



ESTUDO E AVALIAÇÃO DAS COMPONENTES TÉRMICAS NA UTILIZAÇÃO DE ENERGIA EM EDIFÍCIOS

Hugo Desidério Andrade de Barros

Dissertação apresentada à Universidade da Madeira para cumprimento
dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Funchal, Novembro de 2009



ESTUDO E AVALIAÇÃO DAS COMPONENTES TÉRMICAS NA UTILIZAÇÃO DE ENERGIA EM EDIFÍCIOS

Hugo Desidério Andrade de Barros

Licenciado em Engenharia Civil

Orientador:

Doutor João Luís Vieira Alves e Sousa

Dissertação apresentada à Universidade da Madeira para cumprimento
dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Funchal, Novembro de 2009

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu sincero agradecimento a algumas pessoas que directa ou indirectamente participaram na elaboração desta tese:

Em primeiro lugar, ao Doutor João Alves e Sousa, orientador deste trabalho, por todo o apoio prestado e sem o qual não seria possível a realização deste trabalho.

Ao Professor Luíz Carlos Guerreiro Lopes, pelo incentivo e auxílio prestado nas alturas mais críticas.

Aos Engenheiros Artur e Eliane Portela, pelo apoio prestado ao longo do curso.

E por fim, e não menos importante, a minha família, namorada e a todos aqueles que estiveram presentes e me acompanharam ao longo deste percurso, o meu sincero reconhecimento.

Sumário

Este trabalho tem por objectivo desenvolver e implementar metodologias relacionadas com a temática de térmica de edifícios, no sentido de quantificar e otimizar as perdas e ganhos de calor e os consumos de energia associados aos edifícios.

Com base na teoria de transferência de calor e massa, foram construídos programas de cálculo numérico para simular, em regime estacionário (permanente) e não-estacionário (transiente), os fluxos de calor e a distribuição das temperaturas em diferentes tipos de paredes comumente encontradas em Portugal e em particular na Região Autónoma da Madeira.

Estes resultados permitiram analisar a eficácia dos diversos tipos de paredes estudadas bem como o risco de condensação em algumas dessas situações. Para além deste estudo houve a preocupação de desenvolver uma metodologia de análise económica relacionada com a espessura de isolamento a aplicar.

Foram igualmente estudadas algumas medições simples de conservação de energia cuja implementação em edifícios será facilmente justificada atendendo aos baixos períodos de retorno de investimento geralmente associados a estas medidas.

Como resultado deste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta de cálculo cuja aplicação vai permitir não só estimar o risco de condensação mas igualmente o campo de temperaturas no interior das paredes ao longo do período de tempo considerado, visando a optimização de soluções de isolamento térmico *versus* condições de conforto recomendadas.

Abstract

This essay has the purpose to develop and introduce methods regarding the buildings heat in order to quantify and optimize the losses and gains of heat and also the energy consumption of the buildings.

Having the theory of heat and mass transfer in mind, programmers of numeric calculation were built as to simulate in stationary regime (permanent) and not-stationary (transient), the heat fluxes and the distribution of temperatures in different types of walls, which are common in Portugal specially in Madeira Island.

These results have allowed us to analyze the effectiveness of the several types of wall, which were studied and also the risk of condensation in some of those situations. There was also the worry to develop one methodology regarding the economical analyses of the isolation thickness to be used.

There were also studied some simple measurements of heat conservation whose implementation in buildings will be easily justified when looking at the lower periods of the investment feedback generally associated with these measures.

As a result this project a tool of calculation was developed whose application will allow not only to estimate the risk of condensation but also the temperature field inside the walls during a long period of time, in order to optimize the thermal isolation solutions versus the recommended comfort conditions.

Índice geral

Agradecimentos	I
Sumário	III
Abstract	V
Índice geral	VII
Índice de figuras	XI
Índice de gráficos	XIII
Índice de quadros	XVII
1 Introdução	1
2 Enquadramento geral	3
3 Fundamentos teóricos	11
3.1 Conceitos	11
3.2 Aplicação da termodinâmica	11
3.2.1 Lei zero da termodinâmica	11
3.2.2 Segunda lei da termodinâmica	11
3.3 Mecanismos de transferência de calor	12
3.3.1 Condução	12
3.3.2 Convecção	18
3.3.3 Radiação	22
4 Metodologia	25
4.1 Introdução	25
4.2 Trocas de calor nos edifícios	25
4.3 Método adoptado	26
4.3.1 Equação da difusão de calor	27
4.3.2 Método das diferenças finitas	31

4.3.2.1	Regime permanente e sem geração de calor	32
4.3.2.2	Regime transiente sem geração de calor	35
4.3.3	Método explícito	38
5	Isolamento térmico	45
5.1	Generalidade	45
5.2	Inércia térmica	46
5.3	Condensação	52
5.4	Limitações do regime permanente	57
5.5	Análise económica	58
6	Aplicação do modelo matemático	63
6.1	Parede simples	71
6.2	Parede simples com acabamento em reboco	73
6.3	Parede dupla com caixa-de-ar	75
6.4	Parede dupla com isolamento pelo meio	78
6.5	Parede simples com isolamento pelo interior	80
6.6	Parede simples com isolamento pelo exterior	83
6.7	Cálculo do risco de condensação	88
6.7.1	Parede dupla com isolamento e caixa-de-ar	89
6.7.2	Parede dupla com isolamento pelo meio	90
6.7.3	Parede simples com isolamento pelo exterior	91
6.7.4	Parede simples com isolamento pelo interior	92
7	Discussão de resultados	95
8	Eficiência energética nos edifícios	105
8.1	Habitação	105
8.2	Sector doméstico	106

8.2.1	Iluminação	106
8.2.2	Águas quentes sanitárias (AQS)	107
8.2.3	Isolamento de edifícios	108
8.2.4	Envidraçados	108
8.2.5	Climatização	109
8.3	Sector de serviços e indústria	110
8.3.1	Estratégias bioclimáticas	110
8.3.2	Estratégias de aquecimento	110
8.3.3	Estratégias de arrefecimento	111
8.4	Vários aspectos a ter em conta na fase de projecto	111
8.4.1	Incidência solar	111
8.4.2	Perdas de calor	111
8.4.3	Ventilação natural	112
8.5	Medidas a adoptar visando a conservação de energia	112
9	Conclusões e considerações finais	115
10	Referências	117
	Anexos	121
	Anexo I	123
	Anexo II	127
	Anexo III	129

Índice de figuras

Figura 1 - Abastecimento mundial de energia primária (Mtoe) [4]	4
Figura 2 – Mecanismos de transmissão de calor em edifícios [11]	12
Figura 3 – Condução de calor a nível microscópico [12]	13
Figura 4 – Fluxo de calor, em que $T_1 > T_2$	14
Figura 5 – Analogia eléctrica: Resistência térmica – relação entre dT e Q	15
Figura 6 – Analogia eléctrica: Resistências em série	17
Figura 7 - Transferência de calor numa parede com resistências em paralelo	17
Figura 8 – Distribuição de temperaturas num tubo de AQS [12]	18
Figura 9 – Fluxo de ar com e sem intervenção externa [12]	19
Figura 10 – Fluxo de ar junto a um objecto quente [12]	19
Figura 11 – Propagação da radiação num material semitransparente e num material opaco [12]	23
Figura 12 – Análise cartesiana da condução de calor dada pelo volume de controlo [12]	27
Figura 13 - Malha utilizada na aproximação por diferenças finitas [12]	32
Figura 14 – Nodos de continuidade [34]	33
Figura 15 – Nodo de fronteira (unidimensional) [34]	34
Figura 16 – Parede com isolamento pelo exterior	41
Figura 17 – Pormenor dos nodos de fronteira de duas camadas	42
Figura 18 – Representação dos seis tipos de paredes analisadas	69
Figura 19 – Pormenor da colocação dos nodos	70
Figura 20 – Parede simples	71
Figura 21 – Parede simples com acabamento	73
Figura 22 – Parede dupla com caixa-de-ar	75
Figura 23 – Parede dupla com isolamento pelo meio	78

Figura 24 – Parede simples com isolamento pelo interior	80
Figura 25 – Parede simples com isolamento pelo exterior	83
Figura 26 – Energia acumulada – Isolamento pelo exterior	98
Figura 27 – Energia acumulada – Isolamento pelo interior	98
Figura 28 – Variação da pressão de saturação e de vapor com a temperatura exterior a 15°C e no interior a 21°C, nos quatro casos	101
Figura 29 - Variação da pressão de saturação e de vapor com a temperatura exterior a 15°C e no interior a 23°C, nos quatro casos	102
Figura 30 - Variação da pressão de saturação e de vapor com a temperatura exterior a 3°C e no interior a 21°C, nos quatro casos	103
Figura 31 – Nodos sujeitos à convecção	123
Figura 32 – Nodo de fronteira (bidimensional)	124

Índice de gráficos

Gráfico 1 - Consumo de energia por tipo de combustível a nível mundial [4]	4
Gráfico 2 - Consumo de energia primária em Portugal [4]	5
Gráfico 3 - Consumo de energia final <i>per capita</i> [7]	6
Gráfico 4 - Consumo de energia por sector em Portugal [8]	7
Gráfico 5 - Consumo de energia nos edifícios em Portugal no sector doméstico [6]	8
Gráfico 6 - Relação percentual entre AQS, Climatização e Iluminação [6]	8
Gráfico 7 - Factor de utilização dos ganhos térmicos em função da inércia térmica de um edifício	49
Gráfico 8 - Evolução da temperatura média de verão no exterior de um edifício	65
Gráfico 9 - Curva dos valores do coeficiente α	66
Gráfico 10 - Variação da temperatura exterior segundo a equação (64)	67
Gráfico 11 - Sobreposição das curvas dos Gráficos 8 e 10	67
Gráfico 12 - Reajuste na hora solar	68
Gráfico 13 - Temperatura do ar exterior em função dos “Time-step”	68
Gráfico 14 - Temperatura nos nodos ao longo de 24 horas (8640 “Time-step”)	71
Gráfico 15 - Relação entre a temperatura do ar no exterior e nos nodos de fronteira	72
Gráfico 16 - Representação da amplitude térmica e temporal	72
Gráfico 17 - Temperatura nos nodos ao longo de 24 horas (8640 “Time-step”)	74
Gráfico 18 - Relação entre a temperatura do ar no exterior e nos nodos de fronteira	74
Gráfico 19 - Representação da amplitude térmica e temporal	75
Gráfico 20 - Temperatura nos nodos ao longo de 24 horas (8640 “Time-step”)	76

Gráfico 21 – Relação entre a temperatura do ar no exterior e nos nodos de fronteira	77
Gráfico 22 – Representação da amplitude térmica e temporal	77
Gráfico 23 – Temperatura nos nodos ao longo de 24 horas (8640 “Time-step”)	78
Gráfico 24 – Relação entre a temperatura do ar no exterior e nos nodos de fronteira	79
Gráfico 25 – Representação da amplitude térmica e temporal	80
Gráfico 26 – Temperatura nos nodos ao longo de 24 horas (8640 “Time-step”)	81
Gráfico 27 – Relação entre a temperatura do ar no exterior e nos nodos de fronteira	82
Gráfico 28 – Representação da amplitude térmica e temporal	83
Gráfico 29 – Temperatura nos nodos ao longo de 24 horas (8640 “Time-step”)	84
Gráfico 30 – Relação entre a temperatura do ar no exterior e nos nodos de fronteira	85
Gráfico 31 – Representação da amplitude térmica e temporal	86
Gráfico 32 – Evolução da temperatura ao longo da parede dupla com isolamento e caixa-de-ar	89
Gráfico 33 – Pressão de saturação <i>versus</i> pressão de vapor, ao longo da parede dupla com isolamento e caixa-de-ar	89
Gráfico 34 – Evolução da temperatura ao longo da parede dupla com isolamento pelo meio	90
Gráfico 35 – Pressão de saturação <i>versus</i> pressão de vapor, ao longo da parede dupla com isolamento pelo meio	90
Gráfico 36 – Evolução da temperatura ao longo da parede simples com isolamento pelo exterior	91
Gráfico 37 – Pressão de saturação <i>versus</i> pressão de vapor, ao longo da parede simples com isolamento pelo exterior	91
Gráfico 38 – Evolução da temperatura ao longo da parede simples com isolamento pelo interior	92

Gráfico 39 – Pressão de saturação <i>versus</i> pressão de vapor, ao longo da parede simples com isolamento pelo interior	92
Gráfico 40 – Temperatura do ar no interior do compartimento em análise	96
Gráfico 41 – Risco de condensação na parede com isolamento pelo interior	100

Índice de quadros

Quadro 1 – Consumo de energia <i>per capita</i> [7]	6
Quadro 2 – Condutividade térmica de alguns materiais [14]	16
Quadro 3 – Resistências térmicas superficiais [17]	21
Quadro 4 – Resistência térmica dos espaços de ar não ventilados [17]	21
Quadro 5 – Pressão de vapor de saturação P_s , de acordo com a fórmula de GOFF (ASHRAE, Handbook, 1977) [18]	56
Quadro 6 – Características dos materiais	63
Quadro 7 – Resistências térmicas superficiais [3]	64
Quadro 8 – Resistência térmica dos espaços de ar não ventilados [3]	64
Quadro 9 – Valores do coeficiente α indicados pela ASHRAE	66
Quadro 10 – Resumo dos valores da amplitude e do tempo de resposta	95
Quadro 11 – Energia acumulada no interior das paredes ao longo das 24 horas	99

1 Introdução

Este trabalho procura ir ao encontro de uma preocupação muito premente nos nossos dias, no que respeita ao consumo de energia, à sustentabilidade em termos energéticos e ambientais (e económicos) e à dependência externa do nosso país.

Em paralelo com esta problemática foi criado em 1990 o regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) "...constituirá um instrumento de conservação de energia nos edifícios através da promoção generalizada da melhoria das condições de conforto sem acréscimo do consumo de energia, ou da satisfação rigorosa das condições de conforto, nos casos em que estas venham a ser exigidas, com um consumo mais moderado de energia por unidade de área de construção" [1].

A aprovação do RCCTE teve por objectivo principal a melhoria da qualidade térmica da envolvente, mediante intervenção na concepção, no projecto e na construção dos edifícios e veio a constituir um passo significativo no sentido da melhoria das condições de conforto na generalidade dos edifícios. Acima de tudo, é um regulamento sem um elevado grau de exigência, estando previsto o seu não cumprimento apenas quando existirem erros de projecto "graves" ou seja, quando os "edifícios se comportam pior do que o clima".

Este regulamento, embora de grande qualidade científica, não teve na prática grande aplicação por falta de legislação que o sustentasse.

A metodologia proposta por este regulamento não sobrevaloriza a energia, mas antes se centra na localização e concepção arquitectónica do edifício, procurando tirar partido das condições ambientais.

Entretanto, em 2002 saiu a Directiva Europeia sobre o Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) [2] e houve a necessidade de actualizar o Regulamento em Portugal, e dotá-lo de mecanismos que impusessem, desta vez, a sua aplicação de forma generalizada à maioria dos edifícios. Foi o que aconteceu em 2006 com a publicação do novo RCCTE [3] que pretendeu dar resposta às questões levantadas a nível europeu por aquela Directiva, e corrigir os aspectos menos conseguidos da primeira versão. Hoje em dia a aplicação do RCCTE é uma realidade cuja prática se está a generalizar, não sendo mais possível deixar de ter as preocupações adequadas para uma correcta adaptação dos edifícios às necessidades de conservação de energia impostas pelo Regulamento em vigor.

Essas medidas impõem limites nas necessidades de aquecimento e de arrefecimento do espaço interior dos edifícios, de aquecimento das águas quentes sanitárias (AQS) e da energia primária utilizada. Estes parâmetros, por seu turno,

estão relacionados com diversos aspectos que condicionam o respectivo cálculo, designadamente, no que concerne à inércia térmica dos edifícios, ao isolamento da envolvente opaca, aos ganhos solares pelos envidraçados, à renovação de ar horária e à orientação dos edifícios, entre outros.

As preocupações inscritas no Regulamento vão no sentido de minimizar as necessidades de aquecimento diminuindo as perdas térmicas pela envolvente opaca, incluindo as perdas lineares e as perdas para locais não aquecidos, e aumentando o aproveitamento dos ganhos internos. Para isso é necessário um isolamento adequado de toda a envolvente opaca e uma inércia térmica média ou forte para aproveitar de forma adequada os ganhos internos. Em relação às necessidades de arrefecimento o Regulamento obriga a questionar grandes vãos envidraçados e a ter grandes preocupações com o factor solar dos mesmos para além de uma inércia térmica que minimize o impacto das condições exteriores no espaço interior, para que o conforto térmico não tenha que ser conseguido à custa de climatização, visto que os consumos associados a esta componente nos edifícios tem crescido a um ritmo que se pretende agora estancar.

A nível das AQS o Regulamento está construído de uma forma em que esta componente é crucial em termos da sua classificação energética e incide sobre a preocupação do isolamento de tubagens e da correcta selecção de equipamentos, para além da obrigatoriedade da energia solar térmica em orientações entre sudoeste e sudeste.

Este trabalho tem assim um enquadramento onde as preocupações suscitadas pelo RCCTE são relevantes, e o desenvolvimento e aplicação de ferramentas de cálculo de transferência de calor mais complexas, foram, em conformidade, efectuadas para permitir simular o efeito da inércia térmica nas soluções construtivas adoptadas. A ferramenta de cálculo para prever a probabilidade de condensações em paredes, e o estudo de medidas de utilização racional de energia (URE) tiveram a mesma motivação expressa no RCCTE, ainda que em alguns casos não de forma expressa, para preservar os materiais e diminuir os consumos.

2 Enquadramento geral

A problemática do aquecimento global é nos dias que correm uma das prioridades de muitas entidades governamentais. Este aquecimento é um resultado de más decisões ao nível ambiental de muitos países desenvolvidos.

A crescente emissão de gases de estufa para a atmosfera tem vindo a aumentar o valor da temperatura média no planeta, principalmente nos pontos onde se reflecte esse aumento.

No Árctico o aquecimento tem sido duas vezes maior do que no resto do mundo.

Hoje é ponto assente que o degelo tem como principal impacte o aumento do nível médio das águas do mar, podendo fazer com que inúmeras ilhas e países desapareçam, como por exemplo a Holanda.

Um dos sectores da indústria que tem vindo a ser a principal causadora do aumento da temperatura é o sector energético, responsável pela emissão de três gases de efeito de estufa, que são o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). Prevê-se que as emissões de dióxido de carbono nos países da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico) cresçam cerca de 25% até 2020, sendo estes já responsáveis por metade das emissões totais mundiais. Os casos mais polémicos são os países em desenvolvimento que contribuirão até essa data com 50% da emissão de gases, comparativamente aos 39% actuais.

Há uma crescente preocupação com o crescimento rápido destes países, pois estão a contribuir para o aumento do efeito de estufa. Este avultado crescimento da emissão de gases de estufa decorrente do desenvolvimento económico poderá ser minimizado, por um lado, com uma utilização mais intensiva de energias renováveis, e por outro lado, através de um aumento de eficiência dos processos de produção e distribuição da energia. Esta última medida conduzirá a um menor consumo energético com fim a atingir ao mesmo resultado.

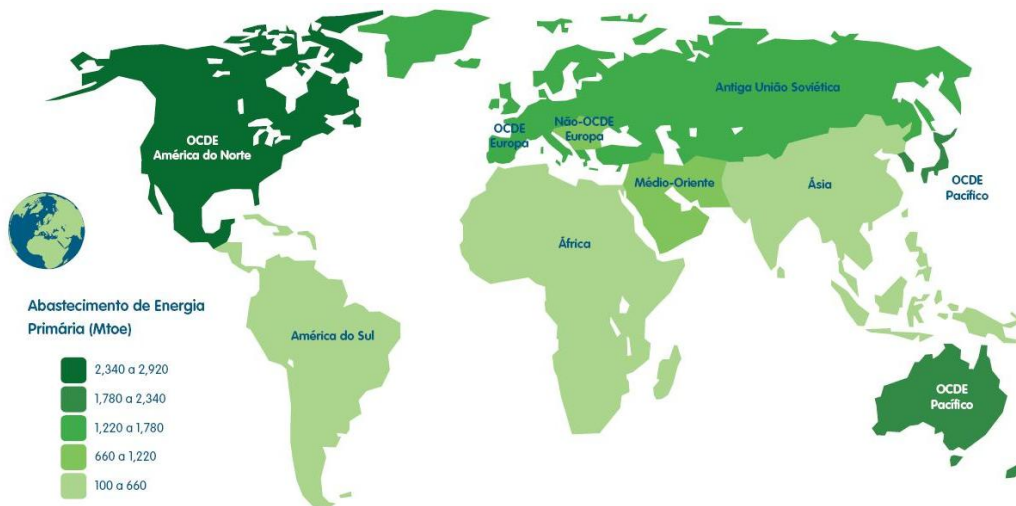


Figura 1 - Abastecimento mundial de energia primária (Mtoe) [4]

A evolução do consumo de energia primária, desde 1971 até 2005, tem vindo a aumentar em alguns dos sectores energéticos, como pode ser observado no Gráfico 1.

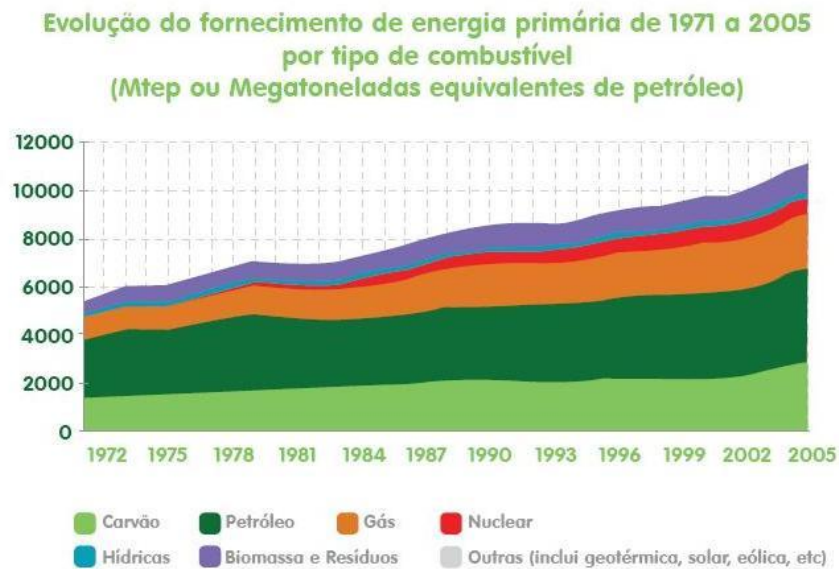


Gráfico 1 - Consumo de energia por tipo de combustível a nível mundial [4]

Como Portugal não é um produtor de petróleo nem de carvão, e a produção hidroeléctrica não chega para satisfazer o consumo de energia total consumida no

país, sempre foi necessário recorrer à importação de energia de modo a que o consumo possa ser satisfeito.

Note-se que de há uns anos para cá os representantes governamentais têm apostado numa estratégia de redução à importação de matéria-prima para a produção de energia, e deste modo apostado nas energias renováveis, como se pode observar no Gráfico 2.

Evolução do Consumo de Energia Primária em Portugal

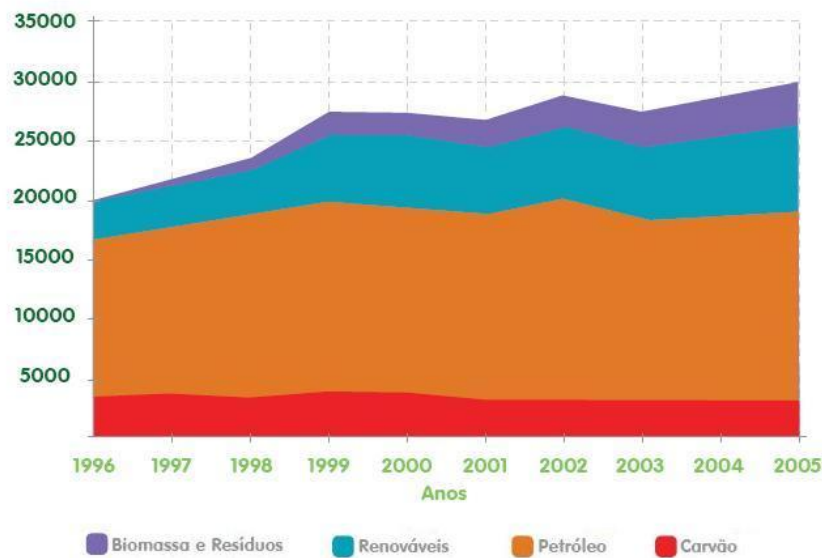


Gráfico 2 - Consumo de energia primária em Portugal [4]

Existem em Portugal mais de 3,3 milhões de edifícios, representando um grupo de actividades de enorme importância económica para o país, correspondendo a cerca de 22% do consumo em energia final (residencial com 13% e os serviços com 9%, dados do Balanço Energético Nacional de 1999), com um consumo total de 3,5 Mtep. Em termos de fontes energéticas existe uma preponderância dos consumos de electricidade nos edifícios, com uma fatia de 58 % dos consumos globais nacionais. [6]

No que toca ao consumo energético *per capita*, este não está distribuído de forma equitativa, apresentando as nações mais desenvolvidas consumos muito mais elevados do que a média mundial. Com os dados indicados no Quadro 1, se verifica que a América do Norte, em 2004, teve um consumo de energia final *per capita* de 7,96 tep/pessoa, enquanto a média mundial estava nos 1,77 tep/pessoa [6].

Quadro 1 – Consumo de energia *per capita* [7]

	<i>Consumo de Energia Final [Mtep]</i>	<i>Consumo de Energia Final per capita [tep/pessoa]</i>
Portugal	26,55	2,52
União Europeia	1757,25	3,82
América do Norte	2594,94	7,96
Mundial	11223,28	1,77

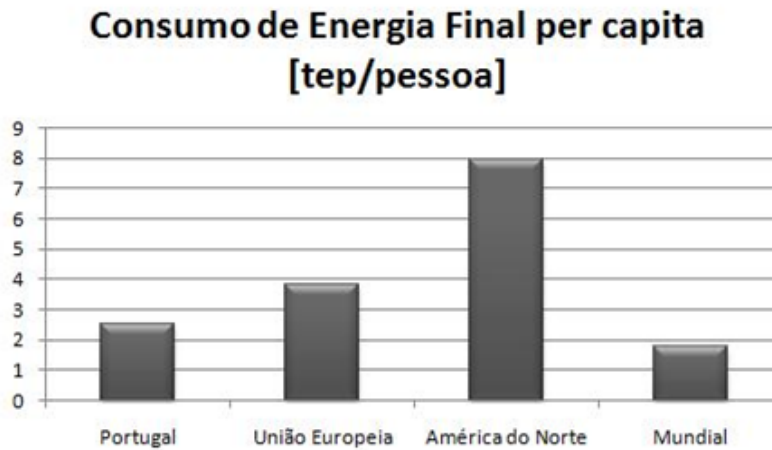


Gráfico 3 - Consumo de energia final *per capita* [7]

Sendo Portugal um país que praticamente importa quase toda a sua fonte de produção de energia é de salientar que o consumo de energia final *per capita* é muito elevado em relação a média mundial.

Em Portugal o sector que tem o maior peso de consumo energético é os transportes com 36,4%, logo seguido da indústria com 29% e do sector doméstico com 16,1% e por fim, do sector dos serviços com 12,3%.

De todos estes sectores, apenas a indústria e o doméstico utilizam fontes de energia renováveis. No sector da indústria as fontes renováveis cobrem 9,9% do total utilizado, enquanto no sector doméstico estas cobrem 37,5% do total.

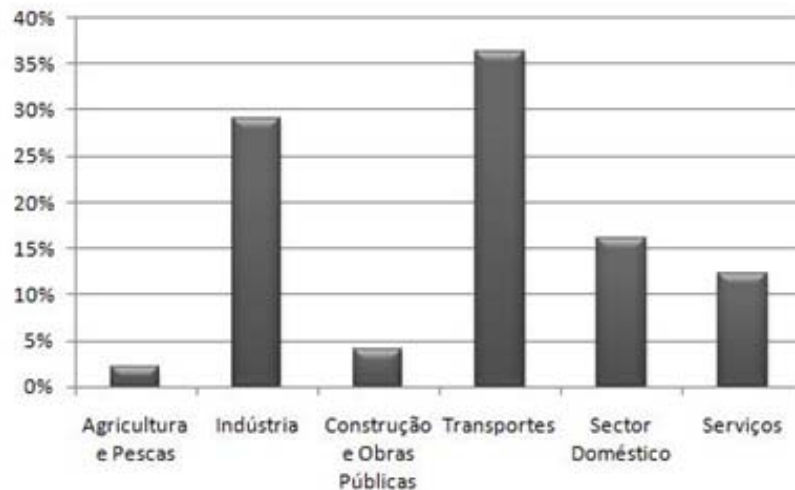


Gráfico 4 - Consumo de energia por sector em Portugal [8]

O consumo de energia no sector dos edifícios representa uma fatia que se situa perto dos 30% do consumo energético total em Portugal. Apesar de este valor ainda ser inferior, comparativamente com a média Europeia (40%), verificou-se na última década um crescimento significativo do consumo de energia no sector doméstico que ronda os 3% por ano.

Um dos motivos pelo qual o consumo energético tem vindo a aumentar deve-se principalmente ao aumento do consumo de energia nos edifícios, aproximadamente (7% ao ano), sendo estes, um dos principais consumidores de energia mundial.

Na União Europeia o consumo de energia por parte dos edifícios é cerca de 41% da energia total consumida nos seus países membros.

Nos edifícios destinados à habitação, a parcela de maior relevância do consumo de energia cabe aos gastos com a climatização, (aquecimento e arrefecimento dos edifícios) e nas AQS (águas quentes sanitárias), representando aproximadamente 60% dos gastos totais numa habitação. Os restantes 40% dividem-se por actividades como a iluminação, 5%, a confecção de alimentos, 6%, a conservação de alimento, 13% e por restantes electrodomésticos, 16% [8].

Consumo de energia nos edifícios em Portugal

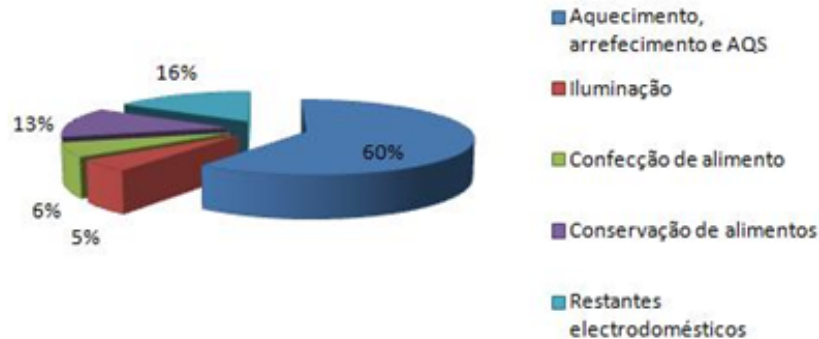


Gráfico 5 – Consumo de energia nos edifícios em Portugal no sector doméstico [6]

O aumento do conforto e da quantidade de electrodomésticos e outros equipamentos consumidores de energia tem vindo a se reflectir no crescimento médio anual dos consumos energéticos em edifícios de habitação.

No entanto é de salientar que no final da década de noventa o consumo energético no sector dos edifícios era de 50% para águas quentes sanitárias e cozinhas, 25% para aquecimento e arrefecimento e 25% para a iluminação e equipamentos, mas a tendência é para que o aquecimento e arrefecimento dos edifícios aumentem o seu peso, devido ao aumento das exigências de conforto por parte dos utilizadores dos edifícios e às alterações climáticas.

Consumo de energia nos edifícios em Portugal em 1998

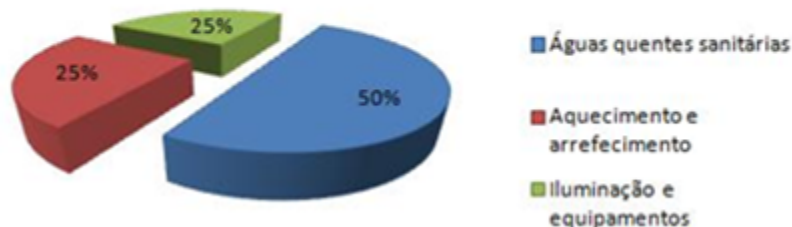


Gráfico 6 – Relação percentual entre AQS, Climatização e Iluminação [6]

Tendo em conta o Gráfico 6, pode-se verificar que é necessário intervir nestas três vertentes com medidas de utilização racional de energia (URE).

Na década de noventa o sector dos edifícios de serviços foi um dos que mais cresceu em consumos energéticos, cerca de 7,1%. É um dos principais responsáveis pelo aumento de 19% para 31% do consumo em energia eléctrica entre os anos 1980 e 2000. Essa tendência continua a verificar-se nos dias de hoje. [6]

3 Fundamentos teóricos

O conceito fundamental da térmica está relacionado com a termodinâmica em diversos parâmetros. Para melhor compreender esta relação, será apresentado logo de seguida a definição de calor e de contacto térmico bem como as leis da termodinâmica.

3.1 Conceitos

O calor é a energia transferida entre dois corpos sujeitos a diferentes temperaturas, ou seja, o calor pode ser visto como sendo energia em trânsito devido a uma diferença de temperaturas impostas.

Pode dizer-se que dois corpos estão em contacto térmico quando existe transferência de calor entre eles. Caso isto ocorra, estes atingirão o equilíbrio térmico se não existir mais trocas de calor entre si. [9]

Em suma, a transmissão de calor entre dois pontos ocorre sempre que se estabelece uma diferença de temperatura entre eles, desenvolvendo-se o fluxo de calor na direcção das temperaturas decrescentes.

Para relacionar estes conceitos com a termodinâmica é necessário ter presente duas das suas respectivas leis.

3.2 Aplicação da termodinâmica

3.2.1 Lei zero da termodinâmica

Se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro, então eles estão em equilíbrio térmico entre si.

3.2.2 Segunda lei da termodinâmica

O segundo princípio da termodinâmica expressa, de uma forma concisa, que a quantidade de entropia de qualquer sistema isolado termodinamicamente tende a aumentar com o tempo, até alcançar um valor máximo. Mais concretamente, quando uma parte de um sistema fechado interage com outra parte, a energia

tende a dividir-se por igual, até que o sistema alcance um equilíbrio térmico. A segunda lei estabelece condições para que as transformações termodinâmicas possam ocorrer. [10]

3.3 Mecanismos de transferência de calor

Os mecanismos de transferência de calor estão intrinsecamente ligados com a termodinâmica, ou seja, o fluxo de calor trata do estudo da transferência de energia térmica durante a evolução de um sistema termodinâmico.

Esta energia pode ser observada através dos três mecanismos de transmissão de calor, como está descrito na Figura 2.

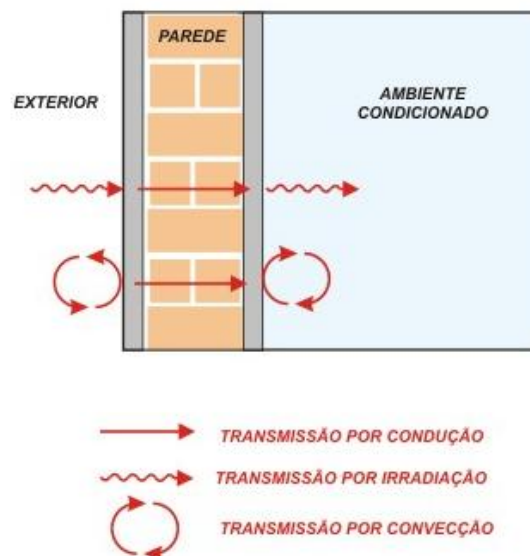


Figura 2 – Mecanismos de transmissão de calor em edifícios [11]

3.3.1 Condução

O mecanismo de transmissão de calor por condução ocorre sempre que haja transferência de energia cinética em sólidos, líquidos ou gases.

Esta condução é feita por via de vibrações ou colisões entre partículas, que assim transferem energia das zonas mais quentes (maior energia) para as zonas mais frias (menor energia), ou seja, sempre que estivermos perante um sistema que está a uma temperatura diferente da sua vizinhança ocorrerá transferência de energia.

Esta transferência de energia é feita através da interacção de partícula a partícula e o seu fluxo difere de material para material.

Os metais são bons condutores, porque recebem e/ou cedem energia, sob a forma de calor muito rapidamente, pois os electrões livres, responsáveis pela condução de corrente eléctrica, aumentam significativamente o transporte de energia sob forma de calor da parte mais quente para a mais fria.

No entanto, os sólidos não-metais também transferem energia, mas com maior dificuldade, através de vibrações da sua estrutura molecular, o que faz com que alguns materiais sejam denominados de materiais isolantes, ou seja, devido à sua estrutura molecular ser muito porosa e constituída por materiais não metálicos faz com que estes aumentem a resistência à troca de calor por condução.

Ao nível microscópico, a condução pode ser vista como sendo a interacção entre as partículas constituintes dos sistemas, como pode ser observado na figura 3, para o caso de um gás. Assim, no processo de condução não existe movimento (macroscópico) dos materiais de que são feitos os sistemas que estão em contacto.

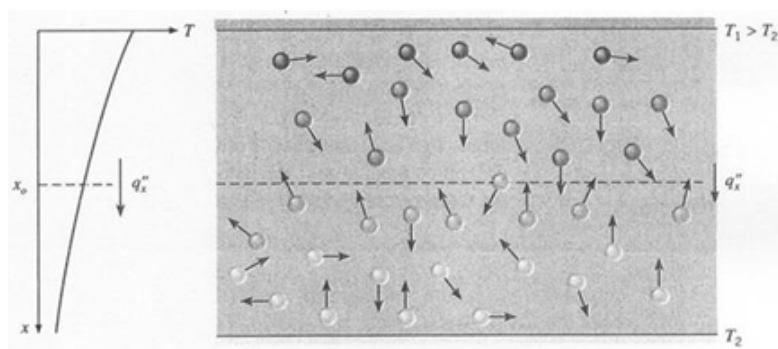


Figura 3 – Condução de calor a nível microscópico [12]

Na engenharia civil, mais concretamente nos edifícios, o processo de transmissão de calor mais significativo é a condução. Este depende da condutividade térmica dos materiais (k) [$\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$] e da espessura do elemento da envolvente (L) [m]. Com estes dois dados, anteriormente mencionados, obtém-se o parâmetro mais utilizado no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, mais conhecido por RCCTE [3], que é o coeficiente global de transmissão de calor (U) [$\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$], e que é inversamente proporcional à resistência térmica (R_{cond}) [$\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{W}$] do material, expresso na equação (1).

$$R_{cond} = \frac{L}{k} \text{ [m}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{W}] \quad (1)$$

$$U = \frac{1}{R_{cond}} \text{ [W/m}^2\text{.}^\circ\text{C]} \quad (2)$$

Estas considerações podem ser sintetizadas na Lei de Fourier, à qual permite quantificar a transmissão de calor entre os extremos (exemplo uma parede) em regime permanente (estacionário), em função das dimensões da respectiva parede, das características do material de que ela é feita e ainda das temperaturas nos seus extremos, como pode-se observar na Equação (3).

$$\dot{Q} = -U.A.\Delta T \text{ [W]} \quad (3)$$

onde

A - área do elemento (m^2) perpendicular à direcção do fluxo de calor;

U - coeficiente global de transmissão de calor

ΔT - representa a variação de temperatura.

Note-se que o fluxo térmico é proporcional à área e ao gradiente de temperatura (variação da temperatura com a distância).

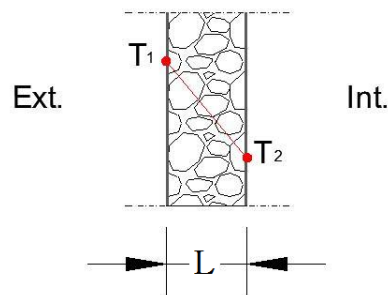


Figura 4 - Fluxo de calor, em que $T_1 > T_2$

Uma vez que o fluxo ocorre da maior para a menor temperatura, o sinal negativo na Lei de Fourier explica-se por a variação de temperatura ser igual a

$$dT = T_2 - T_1 \text{ [K] ou } [^\circ\text{C]} \quad (4)$$

No exemplo mostrado na Figura 4, o fluxo de calor numa parede simples, pode ser descrito como uma resistência eléctrica (fazendo uma analogia com os símbolos utilizados na energia eléctrica), como pode ser observado na Figura 5.

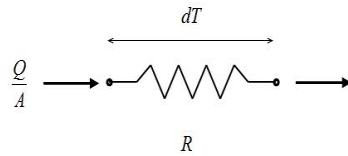


Figura 5 – Analogia eléctrica: Resistência térmica – relação entre dT e Q

Substituindo a equação (4), na (3), usando a Lei de Fourier, obtemos a equação da transmissão de calor em função do coeficiente global de transmissão de calor,

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= -U \times A \times (T_2 - T_1) \\ \Leftrightarrow \dot{Q} &= U \times A \times (T_1 - T_2) \end{aligned} \quad (5)$$

ou em função da resistência,

$$\Leftrightarrow \dot{Q} = \frac{1}{R_{cond}} \times A \times (T_1 - T_2)$$

Em que o fluxo de calor (por condução) pode ser deduzido pela equação (6),

$$\frac{\dot{Q}}{A} = q_x \quad (6)$$

Substituindo a equação (2) e (6) na equação (5), obtém-se a fórmula que dá o fluxo de calor

$$\Leftrightarrow q_x = k \cdot \frac{T_1 - T_2}{L} \quad [\text{W/m}^2] \quad (7)$$

Os bons condutores de calor (geralmente também bons condutores de corrente eléctrica) têm condutividades térmicas elevadas, como por exemplo os metais. Pelo contrário, os isolantes térmicos têm condutividades térmicas baixas, como por exemplo a madeira, a borracha ou o ar, o que significa que para a mesma diferença de temperatura, área e espessura, obtém-se um valor muito mais baixo de transferência de calor por condução nos materiais isolantes do que nos materiais condutores.

Logo de seguida está uma tabela que descreve alguns dos materiais mais utilizados na construção civil com o respectivo coeficiente de condutividade térmica.

Quadro 2 – Condutividade térmica de alguns materiais [14]

Material	Massa Volúmica Aparente (kg/m ³)	Condutibilidade Térmica (W/m.°C)
Alvenaria de granito	2300 ≤ ρ ≤ 2900	3,500
Material cerâmico	1800 ≤ ρ ≤ 2000	1,150
Betões de inertes correntes	2200 ≤ ρ ≤ 2400	1,750
Betão leve de argila expandida sem areia	600 ≤ ρ ≤ 800	0,250
Betão celular	425 ≤ ρ ≤ 575	0,180
	575 ≤ ρ ≤ 725	0,240
Argamassa de cimento	1800 ≤ ρ ≤ 2100	1,150
Estuque de gesso	750 ≤ ρ ≤ 1000	0,350
Poliestireno expandido moldado	15 ≤ ρ ≤ 35	0,040
Poliestireno extrudido	25 ≤ ρ ≤ 40	0,035
Espuma rígida de poliuretano	25 ≤ ρ ≤ 40	0,030
Aglomerado negro de cortiça	100 ≤ ρ ≤ 150	0,045
Regranulado de cortiça	70 ≤ ρ ≤ 80	0,045
Lã de rocha	20 ≤ ρ ≤ 35	0,045
	35 ≤ ρ ≤ 180	0,040
Lã de vidro	8 ≤ ρ ≤ 12	0,045
	12 ≤ ρ ≤ 80	0,040
Perlite expandida	80 ≤ ρ ≤ 125	0,050

Na análise da transferência de calor do interior para o exterior de uma casa podemos estar perante dois tipos de processos de condução de calor, condução em série como descreve a Figura 6, no caso do estudo da transferência de calor numa

parede, ou uma condução em paralelo, Figura 7, no caso de estarmos a estudar a zona onde temos a caixilharia das portas ou envidraçados de uma casa.

Esta situação de condução em paralelo (analogia com um circuito em paralelo), acontece também quando se tem uma condição de fronteira onde existem simultaneamente convecção e radiação à superfície.

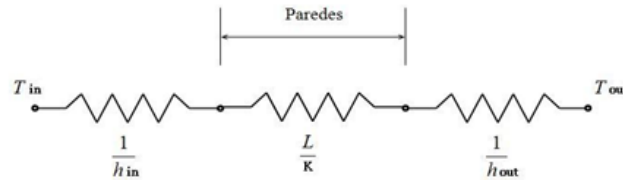


Figura 6 – Analogia eléctrica: Resistências em série

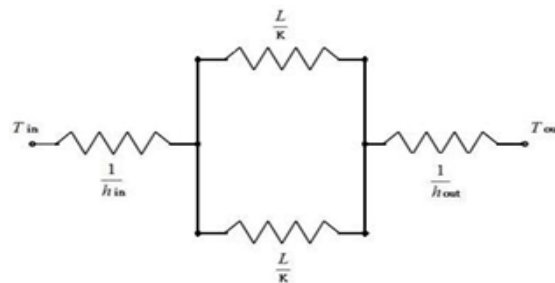


Figura 7 - Transferência de calor numa parede com resistências em paralelo

No entanto não se estuda somente fluxo de calor em paredes planas. No caso do dimensionamento do isolamento das redes de águas quentes sanitárias (AQS), a resistência térmica de condução de calor já vem em função de uma parcela logarítmica, como pode ser observado pela equação (8).

$$R = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi kl} \text{ [m}^2\cdot^\circ\text{C/W]} \quad (8)$$

onde

r_1 – raio interno do tubo;

r_2 – raio externo do tubo;

l – comprimento do tubo.

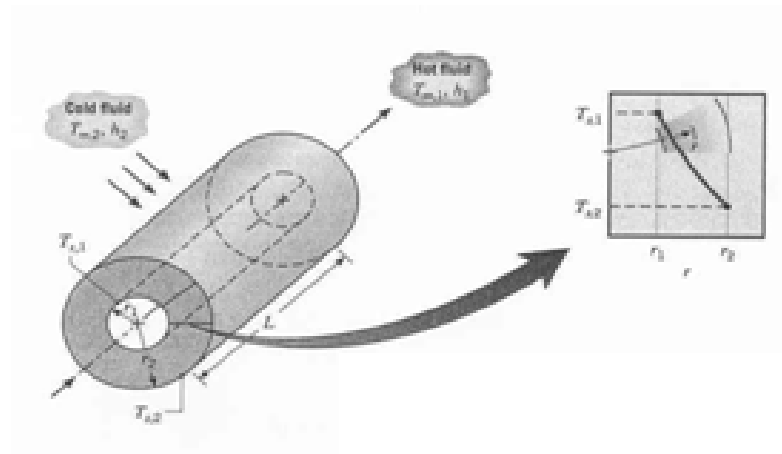


Figura 8 – Distribuição de temperaturas num tubo de AQS [12]

Note-se novamente que na distribuição de temperaturas associada à condução radial na parede cilíndrica é logarítmica, e não linear, como nas paredes planas.

Utilizando a Lei de Fourier, fica-se com a seguinte equação que nos dá o fluxo de calor,

$$q_r = \frac{2\pi kl(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2 / r_1)} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (9)$$

em que

$T_{s,1}$ – temperatura na superfície interior do tubo;

$T_{s,2}$ – temperatura no exterior do tubo;

3.3.2 Convecção

A transferência de calor por convecção ocorre essencialmente quando existe um fluido em movimento na vizinhança de uma superfície sólida. Este processo de transferência de calor inclui os efeitos combinados da condução e do movimento do fluido. Esta transferência é tanto mais elevada quanto mais rápido for o escoamento do fluido. Na ausência de movimento do fluido a transferência de calor entre a superfície do sólido e o fluido ocorre por condução pura, ou seja, quando a diferença de temperatura entre o sólido e o fluido não é suficiente para vencer a

viscosidade do fluido, não se estabelecem correntes convectivas e neste caso a transferência de calor processa-se por condução.

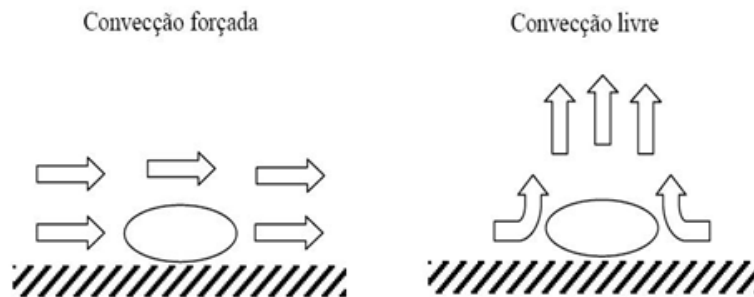


Figura 9 – Fluxo de ar com e sem intervenção externa [12]

A convecção é designada por convecção forçada quando o fluido é forçado a fluir sobre a superfície sólida através de meios externos, como uma ventoinha, uma bomba ou o vento. A convecção é natural ou livre se o movimento do fluido é causado por diferenças de densidade, resultantes das diferenças de temperatura. Por exemplo, no caso de um aparelho electrónico que liberta calor, o ar adjacente aquece, expande e sobe, visto que a sua densidade é mais baixa do que a do ar envolvente, e o ar vizinho mais frio desloca-se para ocupar este lugar. Este processo estabelece correntes convectivas naturais.

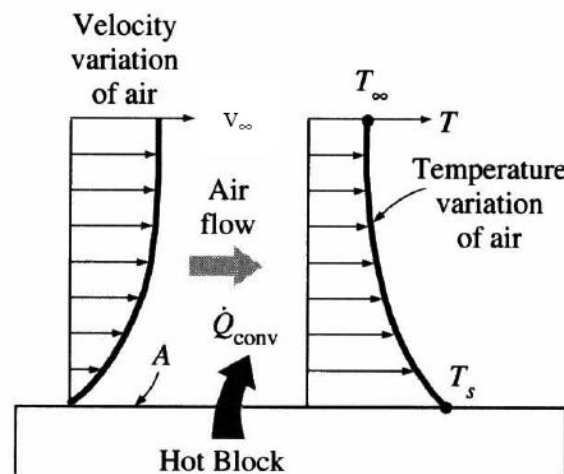


Figura 10 – Fluxo de ar junto a um objecto quente [12]

Na Figura 10, está representado o mecanismo de transferência convectiva de calor do bloco quente para o ar frio que se desloca sobre a superfície da placa. As regiões

do fluido em que a velocidade varia de zero a V_{∞} e em que T varia de T_s (temperatura da superfície) a T_{∞} (temperatura do fluido em regime livre), caracterizam a transferência convectiva de calor. Em regime laminar a transferência convectiva de calor é menor do que em regime turbulento, pois neste existem vórtices que transferem calor transversalmente, arrastando camadas de fluido que estão junto da placa (e.g. escoamento externo sobre placas) para zonas de escoamento livre, fora da camada limite hidrodinâmica, promovendo uma mais rápida uniformização das temperaturas entre o escoamento e a placa.

Pode observar-se que no mecanismo de transmissão de calor por convecção se reduz à determinação do coeficiente de transmissão de calor por convecção, h , o qual depende essencialmente dos seguintes parâmetros:

- ✓ Geometria da superfície sólida (placas, feixes de tubos, etc.);
- ✓ Tipo de escoamento do fluido (interno, externo, laminar, turbulento);
- ✓ Propriedades físicas do fluido (ρ, C_p, k, μ);
- ✓ Da variação de temperaturas entre a parede e o fluido.

Verifica-se experimentalmente que o fluxo térmico por convecção é proporcional à diferença de temperatura $T_s - T_{\infty}$ e à área da superfície de contacto, como pode ser observado na equação (10), que traduz a lei de arrefecimento de Newton.

$$\dot{Q} = h.A.(T_s - T_{\infty}) \text{ [W]} \quad (10)$$

Utilizando a equação 6, deduz-se que o fluxo de calor (por convecção) é dado por,

$$\Leftrightarrow \frac{\dot{Q}}{A} = q_x \text{ [W/m}^2\text{]}$$
$$\Leftrightarrow q_x = h.(T_s - T_{\infty}) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (11)$$

onde

h - é a condutividade térmica superficial, em que no caso de termos uma convecção natural está compreendido entre [2 - 25] (para o caso dos gases) e a radiação não é, em geral, desprezável nestes casos.

A resistência de convecção é dada pela seguinte equação,

$$R_{conv} = \frac{1}{h} \text{ [m}^2\text{.}^{\circ}\text{C/W]} \quad (12)$$

No entanto se estivermos perante uma convecção forçada (auxiliada por meios externos) a condutividade térmica superficial está compreendida entre [50 – 100] e neste caso a radiação pode ser desprezável, dependendo do valor de tempo em causa. O coeficiente de transmissão de calor por convecção, h , resulta da expressão que relaciona, experimentalmente, o número de Nusselt com o número de Reynolds, e com o número de Prandtl na convecção forçada, e o número de Grashof na convecção natural. Em suma, os valores das resistências térmicas superficiais utilizados neste trabalho resumem-se aos valores apresentados no Quadro 3, consoante o sentido do fluxo a ter em conta. [17]

Quadro 3 – Resistências térmicas superficiais [17]

Sentido do fluxo		Resistência térmica superficial ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)	
		Exterior $1/h_e$	Interior $1/h_i$
Horizontal		0,04	0,13
Vertical	Ascendente	0,04	0,10
	Descendente	0,04	0,17

Os valores das resistências térmicas dos espaços de ar não ventilados em função da espessura do espaço constam do Quadro 4.

Quadro 4 – Resistência térmica dos espaços de ar não ventilados [17]

Sentido do fluxo de calor		Espessura do espaço de ar (mm)	Resistência térmica R_{sr} ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)
Horizontal		5	0.11
		10	0.15
		15	0.17
		de 25 a 100	0.18
Vertical	ascendente	5	0.11
		10	0.15
		de 15 a 100	0.16
	descendente	5	0.11
		10	0.15
		15	0.17
		25	0.19
		50	0.21
		100	0.22

Normalmente o coeficiente de convecção não é conhecido, o que nos leva a ter que conhecer alguns métodos de cálculo do respectivo coeficiente. Dos principais métodos existentes (matemáticos, de analogias de transferência de calor, etc.) o de maior utilidade prática é o método da análise dimensional combinada com a experiência, do qual resultam relações funcionais entre o grupos adimensionais (e.g., relações empíricas entre número de Nusselt e os números de Reynolds e Prandtl, na convecção forçada) que permitem determinar o coeficiente de convecção.

3.3.3 Radiação

A energia emitida pela matéria sob a forma de ondas electromagnéticas designa-se radiação.

A transferência de energia por radiação ocorre através do vácuo ou de um meio transparente. Não é necessário existir um meio material entre dois corpos para que a energia seja transferida de um para outro.

A radiação que está relacionada com a temperatura designa-se radiação térmica. Esta é energia emitida pela matéria que está a uma temperatura diferente de zero. A radiação térmica emitida por um corpo inclui vários comprimentos de onda, mas a potência máxima de emissão desloca-se para o visível e ultravioleta nas temperaturas mais elevadas. Por exemplo, a temperatura da superfície do Sol é cerca de 5800 K e a respectiva radiação atinge o máximo de potência na banda visível, enquanto os planetas, cujas superfícies têm temperaturas inferiores a 800 K emitem na banda dos infravermelhos.

Em geral todos os corpos sólidos, líquidos ou gasosos emitem, absorvem e transmitem radiação. No caso dos sólidos opacos o fenómeno é praticamente superficial, visto que toda a radiação emitida no interior não atinge a superfície e a radiação é absorvida em escassos microns da superfície.

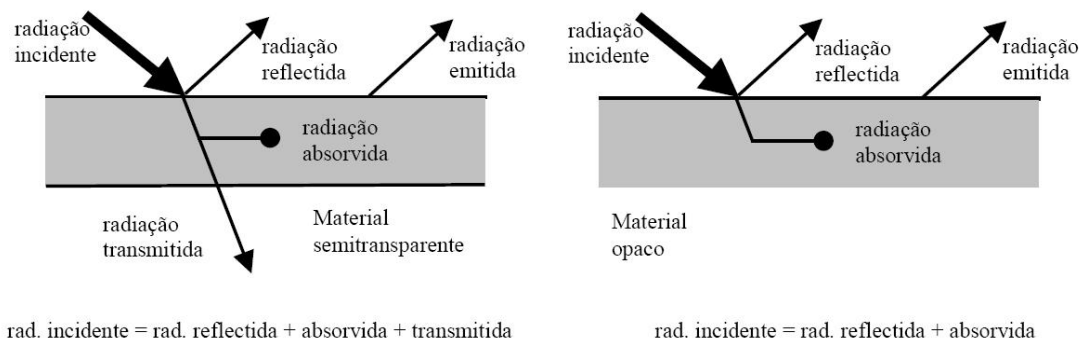


Figura 11 – Propagação da radiação num material semitransparente e num material opaco [12]

O limite superior do poder emissivo de uma superfície (corpo negro), é dado pela seguinte equação,

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (13)$$

onde

σ - representa a constante de Stefan-Boltzman, $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$;

T_s - temperatura da superfície onde incide a radiação.

No entanto o calor emitido por uma superfície real é menor que o de um corpo negro, e é calculado por,

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (14)$$

em que

ε - é o coeficiente de emissividade de um corpo.

A radiação incidente numa superfície é designada por Irradiação (G), e esta pode ser absorvida parcial ou totalmente.

No entanto o fluxo de calor por radiação pode ser dado através de diversos parâmetros,

$$q_{rad} = (\varepsilon \times E_b \times T_s) - (\alpha G)$$

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (15)$$

ou

$$q_{rad} = (\varepsilon\sigma (T_s + T_{viz})(T_s^2 + T_{viz}^2)) \times A \times (T_s - T_{viz})$$

onde

α - é o coeficiente de absorptividade de um corpo;

T_s - representa a temperatura da superfície onde incide a radiação;

T_s - temperatura na vizinhança da superfície.

4 Metodologia

4.1 Introdução

Os objectivos principais deste trabalho incluem quantificar as trocas energéticas entre um elemento de construção, mais propriamente numa parede, e o ar no interior do edifício, bem como a energia armazenada nesse mesmo elemento, em termos dinâmicos, por ser importante saber a distribuição interna da temperatura em cada ponto (nodo) e os fluxos de calor que atravessam a respectiva parede em qualquer instante. Em suma, é importante conhecer a resposta às variações de temperatura no exterior, de forma detalhada e rigorosa.

De modo a obter estes resultados, é necessário efectuar uma análise em regime transiente, de modo a entrar com a capacidade térmica de cada material existente na parede.

Para tal, foi elaborada uma folha de cálculo visando determinar os parâmetros anteriormente mencionados, utilizando o método das diferenças finitas.

Para atingir este objectivo é necessário recorrer a uma solução numérica baseada na discretização da equação de transferência de calor.

4.2 Trocas de calor nos edifícios

A contabilização das trocas de calor (Q) pelos elementos da envolvente dos edifícios pode ser executada da seguinte forma

$$Q = U \cdot A \cdot (T_{in} - T_{out}) \text{ [W]} \quad (16)$$

onde

U - Coeficiente de transmissão térmica do elemento ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$);

A - Área do elemento (m^2);

T_{in} - Temperatura interior ($^\circ\text{C}$);

T_{out} - Temperatura exterior ($^\circ\text{C}$).

De forma a obter o coeficiente global de transmissão de calor (U) de cada elemento da envolvente, serão contabilizadas as parcelas por convecção (h_{in} e h_{out}) e por

condução, a partir da resistência térmica total ($R_i = 1/U_i = L_i/k_i$), como é possível observar na equação (14).

$$U = \frac{1}{R_{se}} + U_i + \frac{1}{R_{si}} = \frac{1}{R_{se}} + \frac{1}{L_i/k_i} + \frac{1}{R_{si}} = \frac{1}{R_{se} + R_i + R_{si}} \quad (17)$$

em que

U_i - Condutividade térmica do elemento de construção i (por condução) ($\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$);

R_{si} - Resistência térmica superficial interior ($\text{m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$);

R_i - Resistência térmica por condução ($\text{m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$), apenas para materiais homogéneos, caso contrário, o cálculo de R_i é mais complicada, devido aos diversos modos de transmissão de calor nesses elementos;

R_{se} - Resistência térmica superficial exterior ($\text{m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$).

Nas condutividades térmicas superficiais agrupam o efeito dos fenómenos de convecção e radiação ($h \approx h_c + h_r$).

A equação (14) é utilizada para contabilizar a troca de calor em zonas correntes de elementos de construção, onde se pode admitir que o fluxo ocorre numa só direcção, perpendicular ao plano da parede. Nos elementos de construção é normalmente fácil surgirem elementos com heterogeneidades geométricas ou das propriedades dos materiais que afectam a direcção do fluxo. Estas heterogeneidades são chamadas de pontes térmicas.

Este fenómeno ocorre na envolvente de um edifício e reflecte-se na redução das características de isolamento térmico da parede. Nestes casos deixamos de ter fluxos de calor rectilíneos e deixamos de admitir a unidireccionalidade do mesmo. A tendência do fluxo é direccionar-se no sentido da menor resistência do material.

4.3 Método adoptado

Perante um objecto de material isotrópico e com condições de fronteira delineadas, pode ser determinado o campo de temperatura no seu meio. Pela Lei de Fourier pode ser calculada a distribuição de temperaturas ao longo do volume analisado, mas sabendo o fluxo de calor por condução.

Pelo método de conservação de energia é determinado a distribuição de temperaturas na peça tendo como referência o volume de controlo diferencial.

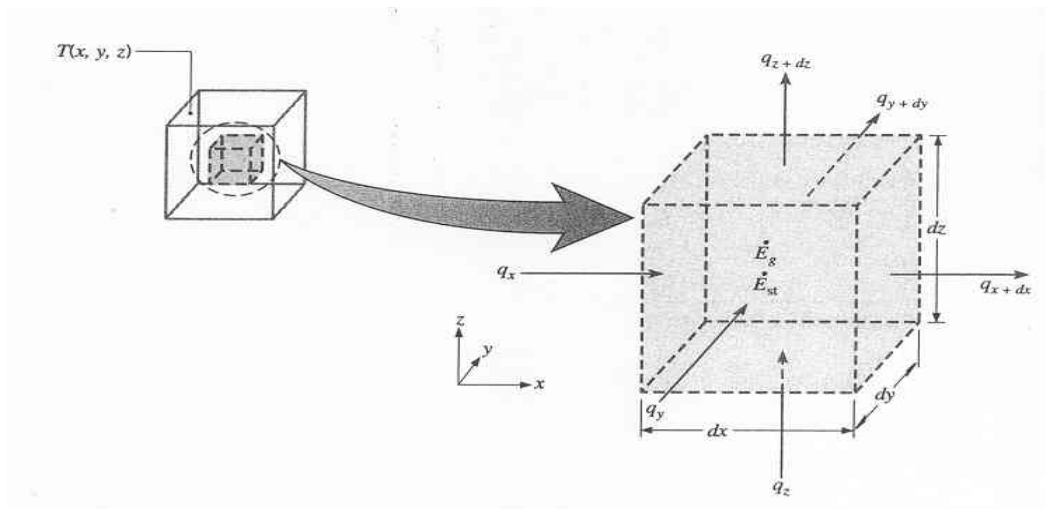


Figura 12 – Análise cartesiana da condução de calor dada pelo volume de controlo [12]

4.3.1 Equação da difusão de calor

Pelo princípio da conservação da energia nos volumes de controlo pode-se dizer que a taxa de variação da energia interna no mesmo é igual ao balanço líquido dos fluxos de calor, e então temos que a equação da conservação da energia pode ser formulada pela seguinte equação

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (18)$$

onde

\dot{E}_{in} - Energia que entra no volume de controlo;

\dot{E}_g - Termo da fonte de energia no balanço energético;

\dot{E}_{out} - Energia que sai do volume de controlo;

\dot{E}_{st} - Energia interna armazenada pelo volume de controlo.

Caso haja geração de energia térmica no volume de controlo o balanço de energia tem que incluir o termo da fonte de energia

$$\dot{E}_g = \dot{q} dx dy dz \quad (19)$$

em que

q - é a taxa a que a energia é gerada por unidade de volume do meio (W/m^3).

E_g - é positiva se a energia térmica for gerada no material e negativa se estiver a ser consumida.

Se houver alterações na quantidade de energia interna armazenada pelo material no volume de controlo temos que adicionar a seguinte equação na equação da conservação de energia.

$$\dot{E}_{st} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (20)$$

onde

$\rho C_p \partial T / \partial t$ - é a taxa de variação de energia térmica do meio por unidade de volume.

Embora os termos E_g e E_{st} tenham as mesmas unidades eles representam processos físicos diferentes.

Se considerarmos que a energia que entra e sai do volume de controlo é dado pelas duas equações seguintes:

$$\dot{E}_{in} = q_x + q_y + q_z \quad (21)$$

$$\dot{E}_{out} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} \quad (22)$$

O fluxo de calor de entrada por condução é dado pelas seguintes equações,

$$q_x = -k dy dz \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_y = -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_z = -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z}$$

e os fluxos de saída de calor por condução são dados por,

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz$$

Resulta assim, que a diferença entre a energia que entra e que sai do volume de controlo pode ser reescrita pelas equações abaixo descritas,

$$q_x - q_{x+dx} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx$$

$$q_y - q_{y+dy} = -\frac{\partial q_y}{\partial y} dy$$

$$q_z - q_{z+dz} = -\frac{\partial q_z}{\partial z} dz$$

A diferença da energia que entra no sistema e a que sai pode ser simplificada da seguinte forma,

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = (q_x + q_y + q_z) - (q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz}) = -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz$$

Substituindo na equação geral equação (15) da conservação de energia, virá,

$$\begin{aligned} -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{q} dx dy dz &= \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \\ \Leftrightarrow -\frac{\partial}{\partial x} \left(-k dy dz \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx - \frac{\partial}{\partial y} \left(-k dx dz \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy - \frac{\partial}{\partial z} \left(-k dx dy \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz + \\ + \dot{q} dx dy dz &= \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \end{aligned}$$

Dividindo todos os termos por $dx dy dz$, obtemos finalmente

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (23)$$

Obteve-se a equação da difusão de calor em coordenadas cartesianas, onde a caracterização do termo difusivo corresponde aos termos diferenciais de 2ª ordem.

Da sua solução podemos obter a distribuição de temperaturas $T(x, y, z)$ em função do tempo, isto é, o campo de temperaturas em qualquer ponto do meio em estudo.

A equação de calor diz-nos que “em qualquer ponto do meio, a quantidade de energia transferida por condução para um volume unitário, mais a geração volumétrica de energia térmica, tem que ser igual à taxa de variação da energia interna armazenada dentro desse volume”.

A equação fundamental da condução de calor pode ser simplificada consoante estiver perante as seguintes situações:

O material que compõe a parede é homogéneo e isotrópico;

A condutibilidade térmica é independente da temperatura e independente da direcção considerada;

As propriedades, para além do coeficiente global de transmissão de calor, não variam com a temperatura;

Não há resistências de contacto entre as possíveis camadas constituintes da parede;

Não há condensações na parede.

Logo de seguida foi feita a simplificação da equação da difusão de calor tendo como base alguns parâmetros:

➤ Condutividade térmica constante

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (24)$$

onde

α – representa a difusividade térmica.

- Regime permanente

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = 0 \quad (25)$$

- Regime permanente, sem geração de calor, condutividade térmica constante e condução bidimensional

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (26)$$

A equação obtida é a equação de Laplace.

- Regime permanente, sem geração de calor e condução unidimensional

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (27)$$

- Regime transiente, sem geração de calor e condução unidimensional

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (28)$$

Esta equação aplica-se ao estudo de paredes homogéneas, permitindo analisar a influência térmica. No entanto, o estudo teria uma maior complexidade se pretendêssemos incluir materiais não homogéneos, como tijolo furado, visto que a discretização no seu interior implicará uma análise mais específica.

Para que possa ser possível utilizar a equação (28), é necessário recorrer a um método numérico que permita resolver a respectiva equação.

4.3.2 Método das diferenças finitas

A análise do método das diferenças finitas pode ser resumida pelos seguintes passos:

- Discretização do domínio contínuo;

- Dedução das equações nodais de diferenças finitas;
- Resolução do sistema de equações resultantes;
- Cálculo da quantidade de calor transmitida.

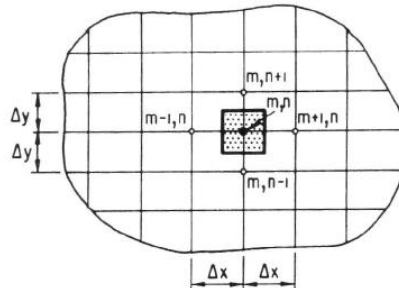


Figura 13 - Malha utilizada na aproximação por diferenças finitas [12]

Para definir cada nodo da malha anterior a equação diferencial de condução (equação de Laplace) é substituída por uma aproximação de diferenças finitas (equação nodal).

Esta aproximação pode ser obtida de duas maneiras, através de aproximações matemáticas em que esta baseia-se no desenvolvimento da série de Taylor, e pelas aproximações físicas que passamos a ver a sua dedução.

- Aproximação física;
- Nodos interiores.

4.3.2.1 Regime permanente e sem geração de calor

Na condução de calor em problemas bidimensionais, em regime permanente, sem geração interna de calor, pode ser modelado pela equação de calor

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0$$

onde

T - representa o campo de temperaturas;

k - indica a condutividade térmica;

x e y - constituem o sistema de coordenadas cartesianas ortogonais.

Se a condutividade térmica (k) for uma propriedade constante, obtém-se a equação de Laplace,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (29)$$

Perante uma análise bidimensional, em regime permanente e sem geração de calor, a equação (29), é utilizada para deduzir a equação do fluxo de calor nos nodos.

Podemos simplificar a equação da conservação de energia, pois sabemos que o calor que entra nos nodos pode ser representados pelas seguintes equações:

➤ Nodo de continuidade

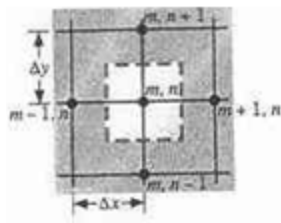


Figura 14 – Nodos de continuidade [34]

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y \cdot 1) \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x}$$

$$q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y \cdot 1) \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x}$$

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x \cdot 1) \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y}$$

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x \cdot 1) \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y}$$

Somando todos os nodos, sem geração de calor, obtemos

$$k(\Delta y.1)\frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} + k(\Delta y.1)\frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} + k(\Delta x.1)\frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} + k(\Delta x.1)\frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} = 0$$

$$k(\Delta y.1)\frac{T_{m-1,n} + T_{m+1,n} - 2T_{m,n}}{\Delta x} + k(\Delta x.1)\frac{T_{m,n-1} + T_{m,n+1} - 2T_{m,n}}{\Delta y} = 0$$

$$\Leftrightarrow k.\Delta y.\frac{T_{m-1,n} + T_{m+1,n} - 2T_{m,n}}{\Delta x} + k.\Delta x.\frac{T_{m,n-1} + T_{m,n+1} - 2T_{m,n}}{\Delta y} = 0$$

Considerando $\Delta x = \Delta y$,

$$\Leftrightarrow k.(T_{m-1,n} + T_{m+1,n} - 2T_{m,n}) + k.(T_{m,n-1} + T_{m,n+1} - 2T_{m,n}) = 0$$

Ao dividir por k temos,

$$T_{m-1,n} + T_{m+1,n} + T_{m,n-1} + T_{m,n+1} - 4T_{m,n} = 0 \quad (30)$$

Esta equação é válida para qualquer nodo interior, desde que a malha seja quadrada, em regime permanente de condução bidimensional e sem geração de calor.

➤ Nodos na fronteira

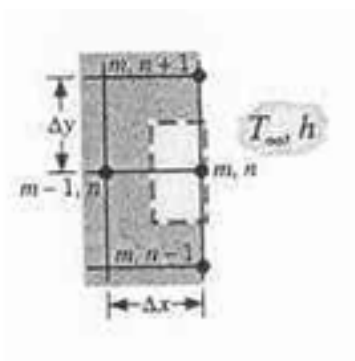


Figura 15 – Nodo de fronteira (unidimensional) [34]

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y.1)\frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x}$$

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = k\left(\frac{\Delta x}{2}.1\right)\frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y}$$

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} = k \left(\frac{\Delta x}{2} \cdot 1 \right) \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y}$$

$$q_{\infty \rightarrow (m,n)} = h(\Delta x \cdot 1)(T_{\infty} - T_{m,n})$$

Somando todos os nodos, sem geração de calor, obtemos

$$k(\Delta y \cdot 1) \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} + k \left(\frac{\Delta x}{2} \cdot 1 \right) \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} + k \left(\frac{\Delta x}{2} \cdot 1 \right) \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} + h(\Delta x \cdot 1)(T_{\infty} - T_{m,n}) = 0$$

Seja $\Delta x = \Delta y$, dividir por k e multiplicar por dois temos

$$\Leftrightarrow 2(T_{m-1,n} - T_{m,n}) + \frac{2h\Delta y}{k}(T_{\infty} - T_{m,n}) + (T_{m,n-1} - T_{m,n}) + (T_{m,n+1} - T_{m,n}) = 0$$

$$\Leftrightarrow 2T_{m-1,n} + T_{m,n-1} + T_{m,n+1} + \frac{2h\Delta y}{k}T_{\infty} - 2\left(2 + \frac{h\Delta y}{k}\right)T_{m,n} = 0 \quad (31)$$

Note-se que a equação da condução de calor nos nodos de fronteira pode assumir mais duas formas. Para tal, foi feita essas deduções das respectivas equações no anexo I.

4.3.2.2 Regime transiente sem geração de calor

Até então estávamos perante regimes de transferência de calor permanentes onde a temperatura era considerada constante de forma a calcular o fluxo de calor e respectiva condutibilidade térmica. No entanto o estudo do fluxo de calor pode ser também calculado ao longo de um período (temporal) de forma a obter a acumulação de energia nas paredes em estudo.

Nestas situações há que saber determinar a temperatura em qualquer ponto e em qualquer instante e também a quantidade de calor acumulado.

Efectuando um balanço térmico superficial teremos:

$$\frac{kA}{l}(T_{s,1} - T_{s,2}) = hA(T_{s,2} - T_{\infty}) \quad (32)$$

onde

$T_{s,1} < T_{s,2} < T_{\infty}$ - o fluxo de calor dá-se entre a superfície 1(interior) e a superfície 2 (exterior), com este sentido de fluxo.

$$\frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{(T_{s,2} - T_{\infty})} = \frac{l/kA}{1/hA} = \frac{R_{cond}}{R_{conv}} = \frac{hl}{k} = Bi \quad (33)$$

em que

Bi - é o número de Biot (número adimensional).

O número de Biot representa a relação entre a queda de temperatura no sólido com a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido.

Se $Bi \ll 1$, em termos de resistências, podemos afirmar que a resistência condutiva é muito menor que a resistência convectiva, e admitir com erro aceitável uma distribuição uniforme de temperaturas, o que permitiria simplificar o cálculo da transferência de calor. Notar que para $Bi \gg 1$ a diferença de temperatura no sólido é muito maior que a existente entre a superfície e o fluido.

No cálculo de problemas de transmissão de calor em regime transiente recorreremos ao método das diferenças finitas, mais abrangente, adequado para um sistema que tenha uma temperatura interior do sistema a variar com o tempo. Como exemplo de casos de transmissão de calor em regime transiente temos as paredes dos edifícios que estão sujeitas a variações de temperaturas ao longo do dia.

A condução de calor em problemas bidimensionais, em regime transitório, sem geração interna de calor, pode ser modelada pela seguinte equação de calor

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(kA \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(kA \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \rho C_p A \frac{\partial T}{\partial t}$$

onde

T - é o campo de temperatura;

k - indica a condutividade térmica;

x e y - constituem o sistema de coordenadas cartesianas ortogonais.

Se a condutividade térmica (k) for uma propriedade constante, tem-se a equação de Laplace

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{\rho C_p}{k} \times \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (34)$$

Ao transformar a equação (34) em uma equação de diferenças finitas mas incrementando a discretização no tempo, passamos a ter,

$$t = p\Delta t$$

onde

p - denomina os pontos discretos no tempo.

A aproximação por diferenças finitas da derivada temporal é dada por,

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{m,n} \approx \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \quad (35)$$

em que

Δt - Time-step;

(p+1) - é chamado de “novo tempo”;

p - é chamado de “tempo anterior”.

Ao substituir na equação geral, a natureza da solução de diferenças finitas irá depender do tempo específico em que são avaliadas as aproximações das derivadas espaciais.

Há vários métodos que permitem a resolução de equações do tipo da equação (34) que fornece, valores para a temperatura e/ou fluxos de calor em pontos seleccionados e a intervalos de tempo previamente escolhidos.

De uma maneira geral são dois tipos de métodos existentes:

- Métodos explícitos;
- Métodos implícitos.

Neste trabalho escolheu-se o método explícito por ser de mais fácil resolução e de convergência mais rápida.

Este método permite o estudo dos mais variados tipos de paredes e para as mais variadas condições de fronteira, permitindo ainda obter a distribuição das temperaturas no interior da parede e o respectivo fluxo de calor, quer no interior da parede quer em ambas as faces, e o calor por ela armazenada.

4.3.3 Método explícito

Tal como noutros métodos de diferenças finitas, o princípio básico da aproximação numérica à equação de condução de calor consiste na substituição da equação diferencial que descreve a distribuição contínua de temperaturas por um sistema de equações algébricas que apenas é satisfeito em certos pontos do domínio.

Neste método as temperaturas são analisadas no “tempo anterior”, e a solução é considerada uma aproximação por diferenças finitas ascendentes e centrais à derivativa do tempo.

Para obter as temperaturas dos nodos ao longo da parede, é necessário deduzir as três equações gerais das temperaturas nos nodos ao longo do tempo.

- ✓ 1º Caso: Equação geral da temperatura no interior da camada.

Seja Fo a forma das diferenças finitas do número de Fourier, que em termos físicos representa a relação entre a velocidade de condução de calor e a velocidade de armazenamento de energia, descrito pela equação (36):

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \tag{36}$$

No caso bidimensional, temos:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \\ \Leftrightarrow \frac{1}{\alpha} \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} &= \frac{T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p - 2T_{m,n}^p}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 2T_{m,n}^p}{(\Delta y)^2} \end{aligned} \tag{37}$$

Assumindo que $\Delta x = \Delta y$, e resolvendo para a temperatura do nodo no “novo tempo” (p+1) podemos continuar a seguinte dedução.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} = \frac{T_{m-1,n}^p + T_{m+1,n}^p + T_{m,n-1}^p + T_{m,n+1}^p - 4T_{m,n}^p}{(\Delta x)^2}$$

$$\Leftrightarrow \frac{(\Delta x)^2}{\alpha \Delta t} (T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p) = T_{m-1,n}^p + T_{m+1,n}^p + T_{m,n-1}^p + T_{m,n+1}^p - 4T_{m,n}^p$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{Fo} (T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p) = T_{m-1,n}^p + T_{m+1,n}^p + T_{m,n-1}^p + T_{m,n+1}^p - 4T_{m,n}^p$$

Assim, obtemos que para um nodo interior a equação das temperaturas é igual à seguinte equação,

$$T_{m,n}^{p+1} = (T_{m-1,n}^p + T_{m+1,n}^p + T_{m,n-1}^p + T_{m,n+1}^p)Fo + (1 - 4Fo)T_{m,n}^p \quad (38)$$

Simplificando para o caso unidimensional obteremos a seguinte equação,

$$T_m^{p+1} = (T_{m-1}^p + T_{m+1}^p)Fo + (1 - 2Fo)T_m^p \quad (39)$$

A exactidão aumenta com o decréscimo de Δx e Δt . Isto fará com que aumente o número de nodos e de intervalos de tempo. A escolha de Δx condiciona a escolha de Δt , devido aos critérios de estabilidade numérica. Neste critério é necessário que o coeficiente associado com o nodo de interesse, no tempo anterior, seja maior ou igual a zero. Este método não é incondicionalmente estável.

- ✓ 2º Caso: Equação geral da temperatura na fronteira da camada com o exterior.

Para a determinação mais exacta das condições térmicas junto à superfície, associamos uma espessura que é metade da espessura dos nodos interiores.

Assim sendo, se não considerarmos a geração de calor e assumirmos que há transferência por convecção de um fluido adjacente, temos:

$$hA(T_\infty - T_0^p) + \frac{kA}{\Delta x} (T_1^p - T_0^p) = \rho C_p A \frac{\Delta x}{2} \frac{T_0^{p+1} - T_0^p}{\Delta t} \quad (40)$$

Ou resolvendo para a temperatura da superfície $t + \Delta t$:

$$h(T_\infty - T_0^p) + \frac{k}{\Delta x} (T_1^p - T_0^p) = \rho C_p \frac{\Delta x}{2} \frac{T_0^{p+1} - T_0^p}{\Delta t}$$

$$\Leftrightarrow \frac{2h\Delta t}{\rho C_p \Delta x} (T_\infty - T_0^p) + \frac{2k\Delta t}{\Delta x^2 \rho C_p} (T_1^p - T_0^p) = (T_0^{p+1} - T_0^p)$$

Sendo, α a difusividade térmica,

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \tag{41}$$

Então fica,

$$\Leftrightarrow \frac{2h\Delta t}{\rho C_p \Delta x} (T_\infty - T_0^p) + \frac{2\alpha\Delta t}{\Delta x^2} (T_1^p - T_0^p) = (T_0^{p+1} - T_0^p)$$

Como já sabemos que,

$$Fo = \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta x)^2}$$

Reduz-se a,

$$\Leftrightarrow \frac{2h\Delta t}{\rho C_p \Delta x} (T_\infty - T_0^p) + 2Fo(T_1^p - T_0^p) = (T_0^{p+1} - T_0^p)$$

De modo a simplificar a primeira parcela do primeiro termo basta multiplicar e dividir por Δx ,

$$\Leftrightarrow \frac{2h\Delta x\Delta t}{\rho C_p \Delta x^2} (T_\infty - T_0^p) + 2Fo(T_1^p - T_0^p) = (T_0^{p+1} - T_0^p)$$

$$\Leftrightarrow \frac{2h\Delta x\Delta t}{\frac{k}{\alpha} \Delta x^2} (T_\infty - T_0^p) + 2Fo(T_1^p - T_0^p) = (T_0^{p+1} - T_0^p)$$

$$\Leftrightarrow \frac{2\alpha h\Delta x\Delta t}{k\Delta x^2} (T_\infty - T_0^p) + 2Fo(T_1^p - T_0^p) = (T_0^{p+1} - T_0^p)$$

$$\Leftrightarrow \frac{2\alpha h\Delta x\Delta t}{k\Delta x^2} (T_\infty - T_0^p) + 2Fo(T_1^p - T_0^p) = (T_0^{p+1} - T_0^p)$$

Seja Bi a forma das diferenças finitas do número de Biot, temos

$$Bi = \frac{h\Delta x}{k} \quad (42)$$

Logo,

$$\Leftrightarrow \frac{2\alpha\Delta t Bi}{\Delta x^2} (T_\infty - T_0^p) + 2Fo(T_1^p - T_0^p) = (T_0^{p+1} - T_0^p)$$

$$\Leftrightarrow 2FoBi(T_\infty - T_0^p) + 2Fo(T_1^p - T_0^p) = (T_0^{p+1} - T_0^p)$$

$$\Leftrightarrow 2FoBi(T_\infty - T_0^p) + 2Fo(T_1^p - T_0^p) + T_0^p = T_0^{p+1}$$

Conclui-se,

$$T_0^{p+1} = 2Fo \times (T_1^p + BiT_\infty) + T_0^p \times (1 - 2Fo - 2BiFo) \quad (43)$$

- ✓ 3º Caso: Equação geral da temperatura na fronteira de duas camadas.

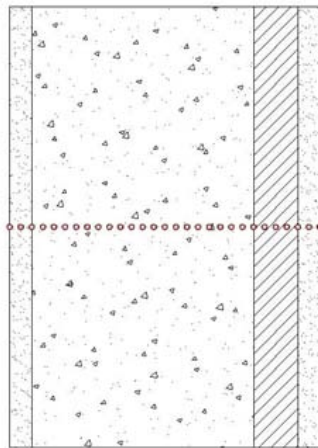


Figura 16 – Parede com isolamento pelo exterior

Nos pontos de estudo onde temos mudança de materiais a equação das temperaturas altera-se de forma a ter em conta as características dos materiais de cada camada:

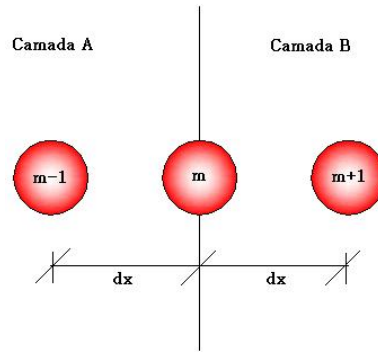


Figura 17 – Pormenor dos nodos de fronteira de duas camadas

$$k_A \times (\Delta y \times 1) \times \frac{T_{m-1}^p - T_m^p}{\Delta x} + k_B \times (\Delta y \times 1) \times \frac{T_{m+1}^p - T_m^p}{\Delta x} =$$

$$\rho_A \times Cp_A \times \left(\frac{\Delta x}{2} \times 1\right) \times \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t} + \rho_B \times Cp_B \times \left(\frac{\Delta x}{2} \times 1\right) \times \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t}$$

No anexo II está representado a dedução da equação (44), abaixo mencionada,

$$\Leftrightarrow T_m^{p+1} = \frac{(T_{m-1}^p - T_m^p)}{\left(\frac{1}{2 \times Fo_A} + \left(\frac{k_B}{k_A} \times \frac{1}{2 \times Fo_B}\right)\right)} + \frac{(T_{m+1}^p - T_m^p)}{\left(\left(\frac{k_A}{k_B} \times \frac{1}{2 \times Fo_A}\right) + \frac{1}{2 \times Fo_B}\right)} + T_m^p \quad (44)$$

Aplicando as equações (39), (43) e (44), é-nos fornecida uma distribuição de temperaturas ao longo da parede ao fim de um dado intervalo de tempo (“Time-step”). Uma vez conhecidas estas temperaturas, são recalculadas ao fim de outro “Time-step”. No decorrer destes tempos de resposta, é calculado o valor das temperaturas e é criada uma matriz Temperatura onde constam todos esses valores ao longo de um determinado período. Para se iniciar todo este processo torna-se necessário atribuir um valor inicial de temperatura para todos os nodos.

Em modo de resumo, pode-se retirar algumas ilações com respeito ao método explícito, ou seja, para determinar o valor do “Time-step” há que ter em conta a convergência ou a instabilidade do método analisado.

No caso unidimensional para um nodo interior o critério de estabilidade é dado pela seguinte equação:

$$(1 - 2Fo) \geq 0 \Leftrightarrow Fo \leq 1/2.$$

No caso em que esteja a ser feita uma análise bidimensional num nodo interior o critério de estabilidade é:

$$(1-4Fo) \geq 0 \Leftrightarrow Fo \leq 1/4.$$

Na camada que está em contacto com o ambiente o critério de estabilidade já é deduzido pela seguinte equação:

$$1-2Fo-2BiFo \geq 0 \Leftrightarrow Fo(1+Bi) \leq 1/2$$

Note-se que através destas equações será escolhido o valor do “Time-step”.

Tudo isto é possível porque assumimos que todo o fluxo de calor vai para o nodo.

No entanto, para garantir uma maior exactidão nos resultados, é importante diminuir o mais possível o intervalo de tempo entre leituras. Fazendo isto, e para satisfazer o critério de convergência referido, torna-se obrigatório recorrer a valores de “Time-step” mais curtos.

Na resolução numérica do sistema de equações é utilizado o menor intervalo de tempo de todos os calculados para cada um dos nodos existentes na parede em análise.

Para que todo este processo se inicie, é importante conhecer a distribuição de temperatura em todos os nodos da parede. Assim sendo, foi assumido um valor inicial de temperatura em cada nodo, a partir do qual, sabendo a curva sinusoidal da temperatura no exterior, se estudou a repercussão desse efeito no interior da parede.

5 Isolamento Térmico

5.1 Generalidades

No passado as casas eram construídas fundamentalmente para proteger da chuva e da neve, sem atenção especial ao isolamento térmico. No decurso do século XX a consciência da limitação dos recursos energéticos, o aumento do preço da energia, bem como uma procura cada vez mais acentuada de conforto térmico levou à implementação de códigos que especificam níveis mínimos de isolamento térmico em paredes, telhados e vãos envidraçados. Vamos dar neste texto alguns exemplos de aplicação do que foi exposto sobre fluxo de calor.

O isolamento térmico tem como função principal o aumento da resistência térmica da envolvente do edifício, de forma a reduzir as trocas de calor entre o edifício e o exterior, reduzindo as necessidades de aquecimento e arrefecimento, assim como o risco de condensações. São considerados isolantes térmicos materiais com $k \leq 0,065 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$ e $R > 0,3 \text{ m}^2\cdot\text{°C/W}$, de forma a garantir que a espessura do material é suficiente para reduzir o fluxo de calor.

Ao retardar o fluxo de calor pela envolvente do edifício, os isolamentos térmicos possuem várias funções (ASHRAE, 1997) [18]:

- Conservam a energia devida à redução das perdas de calor;
- Controlam a temperatura superficial de equipamentos e estruturas;
- Previnem as condensações em superfícies com a temperatura inferior ao ponto de orvalho;
- Reduzem as flutuações térmicas dos espaços, aumentando o conforto térmico.

As janelas são os elementos de um edifício que oferecem menos resistência ao fluxo de calor. Numa casa típica, cerca de um terço do calor total perdido durante o inverno ocorre através das janelas. Por outro lado, no verão o fluxo de radiação solar para o interior aquece indesejavelmente as casas. Embora seja fundamental considerar todos os constituintes das janelas, neste texto vamos focar a atenção exclusivamente no vidro.

Os sistemas de isolamento térmico, aplicados de forma contínua e pelo exterior dos edifícios, contribuem para a optimização do desempenho energético dos edifícios, sendo extremamente fáceis de fiscalizar.

Em Portugal o isolamento térmico é utilizado na construção de edifícios desde a década de 1950 e é uma componente essencial para o bom desempenho energético dos edifícios. [33]

Obrigatório no sector da construção desde 1991, com a entrada em vigor do primeiro Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) o isolamento térmico tanto pode ser aplicado pelo interior das paredes da envolvente de um edifício, como colocado na caixa-de-ar entre paredes duplas, como ainda ser assente pelo exterior de um edifício. Tem utilidade em qualquer destas aplicações, mas é sobretudo numa, aquela pelo exterior do edifício, que o isolamento térmico tem a maior eficácia. [33]

Um sistema de isolamento térmico com características técnicas e espessura adequadas, aplicado de forma contínua e pelo exterior dos edifícios (pavimento térreo, paredes envolventes e coberturas), contribui melhor para a optimização do desempenho energético de um edifício, do que qualquer outro sistema equiparável, excluindo casos de ocupação intermitente do edifício em que se pretende, objectivamente, uma inércia térmica fraca para promover o rápido aquecimento (ou arrefecimento) do local, nos períodos de ocupação. [33]

5.2 Inércia térmica

A inércia térmica é modelada como função da densidade, calor específico e capacidade térmica de um material. Esta é mais relevante especialmente em locais sujeitos a grandes amplitudes térmicas em curtos espaços de tempo, uma das principais características do clima em Portugal. Tendo em conta as características de construção do nosso país, uso de materiais pesados e maciços, faz com que se confira uma maior estabilidade térmica nos edifícios.

Como é indicado pela palavra ‘inércia’, estes materiais pesados interagem muito lentamente com as temperaturas do meio que as rodeia e armazenam as respectivas temperaturas médias, porque as temperaturas de pico (quente e frio) não se mantêm durante suficiente tempo para serem acumuladas por estes materiais.

Em Portugal, a temperatura média do clima, durante a maior parte do ano, mantém-se entre os 18 °C e os 26 °C, contribuindo a inércia térmica, por este motivo, para uma estabilidade do clima no interior e para o conforto. [30]

Tudo passa pela construção de edifícios habitacionais com estruturas pesadas, muito bem isoladas termicamente, que permitam uma relação directa com o ambiente interior.

Para otimizar o contributo da inércia térmica, é importante evitarmos que os materiais pesados (o betão, os tijolos, os rebocos) sejam predominantemente revestidos com outros materiais leves (tectos falsos, alcatifas, madeiras...). Qualquer destes materiais leves de revestimento funciona como um isolante e interrompe o intercâmbio térmico que se pretende manter entre os materiais com elevada inércia térmica e o ambiente interior. Isto não significa que não seja adequado integrar, numa habitação, um pavimento em madeira, também porque é muito elevado o conforto táctil sentido ao tocarmos um material com baixo grau de inércia térmica, como a madeira. [30]

A inércia térmica implica a utilização de materiais pesados na construção – betão, tijolos, rebocos, estuques, pedra, etc. Materiais que, dado o modo como são aplicados, exigem tempos de secagem que tornam a construção mais lenta. Na óptica do curto prazo, em que a pressão financeira é grande para o produto imobiliário ser rapidamente comercializado, os tempos de construção tornam-se uma importante condicionante a minimizar e, por sua vez, torna-se irresistível a tentação de construir edifícios leves (com estruturas metálicas ou em madeira). É de extrema importância que sejam otimizados os prazos de execução em obra para soluções construtivas que ofereçam a inércia térmica adequada e necessária neste clima, para se evitar que sejam substituídas por soluções que não contribuem para o bom desempenho energético do edifício. [20]

Em toda a faixa de clima mediterrânico, a inércia térmica é uma medida essencial para a optimização do desempenho energético-ambiental de edifícios habitacionais, porque constitui uma fonte de energia térmica estabilizante durante toda a duração dos edifícios.

Em termos do RCCTE, [3] este factor vem reflectido nas necessidades de aquecimento e arrefecimento e nos requisitos impostos para os factores solares mínimos admissíveis de vão envidraçados com o mínimo de 5% da área útil do espaço que servem (desde que não orientados à norte, entre noroeste e nordeste), no que concerne aos factores solares com dispositivos de protecção 100% activas.

Segundo o RCCTE, capítulo 4.4, o factor de utilização dos ganhos térmicos (η) é calculado em função da inércia térmica do edifício e da relação (γ) entre os ganhos totais brutos (internos e solares) e as perdas térmicas totais do edifício, conforme representado nas equações seguintes.

$$\begin{cases} \eta = \frac{1-\gamma^a}{1-\gamma^{a+1}} & \text{se } \gamma \neq 1 \\ \eta = \frac{a}{a+1} & \text{se } \gamma = 1 \end{cases}$$

onde

η - factor de utilização dos ganhos térmicos;

γ - relação entre ganhos totais brutos (interiores e solares) e as perdas térmicas totais do edifício;

$$\gamma = \frac{\text{Ganhos térmicos brutos}}{\text{Nec. brutas de aquecimento}} = \frac{Q_g}{Q_t + Q_v}$$

onde,

Q_g - Ganhos térmicos brutos;

Q_t - Ganhos térmicos pela envolvente opaca;

Q_v - Ganhos térmicos pela ventilação.

a - coeficiente adimensional que varia consoante à inércia térmica do edifício.

$$\begin{cases} a = 1,8 & \text{se edifício com inércia térmica fraca} \\ a = 2,6 & \text{se edifício com inércia térmica média} \\ a = 4,2 & \text{se edifício com inércia térmica forte} \end{cases}$$

Outra forma de obter o factor de utilização dos ganhos térmicos poderá ser obtida através da relação entre a inércia térmica do edifício, da relação entre ganhos totais brutos e as perdas térmicas totais do edifício, utilizando o Gráfico 7.

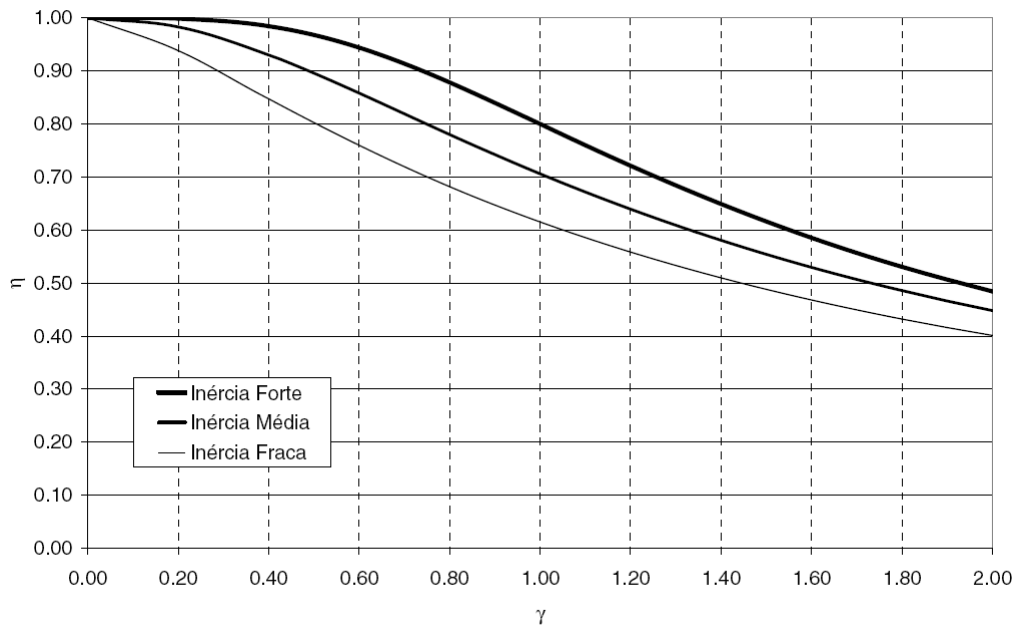


Gráfico 7 – Factor de utilização dos ganhos térmicos em função da inércia térmica de um edifício

Note-se que para valores de γ elevados, que conduzam a valores de η inferiores a 0,8, levam a sérios riscos de sobreaquecimento, pelo que devem ser evitados. [3]

A diferença entre uma inércia forte ou fraca, para uma mesma relação (γ) entre ganhos térmicos brutos e perdas térmicas totais do edifício, pode significar a diferença entre aproveitar 60% ou 80% dos ganhos internos. Por sua vez, esta diferença pode ter, ou não, uma situação de sobreaquecimento indesejável nos edifícios, que à luz do regulamento (RCCTE) actual não são admissíveis. [3]

Segundo o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), as necessidades nominais de energia útil de aquecimento (N_{ic}), é o parâmetro que exprime a quantidade de energia útil necessária para manter em permanência um edifício ou uma fracção autónoma a uma temperatura interior de referência durante a estação de aquecimento, já as necessidades nominais de energia útil de arrefecimento (N_{vc}), é o parâmetro que exprime a quantidade de energia útil necessária para manter em permanência um edifício ou uma fracção autónoma a uma temperatura interior de referência durante a estação de arrefecimento. [3]

$$N_{ic} = \frac{(Q_t + Q_v - Q_{gu})}{A_p} [\text{W/m}^2]$$

onde

Q_t - perdas de calor por condução através da envolvente dos edifícios;

Q_v - perdas de calor resultante da renovação do ar;

Q_{gu} - ganhos de calor úteis resultantes da iluminação, dos equipamentos, dos ocupantes e dos ganhos solares através dos envidraçados;

A_p - área útil de pavimento.

As perdas de calor pela envolvente durante toda a estação de aquecimento devidas à diferença de temperatura entre o interior e o exterior do edifício, é obtido pela seguinte formula,

$$Q_t = Q_{ext} + Q_{lna} + Q_{pe} + Q_{pt} \text{ (W)}$$

onde

Q_{ext} - perdas de calor pelas zonas correntes das paredes, envidraçados, coberturas e pavimentos em contacto como exterior;

Q_{lna} - perdas de calor pelas zonas correntes das paredes, envidraçados e pavimentos em contacto com locais não aquecidos;

Q_{pe} - perdas de calor pelos pavimentos e paredes em contacto com o solo;

Q_{pt} - perdas de calor pelas pontes térmicas lineares existentes no edifício.

Durante toda a estação de aquecimento, a energia necessária para compensar estas perdas é calculada pela seguinte expressão,

$$Q_v = 0,024 \cdot (0,34 \cdot R_{ph} \cdot A_p \cdot P_d) \cdot GD \text{ (kWh)}$$

$$\Leftrightarrow Q_v = (0,34 \cdot R_{ph} \cdot A_p \cdot P_d) \cdot GD \text{ (w)}$$

em que

R_{ph} - número de renovações horárias do ar interior (taxa de renovação nominal);

P_d pé-direito médio;

GD - é o número de graus-dias de aquecimento indicado para cada concelho no anexo III do RCCTE.

ou, no caso de a ventilação ser assegurada por meios mecânicos providos de dispositivos de recuperação de calor do ar extraído,

$$Q_v = 0,024 \cdot (0,34 \cdot R_{ph} \cdot A_p \cdot P_d) \cdot GD \cdot (1 - \eta_v) \text{ (kWh)}$$

$$\Leftrightarrow Q_v = (0,34 \cdot R_{ph} \cdot A_p \cdot P_d) \cdot GD \cdot (1 - \eta_v) \text{ (w)}$$

onde

η_v - é o rendimento do sistema de recuperação de calor.

Tendo em conta que nem todos os ganhos térmicos brutos se traduzem num aquecimento útil do ambiente interior, dando origem por vezes apenas a um sobreaquecimento interior, os ganhos térmicos brutos são convertidos em ganhos úteis através do factor de utilização dos ganhos (η), em função da inércia térmica do edifício e da relação entre aqueles e as perdas térmicas totais do edifício,

$$Q_{gu} = \eta Q_g \text{ (kWh)}.$$

em que

Q_g - representa os ganhos térmicos brutos.

A equação de define os ganhos térmicos brutos é a seguinte,

$$Q_g = Q_i + Q_s \text{ (kWh)}$$

onde

Q_i - é os ganhos térmicos associados a fontes internas de calor;

Q_s - é os ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar.

No que se refere às necessidades nominais de arrefecimento (N_{vc}), é obtida pela seguinte equação,

$$N_{vc} = \frac{(1 - \eta) \cdot Q_g}{A_p}$$

onde

$(1-\eta)$ - representa a fracção dos ganhos excessivos.

Todos os parâmetros que não foram deduzidos neste trabalho, encontram-se descritos no RCCTE. [3]

5.3 Condensação

Há possibilidade de ocorrência de condensação quando o ar quente (com um certo grau de humidade) entra em contacto com uma superfície fria e em lugares onde o ar não circule com eficiência, formando gotículas de água. O período em que há maiores condições de ocorrência de condensação é normalmente no inverno, pois os edifícios durante este tempo não são muito ventilados, daí a humidade criada no interior dos mesmos não tem como escapar condensando-se no interior das paredes.

A condensação aparece frequentemente em divisões sem aquecimento, e cuja ventilação e circulação de ar são limitadas. Este fenómeno pode ser observado de forma bem clara, por exemplo, quando a temperatura do ar no exterior das habitações no inverno são baixas ao tomar banho ou duche produz-se muita humidade ou vapor, que em contacto com as paredes frias (normalmente revestidas com azulejos) foram pequenas gotas de água na superfície das mesmas.

Há diversos factores que propiciam à ocorrência de condensação no interior das paredes, que são:

- Secagem de roupas no interior das habitações;
- Vapor produzido ao cozinhar;
- Vapor dos banhos e duchas;
- Falta de circulação de ar nas habitações;
- Falta de ventilação na casa (Esta situação pode piorar se a casa estiver isolada contra correntes de ar);
- Aumento súbito da temperatura das divisões. Esta situação pode colocar o ar quente em contacto com superfícies frias, aumentando assim as probabilidades de o vapor de água condensar.

Entenda-se que o risco de condensação existe quando a pressão de vapor é superior à pressão de saturação.

Com base em algumas expressões matemáticas, abaixo representadas, foi criada uma folha de cálculo que tem como objectivo analisar a possibilidade de ocorrência de condensação no interior das paredes.

É importante salientar que a análise do risco de condensação no interior da parede é feita perante um regime permanente, ou seja, com as temperaturas do ar (no interior e no exterior) constantes.

Pela equação (3), anteriormente mencionada, pode-se observar que a temperatura no nodo em análise é dada pela seguinte equação, [31]

$$Q = U \times A \times \Delta T$$

Onde o coeficiente global de transmissão de calor é dado por,

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

A resistência total corresponde a soma de todas as resistências de condução e de convecção.

Para derivar a distribuição da pressão de vapor pode ser utilizado um processo análogo ao da transmissão de calor,

$$G_v = \frac{1}{R_{Total}^*} \cdot \Delta p_v \quad (45)$$

onde

$$R_{Total}^* = R_{conv_in}^* + R_{cond}^* + R_{conv_out}^*$$

A taxa de fluxo de vapor sob condições estacionárias por difusão através de um material é dependente da diferença de pressão de vapor através do material, do comprimento do caminho do fluxo e da resistência do material ao vapor de fluxo. Da lei de Fick a taxa de fluxo de vapor é descrita pela equação,

$$G_v = \frac{h^*}{R_v T} \cdot \Delta p_v$$

em que

G_v - representa a taxa de fluxo de vapor [kg/m².s]

h^* - representa o coeficiente de transferência de massa [m/s];

R_v - é a constante do gás de vapor de água (=461 J/kg⁻¹K⁻¹);

Δp_v - é a variação da pressão do vapor de água [N/m²].

Usando a relação de Lewis, (abaixo mencionada), o coeficiente de transferência de massa pode ser obtido a partir do coeficiente de transferência de calor,

$$h^* = \frac{h}{\rho C_p}$$

Sendo que a densidade do ar é 1.2 kg/m³ e o calor específico do ar é 1000 J/(kg.K).

Então

$$h^* = \frac{h}{1200}$$

E a resistência de uma camada de ar é obtida pela seguinte equação,

$$R^* = \frac{R_v T}{h^*}$$

O que para uma temperatura de 20 °C, resulta numa resistência de convecção que é dada por,

$$R^* = \frac{461 \times 293 \times 1200}{h} = 1,62 \times 10^8 \times R \quad (46)$$

A resistência de condução ao vapor de água é obtida por,

$$R^* = \frac{\Delta x}{k^*}$$

onde

k^* - representa a permeabilidade ao vapor de água do material em causa. No exemplo estudado $k^* = 2,5 \times 10^{-11}$ [kg.m.N⁻¹.s⁻¹].

Conclui-se então que a pressão de vapor total é dada pela seguinte formula,

$$G_v = \frac{1}{R_{Total}^*} \times (p_{v1} - p_{v2}) \quad (47)$$

Um dos dados importantes a saber é a percentagem de humidade no ar quer no interior como também no exterior, o que faz com que seja possível calcular a pressão ao vapor do ar em ambos os casos.

$$P_v = (\% \text{humidade}) \times (P_s) \quad (48)$$

onde

P_v - representa a pressão ao vapor [N.s/kg];

P_s - corresponde a pressão de saturação [N/m²].

Já a pressão ao vapor no nodo em análise é calculado em função da pressão no nodo anterior, como podemos observar pela seguinte equação,

$$P_{v+1} = P_v - G_v \times R_{v+1}^* \quad (49)$$

em que

P_{v+1} - Pressão de vapor no nodo em cálculo;

P_v - Pressão de vapor no nodo anterior;

R_{v+1}^* - Resistência ao vapor no nodo em cálculo.

De modo a determinar a temperatura em cada nodo a equação da transmissão de calor reduz-se a,

$$Q = U \times A \times \Delta T$$

$$\Leftrightarrow q = U \times (T_n - T_{n+1})$$

$$\Leftrightarrow q = \frac{(T_n - T_{n+1})}{R}$$

$$\Leftrightarrow T_{n+1} = T_n - (q \times R)$$

(50)

Note-se que o valor da resistência varia consoante o nodo em análise, ou seja, no caso de ser um nodo de superfície estamos perante uma resistência de convecção, caso contrário será uma resistência de condução.

Após determinar as temperaturas no nodos (no limite de cada camada), é retirado o valor da pressão de saturação, tendo como base o seguinte quadro (ASHRAE).

Quadro 5 – Pressão de vapor de saturação P_s , de acordo com a fórmula de GOFF (ASHRAE, Handbook, 1977) [18]

Pressão sat. [kN/m ²]		Parte fracionária									
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
p a r t e i n t e i r a	0	611,1	615,6	620,1	624,6	629,1	633,7	638,3	642,9	647,6	652,3
	1	657,0	661,7	666,5	671,3	676,1	681,0	685,9	690,9	695,8	700,8
	2	705,9	710,9	716,0	721,1	726,3	731,5	736,7	742,0	747,2	752,6
	3	757,9	763,3	768,7	774,2	779,7	785,2	790,8	796,4	802,0	807,7
	4	813,4	819,1	824,9	830,7	836,5	842,4	848,3	854,3	860,3	866,3
	5	872,4	878,5	884,6	890,8	897,0	903,3	909,6	915,9	922,3	928,7
	6	935,1	941,6	948,2	954,7	961,3	968,0	974,7	981,4	988,2	995,0
	7	1001,8	1008,7	1015,7	1022,7	1029,7	1036,7	1043,9	1051,0	1058,2	1065,4
	8	1072,7	1078,0	1083,4	1089,8	1096,3	1102,8	1109,8	1117,3	1124,9	1132,6
	9	1148,0	1155,8	1163,6	1171,4	1179,4	1187,3	1195,3	1203,4	1211,5	1219,7
	10	1227,9	1236,1	1244,4	1252,8	1261,2	1269,6	1278,1	1286,6	1295,2	1303,9
	11	1312,6	1321,3	1330,1	1339,0	1347,9	1356,9	1365,9	1374,9	1384,0	1393,2
	12	1402,4	1411,7	1421,0	1430,4	1439,9	1449,3	1458,9	1468,5	1478,2	1487,9
	13	1497,6	1507,5	1517,3	1527,3	1537,3	1547,3	1557,4	1567,6	1577,8	1588,1
	14	1598,5	1608,9	1619,3	1629,9	1640,5	1651,1	1661,8	1672,6	1683,4	1694,3
	15	1705,2	1716,2	1727,3	1738,5	1749,7	1760,9	1772,3	1783,6	1795,1	1806,6
	16	1818,2	1829,9	1841,6	1853,3	1865,2	1877,1	1889,1	1901,1	1913,3	1925,4
	17	1937,7	1950,0	1962,4	1974,8	1987,4	2000,0	2012,6	2025,4	2038,2	2051,1
	18	2064,0	2077,0	2090,1	2103,3	2116,5	2129,8	2143,2	2156,7	2170,2	2183,8
	19	2197,5	2211,2	2225,1	2239,0	2252,9	2267,0	2281,1	2295,3	2309,6	2324,0
	20	2338,4	2353,0	2367,6	2382,2	2397,0	2411,8	2426,8	2441,8	2456,9	2472,0
	21	2487,3	2502,6	2518,0	2533,5	2549,1	2564,7	2580,5	2596,3	2612,2	2628,2
	22	2644,3	2660,5	2676,7	2693,1	2709,5	2726,0	2742,6	2759,3	2776,1	2793,0
	23	2809,9	2827,0	2844,1	2861,4	2878,7	2896,1	2913,6	2931,2	2948,9	2966,7
	24	2984,6	3002,5	3020,6	3038,8	3057,0	3075,4	3093,8	3112,4	3131,0	3149,8
	25	3168,6	3187,5	3206,6	3225,7	3244,9	3264,3	3283,7	3303,2	3322,9	3342,6
	26	3362,5	3382,4	3402,4	3422,6	3442,8	3463,2	3483,7	3504,2	3524,9	3545,7
	27	3566,6	3587,6	3608,7	3629,9	3651,2	3672,6	3694,1	3715,8	3737,5	3759,4
	28	3781,4	3803,5	3825,7	3848,0	3870,4	3893,0	3915,6	3938,4	3961,3	3984,3
	29	4007,4	4030,6	4054,0	4077,4	4101,0	4124,7	4148,5	4172,5	4196,5	4220,7
	30	4245,0	4269,5	4294,0	4318,7	4343,5	4368,4	4393,4	4418,6	4443,9	4469,3
	31	4494,8	4520,5	4546,3	4572,2	4598,3	4624,5	4650,8	4677,2	4703,8	4730,5
	32	4757,3	4784,3	4811,4	4838,6	4866,0	4893,5	4921,1	4948,9	4976,8	5004,8
	33	5033,0	5061,3	5089,8	5118,4	5147,1	5176,0	5205,0	5234,2	5263,5	5292,9
	34	5322,5	5352,2	5382,1	5412,1	5442,2	5472,5	5503,0	5533,6	5564,3	5595,2
	35	5626,2	5657,4	5688,8	5720,3	5751,9	5783,7	5815,6	5847,7	5880,0	5912,4
	36	5944,9	6010,5	6076,5	6143,0	6210,0	6277,5	6345,5	6414,0	6483,0	6552,5
	37	6279,1	6347,9	6417,9	6488,5	6559,7	6631,5	6703,9	6776,9	6850,5	6924,7
	38	6629,4	6705,5	6782,5	6860,5	6939,5	7019,5	7100,5	7181,5	7263,5	7345,5
39	6996,5	7072,0	7148,0	7224,0	7300,0	7376,0	7452,0	7528,0	7604,0	7680,0	

Depois de obtido o valor da temperatura no nodo, pelo Quadro 5, é retirado o valor da pressão de saturação. Para melhor compreender como retirar um valor do quadro será dado um exemplo, Para uma temperatura no nodo de 27,3, basta simplesmente separar a parte inteira (27) e depois procurar na linha do respectivo

valor e na coluna do valor da parte fraccionária (0,3) o que dá uma pressão de 3629,9 kN/m².

Após determinadas as temperaturas nos nodos e respectivas pressões de saturação, resta calcular as resistências ao vapor pela equação (46). Para melhor compreender este capítulo serão apresentados alguns gráficos de modo a determinar o risco de condensação em algumas paredes, no capítulo 6.7.

5.4 Limitações do regime permanente

A contabilização das perdas de calor por condução é, na maior parte dos casos, efectuada assumindo condições de regime permanente (e unidimensional). E, na verdade estas hipóteses são suficientes para estimar essas perdas de forma adequada. Um exemplo deste cálculo encontra-se no RCCTE, onde na estação de aquecimento (inverno) se calculam as perdas de calor pela envolvente opaca dos edifícios, através da fórmula: [3]

$$Q_t = Q_{ext} + Q_{lna} + Q_{pe} + Q_{pt} \text{ [W]}$$

em que

Q_t - perdas de calor pela envolvente opaca;

Q_{ext} - perdas de calor pelas zonas correntes das paredes, envidraçados, coberturas e pavimentos em contacto com o exterior;

Q_{lna} - perdas de calor pelas zonas correntes das paredes, envidraçados e pavimentos em contacto com locais não aquecidos;

Q_{pe} - perdas de calor pelos pavimentos e paredes em contacto com o solo;

Q_{pt} - perdas de calor pelas pontes térmicas lineares existentes no edifício.

As condições de regime estacionário são aproximações válidas para locais aquecidos em permanência, onde se procura determinar um valor médio e representativo da perda de calor num edifício. Porém, quando se pretende averiguar ao pormenor o cálculo da condução linear das perdas de calor ao longo de uma parede, de forma a permitir conhecer o campo de temperaturas no seu interior (espessura) e ao longo do dia (dia tipo), o regime estacionário deixa de ser o mais adequado, visto que assume um fluxo de calor constante.

Uma outra situação onde o regime estacionário é insuficiente diz respeito à influência que a posição do isolamento térmico na parede pode ter no conforto térmico de um edifício. Repare-se que é indiferente, no cálculo das perdas de calor em regime permanente, colocar o isolamento térmico no interior ou no exterior de uma parede. Tudo o que o modelo assume é uma resistência adicional (em série) à passagem de calor.

Um dos objectivos deste estudo foi explorar a potencialidade do regime transiente na determinação da influência da posição do isolamento térmico nas condições interiores de conforto térmico. Nesse sentido, e para conjugar a variação das temperaturas ao longo do dia com a discretização da parede em vários pontos no seu interior, seleccionámos o método das diferenças finitas (método finito) na abordagem deste problema. Nestas duas abordagens diferentes, regime estacionário ou regime transiente, os parâmetros principais também são diferentes. Enquanto no primeiro, o coeficiente de transmissão térmica superficial do elemento da envolvente (U) é o termo condicionante no cálculo da transferência de calor entre o interior e o exterior, no segundo, o parâmetro da difusividade térmica (α) indica a maior ou menor capacidade do material em acumular ou difundir o calor gerado no interior das paredes.

5.5 Análise económica

Neste capítulo é feita uma relação entre o custo anual de aquecimento e o custo de isolamento, de modo a otimizar a espessura do isolamento a aplicar, tendo em conta alguns parâmetros relacionados com os mesmos custos.

Entenda-se como espessura óptima de isolamento, aquela em que a soma dos custos de aquecimento e do isolamento, anual, é mínima.

A metodologia aplicada nesta análise económica foi baseada em trabalhos de mestrado da Universidade de Cranfield. [21]

Para o cálculo do custo anual de aquecimento é tida em conta a seguinte expressão:

$$H_c = F \times Q \times S \quad (51)$$

onde

F – custo unitário do combustível utilizado para o aquecimento [€/J];

Q – taxa de calor perdido [W];

S – período de funcionamento [segundos].

A equação do custo anual de isolamento, é dada por,

$$I_c = \left(\frac{P \times Z}{100} \times V \right) + c \quad (52)$$

em que

P – taxa de juro [%];

Z – volume do isolamento [m³];

V – custo volumétrico do isolamento [€/m³];

c – custo total da aplicação e manutenção do isolamento pelo tempo da vida útil do isolamento.

Logo, o custo médio anual, C, tendo em conta a vida útil do sistema é dado por,

$$C = H_c + I_c \quad (53)$$

Para o isolamento de uma parede, a espessura óptima x é obtida quando C é mínimo.

Seja,

$$Q = AU(T_i - T_a) \quad (54)$$

onde

U – é o coeficiente global de transmissão de calor, em que este pode ser obtido considerando a soma das resistências em série.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_m} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}} \quad (55)$$

Substituindo a equação (46), na equação (43), fica,

$$H_c = F \times S \times Q = F \times S \times A \times U \times (T_i - T_a)$$

$$\Leftrightarrow H_c = \frac{F \times S \times A \times (T_i - T_a)}{\left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}} \right)} \quad (56)$$

Substituindo na equação do custo médio anual,

$$C = \frac{F \times S \times A \times (T_i - T_a)}{\left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}} \right)} + \left(\frac{P \times Z}{100} \times V \right) + c \quad (57)$$

Sabendo que o volume é igual a área a multiplicar pela espessura, então fica,

$$C = \left(\frac{F \times S \times A \times (T_i - T_a)}{\left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}} \right)} \right) + \left(\frac{P \times Z}{100} \times A \times x \right) + c \quad (58)$$

Para obter o mínimo de custo médio anual em função da espessura do isolamento, então teremos que determinar o zero da primeira derivada, ou seja,

$$\frac{dC}{dx} = 0 \Leftrightarrow \left(\left(\frac{F \times S \times A \times (T_i - T_a)}{\left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}} \right)} \right) + \left(\frac{P \times A \times x}{100} \times V \right) + c \right)' = 0 \quad (59)$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{x}{k} \right) = 10 \times \sqrt{\frac{(F \times S \times (T_i - T_a))}{P \times V \times k}} - \left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{1}{h_{out}} \right) \quad (60)$$

Substituindo na equação (47), fica,

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow \frac{1}{U} &= \left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{1}{h_{out}} \right) + \sqrt{\frac{(F \times S \times (T_i - T_a))}{P \times V \times k}} - \left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{1}{h_{out}} \right) \\ \Leftrightarrow \frac{1}{U} &= \sqrt{\frac{(F \times S \times (T_i - T_a))}{P \times V \times k}} \\ \Leftrightarrow U &= \left(\frac{P \times V \times k}{F \times S \times (T_i - T_a)} \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (61)$$

Seja,

$$(T_i - T_a) = \frac{Q}{Q_{m\acute{a}x}} \times GausDia = f \times G_D$$

(62)

onde

f – factor de carga

G_D – Graus dia

Pode-se concluir que a equação que nos dá a condutividade térmica otimizada em função do isolamento e do custo de aquecimento é dado por,

$$U = \left(\frac{P \times V \times k}{F \times S \times f \times G_D} \right)^{1/2} \quad (63)$$

Através da equação (60), colocando a espessura do isolamento em evidência (x), é possível determinar a espessura ideal do isolamento em função do zonamento climático de uma determinada região, tendo em conta o número de GD da respectiva região, o custo do combustível, a taxa de juro aplicada pela banca para reabilitação ou construção de um edifício, entre outros parâmetros mencionados na equação abaixo mencionada.

$$x = k \times 10 \times \sqrt{\frac{(F \times S \times f \times G_D)}{PVk}} - \left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{1}{h_{out}} \right)$$

6 Aplicação do modelo matemático

Neste capítulo aplica-se o programa de cálculo automático referido no capítulo 4 a um elemento de construção. O objectivo da aplicação do programa é obter as temperaturas nos nodos existentes em duas soluções construtivas com aplicação de isolamento térmico e comparar a evolução da temperatura no interior do compartimento motivado por uma variação diária da temperatura no exterior da mesma.

Para analisar as respectivas paredes efectuou-se um estudo das características de diversos materiais em diversos trabalhos mencionados nas referências bibliográficas de modo a obter os valores mais aproximados da realidade.

Quadro 6 – Características dos materiais

Materiais	ρ	k	C_p
	kg/m ³	W/m.K	J/kg.K
Reboco	1000	0.40	837
Betão	2100	1.40	880
Isolamento	35	0.04	1220
Caixa-de-ar	1.2	0.02	1004

Há que referenciar que os valores apresentados no Quadro 6, no que se refere ao isolamento térmico, foram obtidos tendo em conta a escolha do tipo de isolamento térmico mais frequente nas de paredes da envolvente opaca. Neste trabalho foi considerado que o isolamento utilizado para efectuar o comportamento térmico de vários tipos de paredes estudadas foi EPS – Poliestireno expandido moldado (placas).

As resistências térmicas superficiais interiores e exteriores foram obtidas no RCCTE, Anexo VII, no ponto 1.1, QUADRO VII.1, onde temos que estes dois parâmetros dependem do sentido do fluxo, como podemos observar no Quadro 6.

Quadro 7 – Resistências térmicas superficiais [3]

Sentido do fluxo de calor		Resistência térmica superficial (m ² .°C/W)	
		Exterior 1/he	Interior 1/hi
Horizontal		0,04	0,13
Vertical	Ascendente	0,04	0,10
	Descendente	0,04	0,17

No caso de se estar a analisar uma parede com espaços de ar não ventilados no seu interior a resistência térmica de espaços de ar não ventilados apresentados no RCCTE, Anexo VII, no ponto 1.2, QUADRO VII.2, descrevem os valores das resistências térmicas nestes mesmos espaços consoante a espessura da caixa-de-ar, como podemos visualizar no Quadro 7.

Quadro 8 – Resistência térmica dos espaços de ar não ventilados [3]

Sentido do fluxo de calor		Espessura do espaço de ar (mm)	Resistência térmica R _{ar} (m ² .°C/W)
Horizontal		5	0.11
		10	0.15
		15	0.17
		de 25 a 100	0.18
Vertical	ascendente	5	0.11
		10	0.15
		de 15 a 100	0.16
	descendente	5	0.11
		10	0.15
		15	0.17
		25	0.19
		50	0.21
		100	0.22

No estudo do comportamento do fluxo de calor no interior de uma parede é importante saber o comportamento da temperatura do ar no exterior, pois esta varia com o tempo. Ao longo de um dia as paredes em contacto com o exterior estão sujeitas a variações de temperatura o que faz com que esta variação tenha uma repercussão no interior da mesma. Como o método utilizado na análise deste comportamento tem em conta esta variação de temperaturas, ou seja, o método explícito faz uma análise do fluxo de calor de nodo em nodo num regime transiente.

Segundo o RCCTE, e passo a citar, “na estação de arrefecimento o objectivo é que o edifício não aqueça acima de uma temperatura de referência, que é de 25°C. Se, a temperatura se mantiver abaixo desse valor, não será necessário arrefecer artificialmente o edifício com ar-condicionado.” Para tal neste trabalho foi tido em conta a temperatura média da Região Autónoma da Madeira de forma a efectuar uma simulação do comportamento do fluxo de calor.

Em suma, foi necessário simular uma curva sinusoidal que fosse de certa forma representativa da variação da temperatura no exterior.

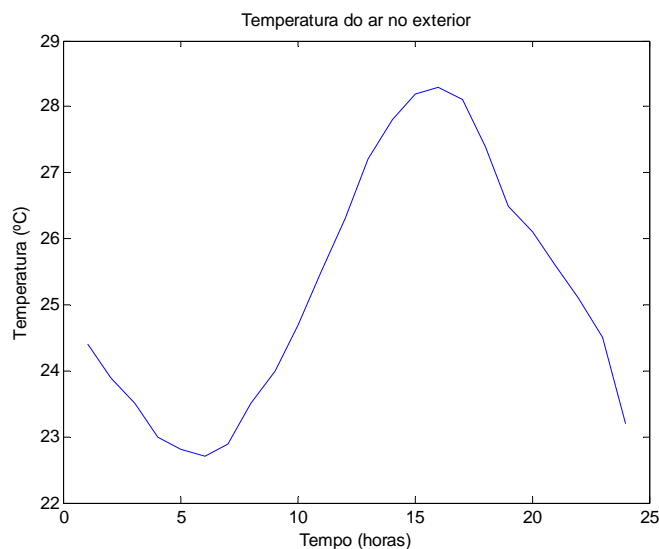


Gráfico 8 – Evolução da temperatura média de verão no exterior de um edifício

Como se pode observar no Gráfico 8, esta curva, não é representativa em relação a variação da temperatura do exterior, pois não descreve a variação de temperatura do ar ambiente ao longo de um dia tipo. Deste modo, tentou-se estudar uma outra curva que enquadrasse mais com a evolução temporal da temperatura exterior.

Segundo a ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) essa curva poderá ser definida pela equação (64), abaixo mencionada, tendo em conta os valores de um coeficiente que a própria indica.

$$T_0 = T_{\max} - \alpha \times (T_{\max} - T_{\min}) \quad (64)$$

onde

T_0 – temperatura na hora em análise;

T_{\max} – temperatura máxima diária;

T_{\min} – temperatura mínima diária;

α – coeficiente indicado pela ASHRAE consoante a hora solar.

Quadro 9 – Valores do coeficiente α indicados pela ASHRAE

Hora solar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
α	0.87	0.92	0.96	0.99	1	0.98	0.93	0.84	0.71	0.56	0.39	0.23
Hora solar	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
α	0.11	0.03	0	0.03	0.10	0.21	0.34	0.47	0.58	0.68	0.76	0.82

Logo de seguida podemos ver o gráfico que simula a curva do coeficiente α ,

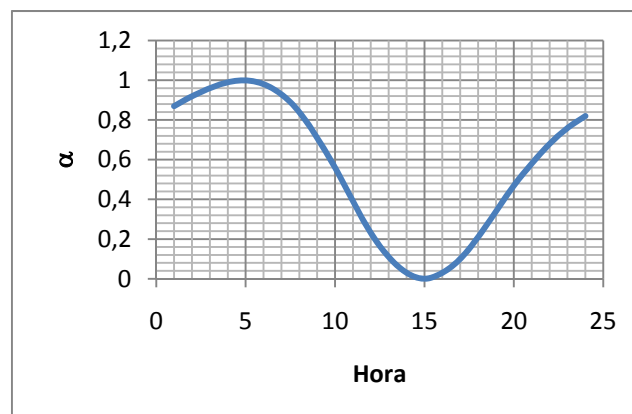


Gráfico 9 – Curva dos valores do coeficiente α

Utilizando a equação (64), tendo como base as temperaturas, máxima e mínima do Gráfico 8, obteve-se o seguinte gráfico,

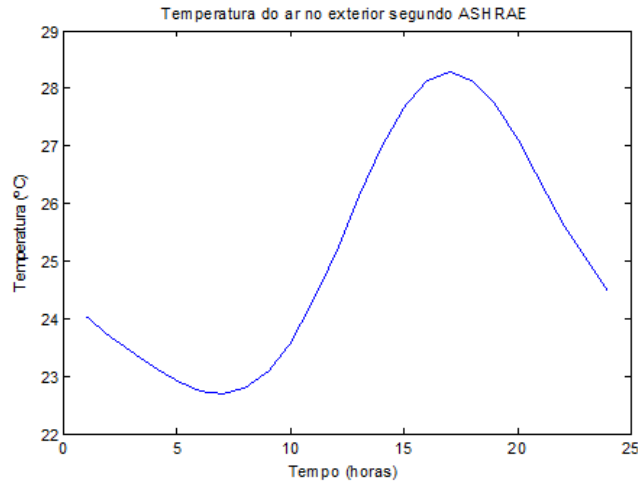


Gráfico 10 – Variação da temperatura exterior segundo a equação (64)

Foram sobrepostas as curvas anteriormente mostradas, para observar que a curva de temperatura do ar inicialmente tomada (a vermelho) está ligeiramente afastada da curva obtida pela equação de ASHRAE (a azul).

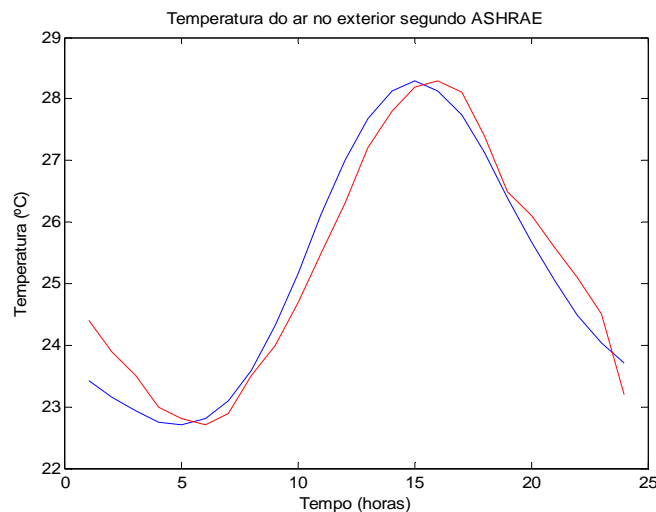


Gráfico 11 – Sobreposição das curvas dos Gráficos 8 e 10

De qualquer modo esta equação teve que ser reajustada a realidade da Região Autónoma da Madeira, ou seja, foi feito um atraso de uma hora, na hora solar. Desta forma foi possível obter uma curva semelhante a curva do Gráfico 8, como vamos ver no próximo gráfico.

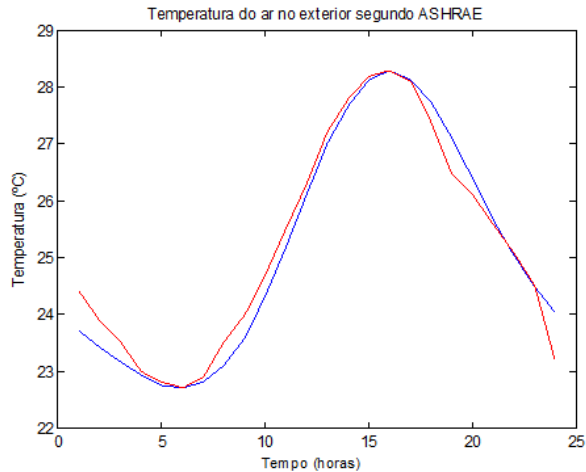


Gráfico 12 – Reajuste na hora solar

É importante salientar que como os valores obtidos da temperatura no exterior foram medidos de hora em hora, isso fez com que as temperaturas durante um intervalo de tempo fossem constantes. Isto é uma condicionante ao método utilizado, visto apenas dispormos da temperatura hora a hora, e o time-step ser muito inferior, logo, fez com que a temperatura no intervalo de tempo (1 hora) seja sempre a mesma até atingir o time-step equivalente a esse mesmo intervalo, como podemos observar no Gráfico 13.

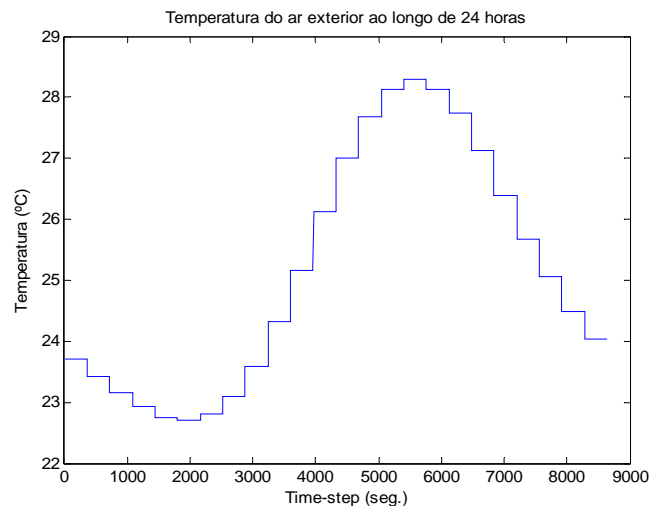


Gráfico 13 – Temperatura do ar exterior em função dos “Time-step”

Como este trabalho teve como objectivo estudar o comportamento térmico de uma parede com isolamento térmico (quer pelo interior, como também pelo exterior),

então tentou-se representar as paredes mais comuns, construídas na ilha da Madeira.

Como base de estudo, e de forma a poder comparar os comportamentos térmicos, analisaram-se os seis tipos de paredes abaixo representadas, como podemos constatar na Figura 18.

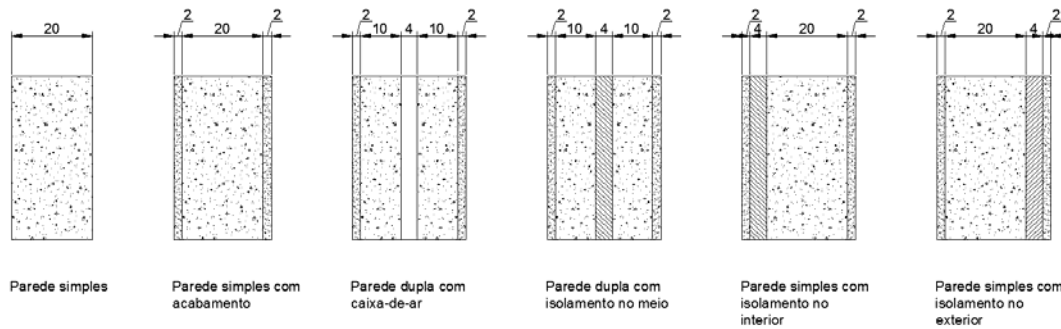


Figura 18 – Representação dos seis tipos de paredes analisadas

Através do modelo matemático criado no MatLab foi possível visualizar diversos parâmetros:

- Evolução das temperaturas nos nodos ao longo de um período considerado;
- Como o modelo desenvolvido se baseou no método explícito das diferenças finitas, pode-se observar a variação da temperatura no interior da parede, resultante da variação horária da temperatura no exterior;
- A energia acumulada no interior da parede durante o período de estudo, entre outros parâmetros.

Para melhor compreender estes parâmetros, serão apresentados alguns gráficos e respectiva descrição.

É importante salientar que as seis paredes analisadas estão sujeitas às mesmas condições de temperatura no exterior, aos mesmos critérios de estabilidade, espaçamentos entre nodos e ao mesmo “Time-step”. Os únicos parâmetros que diferem entre elas são somente a ordem de colocação dos materiais das camadas bem como as suas espessuras.

Note-se que todos os nodos representados nas próximas figuras estão ordenados da esquerda para a direita e com a sua numeração a começar por 1, ou seja, o nodo que está na fronteira com o interior é o nodo número 1 e o nodo na fronteira com o exterior é o nodo n.

É também importante focar que para efeito de cálculo das temperaturas nos nodos foi necessário considerar a distância entre eles (dx nas fatias de continuidade e $dx/2$ para os nodos de fronteira e de mudança de camada). Para exemplificar melhor esta situação tomemos como base a Figura 19.

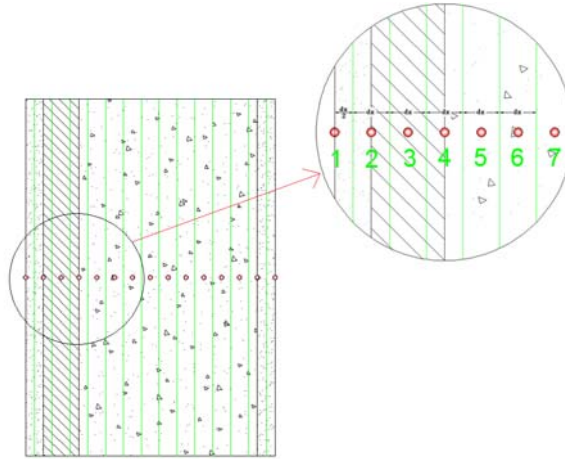


Figura 19 – Pormenor da colocação dos nodos

Para calcular o valor da temperatura no nodo superficial, mais a esquerda (nodo 1), utilizou-se a equação (41) deduzida anteriormente no capítulo 4.3.3, no cálculo da temperatura dos nodos de mudança de material (tomemos como exemplo o nodo 2) tivemos como referência a equação (42) referida no mesmo capítulo, e por fim no caso em que se queiram obter as temperaturas nos nodos interiores (nodo 3 ou nodo 5) foi utilizada a equação (37) que nos dá as temperaturas nesses nodos.

6.1 Parede simples

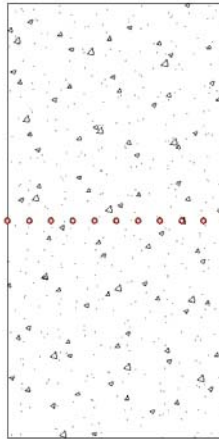


Figura 20 – Parede simples

Analisando os 11 nodos representados na Figura 20 pelo programa criado com base no método explícito das diferenças finitas, obtivemos o seguinte gráfico.

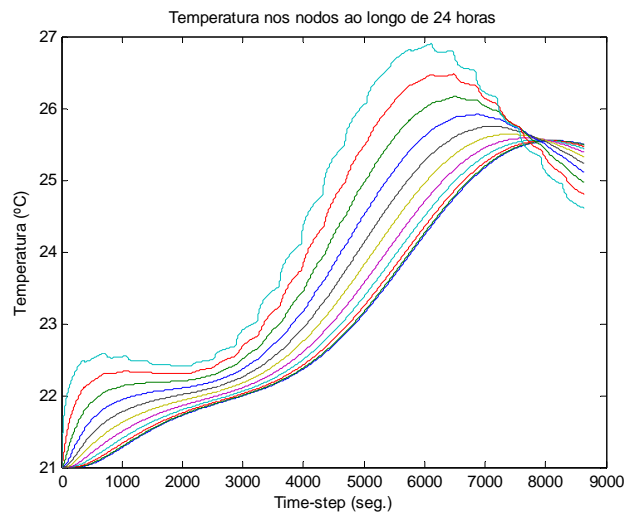


Gráfico 14 – Temperatura nos nodos ao longo de 24 horas (8640 “Time-step”)

As curvas representadas no Gráfico 14 representam a evolução da temperatura nos nodos, sendo que a curva com maior amplitude térmica representa o nó na fronteira com o exterior (nodo 11), e no caso contrário o nó na fronteira com o interior.

Para melhor compreender o resultado obtido pelo Gráfico 14 foi sobreposta a curva da temperatura do ar no exterior, e verifica-se que pelo facto de se estar perante uma parede com uma elevada condutividade térmica e sem isolamento, fez com que a temperatura no interior variasse de forma mais significativa, como se pode observar no Gráfico 15. (ver discussão de resultados) mais à frente.

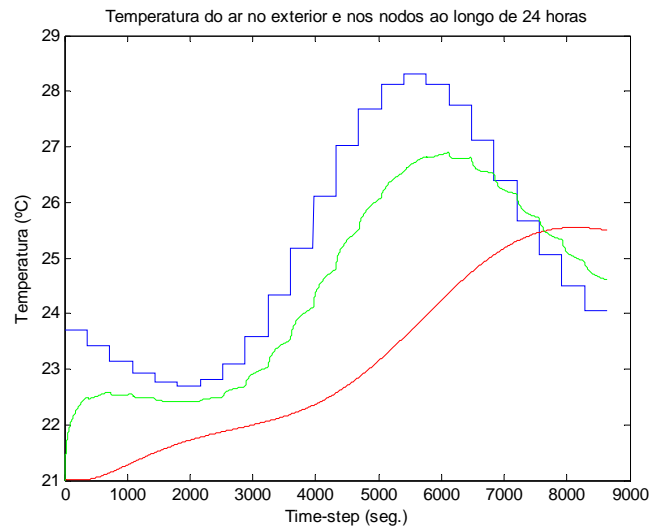


Gráfico 15 – Relação entre a temperatura do ar no exterior e nos nodos de fronteira

Isolando as duas curvas de fronteira com o exterior e com o interior, podem-se obter as amplitudes e o tempo de atraso, bastando apenas traçar algumas rectas nos pontos onde haja mudança de comportamento das temperaturas, comparando dois pontos máximos ou mínimos.

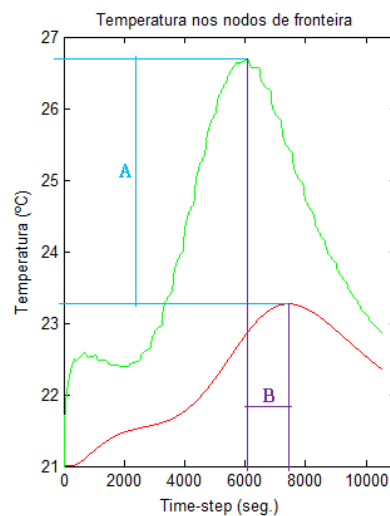


Gráfico 16 – Representação da amplitude térmica e temporal

Note-se que a curva apresentada no Gráfico 16 com cor verde representa a variação da temperatura no nodo de fronteira com a superfície exterior e a curva vermelha é a do nodo de fronteira com o interior. Através destas duas curvas podemos concluir que devido a variação da temperatura no exterior fez-se reflectir no interior com um certo atraso, representado no Gráfico 16 pela letra B, e com uma amplitude térmica causada pela forte ou fraca capacidade de transmissão de calor da parede para o interior ou vice-versa, representado no gráfico pela letra A. Logo a amplitude térmica máxima entre as duas faces da parede é de 3,6 °C e o atraso é obtido traçando duas curvas dos pontos máximos ou mínimos de cada curva e medindo-o em “Time-step”, ou seja, no caso em análise é de cerca de 1400 time-stpe’s, que é cerca de 3,8 horas de atraso.

6.2 Parede simples com acabamento em reboco

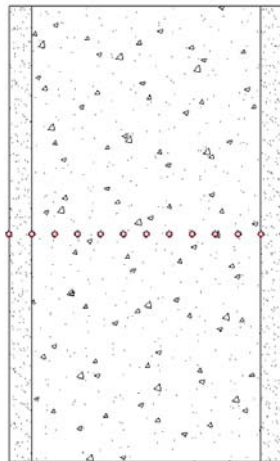


Figura 21 – Parede simples com acabamento

Analisando os 13 nodos representados na Figura 21 pelo programa criado com base no método explícito das diferenças finitas, obtiveram-se as temperaturas nos nodos ao longo de 24 horas (8640 time-step) como se pode observar no Gráfico 17.

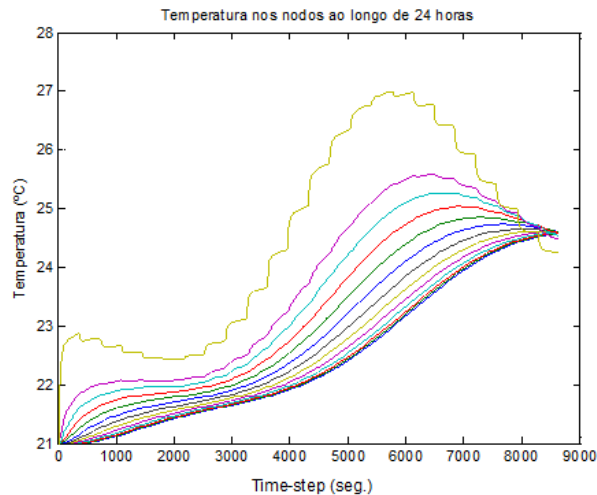


Gráfico 17 – Temperatura nos nodos ao longo de 24 horas (8640 “Time-step”)

As curvas obtidas no Gráfico 17 representam a evolução da temperatura nos nodos, sendo que a curva com maior amplitude térmica representa o nodo na fronteira com o exterior (nodo 13), e a curva com menor amplitude térmica representa a evolução da temperatura no nodo de fronteira com o interior (nodo 1).

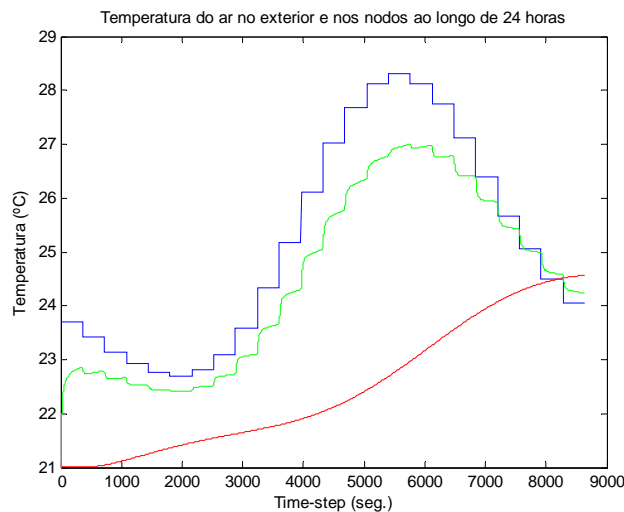


Gráfico 18 – Relação entre a temperatura do ar no exterior e nos nodos de fronteira

É importante salientar as semelhanças entre o Gráfico 14, referente ao estudo do fluxo de calor numa parede simples, com o Gráfico 18, resultante do mesmo estudo

mas em relação a uma parede com revestimento em reboco. Note-se que o primeiro caso em relação ao segundo difere um pouco no resultado das temperaturas no nodo de fronteira com o interior, sendo estas neste segundo caso um pouco inferiores. Mas isso irá ser discutido em mais detalhe um pouco mais à frente.

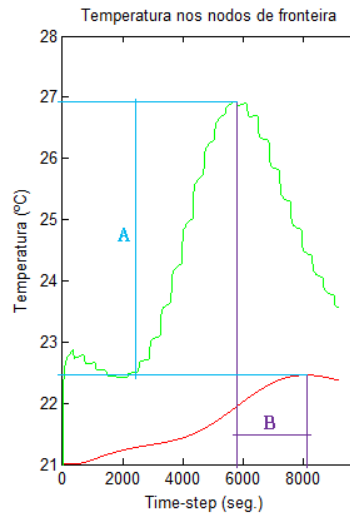


Gráfico 19 – Representação da amplitude térmica e temporal

A amplitude térmica entre as duas faces é de 4,5 °C e o atraso é de aproximadamente 6,4 horas.

6.3 Parede dupla com caixa-de-ar

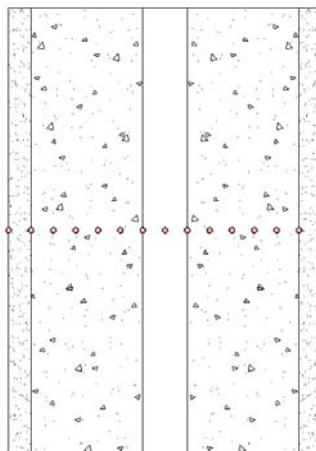


Figura 22 – Parede dupla com caixa-de-ar

Analisando os 15 nodos representados na Figura 22 pelo programa criado com base no método explícito das diferenças finitas, obtiveram-se as temperaturas nos nodos ao longo de 24 horas (8640 time-step) como se pode observar no Gráfico 20.

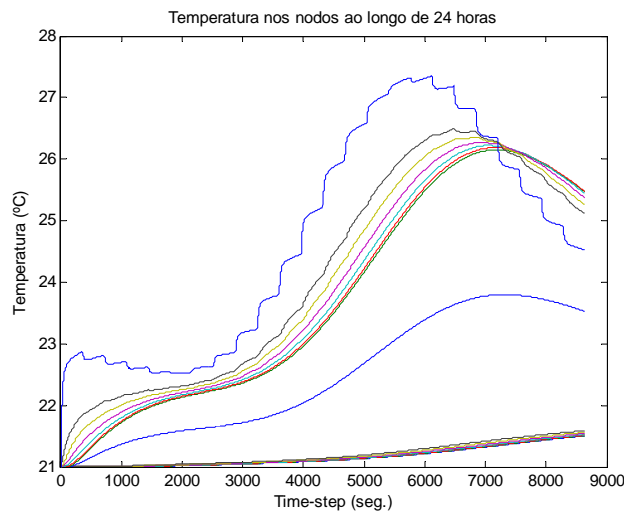


Gráfico 20 – Temperatura nos nodos ao longo de 24 horas (8640 “Time-step”)

As curvas obtidas no Gráfico 20 representam a evolução da temperatura nos nodos, sendo que a curva com maior amplitude térmica representa o nodo na fronteira com o exterior (nodo 15), e a curva com menor amplitude térmica representa a evolução da temperatura no nodo de fronteira com o interior (nodo 1).

Através do gráfico pode concluir-se que a existência de uma caixa-de-ar no interior da parede, faz com que as temperaturas nos nodos das camadas voltadas para o interior não tenham uma variação térmica muito grande ao longo das 24 horas de estudo do comportamento térmico. E o contrário é verificado nos nodos das camadas voltadas para o exterior, onde se verifica que a amplitude térmica já é, de certa forma, significativa. Este desfasamento pode ser observado no gráfico (espaço entre as curvas superiores e as inferiores).

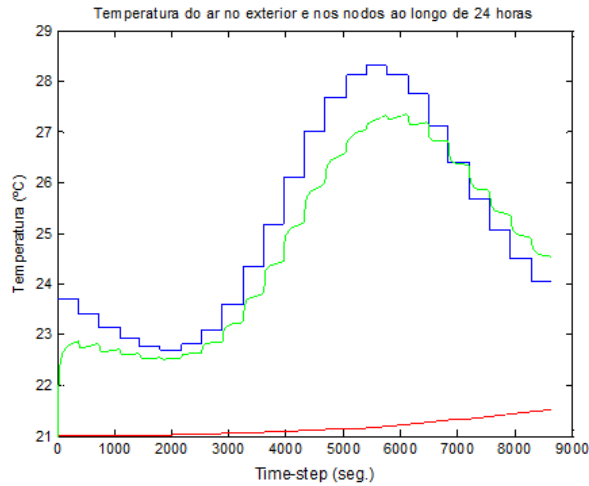


Gráfico 21 – Relação entre a temperatura do ar no exterior e nos nodos de fronteira

Efectuando já uma breve comparação com os gráficos anteriormente apresentados é evidente uma diferença no comportamento da curva que simboliza a variação da temperatura no nodo de fronteira com o interior.

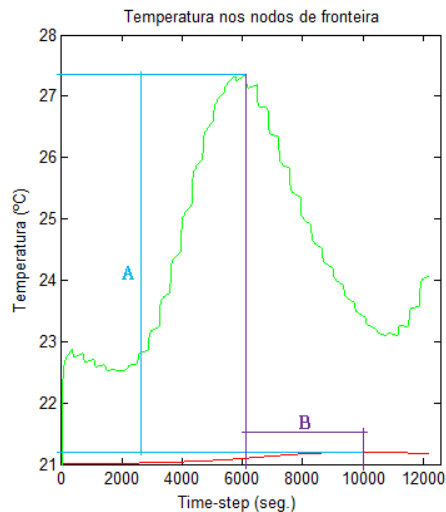


Gráfico 22 – Representação da amplitude térmica e temporal

No Gráfico 22 já é possível verificar uma amplitude térmica entre as duas superfícies de fronteira muito elevada, cerca de 6,1 °C. No que toca ao atraso verificado entre a progressão do fluxo de calor entre o exterior e o interior, o seu valor ronda as 10,8 horas.

6.4 Parede dupla com isolamento pelo meio

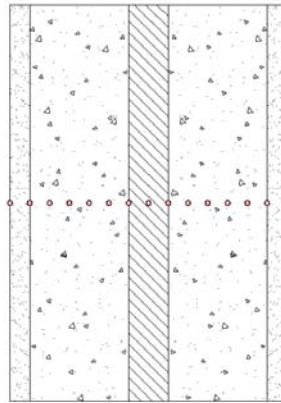


Figura 23 – Parede dupla com isolamento pelo meio

Analisando os 15 nodos representados na Figura 23 pelo programa criado com base no método explícito das diferenças finitas, obtiveram-se as temperaturas nos nodos ao longo de 24 horas (8640 time-step) como pode observar-se no Gráfico 23.

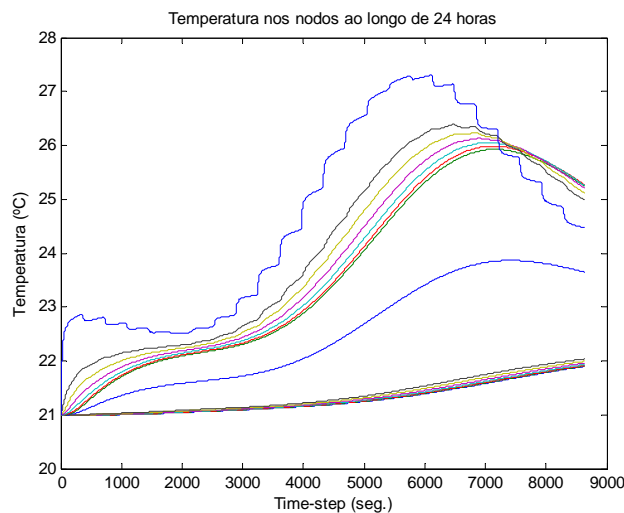


Gráfico 23 – Temperatura nos nodos ao longo de 24 horas (8640 “Time-step”)

As curvas obtidas no Gráfico 23 representam a evolução da temperatura nos nodos, sendo que a curva com maior amplitude térmica representa o nó na fronteira com o exterior (nó 15), e a curva com menor amplitude térmica

representa a evolução da temperatura no nodo de fronteira com o interior (nodo 1).

É importante realçar que este comportamento é idêntico ao da parede com caixa-de-ar, pois as características físicas da caixa-de-ar e da camada de isolamento não variam em muito no seu valor. O coeficiente global de transmissão de calor do ar e do isolamento considerado são 0,02 e 0,04 W/m.K respectivamente. No que toca ao coeficiente da densidade dos materiais considerados são 35 kg/m³ para o isolamento considerado e 1,2 kg/m³ para o ar. Recorde-se que o espaço criado para a caixa-de-ar foi considerada como sendo não ventilada. Por fim, o calor específico do isolamento é de 1220 J/kg.K e para o ar é de 1004 J/kg.K.

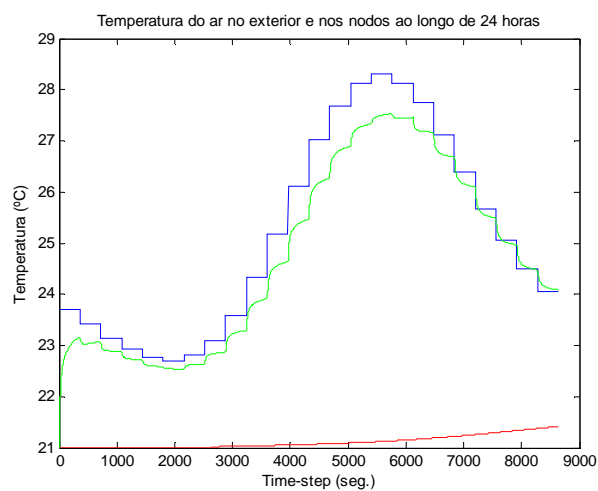


Gráfico 24 – Relação entre a temperatura do ar no exterior e nos nodos de fronteira

Em semelhança com a parede com caixa-de-ar, esta também tem uma grande diferença de comportamento em relação às temperaturas de fronteira.

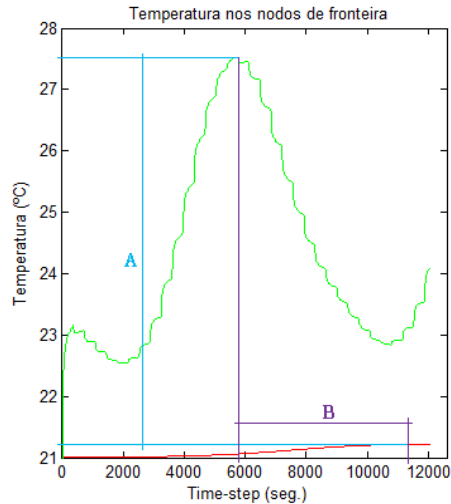


Gráfico 25 – Representação da amplitude térmica e temporal

No Gráfico 25 pode verificar-se que a amplitude térmica entre as duas superfícies de fronteira também é muito elevada, cerca de 6,2 °C, e em relação ao atraso verificado entre a progressão do fluxo de calor entre o exterior e o interior, o seu valor aproxima-se das 11 horas.

6.5 Parede simples com isolamento no interior

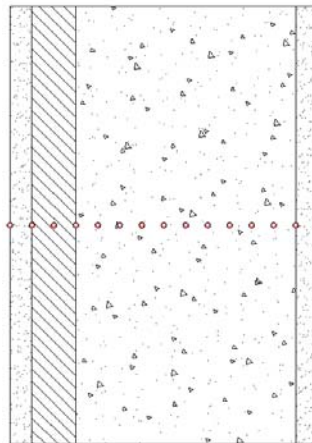


Figura 24 – Parede simples com isolamento pelo interior

Analisando os 15 nodos representados na Figura 24 pelo programa criado com base no método explícito das diferenças finitas, obtiveram-se as temperaturas nos nodos ao longo de 24 horas (8640 time-step) como se pode observar no Gráfico 26.

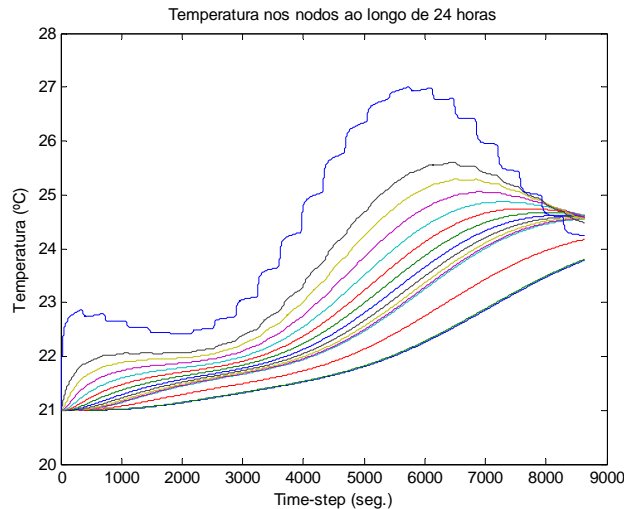


Gráfico 26 – Temperatura nos nodos ao longo de 24 horas (8640 “Time-step”)

As curvas obtidas no Gráfico 26 representam a evolução da temperatura nos nodos, sendo que a curva com maior amplitude térmica representa o nodo na fronteira com o exterior (nodo 15), e a curva com menor amplitude térmica representa a evolução da temperatura no nodo de fronteira com o interior (nodo 1).

Através deste gráfico é possível concluir que a aplicação do isolamento pelo interior da parede não traz muitas vantagens. Mas quando o espaço a isolar não tiver uma utilização muito acentuada e de longa duração, este tipo de aplicação de isolamento pelo interior pode já ser o mais indicado, pois requer um menor tempo para torná-lo num espaço mais confortável em termos térmicos. Como a inércia térmica deste tipo de parede é muito baixa implica menos tempo para aquecimento do espaço, ou seja, devido ao tipo de material e à espessura da camada que vai desde o isolamento até ao interior do compartimento ser muito menor em relação à do lado oposto. A absorção do calor por condução será muito mais rápida, até atingir uma temperatura ambiente mais confortável (no interior do espaço utilizado).

A solução de se aplicar o isolamento térmico pelo interior apresenta a vantagem adicional de não ser necessária a instalação de andaimes para a colocação do material, sendo este aplicado pelo interior entre os pisos do edifício. A nível da resolução das pontes térmicas implica a colocação de uma camada de isolamento na zona das lajes pelo exterior de forma a reduzir o fluxo de calor libertado para o exterior nestas zonas.

Quando se realiza o isolamento térmico de edifícios de ocupação parcial em que o aquecimento não se processa de modo contínuo, o tratamento térmico das paredes pelo interior torna-se numa solução interessante por que, não havendo a

dissipação de calor pela massa das paredes, consegue-se um aquecimento mais rápido do espaço interior. Esta solução construtiva é adequada sempre que não houver um revestimento exterior impermeável ao vapor de água, de modo a que, a água de condensação existente nas paredes da habitação possa evaporar-se para o exterior. O paramento exterior da parede deve ser hidrofugado com produtos silicónicos, que impedem a penetração de água por capilaridade, mantendo-as no entanto permeáveis ao vapor. [25]

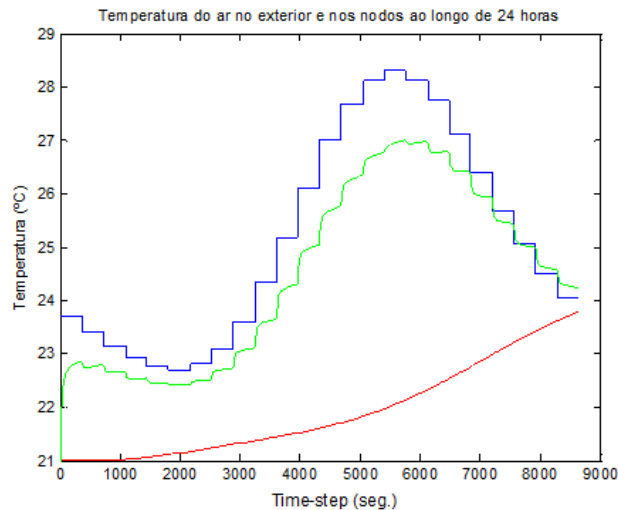


Gráfico 27 – Relação entre a temperatura do ar no exterior e nos nodos de fronteira

Comparando somente as curvas da evolução das temperaturas nos nodos de fronteira é possível verificar que as temperaturas do nodo interior levam um certo tempo a reflectir a variação imposta no exterior, e isto deve-se ao facto de se ter dado um valor inicial das temperaturas nos nodos constituintes da parede. De forma a obter um valor máximo da temperatura no nodo de fronteira com o interior foi necessário aumentar o tempo de análise das temperaturas, o que pode ser observado no Gráfico 28.

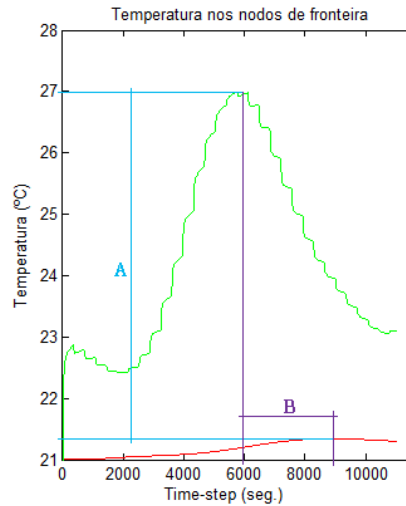


Gráfico 28 – Representação da amplitude térmica e temporal

A amplitude térmica entre as duas superfícies de fronteira é de 5,6 °C aproximadamente, e em relação ao atraso verificado entre a progressão do fluxo de calor entre o exterior e o interior, o seu valor aproxima-se das 8,3 horas.

6.6 Parede simples com isolamento no exterior

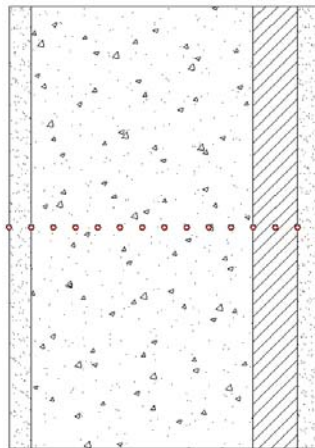


Figura 25 – Parede simples com isolamento pelo exterior

Analisando os 15 nodos representados na Figura 25 pelo programa criado com base no método explícito das diferenças finitas, obtiveram-se as temperaturas nos nodos ao longo de 24 horas (8640 time-step) como se pode observar no Gráfico 29.

Ao contrário das paredes com isolamento pelo interior, estas têm uma capacidade de armazenamento muito grande, ou seja, são paredes com uma elevada inércia térmica. Uma vez armazenada a temperatura média ambiental, a interacção de um elemento de construção maciço com o clima interior é muito positiva, porque, quando não é obstruída, irradia continuamente para os espaços interiores a mesma temperatura média que armazenou. Para o exterior é essencial que se minimizem as perdas térmicas, pelo que é importante conjugar a inércia térmica com o isolamento térmico, idealmente aplicado de forma contínua e pelo exterior. [27]

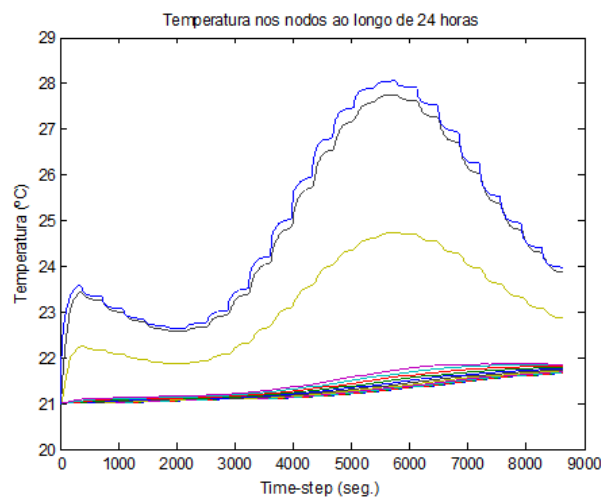


Gráfico 29 – Temperatura nos nodos ao longo de 24 horas (8640 “Time-step”)

As curvas obtidas no Gráfico 29 representam a evolução da temperatura nos nodos, sendo que a curva com maior amplitude térmica representa o nodo na fronteira com o exterior (nodo 15), e a curva com menor amplitude térmica representa a evolução da temperatura no nodo de fronteira com o interior (nodo 1).

Ao tratar termicamente uma parede simples e havendo a possibilidade de opção entre o isolamento pelo exterior ou pelo interior, a primeira apresenta vantagens sobre a segunda que tornam preferível essa opção, na generalidade dos casos.

Duas das principais vantagens são o melhor partido que se tira da inércia térmica das paredes e a continuidade que se consegue com a camada isolante aplicada pelo exterior.

Um exemplo que ilustra bem a vantagem de se isolar termicamente as paredes pelo exterior é que, com este procedimento consegue-se deixar no seu interior uma grande massa de material de construção que absorve o calor que se fornece à habitação, que permite interromper o funcionamento da instalação de aquecimento, deixando a temperatura do ambiente interior descer lentamente, devido ao calor que irradia das paredes que actuam com acumuladores térmicos. É para tirar partido deste comportamento térmico que se desligam e ligam equipamentos de climatização com avanço/atraso em relação aos períodos reais em que existe necessidade de aquecimento/arrefecimento.

Como outras vantagens, eliminam-se as condensações internas, o problema das pontes térmicas é quase na totalidade resolvido, mantêm-se as dimensões dos espaços interiores, e aumenta-se a estanquicidade à infiltração da humidade proveniente do exterior.

Como inconvenientes, apresentam o maior risco de degradação por vandalismo e por exposição directa às intempéries. Existem maiores cuidados de aplicação no tratamento de alguns pontos singulares das fachadas, nomeadamente em remates com vãos abertos e zonas angulares das paredes.

Relativamente à aplicação do isolamento pelo exterior este apresenta-se como solução ideal em obras de reabilitação térmica da envolvente exterior dos edifícios, quando seja possível a sua aplicação.

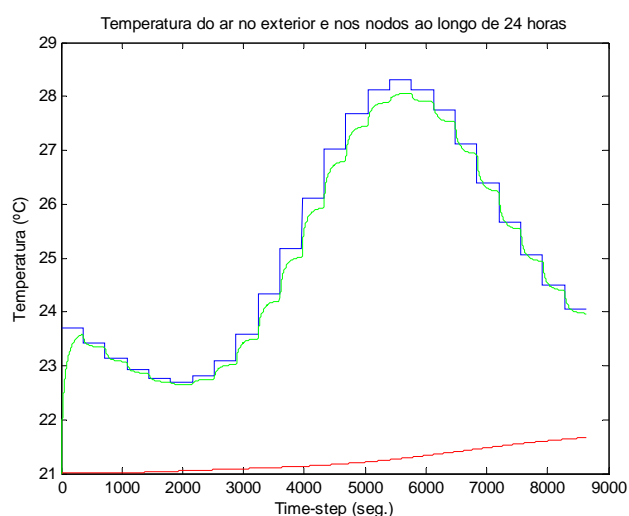


Gráfico 30 – Relação entre a temperatura do ar no exterior e nos nodos de fronteira

Isolando as duas curvas das faces superficiais, onde estão aplicados os dois nodos em contacto com o ar, sujeitos à transmissão de calor por condução e por convecção, podem-se retirar os valores da amplitude e do atraso de resposta, como podemos observar no Gráfico 31.

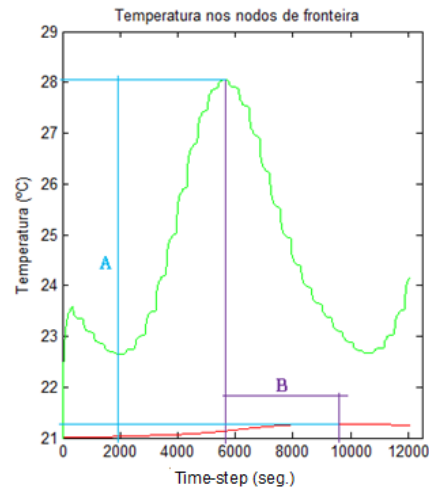


Gráfico 31 – Representação da amplitude térmica e temporal

Através do Gráfico 31 pode-se concluir que a amplitude térmica máxima obtida durante a análise efectuada foi de 6,8 °C e o tempo que esse valor máximo da temperatura no nodo da superfície exterior no interior é de 11,3 horas.

Ao aplicar o isolamento térmico pelo exterior faz com que se obtenham algumas vantagens importantes, entre os quais se destacam:

- É conseguida a eliminação de todas as pontes térmicas, que causam o aparecimento de condensações e, conseqüentemente, de fungos em paredes interiores (ou em compartimentos fechados), devendo, tanto o projecto como a execução, garantir a continuidade efectiva do isolamento térmico;
- É improvável uma má execução, ou seja, “esquecer” a colocação de placas, como tão frequentemente acontece quando o isolamento térmico se encontra escondido entre dois panos de tijolo (parede dupla), uma vez que todo o isolamento térmico aplicado pelo exterior permanece visível durante a sua aplicação em obra, facilitando a sua fiscalização;
- A estrutura do edifício e todos os materiais pesados que compõem a envolvente são protegidos dos contrastes e extremos de temperatura e das intempéries. Esta protecção garante uma maior longevidade e a integridade física dos materiais

fundamentais, porque, desta forma, não sofrem nem a fendilhação nem as microfissuras típicas em toda a construção tradicional. Evita-se, assim, que estas microfissuras absorvam água por acção capilar, água que deteriora os materiais, sobretudo os metais;

- O isolamento térmico, aplicado de forma contínua e pelo exterior, faz com que a inércia térmica (dos materiais pesados utilizados na construção) funcione a favor do clima interior, contribuindo para que as temperaturas no edifício se mantenham estáveis e dentro das amplitudes térmicas médias do clima mediterrânico. Este comportamento resulta do facto das envolventes (paredes exteriores) não permanecerem em contacto directo com o exterior, estabilizando as temperaturas no seu valor médio. Com ambas as medidas (o isolamento térmico aplicado de forma contínua pelo exterior e a inércia térmica), os extremos do clima mediterrânico não afectam o equilíbrio térmico no interior do edifício;

- Estes sistemas de isolamento térmico pelo exterior podem ser igualmente aplicados na reabilitação de edifícios não isolados ou com insuficiente isolamento térmico. Sendo o sistema aplicado pelo exterior, é apenas necessário garantir que o mesmo adira permanentemente à superfície exterior existente e cuidar dos pormenores construtivos em volta de vãos;

- O aspecto com que ficará poderá ser aquele que se desejar – com acabamento em reboco pintado (em qualquer cor), de revestimento em pedra (colada ou fixada mecanicamente). [20]

6.7 Cálculo do risco de condensação

Neste capítulo será feita uma breve descrição do comportamento das variáveis em estudo, em cada caso, bem como uma avaliação do risco de condensação.

Dados do problema:

- Temperaturas do ar:
 - Interior = 21 °C
 - Exterior = 15 °C
- Humidade relativa do ar:
 - Interior = 80 %
 - Exterior = 90 %
- Coeficiente de transmissão térmica de calor por convecção:
 - Interior = 8 W/m².K
 - Caixa-de-ar = 9 W/m².K
 - Exterior = 25 W/m².K
- Coeficiente de transmissão térmica por condução:
 - Reboco = 0,40 W/m.K
 - Betão = 1,40 W/m.K
 - Isolamento = 0,04 W/m.K
- Espessuras:
 - Reboco → dx = 0,02 m
 - Betão → dx = 0,10 m, ou, dx = 0,20 m
 - Isolamento → dx = 0,04 m
 - Caixa-de-ar → dx = 0,05 m

Valores constantes:

- $K^* = 2,50 \times 10^{-11} \text{ kgmN}^{-1}\text{s}^{-1}$

Dados para calcular:

- ✓ Resistência total da parede;
- ✓ Coeficiente global de transmissão de calor;
- ✓ Fluxo de calor;
- ✓ Taxa do fluxo de vapor de água.

Após estes dados e tendo efectuados todos os cálculos (folha de cálculo), pôde-se obter alguns resultados determinantes para a compreensão da possibilidade de ocorrência de condensação nas seguintes paredes.

6.7.1 Parede dupla com isolamento e caixa-de-ar

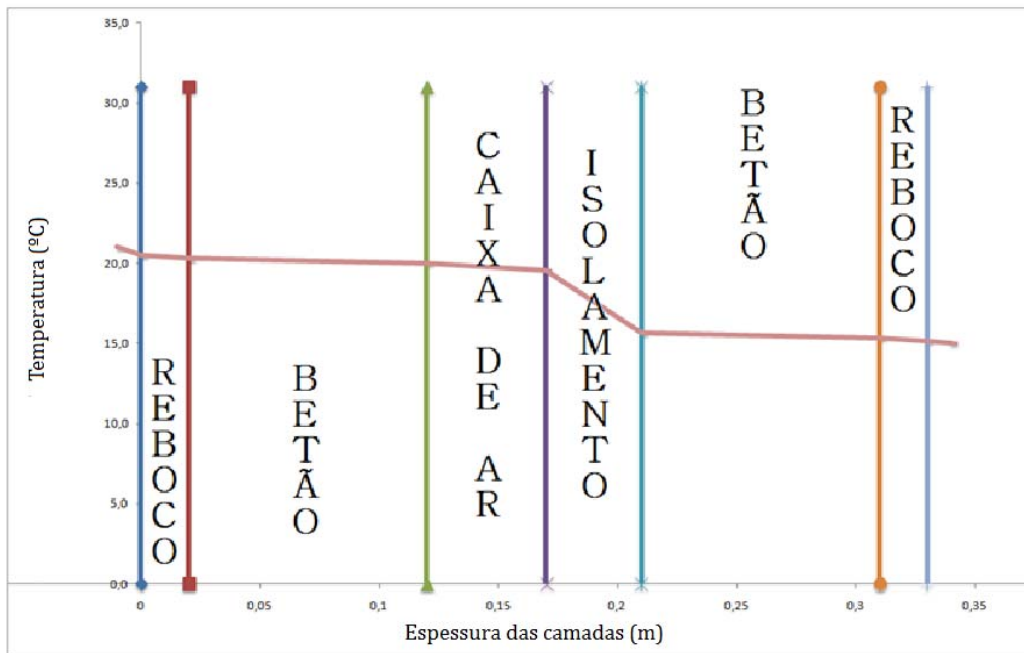


Gráfico 32 – Evolução da temperatura ao longo da parede dupla com isolamento e caixa-de-ar

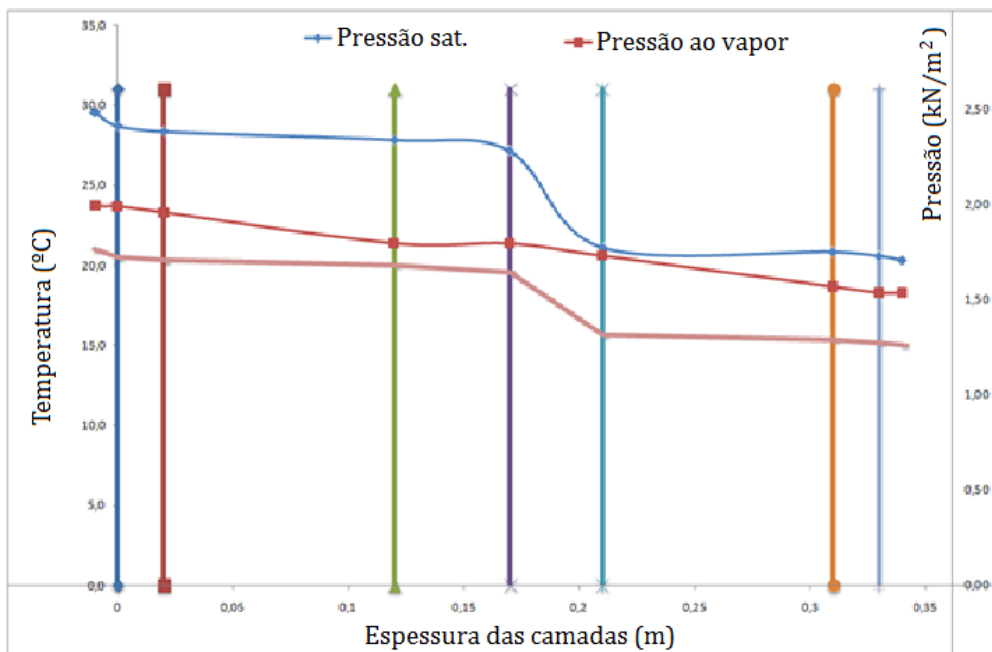


Gráfico 33 – Pressão de saturação versus pressão de vapor, ao longo da parede dupla com isolamento e caixa-de-ar

6.7.2 Parede dupla com isolamento pelo meio

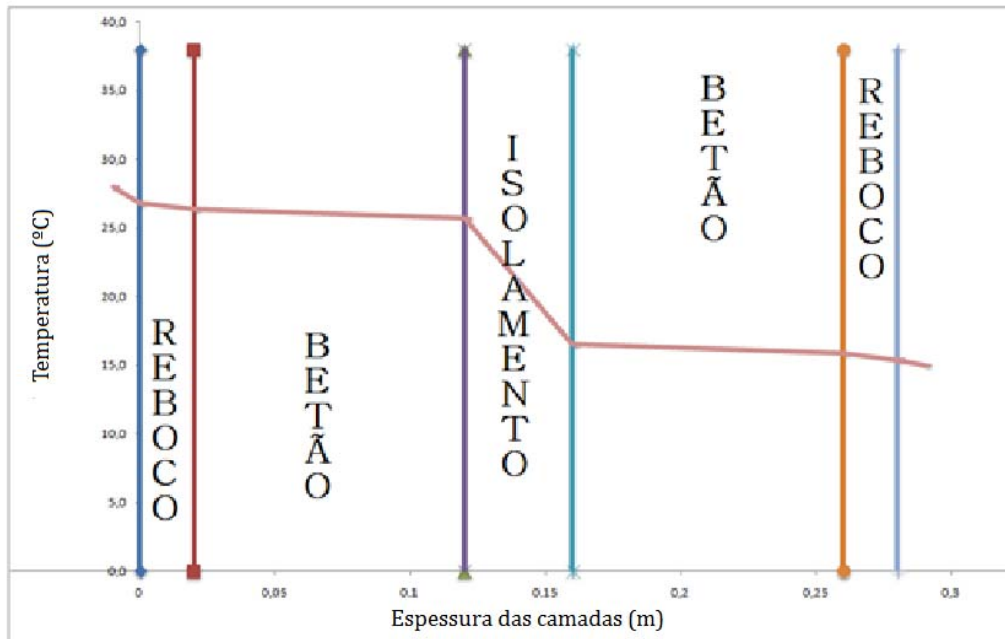


Gráfico 34 – Evolução da temperatura ao longo da parede dupla com isolamento pelo meio

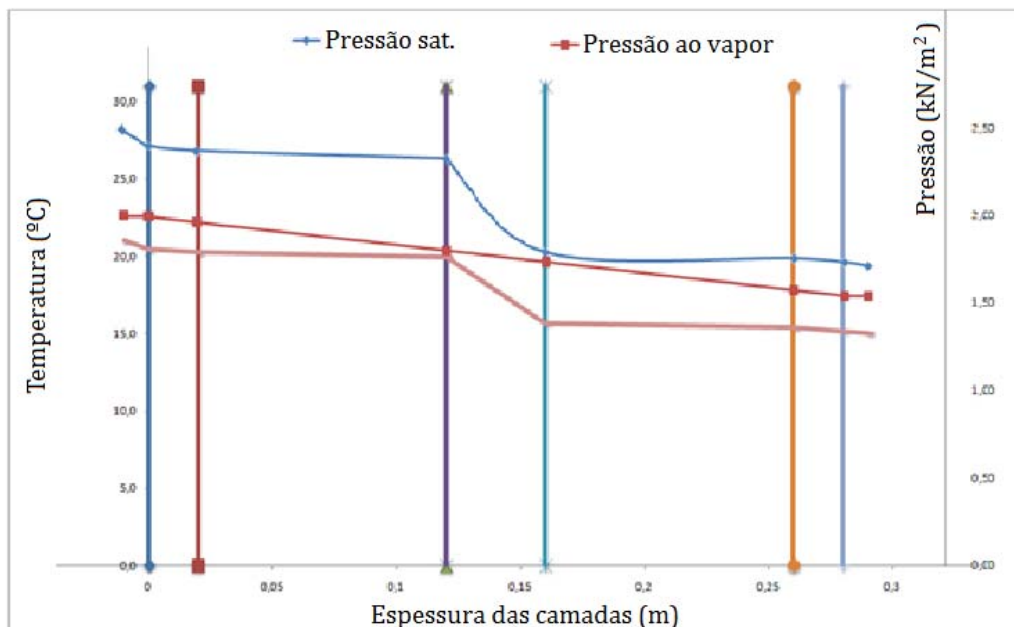


Gráfico 35 – Pressão de saturação versus pressão de vapor, ao longo da parede dupla com isolamento pelo meio

6.7.3 Parede simples com isolamento pelo exterior

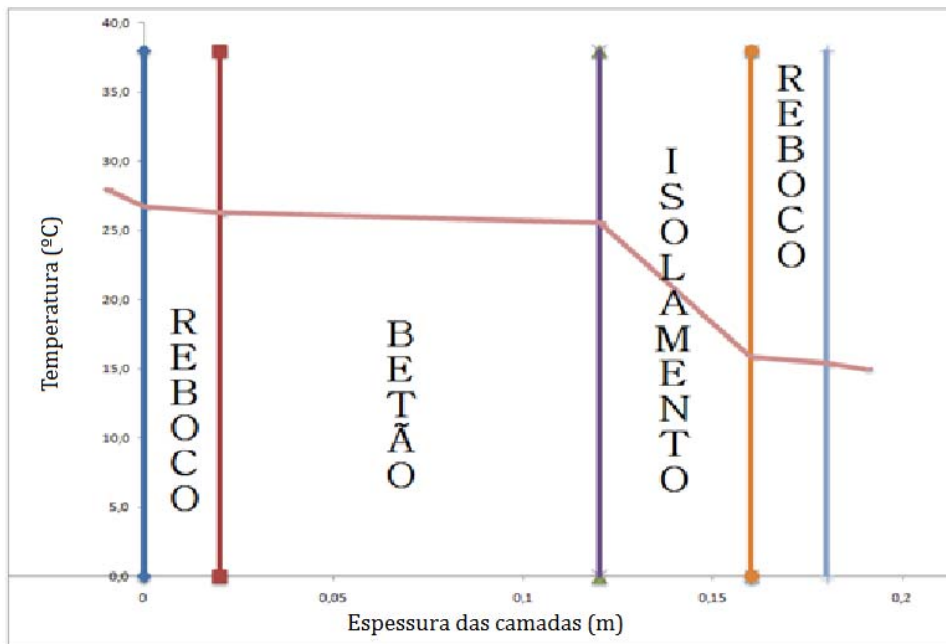


Gráfico 36 – Evolução da temperatura ao longo da parede simples com isolamento pelo exterior

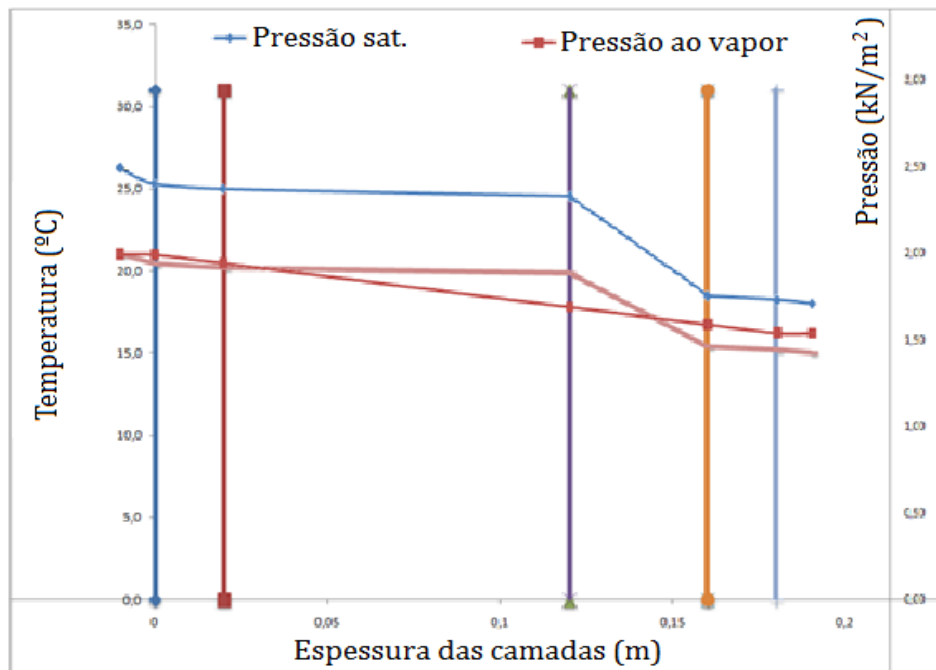


Gráfico 37 – Pressão de saturação versus pressão de vapor, ao longo da parede simples com isolamento pelo exterior

6.7.4 Parede simples com isolamento pelo interior

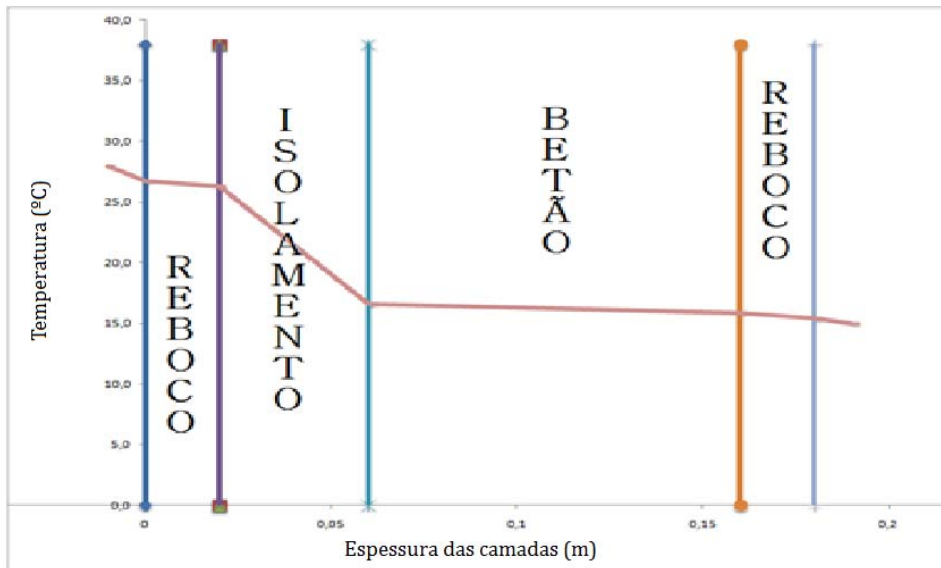


Gráfico 38 – Evolução da temperatura ao longo da parede simples com isolamento pelo interior

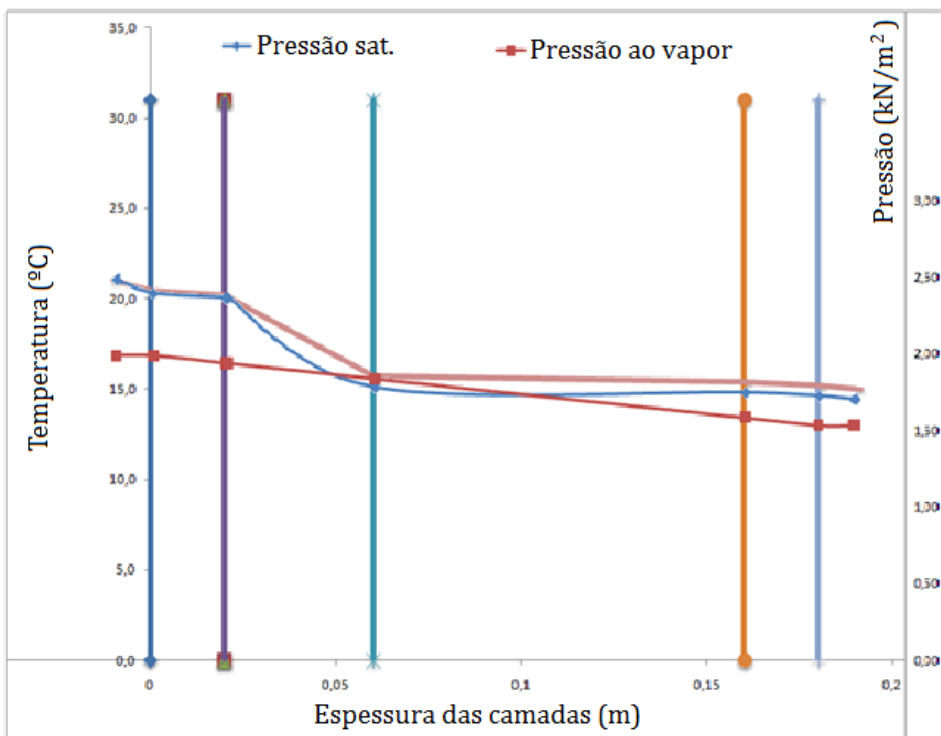


Gráfico 39 – Pressão de saturação versus pressão de vapor, ao longo da parede simples com isolamento pelo interior

Note-se que na análise efectuada às quatro paredes anteriores, foram tidas sempre como referência os mesmos valores para a obtenção dos resultados representados nos Gráficos (33, 35, 37 e 39) onde estão explícitas as curvas representativas da pressão de saturação, pressão de vapor e da evolução da temperatura no interior das respectivas paredes.

7 Discussão de resultados

Reunindo os resultados obtidos nos gráficos anteriores, estão representados no Quadro 10 os valores externos das temperaturas nos nodos de fronteira em termos das temperaturas externas e de amplitude térmica de cada solução.

Quadro 10 – Resumo dos valores da amplitude e do tempo de resposta

Tipo de parede	Espessura total (m)	Amplitude térmica (°C)	Tempo de resposta (horas)
Simplex	0,20	3,6	3,8
Com reboco	0,24	4,5	6,4
Caixa-de-ar	0,28	6,1	10,8
Isol. pelo meio	0,28	6,2	11,0
Isol. pelo interior	0,28	5,6	8,3
Isol. pelo exterior	0,28	6,8	11,3

Como podemos constatar no Quadro 10, a parede com maior amplitude térmica foi a parede com isolamento pelo exterior, ou seja, foi esta que levou a um melhor comportamento térmico no interior do compartimento.

Há que salientar que quanto menor for a amplitude térmica maior será a variação da temperatura no interior do espaço analisado, o que vai requerer maiores gastos em termos energéticos para manter uma temperatura de conforto mais estável, gastos estes que advêm do aquecimento ou arrefecimento com recurso a mecanismos consumidores de energia.

A amplitude térmica foi calculada, como já foi referido anteriormente, pela diferença entre a temperatura máxima da face exterior da parede com a do interior.

No que refere ao tempo de resposta ou atraso, quanto menor for o seu valor, maior será o reflexo da temperatura do exterior no compartimento, o que fará com que se altere de forma um pouco mais rápida as condições de conforto no interior dos espaço em análise.

Para melhor compreender estes valores, foram colocadas todas as temperaturas do ar no interior num só gráfico, (40), para mais facilmente observar as diferenças de variação da temperatura do ar no interior.

- ✓ Parede simples – curva amarela;
- ✓ Parede com acabamento em reboco – curva rosa;
- ✓ Parede com isolamento pelo interior – curva azul;
- ✓ Parede com isolamento pelo exterior – curva vermelha;
- ✓ Parede com caixa-de-ar – curva preta;
- ✓ Parede com isolamento pelo meio – curva verde.

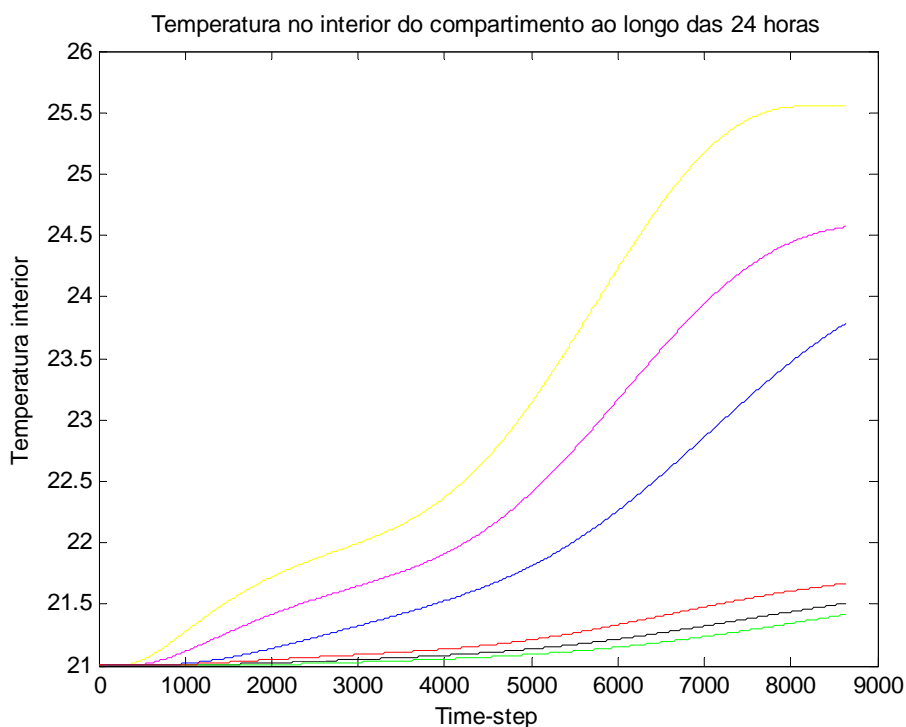


Gráfico 40 – Temperatura do ar no interior do compartimento em análise

Como conclusão podemos observar que as três curvas (amarela, rosa e azul) são paredes com uma condutibilidade térmica elevada. Note-se que quando se fala de condução de calor, esta pode ocorrer quer do interior para o exterior ou vice-versa, varia conforme a variação de temperatura do ar no exterior. Numa habitação com as paredes em contacto com o exterior, com estas características, requerem sistemas de arrefecimento e/ou aquecimento artificial, o que faz com que estas não sejam economicamente vantajosas em termos energéticos.

Aplicando o programa feito no MatLab aos seis tipos de paredes indicadas na Figura 20, pôde-se constatar, que a temperatura do ar no interior do compartimento em análise varia consoante o tipo de material, espessura e sequência da sua aplicação.

É importante salientar que para o resultado obtido não foram tidos em conta valores de temperaturas exteriores com uma amplitude muito significativa, o que faz com que estes valores obtidos já sejam considerados elevados.

No que se refere às outras três curvas (vermelha, preta e verde), uma das poucas desvantagens tem a ver com o seu custo de construção ser mais elevada, mas que trará benefícios a médio prazo com o baixo custo da tarifa energética.

Uma outra análise efectuada neste trabalho, prende-se com a quantificação da energia acumulada no interior das paredes, mas antes deve citar-se o que está escrito no RCCTE: [3]

“Se estes elementos (elemento da envolvente exterior, elemento de construção em contacto com outra fracção autónoma ou com espaços não úteis) não possuem isolamento térmico, contabiliza-se metade da sua massa total (m_t): $M_{si} = m_t/2$.

No entanto, se existir um isolamento térmico (material de condutividade térmica inferior a $0.065 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, com uma espessura que conduza a uma resistência térmica superior a $0.30 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$), considera-se somente a massa situada do lado interior do isolamento térmico (m_i): $M_{si} = m_i$.

Os valores de M_{si} nunca podem ser superiores a 150 kg/m^2 .”

Na análise da acumulação de energia, comparou-se somente os dois casos mais encontrados na construção da região autónoma da Madeira, que foram, a parede com isolamento térmico pelo interior e a parede com isolamento térmico pelo exterior.

Exemplo de onde ocorrerá acumulação de energia numa parede com isolamento pelo exterior.

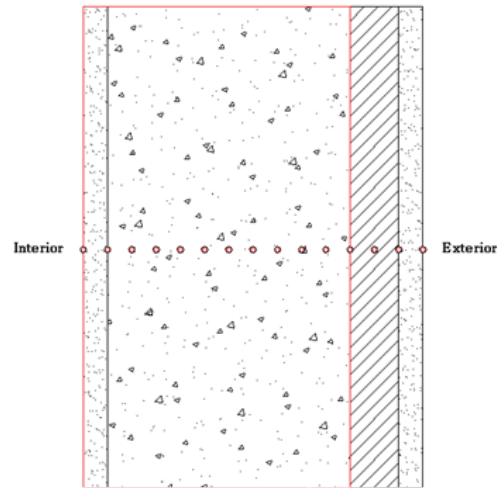


Figura 26 – Energia acumulada – Isolamento pelo exterior

Exemplo de onde ocorrerá acumulação de energia numa parede com isolamento pelo interior.

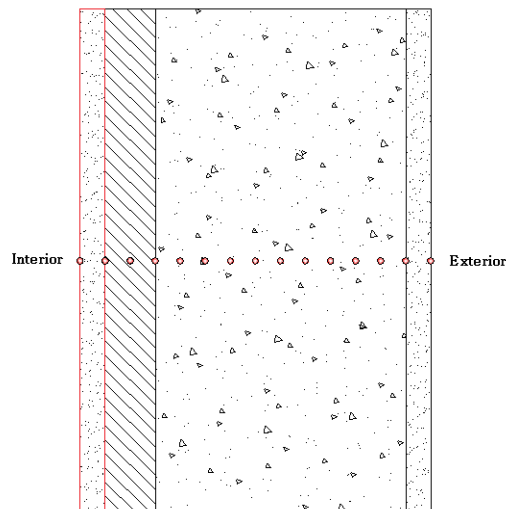


Figura 27 – Energia acumulada – Isolamento pelo interior

De modo a calcular o valor da energia acumulada no interior das paredes, em que segundo o RCCTE só ocorrerá desde a camada de isolamento até a superfície interior da parede, foi tido em conta a equação da conservação da energia.

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st}$$

Sabendo que a transmissão de energia para os nodos ocorre por convecção (espaços de ar) ou por condução, e sabendo que as temperaturas calculadas para cada nodo tiveram em conta o modo como ocorreu essa transmissão, então a energia acumulada só depende da temperatura no nodo em análise

$$E_{st} = \rho C_p dx dy dz \frac{\partial T}{\partial t}$$

Note-se que a energia acumulada nos nodos foi calculada tendo sempre em conta a camada onde ocorre o fluxo de calor, ou seja, se o nodo encontra-se:

- No interior da camada - $E_{st} = \rho C_p dx \frac{T_{nodo}^{p+1} - T_{nodo}^p}{dt}$;

- Na fronteira com o interior - $E_{st} = \rho C_p \frac{dx}{2} \frac{T_{nodo}^{p+1} - T_{nodo}^p}{dt}$;

- Na mudança de camada - $E_{st} = \rho_A C_{pA} \frac{dx}{2} \frac{T_{nodo}^{p+1} - T_{nodo}^p}{dt} + \rho_B C_{pB} \frac{dx}{2} \frac{T_{nodo}^{p+1} - T_{nodo}^p}{dt}$.

Quadro 11 – Energia acumulada no interior das paredes ao longo das 24 horas

Tipo de parede	Energia acumulada [kJ/s]	Difusividade térmica [W.m ² /J]
Parede com isolamento pelo interior	4,68	4,78×10 ⁻⁰⁷
Parede com isolamento pelo meio	19,14	7,11×10 ⁻⁰⁷
Parede com isolamento pelo exterior	28,71	7,32×10 ⁻⁰⁷

A difusividade térmica (α) é tão ou mais importante para o controle térmico das construções do que a condutividade (k), pois expressa quão rapidamente um corpo se ajusta por inteiro à temperatura de seu redor. Os materiais com baixa difusividade térmica retardam a transferência de variações externas de temperatura para o interior das construções. A comparação de valores de difusividade térmica seria mais significativa se estivessemos a comparar soluções com a mesma espessura. Neste caso pode-se no entanto concluir que a ordem de grandeza é relativamente semelhante e o que difere é, essencialmente, a espessura considerada para a acumulação de calor. Só para valores muito díspares da difusividade térmica se poderia compensar a menor espessura de material com um valor muito baixo desse parâmetro, o que não é o caso nesta situação.

Uma inércia térmica forte efectiva no interior de um edifício, significa menores necessidade de aquecimento e menores necessidade de arrefecimento, o que ficou demonstrado pelas simulações efectuadas às temperaturas no interior de um edifício quando comparado com as temperaturas exteriores, em várias soluções de isolamento.

No que se refere ao risco de condensação no interior das paredes analisadas pode-se verificar que, com os valores de temperatura adoptados, só na parede com isolamento pelo interior é que existe possibilidade de ocorrência da mesma. Isto deve-se ao facto da pressão de saturação ser inferior à de vapor, e esta situação ocorre na ligação entre a camada de isolamento e da camada de betão, como mostra o Gráfico 41.

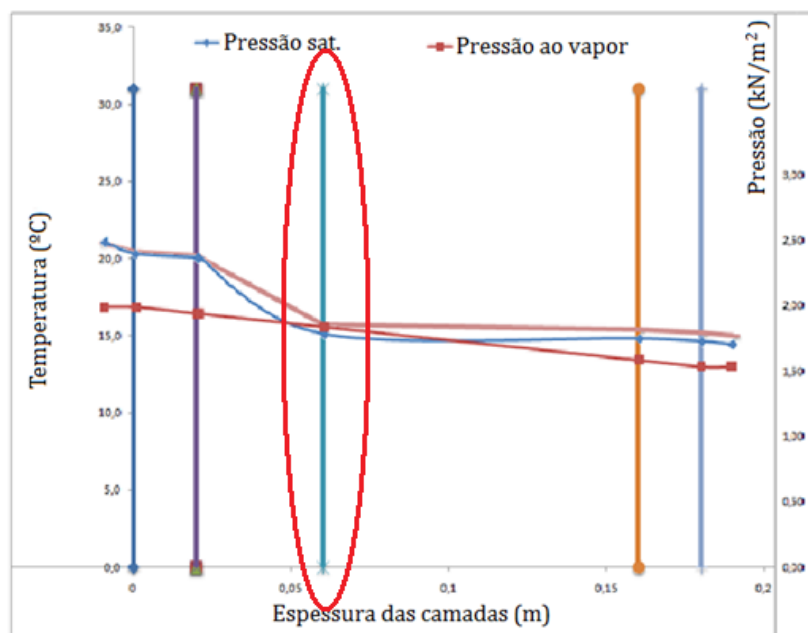


Gráfico 41 – Risco de condensação na parede com isolamento pelo interior

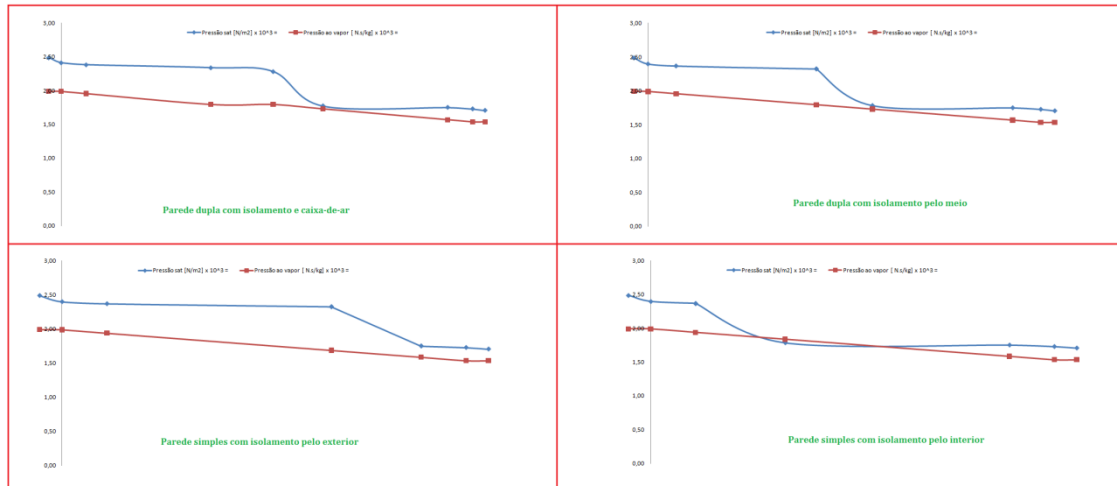


Figura 28 – Variação da pressão de saturação e de vapor com a temperatura exterior a 15°C e no interior a 21°C, nos quatro casos

De notar que a solução de isolamento pelo interior se revela a mais inapropriada, no que respeita a este risco de condensação, sendo a única onde esse risco está presente quando a temperatura no exterior se assumiu ser de 15 °C e no interior ser de 21 °C. Este facto está, obviamente, directamente ligado às espessuras e respectivos valores de condutibilidade térmica utilizados nesta solução que não consegue evitar o abaixamento de temperaturas no interior da parede a níveis abaixo da pressão de saturação

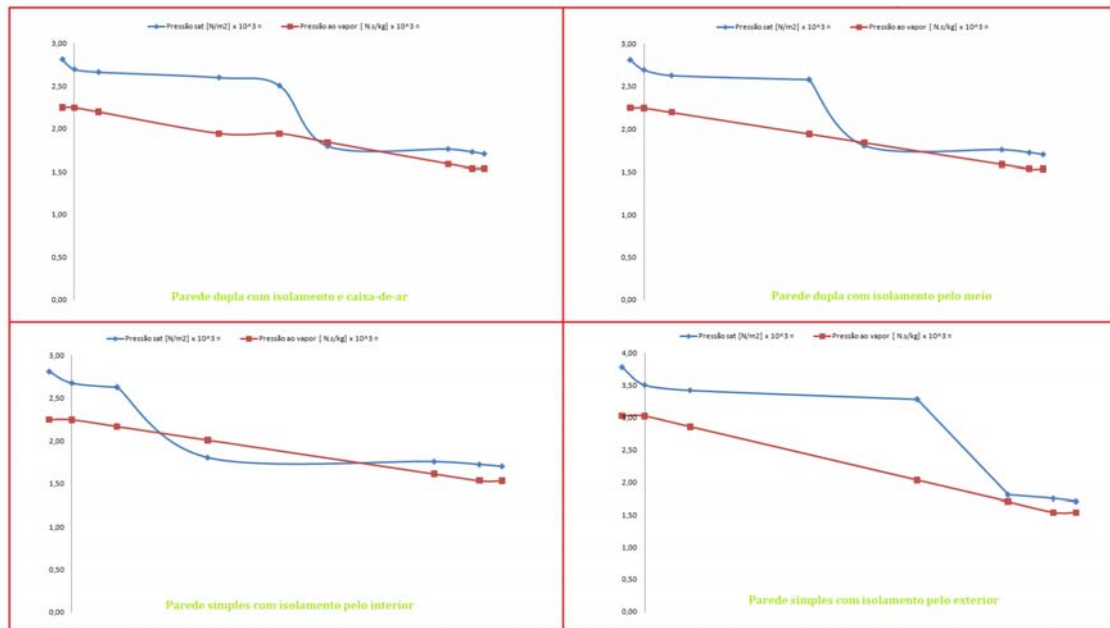


Figura 29 – Variação da pressão de saturação e de vapor com a temperatura exterior a 15°C e no interior a 23°C, nos quatro casos

É importante salientar, pelo facto de se alterar a temperatura no interior das divisões em dois graus célsius, três das quatro paredes representadas na Figura 29 passam a estar em risco de ocorrência de condensação no seu interior. A única parede em que esse risco não ocorre é a que tem aplicado o isolamento pelo exterior. Note-se que a amplitude térmica entre o interior e o exterior para que ocorra risco de condensação na parede com isolamento pelo exterior terá que ser superior a 20°C.

Esta constatação vem de encontro a outras vantagens encontradas para a solução construtiva de isolamento pelo exterior, que, não só se apresenta como vantajosa em relação às restantes em termos de resposta a condições ambientais no exterior, retardando a propagação desses efeitos no conforto interior do edifício por um período de tempo maior, como também nesta situação de análise da probabilidade de ocorrência de condensação nas paredes, tudo indica ser a solução onde esse risco é menor. Quando se aumenta o diferencial entre as temperaturas no interior e no exterior, esse risco aumenta mesmo para outras soluções, como se pode ver no gráfico abaixo, pelas mesmas razões aduzidas para a solução de isolamento pelo interior, embora com menor probabilidade de ocorrência.

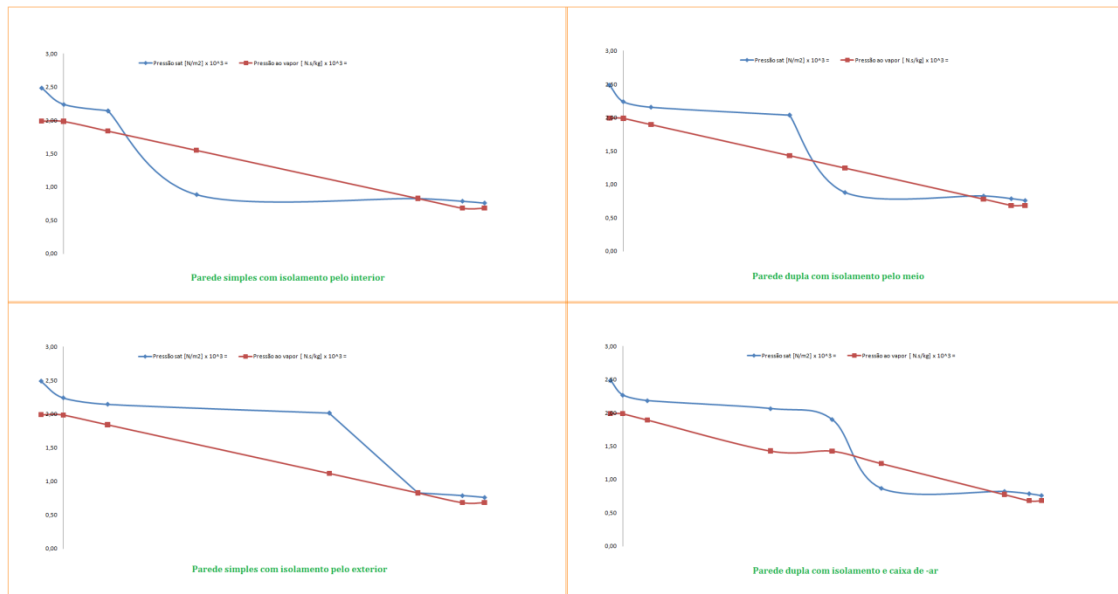


Figura 30 - Variação da pressão de saturação e de vapor com a temperatura exterior a 3°C e no interior a 21°C, nos quatro casos

Na Figura 30 está representado a respectiva variação da pressão de saturação em comparação com a de pressão de vapor, mas só que neste caso sem alteração da temperatura máxima (no interior do compartimento). Há que realçar que a variação ocorrerá com maior facilidade no exterior do edifício, daí os gráficos representados na Figura 30, mas só que agora baixando para 3 graus célsius para observar o risco de condensação em todas as paredes. Na parede com isolamento pelo exterior, o risco de condensação é muito pequeno, o que fez com que tivéssemos de baixar para um valor já não muito adequado ao clima da Região Autónoma da Madeira.

Uma forma de minimizar o risco de ocorrência de condensações é evitar as pontes térmicas, isto é, a existência de heterogeneidades de materiais com coeficientes de transmissão térmica muito diferentes por onde ocorram perdas de calor que baixem as temperaturas do ar a níveis próximos do seu estado de saturação, isto é, o seu ponto de orvalho. Isto consegue-se ao nível de projecto com a escolha dos materiais, e seguindo as recomendações do RCCTE de requisitos mínimos e de máxima diferença dos valores de U para materiais diferentes, ou posteriormente, através da colocação de isolamento, preferencialmente pelo exterior, como se discutiu antes.

Caso tal não seja possível, por diversas razões, então existem possíveis soluções para tentar resolver o problema. Destas, destacamos a ventilação forçada, designadamente nas zonas da cobertura onde se pode ventilar o espaço com ar exterior, ou em situações mais graves, forçar ar seco para esse espaço, sob pressão,

e assim prevenir ar húmido de entrar nessa zona. Em casas de banho e cozinhas a melhor solução também ventilar para remover o ar húmido evitando que este se espalhe no resto do edifício.

Em paredes existem diversas soluções, como sejam a colocação de barreiras de vapor no lado quente do isolamento ou através de uma pintura com material adequado. É importante que, dependendo do local de aplicação da barreira de vapor, se tenha em conta a permeabilidade ao vapor de água para permitir a transferência de humidade para o exterior.

Uma forma de contornar eventuais lacunas de projecto relacionadas com a ocorrência de condensação, consiste na imposição de barreiras de vapor na solução construtiva, como seja uma camada de acabamento (pintura) pela envolvente exterior que funcione como uma barreira na transmissão de vapor para o interior da parede. Esta solução constitui uma alternativa economicamente viável, havendo outras que na fase de projecto podem ser mais facilmente implementadas no interior das paredes.

8 Eficiência energética nos edifícios

A Eficiência Energética nos Edifícios e a Utilização Racional da Energia (URE) são dois conceitos que estão directamente relacionados e têm em comum um só objectivo: dar uma melhor utilização à energia de forma a tornar os edifícios auto sustentáveis.

A economia energética e a redução de custos são dois parâmetros fulcrais da URE tanto no sector doméstico quer no sector de serviços e industrial.

Esta utilização racional tem em conta alguns princípios:

- Reduzir o consumo de energia de forma a atingir o mesmo objectivo;
- Obter uma melhor rentabilidade com a mesma quantidade de energia consumida;
- Inovar nos processos e nos produtos para produzir mais e melhor com menos utilização de energia.

Segundo o site oficial da DGGE [4] e da Eficiência Energética [7], os autores das páginas apresentam alguns conselhos de como dar uma Utilização Racional de Energia por sector dos quais seleccionou-se os conselhos, que de certa forma, estão mais relacionados com a engenharia civil.

8.1 Habitação

Tudo começa aqui, uma vez que um quarto das necessidades energéticas das habitações se destinam ao aquecimento e arrefecimento ambiente e um outra parte dos consumos, desta feita associados aos transportes, têm a ver com a localização relativa entre as habitações e os centros de emprego e de fornecimento de serviços.

Para garantir um nível adequado de conforto térmico e qualidade do ar interior, deve ter-se em consideração a zona bioclimática em que a construção se situa, pois as medidas de isolamento e protecção climática são uma função da localização.

As janelas a S, SW e SE devem ser protegidas da exposição solar excessiva no Verão e permitir a incidência do Sol no Inverno, com a utilização de alpendres, persianas ou outros sistemas de protecção solar (como as plantas trepadeiras, entre as quais se destaca a vinha selvagem, com folhagem nos meses de maior calor e nua no Inverno). As fachadas situadas a N, NW e NE devem ser as mais isoladas e com menores janelas, para evitar as perdas de calor no Inverno. O isolamento das

frinças das janelas e os vidros duplos completam a protecção. Nem sempre, contudo, é possível escolher-se a casa ideal, por razões económicas ou outras.

Em obras de requalificação, deve promover-se o isolamento térmico pelo exterior (ou pelo interior quando a primeira opção não for possível) e as janelas de vidro duplo, protegidas por persianas a Sul. As caixas das persianas devem ser também termicamente isoladas no interior.

No Inverno, o uso de lareira para aquecimento do ar proporciona um rendimento no uso da energia de 15% a 50% se for aberta ou fechada com recuperador de calor, respectivamente. O uso de ventilação natural deve ser preferido no Verão, com vantagem para as habitações que têm aberturas em fachadas com orientações diferentes. Quando necessário, ventiladores podem ser utilizados para facilitar a circulação do ar e reduzir os efeitos do calor.

Pequenos lagos artificiais podem ser utilizados no Inverno para reflectir a luz do Sol incidente a Sul, durante as manhãs e repuxos podem ser utilizados para amenizar o ambiente na vizinhança do prédio, durante os períodos mais quentes no Verão, em zonas não sujeitas a intensos e frequentes períodos de seca.

8.2 Sector doméstico

8.2.1 Iluminação

Utilizar as lâmpadas económicas: fluorescentes tubulares e as fluorescentes compactas. Embora mais caras, emitem a mesma luz, perduram 8 a 10 vezes mais e economizam até 80% do consumo de energia.

Preferir sempre que possível a luz natural (dispondo se possível as zonas mais frequentadas na orientação correcta).

Utilizar lâmpadas com a potência adequada às necessidades do local e do tipo de utilização.

As lâmpadas não devem estar ligadas quando não são estritamente necessárias e devem ser equacionados sistemas cujo seu funcionamento seja programado para ligar ou desligar automaticamente (e.g. sensores de movimento), seja sensores de movimento ou a possibilidade de desligar a iluminação de sectores de edifícios não utilizados.

É de citar que os sistemas de iluminação têm influência no sistema de climatização e que cada kWh poupado em iluminação poupa cerca de 1/3 de kWh no sistema de arrefecimento.

Para além disso há muitas alturas do ano em que se necessita de iluminação mas não de aquecimento.

8.2.2 Águas quentes sanitárias (AQS)

Metade dos consumos energéticos de uma habitação utilizados na confecção de alimentos e nos aquecimentos das águas sanitárias (AQS), pelo que o impacto das medidas neste sector pode ser significativo.

Na construção de edifícios adoptar isolamento sempre nas tubagens de água quente de forma a reduzir as perdas de calor e em geral todas as tubagens de sistemas de climatização (cuja temperatura superficial exterior seja diferente da temperatura ambiente).

Escolher correctamente o termoacumulador mais adequado as necessidades de águas quentes (cerca de 40 litros por pessoa). A temperatura do termóstato do mesmo não deverá estar acima dos 60°C. Nestes casos a utilização de uma válvula termostática aumenta a comodidade e reduz os consumos e ainda sempre que possível colocar redutores de caudais nas torneiras. É importante isolar termicamente as tubagens de armazenamento de AQS, e nunca deixar superfícies livres aquecidas sem isolamento (e.g. piscinas, tanques de água quente).

Utilizar alternativas renováveis como colectores solares térmicos, o que faz com que este sistema reduza até 80% da energia necessária para o aquecimento das AQS.

Desligar o termoacumulador quando não seja necessária água quente e volte a ligá-lo antes da utilização através de relógios programados para esse efeito. Isolar circuitos não utilizados dos que estão em uso, distinguir entre zonas à climatizar e zonas sem essa necessidade.

O aquecimento de água para fins sanitários (banhos, lavagens) e até mesmo para a climatização (em sistemas de aquecimento central) pode beneficiar, como vimos, do uso de colectores solares, antes dos sistemas de aquecimento ou de apoio.

O uso de redutores de caudal nas torneiras e chuveiros de baixo economizadores promove também um menor consumo de AQS e um menor consumo de energia no

aquecimento da água, com reflexos positivos nas facturas de gás (ou electricidade) e de água.

8.2.3 Isolamento de edifícios

Ao isolar um edifício termicamente, a redução de consumo de energia pode reduzir até 30 %, desde que bem aplicado. Para o isolamento de paredes ou coberturas poderá utilizar diversos materiais isolantes, mas é necessário ter o cuidado de escolher bem o tipo de isolamento a aplicar. Há que tirar partido das características térmicas dos materiais escolhidos para o isolamento térmico da sua habitação, tendo sempre em conta o local onde irá ser aplicado. Por exemplo:

Coberturas: utilize placas de poliestireno extrudido (“roofmate”), lã de rocha, etc., para isolar a laje ou telhados da sua habitação.

Paredes exteriores: na construção de uma casa aplicar sempre isolamento contínuo, no interior da parede dupla ou no exterior da parede, de poliestireno expandido, poliestireno extrudido ou outro material isolante. A aplicação exterior é recomendada nas remodelações dos edifícios.

Pontes térmicas (vigas, pilares, intersecção com lajes, ombreiras de portas e janelas): quando o isolamento é efectuado em parede dupla, é necessário isolar as pontes térmicas de modo a evitar o aparecimento de humidade e manchas de bolores localizadas, devido às condensações. Se o isolamento for contínuo pelo exterior, já não há necessidade de isolamento adicional para as pontes térmicas.

Calafetagem: cerca de 15% da energia que se utiliza no aquecimento e arrefecimento da casa perde-se através das frinchas, neste caso isole as frinchas com fita adesiva de espuma, preparada para o efeito.

8.2.4 Envidraçados

Janelas: A utilização de vidros duplos (preferencialmente de baixa emissividade) com caixilharias de baixa transmissão térmica (por exemplo PVC) pode reduzir até 50% as perdas térmicas pelas janelas, assim como o ruído do exterior.

Protecção solar (sombreamento): os envidraçados com grande exposição solar (em especial as orientas a Sul), devem ser ter elementos de protecção, como persianas exteriores ou palas de forma a minimizar os ganhos solares no Verão e maximizar os ganhos solares no Inverno.

Recorrendo a técnicas passivas usar sombreamento exterior. Uma simples árvore de folha caduca permite a obtenção de sombra nas estações quentes.

Fachadas envidraçadas e clarabóias deverão ser criadas condições (aberturas e protecções reguláveis) para aproveitar a ventilação natural, com entradas ao nível inferior e saídas ao nível superior.

8.2.5 Climatização

Antes de tudo, uma casa mal isolada termicamente irá prejudicar a eficiência de qualquer sistema de climatização assim como aumentar os custos energético, pelo que o primeiro passo será garantir o bom isolamento de paredes, tectos e envidraçados.

Recorrer a soluções renováveis com caldeiras a biomassa ou lareiras com recuperador de calor.

Escolher o sistema que melhor se adapta às suas necessidades, tendo em conta a eficiência energética e o consumo total de energia de cada opção.

Evitar aquecer ou arrefecer zonas da casa que não estão habitadas, ou em caso de não estar em casa. São necessários apenas alguns minutos para climatizar uma habitação. De preferência utilizar termóstatos programáveis.

Regular o termóstato para uma temperatura interior de 21 a 23^o C de Verão e de Inverno 20 a 18^oC.

Não deixar portas e janelas abertas quando o ar condicionado estiver em funcionamento.

Os sistemas do tipo evaporativos poderão ser uma boa escolha.

Escolher soluções solares passivas na construção de uma casa nova.

Para aquecer a casa no Inverno aproveite os dias de sol, abrindo os estores e persianas e para evitar perdas de calor fechando-os durante a noite.

Limpar os filtros de ar dos equipamentos de climatização regularmente, de preferência de 15 em 15 dias e solicitar à empresa instaladora a revisão do sistema uma vez por ano.

O chão radiante, apesar de ter um custo de instalação superior, pode ser uma boa alternativa aos convencionais radiadores (em situações de casas novas), uma vez que permitem a utilização de temperaturas muito mais baixas (cerca de 25°C), e conseqüentemente menores custos energéticos.

8.3 Sector de serviços e indústria

Existe uma grande heterogeneidade no sector dos serviços, que vai desde pequena loja até um grande hotel ou grande superfície, assim como, dentro da mesma categoria, existem unidades eficientes e outras grandes consumidoras de energia.

Tendo em conta esta diferenciação, é necessário separar o sector em tipos de edifícios, dos quais os mais significativos (em termos de consumos específicos) são os restaurantes, hotéis, hipermercados, supermercados, piscinas, hospitais e escritórios.

8.3.1 Estratégias bioclimáticas

As Estratégias Bioclimáticas são um conjunto de regras ou medidas de carácter geral destinadas a influenciarem a forma do edifício bem como os seus processos, sistemas e componentes construtivos. As estratégias a adoptar num determinado edifício ou projecto deverão ser seleccionadas; tendo em atenção a especificidade climática do local, função do edifício e conseqüentemente, modo de ocupação e operação do mesmo, com o objectivo de promoverem um bom desempenho em termos de adaptação ao clima.

8.3.2 Estratégias de aquecimento

- Restringir a perdas por condução: aplicações de materiais isolantes nos elementos construtivos (paredes, coberturas, pavimentos e envidraçados) são exemplos deste tipo de estratégia.

- Restringir as perdas por infiltração e restringir o efeito da acção do vento no exterior do edifício: como exemplos de aplicação destas estratégias temos: execução de caixilharias de janelas com uma vedação eficiente, protecção dos ventos dominantes com vegetação e escolha de uma boa localização para o edifício.

- Promover os Ganhos Solares: temos bons exemplos de aplicações deste tipo de estratégias nos sistemas solares passivos para aquecimento.

8.3.3 Estratégias de arrefecimento

- Promover ventilação natural: temos bons exemplos de aplicação desta estratégia nas casas de inércia leve típicas da arquitectura vernácula das regiões tropicais e nos sistemas de arrefecimento por ventilação.

- Restringir ganhos solares: com, por exemplo, redução de envidraçados mais expostos à radiação solar.

8.4 Vários aspectos a ter em conta na fase de projecto

8.4.1 Incidência solar

No Inverno interessa promover os ganhos de radiação, pelo que se apresenta benéfica a abertura de vãos envidraçados no quadrante Sul.

No Verão interessa restringir esses mesmos ganhos, pelo que se apresenta importante que os vãos sejam dotados de dispositivos sombreadores eficazes. Principalmente nos vãos a Poente e Nascente.

Nos quadrantes Norte, Nascente e Poente, seria desejável que a abertura de vãos se restrinja a menores dimensões, desde que isso seja aceitável em termos das outras exigências também presentes no edifício.

8.4.2 Perdas de calor

Restringir a Condução é uma Estratégia Bioclimática que, num clima temperado como o de Portugal, se deve promover nos edifícios para conseguir obter conforto no seu interior, tanto de Inverno como de Verão. Enquanto no Inverno interessa restringir perdas de calor para o exterior através da envolvente, no Verão torna-se mais favorável restringir os ganhos excessivos de calor exterior de forma a manter uma temperatura mais constante no interior dos edifícios.

8.4.3 Ventilação natural

No Inverno, quando a temperatura exterior apresenta praticamente sempre valores abaixo das condições de conforto, interessa limitar as infiltrações. No entanto, a renovação do ar interior é uma medida necessária à manutenção das condições de salubridade interior dos edifícios pelo que deve ser sempre assegurado um mínimo recomendável através de um sistema de ventilação, natural, mecânico ou híbrido, adequado.

No Verão, a ventilação natural assume um papel de relevo no arrefecimento nocturno dos edifícios.

8.5 Medidas a adoptar visando a conservação de energia

Neste capítulo serão apresentadas algumas medidas de conservação de energia de modo a reduzir/remediar o consumo excessivo de energia primária.

O autor do livro “A GREEN VITRUVIUS – PRINCIPLES AND PRACTICE OF SUSTAINABLE ARCHITECTURAL DESIGN” apresenta algumas medidas de forma a melhorar o comportamento térmico dos edifícios, das quais foram seleccionadas as mais relevantes, ou seja, medidas a adoptar à quando da concepção/reparação de um edifício, as quais passo a mencionar. [35]

- ✓ Energias renováveis: eólica, fotovoltaica, etc.
- ✓ Recuperação de calor na ventilação natural;
- ✓ Evitar pontes térmicas;
- ✓ Protecções solares;
- ✓ Vidros reflectantes;
- ✓ Envolventes com excelentes desempenhos térmicos: bem isoladas, sem infiltrações e controlo de vapor;
- ✓ Cor clara nas paredes e coberturas;
- ✓ Na estação de aquecimento (inverno), minimizar as perdas: aproveitar ao máximo os ganhos solares, minimizar as infiltrações e garantir o bom isolamento das envolventes de modo a reduzir as perdas de calor do interior para o exterior;
- ✓ Na estação de arrefecimento (verão) minimizar as cargas de arrefecimento, apostando no arrefecimento natural dos edifícios com tectos altos, uso da inércia térmica, ventilação natural, arrefecimento nocturno (free cooling), protecção dos envidraçados e evitar ao máximo o uso de climatizadores.
- ✓ Reduzir consumos de água através de equipamento de consumo de água;

- ✓ Reutilizar a água proveniente das cozinhas e casas de banhos para regar as plantas ou limpeza de pavimento, após tratamento;
- ✓ Ventilação natural em edifícios altos (efeito chaminé);
- ✓ Escolha de equipamentos de baixo consumo energético;
- ✓ Massa térmica elevada “absorve” variação de temperatura e ajuda tanto na estação de arrefecimento como na de aquecimento (excepto se o edifício tiver uma ocupação intermitente);
- ✓ Solários/estufas para acumular e fornecer calor na estação de aquecimento;
- ✓ Uso de luz natural para minimizar a utilização da luz artificial: através de tectos altos, superfícies reflectoras, janelas bem colocadas e luzes nos tectos;
- ✓ Uso de cores claras no interior dos edifícios para melhor reflectir a luz (branco de preferência);
- ✓ Protecção contra o vento prevalecentes (através do uso de vegetação) a não ser que seja pretendidas brisas frias;
- ✓ Utilização de palas ou árvores de folha caduca para permitir um sombreamento na estação de arrefecimento de modo a criar uma “barreira” à luz solar nas fachadas dos edifícios.

Na fase de ante projecto é importante efectuar uma análise a exaustiva de modo a melhorar o comportamento térmico dos edifícios, através de pequenos parâmetros, estudando a localização e orientação do edifício em termos de:

- ✓ Luz natural;
- ✓ Radiação solar para espaços habitáveis;
- ✓ Uso da inércia térmica para reduzir flutuações acentuadas da temperatura;
- ✓ Considerar métodos de fornecimento e tratamento de águas;
- ✓ Usar estudos iterativos para o projecto e análise do desempenho térmico.

Fase de projecto:

- ✓ Analisar os pés-direitos das divisões no que respeita ao aquecimento, arrefecimento e luz solar;
- ✓ Estudar a inércia térmica em relação ao padrão de utilização do edifício (contínuo ou intermitente);
- ✓ Optimizar a proporção e distribuição das aberturas na envolvente exterior em termos de efeitos no aquecimento e iluminação;
- ✓ Avaliar o desempenho térmico do edifício e comparar com os valores de referência.

Na estação de aquecimento:

- ✓ Maximizar técnicas de aquecimento passivo:

- Maximizar ganhos solares úteis;
- Estudar U-Values para assegurar valores de referência;
- Modelar fluxos de calor no edifício em diferentes situações de temperatura, ao longo das várias estações do ano.
- ✓ Maximizar medidas de aquecimento eficiente:
 - Selecção de combustível e do método de aquecimento mais adequado à situação em estudo;
 - Selecção de radiadores com alto rendimento;
 - Optimização do controlo de sistemas de gestão de energia;
 - Uso de “free cooling” nos sistemas de climatização.

Na estação de arrefecimento:

- ✓ Maximizar técnicas de arrefecimento passivo:
 - Inércia térmica e ventilação para promover medidas de arrefecimento passivo;
 - Modelação da alteração de temperaturas para avaliar o impacto de alterações ambientais nas temperaturas do interior dos edifícios;
 - Modelação do sombreamento e ganhos solares/luz natural.
- ✓ Sistemas activos para minimizar o consumo de energia, incluindo opção de “free cooling” nos sistemas de ventilação.

Consumos de águas:

- ✓ Minimizar consumos de água através de equipamento de baixo consumo (reguladores de fluxos, etc.) e da reutilização da água cinzenta;
- ✓ Sistemas de tratamento de água individuais e de pequena escala.

Ventilação:

- ✓ Modelação para maximizar a ventilação natural dos edifícios de forma a permitir um arrefecimento do edifício (no verão) sem recurso a sistemas de climatização;
- ✓ Sistemas de recuperação de calor na exaustão do ar.

9 Conclusões e considerações finais

As principais conclusões que se obtiveram com a elaboração deste trabalho são as seguintes:

- ✓ A variação da temperatura do ar ambiente no exterior, que é em geral ignorada em análises de transferência de calor em regime estacionário, é um parâmetro a ter em conta sendo responsável pelas variações do calor armazenado nas paredes, bem como pelo seu comportamento ao longo do dia.
- ✓ A aplicação de sistemas de isolamento térmico em paredes da envolvente opaca, em regime transiente, permitiu estimar uma melhor posição para a colocação dos isolamentos, consoante o espaço em estudo. Deste modo, é possível remediar a ocorrência de condensações no interior das paredes, contabilizar a energia acumulada nas mesmas, e conseqüente redução das suas perdas de calor, e por fim, reduzir as flutuações térmicas dos espaços, aumentando o conforto térmico, como os resultados obtidos indicaram.
- ✓ No que concerne à inércia térmica de um edifício pode-se concluir que consoante os elementos de construção e a sua capacidade de acumular calor no seu interior este terá uma maior ou menor capacidade de contrariar as variações de temperatura no seu interior. A inércia térmica dum edifício ditará a capacidade de um edifício utilizar os ganhos solares (de inverno) e de absorção os picos de temperatura (no verão). Para este efeito, o regulamento (RCCTE) define a inércia em três classes: forte, média e fraca.
- ✓ O estudo da condensação permitiu concluir que a posição do isolamento térmico não influencia apenas na inércia térmica, pois a inércia térmica é calculada sempre da camada de isolamento para o interior, e as espessuras e materiais utilizados aí vão também ser preponderantes no fenómeno da condensação.
- ✓ A transmissão de calor em regime permanente não traduz com exactidão o real comportamento das trocas de calor entre o interior com o exterior, sendo uma simplificação, e este trabalho teve como principal objectivo o estudo do comportamento térmico das paredes de modo a determinar as variações de temperatura do ar no interior dos edifícios com o objectivo de salvaguardar o conforto tanto de verão como de inverno.
- ✓ Na análise em regime transiente às seis paredes referidas no capítulo 6, pode-se concluir que três delas tiveram um comportamento térmico, em termos de condução unidimensional de calor, muito semelhante. As paredes duplas com isolamento pelo meio, com caixa-de-ar e a parede simples com isolamento pelo exterior não tiveram uma variação de temperaturas no seu interior muito acentuada (a variação de temperaturas ao longo de um dia tipo ronda os 0,5 °C). Pelo contrário, as restantes (parede simples, parede simples com acabamento em reboco e parede com isolamento pelo interior)

mostraram uma variação excessiva das temperaturas do ar ambiente no interior do compartimento. Os valores associados a esta variação, da temperatura do ar no interior oscilaram entre 2,5 °C e 4,5 °C (para a mesma variação de temperatura exterior). Isto significa que num dia de verão, estas soluções construtivas vão provavelmente implicar o recurso a um sistema auxiliar de arrefecimento.

- ✓ O método explícito, apesar de ser numericamente mais instável que o método implícito e implicar o uso de “time-steps” menores, o que pode ser “pesado” em termos computacionais, não requer a utilização de rotinas para resolver sistemas de equações (lineares ou não-lineares) de forma simultânea, o que o torna num método de aplicação mais directa em que as temperaturas vão sendo calculadas de forma explícita, gradualmente, a partir de uma solução inicial estimada. É, não obstante, um método adequado para determinar o campo de temperaturas em paredes de edifícios, seja em sistemas unidimensionais ou bidimensionais.

10 Referências

- [1] RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Decreto-Lei nº 40/90, de 6 de Fevereiro de 1990.
- [2] Directiva Europeia 2002/91/CE, de 16 de Dezembro de 2002.
- [3] RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Decreto-Lei nº 80/2006, de 4 de Abril.
- [4] Direcção-Geral de Geologia e Energia. [Online] 2007. www.dge.pt.
- [5] Directiva relativa ao rendimento energético dos edifícios. Directiva 2002/91/CE, de 16 de Dezembro de 2002. Jornal Oficial das Comunidades Europeias, Bruxelas, Janeiro 2003.
- [6] Eficiência Energética nos Edifícios, Edição da Direcção Geral de Energia – Ministério da Economia, ISBN 972-8268-25-4, Fevereiro de 2002.
- [7] Eficiência energética [Online] www.eficiencia-energetica.com
- [8] P3E - Programa para a Eficiência Energética em Edifícios. [Online] 2007. www.p3e-portugal.com.
- [9] Física – vol. I Mecânica e Gravitação, vol. II Ondas Mecânicas e Termodinâmica, Raymond A. Serway, LTC, 3ª ed. 1996.
- [10] Fundamentos de Física, Halliday, Resnick & Walker, LTC, 4ª ed., 1996.
- [11] Luís Reis, Apoio à disciplina de Física dos Edifícios (PowerPoint). Ano Lectivo 2004/2005, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja.
- [12] Fundamentals of heat and mass transfer, Incropera, DeWitt, Bergman and Lavine, Sixth Edition.
- [13] Mechanical Services for buildings, Eastof & Watsson, Longman Edition.
- [14] Heating and cooling of buildings, Design for Efficiency, Jan F. Kreider, Peter S. Cirtiss and Ari Rabl, Second Edition.
- [15] Grupo EDP. [Online] 2007. www.edp.pt
- [16] Portail de l'Énergie en Région wallonne. [Online] Direction Générale des Technologies, de la Recherche et de l'Énergie, 2007, energie.wallonie.be.

[17] Santos, Carlos Pina dos e Matias, Luís. *ITE 50 - Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*. S.l: LNEC, 2006.

[18] ASHRAE, "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, Ansi/ASHRAE Standard 62.1-2004, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers", Atlanta, USA, 2004.

[19] Thermodynamics - An Engineering Approach, Çengel & Boles, *Mc Graw-Hill, 2nd ed.*, 1994.

[20] Construção sustentável – Soluções eficientes hoje, a nossa riqueza amanhã, [Online], www.construcaosustentavel.pt

[21] João Alves e Sousa, "Thermal Insulation". Trabalho de mestrado apresentado à Universidade de Cranfield, 1989.

[22] Luís Castanheira e Joaquim Borges Gouveia, Artigo - Energia, ambiente e desenvolvimento sustentável, Editor – Sociedade Portuguesa de Inovação.

[23] José Alexandrino de Melo Matias Faria de Vila Real. "Tese apresentada à FEUP para obtenção do grau de Mestre em Construção de Edifícios". Porto, 1990.

[24] Maria Manuela Guedes de Almeida. "Dissertação apresentada à FEUP para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Térmica". Porto, 1987.

[25] Ricardo Jorge Alves Silvestre Lobão. "Dissertação apresentada à Universidade do Minho para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil". Guimarães, 2004.

[26] António Luís Ferreira Graça. "Dissertação apresentada à FEUP para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica". Porto, 1996.

[27] Luís Manuel Bragança de Miranda e Lopes. "Dissertação apresentada à FEUP para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Térmica". Porto, 1988.

[28] António Manuel Figueiredo Freitas de Oliveira. "Tese apresentada à FEUP para obtenção do grau de Mestre em Construção de Edifícios". Porto, 2007.

[29] Gonçalves, H., "Comportamento de Sistemas Solares Passivos em Edifícios", Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, FEUP, 1986.

[30] João Marques Salgueiro de Oliveira Garrido. "Tese apresentada à Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente". Lisboa, 2008.

[31] Batty, W J. Vapour diffusion and condensation, Cranfield Institute of Technology.

[32] ASHRAE, “Fundamentals Handbook, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers”, Atlanta, 2005.

[33] ADENE, Agência para a energia [Online] www.casacertificada.pt

[34] Apontamentos da cadeira de Térmica de Edifícios, ano lectivo 2008/2009, leccionada pelo Doutor. João Alves e Sousa.

[35] A green vituvius – principles and practice of sustainable architectural design, by James & James (Science Publishers) Ltd, The European Commission, Directorate General XVII for Energy.

Anexos

Anexo I

Outras possíveis interpretações na análise da equação de transmissão de calor nos nodos de fronteira:

- 1º Caso

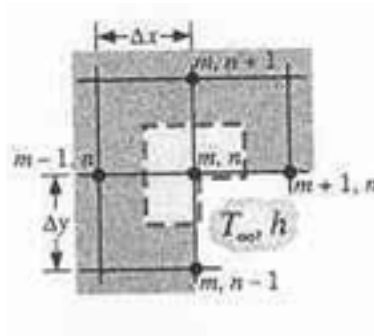


Figura 31 – Nodos sujeitos à convecção

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y \cdot 1) \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x}$$

$$q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} = k\left(\frac{\Delta y}{2} \cdot 1\right) \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x}$$

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = k\left(\frac{\Delta x}{2} \cdot 1\right) \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y}$$

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x \cdot 1) \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y}$$

$$q_{\infty \rightarrow (m,n)} = h\left(\frac{\Delta x}{2} \cdot 1\right) (T_{\infty} - T_{m,n})$$

$$q_{\infty \rightarrow (m,n)} = h\left(\frac{\Delta y}{2} \cdot 1\right) (T_{\infty} - T_{m,n})$$

Somando todos os nodos, sem geração de calor, obtemos

$$k(\Delta y \cdot 1) \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} + k\left(\frac{\Delta y}{2} \cdot 1\right) \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} + k\left(\frac{\Delta x}{2} \cdot 1\right) \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} + k(\Delta x \cdot 1) \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} + h\left(\frac{\Delta x}{2} \cdot 1\right)(T_{\infty} - T_{m,n}) + h\left(\frac{\Delta y}{2} \cdot 1\right)(T_{\infty} - T_{m,n}) = 0$$

Seja $\Delta x = \Delta y$ e dividir por k temos

$$\Leftrightarrow 2(T_{m-1,n} - T_{m,n}) + (T_{m+1,n} - T_{m,n}) + (T_{m,n-1} - T_{m,n}) + 2(T_{m,n+1} - T_{m,n}) + \frac{h\Delta x}{k}(T_{\infty} - T_{m,n}) + \frac{h\Delta y}{k}(T_{\infty} - T_{m,n}) = 0$$

$$\Leftrightarrow 2(T_{m-1,n} + T_{m,n+1}) + (T_{m+1,n} + T_{m,n-1}) - 6T_{m,n} + \frac{h\Delta x}{k}(T_{\infty} - T_{m,n}) + \frac{h\Delta y}{k}(T_{\infty} - T_{m,n}) = 0$$

$$\Leftrightarrow 2(T_{m-1,n} + T_{m,n+1}) + (T_{m+1,n} + T_{m,n-1}) + 2\frac{h\Delta x}{k}T_{\infty} - 2\left(3 + \frac{h\Delta y}{k}\right)T_{m,n} = 0$$

- 2º Caso

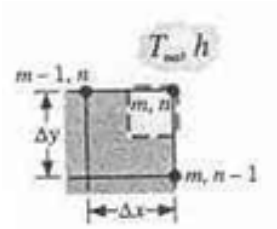


Figura 32 – Nó de fronteira (bidimensional)

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k\left(\frac{\Delta y}{2} \cdot 1\right) \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x}$$

$$q_{\infty \rightarrow (m,n)} = h\left(\frac{\Delta y}{2} \cdot 1\right)(T_{\infty} - T_{m,n})$$

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = k\left(\frac{\Delta x}{2} \cdot 1\right) \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y}$$

$$q_{\infty \rightarrow (m,n)} = h \left(\frac{\Delta x}{2} \cdot 1 \right) (T_{\infty} - T_{m,n})$$

Somando todos os nodos, sem geração de calor, obtemos

$$k \left(\frac{\Delta y}{2} \cdot 1 \right) \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} + h \left(\frac{\Delta y}{2} \cdot 1 \right) (T_{\infty} - T_{m,n}) + k \left(\frac{\Delta x}{2} \cdot 1 \right) \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} + h \left(\frac{\Delta x}{2} \cdot 1 \right) (T_{\infty} - T_{m,n}) = 0$$

Seja $\Delta x = \Delta y$, dividir por k temos e multiplicando por dois,

$$(T_{m-1,n} - T_{m,n}) + \frac{h\Delta y}{k} (T_{\infty} - T_{m,n}) + (T_{m,n-1} - T_{m,n}) + \frac{h\Delta x}{k} (T_{\infty} - T_{m,n}) = 0$$

$$(T_{m-1,n} + T_{m,n-1}) + \frac{2h\Delta y}{k} T_{\infty} - 2 \left(1 + \frac{h\Delta y}{k} \right) T_{m,n} = 0$$

Anexo II

Dedução da equação da temperatura nos nodos de fronteira de camadas:

$$k_A \times (\Delta y \times 1) \times \frac{T_{m-1}^p - T_m^p}{\Delta x} + k_B \times (\Delta y \times 1) \times \frac{T_{m+1}^p - T_m^p}{\Delta x} =$$

$$\rho_A \times Cp_A \times \left(\frac{\Delta x}{2} \times 1\right) \times \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t} + \rho_B \times Cp_B \times \left(\frac{\Delta x}{2} \times 1\right) \times \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t}$$

Seja $\Delta y = 1$, então temos,

$$k_A \times \frac{T_{m-1}^p - T_m^p}{\Delta x} + k_B \times \frac{T_{m+1}^p - T_m^p}{\Delta x} =$$

$$\rho_A \times Cp_A \times \left(\frac{\Delta x}{2} \times 1\right) \times \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t} + \rho_B \times Cp_B \times \left(\frac{\Delta x}{2} \times 1\right) \times \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t}$$

Dividindo a equação por k_A , k_B e Δx , fica

$$\frac{1}{k_B} \times (T_{m-1}^p - T_m^p) + \frac{1}{k_A} \times (T_{m+1}^p - T_m^p) =$$

$$\frac{\rho_A \times Cp_A}{k_A} \times \frac{\Delta x^2}{2 \times k_B} \times \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t} + \frac{\rho_B \times Cp_B}{k_B} \times \frac{\Delta x^2}{2 \times k_A} \times \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t}$$

Como já sabemos, $\frac{1}{\alpha} = \frac{k}{\rho \times Cp}$, logo

$$\frac{1}{k_B} \times (T_{m-1}^p - T_m^p) + \frac{1}{k_A} \times (T_{m+1}^p - T_m^p) =$$

$$\frac{1}{\alpha_A} \times \frac{\Delta x^2}{2 \times k_B} \times \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_B} \times \frac{\Delta x^2}{2 \times k_A} \times \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t}$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{k_B} \times (T_{m-1}^p - T_m^p) + \frac{1}{k_A} \times (T_{m+1}^p - T_m^p) =$$

$$\frac{\Delta x^2}{\alpha_A \times \Delta t} \times \frac{1}{2 \times k_B} \times (T_m^{p+1} - T_m^p) + \frac{\Delta x^2}{\alpha_B \times \Delta t} \times \frac{1}{2 \times k_A} \times (T_m^{p+1} - T_m^p)$$

Também sabemos, $Fo = \frac{\alpha \times \Delta t}{\Delta x^2}$, o que faz com que,

$$\frac{1}{k_B} \times (T_{m-1}^p - T_m^p) + \frac{1}{k_A} \times (T_{m+1}^p - T_m^p) =$$

$$\frac{1}{Fo_A} \times \frac{1}{2 \times k_B} \times (T_m^{p+1} - T_m^p) + \frac{1}{Fo_B} \times \frac{1}{2 \times k_A} \times (T_m^{p+1} - T_m^p)$$

Simplificando fica,

$$\frac{1}{k_B} \times (T_{m-1}^p - T_m^p) + \frac{1}{k_A} \times (T_{m+1}^p - T_m^p) =$$

$$\frac{1}{2 \times k_B \times Fo_A} \times (T_m^{p+1} - T_m^p) + \frac{1}{2 \times k_A \times Fo_B} \times (T_m^{p+1} - T_m^p)$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{k_B} \times (T_{m-1}^p - T_m^p) + \frac{1}{k_A} \times (T_{m+1}^p - T_m^p) =$$

$$T_m^{p+1} \times \left(\frac{1}{2 \times k_B \times Fo_A} + \frac{1}{2 \times k_A \times Fo_B} \right) - T_m^p \times \left(\frac{1}{2 \times k_B \times Fo_A} + \frac{1}{2 \times k_A \times Fo_B} \right)$$

$$\Leftrightarrow T_m^{p+1} \times \left(\frac{1}{2 \times k_B \times Fo_A} + \frac{1}{2 \times k_A \times Fo_B} \right) =$$

$$\frac{(T_{m-1}^p - T_m^p)}{k_B} + \frac{(T_{m+1}^p - T_m^p)}{k_A} + T_m^p \times \left(\frac{1}{2 \times k_B \times Fo_A} + \frac{1}{2 \times k_A \times Fo_B} \right)$$

$$\Leftrightarrow T_m^{p+1} = \frac{\frac{(T_{m-1}^p - T_m^p)}{k_B}}{\left(\frac{1}{2 \times k_B \times Fo_A} + \frac{1}{2 \times k_A \times Fo_B} \right)} + \frac{\frac{(T_{m+1}^p - T_m^p)}{k_A}}{\left(\frac{1}{2 \times k_B \times Fo_A} + \frac{1}{2 \times k_A \times Fo_B} \right)} + T_m^p$$

$$\Leftrightarrow T_m^{p+1} = \frac{(T_{m-1}^p - T_m^p)}{\left(\frac{k_B}{2 \times k_B \times Fo_A} + \frac{k_B}{2 \times k_A \times Fo_B} \right)} + \frac{(T_{m+1}^p - T_m^p)}{\left(\frac{k_A}{2 \times k_B \times Fo_A} + \frac{k_A}{2 \times k_A \times Fo_B} \right)} + T_m^p$$

$$\Leftrightarrow T_m^{p+1} = \frac{(T_{m-1}^p - T_m^p)}{\left(\frac{1}{2 \times Fo_A} + \left(\frac{k_B}{k_A} \times \frac{1}{2 \times Fo_B} \right) \right)} + \frac{(T_{m+1}^p - T_m^p)}{\left(\left(\frac{k_A}{k_B} \times \frac{1}{2 \times Fo_A} \right) + \frac{1}{2 \times Fo_B} \right)} + T_m^p$$

Anexo III

Dedução da equação do custo médio anual em função da espessura do isolamento:

$$\frac{dC}{dx} = 0 \Leftrightarrow \left(\left(\frac{F \times S \times A \times (T_i - T_a)}{\left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}} \right)} \right) + \left(\frac{P \times A \times x}{100} \times V \right) + c \right)' = 0$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{F \times S \times A \times (T_i - T_a)}{\left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}} \right)} \right)' + \left(\frac{P \times A \times x}{100} \times V \right)' + c' = 0$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{F \times S \times A \times (T_i - T_a)}{\left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}} \right)} \right)' + \left(\frac{P \times A \times x}{100} \times V \right)' = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{(F \times S \times A \times (T_i - T_a))' \times \left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}} \right) - (F \times S \times A \times (T_i - T_a)) \times \left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}} \right)'}{\left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}} \right)^2} + \left(\frac{P \times A \times x}{100} \times V \right)' = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{-(F \times S \times A \times (T_i - T_a)) \times \left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}} \right)'}{\left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}} \right)^2} + \left(\frac{P \times A \times x}{100} \times V \right)' = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{-(F \times S \times A \times (T_i - T_a)) \times \left(\frac{k}{k^2} \right)'}{\left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}} \right)^2} + \left(\frac{P \times A \times x}{100} \times V \right)' = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{-(F \times S \times A \times (T_i - T_a))}{k \times \left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}}\right)^2} + \left(\frac{P \times A \times x}{100} \times V\right) = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{-(F \times S \times A \times (T_i - T_a))}{\left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}}\right)^2} + \left(\frac{P \times A \times x}{100} \times V\right) = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{-(F \times S \times A \times (T_i - T_a))}{\left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}}\right)^2} + \left(\frac{P \times A \times k}{100} \times V\right) = 0$$

$$\Leftrightarrow -\frac{\sqrt{(F \times S \times A \times (T_i - T_a))}}{\left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}}\right)} + \sqrt{\left(\frac{PAk}{100} \times V\right)} = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{\sqrt{(F \times S \times A \times (T_i - T_a))}}{\left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{out}}\right)} = \sqrt{\left(\frac{P \times A \times k}{100} \times V\right)}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\sqrt{(F \times S \times A \times (T_i - T_a))}}{\sqrt{\left(\frac{P \times A \times k}{100} \times V\right)}} = \left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{1}{h_{out}}\right) + \left(\frac{x}{k}\right)$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{x}{k}\right) = \sqrt{\frac{(F \times S \times A \times (T_i - T_a))}{\left(\frac{PAk}{100} \times V\right)}} - \left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{1}{h_{out}}\right)$$

Como já é sabido P é dado em percentagem, logo,

$$\Leftrightarrow \left(\frac{x}{k}\right) = \sqrt{\frac{(F \times S \times A \times (T_i - T_a))}{(P \times A \times k \times V)}} - \left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{1}{h_{out}}\right)$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{x}{k}\right) = 10 \times \sqrt{\frac{(F \times S \times A \times (T_i - T_a))}{PAkV}} - \left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{1}{h_{out}}\right)$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{x}{k}\right) = 10 \times \sqrt{\frac{(F \times S \times (T_i - T_a))}{PkV}} - \left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{1}{h_{out}}\right)$$

