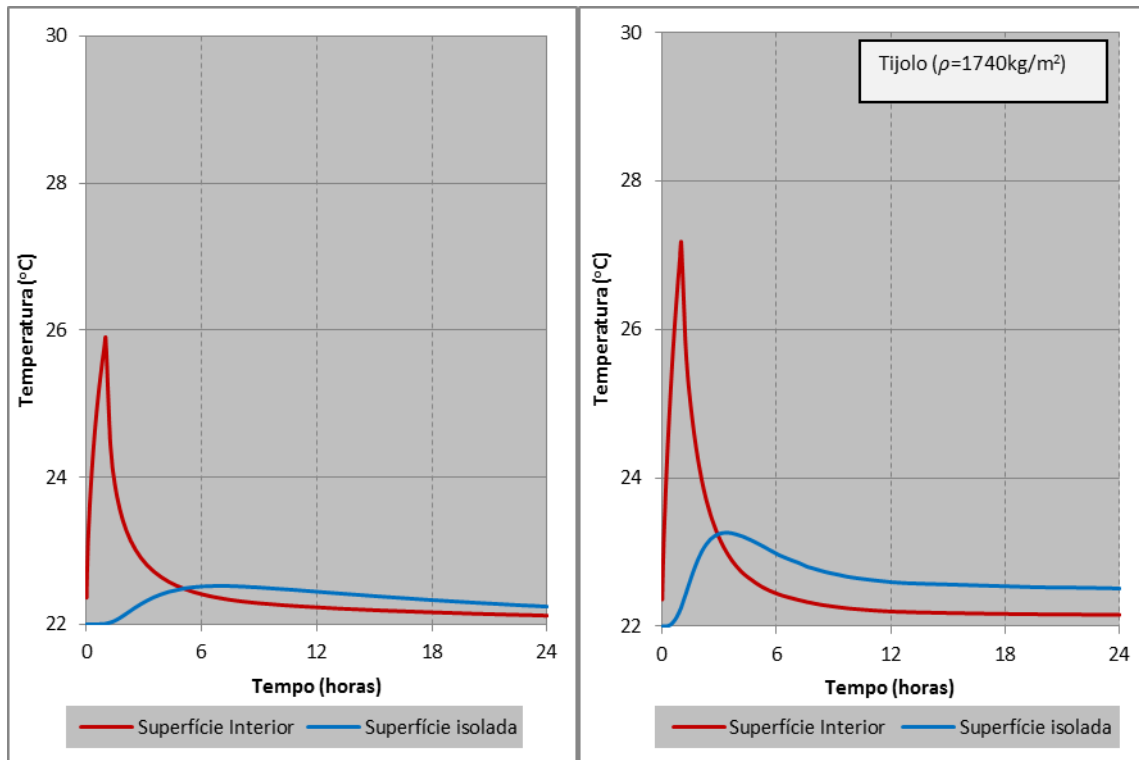


Figura 14 – Distribuição da temperatura da superfície interior e da superfície isolada para a parede de betão e de tijolo, durante 24 horas. A radiação incidente tem 100 W/m^2 de potência e uma duração de uma hora.

A Figura 14 mostra que a parede de tijolo atinge uma temperatura superior à parede de betão. A superfície interior regista uma temperatura máxima, aproximadamente, 1°C superior e a superfície isolada, sensivelmente, $0,5^\circ\text{C}$ superior. A superfície isolada da parede de tijolo atinge a temperatura máxima num menor intervalo de tempo, como resultado de uma menor espessura da parede. O pico de temperatura máxima na superfície interior coincide, nos dois modelos, com o instante em que a radiação deixa de incidir na parede. Após este instante a temperatura tem uma redução acentuada até ao intervalo entre as 4 e 6 horas, e diminui lentamente entre as 6 e as 24 horas.

3.4.1.2 Duas horas de radiação

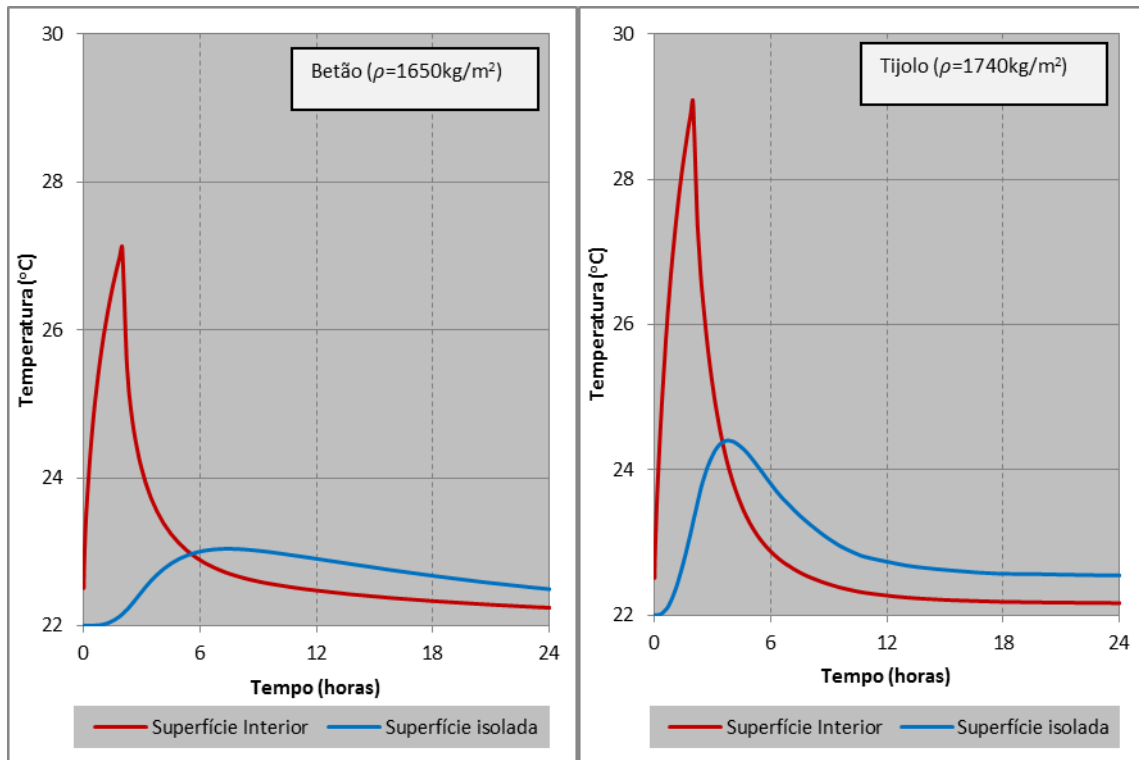


Figura 15 – Distribuição da temperatura da superfície interior e da superfície isolada para a parede de betão e de tijolo, durante 24 horas. A radiação incidente tem 100 W/m^2 de potência e uma duração de duas horas.

A Figura 15 confirma o padrão descrito no parágrafo anterior mas, neste caso, para um patamar de temperaturas superior. Neste caso, a diferença de temperaturas máximas entre os dois modelos é superior. Entre as superfícies interiores regista uma diferença de, aproximadamente, 2°C e entre as superfícies isoladas de 1°C . O aumento do período de incidência aumenta também o intervalo de redução acentuada da temperatura, o que era de esperar como resultado do aumento da temperatura face aos resultados anteriores.

3.4.2 Potência calorífica

A Figura 16 e Figura 17 representam, respectivamente, as distribuições da potência calorífica relativas às simulações de intensidade de 100 W/m^2 de radiação para 1 hora e 2 horas de incidência.

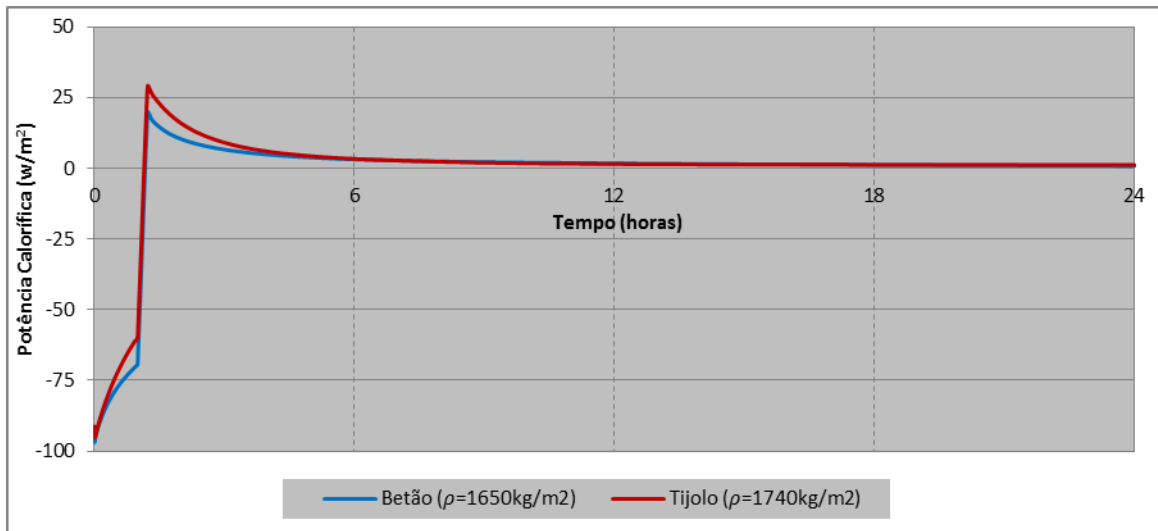


Figura 16 - Distribuição da potência calorífica libertada pela superfície interior para a parede de betão e de tijolo, durante 24 horas. A radiação incidente tem 100 W/m^2 de potência e uma duração de uma hora.

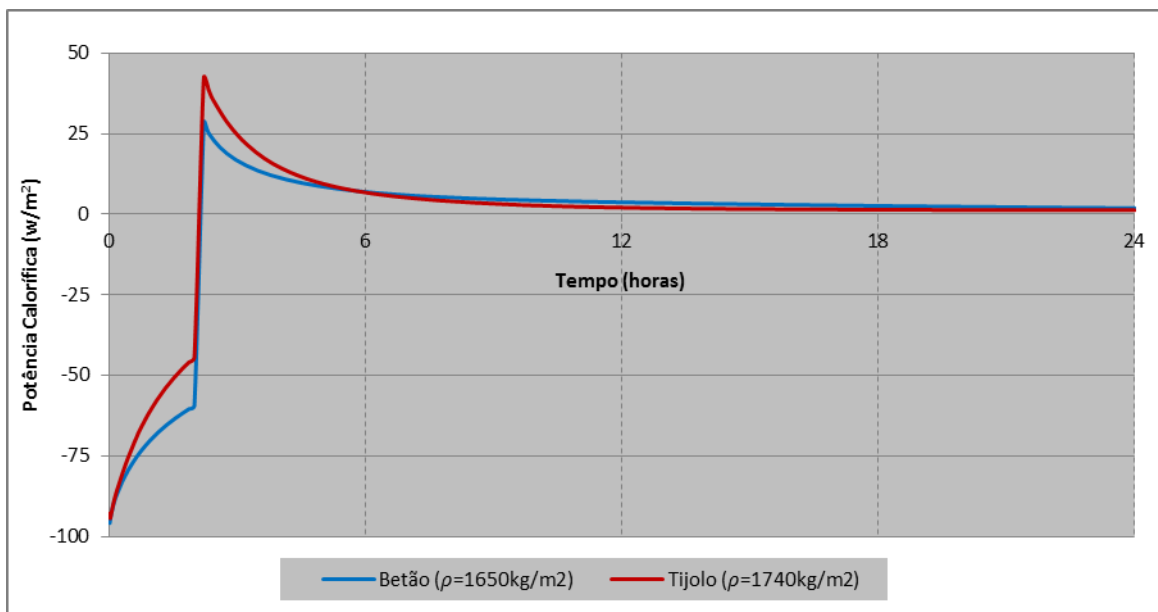


Figura 17 - Distribuição da potência calorífica libertada pela superfície interior para a parede de betão e de tijolo, durante 24 horas. A radiação incidente tem 100 W/m^2 de potência e uma duração de duas horas.

Como era de esperar, a superfície interior da parede de tijolo apresenta uma potência calorífica máxima superior à registada para a parede de betão. Esse máximo é registado, nos dois modelos, e em ambas as durações de incidência de radiação, para o instante imediatamente após a radiação deixa de incidir na parede. Confirma-se que, entre as 4 e as 6 horas, é libertada a maior parte do calor armazenado.

3.4.3 Diagrama de temperaturas

A Figura 18 e Figura 19 ilustram a variação da temperatura da parede ao longo das 24 horas. Cada imagem representa a distribuição da temperatura ao longo da espessura da parede num determinado instante. A representação da temperatura é feita com base numa escala de cores. A intensidade da radiação incidente é de 100 W/m^2 , com 2 h de duração, em ambos os diagramas.

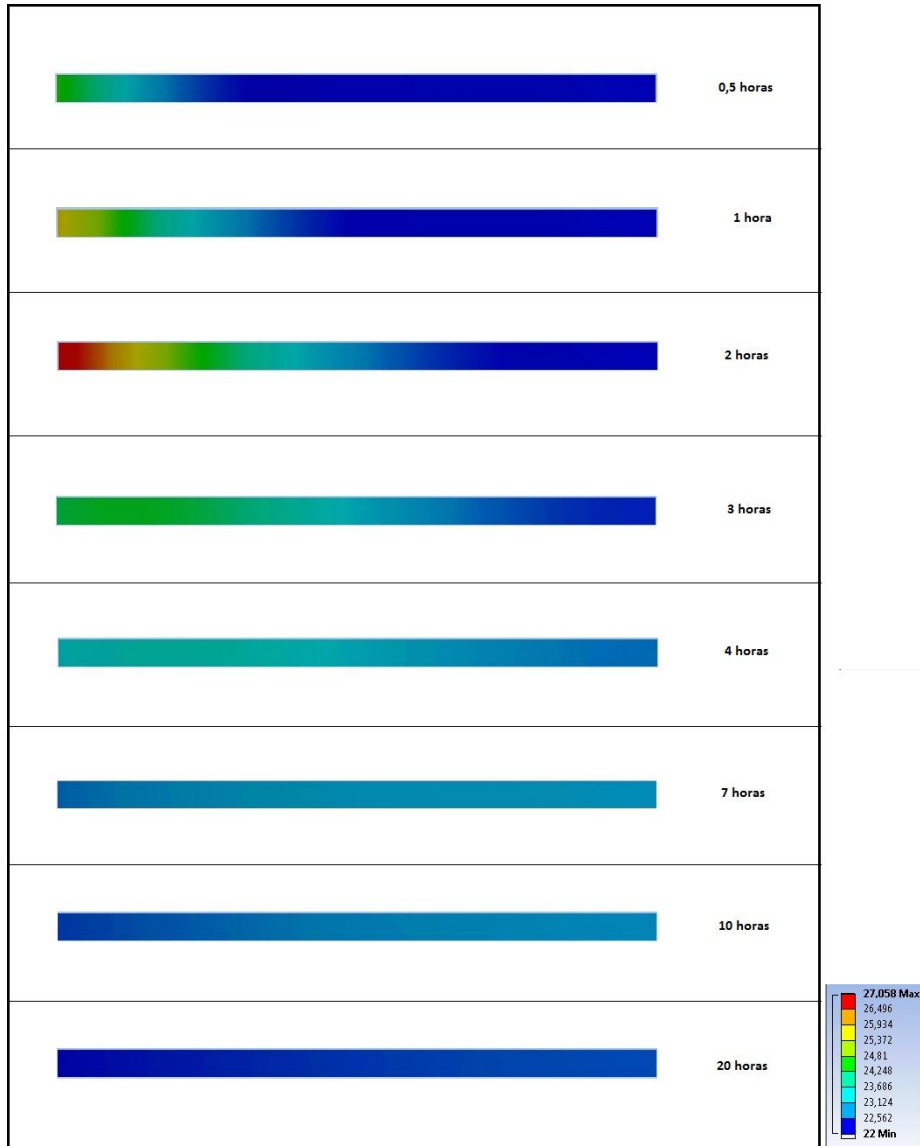


Figura 18 - Evolução da temperatura da parede de betão ao longo de 24 horas, para uma radiação incidente de 100 W/m^2 , durante 2 horas.

A Figura 18 mostra que até ao instante de 2h a temperatura da superfície interior aumenta, atingindo o máximo para este momento. As restantes imagens mostram que o ponto da parede correspondente à temperatura máxima se desloca ao longo da espessura, devido à condução e à perda de calor por convecção na superfície isolada. A partir das 7h, aproximadamente, esse ponto localiza-se junto da superfície isolada, onde se mantém até ao final da análise.

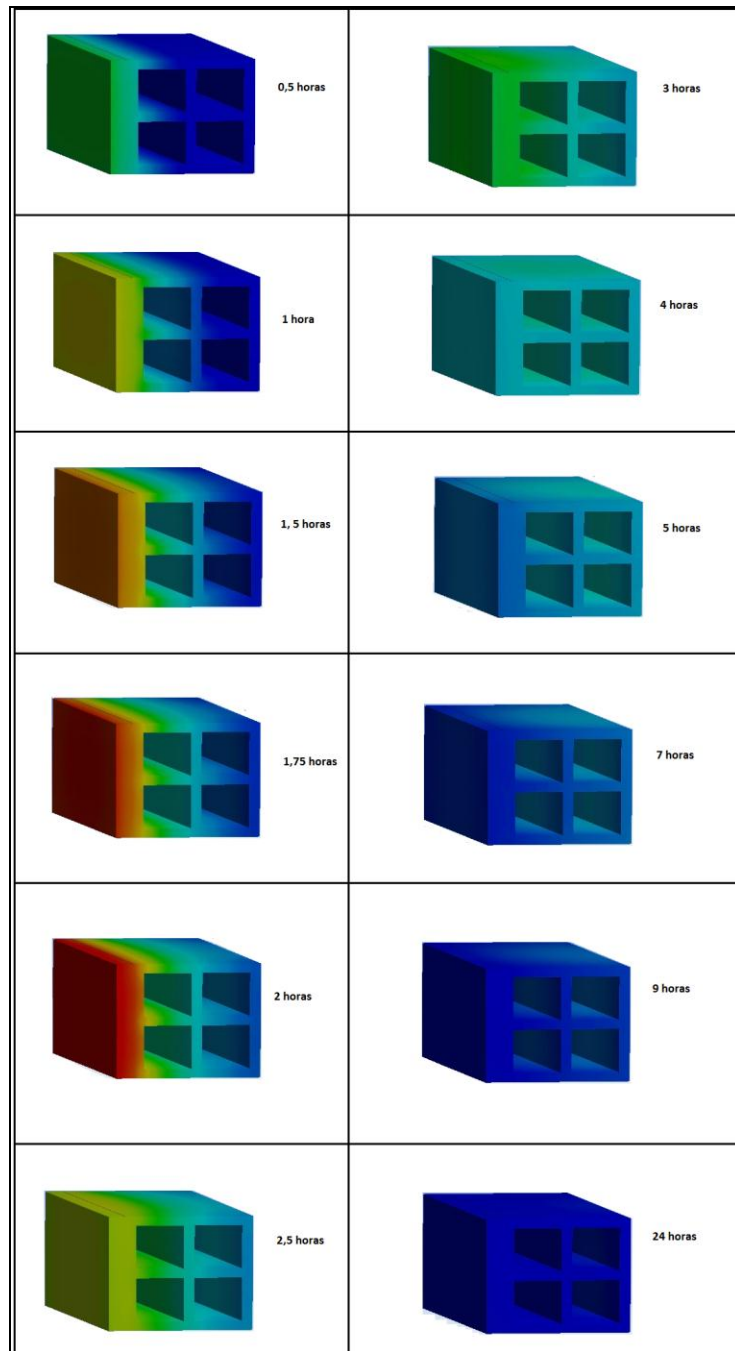


Figura 19 - Evolução da temperatura ao longo de 24 horas, com uma radiação incidente de 100 W/m^2 durante duas horas.

A Figura 19 mostra que a temperatura máxima se verifica na superfície interior após as duas horas de incidência de radiação. A partir deste instante, o ponto correspondente à temperatura máxima da parede vai progredindo ao longo da espessura. Nas últimas horas de simulação o máximo verifica-se próximo da superfície isolada, como era de esperar pela análise dos resultados anteriores. A figura mostra também que a temperatura máxima da parede se verifica, durante toda a simulação, para os centímetros centrais ao longo da largura, com maior significado a partir das 3h de simulação.

3.4.4 Modelos de reabilitação

Da Figura 20 à Figura 23 são apresentados os resultados relativos à distribuição da temperatura e da potência calorífica da superfície interior, para os modelos de reabilitação, e respectiva comparação com os modelos anteriores.

3.4.4.1 Temperatura da superfície interior

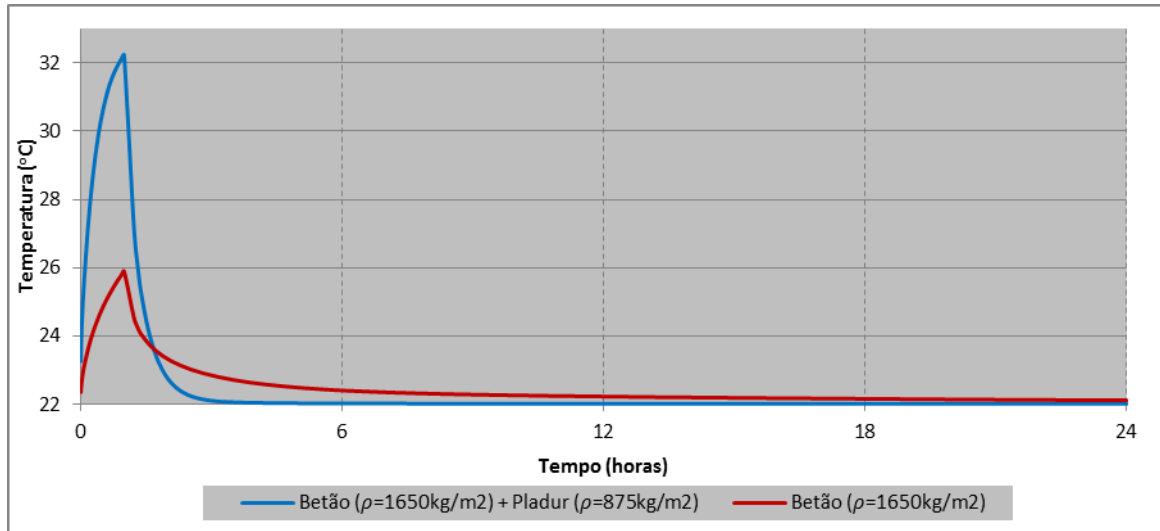


Figura 20 - Distribuição da temperatura da superfície interior para a envolvente de betão e betão após reabilitação, durante 24 horas. A radiação incidente tem 100 W/m^2 de potência e uma duração de uma hora.

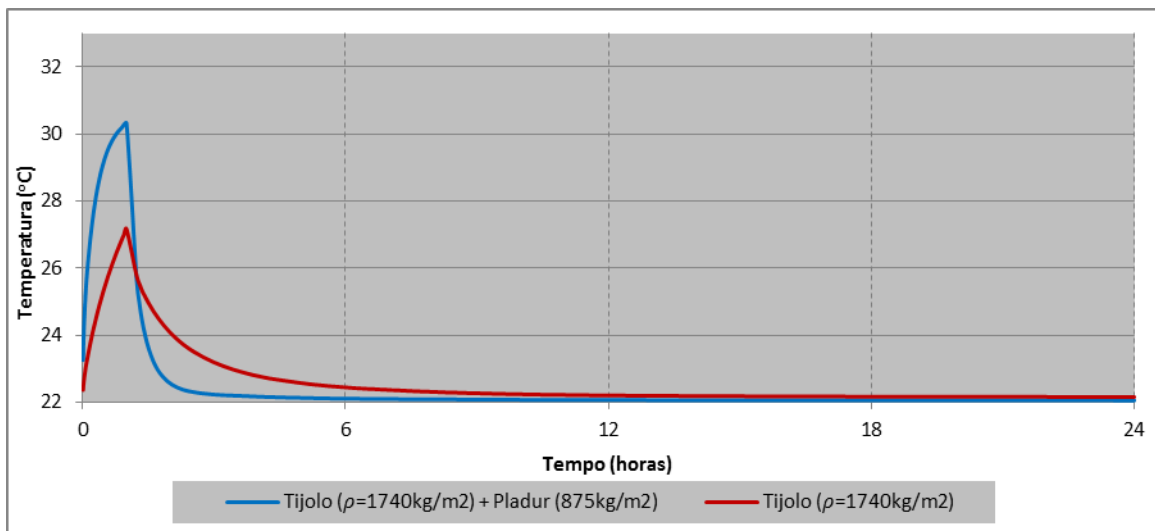


Figura 21 - Distribuição da temperatura da superfície interior para a envolvente de tijolo e tijolo após reabilitação, durante 24 horas. A radiação incidente tem 100 W/m^2 de potência e uma duração de uma hora.

Como era de esperar, os modelos de reabilitação atingem uma maior temperatura superficial. A diminuição da temperatura, após as duas horas de simulação, é igualmente mais acentuada. Verifica-se o novo equilíbrio térmico a partir das 3 e 6 horas de simulação, respectivamente, para os modelos de betão e tijolo com gesso cartonado.

A camada de ar actua como isolante térmico, dificultando a transferência de calor entre o pladur e a restante parede. A camada de gesso cartonado é caracterizada por uma espessura e uma densidade reduzidas. Como resultado, a quantidade de massa directamente exposta à radiação é muito menor, quando comparada com os modelos anteriores. Consequentemente, a temperatura atingida pela parede é significativamente superior.

3.4.4.2 Potência calorífica

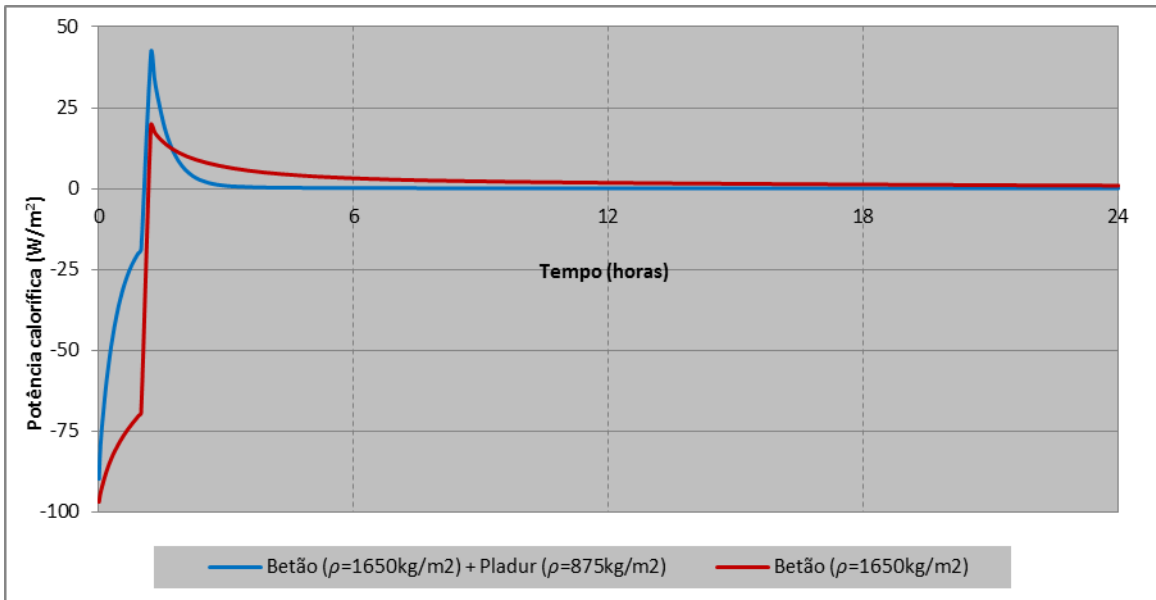


Figura 22 - Distribuição da potência calorífica libertada pela superfície interior para a parede de betão e betão após reabilitação, durante 24 horas. A radiação incidente tem 100 W/m^2 de potência e uma duração de uma hora.

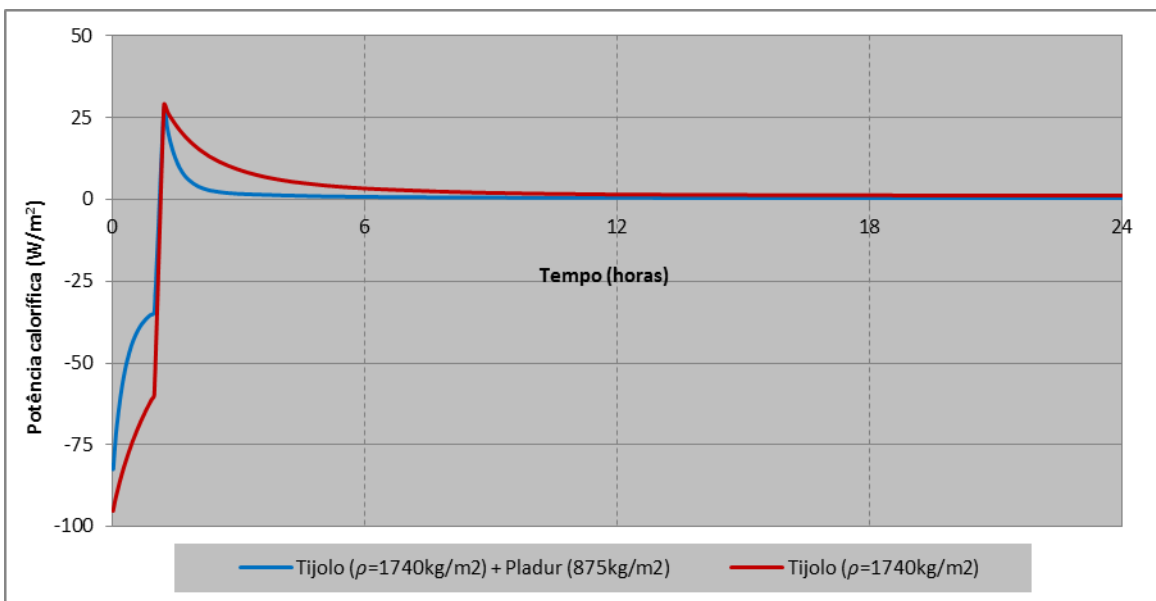


Figura 23 - Distribuição da potência calorífica libertada pela superfície interior para a parede de tijolo e tijolo após reabilitação, durante 24 horas. A radiação incidente tem 100 W/m^2 de potência e uma duração de uma hora.

A Figura 22 confirma o resultado anterior, verifica-se uma potência calorífica máxima para o modelo reabilitado. Mostra que, até às 3 horas de simulação, é libertada toda a potência calorífica armazenada na primeira hora.

A Figura 23 confirma a libertação da potência calorífica entre as primeiras 6 horas de simulação, como sugeriam os resultados da distribuição da temperatura. Contrariamente ao esperado, o valor máximo atingido é praticamente igual entre os dois modelos da parede de tijolo. A diferença entre os máximos atingidos para os modelos reabilitados está, provavelmente, na quantidade de calor libertado entre as 3 e as 6 horas de simulação.

3.5 Resumo da análise da caracterização térmica de uma parede isolada

A variação da quantidade de radiação incidente resulta na variação da temperatura máxima das superfícies e da potência calorífica libertada. Quanto maior o tempo de incidência e a intensidade da radiação, maior o valor da temperatura registada. Na superfície interior o valor máximo coincide com o momento em que a radiação deixa de incidir na parede, e na superfície oposta (a isolada) regista-se 2 a 4 horas depois, consoante o material. A potência calorífica verifica uma variação semelhante, quanto maior a intensidade de radiação maior o valor da potência máxima libertada e maior o tempo de restituição do calor ao ambiente.

A parede de tijolo, para as mesmas condições, apresenta valores superiores de temperatura e de potência calorífica libertada.

A análise de soluções de reabilitação, caracterizadas pela colocação de gesso cartonado na superfície da parede que recebe radiação solar, demonstraram uma menor capacidade em armazenar energia calorífica como resultado do isolamento da massa térmica, exposta à radiação, relativamente à restante parede. As temperaturas atingidas por estes dois modelos, assim como as potências caloríficas registadas, revelaram-se significativamente superiores às dos modelos não-reabilitados. A reduzida inércia destes modelos resulta numa elevada intensidade da potência calorífica e na libertação rápida do calor armazenado. O equilíbrio térmico entre a parede e o ambiente é novamente alcançado no intervalo de 2 a 5h depois de atingir o pico de temperatura máxima.

4 Análise da influência da inércia térmica no comportamento térmico de um espaço

O presente capítulo tem como objectivo analisar a variação da inércia térmica no comportamento térmico de um espaço localizado na cidade do Porto. A geometria considerada é a de um espaço unicelular com um vão envidraçado. O comportamento térmico do espaço foi avaliado para as quatro diferentes orientações, Norte, Sul, Este e Oeste. A envolvente foi dividida em quatro patamares de áreas distintas e foi analisado, para cada patamar, uma sequência de seis espessuras consecutivas, entre zero e trinta centímetros. Para cada espessura foram ainda analisados três tipos de betão com diferentes propriedades térmicas, como ilustra a Figura 24.

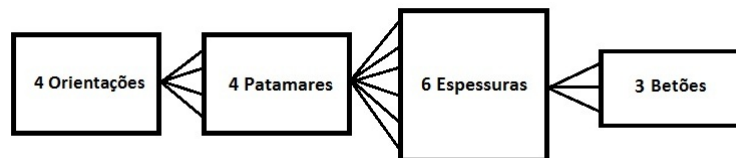


Figura 24 - Sequência da variação da massa térmica.

Os resultados serão apresentados com base na distribuição da temperatura operativa, durante a estação de aquecimento. A análise foi feita de duas formas distintas. A primeira foi feita com uma base diária, para dois conjuntos de dias característicos e a segunda, com base sazonal, para toda a estação de aquecimento. A nível sazonal é feita a análise da amplitude térmica e da temperatura operativa média, tendo como base a teoria do conforto adaptativo. O objectivo é manter a temperatura operativa dentro dos limites do conforto térmico, o que implica uma amplitude térmica reduzida.

A inércia térmica, por definição, representa a capacidade de um material em absorver e armazenar energia térmica. Segundo o RCCTE, em edifícios, pode ser quantificada pela razão entre o somatório de massa útil da envolvente e a área de pavimento (kg/m^2) [RCCTE 1989].

Antes da apresentação dos resultados será exposto, em primeiro lugar, a caracterização do regime climático e os respectivos dias característicos seleccionados para análise, escolhidos para representar duas situações distintas, dias de céu limpo e dias de céu encoberto. Em segundo lugar, a caracterização do espaço, que envolve a definição da geometria, materiais utilizados, estrutura da envolvente e as condições de fronteira. Por último descreve-se a metodologia de análise de forma a facilitar a compreensão dos resultados apresentados.

Para executar as simulações foi escolhido o software de cálculo *EnergyPlus* Versão 7.2 (2012). O *EnergyPlus* é um software que permite simular o comportamento térmico e energético de edifícios, nomeadamente em questões de aquecimento, arrefecimento, ventilação e iluminação. A simulação segue um conjunto de passos que possibilitam a análise de um grande número de parâmetros. Em primeiro lugar é definida a geometria e características do espaço a simular, tais como materiais utilizados e as condições de fronteira. Em segundo lugar são definidos os parâmetros que se quer controlar. Em último lugar o software efectua a simulação com base num ficheiro de dados climáticos definido pelo utilizador [“Basic Concepts Manual” 2012].

4.1 Caracterização do clima

O Porto tem um clima mediterrâneo caracterizado por um inverno com temperaturas que oscilam, normalmente, entre 5 e 14°C, e um número de graus-dia de aquecimento de 1610 [RCCTE 1989]. A radiação solar global, durante a estação de aquecimento, apresenta um valor médio de, aproximadamente, 100W/m² e um valor máximo de, sensivelmente, 890W/m².

A Figura 25 ilustra a variação da temperatura e radiação global para o Porto, na estação de aquecimento. Os valores estão representados através de um registo horário.

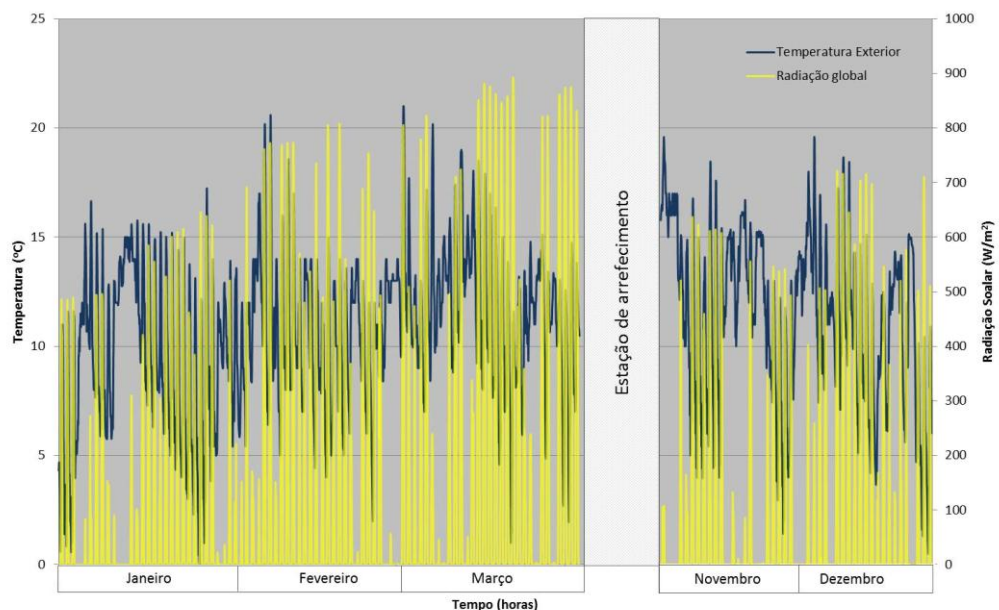


Figura 25 - Distribuição da temperatura e radiação global para a cidade do Porto, nos meses de aquecimento.

Além da análise sazonal, feita para o total dos cinco meses apresentados, a análise incide também em dias característicos distintos. Para o efeito foram escolhidos dois períodos característicos de três dias cada, um caracterizado por uma grande amplitude térmica e elevada radiação solar directa, e outro com uma reduzida amplitude e ausência de radiação solar directa. Os períodos escolhidos são, respectivamente, entre 20 e 21 de Janeiro e entre 25 e 27 de Dezembro, representados na Figura 26 e Figura 27.

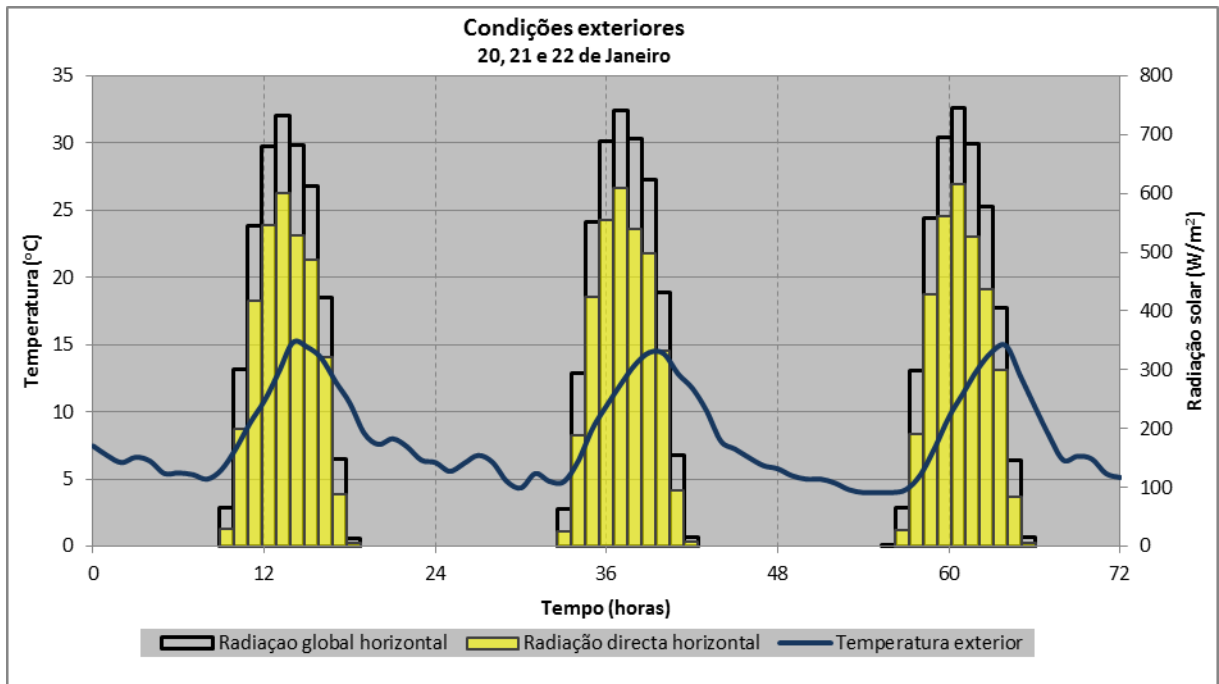


Figura 26 - Distribuição da temperatura exterior e radiação solar para os dias característicos de Janeiro.

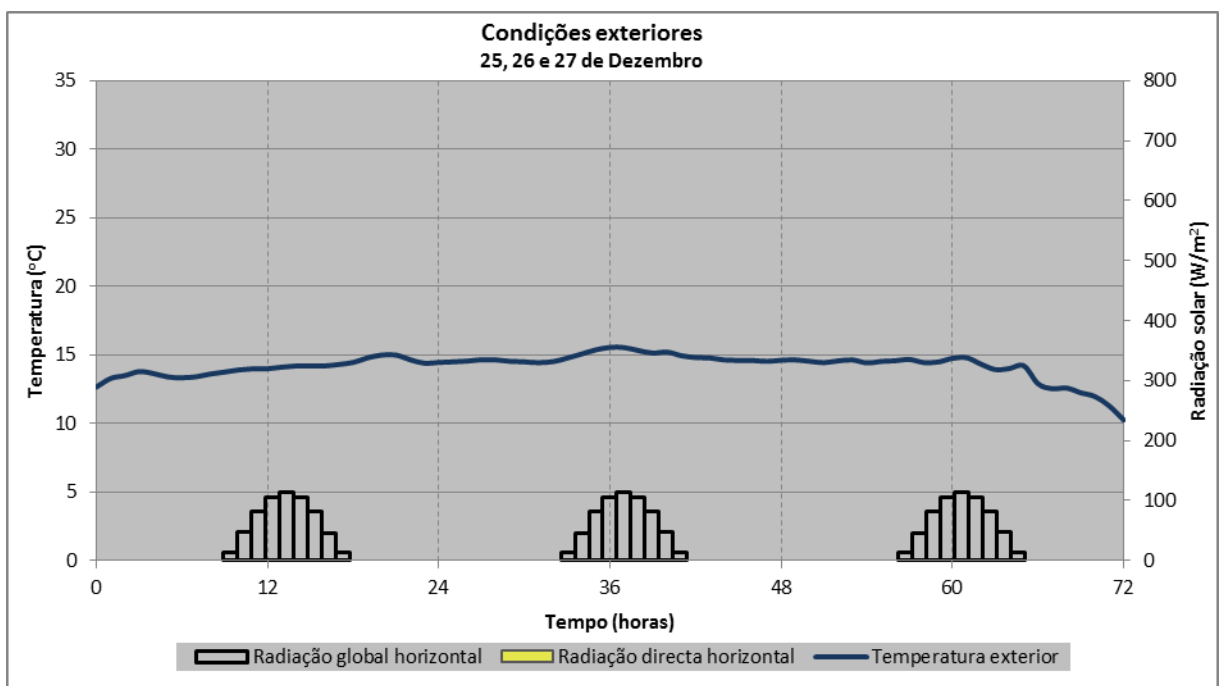


Figura 27 - Distribuição da temperatura exterior e radiação solar para os dias característicos de Dezembro.

A Figura 26 mostra a proximidade entre os valores da radiação global horizontal e a radiação directa horizontal, o que seria de esperar para um dia com céu limpo. A Figura 27 mostra a ausência de radiação solar directa e a reduzida radiação global horizontal, representativa de um dia encoberto.

O objectivo de escolher dois períodos distintos é analisar o impacto da inércia térmica face a duas situações climáticas distintas.

4.2 Caracterização do espaço

A modelação do espaço teve como objectivo representar uma situação tão real quanto possível. Para que o espaço fique totalmente definido foi, em primeiro lugar, definida a geometria do espaço. Estando completa a geometria serão caracterizados os materiais e definidos os constituintes de cada superfície da envolvente. O comportamento térmico de cada superfície, face aos elementos com que faz fronteira, será definido em último lugar.

4.2.1 Geometria

A geometria e dimensões escolhidas pretendem representar uma sala. A geometria do pavimento escolhida tem 4 m de largura e 7 m de comprimento, que resulta numa área útil de 28 m². A Figura 28 representa o espaço dimensionado com as respectivas medidas, assim como a numeração referente a cada superfície. A correspondência entre a numeração e o nome da superfície é feita através da Tabela 6.

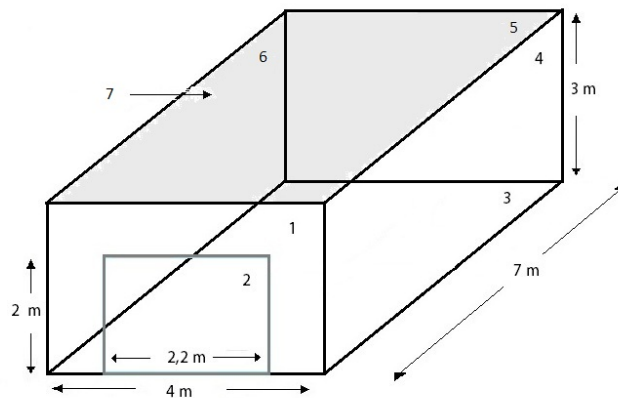


Figura 28 - Geometria da sala com as respectivas dimensões e numeração de superfícies.

Tabela 6 - Correspondência entre o número de identificação e o nome da superfície.

Número	1	2	3	4	5	6	7
Nome	Fachada exterior	Envidraçado	Pavimento	Parede lateral D	Parede posterior	Parede lateral E	Cobertura

4.2.2 Materiais utilizados

A Tabela 7 apresenta a listagem dos materiais utilizados e respectivas características. De modo a facilitar a diferenciação dos três tipos de betão, a sua nomenclatura foi alterada. Passam a ser referenciados por ordem crescente de densidade, “Betão leve” (1000 kg/m³), “Betão padrão” (1650 kg/m³) e “Betão pesado” (2400 kg/m³).

Para o envidraçado, foi escolhido um vidro duplo cujas propriedades estão especificadas na Tabela 8. O vidro é incolor e o seu factor solar é calculado tendo em conta a presença de uma cortina muito transparente pelo interior [RCCTE 1989].

Tabela 7 – Características térmicas dos Materiais utilizados na envolvente [LNEC 2006].

Material	Massa volúmica aparente seca, ρ [kg/m ³]	Condutibilidade térmica, λ [W/(m.°C)]	Calor específico, C_p [J/(kg.K)]
Betão estrutural	1650	0,84	840
Betão normal	2400	1,7	840
Betão isolante “resistente”	1000	0,36	840
Gesso cartonado	875	0,25	840
Reboco tradicional	1900	1,3	1050
Poliestireno expandido moldado (EPS)	14	0,045	1550

Tabela 8 – Propriedades e tipologia do envidraçado utilizado [RCCTE 1989].

Nome	Coefficiente de transmissão térmica, U [m ² .°C/W]	Factor solar, g
Envidraçado duplo com cortinas muito transparentes	3,3	0,63

4.2.3 Estrutura da envolvente

A fachada exterior é a única que permanecerá inalterada durante todo o processo de simulação. A sua estrutura está ilustrada na Figura 29, com a lista de materiais e respectivo coeficiente de transmissão térmica global expressos na Tabela 8. A tipologia de fachada escolhida é de parede simples, com isolamento térmico pelo interior.

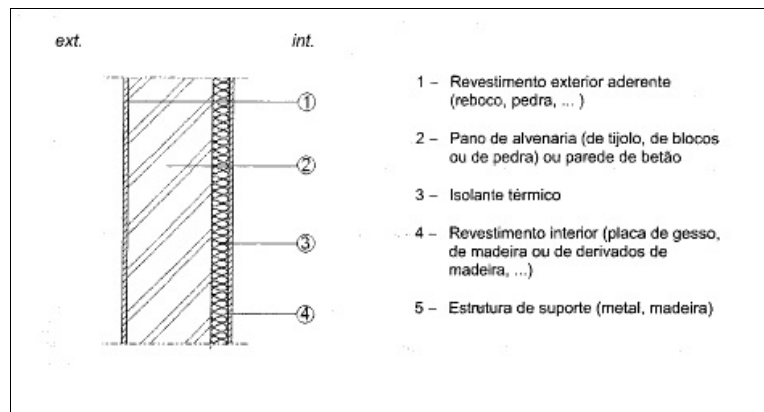


Figura 29 - Tipologia de uma parede simples de fachada, isolamento térmico pelo interior [LNEC 2006]

Tabela 9 - Lista de materiais constituintes da fachada exterior, respectivas espessuras e coeficiente de transmissão térmico global [LNEC 2006]

	1	2	3	4
Material	Reboco	Betão padrão	Poliestireno expandido moldado (EPS)	Gesso cartonado
Espessura [m]	0,025	0,2	0,04	0,02
Coefficiente de transmissão térmica global, U [m².°C/W]	0,66			

As restantes superfícies serão apenas constituídas por pladur ou betão. Não terão nenhuma cobertura nem isolamento, tendo apenas espessura variável conforme será abordado na descrição da metodologia.

4.2.4 Condições de fronteira e ganhos internos

O único contacto directo do espaço dimensionado com o exterior é feito através da fachada exterior. Como resultado, as restantes paredes são definidas como paredes interiores, só realizam trocas energéticas com outros espaços interiores. Estando a sala situada no 1º piso, também o pavimento e a cobertura estão limitadas a realizar trocas de energia com outros espaços interiores. Resumindo, e considerando que todo o edifício se encontra em equilíbrio energético, todas as superfícies com excepção para a fachada exterior são adiabáticas relativamente ao exterior.

O cálculo da convecção interior é feito através de um algoritmo de convecção natural variável que se baseia nas diferenças de temperatura do espaço, escolhido por defeito pelo software. O

cálculo da convecção exterior é feito através do modelo de Klems e Yazdanian [Yazdanian 1994] para superfícies de rugosidade significativa, escolhido também por defeito.

Embora não seja uma condição de fronteira, a definição da ventilação do espaço está relacionada com a convecção interior. As infiltrações são caracterizadas por uma renovação horária. O cálculo foi feito segundo a norma EN 12207, que atribui 0,9 renovações horárias a uma caixilharia sem classificação. Esse valor é depois acrescido de $0,1h^{-1}$, resultado da dimensão do vão envidraçado ser superior a 15% da área útil de pavimento [RCCTE 1989]. Considerou-se que o valor das infiltrações se mantem constante durante todo o ano.

Os ganhos internos contribuem para o aumento da temperatura interior. Considerou-se três tipos de ganhos internos, equipamentos, iluminação e pessoas. Para os equipamentos foi considerada apenas uma televisão a que corresponde uma potência calorífica de 100W. Para a iluminação foi considerado um valor médio de 40W. Para as pessoas, a potência calorífica está dependente do tipo de actividade praticada, e do número de pessoas. A actividade definida foi apenas permanecer sentado numa actividade sedentária que é equivalente a uma potência de 130W/pessoa. O número de ocupantes escolhido é 2, perfazendo então um total de 260W [3]. A Tabela 10 resume os ganhos internos definidos. Todos os ganhos internos apresentados apenas se fazem sentir, durante a semana, entre as 19 e as 23 horas, e durante o fim-de-semana entre as 14 e as 16 horas e as 19 e as 24 horas.

Tabela 10 - Lista de ganhos internos [ASHRAE 2010].

Ganho	Unidade	Valor
Número de ocupantes	Número	2
Actividade do ocupante	W/pessoa	130
Potência de iluminação	W	40
Potência dos equipamentos	W	100

4.3 Metodologia

As simulações foram estruturadas para progredir de forma crescente de um caso com a menor quantidade de inércia térmica possível até um caso com inércia elevada, neste caso, próxima de 1000 kg/m^2 .

De forma a compreender com maior pormenor a influência das condições exteriores na temperatura interior, foi criado um modelo base com o objectivo de representar um caso de inércia próxima de zero. Para o efeito, foi atribuída a toda a envolvente uma espessura de 1,5 centímetros de pladur, que totaliza uma inércia térmica de 47kg/m^2 . Este modelo servirá de comparação com os restantes, sendo realizado em primeiro lugar para as 4 orientações.

Tendo como base a razão entre áreas $RA = \text{Área exposta} / \text{Área de Pavimento}$, foram definidos 4 patamares de área diferentes. A Tabela 11 faz a correspondência entre os patamares definidos e as superfícies a simular.

Tabela 11 - Correspondência entre RA e as superfícies que serão simuladas.

Razão entre áreas	0,5	1	2	3
Superfície	Metade da Cobertura	Pavimento	Pavimento + Cobertura	Envolvente total
		Cobertura		

Para cada uma das superfícies ou conjuntos de superfícies apresentados na Tabela 11 foram realizadas seis simulações correspondentes a seis diferentes espessuras de material. Por ordem crescente, 2-5-10-15-20-30 centímetros, a que corresponde um aumento gradual de inércia térmica. Para cada espessura foram simulados os três tipos de betão. Por ordem crescente, betão leve (1000kg/m^3), betão padrão (1650kg/m^3) e betão pesado (2400kg/m^3). Este conjunto de simulações foi realizado para cada uma das quatro orientações. A Figura 30 ilustra a metodologia descrita nos parágrafos anteriores.

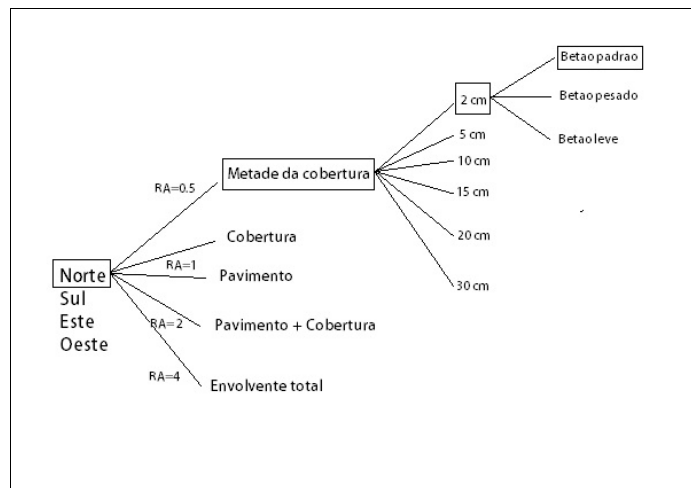


Figura 30 - Esquema em formato de árvore ilustrativo da sequência de simulações.

A fachada exterior foi a única que permaneceu inalterada em todo o processo de simulação, com o objectivo de manter constante o seu contributo para o comportamento térmico interior.

Através do somatório de todas as amplitudes diárias, para cada simulação, é possível obter um valor médio diário que representa toda a estação de aquecimento. Com base nos valores obtidos, é possível traçar uma curva que ilustre a evolução da amplitude média diária consoante o aumento da massa térmica, para os diferentes modelos.

4.4 Resultados

Com base na metodologia apresentada foram simulados e obtidos o mesmo número de resultados para todas as orientações.

A apresentação de resultados seguirá a ordem, Sul, Oeste, Norte e Este. Cada orientação será dividida em resultados diários e resultados sazonais. Nos resultados diários, em primeiro lugar, serão apresentados os modelos base para ambos os dias característicos. Dado a sua distribuição da temperatura operativa para estes dias ser um ponto de referência, estará representada nos restantes modelos de forma a facilitar comparações. As restantes

configurações serão apresentadas por ordem crescente de área exposta, do pavimento à envolvente na totalidade. Para cada configuração serão em primeiro lugar apresentados os resultados para os dias característicos com radiação solar directa, seguidos dos dias sem radiação.

A grande exposição solar do espaço orientado a Sul levou a que a exposição dos resultados para esta orientação tenha um maior relevo, sendo igualmente mais extensa. Os resultados relativos a algumas configurações serão omitidos para as restantes orientações dado que, embora apresentem valores muito diferentes, seguem a mesma distribuição e, portanto, o mesmo impacto térmico no espaço.

4.4.1 Orientação Sul

4.4.1.1 Resultados diários

Os resultados diários para a orientação Sul estão ilustrados da Figura 31 à Figura 43.

Da Figura 33 à Figura 37, ilustram-se os resultados relativos à colocação de massa no pavimento e à colocação de massa na cobertura. A influência da radiação directa incidente nas superfícies com massa reflecte-se no comportamento da temperatura operativa.

O aumento progressivo da superfície exposta, como era de esperar, promove a uma maior estabilidade da temperatura interior, como se pode verificar da Figura 38 à Figura 43.

4.4.1.1.1 Envolvente interior com inércia mínima

A Figura 31 e a Figura 32 representam os dois modelos base, onde o aumento da temperatura operativa com a incidência de radiação. Exibem igualmente a influência dos ganhos internos.

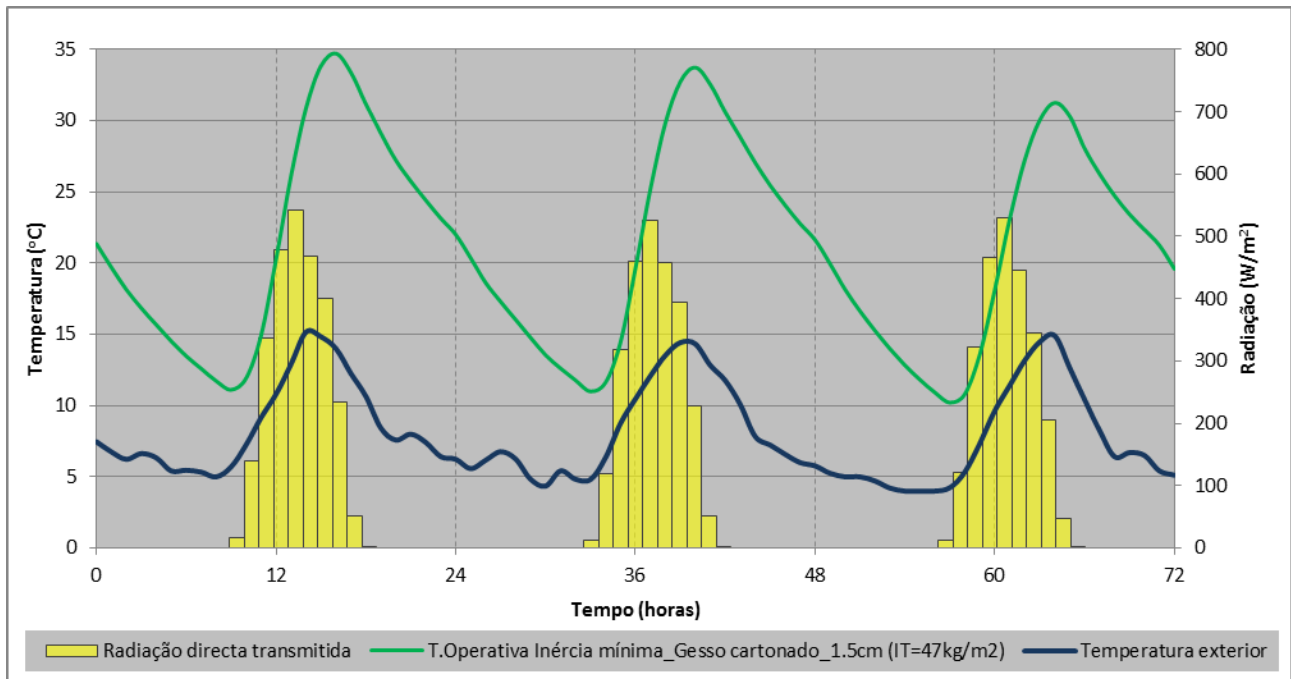


Figura 31 – Distribuição da temperatura operativa para o modelo base de inércia mínima, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Sul.

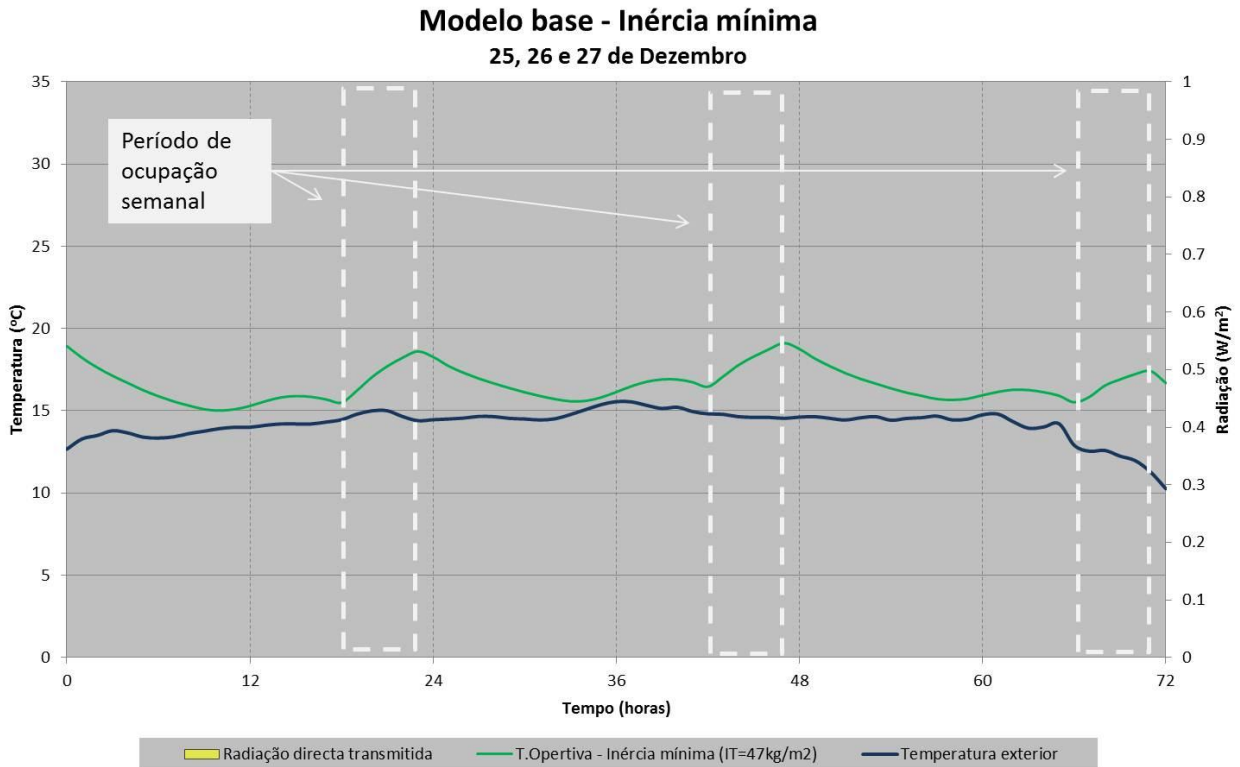


Figura 32 – Distribuição da temperatura operativa para o modelo base de inércia mínima, nos dias característicos de Dezembro. Orientação Sul.

As duas distribuições, correspondentes aos modelos base, ilustram o comportamento aproximado do que seria um espaço com inércia térmica próxima de zero. A evolução das condições interiores face à alteração das condições exteriores é praticamente simultânea. A amplitude térmica interior reflecte, para os dois casos, a reduzida capacidade de absorver energia térmica, inerente à pouca massa do espaço. Na Figura 31, a amplitude térmica exterior, de aproximadamente 10°C, e a grande quantidade de radiação directa transmitida, resultam numa elevada amplitude da temperatura operativa. A amplitude térmica interior regista valores duas vezes superiores à registada no exterior.

Para os dias característicos de Dezembro, Figura 32, os ganhos internos resultam num aumento imediato da temperatura operativa. Ambos os casos representam as duas situações menos favoráveis para o conforto térmico, daí serem o ponto de referência para os restantes resultados.

4.4.1.1.2 Envolvente interior com pavimento ou cobertura massivos

Impacto do pavimento na Temperatura interior

20, 21 e 22 de Janeiro

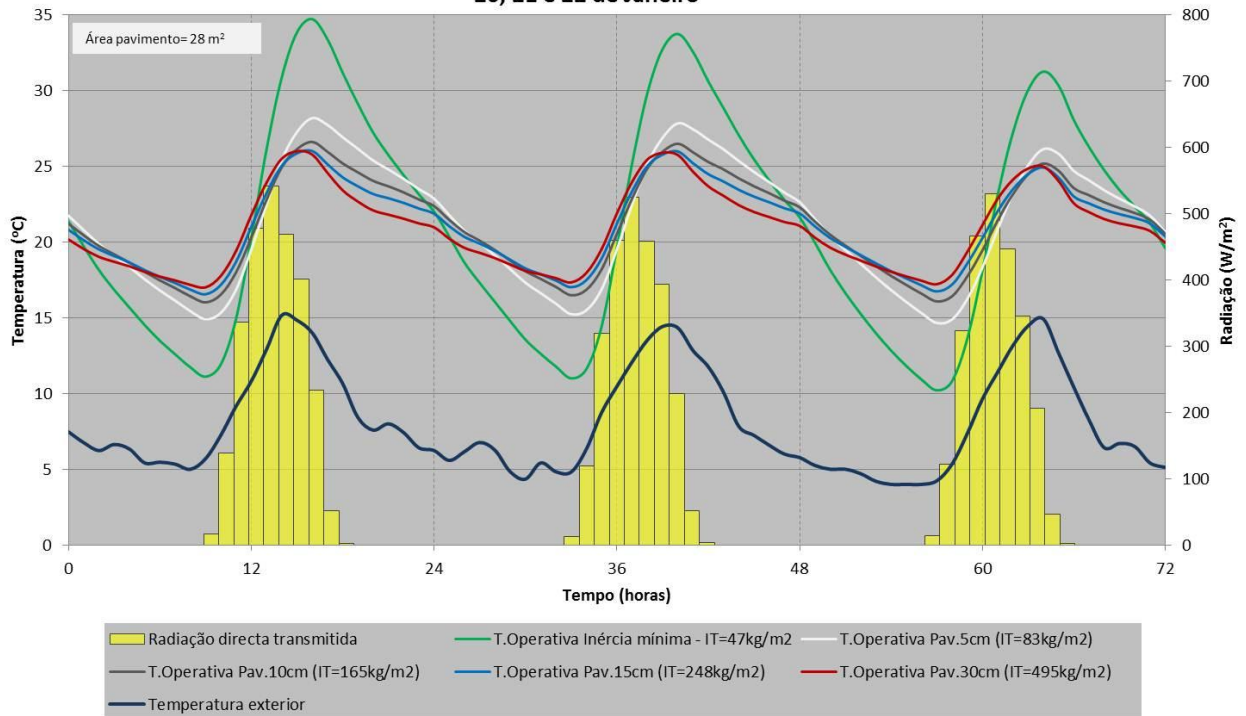


Figura 33 – Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de pavimento, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Sul.

Impacto do pavimento na Temperatura interior

25, 26 e 27 de Dezembro

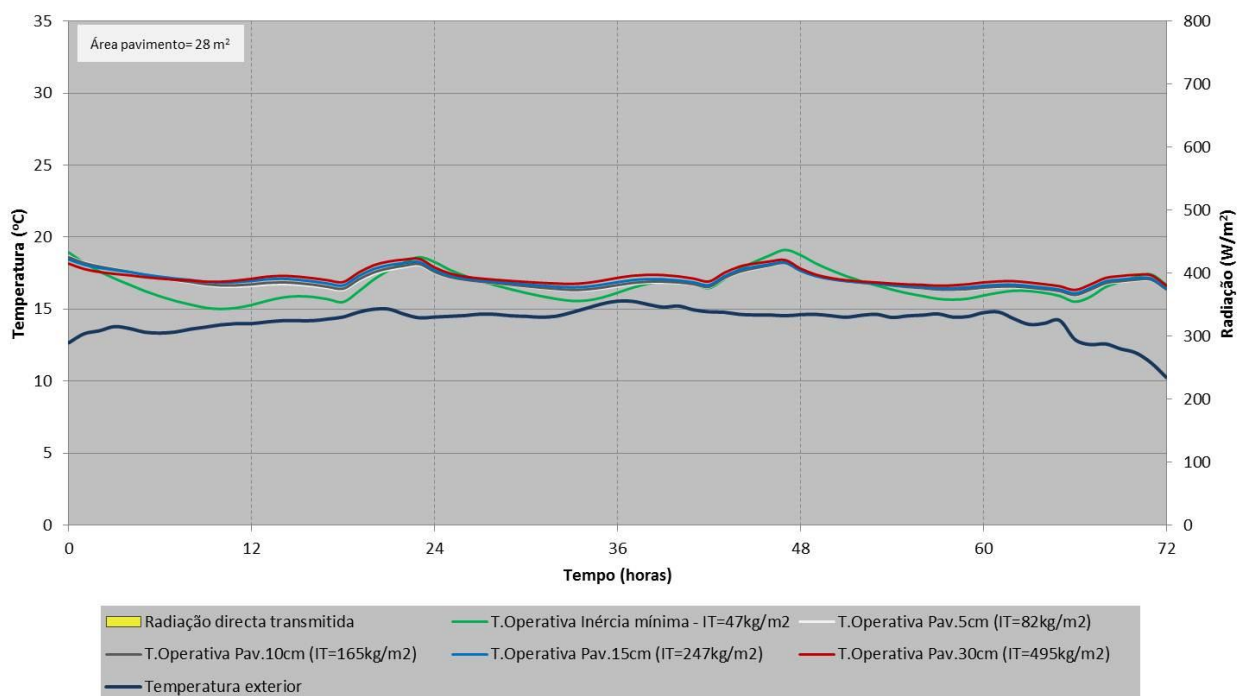


Figura 34 – Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras do pavimento, nos dias característicos de Dezembro. Orientação Sul.

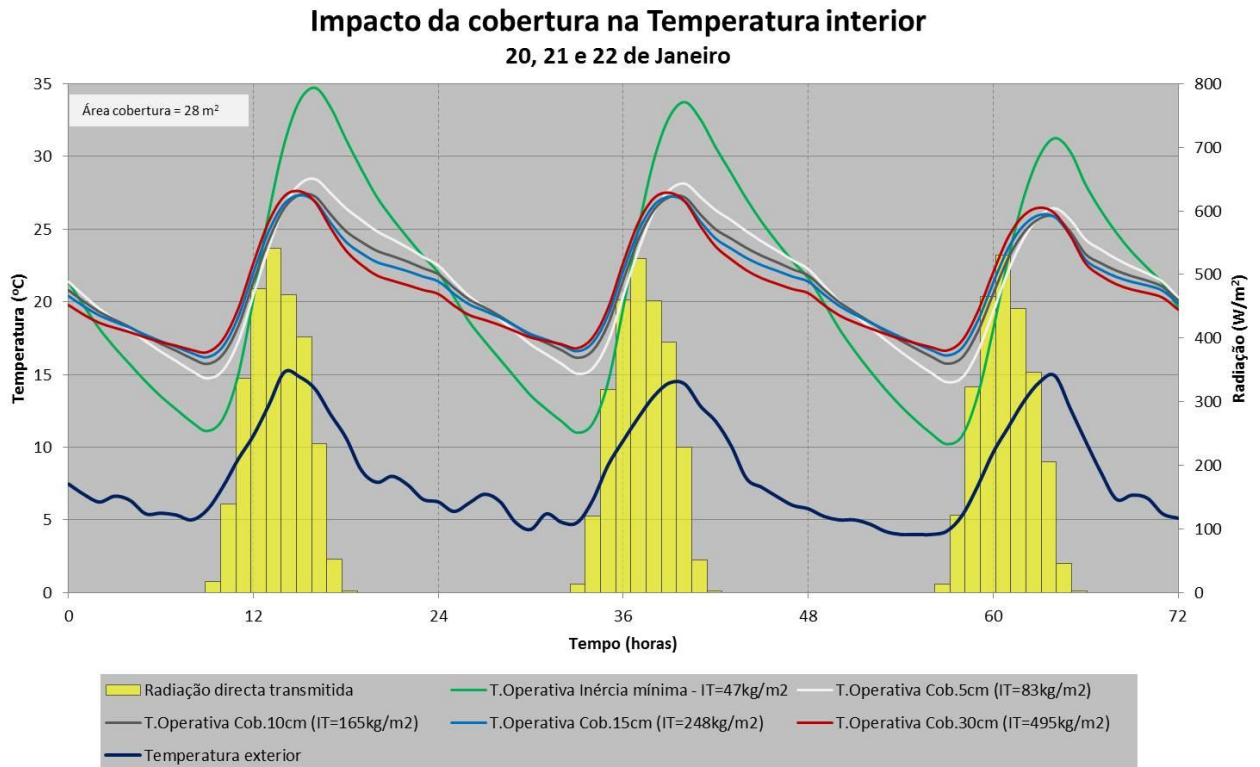


Figura 35 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de cobertura, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Sul.

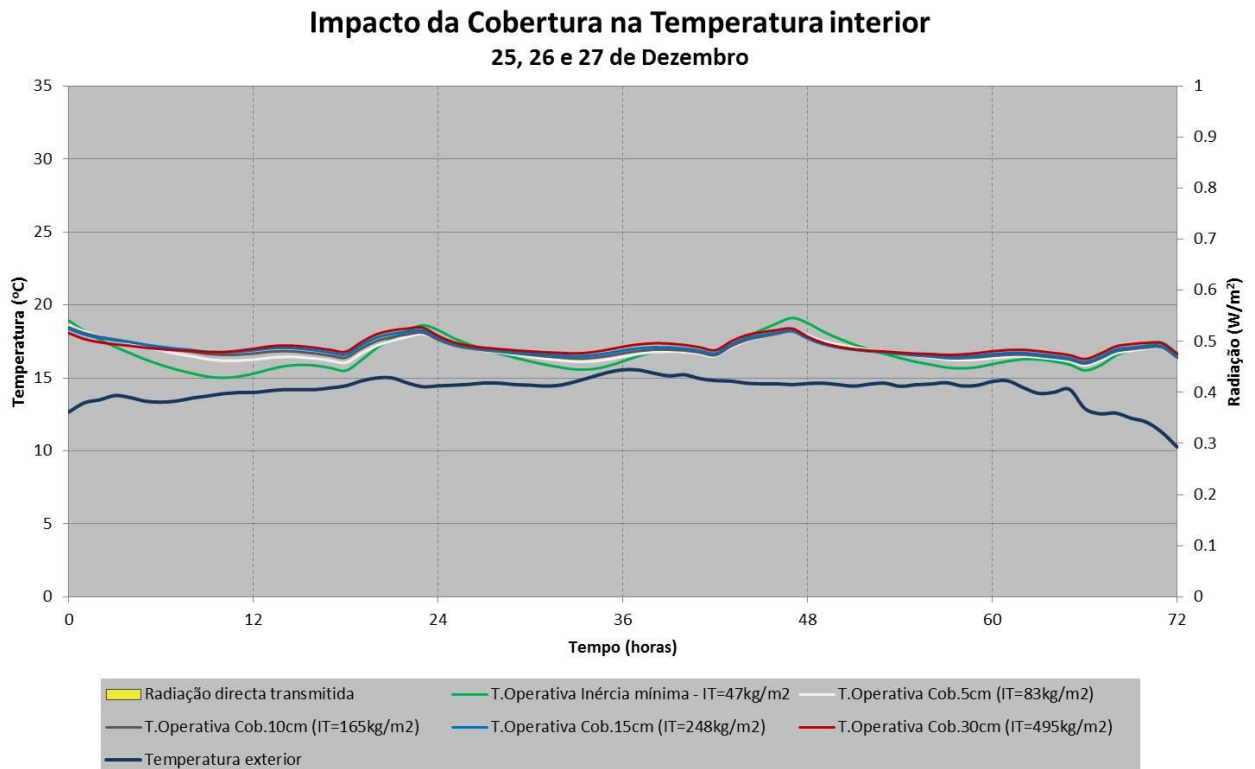


Figura 36 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras do cobertura, nos dias característicos de Dezembro. Orientação Sul.

A adição de massa nas superfícies do pavimento e da cobertura resulta, em ambas, numa redução significativa da amplitude térmica interior. De uma forma geral, para os dias característicos de Janeiro, o aumento da espessura resulta num aumento da temperatura operativa mínima, e numa redução da temperatura operativa máxima. A Figura 33 e Figura 35 mostram que redução da amplitude térmica tem maior evidência entre as curvas de 5 e 15 centímetros, sendo reduzida a diferença entre as curvas de 15 e 30 centímetros. Tal facto sugere um limite crítico de espessura, ponto a partir do qual o aumento da espessura de uma superfície não resulta numa diminuição significativa da amplitude térmica.

A Figura 34 e a Figura 36 mostram que, para os dias característicos de Dezembro, os resultados para as duas superfícies são equivalentes, como consequência da ausência de radiação directa. O mesmo factor é responsável pelo reduzido impacto do aumento de inércia na temperatura operativa. Contudo, quanto maior espessura da superfície exposta menor a amplitude registada.

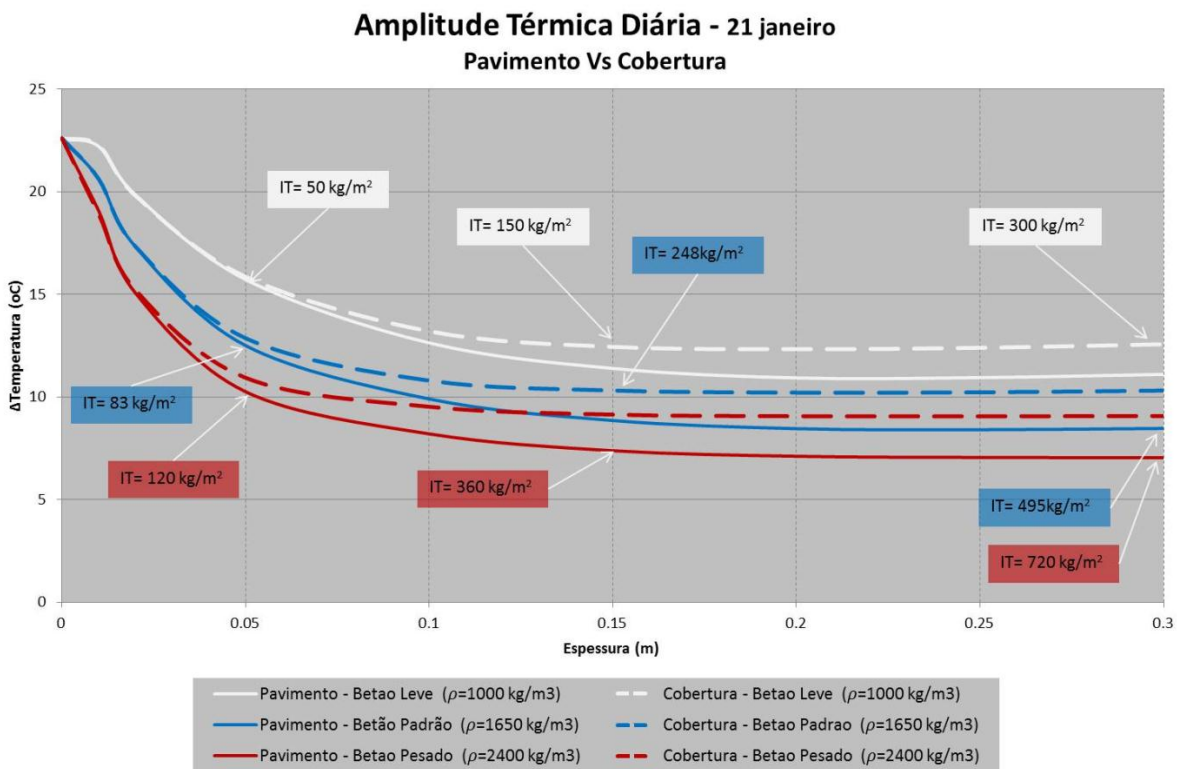


Figura 37 - Comparação entre as amplitudes térmicas diárias referentes às configurações do pavimento e da cobertura. A espessura varia entre 0 e 30 centímetros, para três diferentes massas volúmicas. Resultados para o dia 21 de Janeiro, orientação Sul.

A Figura 37 mostra com maior pormenor o impacto que cada uma das superfícies tem na amplitude térmica interior, para o dia 21 de Janeiro. Para qualquer espessura, a redução da amplitude térmica verificada para o pavimento é superior, como resultado da grande quantidade de radiação directa incidente. Tomando como exemplo uma espessura de 15 centímetros, e para o betão padrão, o pavimento regista uma amplitude térmica, aproximadamente, 2°C inferior à verificada para a cobertura. Ao contrário do que acontece com a cobertura, a colocação de massa no pavimento tem impacto directo na quantidade de radiação directa transmitida que é absorvida. O aumento da espessura aumenta significativamente a quantidade de radiação absorvida. Como resultados, regista-se uma diminuição da potência calorífica libertada pela superfície que se mantém elevada por mais

tempo, o que diminui a temperatura interior máxima e aumenta a temperatura mínima atingida pela superfície. Uma maior temperatura mínima da superfície afecta positivamente a temperatura mínima operativa, que aumenta também.

A Figura 37 ilustra igualmente a influência da densidade do material na flutuação térmica interior. O aumento da densidade resulta, em ambas as superfícies, numa diminuição da amplitude térmica. Tendo em consideração o impacto do pavimento na temperatura operativa, a mesma espessura pode registar uma diferença até 4°C, quando comparando os dois betões extremos. Assim como o aumento de espessura, o aumento da densidade tem como consequência uma maior massa por área de pavimento, o que resulta numa maior quantidade de energia absorvida pela superfície. Quando comparado o efeito do aumento da densidade com o aumento de espessura, para a mesma inércia térmica resultante, comprova-se que o aumento de densidade garante uma maior redução da amplitude térmica interior.

Para qualquer uma das densidades utilizadas, a partir dos 15 centímetros, o aumento de espessura traduz-se numa redução significativa da amplitude térmica.

4.4.1.1.3 Envolvente interior com pavimento e cobertura massivos

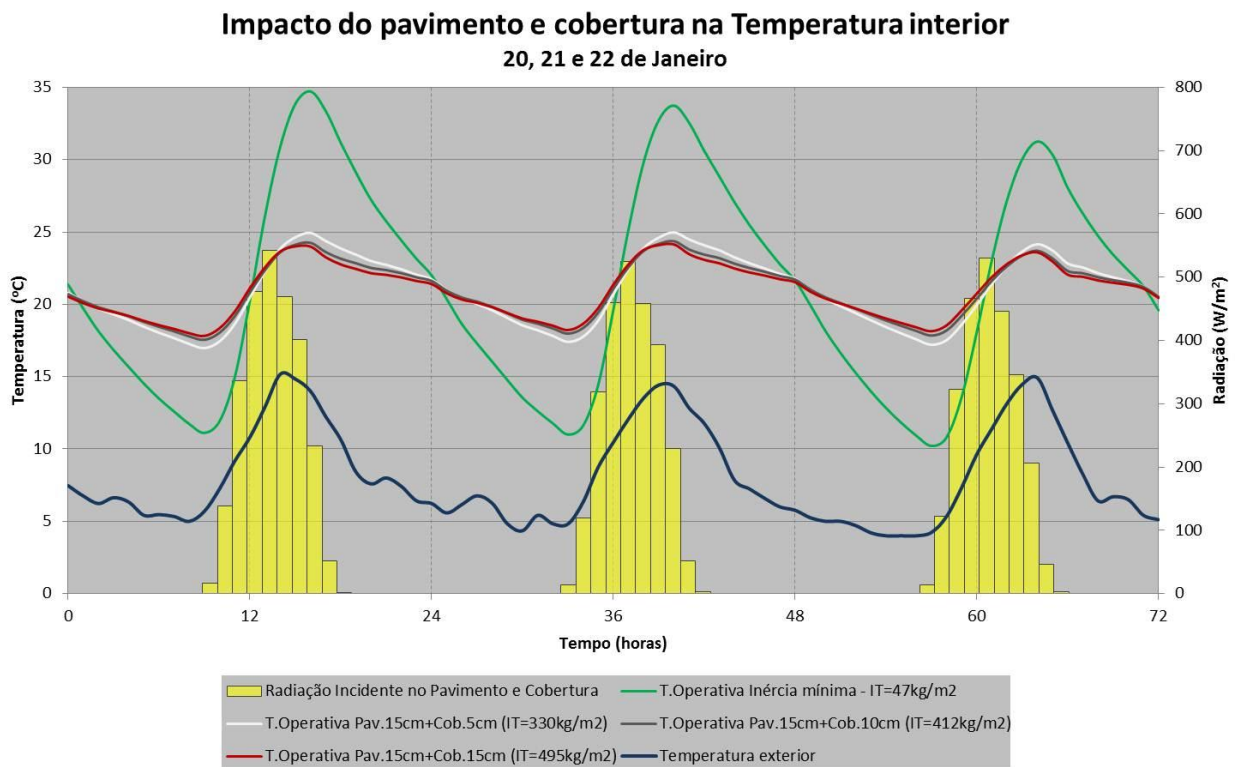


Figura 38 – Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras da combinação do pavimento e da cobertura, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Sul.

Impacto do pavimento e cobertura na Temperatura interior 25, 26 e 27 de Dezembro

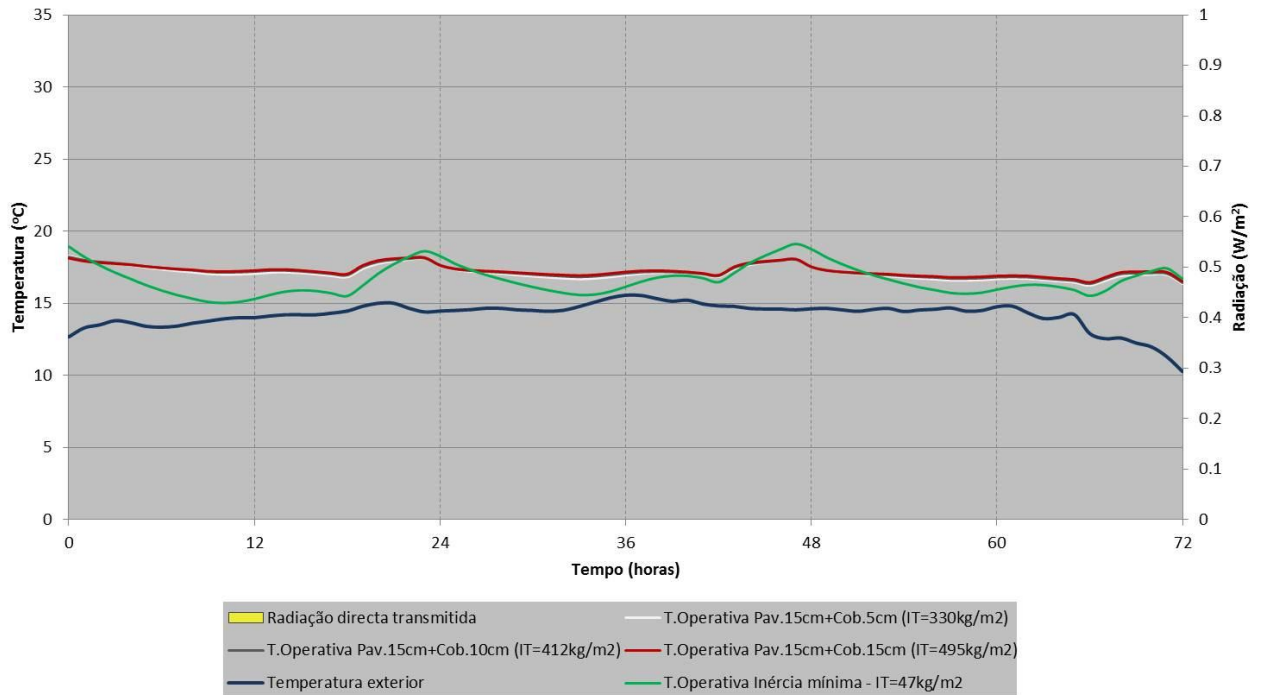


Figura 39 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras da combinação do pavimento e da cobertura, nos dias característicos de Dezembro. Orientação Sul.

4.4.1.1.4 Envolvente interior massiva

Impacto da envolvente total na Temperatura interior 20, 21 e 22 de Janeiro

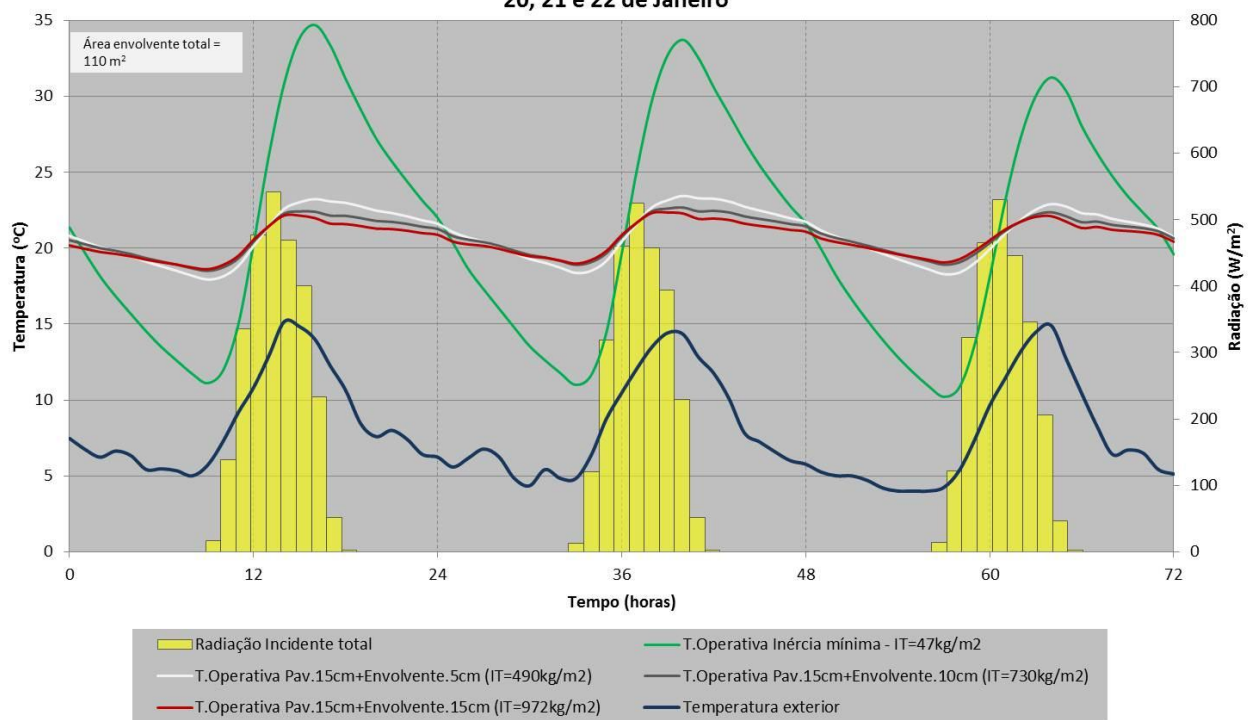


Figura 40 – Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de toda a envolvente, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Sul.

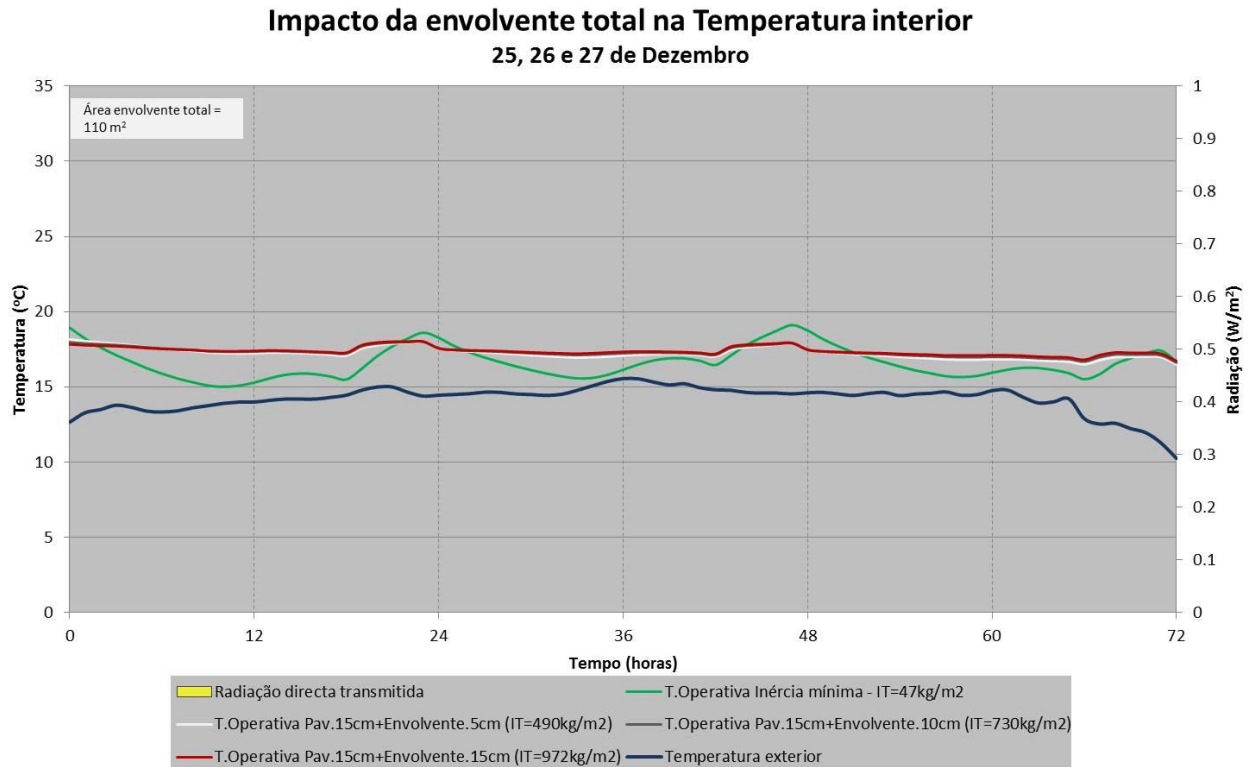


Figura 41 – Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de toda a envolvente, nos dias característicos de Dezembro. Orientação Sul.

Da Figura 38 à Figura 41 ilustra-se que, como esperado, o aumento da área exposta se traduz numa diminuição da amplitude térmica interior. Tal como o aumento de espessura do pavimento, o aumento da área exposta aumenta a capacidade de absorver e armazenar energia térmica, que resulta numa diminuição da flutuação da temperatura operativa.

Para uma inércia térmica forte ($>400\text{kg/m}^2$), a temperatura operativa praticamente não regista valores fora do intervalo de conforto térmico ($18,5 - 25^\circ\text{C}$), nos dias característicos de Janeiro. Contudo, valores equivalentes de inércia térmica não têm, obrigatoriamente, como resultado, distribuições de temperatura para os mesmos patamares térmicos. Para as mesmas condições, dois casos com uma inércia térmica semelhante e uma área exposta distinta apresentam resultados igualmente distintos. Tomando como exemplo a configuração de 30 centímetros de pavimento, a inércia térmica correspondente tem valor de 495kg/m^2 . Quando comparado com o mesmo valor de inércia térmica, mas o dobro da área exposta, a que corresponde 15 centímetros de pavimento e de cobertura, a amplitude térmica registada é significativamente superior.

4.4.1.1.5 Comparação entre patamares

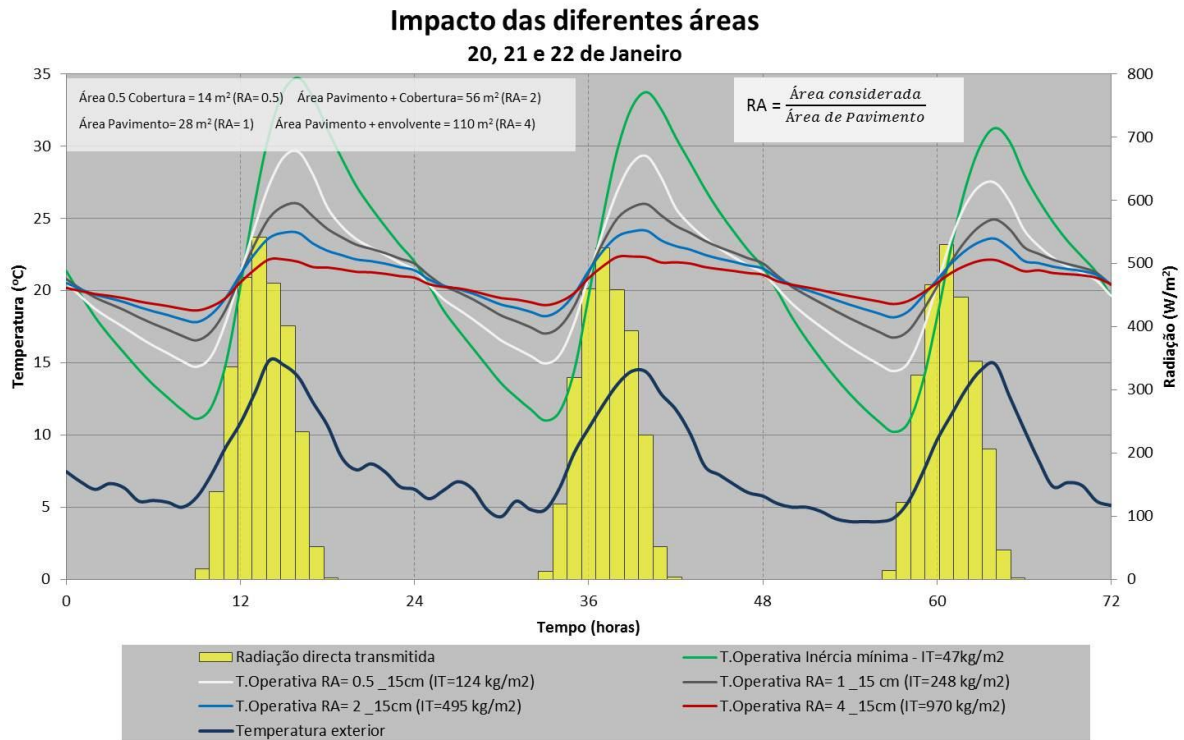


Figura 42 – Distribuição da temperatura operativa para diferentes áreas expostas, com espessura constante de 15 centímetros de betão padrão. Resultados para os dias característicos de Janeiro, orientação Sul.

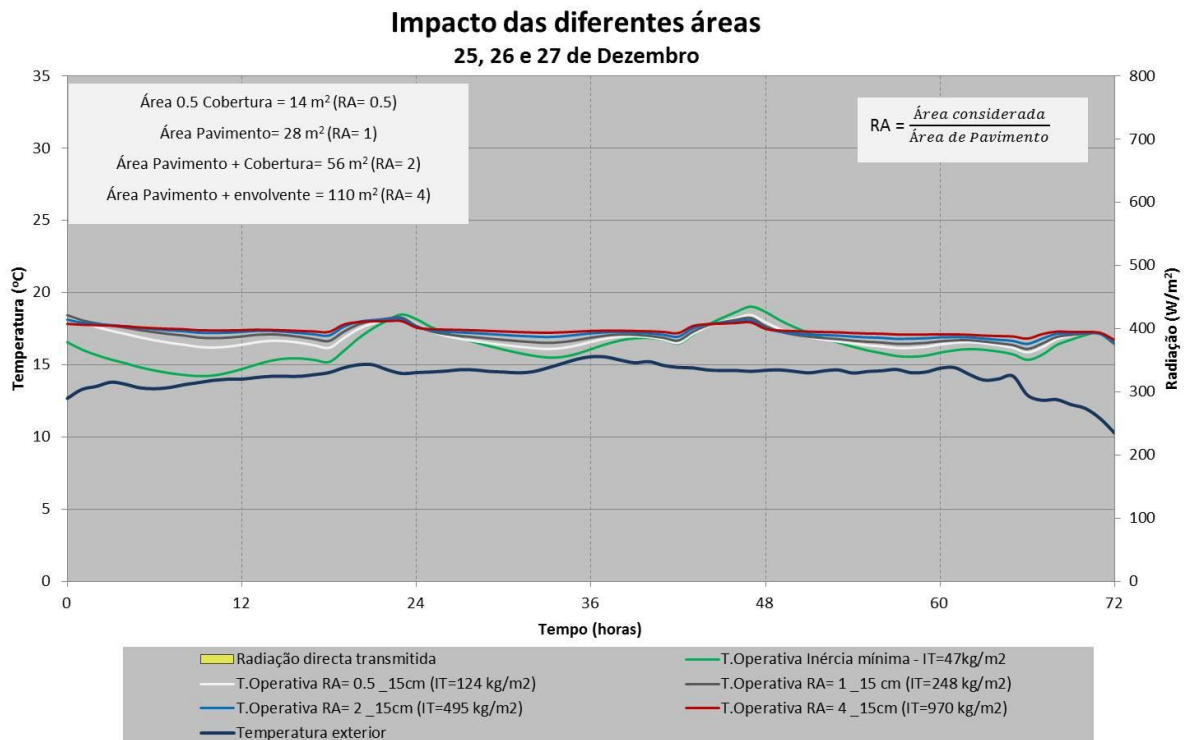


Figura 43 – Distribuição da temperatura operativa para diferentes áreas expostas, com espessura constante de 15 centímetros de betão padrão. Resultados para os dias característicos de Janeiro, orientação Sul.

Para os dias característicos de Janeiro, verifica-se uma redução na amplitude térmica interior de aproximadamente 19°C entre os dois casos extremos, de inércia mínima ($\Delta T \approx 22^\circ\text{C}$) e de envolvente total de 15 centímetros ($\Delta T \approx 3^\circ\text{C}$). Contudo, o valor da temperatura operativa média regista alterações pouco significativas, de aproximadamente 20°C para todos os modelos.

Tendo como base comparativa a Figura 42 e a Figura 43, os dias característicos de Dezembro não registam alterações significativas para o aumento da área exposta, assim como acontece para as configurações anteriores. A diferença entre as amplitudes térmicas dos casos extremos, inércia zero ($IT=47 \text{ kg/m}^2$) e envolvente total ($IT=970 \text{ kg/m}^2$), é pouco superior a 3°C. Para valores superiores a aproximadamente 300 kg/m^2 , a distribuição da temperatura operativa mantém-se praticamente inalterada.

4.4.1.2 Resultados sazonais

Os resultados das simulações ficariam incompletos sem a ilustração do que acontece a nível sazonal. Assim, a Figura 44 e Figura 46 representam a evolução do valor médio da amplitude térmica para toda a estação de aquecimento. A cada valor da espessura simulado, entre 0 e 30 centímetros, corresponde um valor médio da amplitude da temperatura operativa sazonal. Tal como na análise diária para o dia 21 de Janeiro, Figura 37, as duas figuras mostram que o aumento progressivo da espessura tende para um valor constante, tanto menor quanto maior a área exposta e a densidade do material utilizado. A relação entre a amplitude térmica interior e exterior é ilustrada na Figura 45. De forma a evidenciar o ponto em que as duas amplitudes tomam o mesmo valor médio, está referenciada no gráfico uma recta horizontal a traço descontínuo para $RA=1$. Para os pontos da curva representados a cima da recta, a amplitude interior média é superior à exterior, para pontos de valor inferior à curva, verifica-se o efeito oposto.

A Figura 47 mostra a distribuição da temperatura operativa média sazonal para os quatro patamares.

Amplitude térmica diária (valor médio na estação aquecimento) Pavimento Vs Cobertura

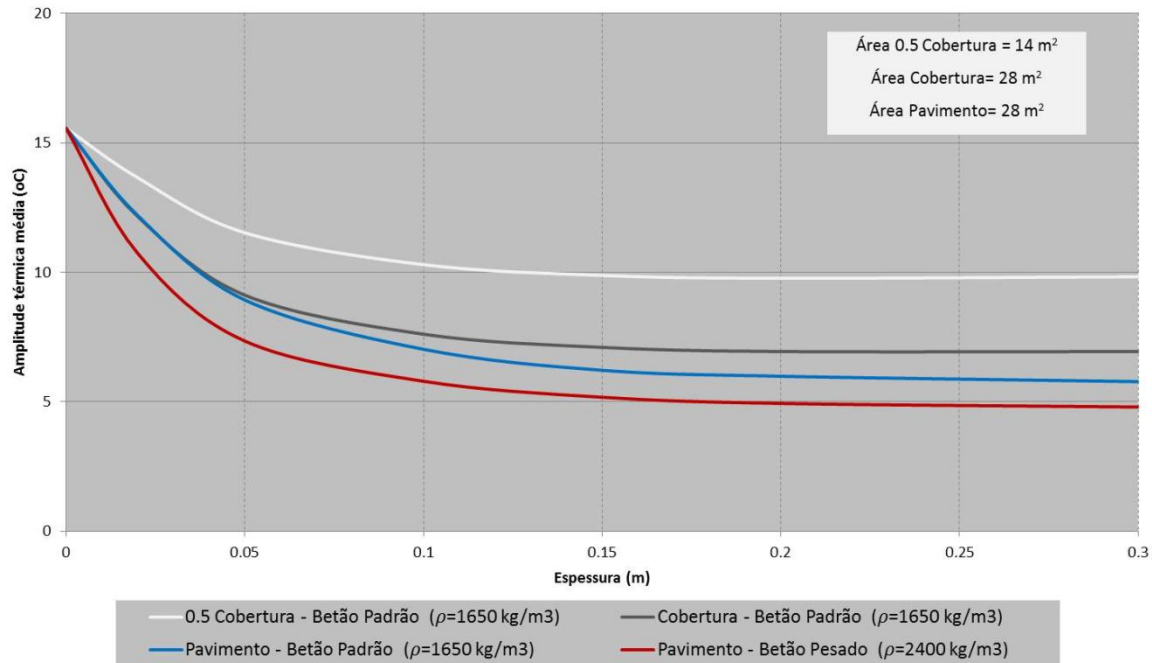


Figura 44 - Evolução do valor médio da amplitude térmica diária segundo um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para as superfícies do pavimento, cobertura e metade da cobertura na estação de aquecimento, orientação Sul.

Razão média entre amplitudes

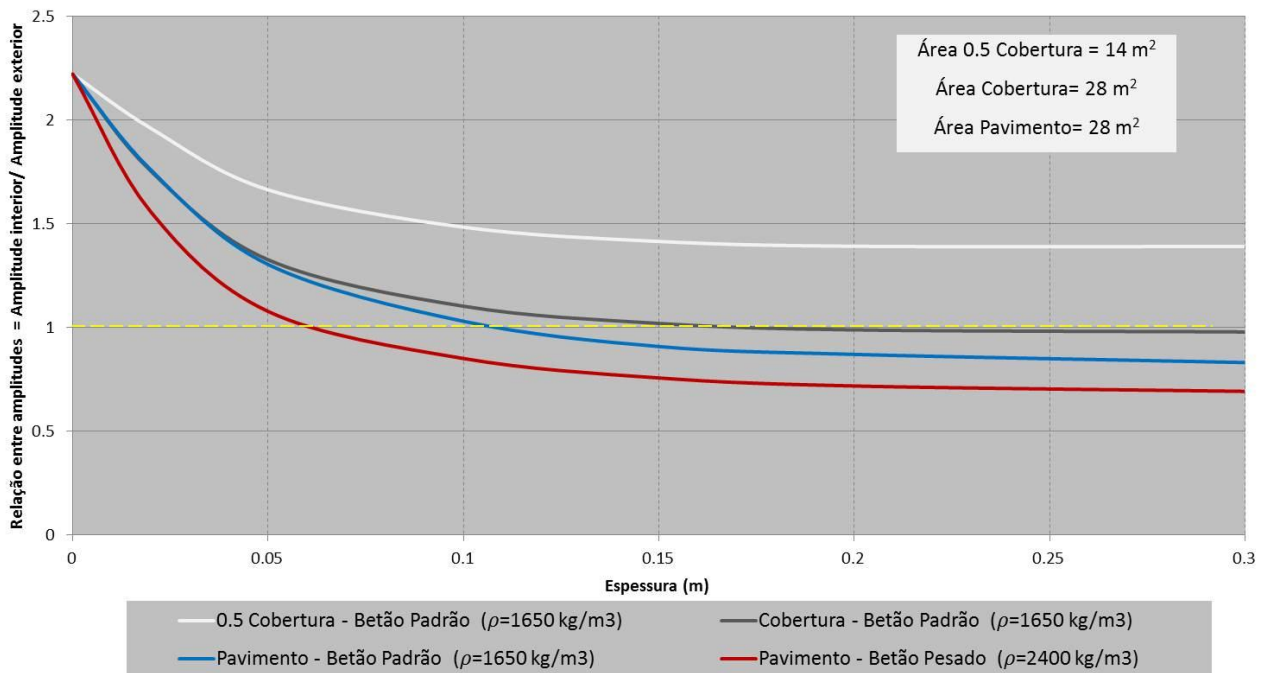


Figura 45 - Relação entre o valor médio da amplitude térmica interior e exterior para um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para as superfícies do pavimento, cobertura e metade da cobertura na estação de aquecimento, orientação Sul.

Amplitude térmica diária (valor médio na estação aquecimento) Comparação entre áreas

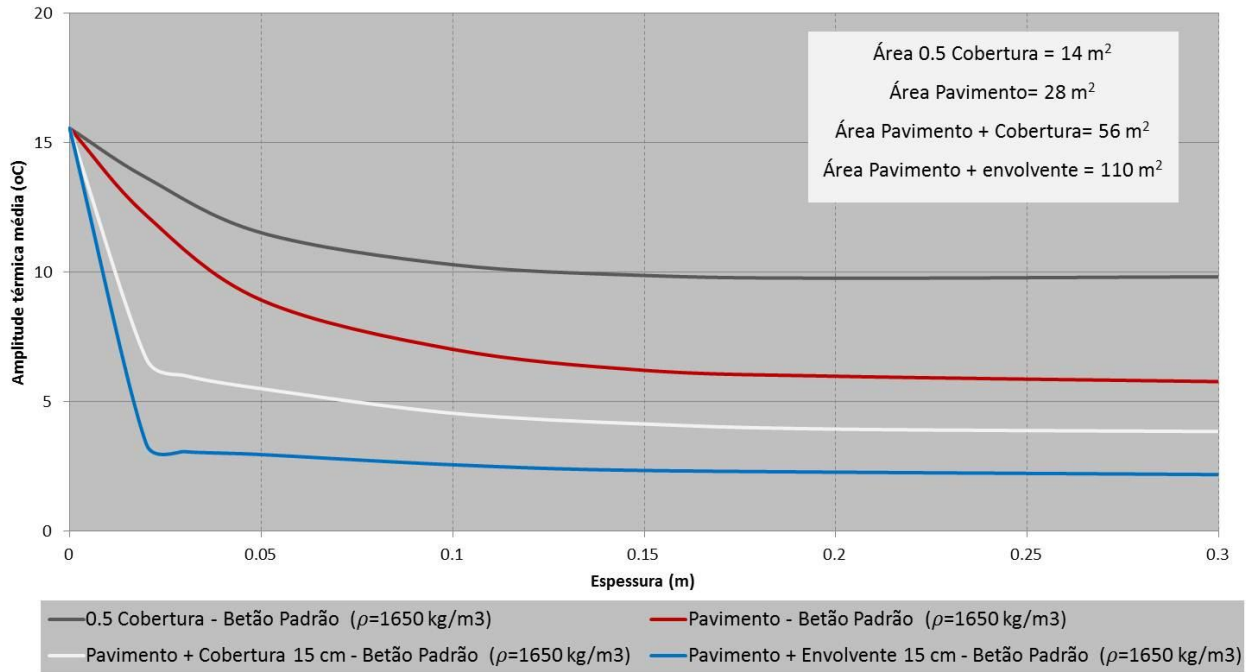


Figura 46 - Evolução do valor médio da amplitude térmica diária segundo um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para os quatro patamares principais na estação de aquecimento, orientação Sul.

Temperatura operativa média Sazonal

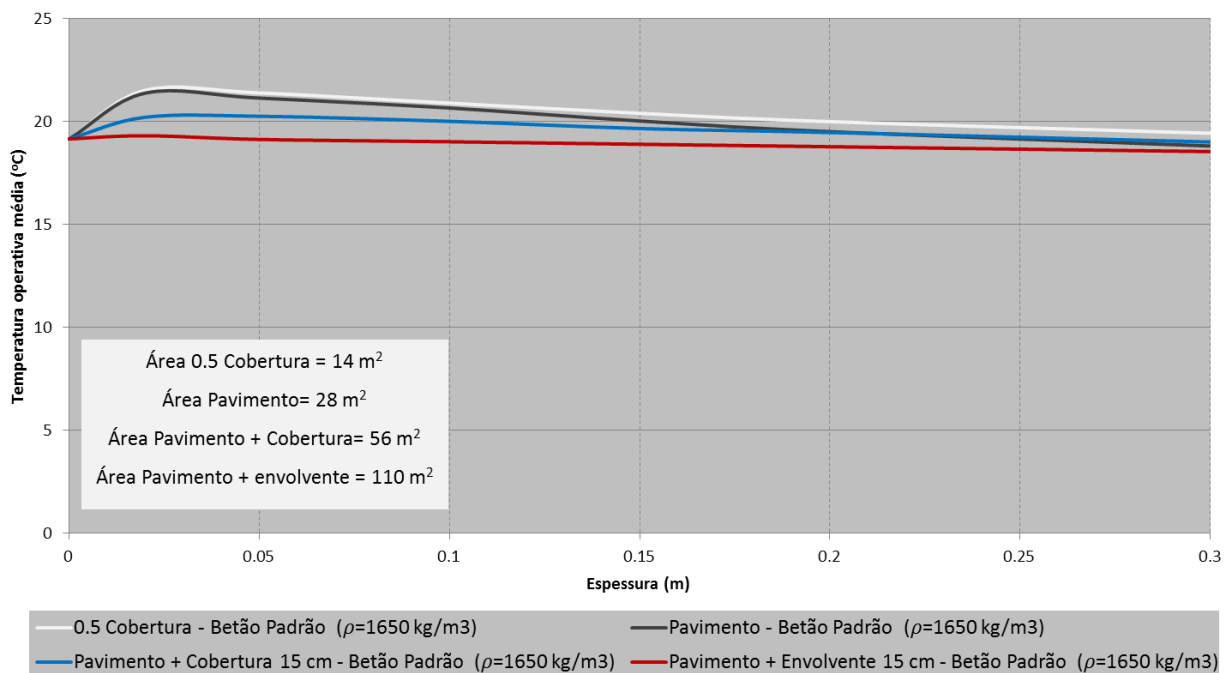


Figura 47 - Distribuição da temperatura média sazonal para dois patamares principais, pavimento massivo e envolvente massiva. Orientação Oeste.

Com base nos resultados sazonais, ilustrados pelas três figuras, é possível confirmar a existência, para a orientação Sul, de um limite crítico de espessura. Situa-se entre os 10 e os 15 centímetros, variando dentro deste intervalo consoante a densidade e a área exposta do espaço. Tanto o aumento de área exposta como o aumento da densidade resultam numa menor espessura crítica. Contudo, este efeito é mais visível para o aumento da área exposta.

A Figura 44 confirma igualmente que, para o mesmo valor de inércia térmica, o aumento da área exposta é preferível ao aumento da espessura. A amplitude térmica diária sazonal, resultante da colocação de 5 centímetros de betão em toda a área da cobertura, é inferior à verificada para a colocação de 10 centímetros em apenas metade da área.

A análise da Figura 44 e da Figura 46 permite verificar que, para uma espessura de 15 centímetros do pavimento, a aplicação de um betão pesado ou a adição de 15 centímetros de cobertura têm um impacto próximo na amplitude térmica sazonal. Ou seja, é possível atenuar o efeito descrito no parágrafo anterior, pela aplicação de um betão de maior densidade.

A colocação de massa em apenas metade da área da cobertura resulta num valor médio da temperatura interior sempre superior ao valor médio registado para o exterior, Figura 45.

Para os dois casos de maior inércia, presentes na Figura 46, entre os valores de 2 e 5 centímetros de pavimento, a curva descreve um pequeno arredondamento que não representa o valor real da amplitude térmica. Este pequeno erro induzido pelo *software* ao criar o gráfico podia, provavelmente, ser atenuado ou anulado se fosse aumentada a resolução para os primeiros centímetros das duas configurações em específico.

A Figura 47 mostra que o aumento da massa térmica da envolvente não leva a uma variação significativa da temperatura operativa média. Para uma espessura de 15cm, a diferença entre os valores médios dos dois patamares extremos é de aproximadamente 1,5°C. O aumento da temperatura operativa média, para os primeiros centímetros dos dois patamares de menor área massiva, deve-se a um aumento da temperatura operativa mínima relativamente superior à diminuição da temperatura operativa máxima.

4.4.2 Orientação Oeste

4.4.2.1 Resultados diários

Os resultados diários referentes à orientação Oeste estão apresentados da Figura 48 à Figura 54.

A alteração da orientação do espaço resulta, entre outros factores, na alteração da exposição solar do envidraçado. A posição relativa do envidraçado condiciona a quantidade de radiação solar que é transmitida para o interior do edifício. Neste caso em particular, a alteração registada é a redução da radiação directa transmitida, visível nos resultados para os dias característicos com radiação.

Uma menor radiação directa transmitida resulta na alteração do comportamento de todas as configurações quando comparadas com a orientação anterior. Os modelos base são os mais sensíveis às alterações exteriores como mostra a Figura 48.

Os resultados para as diferentes espessuras do pavimento estão ilustrados na Figura 50 e Figura 51. Como foi descrito no ponto 4.3, os resultados referentes a algumas configurações em particular serão omitidos. Dada a semelhança dos resultados registados para a cobertura, apenas será apresentada a comparação directa entre as amplitudes térmicas diárias, resultantes

das duas superfícies, Figura 52. As distribuições, com base nas configurações da envolvente total e da combinação do pavimento e cobertura, apresentam um comportamento equivalente ao registado para pavimento. O aumento da espessura resulta igualmente na diminuição da amplitude térmica registada, diferenciando-se apenas nos patamares térmicos atingidos.

A comparação entre diferentes áreas expostas está representada na Figura 53 e Figura 54.

4.4.2.1.1 Envolvente interior com inércia mínima

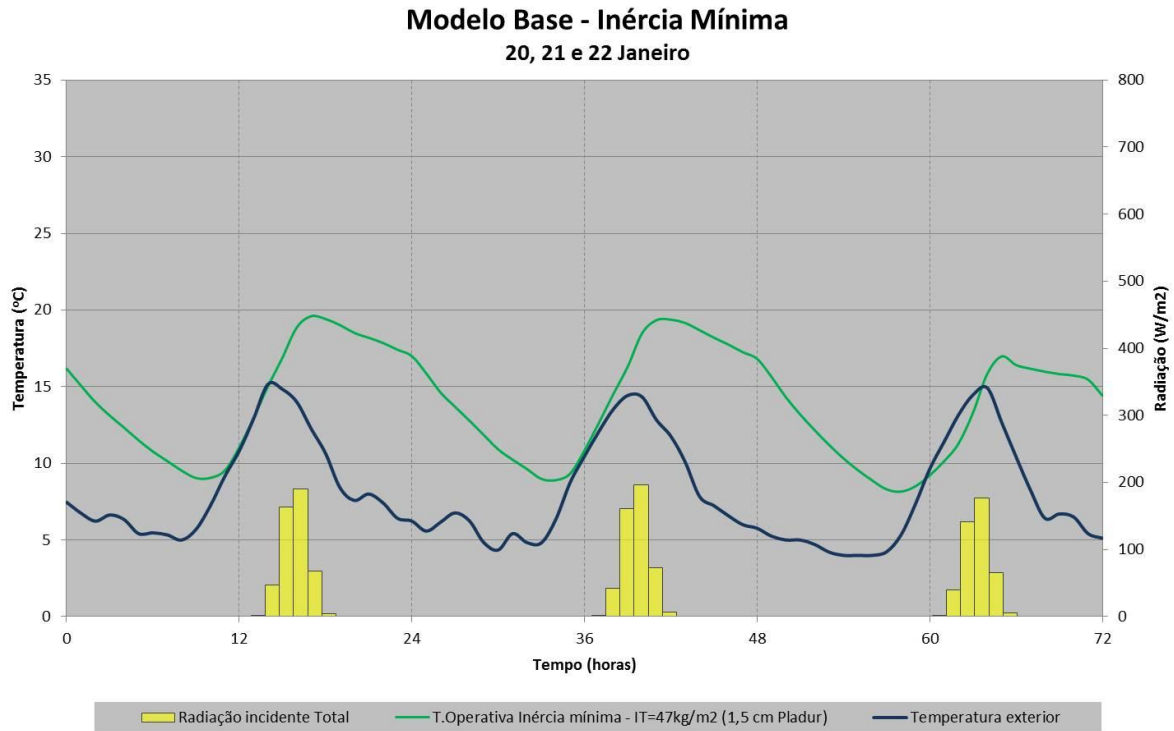


Figura 48 - Distribuição da temperatura operativa para o modelo base de inércia mínima, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Oeste.

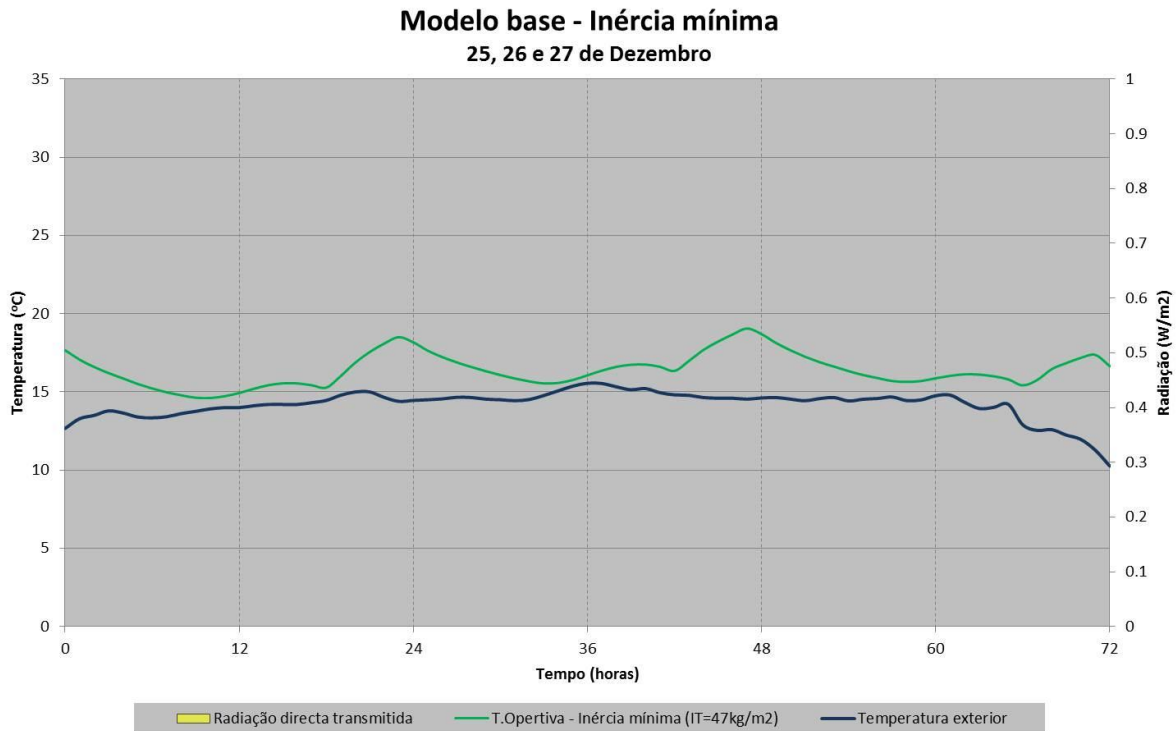


Figura 49 - Distribuição da temperatura operativa para o modelo base de inércia mínima, nos dias característicos de Dezembro. Orientação Oeste.

A presença de radiação directa no espaço apenas se verifica a partir das 14 horas, que resulta numa radiação directa transmitida total muito inferior à transmitida para a orientação Sul.

Com base na Figura 48, verifica-se um desfasamento entre os picos da temperatura mínima exterior e operativa. A ausência de radiação directa transmitida, nas primeiras horas do dia, resulta num aumento tardio da temperatura operativa face à temperatura exterior. A temperatura operativa só começa a aumentar a partir do instante em que ambas as temperaturas, exterior e operativa, registam o mesmo valor.

Verifica-se também um intervalo significativo entre os picos da temperatura máxima exterior e operativa. A radiação directa transmitida para o espaço a partir das 14 horas resulta num maior período de aquecimento da temperatura operativa face à temperatura exterior. O desfasamento entre picos regista uma diferença de aproximadamente 3 horas. Os restantes ganhos internos são responsáveis por manter a temperatura estável até às 23 horas.

Para os dias característicos de Dezembro, a distribuição da temperatura operativa é equivalente à apresentada na Figura 32, relativa à orientação Sul.

4.4.2.1.2 Envolvente interior com pavimento ou cobertura

Impacto do pavimento na Temperatura interior

20, 21 e 22 de Janeiro

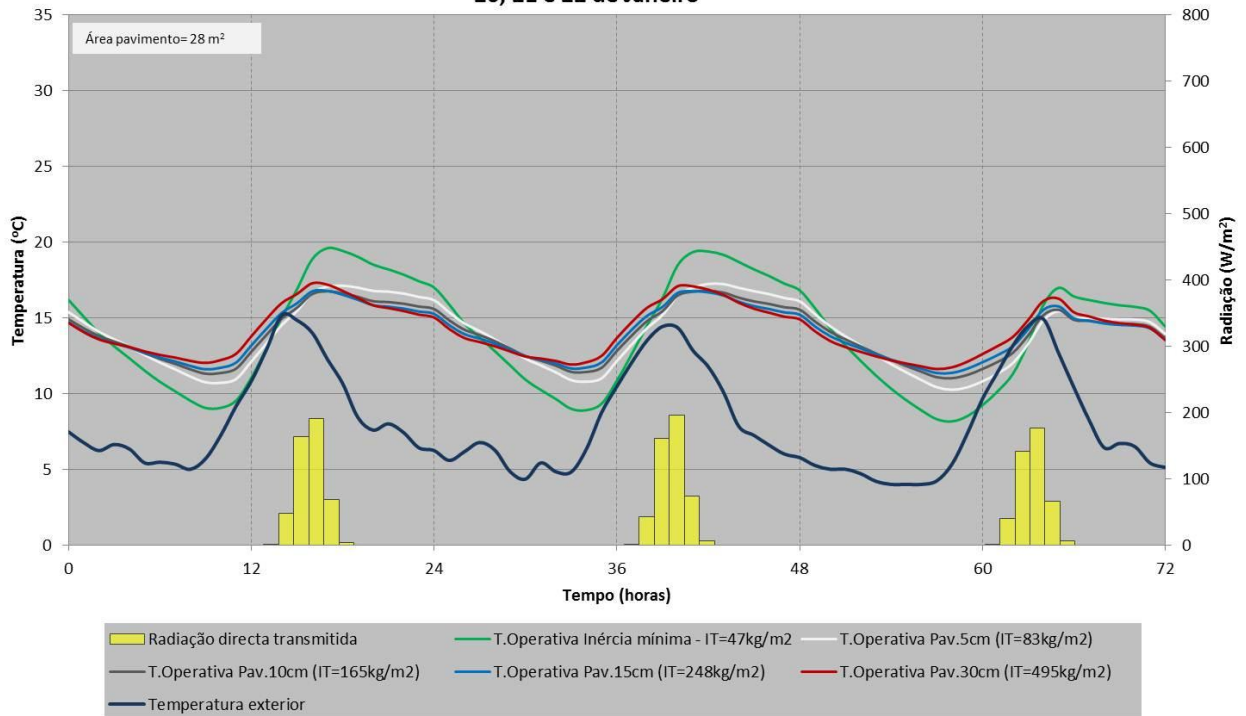


Figura 50 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de cobertura, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Oeste.

Impacto do pavimento na Temperatura interior

25, 26 e 27 de Dezembro

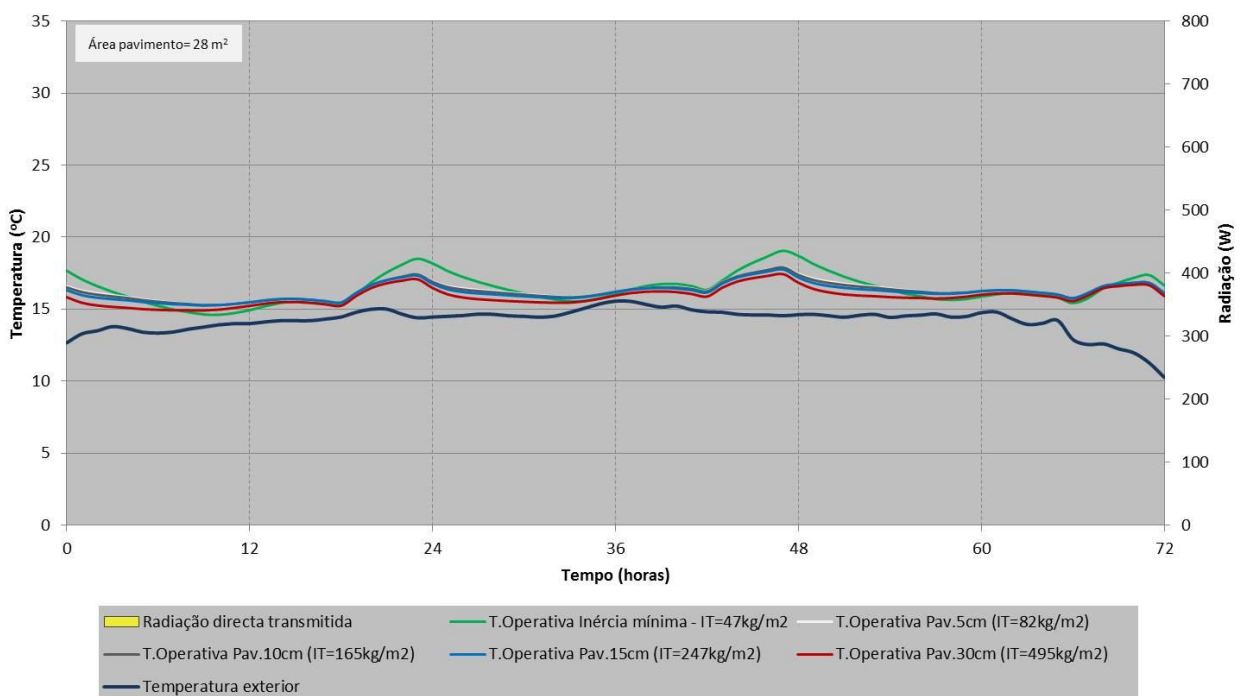


Figura 51 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de cobertura, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Oeste.

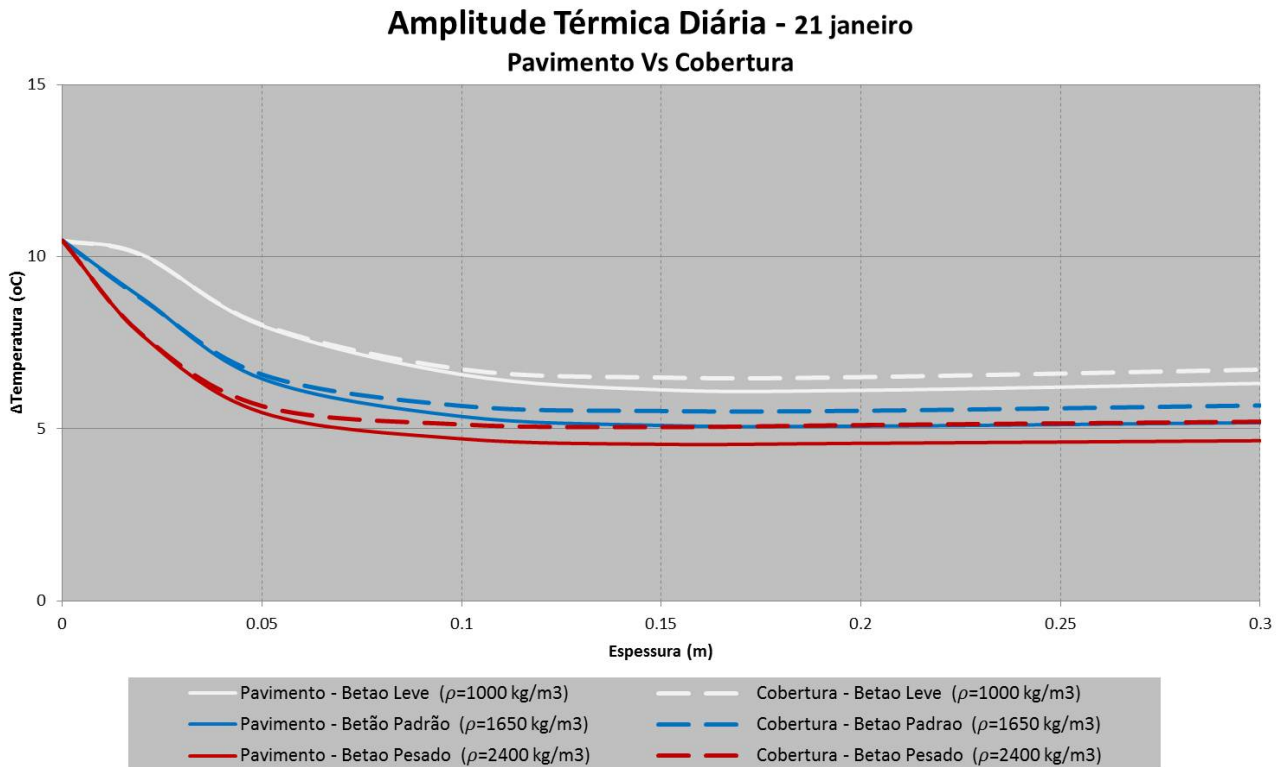


Figura 52 - Comparação entre as amplitudes térmicas diárias referentes às configurações do pavimento e da cobertura. A espessura varia entre 0 e 30 centímetros, para três diferentes densidades. Resultados para o dia 21 de Janeiro, orientação Oeste.

O efeito do aumento da espessura na distribuição da temperatura operativa é visível na Figura 50 e Figura 51. Quanto maior a espessura, menor é a amplitude térmica operativa resultante. A temperatura mínima aumenta mas, contrariamente ao que acontece para a orientação anterior, a temperatura máxima aumenta também com o aumento da espessura. Tal facto é resultado do desfaseamento entre o máximo da temperatura exterior e o período de incidência de radiação directa no interior. Quando a temperatura exterior diminui, o efeito da radiação directa faz-se sentir na temperatura operativa. A energia térmica transferida por condução, do interior para o exterior, diminui com o aumento de espessura. Como resultado, os casos de menor espessura registam uma redução da temperatura máxima atingida.

Para os dias característicos de Dezembro, mantém-se a semelhança com os resultados obtidos em simulações anteriores. A diferença verificada está no intervalo de temperaturas que o conjunto de distribuições regista, como resultado de uma menor radiação directa transmitida. Neste caso, as curvas descritas encontram-se a baixo da curva de referência, ao contrário do que acontece na orientação anterior.

A Figura 52 mostra que a diferença entre amplitudes, como resultado da variação da densidade do material, é inferior à mesma diferença registada na Figura 37. Igualmente, a diferença resultante da colocação da massa no pavimento ou na cobertura não é tão significativa. A justificação está na quantidade de radiação directa transmitida que é significativamente inferior. Quanto menor a radiação incidente numa superfície menor será o impacto do aumento da massa ou da densidade na temperatura operativa. Seguindo a mesma lógica, mais próximos serão os resultados entre os casos do pavimento e da cobertura.

4.4.2.1.3 Comparação entre patamares

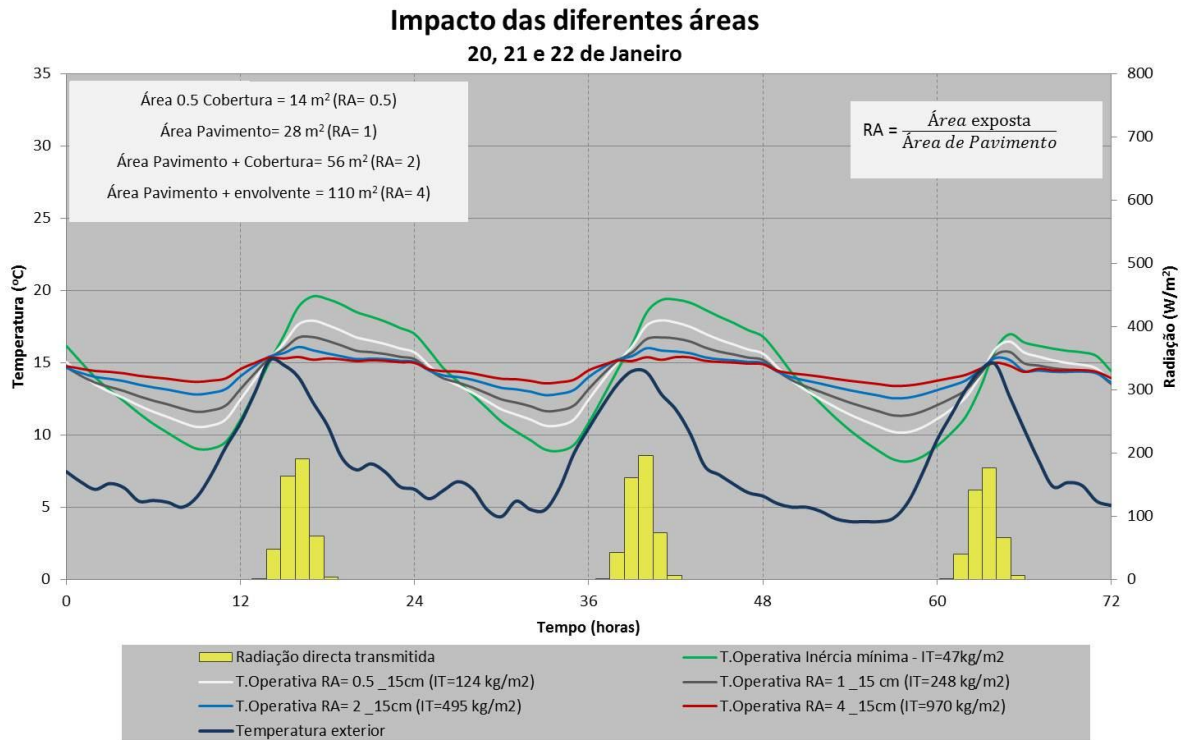


Figura 53 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes áreas expostas, com espessura constante de 15 centímetros de betão padrão. Resultados para os dias característicos de Janeiro, orientação Oeste.

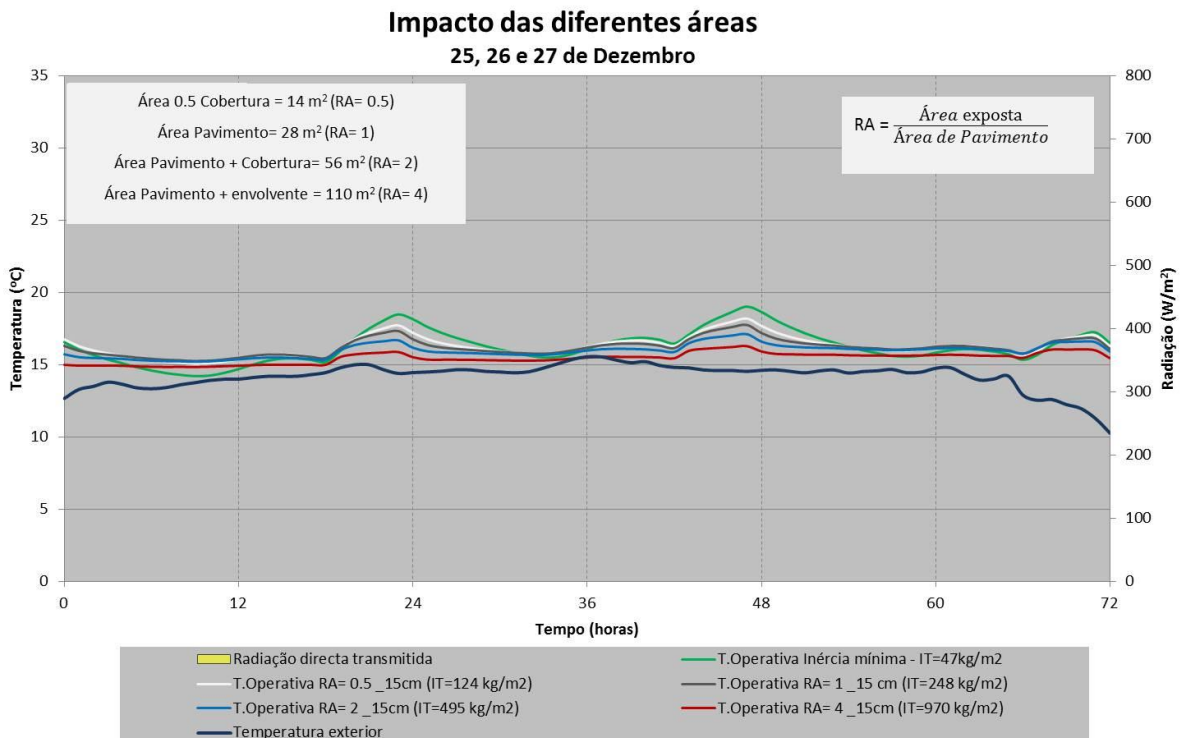


Figura 54 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes áreas expostas, com espessura constante de 15 centímetros de betão padrão. Resultados para os dias característicos de Janeiro, orientação Oeste.

Com base em todos os resultados diários, o aumento da inércia térmica traduz-se numa diminuição da amplitude da temperatura operativa, como era de esperar. Entre os dois casos extremos, a diminuição da amplitude térmica resultante é de 8°C.

A Figura 53 ilustra a distribuição da temperatura operativa para diferentes dimensões de área exposta. O aumento da área promove o aumento da temperatura operativa mínima, tal como acontece com o aumento progressivo da espessura, e a diminuição da temperatura máxima. Este resultado é contrário ao que acontece na Figura 50. A explicação reside na quantidade considerável de inércia térmica presente em todos os casos, não sendo praticamente afectados pela diminuição da temperatura exterior.

A diferença relativa entre as 4 distribuições é inferior à verificada para a Figura 42. Tal como acontece para análise do pavimento, quanto menor a radiação directa transmitida, menor será a diferença relativa entre as diferentes temperaturas operativas.

4.4.2.2 Resultados sazonais – Estação de aquecimento

Os resultados para a estação de aquecimento estão resumidos da Figura 55 à Figura 57.

Ambas as figuras apresentam distribuições semelhantes às obtidas para a orientação Sul, com principal destaque para a Figura 57 que compara as amplitudes térmicas referentes às diferentes áreas expostas.

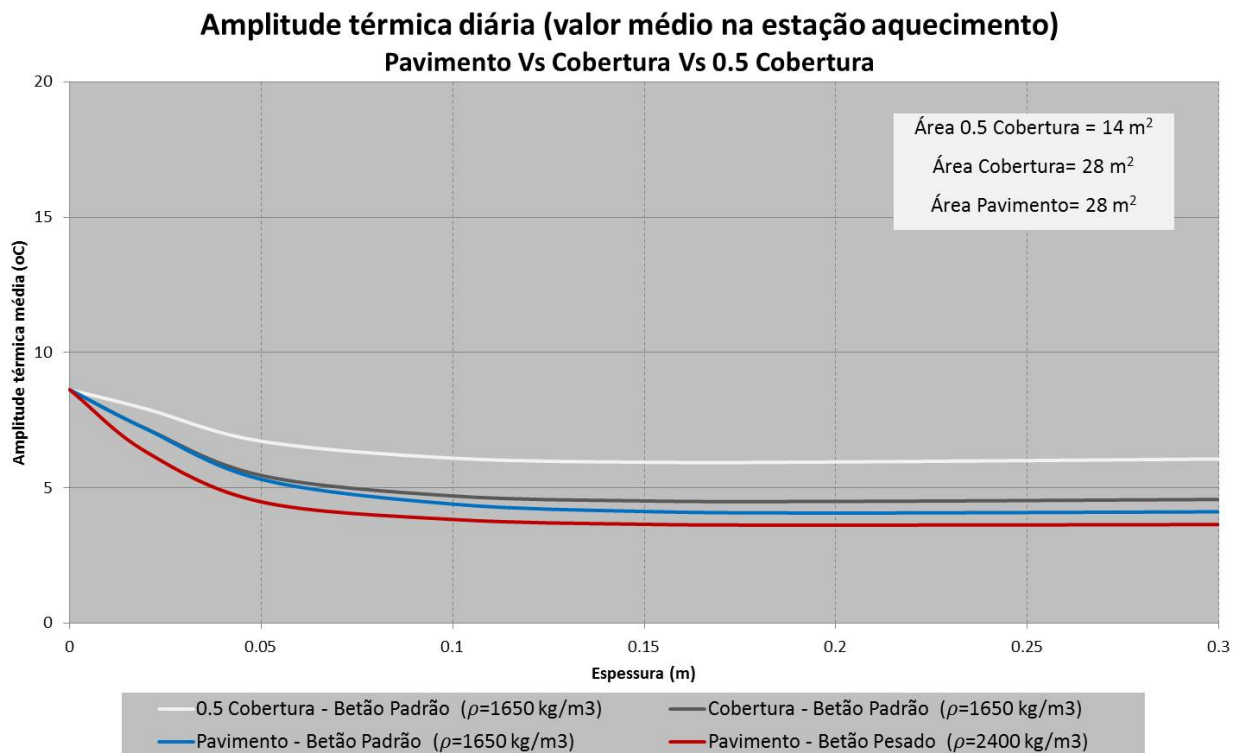


Figura 55 - Evolução do valor médio da amplitude térmica diária segundo um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para as superfícies do pavimento, cobertura e metade da cobertura massivas na estação de aquecimento, orientação Oeste.

Razão média entre amplitudes

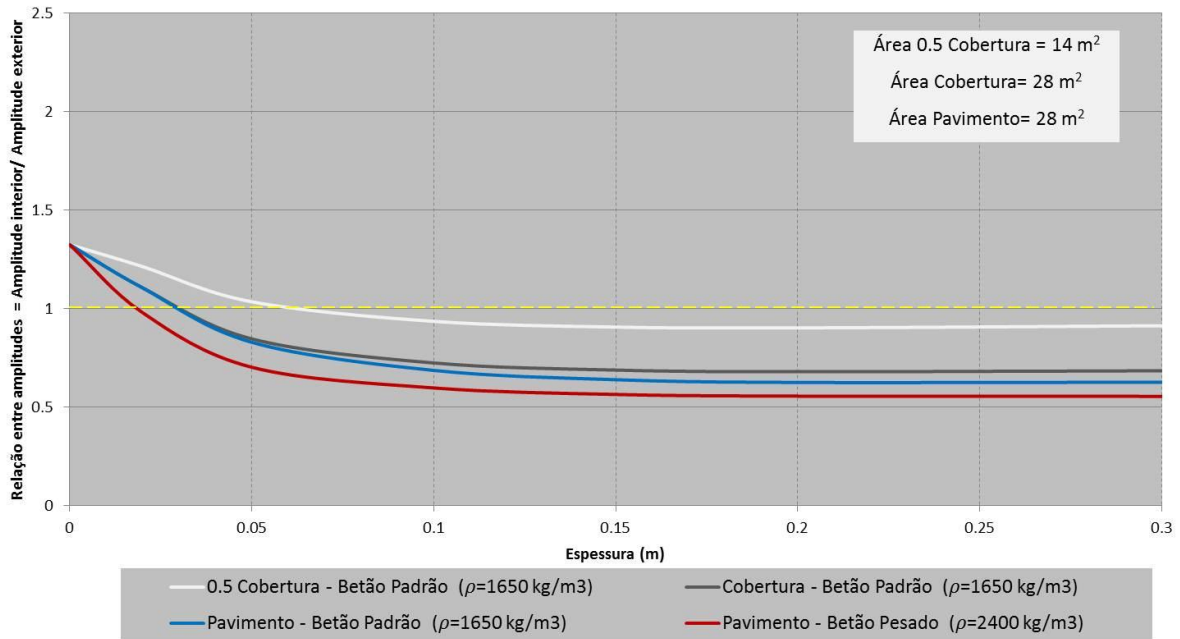


Figura 56 - Relação entre o valor médio da amplitude térmica interior e exterior para um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para as superfícies do pavimento, cobertura e metade da cobertura massivas na estação de aquecimento, orientação Oeste.

Amplitude térmica diária (valor médio na estação aquecimento) Comparação entre Áreas

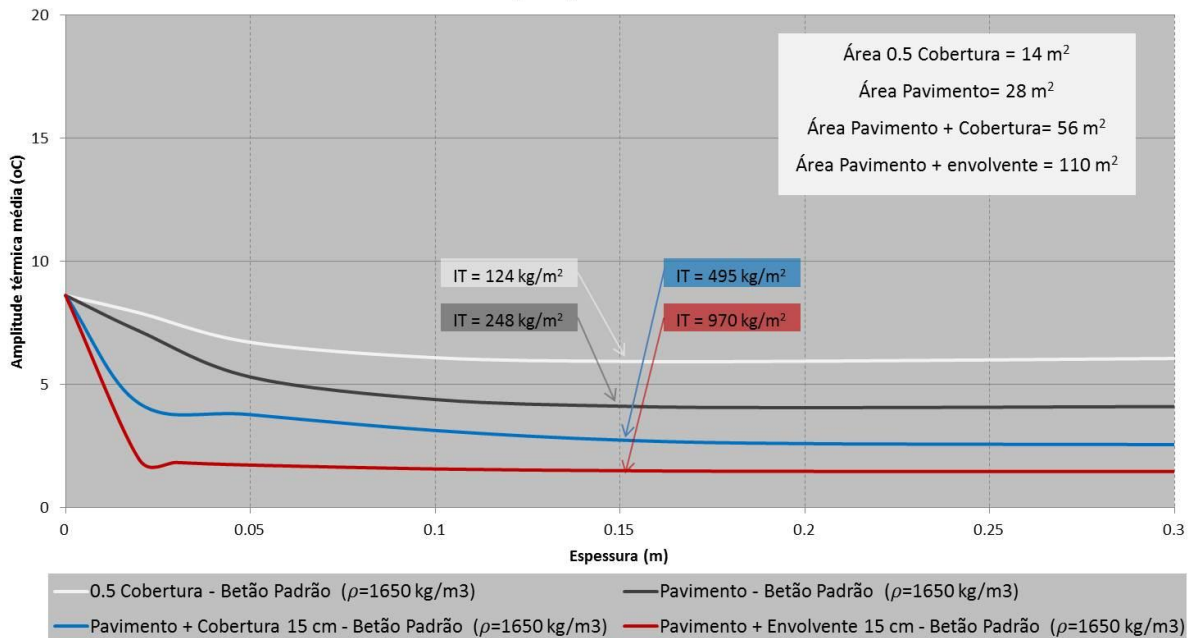


Figura 57 - Evolução do valor médio da amplitude térmica diária segundo um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para os quatro patamares principais na estação de aquecimento, orientação Oeste.

Temperatura operacional média Sazonal

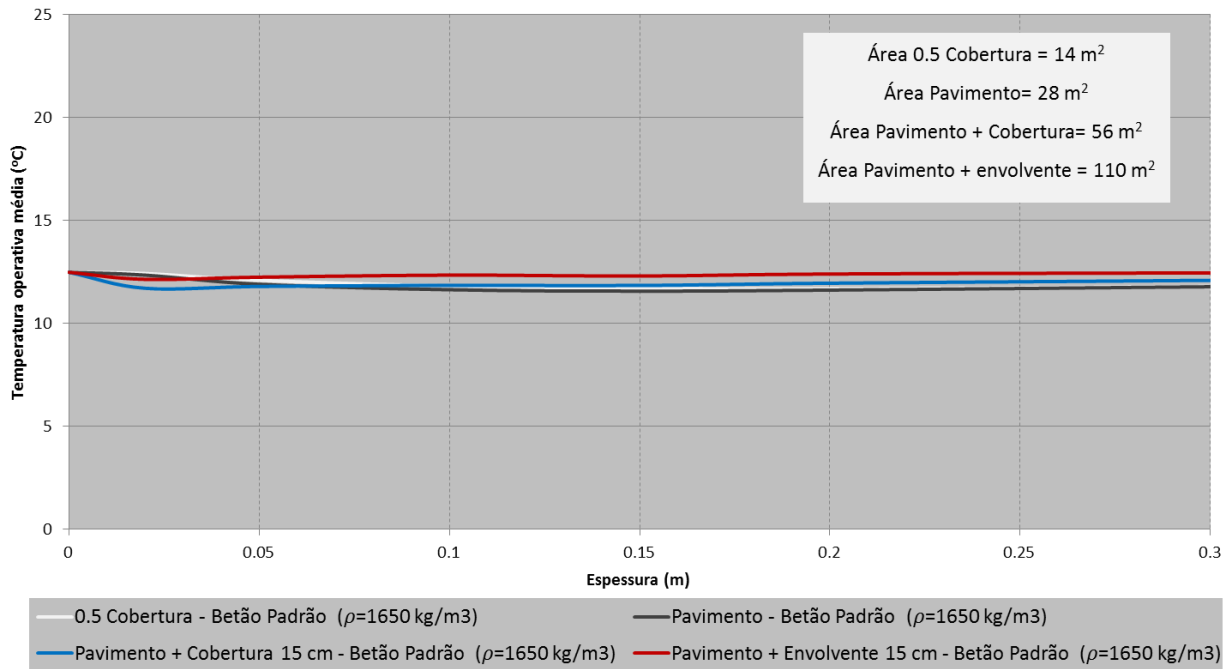


Figura 58 - Distribuição da temperatura média sazonal para dois patamares principais, pavimento massivo e envolvente massiva. Orientação Oeste.

Confirmando os resultados diários, a Figura 55 mostra que a colocação de massa no pavimento ou na cobertura tem como resultado amplitudes térmicas médias relativamente próximas. Igualmente, a utilização de um betão com maior densidade apresenta melhorias significativas.

A Figura 57 é equivalente á mesma representação para a orientação Sul, Figura 46. Neste os valores da amplitude são todos inferiores, em que a diferença relativa entre as curvas, como já foi apresentado, é igualmente inferior.

A Figura 58 mostra que o aumento de massa térmica regista uma variação pouco significativa na distribuição da temperatura operativa média, mantendo-se praticamente constante para o valor de 12°C.

4.4.3 Orientação Norte

4.4.3.1 Resultados diários

Os resultados diários referentes à orientação Norte estão representados da Figura 59 à Figura 64.

Esta orientação é caracterizada pela ausência de radiação directa transmitida. As distribuições da temperatura operativa para qualquer configuração reflectem esse facto, que resulta num impacto reduzido quer do aumento da espessura, Figura 61 e Figura 62, quer do aumento da área exposta, Figura 63 e Figura 64.

4.4.3.1.1 Envolvente interior com inércia mínima

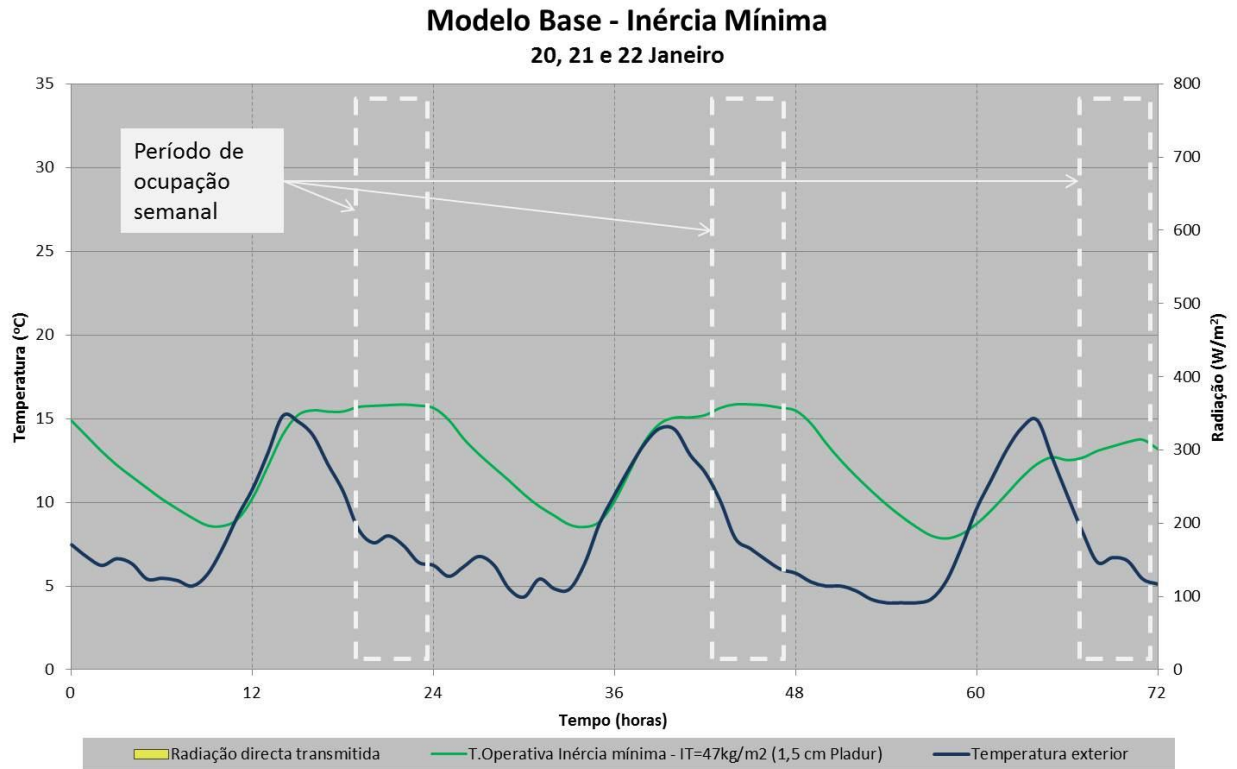


Figura 59 - Distribuição da temperatura operativa para o modelo base de inércia mínima, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Norte.

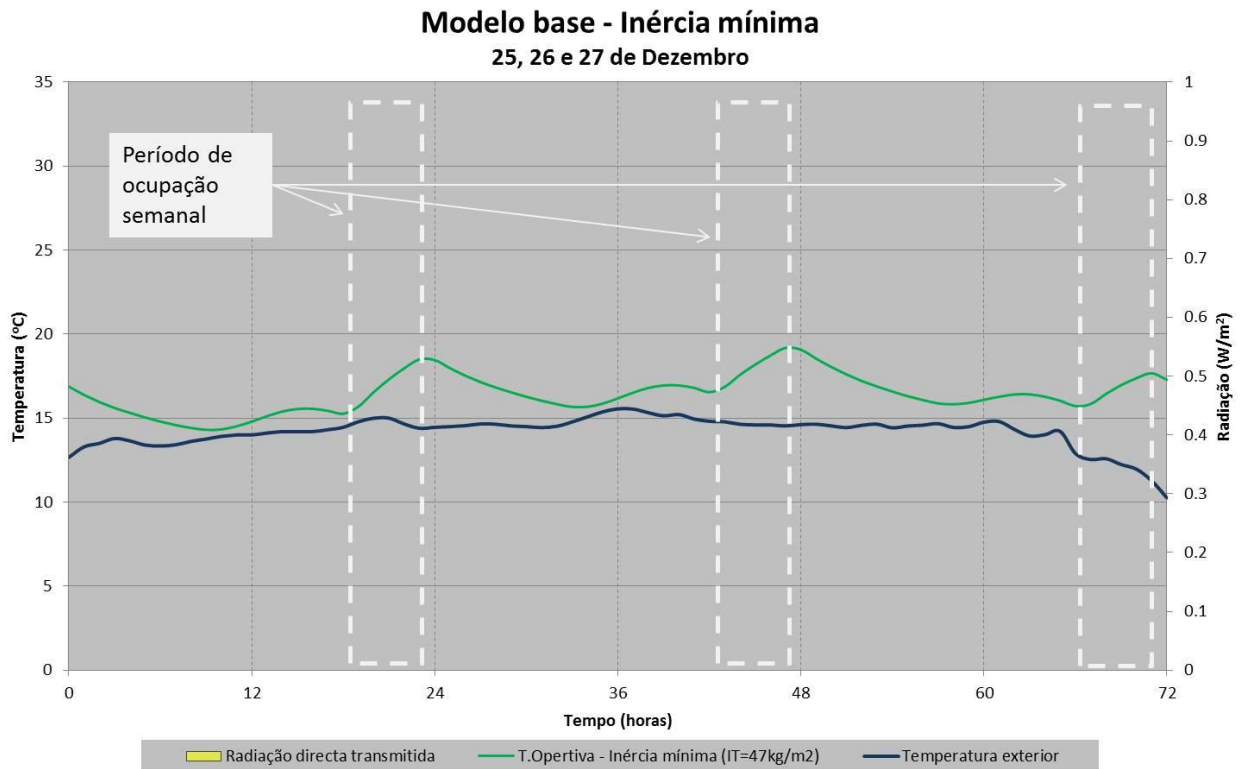


Figura 60 - Distribuição da temperatura operativa para o modelo base de inércia mínima, nos dias característicos de Dezembro. Orientação Norte.

A Figura 59 mostra que, para dias com grande amplitude térmica exterior, um espaço que não receba radiação directa e tenha ganhos internos reduzidos, registará uma temperatura máxima interior aproximadamente equivalente à registada no exterior. O processo de transferência de calor entre o exterior e interior, neste caso, é feito exclusivamente por condução. Como resultado, pode verificar-se, como acontece para o dia 21 de Janeiro, um intervalo entre os picos máximos da temperatura exterior e interior. Esse intervalo representa o tempo necessário para equilíbrio entre as duas temperaturas. Poderá também a radiação difusa que é transmitida ter uma influência, mesmo que reduzida, nos resultados.

A Figura 60 é equivalente às distribuições anteriores referentes ao modelo base.

4.4.3.1.2 Envolvente interior com pavimento massivo

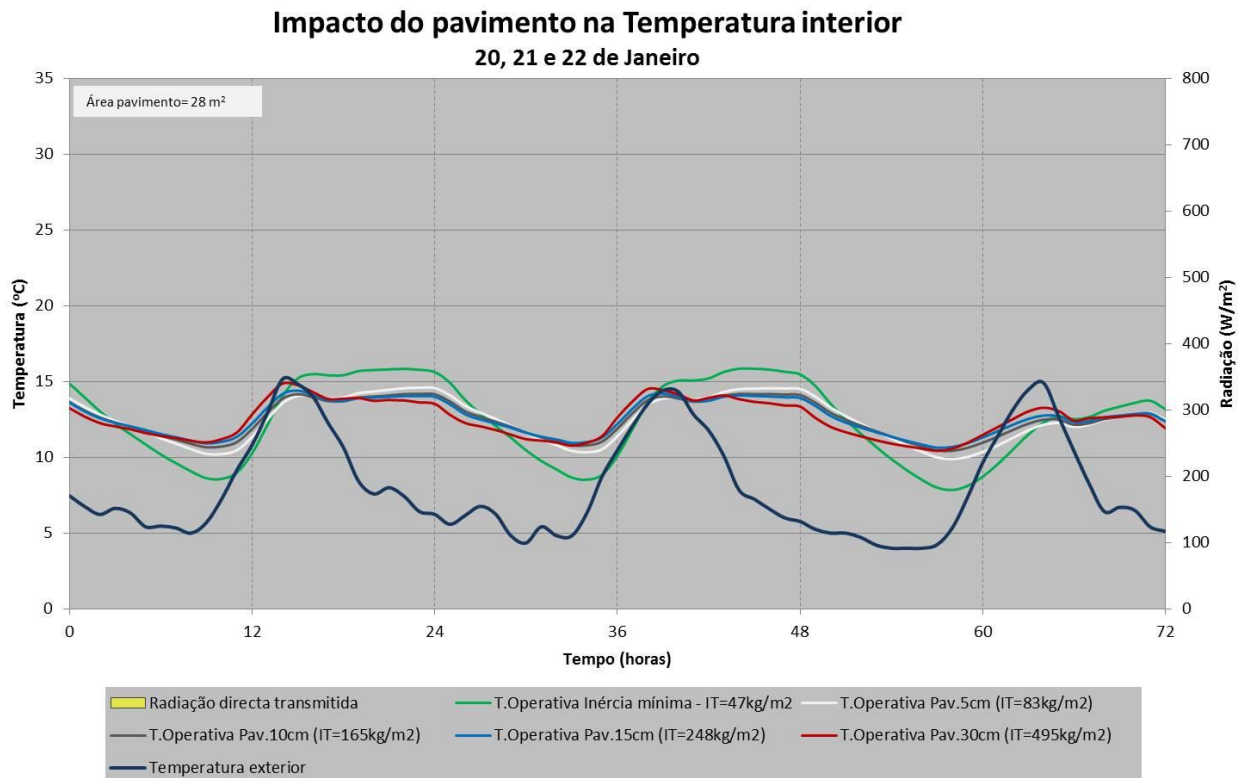


Figura 61 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de cobertura, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Norte.

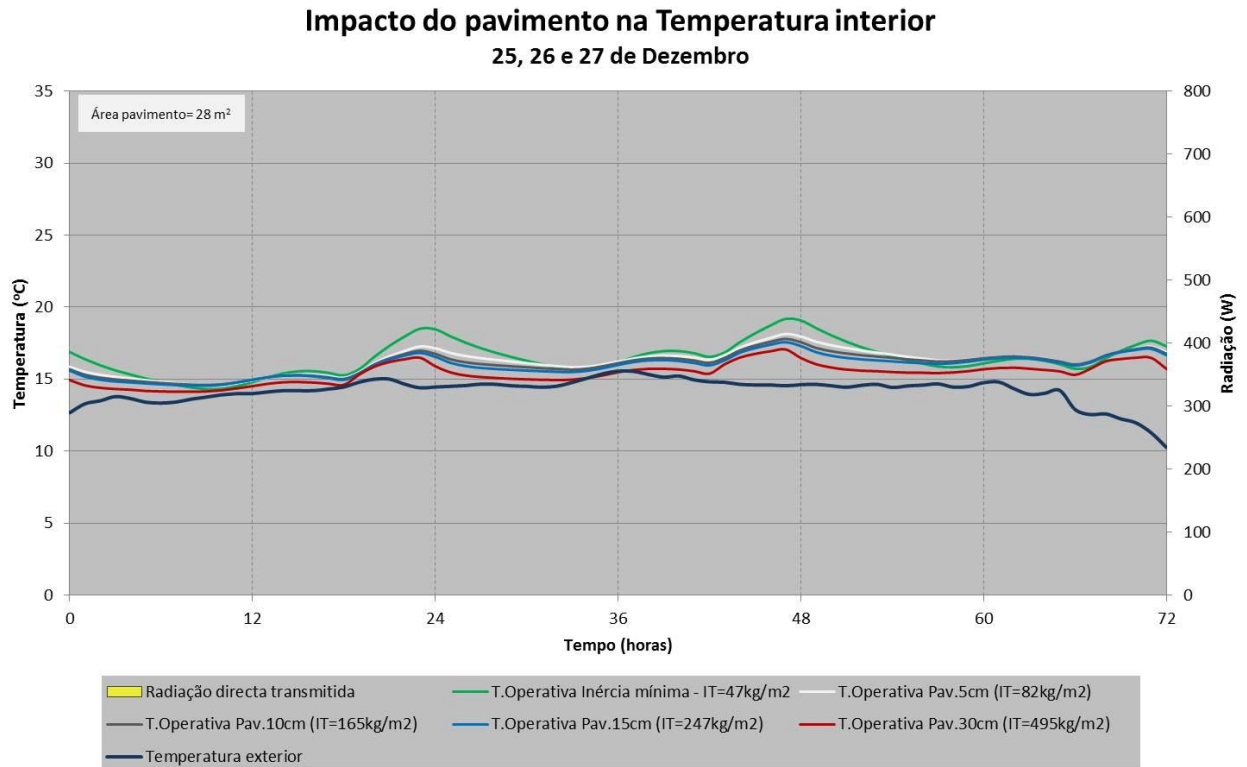


Figura 62 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de cobertura, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Norte.

4.4.3.1.3 Comparação entre patamares

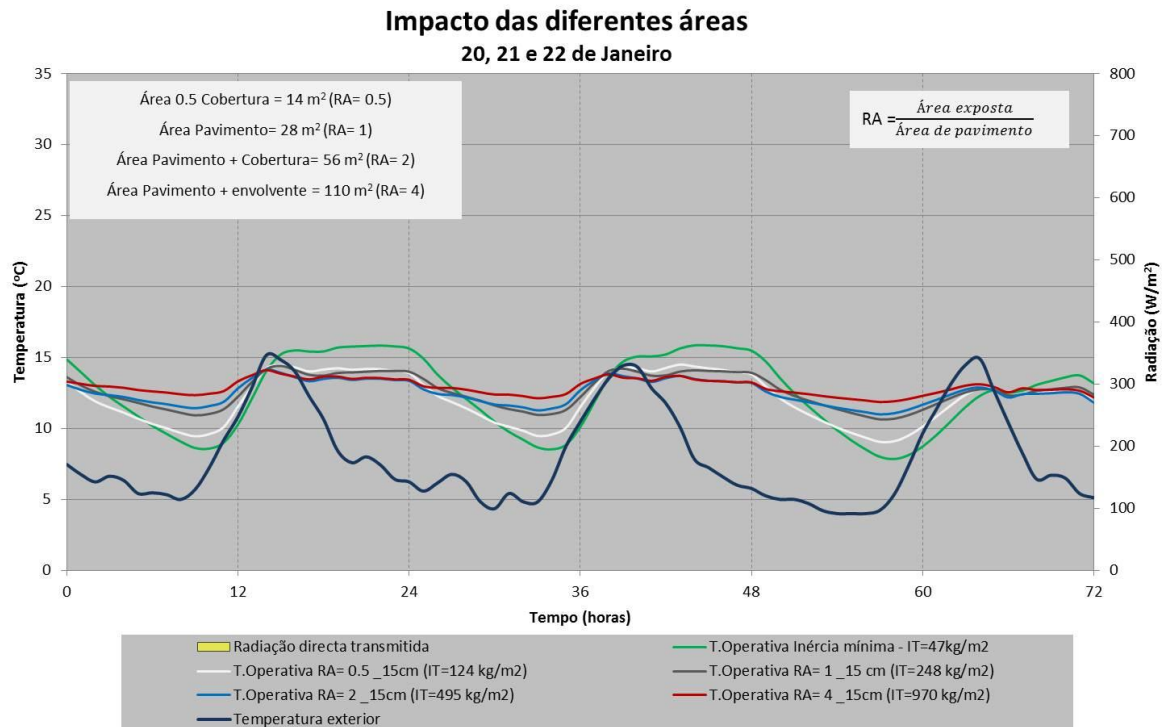


Figura 63 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes áreas expostas, com espessura constante de 15cm de betão padrão. Resultados para os dias característicos de Janeiro, orientação Norte.

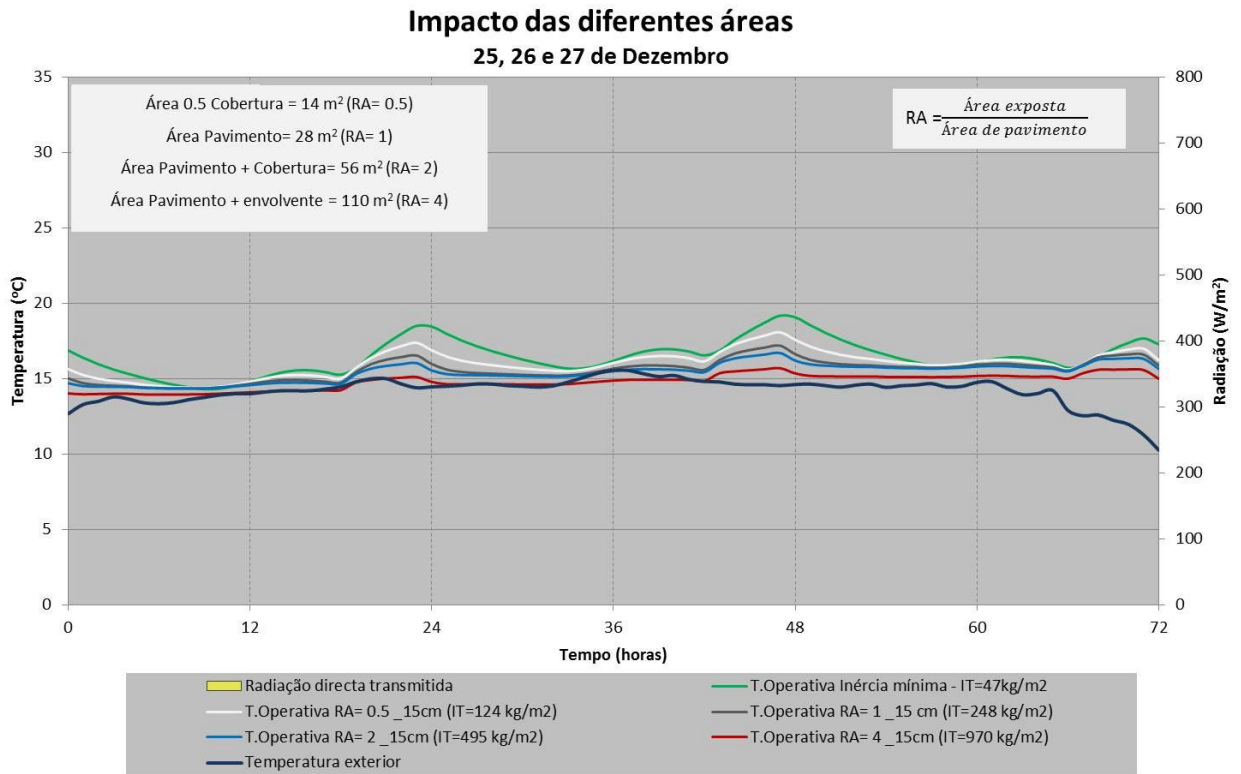


Figura 64 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes áreas expostas, com espessura constante de 15cm de betão padrão. Resultados para os dias característicos de Dezembro, orientação Norte.

Para esta orientação, o impacto do aumento de inércia térmica na distribuição da temperatura operativa é o menor para as 4 orientações, como se poderá confirmar mais adiante.

Para este caso, quaisquer duas superfícies com a mesma espessura e material, que apresentem a mesma área, têm como resultado uma distribuição da temperatura operacional equivalente. Esta afirmação apenas se verifica para a orientação norte, sendo a única que não recebe radiação solar directa.

A Figura 64 sublinha, novamente, que para os dias característicos de Dezembro, as distribuições da temperatura são praticamente independentes da orientação escolhida.

4.4.3.2 Resultados sazonais

Os resultados sazonais para a orientação Norte, representados da Figura 65 à Figura 67, confirmam as reduzidas amplitudes verificadas para os resultados diários. A Figura 66 evidencia para a razão entre amplitudes inicial, correspondente ao modelo base, mais reduzida que é possível obter, sem alterar as características geométricas do espaço. O valor de $RA \approx 1$ mostra que a temperatura operativa regista valores, aproximadamente, iguais aos registados no exterior, para a estação de aquecimento.

Amplitude térmica diária (valor médio na estação aquecimento) Pavimento Vs 0.5 Cobertura

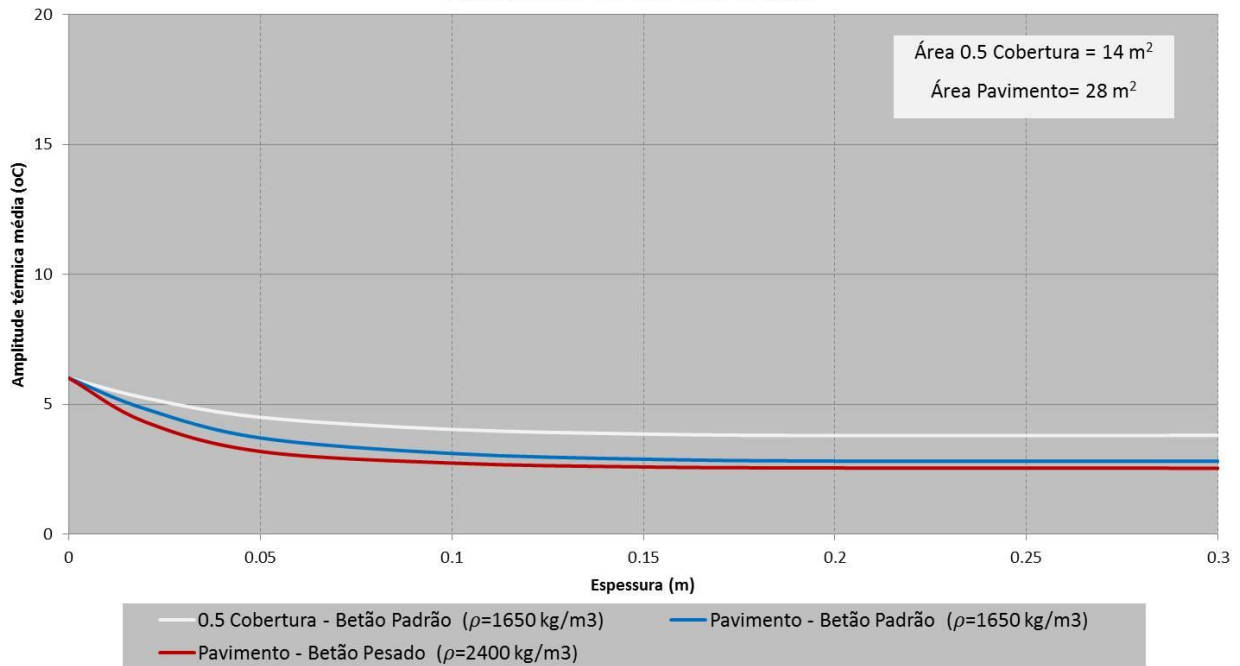


Figura 65 - Evolução do valor médio da amplitude térmica diária segundo um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para as superfícies do pavimento, cobertura e metade da cobertura massivos na estação de aquecimento, orientação Norte.

Razão média entre amplitudes

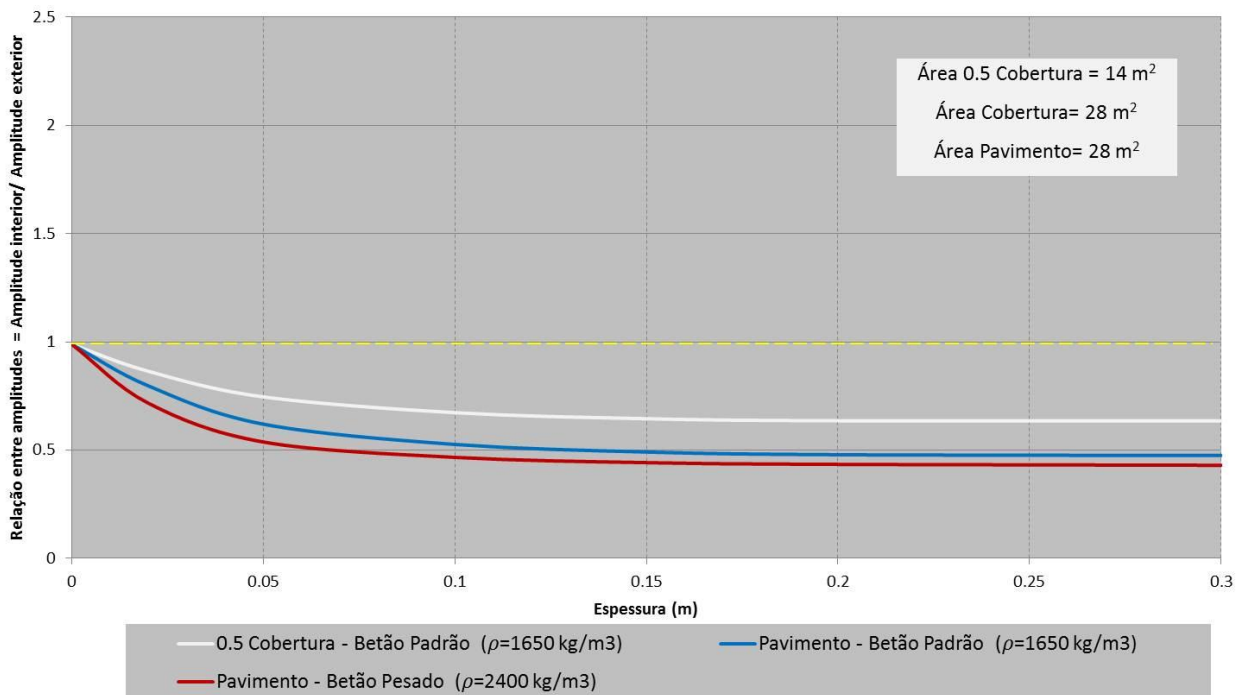


Figura 66 - Relação entre o valor médio da amplitude térmica interior e exterior para um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para as superfícies do pavimento, cobertura e metade da cobertura massivos na estação de aquecimento, orientação Norte.

Amplitude térmica diária (valor médio na estação aquecimento) Comparação entre diferentes Áreas

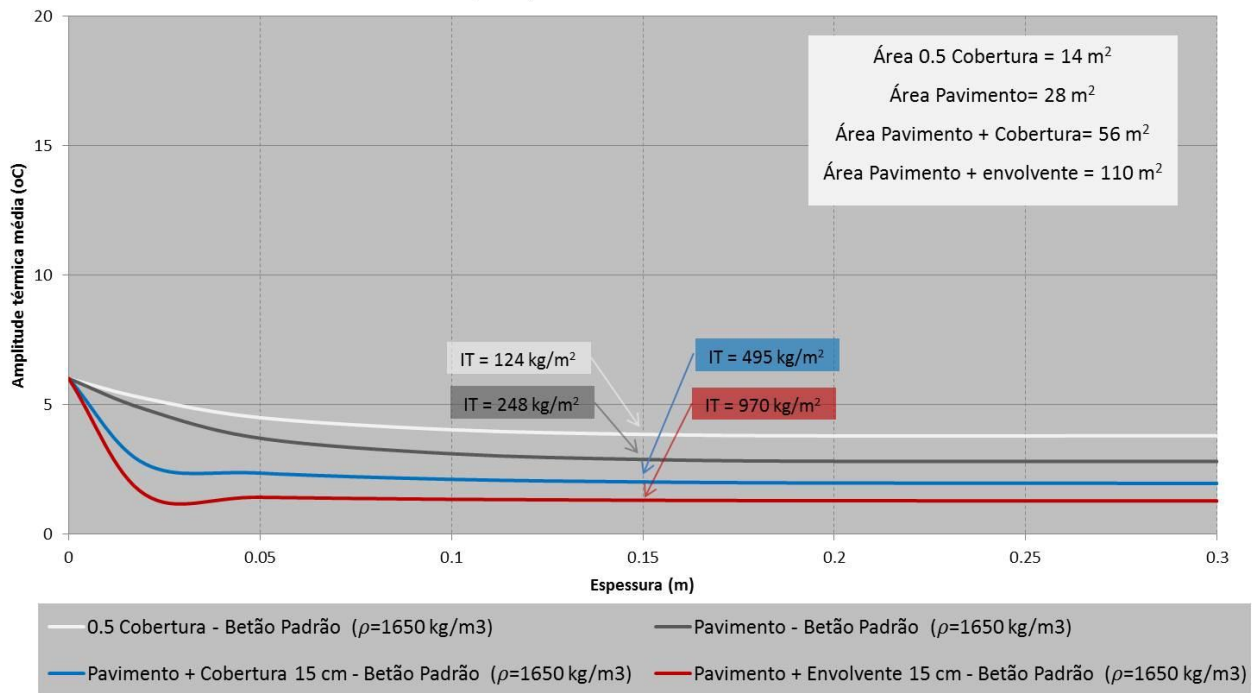


Figura 67 - Evolução do valor médio da amplitude térmica diária segundo um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para os quatro patamares principais na estação de aquecimento, orientação Norte.

Temperatura operativa média Sazonal

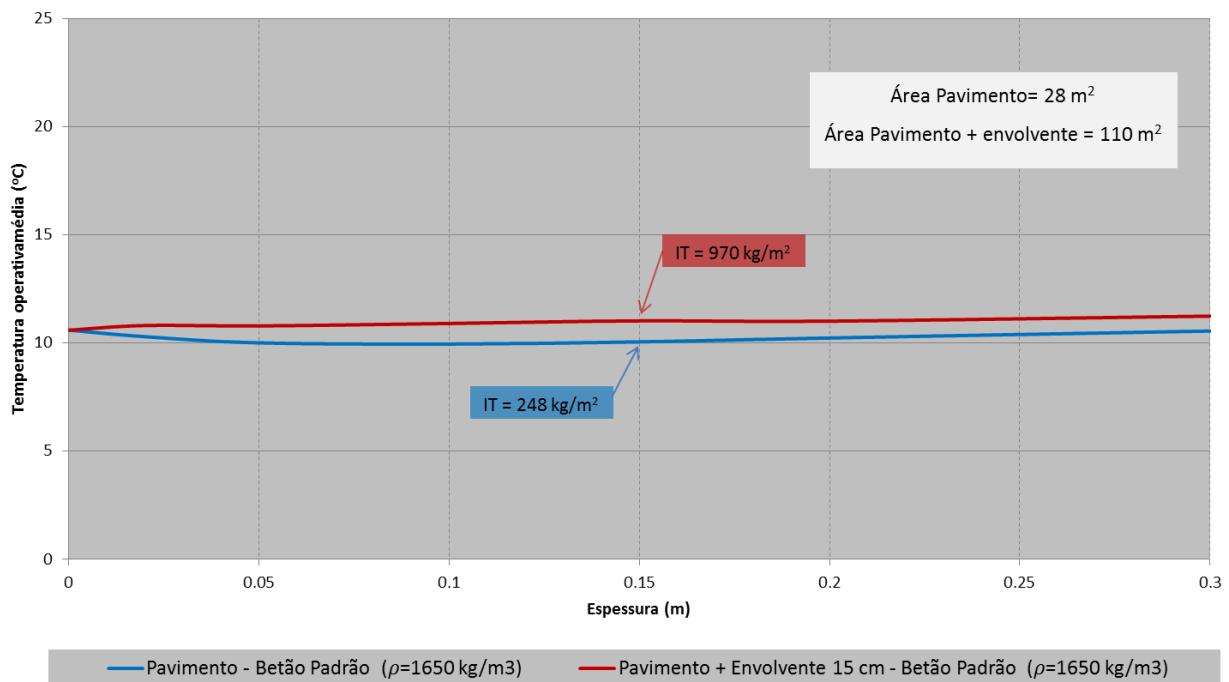


Figura 68 - Distribuição da temperatura média sazonal para dois patamares principais, pavimento massivo e envoltente massiva. Orientação Norte

Como já foi definido, um dos objectivos principais do aumento da inércia térmica é uma maior estabilidade térmica interior. Com base nos resultados sazonais, e de acordo com os resultados diários é possível afirmar que, para a orientação norte, se registam os menores valores da amplitude térmica operativa. Todos os resultados analisados para os dias característicos de Dezembro indicam que este seria o resultado mais provável. Contudo, ao registar a menor amplitude não significa que registre as melhores condições de conforto térmico. Tomando como exemplo o caso de maior inércia térmica da Figura 67, embora seja possível obter uma amplitude térmica diária média de, aproximadamente, $1,5^{\circ}\text{C}$, a temperatura operativa para toda a estação raramente ultrapassa os 15°C . Para o nosso clima e geometria solar, por definição, um espaço como uma sala de grande ocupação nunca deveria ser orientada a Norte.

As figuras mostram igualmente, como era esperado, uma diferença reduzida entre curvas, quer para o aumento da espessura e da área exposta. Confirma-se, mais uma vez, os valores estabelecidos para a espessura crítica. Para esta orientação, esse valor é próximo de 10 centímetros, uma consequência directa da ausência de radiação directa transmitida.

A Figura 68 mostra que, para esta orientação, tal como nas anteriores, a temperatura operativa média não regista alterações significativas com o aumento de inércia térmica da envolvente.

4.4.4 Orientação Este

4.4.4.1 Resultados diários

Os resultados diários para a orientação Este estão representados da Figura 69 à Figura 73.

A orientação Este é caracterizada pela presença de radiação solar directa nas primeiras 5 horas de luz solar. A duração da incidência de radiação solar é idêntica à registada para a orientação Oeste. Contudo, o horário a que ocorre sugere para dois comportamentos da temperatura operativa distintos. Os valores máximos e mínimos são igualmente diferentes, como resultado de uma menor intensidade de radiação directa transmitida para esta orientação. O modelo base, ilustrado na Figura 69, reflecte com pormenor as alterações anteriormente descritas. A Figura 71 e a Figura 72 apresentam os resultados para as diferentes espessuras de pavimento. A comparação entre a colocação da massa no pavimento ou na cobertura está representada na Figura 73.

4.4.4.1.1 Envolvente interior de inércia mínima

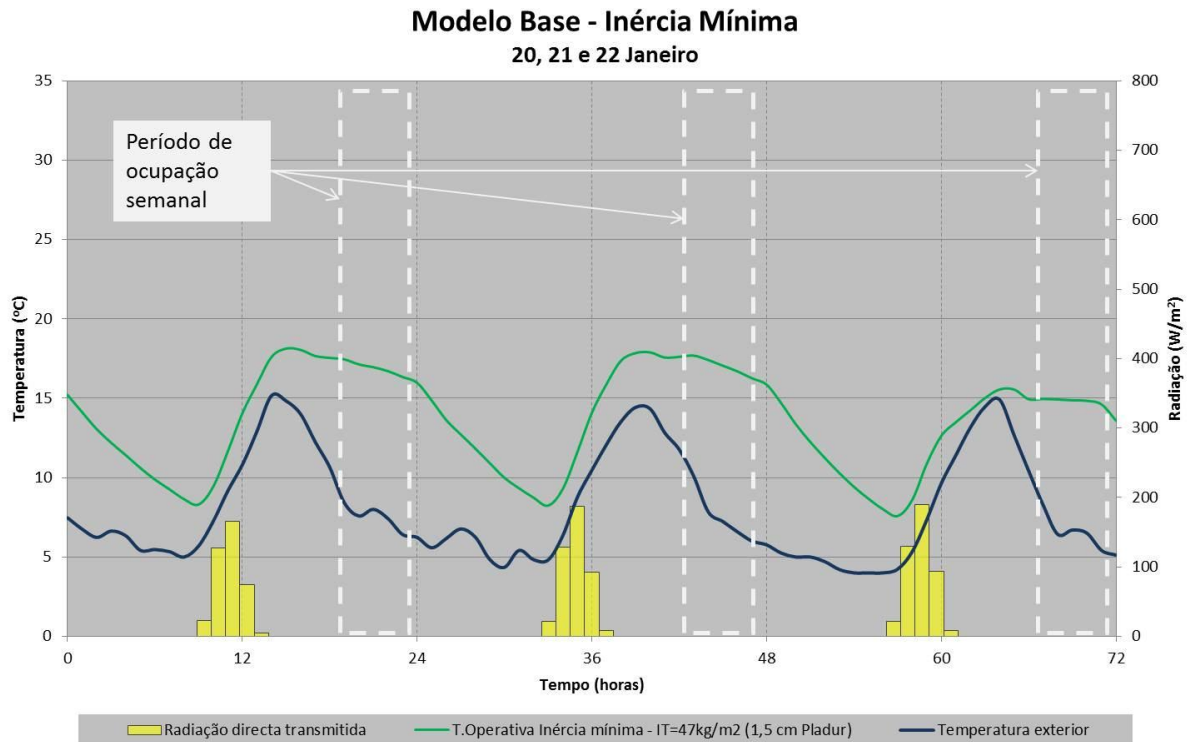


Figura 69 - Distribuição da temperatura operativa para o modelo base de inércia mínima, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Este.

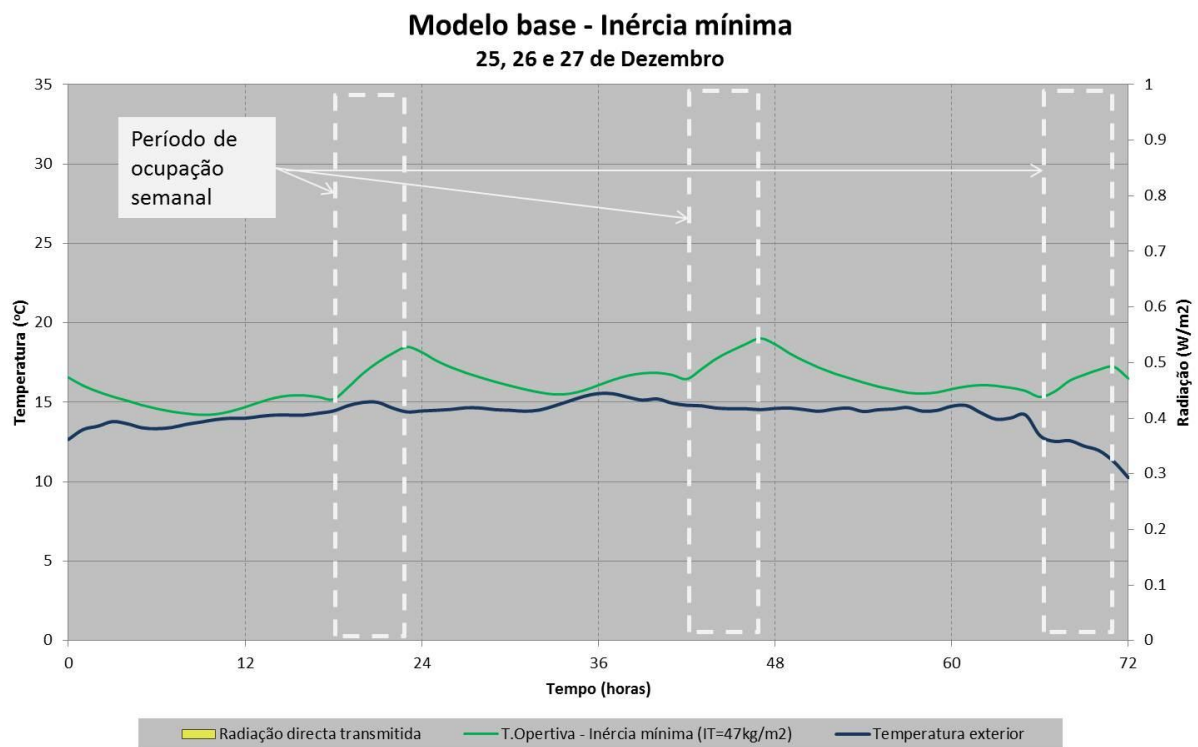


Figura 70 - Distribuição da temperatura operativa para o modelo base de inércia mínima, nos dias característicos de Dezembro. Orientação Este.

As duas temperaturas, exterior e operativa, iniciam o período de aquecimento, sensivelmente, em simultâneo, como resultado da radiação directa transmitida Figura 69. O desfasamento entre os dois picos de temperatura máxima não tem grande significado. Assim como na orientação Norte, para o pico da temperatura máxima exterior, a transferência de calor entre os dois ambientes realiza-se apenas por condução. Consequentemente, verifica-se um desfasamento reduzido entre as duas temperaturas.

A Figura 70, como era de esperar, não apresenta alterações relativamente às restantes orientações.

4.4.4.1.2 Envolvente interior com pavimento ou cobertura massivas

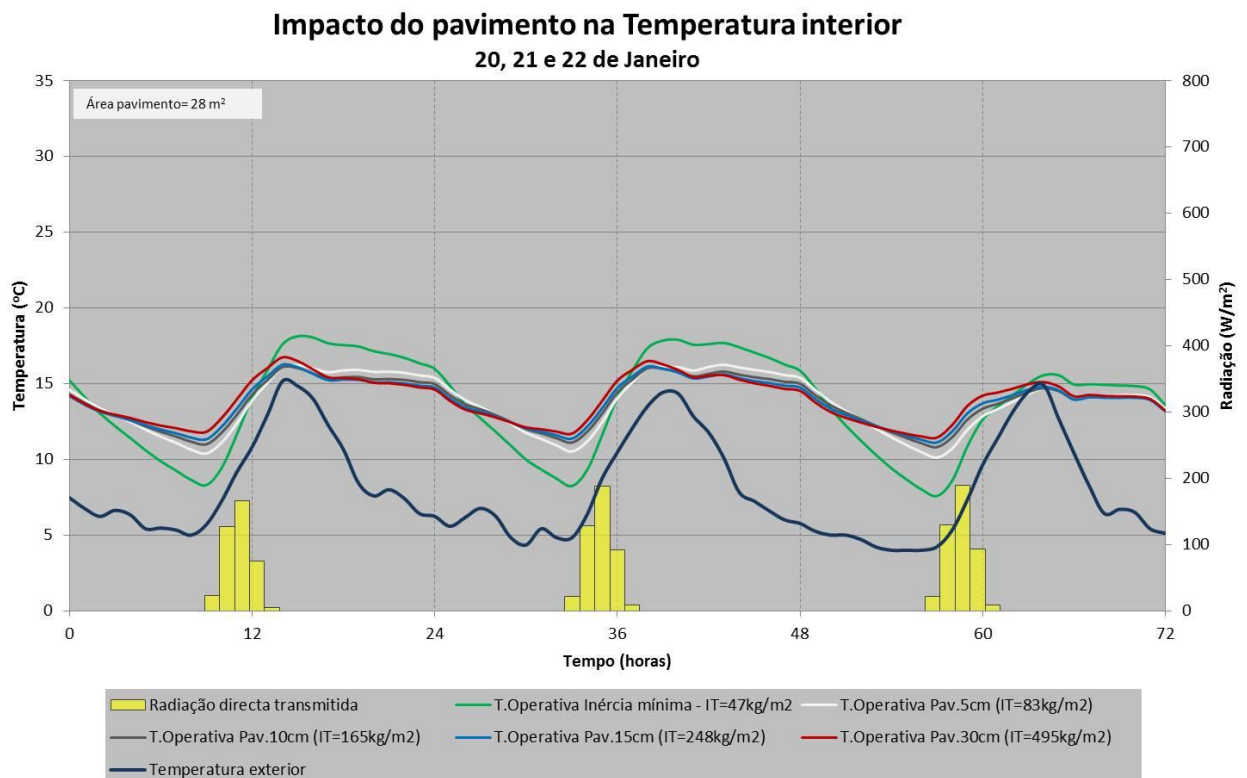


Figura 71 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de cobertura, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Este.

Embora para um intervalo horário diferente, a Figura 71 mostra que a temperatura operativa máxima aumenta com o aumento da espessura, como acontece para a orientação Oeste, Figura 50. Neste caso, quando a radiação directa incide no espaço, a diferença entre as duas temperaturas, operativa e exterior, é significativa, de aproximadamente 5°C. A quantidade de calor transferido por condução, resultante da diferença de temperaturas, é tanto menor quanto maior for a espessura do pavimento. Como resultado, o efeito da radiação solar directa no pavimento tem maior impacto para os casos de maior espessura.

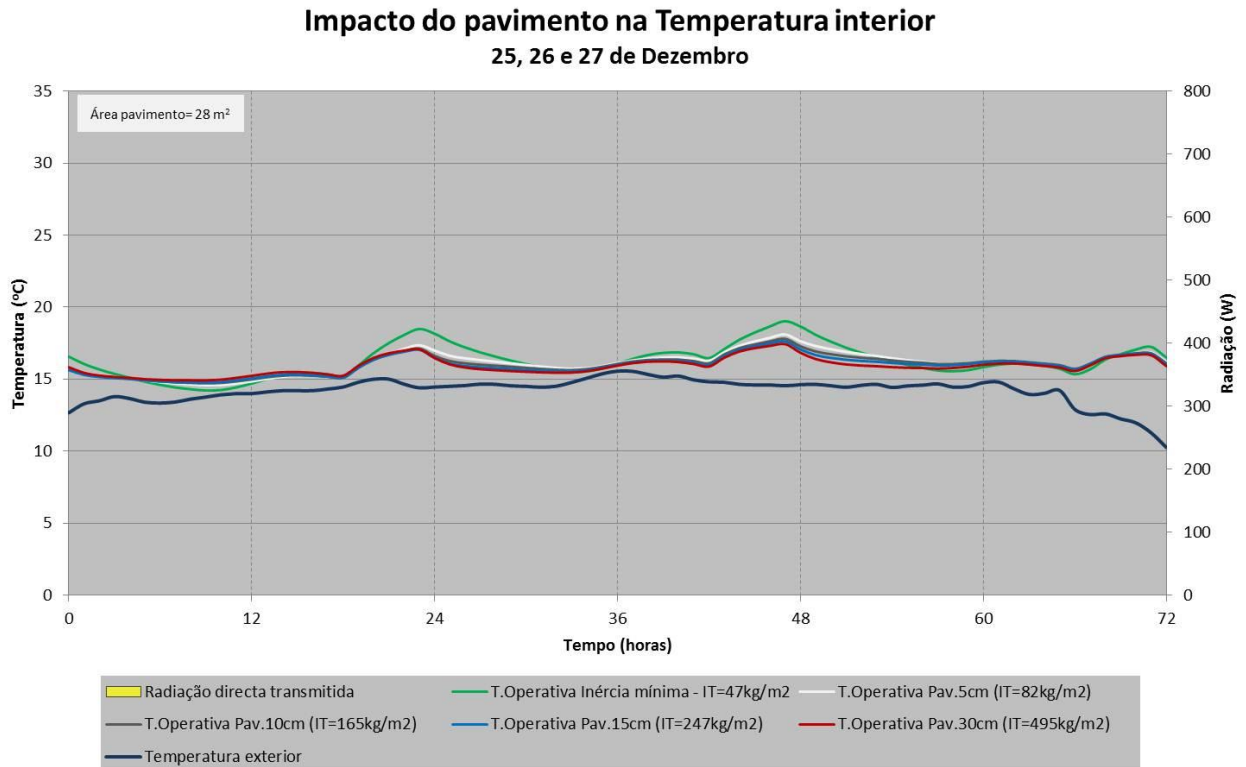


Figura 72 - Distribuição da temperatura operativa para diferentes espessuras de cobertura, nos dias característicos de Janeiro. Orientação Este.

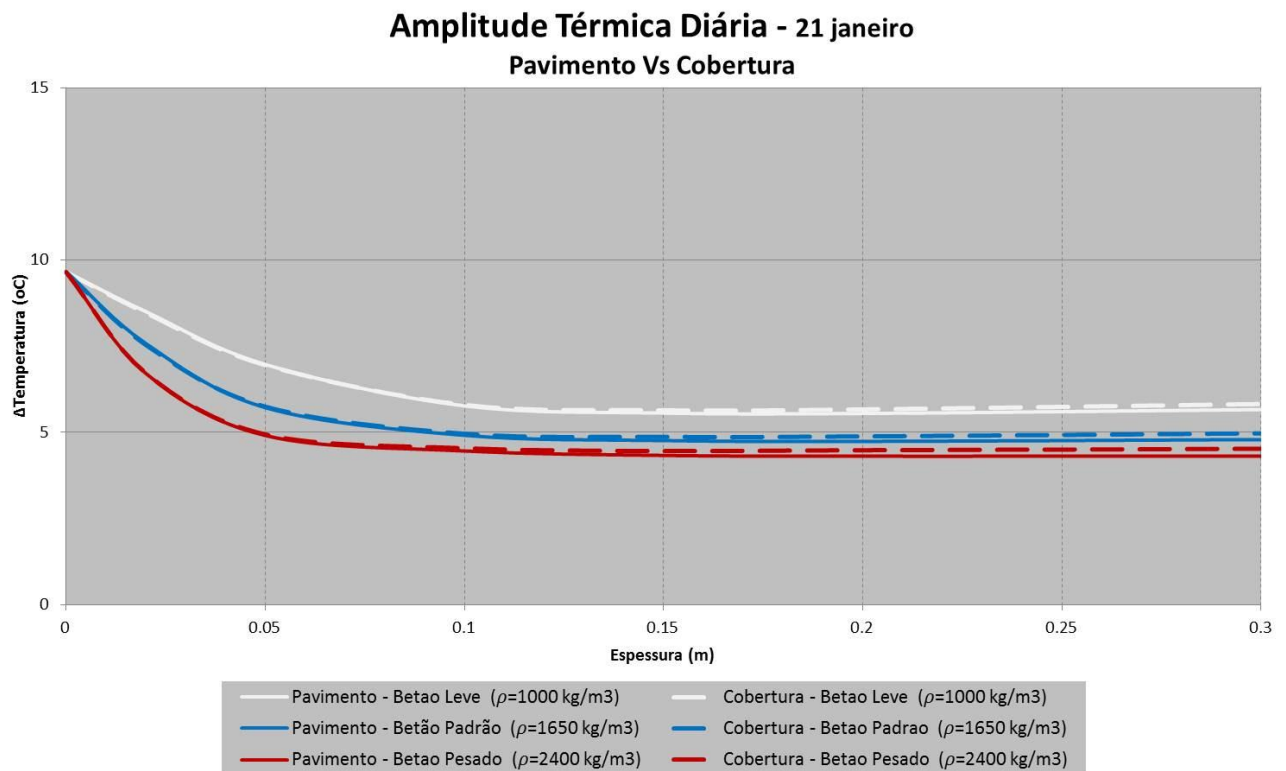


Figura 73 - Comparação entre as amplitudes térmicas diárias referentes às configurações do pavimento e da cobertura. A espessura varia entre 0 e 30 centímetros, para três diferentes densidades. Resultados para o dia 21 de Janeiro, orientação Este.

A Figura 73 confirma, mais uma vez, a relação entre a radiação directa incidente e o impacto da inércia na amplitude térmica diária. Quanto menor a radiação incidente no espaço, menor é o impacto da inércia na temperatura operativa. Como resultado da reduzida radiação directa, a diferença entre adicionar massa no pavimento ou na cobertura é pouco significativa.

O aumento da área exposta, para ambos os períodos característicos, regista resultados equivalentes aos apresentados para a orientação Oeste, Figura 53 e Figura 54. Novamente o aumento da área resulta no aumento da temperatura operativa mínima e na diminuição da máxima. Não se verificando nenhum aspecto singular, os resultados correspondentes à envolvente massiva e à comparação entre patamares não serão apresentados.

4.4.4.2 Resultados sazonais

Assim como acontece nos resultados diários, o aumento da área exposta para a estação de aquecimento resulta num conjunto de distribuições equivalentes às da orientação Oeste, Figura 57. Igualmente, a razão entre as amplitudes, e a distribuição da temperatura operativa média não apresenta alterações significativas, registando valores idênticos aos da Figura 56 e Figura 58, respectivamente.

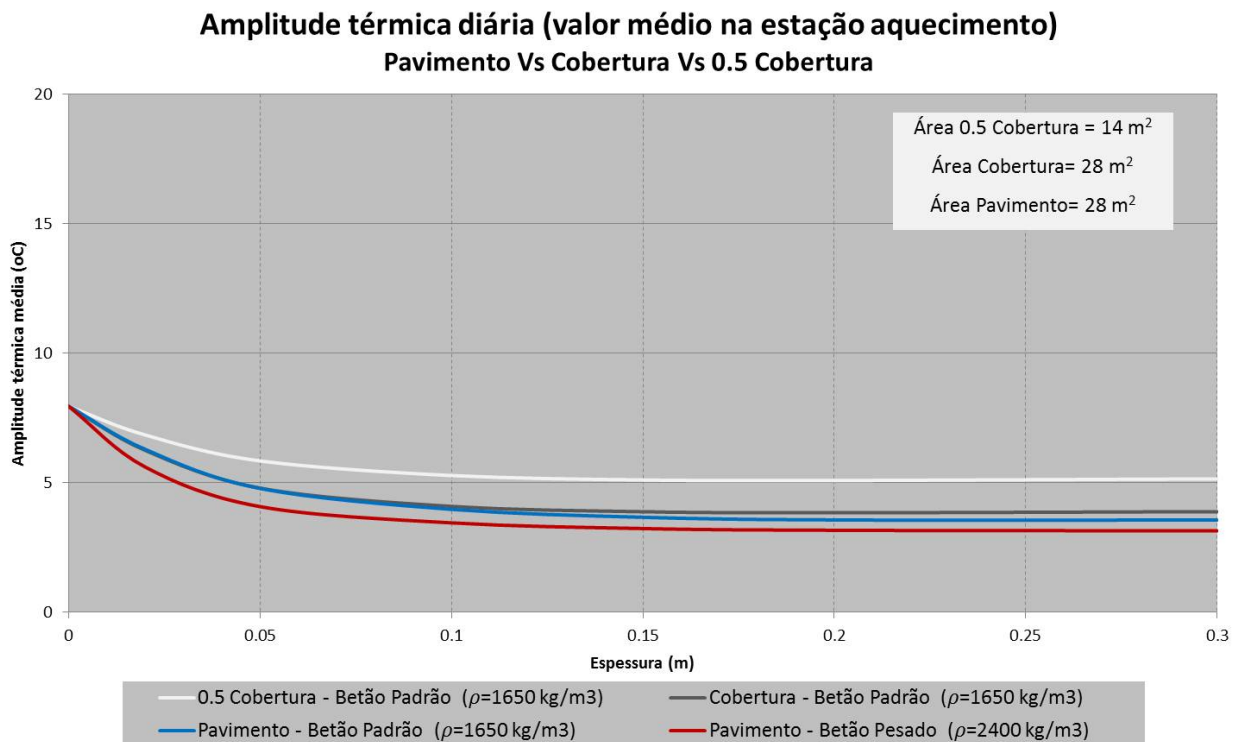


Figura 74 - Evolução do valor médio da amplitude térmica diária segundo um aumento progressivo da espessura, entre 0 e 30 centímetros. Resultados para as superfícies do pavimento, cobertura e metade da cobertura massivas na estação de aquecimento, orientação Este.

A Figura 74 confirma, a nível sazonal, a relação entre a quantidade de radiação directa transmitida e o impacto da inércia térmica. As distribuições relativas ao pavimento e cobertura registam praticamente os mesmos valores e, o aumento da densidade do material apresenta uma diferença pouco significativa.

4.5 Comparação de resultados entre orientações

A Figura 75 ilustra as principais diferenças registadas para as quatro orientações, nos dias característicos de Janeiro. Está dividida em três conjuntos de curvas, o primeiro conjunto relativo às temperaturas operativas para a envolvente interior com inércia térmica, o segundo relativo às temperaturas operativas para a envolvente interior com pavimento massivo, e o último correspondente às temperaturas operativas para a envolvente interior com envolvente massiva. Para cada modelo são representados os resultados relativos a cada orientação, para a mesma espessura de material. Respectivamente, 1,5cm de gesso cartonado e, 15cm de betão padrão para os dois últimos casos.

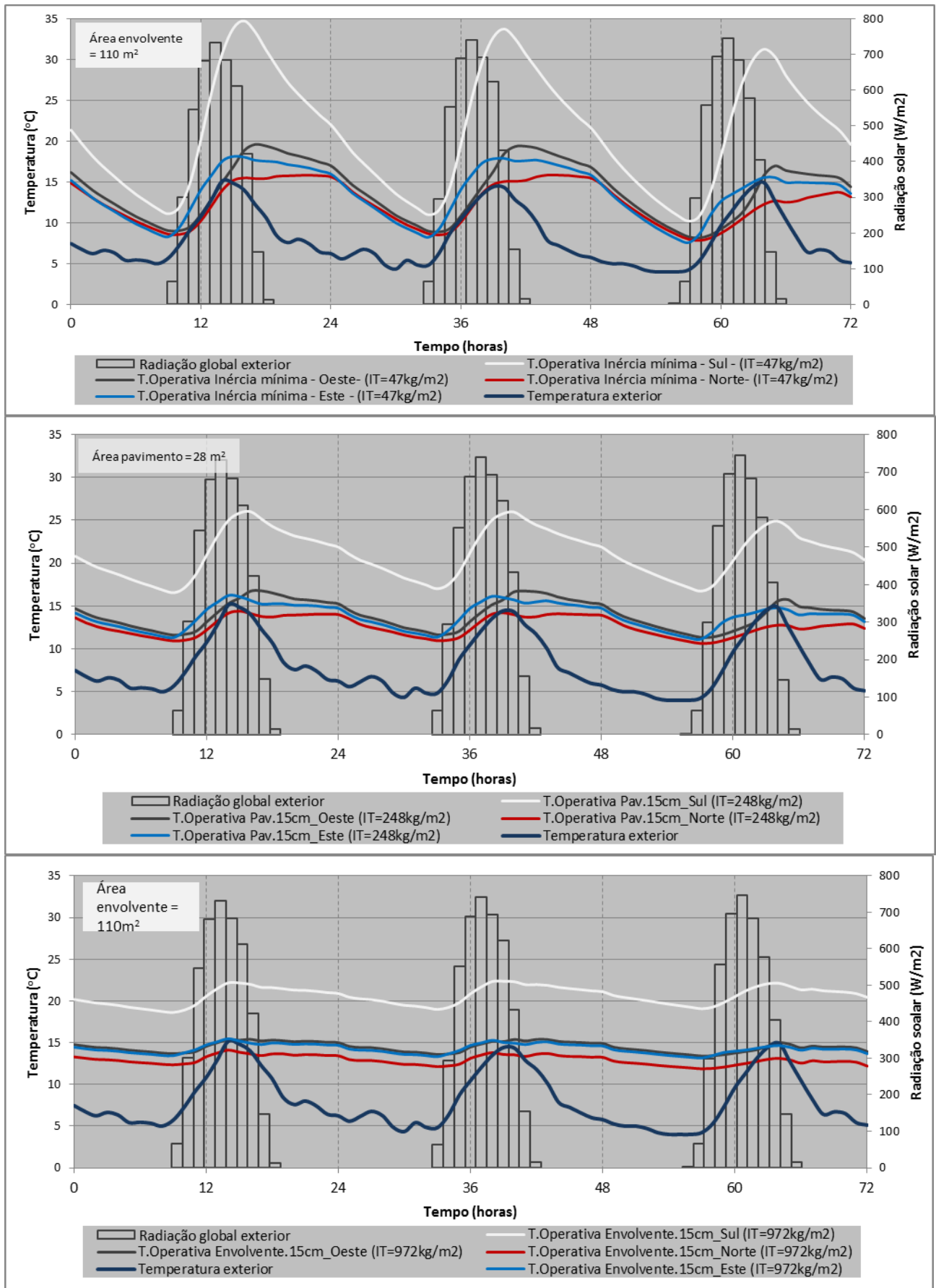


Figura 75 – Comparação entre temperaturas operativas para as quatro orientações, com base nos principais patamares. Dias característicos de Janeiro.

A Figura 75 revela, efectivamente, que a orientação Sul é a que regista uma maior amplitude térmica para os três modelos. É também a que apresenta a maior diminuição de amplitude térmica com o aumento da inércia. A orientação Norte é caracterizada pela menor amplitude das quatro orientações, registando uma diferença pouco significativa entre os dois patamares. As orientações Oeste e Este apresentam distribuições de temperatura operativa semelhantes, que se aproximam com o aumento da inércia térmica.

A temperatura operativa média para estas duas orientações é praticamente igual. Para as restantes orientações verifica-se um valor distinto entre temperaturas operativas médias.

Quanto maior a inércia térmica menor o desfasamento temporal verificado entre as orientações.

A orientação Sul é a única que garante uma variação da temperatura operativa dentro do intervalo de conforto térmico.

4.6 Discussão de resultados

4.6.1 Resumo dos principais resultados

O aumento progressivo da quantidade de inércia térmica da envolvente comprovou ter efeitos significativos na distribuição da temperatura operativa do espaço. Os resultados obtidos permitem realçar o efeito singular de cada uma das variáveis consideradas, densidade do material de construção, espessura da envolvente e área exposta.

O calor armazenado pelas paredes e o calor restituído ao ar ambiente varia com a espessura da parede e com os seus materiais constituintes [Guedes 1987]. O aumento da espessura da parede verifica um aumento da capacidade de armazenar calor que resulta, até um certo patamar, numa menor variação da temperatura interior [Al-Sanea 2012]. Os resultados obtidos para as quatro orientações confirmam a diminuição da amplitude térmica com o aumento de espessura e densidade das superfícies massivas. Todas as orientações registaram o mesmo patamar de espessuras para a qual o aumento da espessura deixa de resultar numa diminuição significativa da amplitude térmica. Esse valor revelou-se tanto menor quanto maior a densidade da superfície massiva, e menor a radiação solar transmitida, ficando caracterizado pelo intervalo entre 10 e 15 cm. Estudos anteriores sugerem o intervalo entre 20 e 25 cm [Guedes 1987, Al-Sanea 2012].

Quando comparado o efeito do aumento da densidade com o aumento de espessura, para a mesma inércia térmica resultante, comprova-se que o aumento de densidade garante uma maior redução da amplitude térmica interior. Ou seja, para a mesma área massiva, entre aplicar 5cm de “betão pesado” ou 10 cm de “betão leve”, a primeira solução garante uma menor variação da temperatura operativa interior, embora que, a relação existente entre densidades seja relativamente superior a duas vezes.

Estudos anteriores concluíram que o aumento de inércia resulta num maior desfasamento entre o pico da temperatura interior e o pico registado para as condições exteriores de radiação e temperatura [Ogoli 2002, Balaras 1995]. No presente caso, embora pouco significativo, verifica-se uma redução do desfasamento dos picos de temperatura com o aumento da inércia. A Figura 76 ilustra a distribuição correspondente a duas diferentes espessuras de pavimento massivo, para o dia 20 de Janeiro e orientação Sul. É visível a redução do desfasamento com o aumento da espessura. Tal facto é explicado através da intensidade da potência irradiada pela superfície massiva. Quanto menor a inércia, maior é a intensidade da libertação de calor. Após

o instante verificado para a radiação solar máxima, a libertação de calor, para superfície de menor inércia intensifica-se. Pelo contrário, a superfície de maior inercia liberta uma menor quantidade de calor durante um maior período de tempo. No caso do pavimento massivo de 5cm, como resultado de uma libertação de calor mais intensa, a temperatura operativa aumenta com maior rapidez e durante um maior período de tempo, aumentando o desfasamento. O seu arrefecimento é igualmente mais rápido.

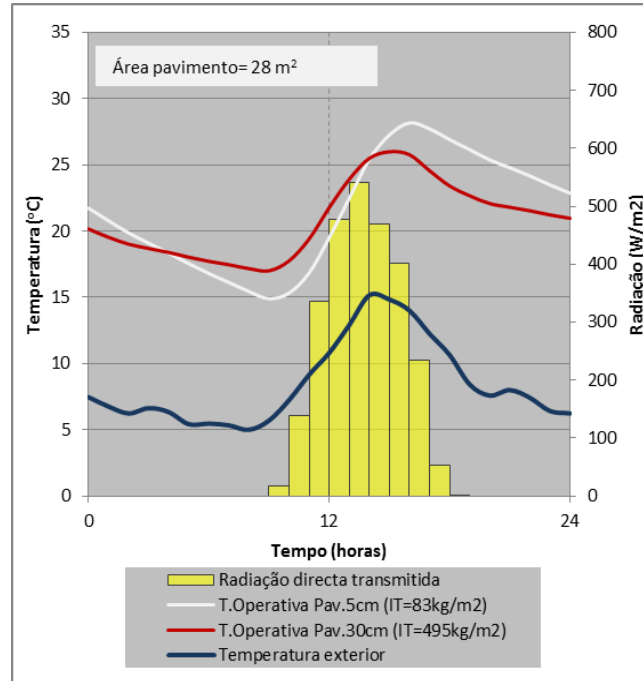


Figura 76 - Distribuição da temperatura operativa para duas espessuras do pavimento massivo, no dia 20 de Janeiro. Orientação Sul.

O aumento da área exposta para as quatro orientações garante a redução da variação da temperatura operativa. Como era de esperar, o aumento da área das superfícies massivas verifica um aumento significativo na capacidade de armazenar calor. Quando comparado o efeito entre o aumento da área ou o aumento da espessura, para o mesmo valor resultante de inércia térmica, o aumento da área revela uma maior redução da amplitude térmica. O que, por outro lado, permite afirmar que, diminuindo a área de uma superfície massiva a metade, com um consecutivo aumento da espessura para o dobro, resulta numa distribuição da temperatura operativa aproximadamente equivalente. O pequeno aumento da variação da temperatura verificado pode ser compensado com o aumento da densidade do material utilizado.

Contudo, a análise para os dias característicos sem radiação mostra que, para um dia encoberto com uma reduzida amplitude térmica, o aumento da inércia resulta numa diminuição pouco significativa da amplitude da temperatura operativa. Como consequência, não se verificam melhorias significativas no conforto térmico interior. O comportamento térmico do espaço mostrou-se também praticamente independente da orientação do espaço para estes dias.

4.6.2 Definição do patamar mínimo de inércia térmica

Um dos objectivos do trabalho é encontrar um patamar mínimo de inércia que garanta as condições de conforto térmico interior, durante a estação de aquecimento. O patamar foi

definido com base na análise nos resultados da amplitude térmica diária média e na temperatura operativa média sazonal. Foi estabelecido um valor mínimo de selecção de, respectivamente, amplitude térmica menor ou igual a 5°C e temperatura operativa média superior ou igual a 20°C. Definiu-se assim, para cada orientação, um patamar mínimo, a que corresponde um valor mínimo de área massiva, espessura e densidade de material, que verifique os critérios estabelecidos.

Com base na análise dos resultados para a orientação Sul, foram consideradas duas soluções diferentes, representativas do patamar mínimo de inercia. A Figura 77 mostra a distribuição da amplitude média diária entre dois modelos, pavimento massivo com betão pesado (2400 kg/m³) e pavimento passivo com cobertura massiva de 5 cm de betão padrão (1650 kg/m³). Verifica-se que o aumento de densidade do pavimento compensa o aumento de área exposta para uma espessura de 5cm de betão padrão. Para um caso de reabilitação, a colocação de 15 cm de betão pesado em todo o pavimento (IT=360 kg/m²) iria garantir uma amplitude térmica diária média de, aproximadamente, 5°C. A restante envolvente pode ser configurada com materiais leves sem que resulte numa diminuição do conforto.

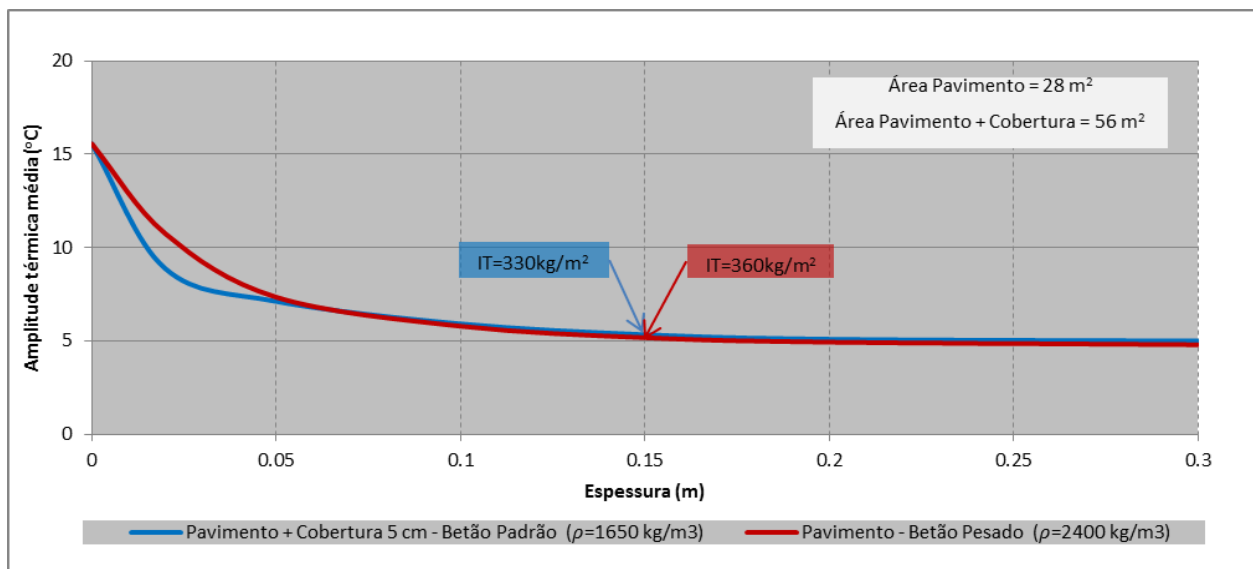


Figura 77 - Amplitude média diária para a estação de aquecimento correspondente aos modelos de pavimento massivo de betão pesado e pavimento massivo com 5cm de cobertura massiva. Orientação Sul.

O segundo patamar corresponde à colocação de 15 cm de betão padrão para as superfícies do pavimento e cobertura, o que totaliza uma área duas vezes superior ao patamar anterior Figura 78. Neste caso, a adição de 15 cm de betão na cobertura apresenta uma diminuição da amplitude térmica equivalente à adição de 5cm do mesmo betão em toda a envolvente. Para um caso de reabilitação em que a colocação de massa térmica nas paredes interiores seja impossível, consegue-se garantir uma amplitude térmica diária média inferior a 5°C.

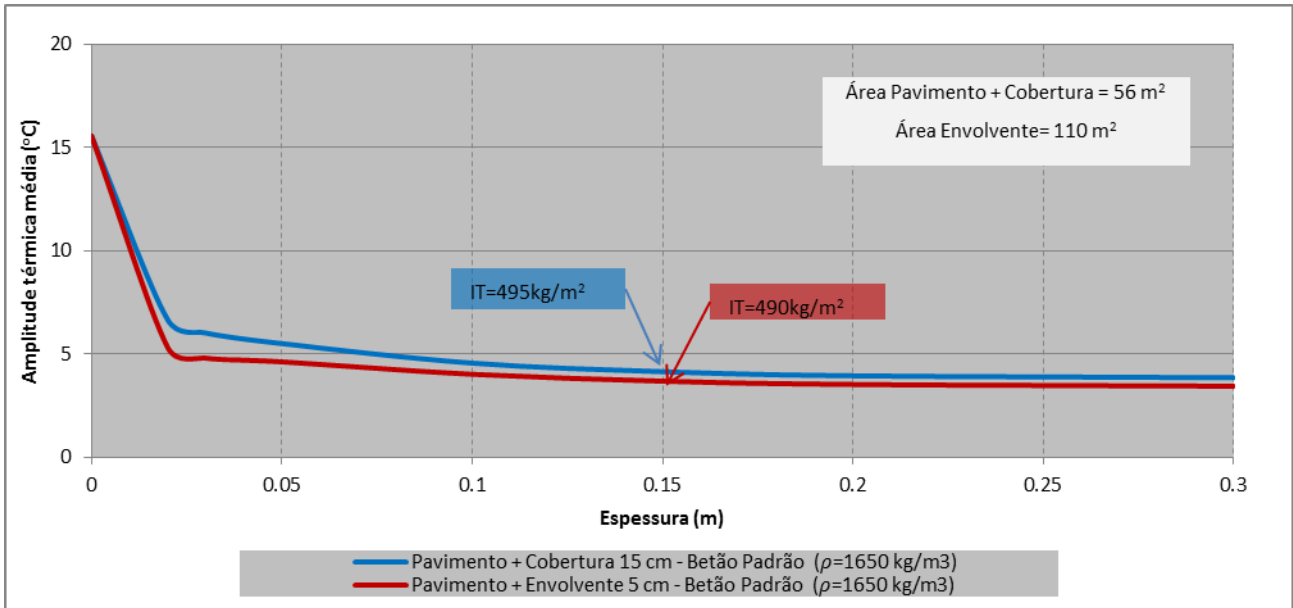


Figura 78 - Amplitude média diária para a estação de aquecimento correspondente aos modelos de pavimento massivo com cobertura massiva e pavimento massivo com 5cm de envolvente massiva, ambos de betão padrão. Orientação Sul.

O aumento da espessura e da área exposta não tem uma influência significativa no valor da temperatura operativa média, como foi possível confirmar na análise de resultados. A Figura 79 ilustra a temperatura operativa média para os dois patamares de área exposta mínimos definidos, durante a estação de aquecimento. Para ambos os modelos, uma espessura de 15 cm corresponde a um valor médio de, aproximadamente, 20°C de temperatura operativa. Pode esperar-se, para ambos os modelos, uma variação da temperatura operativa entre 17,5°C e 22,5°C.

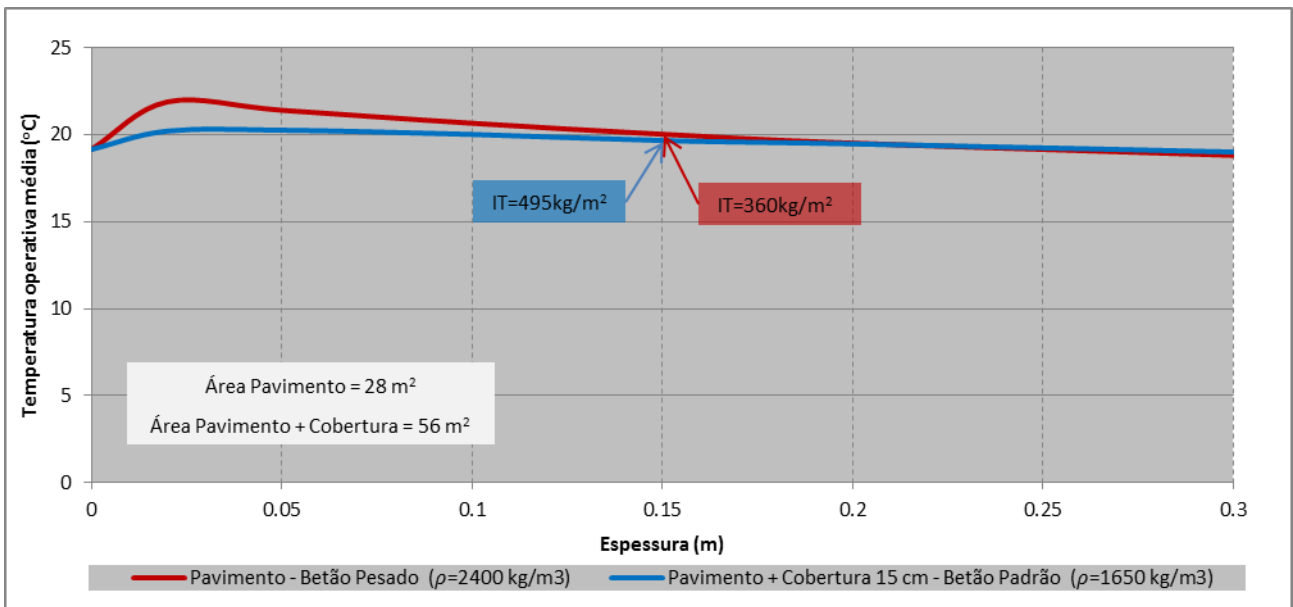


Figura 79 - Distribuição da temperatura operativa média para os dois patamares mínimos definidos, durante a estação de aquecimento. Orientação Sul.

Para as restantes orientações, a pequena quantidade de radiação transmitida leva a que seja necessária uma menor quantidade de massa térmica para se obter uma amplitude térmica reduzida. O primeiro patamar mínimo definido para a orientação Sul revela-se suficiente para garantir uma amplitude reduzida, inferior a 4°C, para a orientação Oeste, Norte e Este. O patamar mínimo, para estas três orientações é então definido por um pavimento massivo de 15 cm de betão pesado ($\rho=2400 \text{ kg/m}^3$) Figura 80. Contudo, embora a amplitude seja reduzida, os valores da temperatura média sazonal correspondentes aos patamares mínimos definidos, são significativamente inferiores aos da orientação Sul, como era de esperar, Tabela 12.

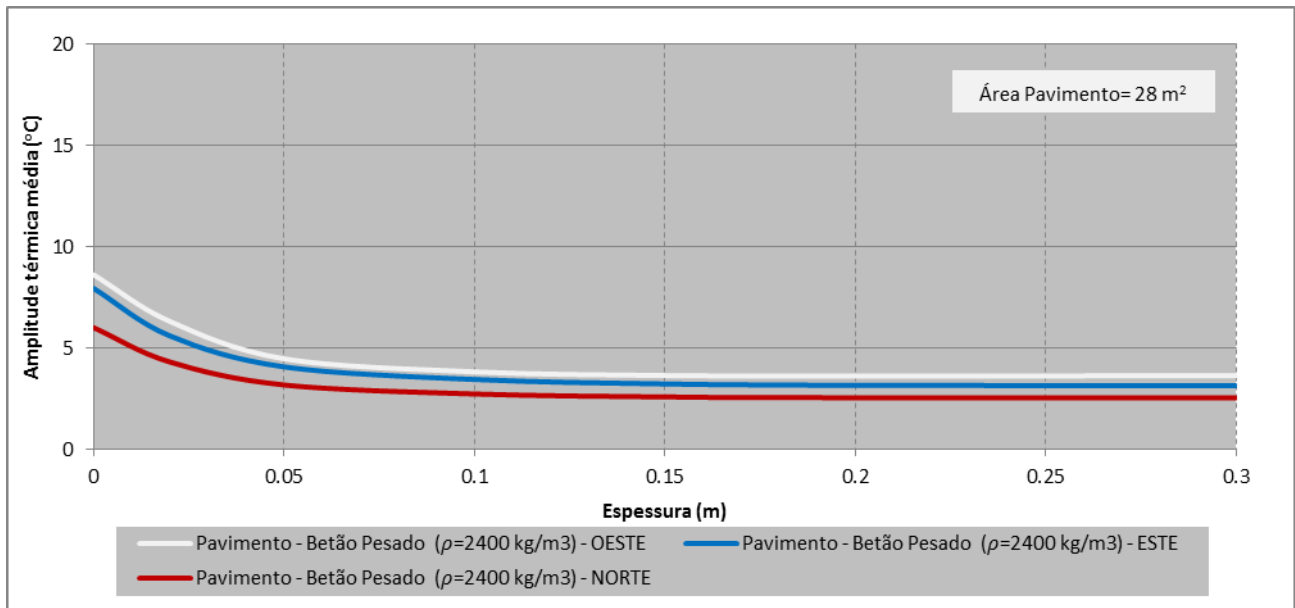


Figura 80 - Amplitude média diária para a estação de aquecimento correspondente ao modelo de pavimento massivo de betão pesado. Orientações Oeste, Norte e Este.

Tabela 12 - Temperaturas operativas médias correspondentes aos patamares mínimos das quatro orientações.

	Patamar mínimo Oeste (IT=360kg/m ²)	Patamar mínimo Norte (IT=360kg/m ²)	Patamar mínimo Este (IT=360kg/m ²)	Patamar mínimo Sul 1 (IT=360kg/m ²)	Patamar mínimo Sul 2 (IT=495kg/m ²)
Temperatura Operativa média (estação de aquecimento) [°C]	13,5	12,0	13,1	20	20,1

As temperaturas operativas médias para os patamares definidos são reduzidas. Contudo, o aumento da área massiva não se traduz num aumento da temperatura média operativa, como se verifica na Figura 79. Para estas orientações o patamar mínimo definido não garante temperaturas dentro do intervalo de conforto. Contudo, com uma área exposta quatro vezes inferior a um modelo de envolvente massiva, garante uma variação da temperatura operativa inferior a 4°C, mantendo o mesmo valor da temperatura média.

5 Conclusões

O trabalho apresentado analisa o efeito da inércia térmica no comportamento térmico de edifícios. Assim, foi estudado, em primeiro, o comportamento térmico de uma parede isolada e foi analisada a distribuição da temperatura e a potência calorífica libertada pela parede ao longo do tempo, depois da incidência de radiação solar. Depois, avaliou-se o efeito da variação da massa térmica da envolvente interior no comportamento térmico de um espaço localizado no Porto para as quatro orientações, Norte, Sul, Este e Oeste.

5.1 Comportamento térmico de uma parede isolada

Neste estudo, a variação da quantidade de radiação incidente na parede mostra que, quanto maior o tempo de incidência e a intensidade da radiação solar, maior a temperatura máxima registada e maior é a potência calorífica libertada. Como resultado, o tempo em que a radiação solar é restituída ao ambiente aumenta também.

A análise comparativa do modelo de parede adoptando soluções de reabilitação permite concluir que, as soluções construtivas que utilizam materiais leves como o gesso cartonado diminuem de forma acentuada a capacidade da parede em armazenar calor. Como resultado, a radiação solar incidente na parede é quase instantaneamente restituída para o ambiente.

5.2 Influência da inércia térmica no comportamento de um espaço

De forma a avaliar a influência da inércia térmica no comportamento térmico de um espaço, variou-se a área dos elementos da envolvente com massa elevada (massivos), e variou-se ainda a espessura e o tipo dos materiais utilizados. O comportamento térmico do espaço foi avaliado recorrendo à temperatura operativa.

A variação da área das superfícies massivas da envolvente interior do espaço mostra que o aumento da área leva a uma redução efectiva da variação da temperatura operativa. Verifica-se que a variação da área tem uma grande influência na temperatura operativa nos dias com maior intensidade de radiação solar transmitida, enquanto que, nos dias com menores níveis de radiação solar, esta influência é pouco significativa. Para dias encobertos, pode ainda concluir-se que, a distribuição da temperatura operativa é praticamente independente da orientação do espaço.

A variação da massa térmica, de uma forma geral, mostra que o aumento de massa tem um maior efeito no comportamento térmico interior para superfícies que recebem radiação solar directa.

O aumento da espessura da envolvente interior resulta numa menor amplitude da temperatura operativa. O seu aumento resulta também numa diminuição do desfasamento entre as temperaturas máximas, exterior e operativa.

Quando comparado o efeito do aumento de área “massiva” com o aumento de espessura da envolvente, para o mesmo valor de inércia térmica resultante, conclui-se que o aumento de área exposta garante uma maior redução da amplitude térmica interior.

A variação do material utilizado na envolvente mostra que o aumento de densidade reduz a variação da temperatura operativa interior. Quando comparado o efeito do aumento da densidade com o aumento de espessura, para a mesma inércia térmica resultante, comprova-se que o aumento de densidade garante uma maior redução da amplitude térmica interior. A utilização de tipos de material com diferentes densidades permitiu definir uma espessura, para o intervalo de 10-15 cm, para além da qual o efeito da inércia resulta numa variação pouco significativa da temperatura operativa.

5.3 Patamares mínimos de inércia térmica

Com base nos resultados obtidos nos casos de estudo foram definidos patamares mínimos de inércia térmica de forma a garantir condições de conforto térmico – temperatura operativa média e amplitude térmica – durante a estação de aquecimento. Foi tido em conta o limite crítico de espessura e a quantidade de radiação solar incidente por superfície. De modo a garantir as condições de conforto, definiu-se que o patamar deveria verificar uma amplitude térmica menor ou igual a 5°C e temperatura operativa superior ou igual a 20°C.

Para a orientação Sul definiram-se dois patamares. O primeiro patamar caracteriza-se pela colocação de 15 cm de “betão pesado” em toda a área de pavimento, (inércia térmica equivalente de 360 kg/m²). O segundo patamar é definido pela colocação de 15 cm de “betão padrão” no pavimento e na cobertura (inércia térmica resultante de 495 kg/m²). Devido à quantidade de radiação solar que incide na superfície, verifica-se que o pavimento é a superfície da envolvente que tem maior impacto na distribuição da temperatura operativa. Consequentemente a consideração do pavimento como um elemento massivo da envolvente interior é da maior importância. A atribuição de uma área equivalente, considerando outras superfícies, não garante o mesmo nível de conforto térmico durante a estação de aquecimento.

Para as restantes orientações o patamar mínimo definido caracteriza-se pela colocação de 15 cm de “betão pesado” em toda a área de pavimento, (inércia térmica equivalente de 360 kg/m²) o que coincide com o primeiro patamar definido para a orientação Sul. A definição de um segundo patamar mínimo não se justifica, uma vez que, o aumento de inércia não leva a uma melhoria significativa do conforto térmico interior, ao contrário de verificado para a orientação Sul.

5.4 Sugestões para trabalhos futuros

Para possíveis estudos futuros propõe-se a comparação entre os resultados obtidos por modelação térmica apresentados neste trabalho e os resultados experimentais obtidos na CTO no trabalho “Caracterização da inércia térmica de paredes maciças” por M. Guedes [Guedes 1987] que estudou, para diferentes materiais, espessuras “óptimas” dos elementos massivos da envolvente na estação de arrefecimento.

Sugere-se ainda que o caso de estudo desenvolvido neste trabalho seja expandido para um edifício de habitação, englobando as diferentes divisões, estudando-se a influência da inércia térmica no comportamento térmico global do edifício. Adicionalmente, este estudo poderia ser executado para diferentes tipologias de edifícios de habitação e em diferentes contextos climáticos.

6 Referências e Bibliografia

- A. F. Pimentel (2005) “Reabilitação de edifícios tradicionais”
- A. Oliveira (1989) “Método simplificado para avaliação do comportamento térmico de edifícios solares passivos”, Porto/FEUP
- A. Dadoo (2011) “Effect of thermal mass on life cycle primary energy balances of a concrete- and a wood-frame building”;
- ASHRAE 55-2010, “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”, 2010;
- Basic Concepts Manual (2012) “Essential Information You Need about Running EnergyPlus”;
- C.A. Balaras (2005), “The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods”;
- C. A. Pina dos Santos (2006), “Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente de edifícios”;
- D. M. Ogoli (2002), “Predicting indoor temperatures in closed buildings with high thermal mass”;
- E. O. Fernandes (1983), A.Ribas,C.Araujo e S.Boissel. Projecto PES4 – “Casa termicamente Optimizada” – GFC/FEUP
- “Eficiência Energética em Edifícios” (2005), DGGE/IP3E, Lisboa, Maio
- F. Veiga (2007) “Reabilitação térmica de edifícios”;
- H. B. Awbi (1999), “Natural convection from heated room surfaces”;
- H. Gonçalves (1986), “Comportamento de sistemas solares passivos em edifício”, Porto,FEUP;
- J.G. Martins (2005), “Identificação e tratamento de patologias em edifícios”, 1ªedição;
- J. Kosny (2001), “Thermal Mass - Energy Savings Potential in Residential Buildings”;
- J. Zhou (2007), “Coupling of thermal mass and natural ventilation in buildings”;
- K. Gregory (2007), “Effect of thermal mass on the thermal performance of various Australian residential constructions systems”;
- M. Guedes (1987), “Caracterização da inercia térmica de paredes maciças”, Porto, FEUP;
- M. P. Morales (2011), “Study of the geometry of a voided clay brick using rectangular perforations to optimize its thermal properties”;

- M. Veiga (2003) “Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes “;
- PLADUR (2012) “Resumo das características técnicas”, Grupo Uralita;
- R. Zeng (2010), “New concepts and approach for developing energy efficient buildings: Ideal specific heat for building internal thermal mass”;
- S. A. Al-Sanea (2011), “Effect of thermal mass on performance of insulated building walls and the concept of energy savings potential”;
- S. A. Al-Sanea (2012), “Effect of masonry material and surface absorptivity on critical thermal mass in insulated building walls”;
- S. A. Kalogirou (2001), “Energy analysis of buildings employing thermal mass in Cyprus”;
- T. J. Williamson (2011), “Assessing the effectiveness for thermal mass in the building envelop”;
- T. Lopes (2011), “Pré-fabricação aplicada ao contexto da reabilitação de edifícios” Lisboa;
- Y. A. Cengel (2002), “Heat Transfer - a practical approach”, 2º Edição;
- <http://magoonconcretestudy.wordpress.com/2011/01/15/passive-solardirect-gain-case-study-st-georges-county-secondary-school-wallesy-england/> - visitada a 12/03/2013