



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Ponto ótimo de rentabilidade económica das soluções construtivas opacas de edifícios localizados em Portugal

Cost optimality of opaque constructive solutions of buildings located in Portugal

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

Nuno Francisco Baía da Silva Garcia Saraiva

Orientador

António Manuel Mendes Raimundo

Júri

Presidente **Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar**
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador **Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo**
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogal

Mestre Francisco José Craveiro Bispo Pocinho Lamas
Professor Convidado da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2017

Agradecimentos

Concluído este trabalho gostaria de dedicar algumas palavras de apreço e gratidão a todos aqueles que me apoiaram e incentivaram do meu percurso académico.

Estas palavras são dirigidas:

Ao meu orientador Senhor Professor Doutor António Raimundo pelo apoio, disponibilidade e pelos esclarecimentos e pertinência das suas orientações e sugestões.

A todos os docentes do DEM-UC que contribuíram para a minha formação académica.

Um agradecimento especial para a minha família e amigos por todo o apoio e motivação a quem dedico o presente trabalho.

Um muito obrigado a todos.

Resumo

Nos dias de hoje a preocupação com os consumos energéticos exacerbados tem vindo a aumentar devido aos recursos limitados do planeta Terra. Assim sendo, é importante identificar os principais consumos e estudar maneiras de os reduzir e, simultaneamente, contribuir para um desenvolvimento mais sustentável e amigo do meio ambiente. Sabe-se que parte do consumo energético global provém de gastos provenientes da utilização de edifícios. O comportamento energético de um edifício depende muito da qualidade dos seus elementos ativos (sistemas energéticos) e passivos (soluções construtivas opacas e transparentes). Isto é, o consumo global de energia de um edifício está relacionado com a qualidade térmica das suas soluções construtivas opacas e transparentes. No entanto, um edifício energeticamente mais eficaz requer, também, um maior investimento na compra de materiais e na sua construção. Por isso, importa questionar qual é o ponto ótimo para o qual há um compromisso ideal entre os custos de investimento inicial e as poupanças energéticas obtidas.

Com a elaboração deste trabalho pretendeu-se relacionar o custo das soluções construtivas opacas comumente utilizadas em edifícios Portugueses com a eficiência energética que promovem. Para o efeito usa-se o conceito de custo anual equivalente (*CAE*) do ciclo de vida completo (construção + exploração + demolição) de diversos tipos de edifícios, quando localizados em três regiões climáticas típicas de Portugal continental. Procurou-se identificar a solução com o menor valor de *CAE* e assim definir as soluções construtivas opacas a utilizar na construção ou reabilitação de edifícios que contribuam para o “ponto ótimo de rentabilidade económica” destes edifícios.

Este estudo foi efetuado recorrendo a preços de mercado de isolamentos térmicos, ao Gerador de Preços Cype (para cálculo dos preços de construção dos elementos dos edifícios), à folha de cálculo CalProTerm (para determinar as propriedades termofísicas das soluções construtivas) e ao software SEnergEd (para simulação do comportamento energético do edifício e cálculo do *CAE* do seu ciclo de vida completo).

Foram identificadas as soluções construtivas opacas, em termos de espessura e posicionamento do isolamento, de cinco tipologias de edifícios localizados em três locais representativos das características climáticas de Portugal continental. Foi assim possível identificar a solução ideal a aplicar em cada situação (cada par tipologia de edifício / região climática).

Palavras-chave: Soluções construtivas opacas, Eficiência energética, Custo anual equivalente, Rentabilidade económica, Isolamento térmico ótimo.

Abstract

Nowadays the environmental concerns about energy consumption have been increasing because of the limited resources available on Earth. Therefore, it is important to identify where energy is wasted and study ways of reducing this energy consumption to contribute for an eco-friendly and sustainable development. It is known that part of the global energy consumption comes from the unnecessary outlay of buildings. Energy behaviour of a building depends on the quality of solutions used on its construction. This means that the global energy consumption of a building has a strict relation with the thermal quality of its active (energetic systems) and passive (transparent and opaque constructive solutions) elements. Therefore, buildings with more energy efficiency require higher acquisition and construction costs. For this reason, it is important the identification of what is the optimal compromise between the initial investment costs and the return achieved in terms of energy savings.

With the elaboration of this work, it was pretended to relate the opaque construction solutions used on Portuguese buildings with the energy efficiency that they promote. For this purpose, it is used the concept of Equivalent Annual Cost (EAC) of the complete lifetime cycle (construction + exploration + demolition) of various types of buildings when located in three typical climatic regions of continental region of Portugal. It was intended to identify the solution with lower EAC and thus define the best construction solutions to build or refurbish Portuguese buildings.

This study was carried out using market prices of thermal insulations, the Cype Price Generator (to calculate building elements prices), the CalProTerm spreadsheet (to determine the thermophysical properties of the constructive solutions) and the SEnergEd software (for simulation of building energy performance and calculation of CAE of its complete life cycle).

The optimal construction solutions were identified, in terms of thickness and position of the thermal insulation, for five buildings types and for three distinct locations that characterize the weather of the continental region of Portugal. It was thus possible to identify the ideal solution to be applied in each situation (each pair typology of building / climatic region).

Keywords Opaque constructive solutions, Energy efficiency, Equivalent annual cost, Economic profitability, Optimal thermal insulation.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas.....	xiii
Simbologia e Siglas.....	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos.....	5
2. FERRAMENTAS DE CÁLCULO	7
2.1. Folha de Cálculo CalProTerm	7
2.2. Gerador de Preços CYPE	8
2.3. SEnergEd – Simulação Dinâmica de Edifícios	9
3. MATERIAL	13
3.1. Clima de Portugal	13
3.2. Edifícios em Estudo.....	14
3.2.1. Apartamento	14
3.2.2. Moradia	17
3.2.3. Clínica	19
3.2.4. Escola	21
3.2.5. Supermercado.....	22
3.3. Sistemas Energéticos	24
3.4. Vãos Envidraçados	25
3.5. Soluções Construtivas Opacas.....	26
3.5.1. Isolamentos térmicos comercializados em Portugal	26
3.5.2. Custo da eficiência energética do isolamento térmico	27
3.5.3. Soluções construtivas opacas de base (sem isolamento).....	30
3.5.4. Soluções construtivas opacas com isolamento térmico.....	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1. Apartamento	37
4.2. Moradia.....	41
4.3. Clínica.....	45
4.4. Escola.....	48
4.5. Supermercado	54
4.6. Análise Comparativa	59
5. CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXO A – EDIFÍCIOS.....	68
ANEXO B – SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS OPACAS	76
ANEXO C – CUSTO ANUAL EQUIVALENTE	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Custo económico durante o ciclo de vida de um nZEB [Raimundo, 2012].....	2
Figura 2.1 - Esquema do método 5R1C	10
Figura 3.1 - Localização do concelho de Odemira, Ansião e Mirandela no mapa de Portugal [Google, 2016a]	13
Figura 3.2 – Planta do apartamento T3 do piso 2 [Raimundo et al, 2011a]	15
Figura 3.3 – Implantação da moradia [Raimundo et al, 2011b]	18
Figura 3.4 – Implantação da clínica [Raimundo et al 2011c].....	19
Figura 3.5 – Divisão da escola em diferentes blocos [Claro, 2015]: Bloco A – a Sul; Bloco B – a Norte; Bloco C – a Este; e Bloco E – a Oeste.....	21
Figura 3.6 – Planta do supermercado [Vidigueira, 2013].....	23
Figura 3.7 – Comparação do <i>CEEIT</i> para o EPS E XPS.....	29
Figura 3.8 – Custo da Eficiência Energética do Isolamento Térmico EPS.	29
Figura 3.9 – Comparação do custo de construção aplicando o isolamento pelo interior, intermédio e pelo exterior.....	34
Figura 4.1 – Apartamento: Custo anual equivalente [€/ano] para cada espessura e posicionamento do isolamento, para o edifício localizado em cada um dos três concelhos.	39
Figura 4.2 – Apartamento: a) Potências no aquecimento e arrefecimento ao longo do ano; b) Temperaturas interiores e exteriores ao longo do ano	41
Figura 4.3 – Moradia: Custo anual equivalente [€/ano] para cada espessura e posicionamento do isolamento, para o edifício localizado em cada um dos três concelhos.	44
Figura 4.4 – Moradia: a) Potências no aquecimento e arrefecimento ao longo do ano; b) Temperaturas interiores e exteriores ao longo do ano.....	44
Figura 4.5 – Clínica: Custo anual equivalente [€/ano] para cada espessura e posicionamento do isolamento, para o edifício localizado em cada um dos três concelhos.	46
Figura 4.6 – Clínica: a) Potências no aquecimento e arrefecimento ao longo do ano; b) Temperaturas interiores e exteriores ao longo do ano.....	48
Figura 4.7 – Escola: Custo anual equivalente [€/ano] para cada espessura e posicionamento do isolamento, para o edifício localizado em cada um dos três concelhos.	50
Figura 4.8 – Escola: Gastos energéticos para o aquecimento e arrefecimento.....	52
Figura 4.9 – Gastos em energia [€/ano] da escolar nos concelhos de Odemira e Mirandela	53

Figura 4.10 – Escola: a) Potências no aquecimento e arrefecimento ao longo do ano; b) Temperaturas interiores e exteriores ao longo do ano	54
Figura 4.11 – Supermercado: Custo anual equivalente [€/ano] para cada espessura e posicionamento do isolamento, para o edifício localizado em cada um dos três concelhos.....	56
Figura 4.12 – Supermercado: Gastos energéticos para o aquecimento e arrefecimento	58
Figura 4.13 – Supermercado: a) Potências no aquecimento e arrefecimento ao longo do ano; b) Temperaturas interiores e exteriores ao longo do ano	59
Figura 0.1 – Planta do Piso 0 [Raimundo et al, 2011b]	68
Figura 0.2 – Planta do Piso 1 [Raimundo et al, 2011b]	68
Figura 0.3 – Planta do Piso 2 [Raimundo et al, 2011b]	69
Figura 0.4 – Planta do piso 0 [Raimundo et al, 2011c].....	70
Figura 0.5 – Planta do piso 1 [Raimundo et al, 2011c].....	70
Figura 0.6 – Vista da entrada principal da Escola Secundária Avelar Brotero, correspondente ao Bloco C	72

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Perfil de ocupação para o edifício	15
Tabela 3.2 – Apartamento: custos de investimento, rendimentos e gastos anuais (sem IVA)	16
Tabela 3.3 – Características técnicas dos envidraçados [Rebello, 2016]	25
Tabela 3.4 – Preços médios em Portugal, e seus desvios padrões, dos isolamentos EPS e XPS. Estes valores não incluem o IVA nem os gastos de transporte e de aplicação.	26
Tabela 3.5 – Resistências térmicas superficiais típicas dos edifícios localizados em Portugal. Quadro I.3 do Anexo I do ITE 50 [Santos e Matias, 2006].....	27
Tabela 3.6 – Custo da Eficiência Energética do Isolamento Térmico	28
Tabela 3.7 – Descrição dos elementos construtivos opacos base (sem isolamento térmico).	30
Tabela 3.8 – Elementos construtivos opacos que constituem a estrutura base das simulações	31
Tabela 3.9 - Tabela comparativa da aplicação do isolamento na parede exterior	34
Tabela 4.1 – Tabela comparativa dos <i>CAE</i> e das poupanças dos diferentes edifícios; Legenda: isolamento aplicado pelo a) pelo interior, b) intermédio, c) pelo exterior	60
Tabela 0.1 - Moradia: custos de investimento, rendimentos e gastos anuais (sem IVA)....	69
Tabela 0.2 – Perfil de ocupação para a clínica	71
Tabela 0.3 – Clínica: custos de investimento, rendimentos e gastos anuais (sem IVA)	71
Tabela 0.4 – Perfil de ocupação da escola secundária.....	73
Tabela 0.5 – Escola: custos de investimento, rendimentos e gastos anuais (sem IVA)	73
Tabela 0.6 – Perfil de ocupação do edifício	74
Tabela 0.7 – Supermercado: custos de investimento, rendimentos e gastos anuais (sem IVA).....	74
Tabela 0.1 – Descrição dos elementos construtivos da envolvente opaca interior.....	76
Tabela 0.2 – Descrição dos elementos da compartimentação interior	77
Tabela 0.3 – Descrição dos elementos em contato com o solo	78
Tabela 0.4 - Tabela comparativa da aplicação do isolamento no pilar/viga exterior	78
Tabela 0.5 – Tabela comparativa da aplicação do isolamento caixa de estore	78
Tabela 0.6 – Tabela comparativa da aplicação do isolamento na parede em contato com outros espaços interiores	79

Tabela 0.7 – Tabela comparativa da aplicação do isolamento no pilar/viga em contato com outros espaços interiores	79
Tabela 0.8 – Tabela comparativa da aplicação do isolamento no pavimento exterior.....	80
Tabela 0.9 – Tabela comparativa da aplicação do isolamento no pavimento sobre espaço interior.....	80
Tabela 0.10 – Tabela comparativa da aplicação do isolamento na cobertura exterior.....	81
Tabela 0.11 – Tabela comparativa da aplicação do isolamento na cobertura sob espaço interior.....	81
Tabela 0.12 – Tabela comparativa da aplicação do isolamento no pavimento térreo.....	81
Tabela 0.1 – Razão entre o gasto em energia e o custo anual equivalente (<i>CAE</i>) da escola	83
Tabela 0.2 – Razão entre o gasto em energia e o custo anual equivalente (<i>CAE</i>) do supermercado	83

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

CAE – Custo anual equivalente [€/ano]

$CEEIT$ – Custo da Eficiência Energética do Isolamento Térmico [€/ (W/K)]

CF – Cash-flow [€/ano]

COP – “Coefficient of performance” da bomba-de-calor em aquecimento

EER – “Energy efficiency ratio” do chiller em modo de arrefecimento

G – Gasto anual [€/ano]

GD – Graus-dias

i – taxa de atualização para uma análise a preços constantes [/ano]

M_{si} – Massa superficial útil [kg/m²]

n – Período de vida do investimento [anos]

R – Rendimento económico anual [€/ano]

R_s – Resistência térmica do espaço de ar criado entre duas janelas [m².K/W]

R_{se} – Resistência térmica superficial exterior [m².K/W]

R_{si} – Resistência térmica superficial interior [m².K/W]

U – Coeficiente de transmissão térmica superficial [W/m².K]

VLA – Valor líquido atual [€]

VR – Valor residual [€]

$\theta_{ext,v}$ – Temperatura média exterior na estação de arrefecimento [°C]

Siglas

AQS – Águas quentes sanitárias

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

ETICS – External Thermal Insulation Composite System

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

RECS – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

SCE – Sistema de Certificação Energética dos Edifícios

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

O ser humano, desde que encontrou motivos para se estabelecer em comunidade, ou a isso foi forçado, organizando-se progressivamente, procurou sempre formas de melhorar o seu conforto. Com o avanço tecnológico, novas ferramentas e procedimentos permitiram uma evolução em termos da qualidade de vida que em parte se traduz na comodidade procurada e sentida por de cada um. O Homem tem prazer em sentir-se confortável e acomodado seja em que circunstância for: começando pela habitação, passando ao local onde trabalha e até mesmo na forma como se desloca. Por estas razões, engenheiros e arquitetos começaram a focar o seu objeto de estudo em novas formas que contribuam para o desejado conforto. Se inicialmente os meios necessários para alcançar esta comodidade não eram tidos em conta, hoje em dia tem-se a preocupação de gerir da melhor forma os recursos disponíveis da Terra, que são limitados, e a correta utilização dos recursos, bem como de forma a minimizar a poluição inerente a essa utilização.

Desta forma, há muito se começou a discutir medidas e formas de preservação do meio ambiente de maneira a proteger o planeta Terra. A primeira conferência, que marcou o início das tentativas de encontrar um equilíbrio entre o Homem e o meio ambiente, aconteceu em 1972 em Estocolmo, Suécia. Esta conferência abordou o tema das preocupações ambientais de modo a reduzir a degradação do ambiente com um desenvolvimento sustentável. Em 1992, uma conferência relativa a mudanças climáticas, denominada ECO-92 foi organizada pelas Nações Unidas com o objetivo de sensibilizar e alertar as sociedades de que certas medidas teriam de ser executadas de forma a assegurar o futuro das próximas gerações. A ECO-92 acabou por constituir uma base para que em 1997 se assinasse o Protocolo de Quioto, em que os países signatários assumiram tomar medidas para que até 2020 se reduzisse a produção de gases poluentes que afetam a camada de ozono em 20% em relação aos níveis de 1990 [ECEEE, 2011]. Verificou-se que uma das formas para se reduzir a produção de gases do efeito de estufa, de forma a cumprir

das políticas assumidas no tratado, é melhorar as eficiências energéticas dos edifícios. Em muitos destes países, os gastos energéticos dos edifícios rondavam os 40% da energia total consumida que também eram responsáveis por 36% das emissões de CO₂ [Raimundo, 2012]. Em 2010, a União Europeia, depois de lançadas e atualizadas várias diretivas ao longo dos anos, e de forma a cumprir os objetivos assumidos no Protocolo de Quioto, lançou uma nova Diretiva Europeia relativa ao desempenho energético dos edifícios [Directiva EPBD, 2010], impondo que, a partir de 2018, todos os edifícios novos pertencentes a entidades públicas e, depois de 2020, todos os edifícios destinados a prestarem serviços sejam edifícios muito eficientes, de tal forma que as suas necessidades do ponto de vista energético sejam quase nulas. A este tipo de edifícios, deu-se o nome de nZEB (near Zero Energy Buildings).

O conceito de edifício nZEB tem sido amplamente explorado e discutido na literatura. Crawley *et al.* [2009] defende que um nZEB é definido como um edifício que poupa energia de forma passiva, e que ao mesmo tempo, de uma forma ativa, é eficiente do ponto de vista energético de forma a tornar-se um edifício que consuma pouca energia. Acrescenta ainda que a energia consumida por um nZEB provem de fontes de energias verdes, não poluentes, que produzem energia suficiente para as necessidades do mesmo. As fontes de energia mais aplicadas num nZEB são: painéis fotovoltaicos e sistemas de coletores solares para aquecimento de águas sanitárias [Torcellini *et al.*, 2006]. A construção de um edifício que tenha um consumo de energia quase nulo pode exigir elevados custos de construção [Raimundo, 2012], comprometendo o ponto ótimo de rentabilidade económica durante toda a vida útil do edifício, como se mostra na Figura 1.1.

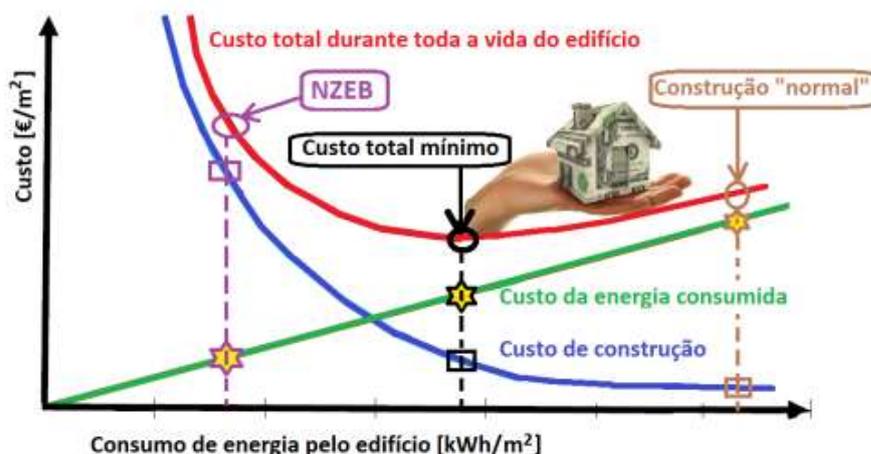


Figura 1.1 – Custo económico durante o ciclo de vida de um nZEB [Raimundo, 2012]

É com base nestes pressupostos que o tema da presente dissertação, “ponto ótimo de rentabilidade económica das soluções construtivas opacas de edifícios localizados em Portugal”, se insere. Os custos de construção de um edifício estão diretamente relacionados com as soluções construtivas utilizadas sejam elas paredes, pavimentos, coberturas, vãos envidraçados, portas, etc.

O presente estudo é um trabalho de continuação de uma dissertação anterior, relativa ao “ponto de rentabilidade económica dos vãos envidraçados em edifícios localizados em Portugal” [Rebelo, 2016]. Agora, o foco do estudo recai sobre a utilização de diferentes soluções construtivas opacas e que impacto têm nos gastos com um edifício ao longo do seu ciclo de vida.

Como breve definição de solução construtiva opaca, pode dizer-se que são um conjunto de elementos utilizados na construção de paredes, de pavimentos e de coberturas dos edifícios, representando uma barreira de proteção entre o interior e o exterior. São, portanto, responsáveis por uma parte significativa dos ganhos e das perdas térmicas de um edifício, as quais, por norma, afetam negativamente o conforto térmico dos ocupantes e os gastos de energia. Segundo entidade gestora do SCE (Sistema de Certificação Energética de Edifícios), as perdas de calor numa habitação de tipologia T3 com 136 m² de área útil são maioritariamente através das soluções construtivas opacas: 23% através das paredes e 32% através das coberturas [Adene, 2016a, 2016b]. Posto isto, para a obtenção do ponto ótimo de rentabilidade económica de um edifício, é necessário reduzir estas perdas recorrendo à aplicação de isolamento térmico. Em adição, os edifícios construídos em Portugal até 1990 não contemplavam qualquer isolamento [Adene, 2016a, 2016b], fator potenciador de elevadas trocas térmicas através da envolvente opaca. A falta de isolamento térmico, para além de afetar o conforto térmico dos ocupantes, afeta, também, a qualidade do ar interior. A qualidade do ar interior depende da renovação do ar e da qualidade da envolvente do edifício, a qual deve ser construída de modo a evitar focos de condensação, fungos e bolores que, por norma, estão associados a um comportamento higrotérmico deficiente do edifício e, cumulativamente, a um isolamento térmico insuficiente.

O tema desta dissertação é relativo à obtenção da rentabilidade económica das soluções construtivas opacas que pode ser atingida através de um equilíbrio entre os gastos iniciais de construção do edifício e os custos para utilizar e manter o mesmo. Todos estes gastos estão, direta ou indiretamente, relacionados com a utilização ou não de isolamento

térmico. No que concerne especificamente à aplicação do isolamento térmico, três opções se colocam quando se projetam as soluções construtivas opacas para se alcançar a rentabilidade económica: o tipo de isolamento, a sua espessura e o seu posicionamento na envolvente opaca.

A escolha do tipo de isolamento mais apropriado deve ser efetuada com base na sua adequabilidade para a função que se deseja (em termos de propriedades químicas, mecânicas e térmicas) e no conceito de Custo da Eficiência Energética do Isolamento Térmico (CEEIT). Este parâmetro não é mais do que uma relação entre o potencial de poupança energética do isolamento térmico em questão e o seu custo de aquisição e aplicação, e que será apresentado mais adiante.

A seleção da espessura de isolamento a aplicar tem de ser efetuada através de um parâmetro (do tipo “custo anual equivalente”) que leve em consideração o custo de investimento inicial requerido e os consumos de energia ao longo da vida útil do edifício [Kaynakli, 2012]. Logo, para determinar a espessura ótima de isolamento térmico é necessário recorrer a simulação do comportamento energético do edifício quando exposto a um determinado clima específico. A espessura ideal depende, também, da tipologia e função do edifício, da forma e orientação do edifício do edifício, dos materiais de construção utilizados, da zona climática, do custo da energia utilizada e dos tipos e eficiência dos aparelhos utilizados (iluminação, AVAC, etc.) [Al-Khawaja, 2004; Al-Homoud, 2005].

Os critérios de avaliação do melhor posicionamento do isolamento térmico (ou seja, do tipo de aplicação do isolamento, se pelo interior, intermédio ou pelo exterior da solução construtiva opaca) são idênticos aos da espessura de isolamento. Consoante o posicionamento do isolamento, as soluções construtivas opacas comportam-se termicamente de maneira diferente uma vez que as massas superficiais úteis variam e, portanto, também as inércias térmicas dos edifícios, contribuindo assim para uma maior (ou não) estabilidade térmica do edifício que em alguns casos pode ser benéfica do ponto de vista energético, mas que para outros não [Ferreira *et al.*, 2016]. Para além disso, a posição do isolamento na envolvente opaca expõe (ou não) pontes térmicas lineares que influenciam negativamente o comportamento térmico do edifício. Ao contrário do isolamento térmico pelo exterior e pelo interior, o isolamento intermédio não consegue anular as pontes térmicas lineares. Por sua vez, embora necessitando de mais cuidado, o

isolamento térmico intermédio tem potencial semelhante às outras duas técnicas na minimização das pontes térmicas planas.

Resumindo, pretende-se encontrar as espessuras e os posicionamentos de isolamento que contribuam para o ponto ótimo de rentabilidade económica de um edifício localizado em cada uma das três zonas climáticas distintas que caracterizem os diferentes tipos de situações climáticas em Portugal.

1.2. Objetivos

Com a realização deste trabalho pretende-se, em primeiro lugar determinar o ponto ótimo de rentabilidade económica das soluções construtivas opacas utilizadas na construção e na reabilitação de edifícios localizados em Portugal. Procura-se relacionar os custos de investimento inicial na construção de um edifício com a sua eficiência energética de modo a identificar as soluções construtivas opacas mais adequadas para os edifícios portugueses.

Numa primeira fase pretende-se identificar o tipo isolamento térmico a utilizar. De entre os tipos de isolamento com características químicas, físicas e térmicas adequadas, identificar-se-á o economicamente mais viável. Para o efeito recorrer-se-á ao conceito de custo da eficiência energética do isolamento térmico (CEEIT).

Pretende-se ainda analisar o impacto da utilização de isolamento em edifícios localizados em três zonas climáticas distintas de Portugal continental (com climas suave, moderado, intenso), de forma a determinar a solução de isolamento térmico ideal. Ou seja, a solução de isolamento mais rentável do ponto vista económico, em termos de espessura a aplicar e do seu posicionamento (pelo interior, intermédio ou pelo exterior) na solução construtiva opaca, consoante a tipologia de edifício e a região climática em que o mesmo se insere. Para o efeito será necessário recolher preços de isolamentos vendidos em Portugal, bem como os da sua aplicação na construção, para que se possa prever que espessura e posicionamento tornam o edifício mais económico. Esta avaliação tem como critério de seleção um indicador económico calculado recorrendo ao software SEnergyEd que se designa por custo anual equivalente (CAE) do ciclo de vida completo do edifício [Raimundo, 2017].

Por fim, calcular-se-ão as poupanças em termos percentuais entre aos resultados obtidos para os custos anuais equivalentes (*CAE*) ótimos e os casos em que o edifício não tem isolamento, para se perceber se realmente vale a pena isolar um edifício não só do ponto de vista económico mas também ambiental.

2. FERRAMENTAS DE CÁLCULO

No presente estudo optou-se por utilizar uma metodologia estruturada aplicada sequencialmente com o objetivo de calcular o custo anual equivalente (*CAE*) do edifício em função da composição da sua solução construtiva. Para o efeito recorreu-se à utilização de três programas de cálculo: o CalProTerm [Raimundo, 2016], o Gerador de Preços Cype [Cype, 2016] e o SEnergEd [Raimundo, 2017].

A folha de cálculo CalProTerm permitiu calcular os valores do coeficiente global de transmissão de calor (U) e da massa superficial útil (M_{si}) de uma determinada solução construtiva opaca. Isto é, determinar estes valores para as diferentes soluções construtivas que têm diferentes espessuras e posicionamentos relativos do isolamento térmico. Seguidamente, calculou-se o preço, sem IVA, por metro quadrado da solução construtiva opaca em questão com o auxílio do programa Gerador de Preços da CYPE Ingenieros. Posteriormente, recorrendo ao *software* SEnergEd para obter o custo anual equivalente (*CAE*) do ciclo de vida completo de cada edifício e os gastos energéticos anuais com cada função (aquecimento, arrefecimento, iluminação, ...).

2.1. Folha de Cálculo CalProTerm

A folha de cálculo CalProTerm [Raimundo, 2016] é uma base de dados de materiais de construção de edifícios, permitindo ainda determinar as propriedades termofísicas de um conjunto muito alargado de soluções construtivas de edifícios. Esta folha de cálculo foi desenvolvida com o objetivo de servir de apoio ao projeto e aos processos de certificação energética de edifícios no âmbito do SCE [SCE, 2006 e 2013].

Antes de se utilizar a CalProTerm, é importante que os elementos construtivos estejam bem definidos (casos para elementos sem isolamento, com isolamento pelo interior, intermédio e exterior), ou seja, saber que materiais de construção constituem as soluções, bem como a espessura de cada camada e qual a ordem com que aparecem na solução construtiva em questão. No presente trabalho a folha de cálculo CalProTerm foi utilizada essencialmente para determinar os valores do coeficiente global de transmissão de calor (U) e da massa superficial útil (M_{si}) das soluções construtivas opacas.

2.2. Gerador de Preços CYPE

O Gerador de preços Cype [Cype, 2016] é um *software* gratuito desenvolvido pela Cype Ingenieros, que o disponibiliza online em <http://www.geradordeprecos.info/>. Este *software* permite consultar os custos de construção atual de cada solução ajustados aos preços de mercados, permitindo, assim, a calcular o custo real de construção de um edifício. Os preços fornecidos têm em conta os custos de aquisição de material e os gastos relativos à mão de obra de execução, e são fornecidos em euros por metro quadrado. Estes preços são relativos ao custo de cada camada que compõe os diferentes elementos construtivos. Simultaneamente, foram criadas folhas de Excel para cada um desses elementos construtivos em que se somam os custos necessários das camadas obtendo-se o preço final de construção dessa solução construtiva. Note-se que os custos não contabilizam o IVA.

Para que os valores se aproximem o mais possível dos custos reais inerentes aos preços de construção em Portugal decidiu-se decompor o preço dado pelo Gerador de Preços Cype. Para o efeito retirou-se o custo de aquisição do material de isolamento do valor total indicado pelo Gerador de Preços Cype para a camada de isolamento. Ficou-se assim a conhecer os gastos em mão de obra para a aplicação do isolamento. Posteriormente, somou-se este valor aos preços médios de aquisição, das diferentes espessuras de isolamento, fornecidos por várias empresas vendedoras em Portugal do isolante térmico em questão. Estes preços médios do isolamento, consoante a sua espessura, podem ser consultados no Capítulo seguinte. Obteu-se, assim, o custo total de construção da camada relativa ao isolamento ajustado ao mercado português. A espessura da placa de isolamento praticamente não afeta o custo da sua aplicação em obra. Ou seja, calcularam-se estes custos para as camadas com as diferentes espessuras utilizadas no estudo, para os três casos de aplicação do isolamento (interior, intermédio, exterior).

Obtidos os preços de construção de cada solução construtiva opaca não isolada (ou seja, sem incluir o isolamento térmico), para o que se utilizou o Gerador de Preços Cype, e conhecido o custo de aplicação das camadas de isolamento térmico, é possível por soma direta obter o custo de construção de cada solução construtiva opaca (em €/m²).

2.3. SEnergEd – Simulação Dinâmica de Edifícios

Para determinar o Custo Anual Equivalente (*CAE*) do ciclo de vida completo de cada edifício recorreu-se à versão 3.32 do *software* SEnergEd [Raimundo, 2017]. Para que este programa consiga calcular o *CAE* de um edifício é necessário fornecer-lhe um conjunto alargado de informação, nomeadamente: localização do edifício; dimensões e características arquitetónicas do mesmo; densidades de ocupação e de equipamentos energéticos (não AVAC); perfis de uso e de funcionamento dos equipamentos energéticos (não AVAC); potências, eficiências, set-points e perfis de funcionamento dos sistemas AVAC; características dos envidraçados; características das soluções construtivas opacas (U , M_{si} , ...); preços de projeto, de aquisição, de instalação ou de construção de todos os componentes do edifício; preços unitários de compra da energia consumida; e gastos de demolição e remoção de escombros.

O *software* SEnergEd conjuga uma simulação do comportamento térmico e energético do edifício em questão com uma análise económica do seu ciclo de vida completo. A simulação do comportamento térmico e energético do edifício assenta numa metodologia de cálculo, baseada no modelo dinâmico monozona 5R1C da norma ISO 13790 [2006], e descrita em Raimundo [2008]. A análise económica do ciclo de vida do edifício é efetuada com recurso a uma metodologia de análise de projetos de investimento, descrita no texto de apoio à disciplina Economia e Gestão Industrial do MiEM [Raimundo, 2015]. Este *software* sintetiza os vários resultados económicos parciais no *CAE* do ciclo de vida do edifício.

O programa SEnergEd já foi utilizado no âmbito de teses de MiEM, nomeadamente por Claro [2015], que o validou por comparação das previsões do mesmo com os consumos energéticos reais de uma escola secundária, e por Rebelo [2016], que o utilizou para analisar as características ótimas de rentabilidade económica dos envidraçados aplicados em edifícios localizados em Portugal.

Para se perceber melhor a metodologia 5R1C utilizada pelo programador para simular o comportamento térmico e energético do edifício, mostra-se um esquema na na Figura 2.1, adaptado de Raimundo [2008]. Este esquema térmico é formalmente análogo a um circuito elétrico constituído por cinco resistências e uma capacitância, daí o 5R1C.

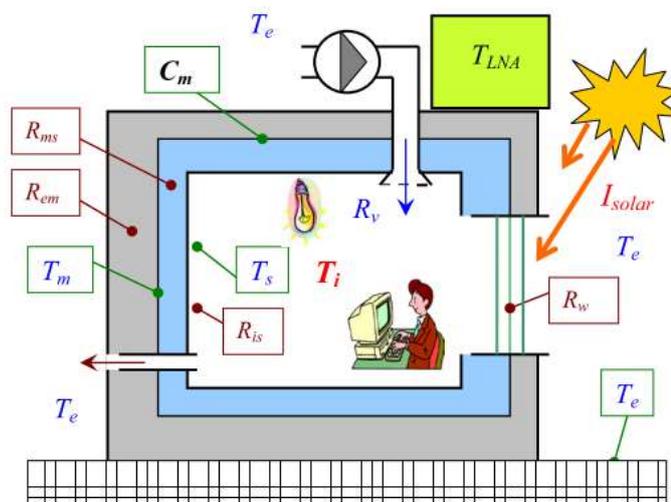


Figura 2.1 - Esquema do método 5R1C

O esquema térmico do modelo 5R1C constitui um balanço térmico em regime transitório em que são consideradas a temperatura do ar no interior do edifício (T_i), a temperatura média das superfícies da envolvente em contato com o ar interior (T_s) e a temperatura média da massa térmica (T_m), esta última suposta concentrada no interior das soluções construtivas opacas da envolvente exterior. As resistências do circuito representam: R_{is} – resistência térmica entre as superfícies interiores e o ar interior; R_{ms} – resistência térmica entre a massa térmica e as superfícies interiores dos elementos opacos; R_{em} – resistência térmica entre o ambiente exterior e a massa térmica; R_w – resistência térmica dos vãos envidraçados; e R_v – resistência térmica associada ao caudal de ar novo introduzido no espaço. A capacitância C_m corresponde à massa de inércia concentrada no interior dos elementos opacos da envolvente exterior. São tidos em conta ainda os valores da radiação solar incidente (I_{solar}) e a temperatura dos locais não climatizados (T_{LNA}).

A utilização do *software* SEngEd pressupõe que são válidos um conjunto de requisitos [Raimundo, 2008], nomeadamente que toda a área climatizada pertence à mesma “zona térmica” e que os sistemas de aquecimento, de arrefecimento e de ventilação são únicos e servem toda a zona climatizada do edifício. Desta maneira, assume-se que todos os espaços climatizados se encontram à mesma temperatura e que estão sujeitos aos mesmos set-points para a climatização interior. É requerido, ainda, que 96% do caudal de ar novo seja insuflado nos espaços da zona climatizada, para os casos em que a ventilação seja mecânica.

Em relação à análise económica executada pelo SEnergEd, o valor que foi alvo de comparação ao longo das simulações foi o custo anual equivalente (*CAE*) que engloba outro valor importante ao estudo, o consumo anual de energia do edifício. O *CAE* é um indicador de rentabilidade económica que, como explicado anteriormente, expressa o valor médio gasto em cada ano no investimento inicial na construção do edifício assim, como os gastos para assegurar as necessidades energéticas ao mesmo ao longo do seu ciclo de vida.

A metodologia de cálculo implementada no SEnergEd encontra-se descrita no texto de apoio à disciplina Economia e Gestão Industrial do curso MIEM [Raimundo, 2015] no DEM-FCTUC. Começa-se por definir os gastos (*G*) e os rendimentos (*R*) ao longo do ano. Os gastos anuais (*G*) devem-se ao consumo de energia, a trabalhos de manutenção e conservação dos equipamentos e do edifício e ainda ao pagamento dos impostos, por como exemplo, o imposto municipal sobre imóveis (IMI). Os rendimentos anuais (*R*) resultam do aluguer de espaços pertencentes ao edifício em questão ou ainda da venda de energia elétrica proveniente das fontes de energias renováveis do edifício. A diferença entre os rendimentos (*R*) e os gastos (*G*) traduz o saldo entre os fluxos económicos de entrada e saída ao longo do ano que se designa por *cash-flow*.

Para efeitos deste trabalho é assumido que o ciclo de vida de um edifício, ou seja, a sua vida útil, é de 50 anos, o que corresponde a um período de análise económico-financeira (*n*) igual a 50 anos. Decorridos os 50 anos, isto é, no fim de vida do edifício a demolição e remoção dos escombros é subtraída ao valor do terreno. A diferença destes valores designa-se por valor residual (*VR*). Neste estudo assume-se que a taxa de inflação anual média prevista para o período de análise é $i_f = 3,0 \%$ /ano, e que o custo médio ponderado da utilização de capital para uma análise a preços constantes, também conhecido por taxa de atualização (*i*), é igual a esta taxa de inflação, ou seja, $i = 3,0 \%$ /ano. Resta definir o conceito de investimento global (*I₀*) que corresponde a todos os gastos necessários para construir e tornar funcional o edifício. Ao investimento global estão associados recursos financeiros para a aquisição do terreno, construção do edifício e todos os equipamentos necessários, entre outros. Definidos estes indicadores é possível determinar o valor líquido atual (*VLA*) e posteriormente o custo anual equivalente (*CAE*).

O valor líquido atual de um projeto representa o lucro ou prejuízo global do projeto quando atualizado para o instante inicial, exprimido na seguinte equação

$$VLA = \frac{VR}{(1+i)^n} - I_0 - \sum_{k=0}^n \frac{R_k - G_k}{(1+i)^k} \quad (2.1)$$

de onde se percebe que terá um valor negativo uma vez que os gastos anuais são superiores aos rendimentos para os edifícios estudados e, portanto, a soma do segundo e terceiro termo (que são negativos) será superior à do primeiro termo (positivo). O custo anual equivalente (*CAE*) está diretamente relacionado com o valor líquido anual (*VLA*) como se mostra na seguinte equação

$$CAE = -VLA \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.2)$$

As alterações produzidas pelos inputs, coeficiente de transmissão térmica (*U*), massa superficial útil (*M_{si}*) e custo das soluções construtivos por metro quadrado, que dependem da espessura e posicionamento do isolamento, vão alterar os valores investimento global (*I₀*) e os gastos anuais (*G*), que por sua vez alteram também os valores do valor líquido anual (*VLA*) e finalmente o do custo anual equivalente (*CAE*). Desta forma, comparam-se os valores do custo anual equivalente (*CAE*) encontrando aquele que for mais baixo e, portanto, mais rentável do ponto de vista económico.

3. MATERIAL

3.1. Clima de Portugal

Para o presente estudo é determinante definir a zona na qual o edifício em análise está localizado. Em Portugal Continental, o Sistema de Certificação Energética de Edifícios [SCE, 2013] define 3 zonas distintas tanto para a estação de arrefecimento, o Verão (V1, V2 e V3) como para a de aquecimento, o Inverno (I1, I2 e I3). As zonas climáticas são definidas com base no número de graus-dias de aquecimento, GD , e na temperatura exterior média, $\theta_{ext,v}$, para a estação de arrefecimento. As diferenças climáticas entre os zonamentos distinguem o tipo de clima em cada concelho, sendo que V1 e I1 indicam um clima mais suave e, opostamente, V3 e I3 um clima mais severo.

Ao longo de todo o estudo os diferentes edifícios foram simulados em diferentes localidades do país de modo a verificar-se realmente o comportamento destes em situações diversas. Cada um dos concelhos escolhidos representam um conjunto de zonas climáticas que reúnem as condições mais suaves (I1-V1), moderadas (I2-V2) e mais intensas (I3-V3) e que são, respetivamente: Odemira, Ansião e Mirandela. De realçar que segundo o SCE 2013 [SCE, 2013], o clima de Odemira é I1-V3 (seja qual for a altitude), sendo I1-V1 segundo o SCE 2006 [SCE, 2006]. Já, se for escolhida uma altitude igual à de referência desse concelho, em ambos as versões do SCE o clima de Ansião é I2-V2 e o de Mirandela I3-V3. Logo, é duvidoso chamar suave ao verão de Odemira. A localização geográfica destes concelhos apresenta-se na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Localização do concelho de Odemira, Ansião e Mirandela no mapa de Portugal [Google, 2016a]

3.2. Edifícios em Estudo

Este subcapítulo destina-se a descrever os edifícios que foram utilizados nas simulações. Dando continuidade a trabalhos anteriores, Claro [2015] e Rebelo [2016], selecionaram-se cinco edifícios distintos: edifícios residenciais (apartamento e moradia), de serviços (clínica e escola) e de comércio (supermercado). Pensa-se que com esta lista se tem uma boa abrangência de tipologias de edifícios, pois incluem-se os dois tipos de edifícios residenciais mais comuns, um edifício de serviços de baixas cargas térmicas internas de utilização permanente (a clínica), um edifício de serviços de baixas cargas térmicas internas de utilização intermitente (a escola) e um edifício de comércio de altas cargas térmicas internas de utilização intermitente (o supermercado).

3.2.1. Apartamento

O apartamento em estudo está inserido num edifício de cinco andares. O edifício é constituído por uma garagem comum no piso -1; dois espaços comerciais no piso 0; e dois apartamentos, T3 e T4, em cada um dos restantes pisos (pisos 1, 2 e 3), perfazendo um total de oito frações autónomas – seis residências e duas comerciais. Em áreas de circulação comum o edifício tem elevadores e uma escada de serviço sem abertura para o exterior, sendo que a entrada se localiza na fachada voltada a Sul.

A fração autónoma estudada tem uma tipologia T3 e localiza-se no piso 2 do edifício. Apresenta uma área total de pavimento de 109,40 m² com um pé-direito de 2,60 m, compartimentada numa sala, uma cozinha, duas instalações sanitárias, três quartos, um vestíbulo, um espaço de circulação, um espaço de arrumos e três varandas exteriores. Relativamente aos vãos envidraçados, uma área total de 21,32 m² dividida por oito vãos. A planta do apartamento é apresentada na Figura 3.2 e para uma melhor compreensão pode ser consultada com mais detalhe em Raimundo *et al.* [2011a].



Figura 3.2 – Planta do apartamento T3 do piso 2 [Raimundo et al, 2011a]

A taxa de ocupação diária ao longo de uma semana para uma fração autónoma de carácter residencial e tipologia T3 é apresentada na Tabela 3.1. O perfil de funcionamento considerou-se 100% ao longo do ano à excepção do mês de agosto em que o funcionamento se reduz em 50%.

Tabela 3.1 – Perfil de ocupação para o edifício

Perfil de ocupação					
Para o edifício a funcionar a 100%					
2ª a 6ª feira		Sabados		Domingos	
Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)
0 - 1	100	0 - 1	100	0 - 1	100
1 - 2	100	1 - 2	100	1 - 2	100
2 - 3	100	2 - 3	100	2 - 3	100
3 - 4	100	3 - 4	100	3 - 4	100
4 - 5	100	4 - 5	100	4 - 5	100
5 - 6	100	5 - 6	100	5 - 6	100
6 - 7	100	6 - 7	100	6 - 7	100
7 - 8	60	7 - 8	100	7 - 8	100
8 - 9	40	8 - 9	100	8 - 9	100
9 - 10	0	9 - 10	75	9 - 10	50
10 - 11	0	10 - 11	75	10 - 11	50
11 - 12	0	11 - 12	100	11 - 12	100
12 - 13	30	12 - 13	100	12 - 13	100
13 - 14	30	13 - 14	100	13 - 14	100
14 - 15	0	14 - 15	50	14 - 15	25
15 - 16	0	15 - 16	50	15 - 16	25
16 - 17	0	16 - 17	50	16 - 17	25
17 - 18	50	17 - 18	50	17 - 18	25
18 - 19	100	18 - 19	50	18 - 19	25
19 - 20	100	19 - 20	100	19 - 20	100
20 - 21	100	20 - 21	100	20 - 21	100
21 - 22	100	21 - 22	100	21 - 22	100
22 - 23	100	22 - 23	100	22 - 23	100
23 - 24	100	23 - 24	100	23 - 24	100

Relativamente ao aquecimento de águas sanitárias, este é garantido através de um sistema composto por um conjunto de painéis solares térmicos com 4,7 m², instalados no terraço orientados a Sul, com uma inclinação de 40°, sendo o sistema de apoio baseado numa caldeira de gás natural.

Quanto aos custos de investimento inicial, todos os espaços interiores do apartamento são considerados úteis. No entanto, é necessário reparar que no separador “outros encargos” se considera um custo dos espaços não úteis, como garagens ou armazéns, com um valor de referência de 450 €/m². Para além disso, são considerados gastos não energéticos, por exemplo, manutenção ao longo da vida útil da fração autónoma em estudo bem como os rendimentos. Para o caso do apartamento, os rendimentos são nulos uma vez que nem se vende energia nem se arrenda o espaço. Todos estes valores estão apresentados na Tabela 3.2.

É importante realçar ainda que todos os custos de investimento apresentados são os mesmos em todas as simulações, sendo que o investimento em soluções construtivas será a variável em estudo – de onde se obterão diferentes resultados e, portanto, não se apresentam neste subcapítulo.

Tabela 3.2 – Apartamento: custos de investimento, rendimentos e gastos anuais (sem IVA)

Investimento inicial	58 233,97 €
Vãos envidraçados:	3 933,97 €
Terreno e infraestruturas:	15 000,00 €
Sistemas de iluminação:	6 000,00 €
Sistemas de AVAC:	6 000,00 €
Sistemas de água e esgostos:	3 000,00 €
Sistemas para preparação de AQS:	3 000,00 €
Sistemas de energia renovável: (fotovoltaicos, eólicos, biomassa, etc.)	3 000,00 €
Acabamentos e pinturas:	2 000,00 €
Outros encargos (licenças, etc.):	10 000,00 €
Outros encargos:	6 300,00 €

Vida útil do edifício		(Análise a preços constantes)	
Período de vida útil do edifício:		50	anos
Taxa média de inflação neste período:		3,00	%/ano
Rendimentos líquidos de energia vendida:		0,00	€/ano
Rendimentos líquidos de rendas:		0,00	€/ano
Outros rendimentos líquidos:		0,00	€/ano
Gastos em conservação e manutenção:		1 000,00	€/ano
Gastos em impostos (IMI, etc.):		2 000,00	€/ano

3.2.2. Moradia

A moradia em análise corresponde a uma moradia unifamiliar isolada de tipologia T3, constituída por três pisos (0, 1 e 2) com uma área total de pavimento de 167,13 m² e um pé-direito médio ponderado de 2,62 m para todo o espaço útil. A moradia isolada insere-se num terreno de 1 200 m² estando dividida em duas alas, uma correspondente a uma remodelação de um edifício existente e uma completamente nova. Ambas as zonas estão construídas cumprindo os requisitos do SCE 2006 [SCE, 2006]. Relativamente aos vãos envidraçados: os exteriores possuem uma área total de 49,68 m², enquanto que os interiores possuem uma área de 1,75 m². O exterior da moradia é pintado com cores claras.

No Piso 0 da moradia existem espaços fechados destinados a arrumos e afins (não climatizados) e uma zona de estacionamento coberto (mas sem paredes laterais). No Piso 1 existem apenas espaços climatizados: 1 hall de entrada, 1 circulação interior, 1 cozinha, 1 sala (com zonas separadas de jantar e de estar), 1 escritório, 2 quartos e 2 instalações sanitárias. O Piso 2, que constitui um aproveitamento do desvão de cobertura, é formado por uma zona em mezanino aberto para a sala (climatizada) e uma zona de arrumos (não climatizada).

Para uma melhor compreensão a Figura 3.3 ilustra a implantação da moradia e as Figura 0.1, Figura 0.2 e Figura 0.3 do Anexo A ilustram as plantas de cada piso do edifício. Para informação mais detalhada pode consultar-se Raimundo *et al.* [2011b].



Figura 3.3 – Implantação da moradia [Raimundo et al, 2011b]

O pé-direito foi calculado através da média ponderada, uma vez que existem espaços com diferentes pé-direito, como, por exemplo, a sala de estar que nalgumas zonas tem um pé-direito duplo, ocupando os Pisos 1 e 2.

Relativamente ao aquecimento de águas sanitárias (AQS), este é garantido através de um sistema composto por um conjunto de painéis solares térmicos com $4,0 \text{ m}^2$ orientados a Sul e com uma inclinação de 42° , sendo o sistema de apoio uma caldeira a gás natural.

Tal como no caso do apartamento, a moradia é considerada de tipologia T3, o que equivale a uma ocupação de quatro pessoas, e com um perfil de funcionamento de 100% ao longo do ano à exceção do mês de agosto, em que se reduz para 50%.

Quanto aos custos de investimento inicial, e sublinhando novamente, todos os espaços da moradia são considerados úteis para o cálculo.

Por questões de espaço, os fluxos económicos relacionados com a moradia são apresentados na Tabela 0.1 do Anexo A. É de realçar que no separador “outros encargos” se considera um custo dos espaços não úteis com um valor de referência de 450 €/m^2 . Para além disso, são considerados gastos não energéticos ao longo da vida útil da fração autónoma em estudo bem como os rendimentos. Para o caso da moradia, os rendimentos são nulos uma vez que nem se vende energia nem se arrenda o espaço.

Mais uma vez se realça que estes custos de investimento não contabilizam os custos das soluções construtivas opacas tendo em conta que esta é a variável em estudo.

3.2.3. Clínica

Passando agora aos edifícios destinados a prestar serviços, a clínica privada faz parte de um edifício juntamente com uma outra fração autónoma, uma farmácia. Tratando-se de um edifício de apenas dois pisos, Pisos 0 e 1, a clínica ocupa a quase totalidade dos mesmos, enquanto que a farmácia ocupa unicamente uma pequena zona do Piso 0 na esquina entre as fachadas Nordeste e Sudeste. A implantação deste edifício é apresentada na Figura 3.4. Realça-se que quer a clínica quer a farmácia têm sistemas de climatização independentes.



Figura 3.4 – Implantação da clínica [Raimundo et al 2011c]

Relativamente à fração autónoma em estudo, a clínica, está dividida em dois pisos, Piso 0 e Piso 1, totalizando uma área útil de pavimento de 926,70 m² com 3,73 m de pé-direito médio. A clínica possui 49 vãos envidraçados, com uma área total de 192,76 m². O piso 0 tem a forma de um C que se divide em 3 alas diferentes: Nordeste, Sudeste e Sudoeste. Começando pela ala a Nordeste, onde se encontram espaços como a receção, a lavandaria, a cozinha, a sala de jantar e sala comum e as instalações sanitárias. A ala a Sudeste da clínica está reservada para o tratamento dos utentes, onde se localizam um gabinete médico, um posto de enfermagem, um ginásio de fisioterapia, salas (de tratamento

e observações, terapia da fala e desinfecção), um armazém, uma sala técnica e as instalações sanitárias. Finalmente, a ala voltada a Sudoeste é reservada ao internamento de doentes, tendo oito quartos com instalações sanitárias próprias.

Apresentam-se nas Figura 0.4 e Figura 0.5 do Anexo A as plantas dos Pisos 0 e 1 desta clínica, onde se pode constatar que os halls dos Pisos 0 e 1 estão conectados por uma escada interior. A área do Piso 0 é muito superior à do piso 1 que se limita a ocupar apenas a parte do canto Nordeste/Sudeste do edifício. O Piso 1 tem uma forma quadrangular e destina-se à direção e administração da clínica, sendo composto maioritariamente por gabinetes e salas de reuniões. Para uma melhor compreensão pode-se consultar com maior profundidade e detalhe as características deste edifício em Raimundo *et al.* [2011c].

O aquecimento das AQS é garantido através de um sistema composto por um conjunto de dez painéis solares térmicos com $20,0 \text{ m}^2$, orientados para Sudeste, com uma inclinação de 35° e instalados diretamente sobre a cobertura do Piso 0 com esta orientação. O apoio à preparação das AQS é dado por uma caldeira a gás natural.

Apresenta-se na Tabela 0.2 do Anexo A o perfil de funcionamento da clínica. Tratando-se de um estabelecimento de saúde com internamento considera-se os 100% de ocupação entre as 8 e as 17 horas e 50% para as restantes horas, perfazendo as 24 horas diárias. Isto porque ao longo do dia há consultas externas, fazendo com que a ocupação seja maior durante o período diurno. A capacidade máxima da clínica é de 152 ocupantes.

Apresenta-se na Tabela 0.3 do Anexo A a lista de gastos da clínica. Tal como anteriormente, o custo de investimento inicial foi calculado utilizando o *software* Gerador de Preços Cype. Para contabilizar os custos da construção de espaços não climatizados (lavandaria, cozinha ou armazém de produtos farmacêuticos) atribuiu-se um valor médio por área de pavimento de 800 €/m^2 , 450 €/m^2 para espaços não-uteis (garagem ou armazém), como anteriormente, e finalmente para os espaços exteriores 100 €/m^2 . Contrariamente a arbitrado no apartamento e na moradia, a clínica tem um rendimento líquido de $8\,400 \text{ €/ano}$, correspondente ao aluguer da farmácia. Mais uma vez, se realça que os custos das soluções construtivas opacas não são contabilizados nesta Tabela 0.3 do Anexo A.

3.2.4. Escola

Para o outro edifício de serviços do estudo, considerou-se uma escola do ensino secundário localizada na cidade de Coimbra, a Escola Secundária Avelar Brotero. A escola já foi alvo de estudo numa dissertação de MiEM [Claro, 2015], onde se poderão encontrar mais detalhes sobre a mesma. A Figura 0.6 do Anexo A ilustra uma vista geral da fachada principal da Escola Secundária Avelar Brotero localizada em Coimbra.

Conforme se pode verificar na Figura 3.5, a Escola Avelar Brotero está dividida em 5 grandes blocos: A, B, C, D e E. Apresenta-se na Figura 0.6 do Anexo A uma vista geral destes blocos. Os 5 blocos totalizam uma área útil de pavimento de 11 246 m², com um pé-direito médio de 3 m, que se considera para efeitos de trabalho como área climatizada. Desta área 7 669 m² correspondem a salas (de aula, de professores, gabinetes e secretarias), 3 171 m² a espaços comuns (halls, circulações interiores, bar/cantina com cozinha e salão polivalente) e 406 m² a balneários e instalações sanitárias. Existem ainda vários arquivos e arrumos (não climatizados). O Bloco E é constituído pelo campo de jogos do pavilhão gimnodesportivo, o qual se encontra aberto lateralmente ao exterior (logo, espaço não climatizado). Relativamente à área de vãos envidraçados tem-se 1 785 m² de vãos e todas as fachadas estão pintadas de cor clara.

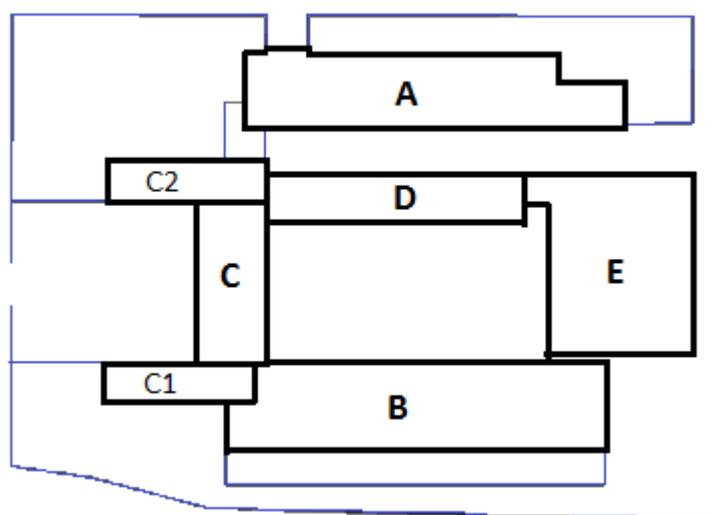


Figura 3.5 – Divisão da escola em diferentes blocos [Claro, 2015]: Bloco A – a Sul; Bloco B – a Norte; Bloco C – a Este; e Bloco E – a Oeste.

Os blocos estão divididos consoante o seu propósito: os blocos A e B são reservados ao ensino sendo que é onde se localizam as salas de aulas; no bloco C encontra-se a biblioteca, a sala de diretores, o bar/cantina com cozinha e o salão polivalente; no bloco D destina-se a salas de professores e balneários; e por fim o bloco E é um pavilhão desportivo que corresponde a um espaço exterior coberto. Tanto o bloco A como o B são constituídos por 3 pisos, enquanto que o bloco C tem 4 e o D apenas 1 piso.

Relativamente ao período de funcionamento, a escola tem uma população estudantil de 1 100 alunos e funciona de segunda a sexta-feira entre as 08:00 e as 18:30 horas para o turno diurno e entre as 19:00 e 23:00 horas para o período noturno.

Apresenta-se na Tabela 0.4 do Anexo A o perfil de funcionamento diário da escola. De realçar que nos períodos de férias a densidade de funcionamento passa para 0% e que nos períodos sem aulas mas com avaliações esta redução é para 50%.

A preparação de AQS é baseada num sistema de 20 painéis solares térmicos, perfazendo 44 m² de área de captação, instalados voltados a Sul e com uma inclinação de 40°. O apoio à preparação de AQS é efetuado por uma caldeira a Gás Natural.

Tal como nos restantes edifícios, apresentam-se, na Tabela 0.5 do Anexo A, os custos de investimento inicial para a construção da escola assim como os rendimentos e gastos a considerar ao longo da vida útil. É importante destacar que a escola prestando um serviço público não paga IMI (Imposto Municipal sobre Imóveis) sendo que, por isso, para o parâmetro dos impostos se considera o valor nulo.

3.2.5. Supermercado

Para o último edifício do conjunto dos edifícios em estudo, escolheu-se um edifício de comércio (um supermercado) de maneira a que este seja representativo de edifícios com elevada carga térmica interna e uma utilização intermitente. O supermercado já foi alvo de estudo numa dissertação de MiEM [Vidigueira, 2013], onde se podem encontrar mais detalhes relativamente a este edifício.

Conforme se pode observar na Figura 3.6, o supermercado tem apenas piso térreo de forma paralelepípedica e é constituído por uma zona climatizada, de 1 143 m² de área de pavimento e um pé-direito de 3,6 m, e uma zona não climatizada (correspondente

ao Armazém e à Sala de máquinas). A zona climatizada é constituída por seis tipos de espaços: uma Zona de vendas (supermercado), quatro Lojas (independentes), um Escritório, uma zona de Talho, uma Cafeteria e as Instalações sanitárias.

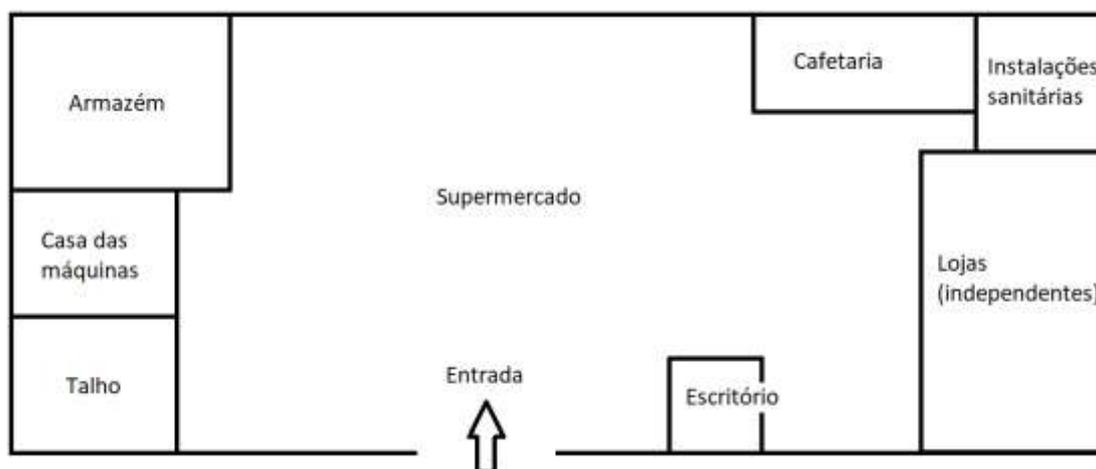


Figura 3.6 – Planta do supermercado [Vidigueira, 2013]

Apresenta-se na Tabela 0.6 do Anexo A o perfil de ocupação do supermercado ao longo do dia. Relativamente ao período de funcionamento, o supermercado funciona ao longo de todo o ano, ou seja, considera-se um funcionamento de 100% em todos os meses. O supermercado está dimensionado para um máximo de 194 ocupantes, sendo que a sua utilização diária começa por volta das 7 horas tendo um período de atividade crescente até as 19 horas, onde começa a diminuir até se atingir as 24 horas, ou seja, o regime de utilização intermitente pretendido para o estudo.

A preparação de AQS é baseada num sistema de painéis solares térmicos com 5,4 m² de área de captação, instalados voltados a Sul e com uma inclinação de 40°, apoiados por uma caldeira a Gás Natural.

Apresenta-se na Tabela 0.7 do Anexo A a lista de gastos de construção e funcionamento do supermercado para um período de vida de 50 anos. Mais uma vez não se apresentam os custos de construção das soluções construtivas opacas, por estes variarem consoante a solução considerada.

3.3. Sistemas Energéticos

Tanto a ventilação como a climatização dos edifícios são asseguradas por unidades de tratamento de ar (UTAs) compostas por ventiladores com 70% de rendimento e um sistema chiller / bomba-de-calor por ciclo de compressão com uma eficiência para o aquecimento de $COP = 4,0$ e para o arrefecimento $EER = 3,0$. Note-se que para a ventilação, que será forçada, não há recuperação de calor do ar de exaustão/rejeição. Quanto à climatização (aquecimento e arrefecimento), estabeleceram-se set-points para temperatura do ar interior com valores compreendidos entre um mínimo de $21^{\circ} C$ e um máximo de $24^{\circ} C$, sendo que todos os sistemas AVAC estão ligados sempre que o edifício esteja ocupado. Para evitar problemas nas comparações dos resultados, admitiu-se que nenhum dos edifícios possuía sistemas de freecooling.

Em relação à preparação de águas quentes sanitárias (AQS), esta será sustentada por um sistema composto por coletores solares térmicos, de área que dependerá das necessidades de cada edifício, e uma caldeira de gás natural com um rendimento de 90%.

Todos os equipamentos instalados para a ventilação e climatização de cada edifício terão um custo de energia associado. Estipulou-se que o custo de energia elétrica é de $0,18 \text{ €/kWh}$, enquanto que para o gás natural se tem um valor de custo de $0,12 \text{ €/kWh}$. Para os casos em que a energia provém de várias fontes, eletricidade e gás, como acontece na cozinha, considerou-se que a razão de utilização é de igualdade, ou seja, consome-se tanto de eletricidade como de gás, ficando, assim, a média ponderada do custo simplesmente a média dos dois preços, $0,15 \text{ € /kWh}$. Estes valores estão em constante alteração pelo que são estipulados de maneira a tentarem aproximar-se de valores reais dos preços de mercado. Ao assumirem-se valores ligeiramente mais altos do que os atualmente praticados teve-se em consideração o rápido aumento dos preços da energia comparativamente à taxa de inflação.

3.4. Vãos Envidraçados

Os vãos envidraçados a considerar neste trabalho são os mesmos de uma dissertação de MiEM anterior [Rebelo, 2016], constituídos por uma janela protegida pelo exterior por um estore elétrico de réguas horizontais metálicas com isolamento pelo interior das réguas. Para identificar a janela que mais contribui para o ponto ótimo de rentabilidade económica dos edifícios Portugueses, Rebelo [2016] classificou as janelas por classes energéticas segundo uma escala: A+, A-, B+, B-, C+, C-, D+, D-, em que A+ identifica as janelas energeticamente mais eficientes e D- as energeticamente menos eficientes.

Rebelo [2016] identificou as janelas da Subclasse C- como as que têm maior rentabilidade económica, como tal, são estas as consideradas para efeito do presente trabalho. As janelas da Subclasse C- são constituídas por caixilho em alumínio com corte térmico e vidro duplo (vidro incolor + espaço de ar + vidro incolor). Apresentam-se na Tabela 3.3 a informação sobre os envidraçados a considerar na persecução do presente estudo, retirada de Rebelo [2016].

Tabela 3.3 – Características técnicas dos envidraçados [Rebelo, 2016]

Subclasse energética	U_{wdn} [W/m ² .K]	$g_{\perp\text{vidro}}$	$g_{\perp 100}$	Custo médio dos Envidraçados s/IVA	
C-	2,465	0,786	0,05	185,00	€/m ²

O valor de U_{wdn} corresponde ao coeficiente de transmissão térmica médio dia-noite do envidraçado. O valor $g_{\perp\text{vidro}}$ corresponde ao valor do fator solar dos vidros, enquanto que o $g_{\perp 100}$ é relativo ao fator solar do envidraçado quando a proteção solar está 100% ativa. Em termos de custos, 125 €/m² dizem respeito à janela e 60 €/m² ao estore elétrico.

3.5. Soluções Construtivas Opacas

3.5.1. Isolamentos térmicos comercializados em Portugal

Para o estudo do ponto ótimo de rentabilidade económica das soluções construtivas opacas foi necessário escolher o isolamento a utilizar. Inicialmente o poliestireno extrudido, denominado XPS, parecia a melhor opção dadas as suas características térmicas, mecânicas e de estabilidade química. Mas, ao fazer-se o levantamento dos preços das diferentes espessuras de XPS vendido em Portugal levantaram-se algumas dúvidas relativamente à sua rentabilidade, isto devido ao seu preço elevado. Desta forma, contactaram-se também empresas que comercializam o poliestireno expandido denominado, denominado EPS (e também conhecido por Esferovite) para diferentes espessuras do isolamento.

De modo a efetuar uma análise comparativa, apresentam-se na Tabela 3.4 os valores dos preços médios praticados em Portugal para as diferentes espessuras de EPS (P_{EPS}) e de XPS (P_{XPS}), bem como os correspondentes desvios padrão (σ), e as respetivas resistências térmicas R_{EPS} e R_{XPS} .

Tabela 3.4 –Preços médios em Portugal, e seus desvios padrões, dos isolamentos EPS e XPS. Estes valores não incluem o IVA nem os gastos de transporte e de aplicação.

Espessura [mm]	EPS			XPS		
	R_{EPS} [m ² .°C/W]	P_{EPS} [€/m ²]	σ	R_{XPS} [m ² .°C/W]	P_{XPS} [€/m ²]	σ
30,00	0,71	2,25	0,51	0,81	7,82	1,71
40,00	0,95	3,00	0,68	1,08	10,43	2,28
50,00	1,19	3,75	0,85	1,35	13,04	2,85
60,00	1,43	4,50	1,02	1,62	15,65	3,42
80,00	1,90	5,99	1,35	2,16	20,86	4,56
100,00	2,38	7,89	1,35	2,70	28,31	2,80

3.5.2. Custo da eficiência energética do isolamento térmico

Para escolher o isolamento térmico mais viável recorre-se aqui ao conceito de Custo da Eficiência Energética do Isolamento Térmico (*CEEIT*), que corresponde à quantia monetária que é necessário investir em isolamento térmico para reduzir as perdas térmicas de um edifício em 1 Watt por cada grau Kelvin de diferença entre as temperaturas do ar no interior e no exterior. Para se efetuar esta avaliação é necessário determinar previamente o coeficiente de transmissão térmica máximo ($U_{m\acute{a}x}$), que corresponde ao valor do coeficiente de transmissão térmica (U_P) da pior solução construtiva opaca possível, o qual pode ser obtido utilizando a expressão (3.1).

$$U_P = \frac{1}{R_{si} + R_p + R_{se}} \quad (3.1)$$

O valor de $U_{m\acute{a}x}$ pode ser obtido considerando uma parede em contacto com o exterior constituída apenas por uma placa muito fina de um material de muito elevada condutividade térmica, para o qual se pode assumir uma resistência térmica condutiva nula, $R_{p,min} = 0,0 \text{ m}^2.\text{K/W}$, e assumindo os valores sugeridos no ITE 50 [Santos e Matias, 2006] para as resistências térmicas superficiais interior e exterior, respetivamente, $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2.\text{K/W}$ e $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2.\text{K/W}$, os quais se reproduzem na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Resistências térmicas superficiais típicas dos edifícios localizados em Portugal. Quadro I.3 do Anexo I do ITE 50 [Santos e Matias, 2006]

Sentido do fluxo de calor	Resistência térmica superficial [[m ² .°C)/W]	
	exterior R_{se}	interior R_{si}
Horizontal ⁽¹⁾	0,04	0,13
Vertical ⁽²⁾	ascendente	0,04
	descendente	0,04

1 – Paredes (até +/- 30° com a vertical)

2 – Coberturas e pavimentos (até +/- 60° com a horizontal)

Calculou-se, assim, um valor para o $U_{m\acute{a}x} = 5,882 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ correspondente ao maior valor U que uma parede vertical pode ter.

Tomando este valor de $U_{m\acute{a}x}$ como referência, é possível calcular o Custo da Eficiência Energética do Isolamento Térmico (*CEEIT*) para cada espessura de isolamento, utilizando para isso a seguinte expressão

$$CEEIT = \frac{P_P}{U_{m\acute{a}x} - U_P} \quad (3.2)$$

em que P_P traduz o preço da construção da parede em contato com o exterior por metro quadrado com um determinado material de isolamento e determinada espessura e U_P representa o coeficiente de transmissão térmica dessa mesma parede.

Para efeitos de simplificação escolheu-se para objeto desta avaliação uma parede em contato com o exterior com isolamento na posição intermédia, isto tendo em conta que é a solução construtiva opaca mais simples e de onde os resultados podem ser facilmente aplicáveis às restantes soluções construtivas.

Apresentam-se na Tabela 3.6 e na Figura 3.7 os resultados obtidos, para os diferentes isolamentos e espessuras, do custo da eficiência energética do isolamento térmico (*CEEIT*).

Tabela 3.6 — Custo da Eficiência Energética do Isolamento Térmico

Espessura [mm]	EPS – Poliestireno expandido			XPS – Poliestireno extrudido		
	U_P [W/(m ² .K)]	P_P [€/m ²]	<i>CEEIT</i> [€/W/K]	U_P [W/(m ² .K)]	P_P [€/m ²]	<i>CEEIT</i> [€/W/K]
30	0,59	63,26	11,94	0,56	68,20	12,80
40	0,51	64,02	11,92	0,48	70,41	13,04
50	0,46	64,97	11,98	0,43	72,62	13,31
60	0,41	65,52	11,98	0,38	74,82	13,61
80	0,35	67,00	12,10	0,32	79,24	14,24
100	0,29	68,90	12,34	0,27	89,89	16,02

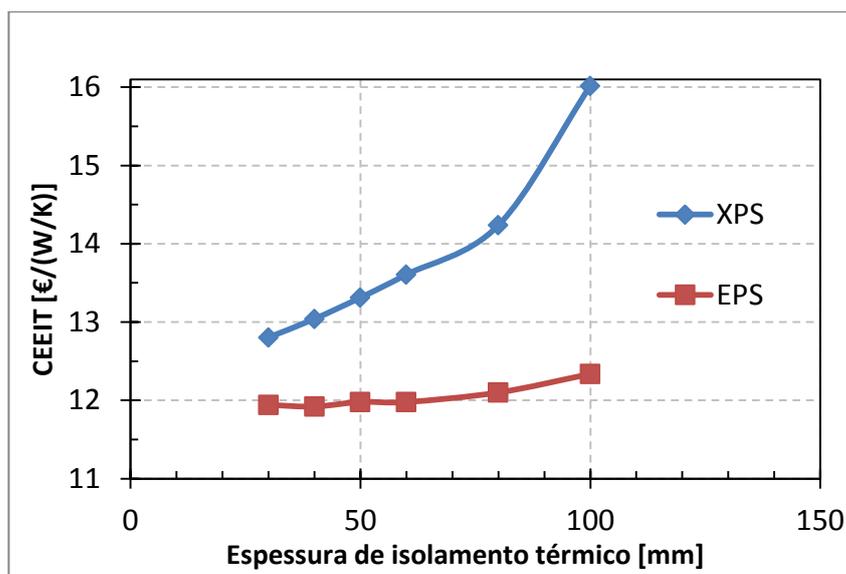


Figura 3.7 – Comparação do *CEEIT* para o EPS E XPS

Uma análise dos valores representados na Tabela 3.6 e na Figura 3.7 permite concluir que, comparativamente ao XPS, o isolamento térmico mais promissor em termos económicos é o EPS. Por esta razão o EPS foi o isolamento térmico selecionado para a realização do presente trabalho.

Repete-se na Figura 3.8 os valores do *CEEIT* para o caso do EPS, mas com uma escala diferente. Da análise desta figura é possível constatar que a condição potencialmente mais favorável é a que resulta da aplicação de uma espessura de 40 mm de EPS. Veremos se isto é, ou não, confirmado pelo Custo Anual Equivalente determinado com recurso à simulação energética dinâmica dos edifícios.

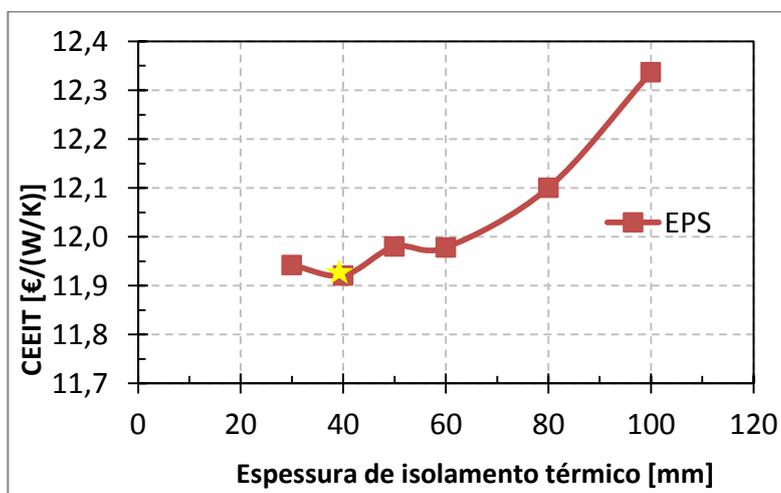


Figura 3.8 – Custo da Eficiência Energética do Isolamento Térmico EPS.

3.5.3. Soluções construtivas opacas de base (sem isolamento)

Para efeitos do presente estudo, impõem-se as mesmas soluções construtivas opacas em todos os edifícios, pois só assim terá validade a sua análise comparativa.

Em todos os edifícios foram utilizadas um conjunto de soluções construtivas que seguem uma estrutura base, à qual posteriormente se adiciona o isolamento térmico. A descrição dos elementos construtivos desta estrutura base encontra-se na Tabela 3.7. Definiu-se, então, a estrutura base para os elementos da envolvente opaca exterior e interior bem como os elementos de compartimentação interior (que foram constantes ao longo das simulações não tendo qualquer tipo de isolamento) e por fim dos elementos em contacto com o solo.

Tabela 3.7 – Descrição dos elementos construtivos opacos base (sem isolamento térmico).

Envolvente Opaca Exterior		
Elemento Construtivo	Espessura [cm]	Descrição (do exterior para o interior)
Parede exterior	38	Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm, Tijolo furado normal de 22 cm, Espaço de ar fracamente ventilado com 1 cm, Tijolo furado normal de 11 cm com 11 cm, Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm.
Pilar/Viga exterior	38	Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm, Betão armado (volume de ferro < 1%) de inertes com 22 cm, Espaço de ar fracamente ventilado com 1 cm, Tijolo furado normal de 11 cm, Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm.
Caixa de estore	35	Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm, Caixa de estore com 31 cm de Poliestireno expandido moldado – EPS, Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm.
Pavimento sobre o exterior	55	Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm, Laje aligeirada a 1 vigota com 38 cm, Betão isolante só com areia leve com 7.5 cm, Betonilha (argamassa) com 5.5 cm, Madeira de carvalho com 2 cm.

Cobertura plana sob o exterior	33,3	Seixo (inerte) calcário com 4 cm, Feltro betuminoso com 0.3 cm, Betonilha (argamassa) com 4 cm, Laje aligeirada a 1 vigota com 23 cm (cerâmico 1 furo, 20cm + betão 3cm, base 16-30cm, Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm.
--------------------------------	------	---

Os restantes elementos construtivos relativamente à envolvente opaca interior, à compartimentação interior e aos elementos em contacto com o solo encontram-se descritos nas Tabela 0.1, Tabela 0.2 e Tabela 0.3 do Anexo B.

Na Tabela 3.8 estão explicitados os valores da massa superficial útil (M_{si}), do coeficiente de transmissão térmica (U) e do custo de cada um destes elementos construtivos.

Tanto as massa superficiais úteis (M_{si}) como os coeficientes de transmissão térmica (U) foram obtidos recorrendo à folha de cálculo CalProTerm [Raimundo, 2016]. O custo de cada elemento foi calculado com o auxílio do *software* Gerador de Preços Cype [Cype, 2017]. É importante realçar que todos os preços não têm o IVA incluído.

Tabela 3.8 – Elementos construtivos opacos que constituem a estrutura base das simulações

Envolvente opaca exterior	M_{si} [kg/m²]	U [W/m².K]	Custo [€/m²]
Parede exterior	150,0	0,872	57,10
Pilar ou Viga	150,0	1,364	141,49
Caixa de estore	38,0	1,010	96,67
Porta blindada exterior	29,0	1,60	808,90
Pavimento sobre o exterior	150,0	1,169	177,21
Cobertura plana não acessível sob o exterior	150,0	2,402	83,63

Envolvente opaca interior	M_{si} [kg/m²]	U [W/m².K]	Custo [€/m²]
Paredes com outros espaços interiores	134,0	1,019	47,02
Pilares e Vigas com espaços interiores	150,0	1,215	141,49
Porta blindada interior	29,0	1,60	808,90
Pavimento sobre espaço interior	150,0	1,015	177,21
Cobertura sob o interior	150,0	1,219	177,17

Elementos de compartimentação interior	<i>Msi</i> [kg/m²]	<i>U</i> [W/m².K]	Custo [€/m²]
Parede fina	172,00	-	36,27
Parede grossa	268,00	-	47,02
Pilares e Vigas	300,00	-	149,49
Porta interior	18,00	-	280,23
Pavimento de compartimentação	300,00	-	177,21
Cobertura de compartimentação	300,00	-	177,17

Elementos em contato com o solo	<i>Msi</i> [kg/m²]	<i>U</i> [W/m².K]	Custo [€/m²]
Pavimento sobre o solo	150,00	1,169	177,21

3.5.4. Soluções construtivas opacas com isolamento térmico

O estudo teve por base diferentes composições de soluções construtivas opacas em que o que se varia é a espessura e o posicionamento do isolamento EPS. Os preços utilizados nas simulações basearam-se no levantamento de mercado feito para as diferentes espessuras do isolamento EPS. Foram utilizadas espessuras de 30, 40, 50, 60, 80 e 100 mm, visto que são as mais comercializadas e vendidas no país. Para alguns casos, em que os resultados eram aparentemente inconclusivos, foi necessário simular os edifícios com uma espessura de 120 mm de isolamento térmico.

Relativamente ao posicionamento do isolamento, foi estudado aplicando-o pelo interior, pelo meio da solução construtiva e pelo exterior. Para cada uma destas situações é necessário definir a sua aplicação tendo em conta que não basta colocar o isolamento pelo interior, intermédio ou exterior mas que são necessárias algumas alterações de ordem prática e de execução nas soluções construtivas, nomeadamente:

- Para isolamentos aplicados pelo interior:

- em todas as paredes, pilares, vigas e caixas de estore é necessária, para efeitos de bom acabamento construtivo, a colocação de uma parede falsa (pladur) em gesso cartonado com 1 cm de espessura para proteger o isolamento;
- em todos os pavimentos coloca-se o isolamento entre a betonilha de regularização e a laje;

- em todas as coberturas é necessário a colocação de teto falso também ele em gesso cartonado com 1 cm.

- Para isolamentos aplicados pelo meio (na caixa de ar):

- em todas as paredes, pilares e vigas das envolventes, o isolamento é colocado diretamente na caixa de ar;
- já nas caixas de estore é aplicado entre a mesma e o acabamento;
- em todos os pavimentos, tendo em conta que é impossível colocar o isolamento no meio da solução dada a inexistência de duas camadas, isola-se apenas pelo interior do pavimento pois esta é a solução mais utilizada na construção hoje em dia;
- em todas as coberturas, tal como acontece nos pavimentos também não é possível a aplicação do isolamento intermédio da laje estrutural e, portanto, o EPS é colocado pelo exterior uma vez que representa a solução mais económica, mais prática e mais utilizada na construção atual;

- Para isolamentos aplicados pelo exterior:

- para as paredes, pilares, vigas e caixas de estore da envolvente exterior, o sistema utilizado para a aplicação do isolamento foi o ETICS (External Thermal Insulation Composite System);
- para paredes, pilares e vigas da envolvente interior, isolando pelo exterior destas soluções obriga a que se aplique um 1 cm de gesso cartonado, o pladur, para proteger o isolamento;
- os pavimentos exteriores e térreos são isolados diretamente pelo exterior não sendo necessário aplicações extra no entanto para pavimentos sobre espaços não úteis ou frações autónomas é necessária a colocação de um teto falso também ele em gesso cartonado de 1 cm;
- as coberturas exteriores planas não acessíveis, são isoladas diretamente pelo exterior entre o seixo calcário e o feltro betuminoso enquanto que as coberturas sob espaços não úteis ou frações autónomas são isoladas entre o acabamento do pavimento e a laje com a betonilha de regularização.

Os restantes elementos construtivos, de compartimentação interior e vãos envidraçados são tomados como constantes ao longo das simulações.

Todas estas alterações têm impacto no coeficiente de transmissão térmica (U), na massa superficial útil (M_{si}) e no custo por metro quadrado dos elementos construtivos. Por isso apresenta-se na Tabela 3.9 e na Figura 3.9 as diferenças destes valores apenas para a parede exterior como caso exemplificativo. Os valores de U , de M_{si} e do Custo dos restantes elementos construtivos são apresentados nas Tabelas 0.4 a 0.12 do Anexo B.

Tabela 3.9 - Tabela comparativa da aplicação do isolamento na parede exterior

Espessura [mm]	Isolamento pelo interior			Isolamento intermédio			Isolamento pelo exterior		
	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]
0	150	0,87	57,10	150	0,87	57,10	150	0,87	57,10
30	9	0,53	69,01	134	0,54	63,26	150	0,53	100,36
40	9	0,47	69,76	134	0,48	64,01	150	0,47	101,11
50	9	0,42	70,51	134	0,43	64,76	150	0,42	101,86
60	9	0,39	71,26	134	0,39	65,51	150	0,39	102,61
80	9	0,32	72,75	134	0,33	67,00	150	0,33	104,10
100	9	0,28	74,65	134	0,28	68,90	150	0,28	106,00
120	9	0,25	77,56	134	0,25	71,81	150	0,25	108,91

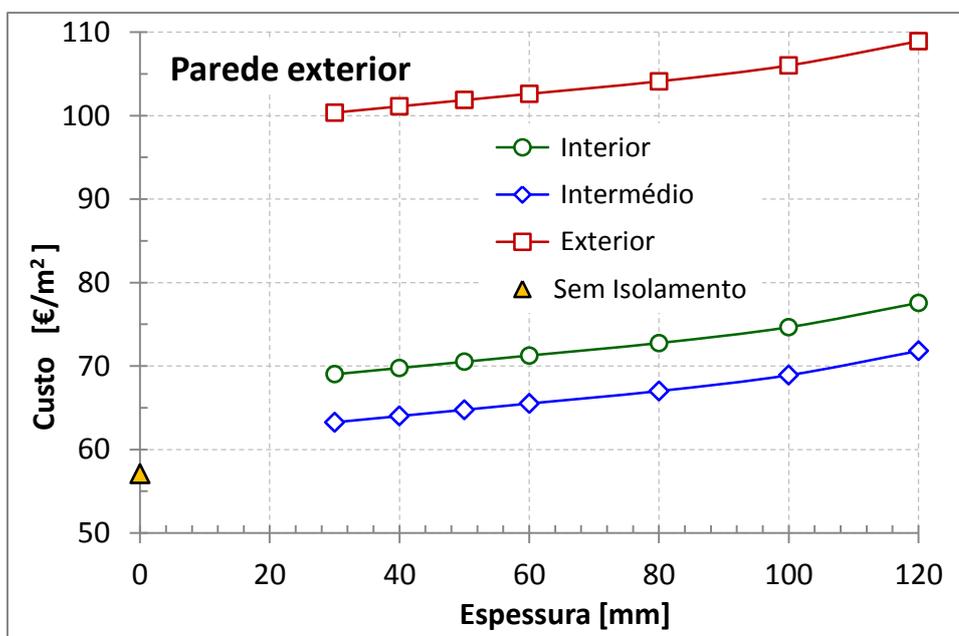


Figura 3.9 – Comparação do custo de construção aplicando o isolamento pelo interior, intermédio e pelo exterior.

Constata-se que isolar pelo exterior é mais caro devido ao elevado preço do sistema ETICS, sendo que a opção mais barata para o isolamento será pelo meio da solução construtiva (na caixa de ar). Realça-se ainda que a massa superficial útil, M_{si} , para isolamentos pelo interior é muito menor do que nas outras duas alternativas, o que também influencia o comportamento térmico dos edifícios. Posto isto, as simulações permitirão perceber se é rentável investir mais ou menos na construção isolando pelo interior, pelo meio (na caixa de ar) ou pelo exterior.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Descritas as metodologias adotadas e os materiais utilizados, realizaram-se as simulações de maneira a obter os dados que permitam tirar conclusões sobre os objetivos propostos. O indicador avaliado e comparado foi o custo anual equivalente (*CAE*), sendo este determinante para a obtenção do ponto ótimo de rentabilidade das soluções construtivas de edifícios localizados em Portugal.

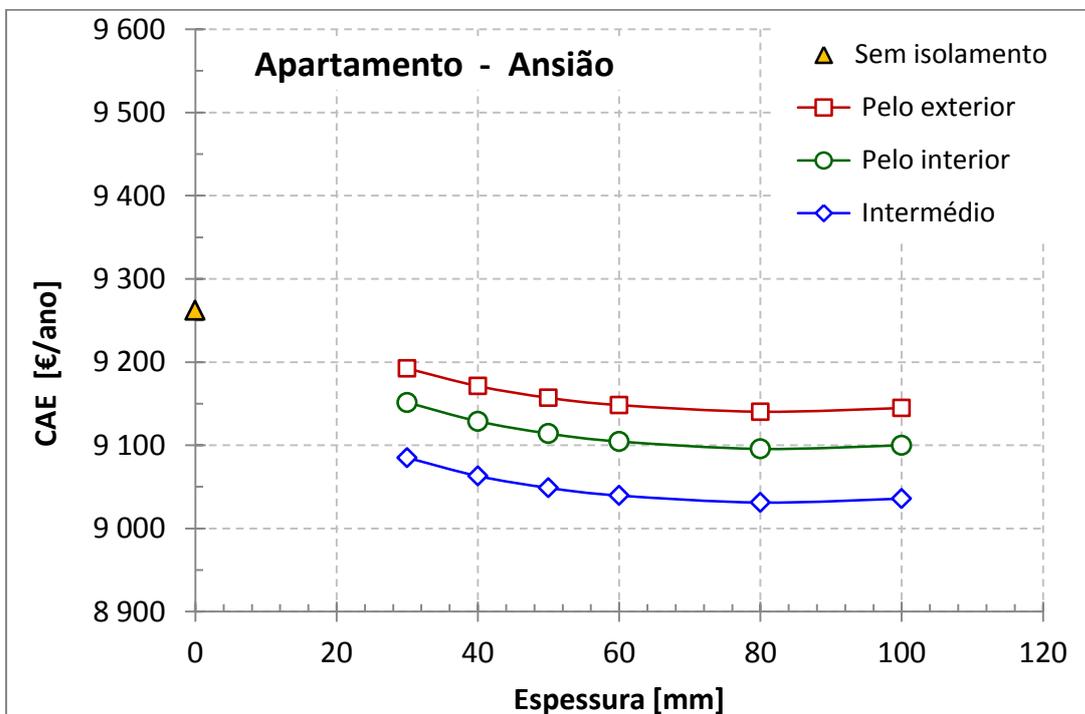
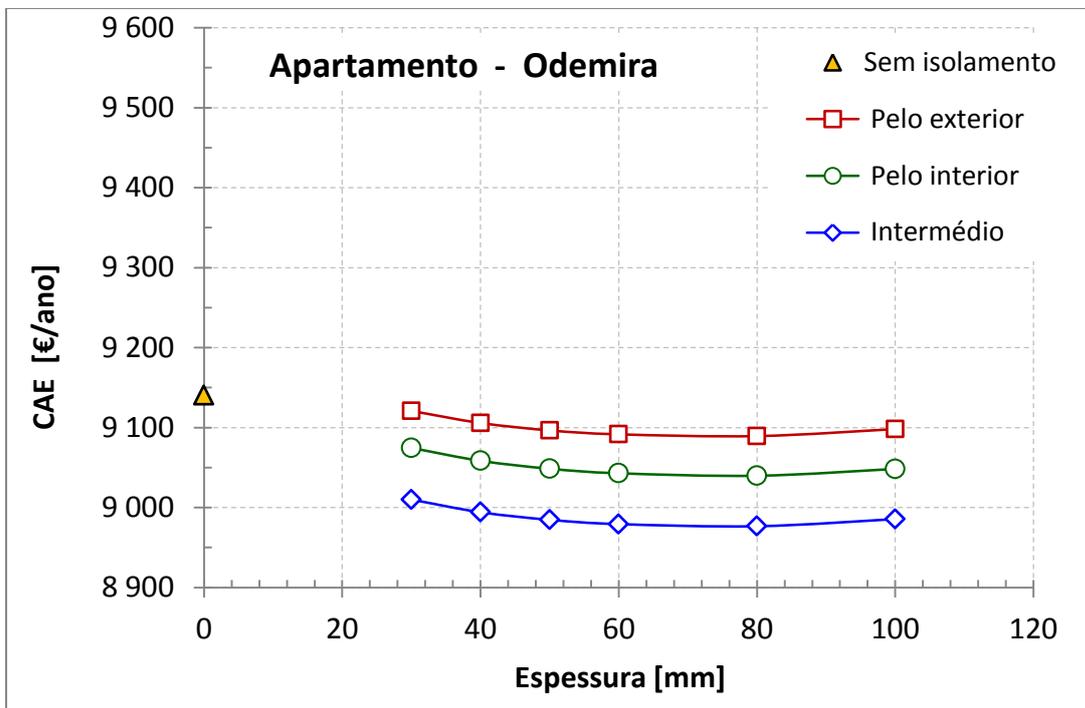
Neste capítulo apresentam-se os valores determinados para o *CAE* dos cinco edifícios selecionados: o apartamento, a moradia, a clínica, a escola e o supermercado, quando localizados em cada um dos concelhos escolhidos: Odemira, Ansião e Mirandela arbitrados, respetivamente, como correspondentes a zonas caracterizadas por ter um clima suave (I1-V1 segundo o SCE 2006 e I1-V3 segundo o SCE 2013), um clima moderado (I2-V2) e intenso (I3-V3).

A previsão do *CAE* de cada edifício, para cada situação de isolamento e cada concelho, foi obtida recorrendo a simulação energética dinâmica utilizando a versão 3.32 do *software* SEnergEd [Raimundo, 2017].

Segue-se a apresentação dos resultados obtidos, onde se identifica a solução acarreta menores custos anuais com o edifício, equivalente aos gastos de investimento, aos fluxos económicos relacionados com o uso do edifício e aos custos de demolição e remoção de escombros. Espera-se assim identificar o ponto ótimo de rentabilidade económica do isolamento térmico dos edifícios em questão quando localizados em Portugal continental.

4.1. Apartamento

Os resultados obtidos para o apartamento apresentam-se na Figura 4.1, que ilustra a variação do custo anual equivalente (*CAE*) em função da espessura e do posicionamento do isolamento, para o edifício localizado em cada um dos três concelhos selecionados para representar o clima de Portugal continental.



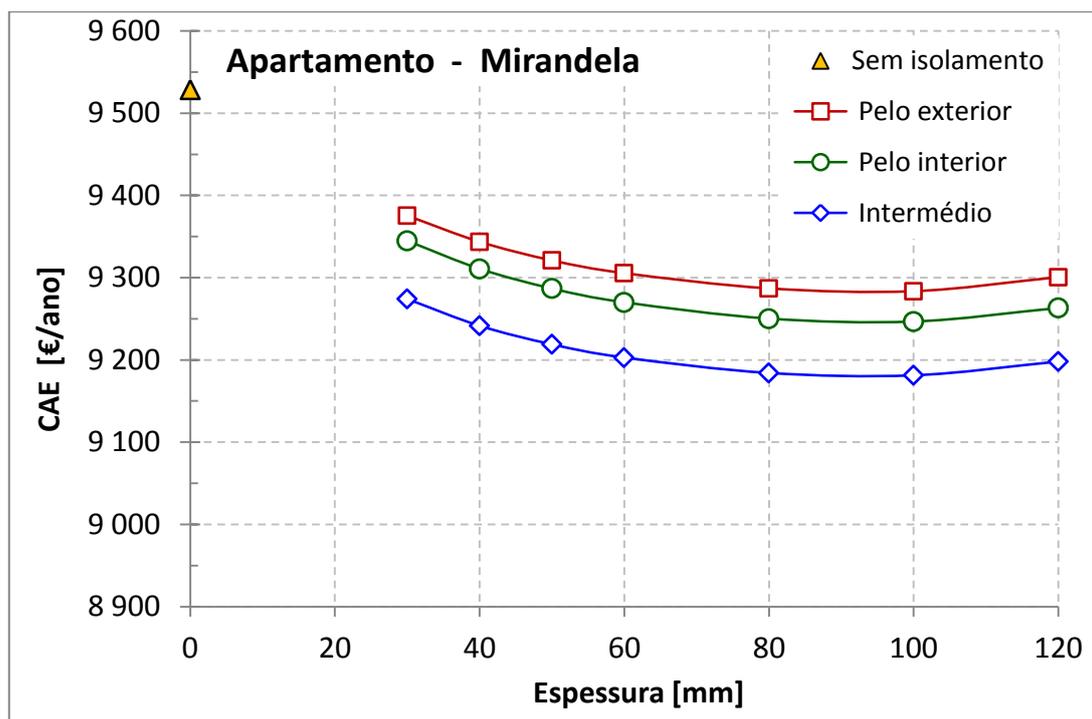


Figura 4.1 – Apartamento: Custo anual equivalente [€/ano] para cada espessura e posicionamento do isolamento, para o edifício localizado em cada um dos três concelhos.

Como primeira conclusão verificou-se que, para a mesma espessura e posição do isolamento, é mais económico construir e manter o apartamento no concelho de Odemira. Os gastos totais em climatização do apartamento no concelho de Odemira são inferiores aos gastos nos outros concelhos, isto porque o clima em Odemira é mais suave, não obrigando a tantos gastos energéticos para a climatização. Contrariamente, e como era expectável, construir o apartamento no concelho de Mirandela obriga a um maior gasto anual equivalente. Isto está de acordo com o afirmado por Gouveia [2008], que concluiu que as necessidades em termos de climatização de edifícios localizados em zonas climáticas mais intensas são maiores quando comparadas a zonas com climas mais amenos.

De uma maneira geral, isolar pelo meio da solução construtiva (na caixa de ar) é economicamente mais rentável independentemente da envolvente climática, devido aos custos acrescidos da aplicação do isolamento tanto pelo interior como pelo exterior.

Relativamente à espessura ideal de isolamento, tanto em Odemira como em Ansião, deve-se aplicar uma placa de isolamento com 80 mm enquanto que no clima mais

intenso, Mirandela, se deve utilizar um isolamento EPS com 100 mm. Neste último caso, foi necessário simular o apartamento com soluções opacas constituídas por uma placa de isolamento de 120 mm para perceber se esta seria mais rentável que uma placa de 100 mm. Como se percebe no gráfico, recorrer a uma placa de 120 mm não compensa do ponto de vista económico sendo que o acréscimo do custo de aquisição desta placa não compensa as poupanças energéticas sendo por isso uma placa de 100 mm a ideal. De notar que a prática comum em Portugal é aplicar nos edifícios residências 60 mm de EPS (ou de XPS) independentemente da região climática em questão.

A não utilização de isolamento aponta sempre para um *CAE* superior comparativamente aos casos do apartamento isolado. O acréscimo dos custos ao longo do ano é, maioritariamente, relativo a gastos em climatização para assegurar as condições de conforto requeridas. Quanto mais intenso for o clima, maiores são os gastos em climatização, sendo que o *CAE*, para os casos em que o apartamento não é isolado, aumenta com o tipo de clima, ou seja, é maior para climas mais rigorosos. É, portanto, mais importante em termos económicos isolar em climas adversos e rigorosos do que em climas suaves.

Outra conclusão a extrair, é a de que existe uma relação constante entre as curvas dos *CAE* para diferentes aplicações do isolamento, o que se traduz no paralelismo destas curvas. As curvas do *CAE* obtidas confirmam uma relação não linear entre este parâmetro e as espessuras de isolamento utilizadas e, portanto, as reduções energéticas tal como Sisman *et al.* [2007] afirmaram.

Finalmente, a abertura das parábolas que descrevem a variação do *CAE* é tanto maior quanto mais ameno for o clima, o que pressupõe que as diferenças entre *CAE*'s para diferentes espessuras de isolamento sejam menores. Por outras palavras, isto significa que os ganhos (ou perdas) económicos obtidos pelo aumento da espessura do isolamento são maiores (a curva é mais acentuada) em climas mais rigorosos.

Mostra-se na Figura 4.2 os gráficos produzidos pelo *SEnergEd* que apresentam as temperaturas do ar interior e exterior e as potências necessárias para a climatização do apartamento. Os gráficos são referentes ao caso do isolamento térmico ótimo (em termos de posição e de espessura) do apartamento localizado em Mirandela visto ser o clima mais agreste.

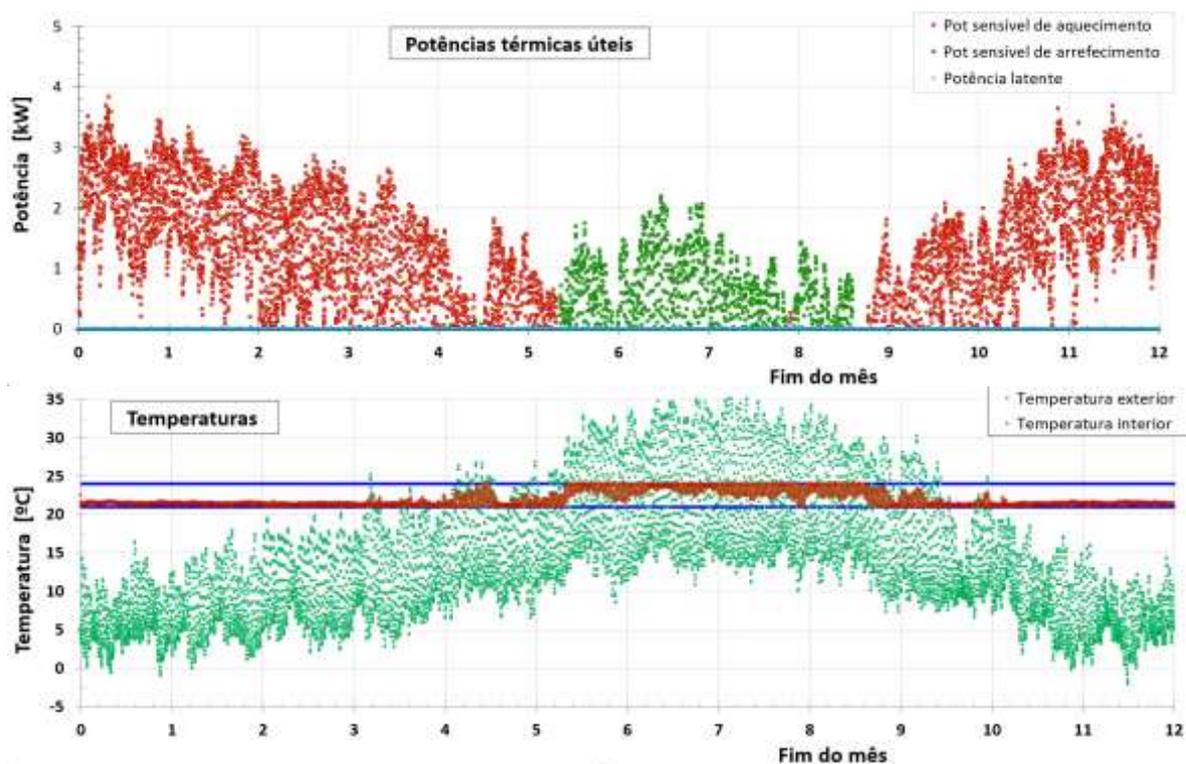


Figura 4.2 – Apartamento: a) Potências no aquecimento e arrefecimento ao longo do ano; b) Temperaturas interiores e exteriores ao longo do ano

4.2. Moradia

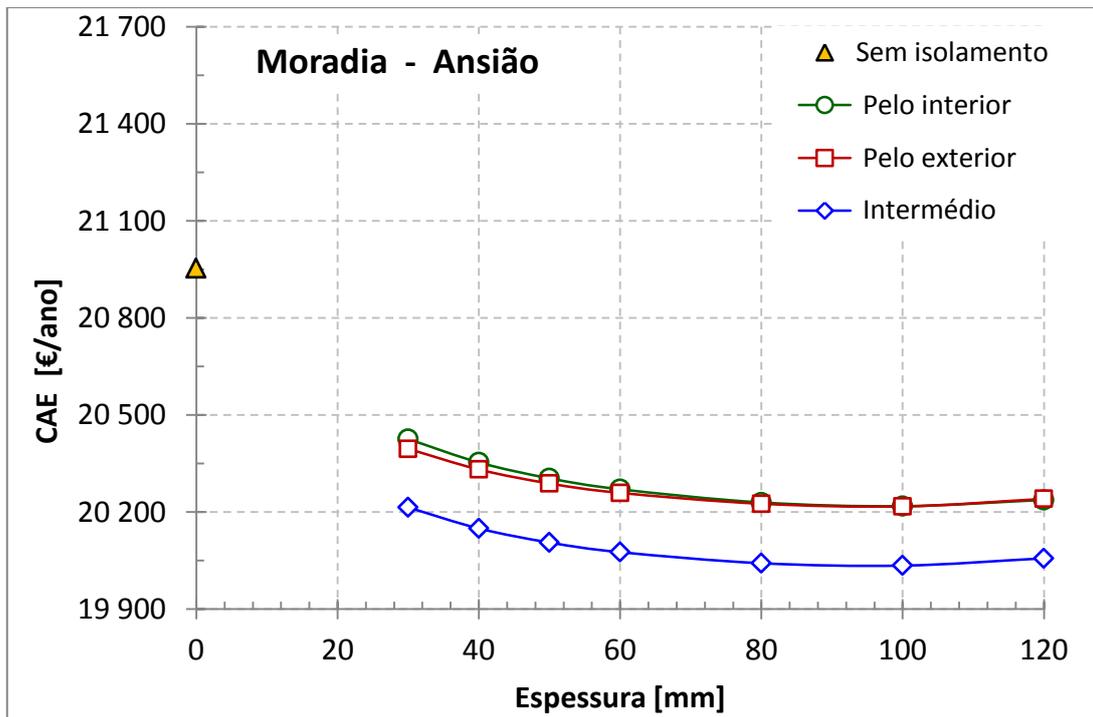
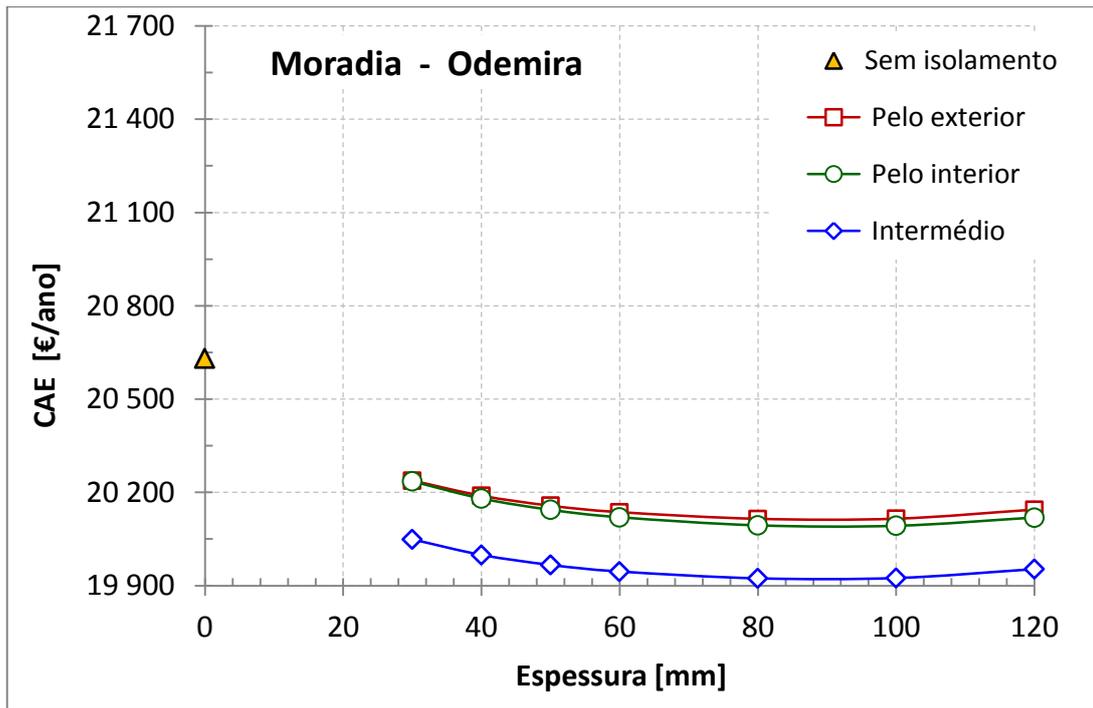
Os resultados para o outro edifício residencial, a moradia, encontram-se representados na Figura 4.3, para o edifício localizado em cada um dos três concelhos selecionados para representar o clima de Portugal continental. Para o caso da moradia, um edifício de ocupação considerada permanente, o posicionamento ideal do isolamento é independente da zona climática é, tal como acontece no apartamento, o mais favorável é aplicar o isolamento térmico pelo meio das soluções construtivas opacas, na caixa de ar das mesmas. Aplicando o isolamento pelo meio combina-se uma inércia média (e nalguns casos forte) com um preço de construção mais baixo, tornando esta escolha a ideal para uma moradia.

Comparando as curvas do *CAE* entre os isolamentos aplicados pelo exterior ou pelo interior, observa-se que para climas suaves, como o de Odemira, isolar pelo interior compensa (mas pouco) comparativamente ao exterior. No entanto, à medida que o clima se vai tornando mais rigoroso, ocorre uma mudança nas curvas do *CAE* em que o isolamento aplicado pelo exterior passa a ser ligeiramente mais rentável que o isolamento aplicado

pelo interior. Isto poderá explicar-se considerando o conceito de inércia térmica de um edifício. Sabe-se que aplicando o isolamento pelo exterior a massa superficial útil das soluções construtivas opacas será maior que a massa superficial útil das soluções construtivas opacas com isolamento aplicado pelo interior. Quanto maior for esta massa superficial útil mais forte será a inércia térmica do edifício. Ou seja, as temperaturas dentro do edifício oscilam menos, são mais constantes, para edifícios de inércia térmica forte. Segundo Ferreira *et al.* [2016] um edifício com uma inércia térmica forte apresenta menos 20% de gastos energéticos que os de um edifício de inércia térmica fraca nas mesmas condições. Em edifícios em que é necessário manter em contínuo condições de conforto térmico é vantajoso ter-se uma inércia forte para que as flutuações térmicas sejam menores. Para além disso, isolar pelo exterior é um tipo de aplicação mais eficaz uma vez que cobre todas as superfícies expostas e minimiza as pontes térmicas do edifício [AREAM, 2007]. Por estes motivos, isolar pelo exterior para os concelhos de Ansião e Mirandela é economicamente mais vantajoso.

As espessuras mais rentáveis e que devem ser aplicadas à moradia correspondem a: 80 mm para o clima suave (Odemira) e 100 mm para o clima moderado (Ansião) e intenso (Mirandela).

Concluiu-se que não isolar continua a ser uma má opção em termos económicos, seja em que zona climática for e isolar a moradia é sempre mais rentável. Tal como no apartamento, quanto mais agreste for o clima maior será a poupança nos gastos quando se isola comparativamente ao caso do edifício sem isolamento.



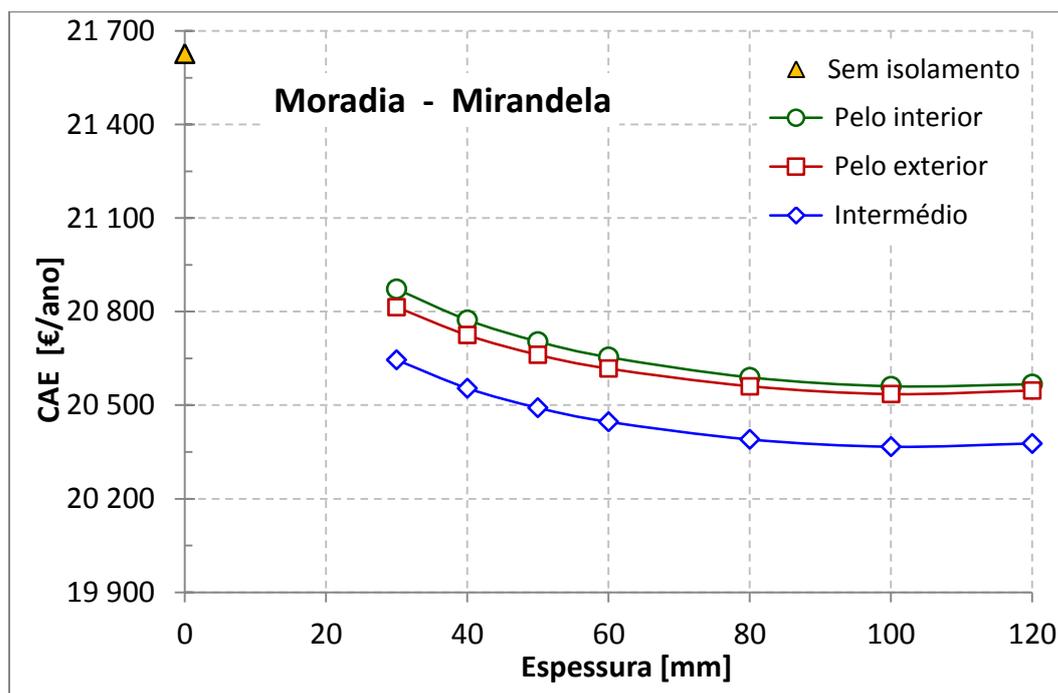


Figura 4.3 – Moradia: Custo anual equivalente [€/ano] para cada espessura e posicionamento do isolamento, para o edifício localizado em cada um dos três concelhos.

Mostra-se na Figura 4.4 os gráficos produzidos pelo SEngEd que apresentam as temperaturas do ar interior e exterior e as potências necessárias para a climatização da moradia.

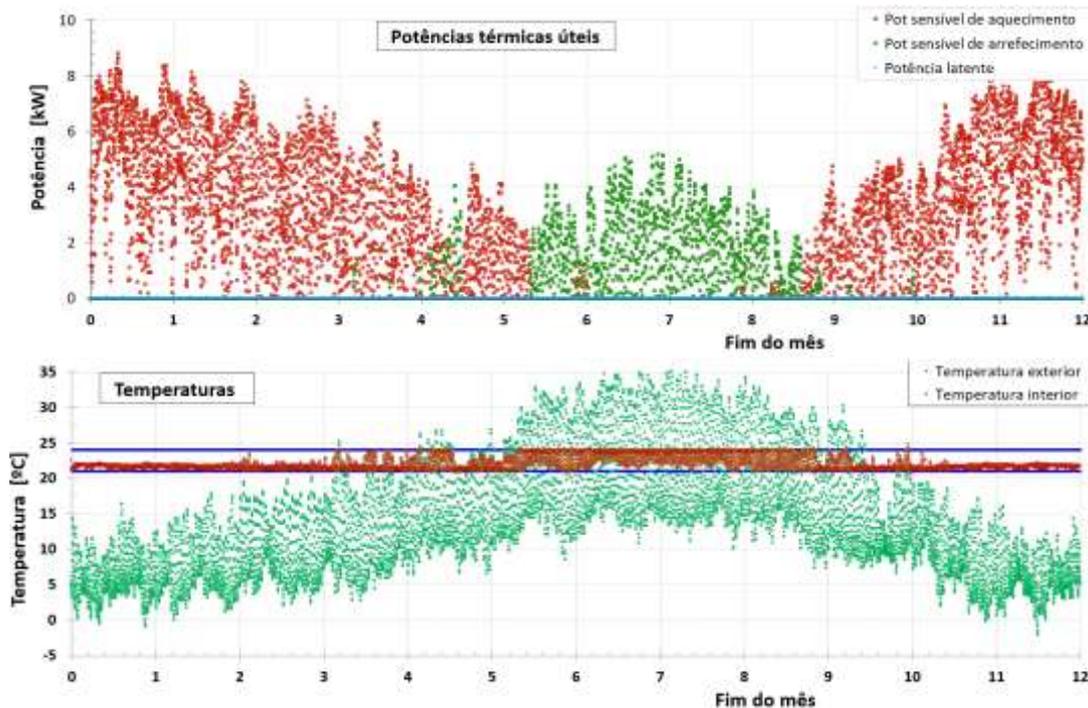
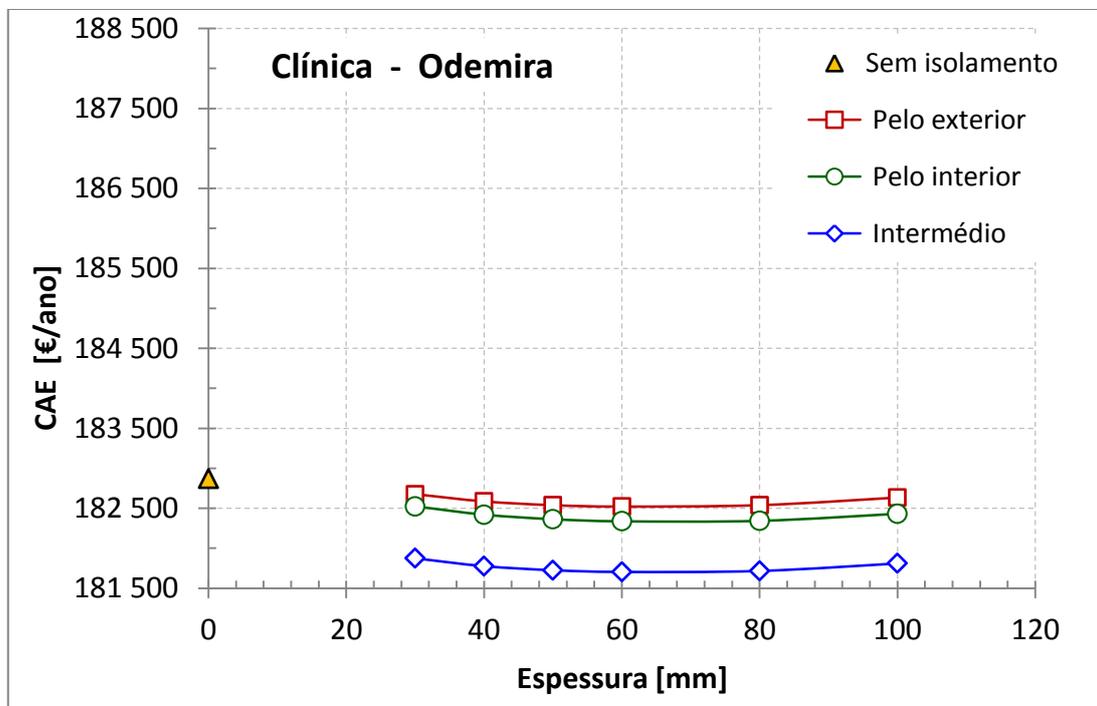


Figura 4.4 – Moradia: a) Potências no aquecimento e arrefecimento ao longo do ano; b) Temperaturas interiores e exteriores ao longo do ano

4.3. Clínica

Passando agora para os edifícios destinados a serviços, os resultados obtidos nas simulações para a clínica apresentam-se na Figura 4.5, para o edifício localizado em cada um dos três concelhos selecionados para representar o clima de Portugal continental. Neste caso, o ponto ótimo de rentabilidade do edifício é alcançado para um isolamento aplicado pelo meio (na caixa de ar) nas três zonas climáticas com uma espessura de 60, 80 e 100 mm, conforme o clima se vai tornando mais agreste.



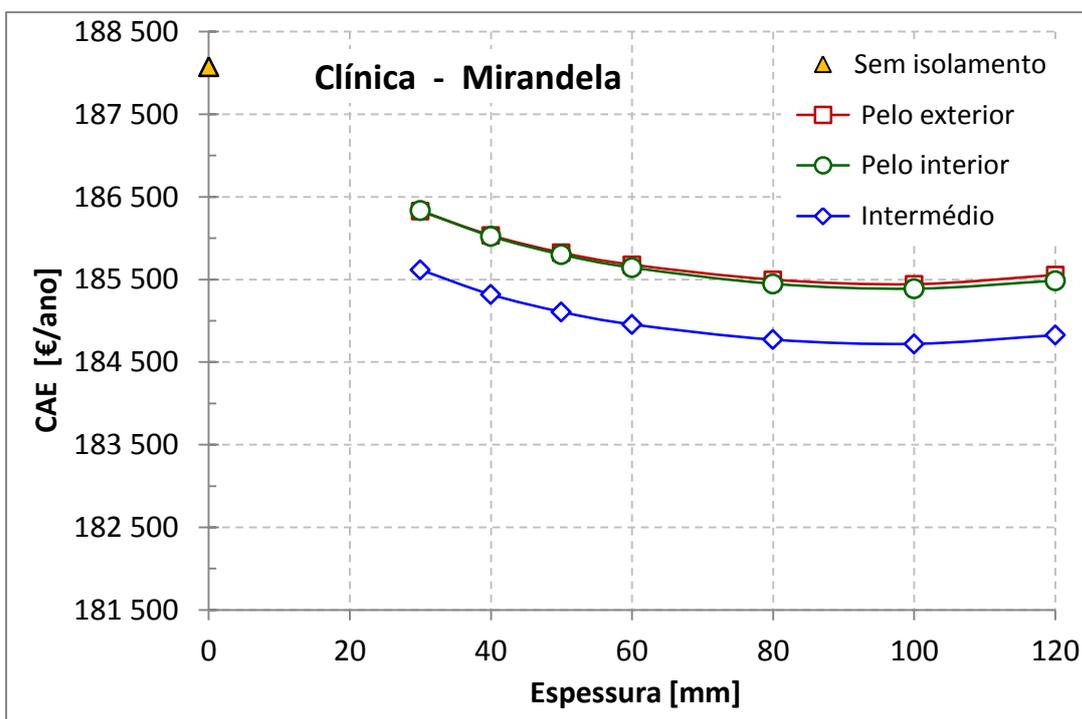
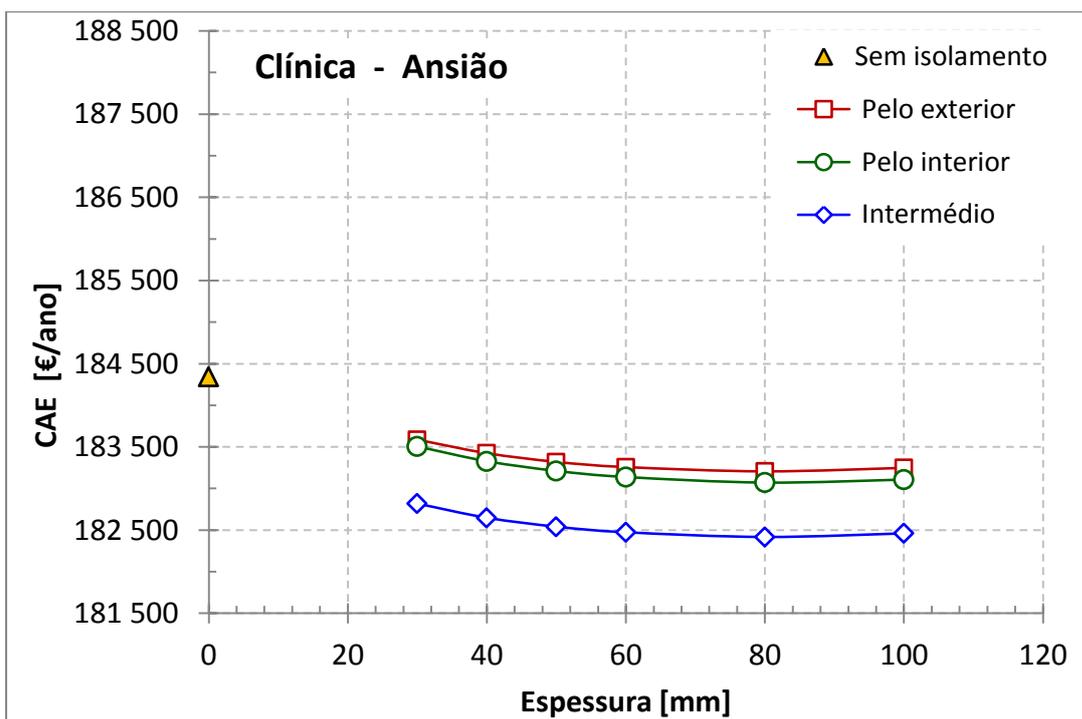
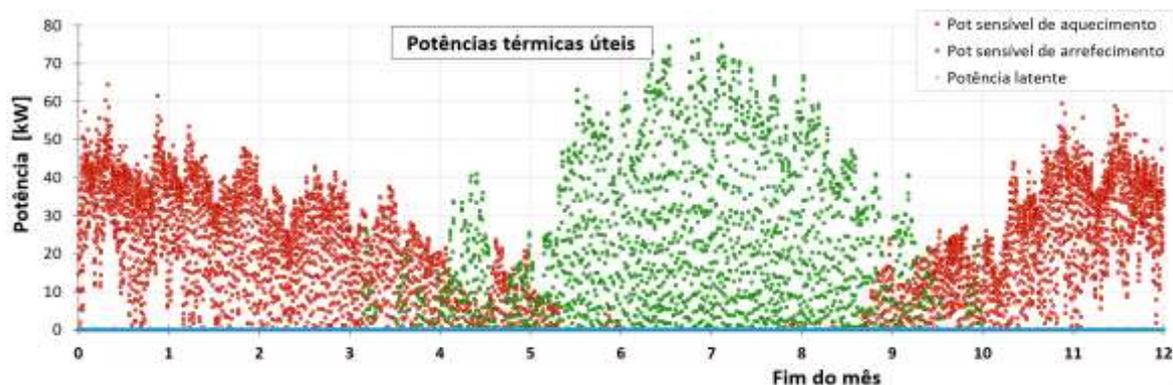


Figura 4.5 – Clínica: Custo anual equivalente [€/ano] para cada espessura e posicionamento do isolamento, para o edifício localizado em cada um dos três concelhos.

Verifica-se que é mais económico isolar pelo meio, como tem acontecido no caso dos outros edifícios. No entanto, no caso da clínica isolar pelo interior é mais vantajoso do que aplicar o isolamento térmico pelo exterior. À partida, sendo a clínica um edifício de ocupação permanente, a aplicação do isolamento deveria ser de maneira a que o edifício tivesse uma inércia forte, de forma a manter as condições de conforto térmico constantes no seu interior. Sabendo que aplicando o isolamento pelo exterior, a solução construtiva terá uma inércia térmica mais forte, este seria à partida mais conveniente, comparativamente ao isolamento aplicado pelo interior. É obvio que, tal como o constatado por Kossecka e Kosny [2002], a melhor performance térmica de um edifício é obtida quando os materiais de construção se localizam pelo interior da solução, isto é, isolando pelo exterior. No entanto, quando se contabiliza também o investimento financeiro requerido, resultam CAE's superiores para isolamento térmico aplicado pelo exterior. Ou seja, isolar pelo interior é mais rentável uma vez que o preço de construção e aplicação do isolamento pelo interior é mais baixo que aplicando o isolamento pelo exterior, sendo a diferença de preços suficiente para compensar a diferença de gastos energéticos na climatização da moradia. Deste modo, por ordem, em qualquer caso é mais rentável isolar pelo meio (na caixa de ar) e só depois considerar a solução de isolamento pelo interior, depois pelo exterior e finalmente não isolar. Concluiu-se também que, tal como acontece nos casos anteriores, não é de todo apropriado não isolar a clínica compensando sempre isolar o edifício.

Mostra-se na Figura 4.4 os gráficos produzidos pelo SEnergEd que apresentam as temperaturas do ar interior e exterior e as potências necessárias para a climatização da clínica.



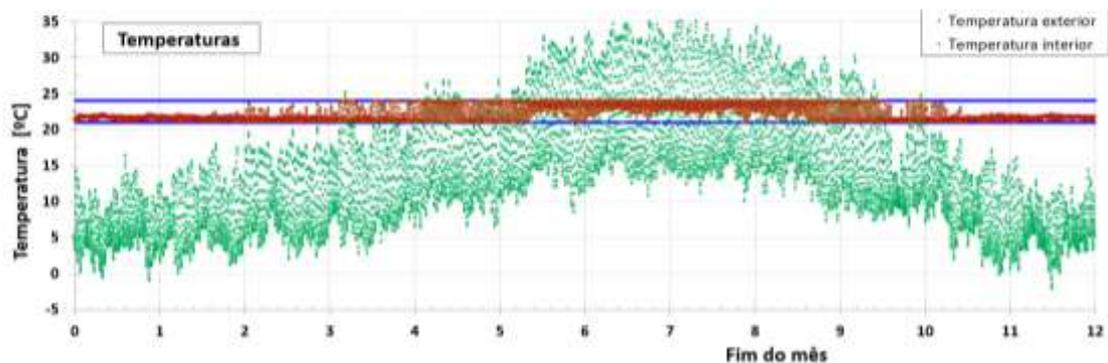
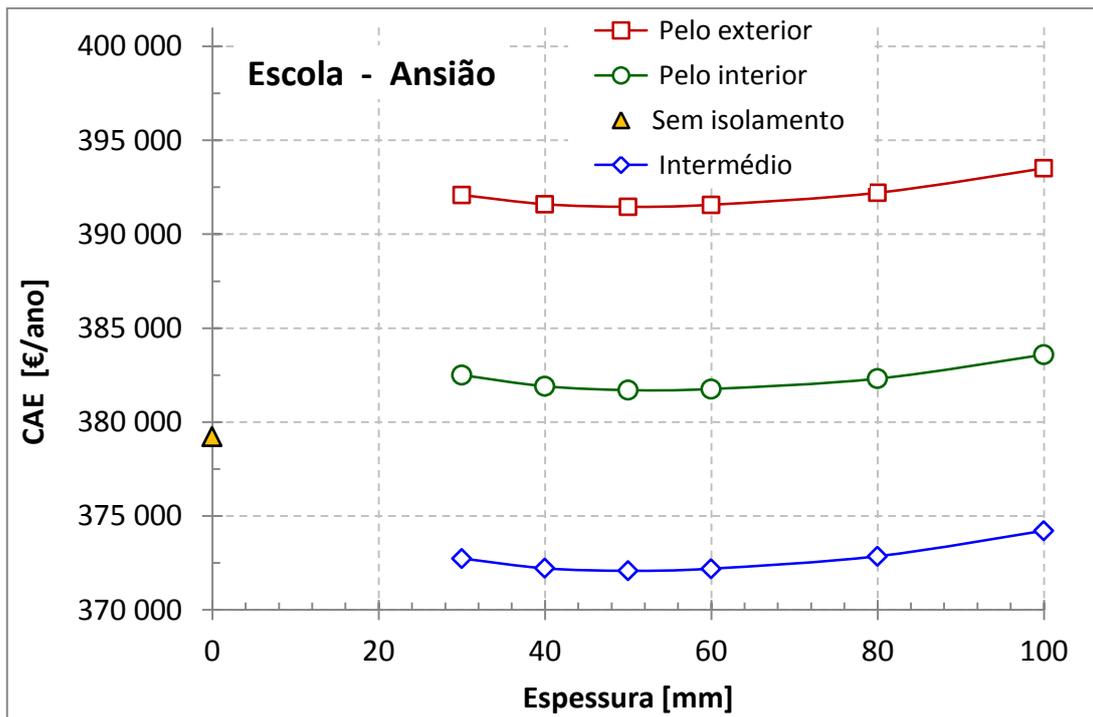
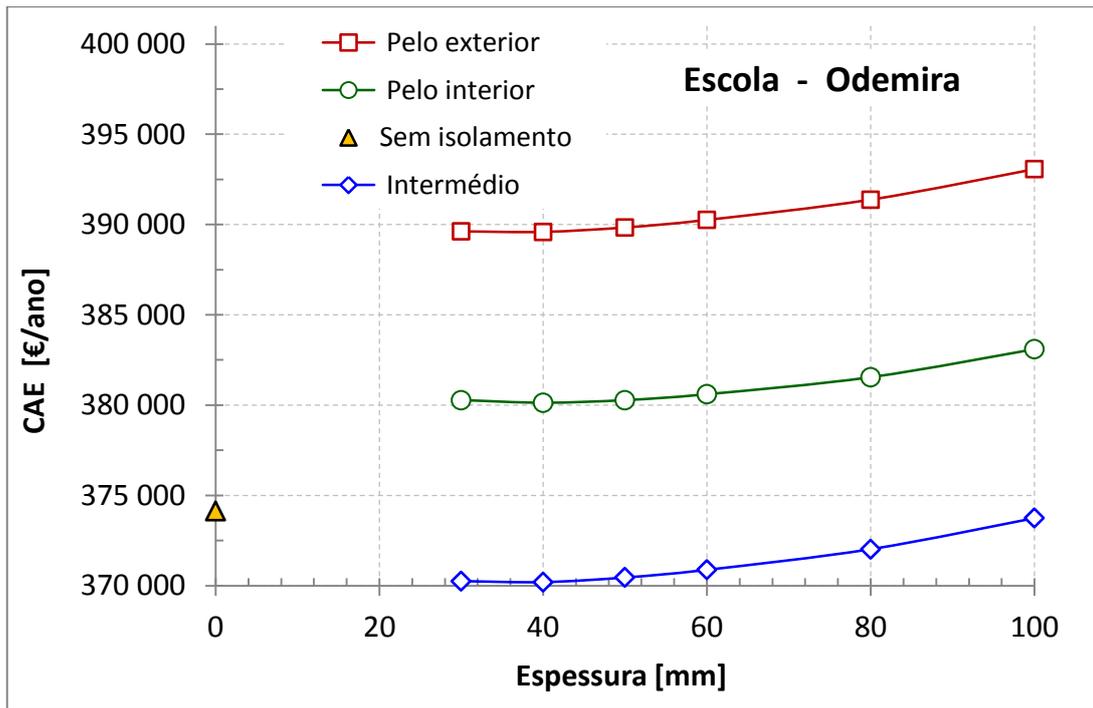


Figura 4.6 – Clínica: a) Potências no aquecimento e arrefecimento ao longo do ano; b) Temperaturas interiores e exteriores ao longo do ano

4.4. Escola

Uma escola secundária é um edifício de serviços com ocupação intermitente, isto é, está ocupado apenas durante uma parte do dia, no presente caso apenas entre as 07:00 e as 23:00 horas dos dias úteis (de segunda a sexta-feira). Para além disto, também é um edifício com funcionamento periódico, pois funciona a 100% durante o período de aulas, em regime parcial nos períodos de exames, não funciona nos períodos de férias letivas e também não funciona aos sábados e domingos. Resumindo, uma escola é um edifício com um funcionamento irregular muito específico.

Apresentam-se na Figura 4.7 os valores previstos para o CAE da escola em função da espessura e do posicionamento do isolamento térmico, para os casos em que a mesma se localiza em cada um dos três concelhos selecionados para representar o clima de Portugal continental.



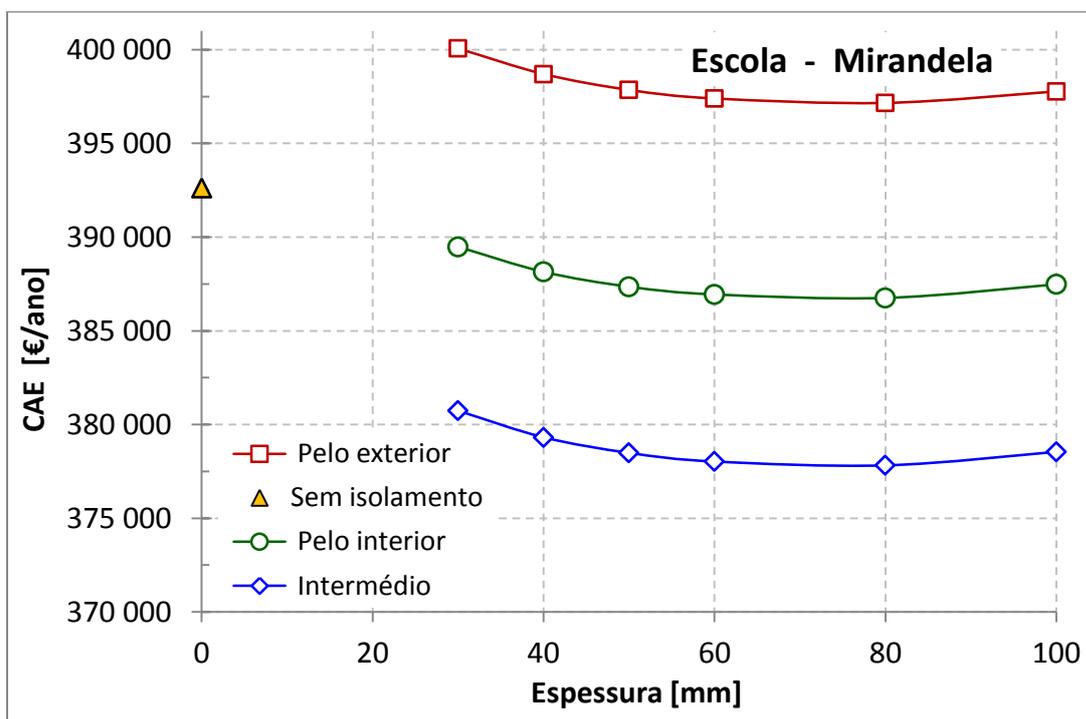


Figura 4.7 – Escola: Custo anual equivalente [€/ano] para cada espessura e posicionamento do isolamento, para o edifício localizado em cada um dos três concelhos.

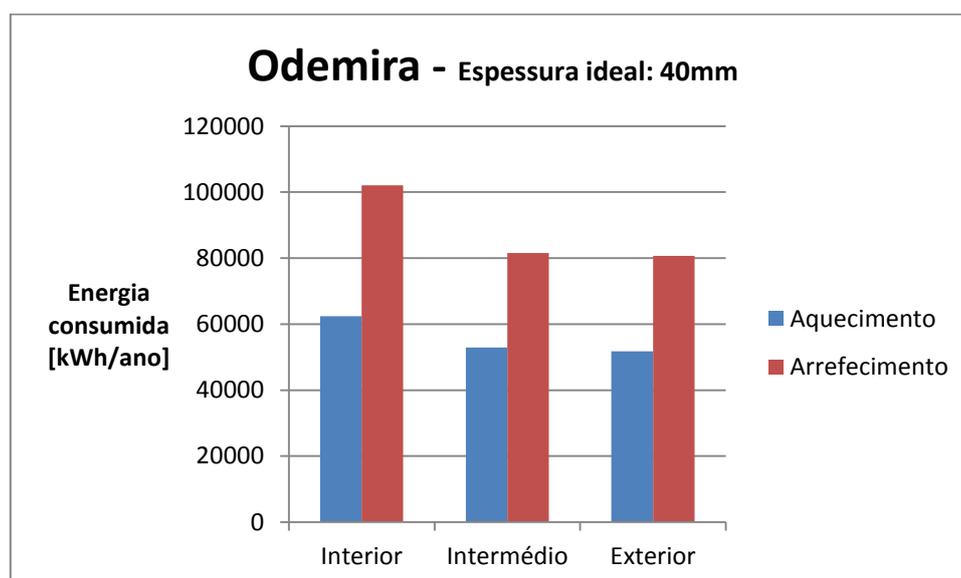
Verificou-se que mais uma vez isolar pelo meio (na caixa de ar) é a técnica mais rentável, independentemente da zona climática. Relativamente às espessuras do isolamento, para o concelho de Odemira, uma placa de 40 mm de espessura é a recomendada, enquanto que nos concelhos de Ansião de placas de 50 mm são mais adequadas e no concelho de Mirandela o ideal será aplicar placas de 80 mm.

O facto mais digno de realce é que o CAE da escola para a situação de soluções construtivas opacas não isoladas é sempre inferior ao CAE de aplicar isolamento térmico pelo exterior, independentemente do clima em questão, e também inferior ao CAE de aplicar isolamento térmico pelo interior nos climas mais suaves, Odemira e Ansião. Ou seja, tendo em conta o ciclo de vida da escola, é economicamente mais vantajoso não isolar as soluções construtivas opacas do que aplicar-lhe isolamento pelo interior, em Odemira e Ansião, ou pelo exterior, em todos os concelhos. Para o caso do isolamento aplicado pelo exterior, nunca é vantajoso isolar mesmo que o clima da região seja severo (I3-V3), como é o caso de Mirandela. É uma conclusão que deve ser explicada pelo elevado preço da aplicação do isolamento pelo interior e pelo exterior que resulta num grande investimento

inicial na construção da escola dada a sua dimensão conjugado com uma utilização muito específica e um funcionamento irregular da escola.

Comparando os resultados entre a aplicação do isolamento pelo interior ou pelo exterior, percebeu-se que isolar pelo interior é economicamente mais vantajoso principalmente em climas mais severos. Esta conclusão vai de encontro ao já afirmado anteriormente, que um edifício com inércia térmica fraca é mais apropriado quando o regime de ocupação é intermitente. De facto, ao se isolar pelo interior faz com que as soluções construtivas tenham uma menor massa superficial útil e consequentemente uma inércia térmica fraca. Uma inércia térmica fraca permite que ocorram maiores flutuações da temperatura do ar interior de um edifício, mas, devido ao baixo calor específico do ar e a serem baixos os gastos energéticos para alterar a temperatura da massa térmica inercial do edifício, os gastos energéticos para repor as condições de conforto térmico são inferiores aos necessários para o manter o edifício permanentemente climatizado [Kolaitis *et al.*, 2013]. É, portanto, mais fácil aquecer ou arrefecer um edifício com inércia fraca no momento em que se pretende utilizá-lo, que neste caso é no período da manhã quando a escola abre, do que mantê-lo permanentemente climatizado.

Apresentam-se na Figura 4.8 os consumos anuais de energia para aquecimento e para arrefecimento da escola.



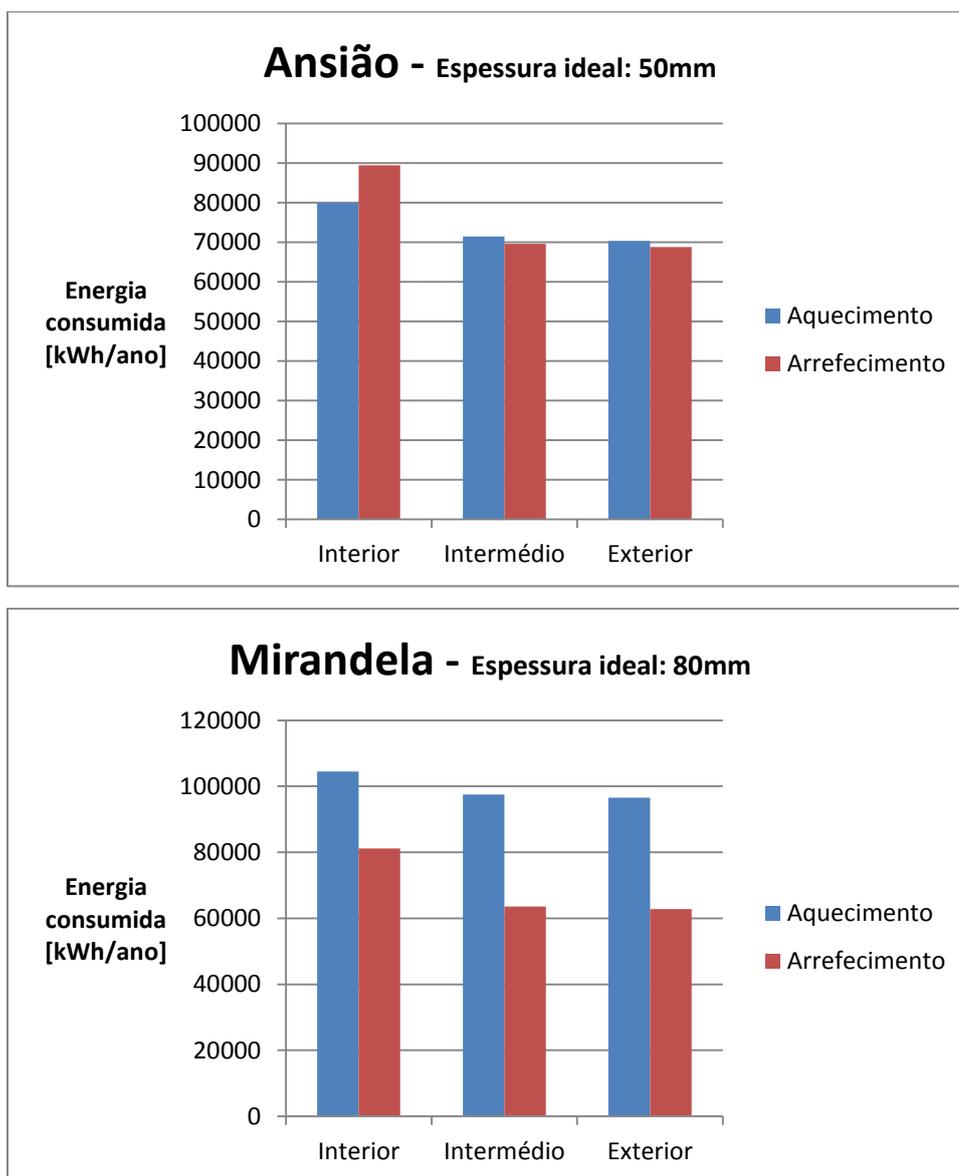


Figura 4.8 – Escola: Gastos energéticos para o aquecimento e arrefecimento

Para auxiliar a compreensão da importância da inércia térmica nos consumos energéticos, apresenta-se a Figura 4.9 os gastos em energia pela escola quando localizada nos concelhos de Odemira e de Mirandela (mais suave e mais intenso, respetivamente), consoante as espessuras e o posicionamento do isolamento. A Figura 4.9 mostra uma relação não linear entre a espessura de isolamento e os gastos energéticos, tal como sugerido por Sisman *et al.* [2007].

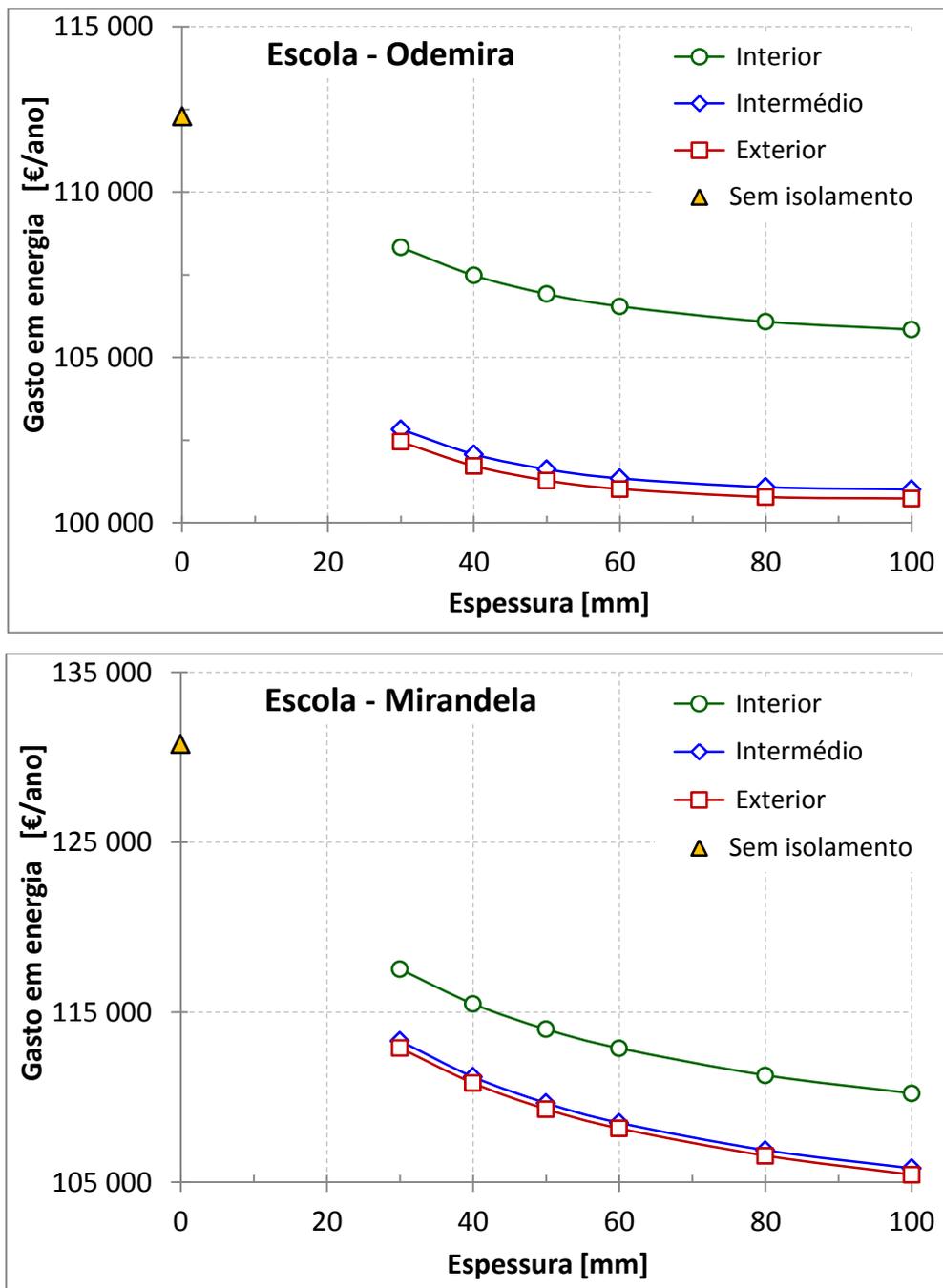


Figura 4.9 – Gastos em energia [€/ano] da escolar nos concelhos de Odemira e Mirandela

Como se pode verificar, os gastos em energia são muito maiores quando a escola não é isolada. Verificou-se ainda que quanto mais forte for a inércia térmica de um edifício menos se gasta em climatização. Os resultados obtidos por Ferreira *et al.* [2016] corroboram esta afirmação. Isolando pelo exterior implicará uma maior inércia térmica, comparativamente aos casos em que se isola pelo interior, e, portanto, um menor gasto em energia para climatização. No entanto, quando se comparam as percentagens relativas entre

o consumo de energia e o custo anual equivalente (CAE) verificou-se que estas são quase idênticas (percentualmente as diferenças devidas à localização do isolamento rondam os 2%), tal como se constata na Tabela 0.1 do Anexo C.

Mostra-se na Figura 4.10 os gráficos produzidos pelo SEnegEd que apresentam as temperaturas do ar interior e exterior e as potências necessárias para a climatização da escola.

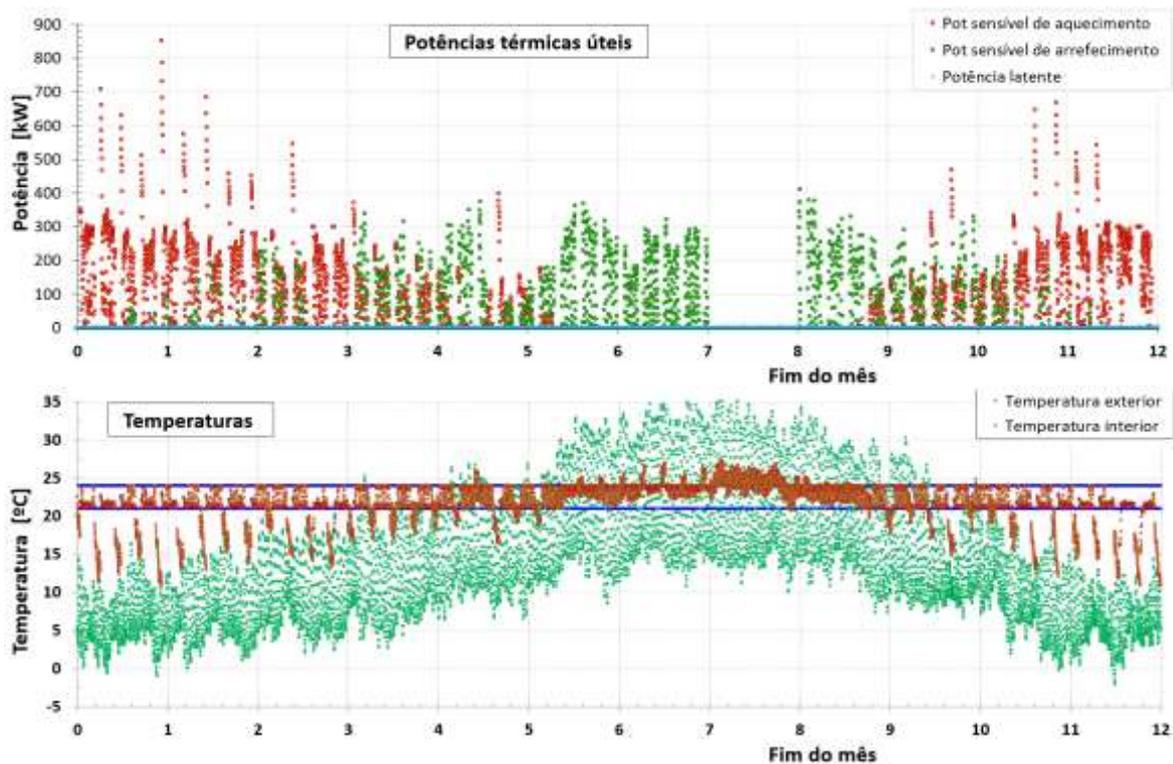
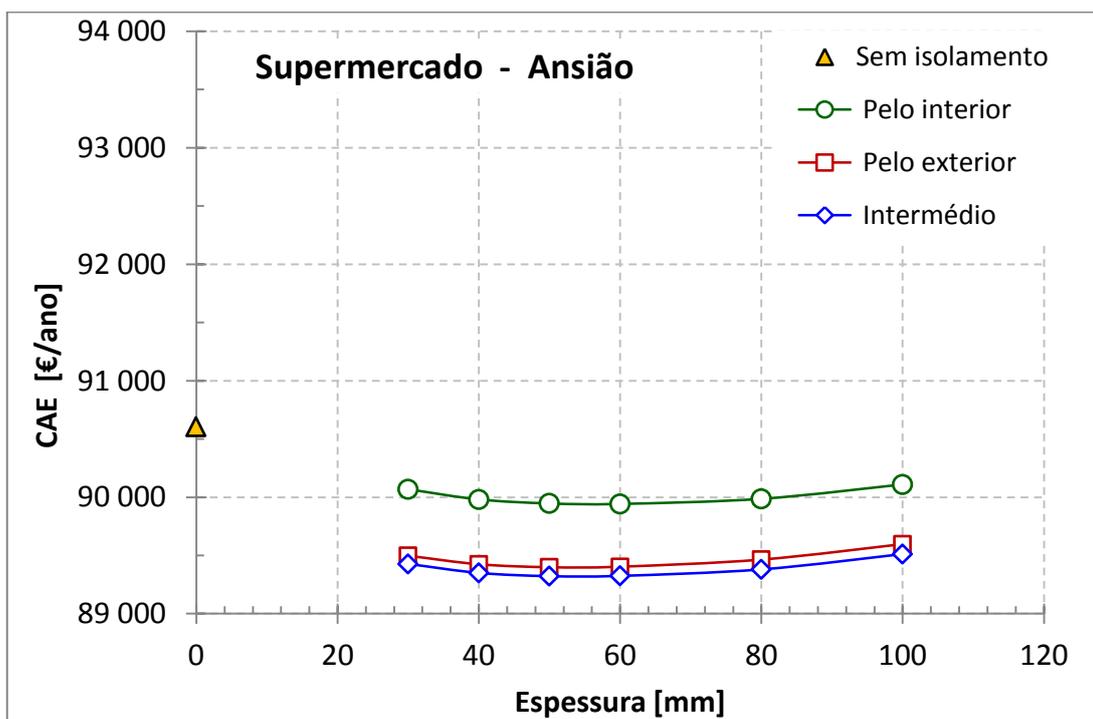
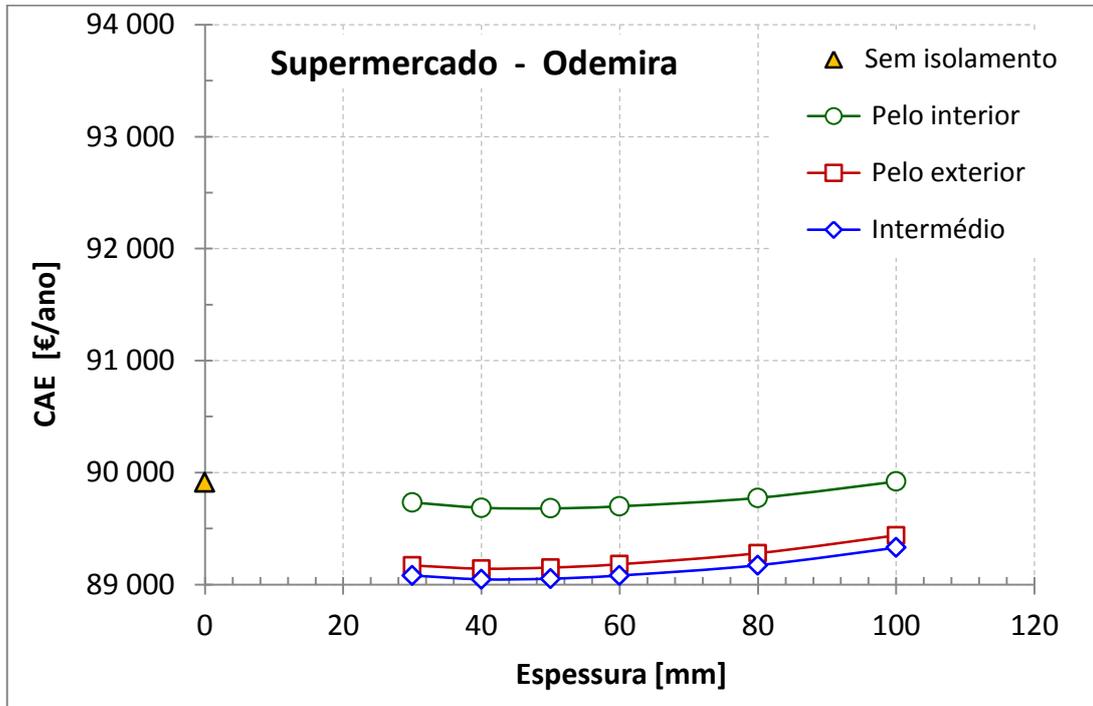


Figura 4.10 – Escola: a) Potências no aquecimento e arrefecimento ao longo do ano; b) Temperaturas interiores e exteriores ao longo do ano

4.5. Supermercado

Escolheu-se um supermercado para representar os edifícios de comércio. Trata-se de um edifício com funcionamento intermitente, sendo utilizado todos os dias do ano (úteis ou não), em funcionamento pleno entre as 09:00 e as 22:00 horas e em funcionamento residual entre as 07:00 e as 09:00 e entre as 22:00 e as 24:00 horas. Trata-se de um edifício com cargas térmicas internas elevadas.

Apresentam-se na Figura 4.11 as previsões do valor do valor do CAE em função da espessura de EPS e da posição em que o mesmo é aplicado, isto para o edifício localizado em cada um dos três concelhos selecionados para representar o clima de Portugal continental.



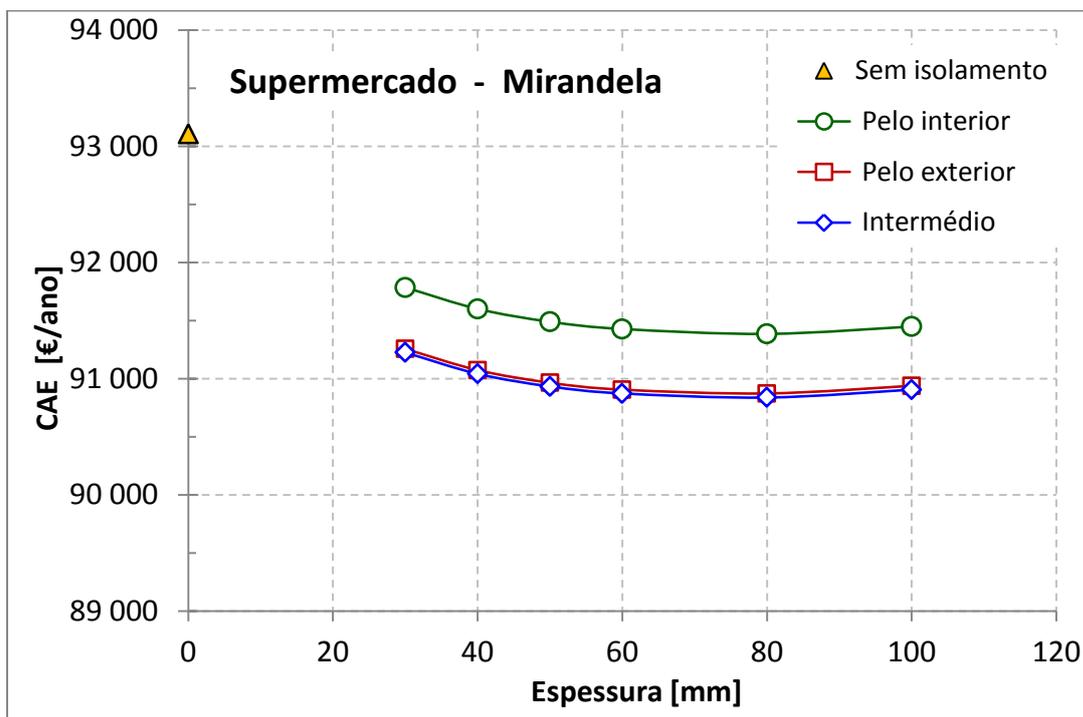


Figura 4.11 – Supermercado: Custo anual equivalente [€/ano] para cada espessura e posicionamento do isolamento, para o edifício localizado em cada um dos três concelhos.

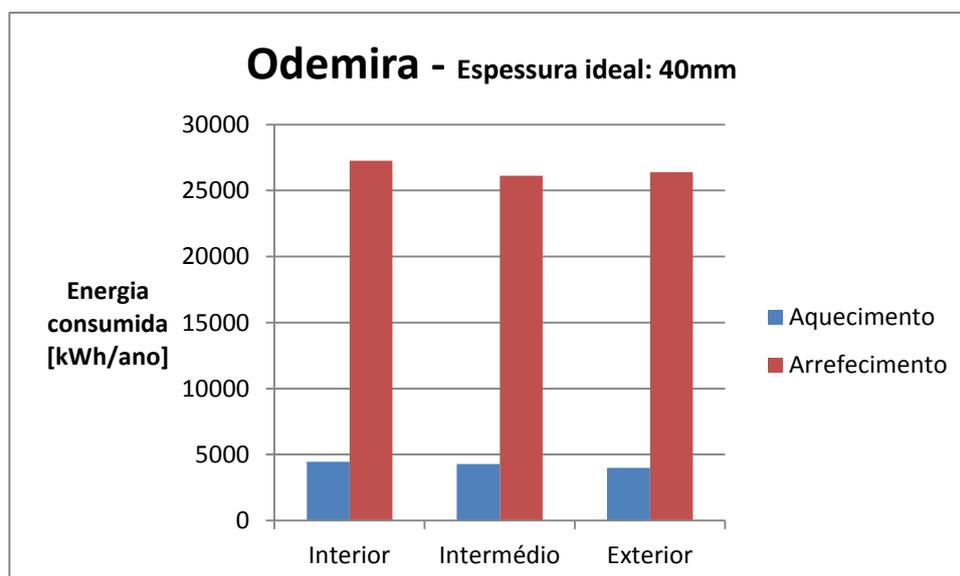
Pela análise dos resultados da Figura 4.11 constata-se que não isolar as soluções construtivas opacas do supermercado não é economicamente viável em nenhum dos concelhos, sendo que nos casos em que o supermercado não é isolado obteve-se um CAE mais elevado do que para os casos em que o edifício é isolado, independentemente da espessura e do posicionamento do isolamento.

Verifica-se ainda que a opção economicamente mais rentável para o supermercado é a aplicação do isolamento térmico pelo meio das soluções construtivas (na caixa de ar). As espessuras de isolamento térmico mais interessantes são de 40, 50 e 80 mm para os concelhos de Odemira, Ansião e Mirandela, respetivamente.

No caso do supermercado, as espessuras ideais são mais baixas do que nas dos outros edifícios, o que acarreta maiores gastos com energia de climatização. Mesmo assim, do ponto de vista económico é preferível gastar menos na construção do supermercado recorrendo a placas EPS mais finas e consumindo mais energia do que investir mais no isolamento térmico e poupar nos gastos energéticos. Esta opção embora seja ótima do ponto de vista económico requer uma maior utilização de energia, o que não é favorável do ponto de vista energético e ambiental.

Apresentam-se na Tabela 0.2 do Anexo C a razão entre o gasto em energia e o custo anual equivalente (*CAE*) para o supermercado, quando localizado nos concelhos de Odemira e de Mirandela, em função da posição e para a melhor localização do isolamento térmico (intermédio). No caso do supermercado, e para a espessura ótima de isolamento, este rácio é de 39,2% no caso de Odemira e de 40,2% no caso de Mirandela, enquanto que no caso, por exemplo, da escola estas percentagens são de 28,3% e 27,6%, respetivamente.

Contrariamente ao que se estava à espera para o supermercado, continua a opção de isolamento intermédio a ser a mais favorável, embora diferença económica entre isolar pelo meio e pelo exterior seja pouco significativa. Mais surpreendente ainda é verificar que a opção de isolar as soluções construtivas opacas pelo interior é substancialmente menos vantajoso do que a aplicação das outras duas técnicas. Isto contraria a ideia de que isolar pelo interior edifícios de ocupação intermitente é o economicamente mais acertado, uma vez que a inércia térmica desses edifícios é mais baixa, aquecendo-se ou arrefecendo-se o edifício rapidamente e com baixos consumos de energia. No entanto, tal não acontece no supermercado, o que poderá ser explicado pelo facto dos consumos para o arrefecimento serem maiores do que os para o aquecimento, como se mostra na Figura 4.12.



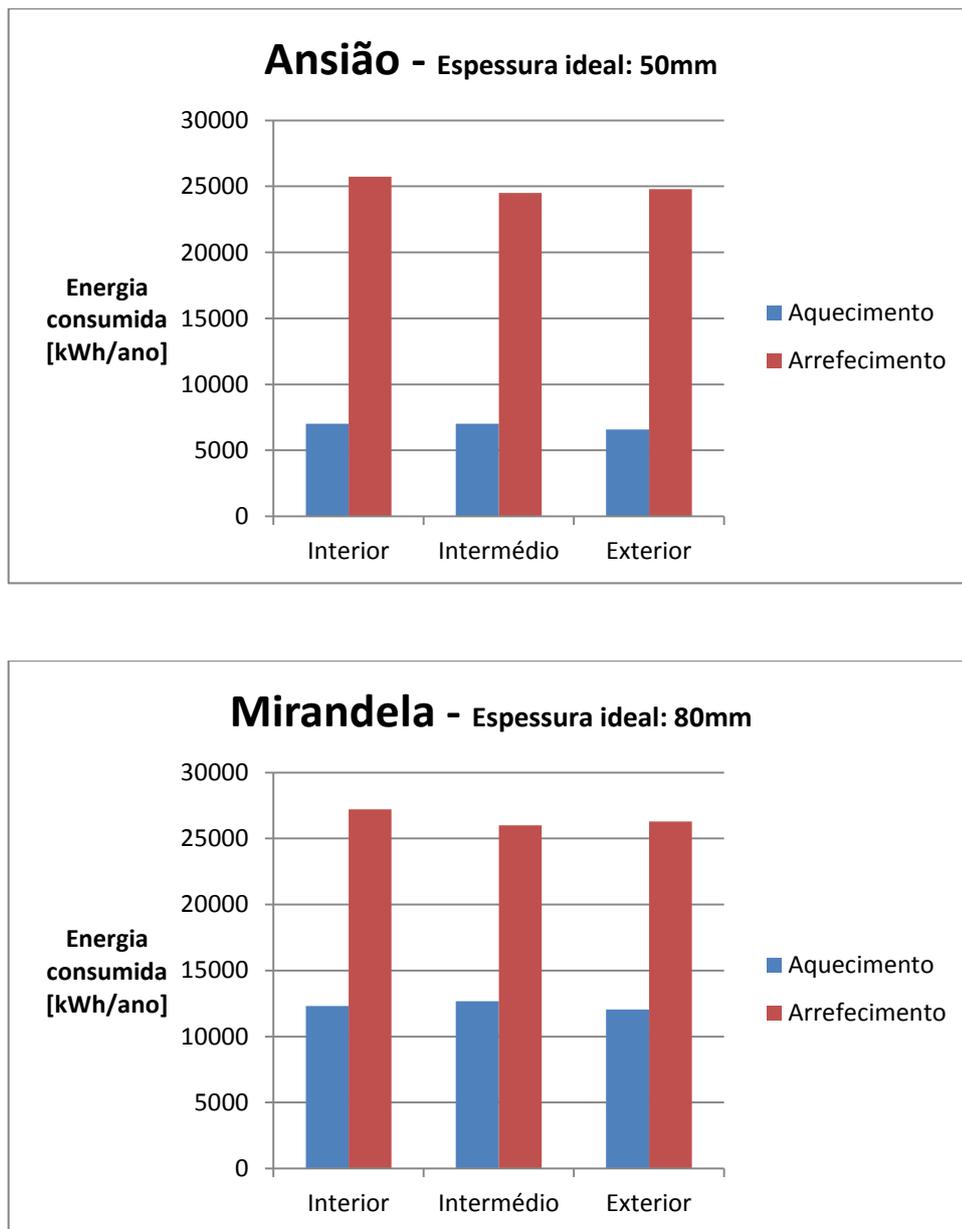


Figura 4.12 – Supermercado: Gastos energéticos para o aquecimento e arrefecimento

Mostra-se na Figura 4.13 os gráficos produzidos pelo SEnergEd que apresentam as temperaturas do ar interior e exterior e as potências necessárias para a climatização do supermercado.

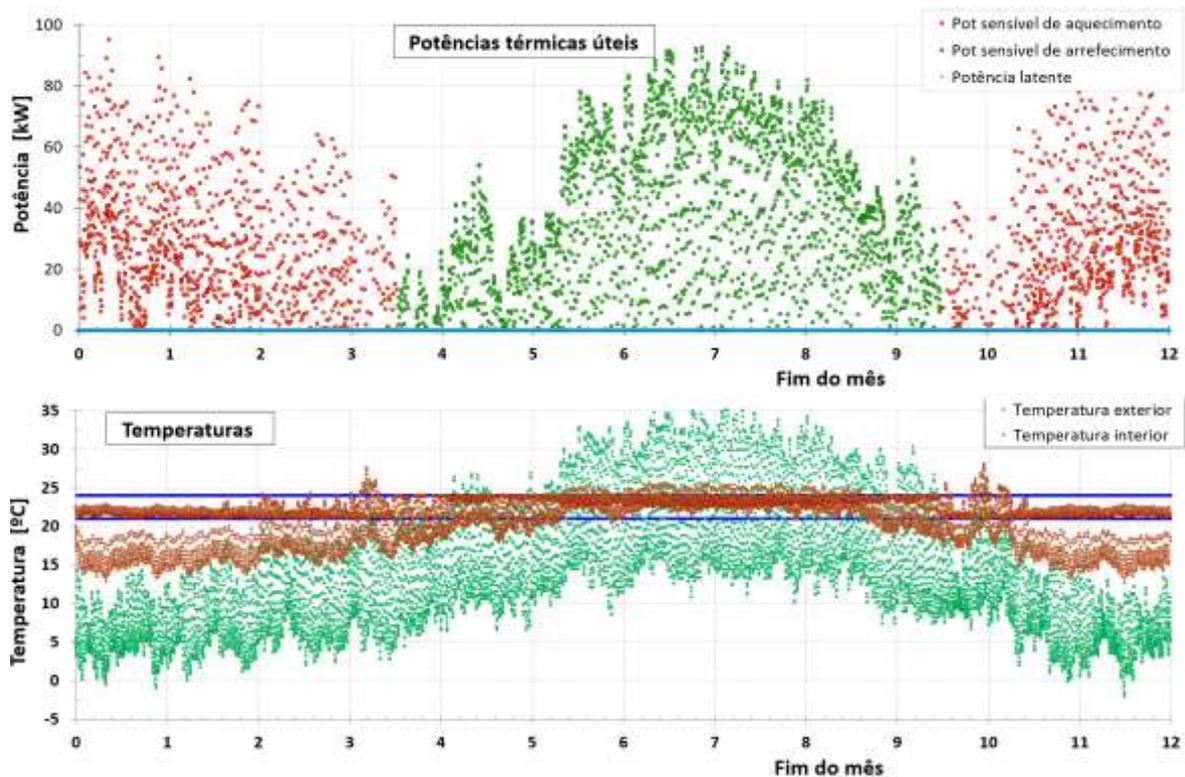


Figura 4.13 – Supermercado: a) Potências no aquecimento e arrefecimento ao longo do ano; b) Temperaturas interiores e exteriores ao longo do ano

4.6. Análise Comparativa

Este estudo centrou-se na determinação da solução economicamente mais viável de isolamento térmico das soluções construtivas opacas a utilizar na construção dos edifícios Portugueses. Para o efeito selecionaram-se cinco tipologias diferentes de edifícios (2 de habitação, 2 de serviços e 1 de comércio), os quais foram sendo “localizados” em três concelhos representativos do clima de Portugal continental. Para efeitos de análise recorreu-se ao conceito de custo anual equivalente (*CAE*) do ciclo de vida destes edifícios, o qual foi obtido recorrendo a simulação energética dinâmica.

Numa tentativa de relacionar a solução ótima de isolamento térmico com a utilização dos edifícios, apresenta-se na Tabela 4.1 o valor previsto para o *CAE*, das cinco tipologias de edifícios, na situação de isolamento térmico ótimo e na de as soluções construtivas opacas não serem isoladas. Analisando os resultados presentes nesta tabela resulta de forma evidente que a melhor solução é sempre utilizar o isolamento no meio da solução construtiva (na caixa de ar), que a espessura ótima de isolamento aumenta com a

severidade do clima e que os edifícios residenciais requerem espessuras de isolamento térmico superiores às das restantes tipologias.

Tabela 4.1 – Tabela comparativa dos CAE e das poupanças dos diferentes edifícios; Legenda: isolamento aplicado pelo a) pelo interior, b) intermédio, c) pelo exterior

Zona climática	ODEMIRA – Clima suave				
Edifício	Apartamento	Moradia	Clínica	Escola	Supermercado
Espessura (mm)	80 ^{b)}	80 ^{b)}	60 ^{b)}	40 ^{b)}	40 ^{b)}
CAE ótimo (€/ano)	8 977	19 924	181 704	370 197	89 046
CAE sem isolam (€/ano)	9 140	20 631	182 870	374 129	89 914
Poupança (€/ano)	163	707	1 166	3 932	868
Poupança (%/ano)	1,8%	3,4%	0,6%	1,1%	1,0%

Zona climática	ANSIÃO – Clima moderado				
Edifício	Apartamento	Moradia	Clínica	Escola	Supermercado
Espessura (mm)	80 ^{b)}	100 ^{b)}	80 ^{b)}	50 ^{b)}	50 ^{b)}
CAE ótimo (€/ano)	9 031	20 035	182 418	372 084	89 322
CAE sem isolam (€/ano)	9 262	20 954	184 343	379 223	90 607
Poupança (€/ano)	231	919	1 925	7 138	1 285
Poupança (%/ano)	2,5%	4,4%	1,0%	1,9%	1,4%

Zona climática	MIRANDELA – Clima intenso				
Edifício	Apartamento	Moradia	Clínica	Escola	Supermercado
Espessura (mm)	100 ^{b)}	100 ^{b)}	100 ^{b)}	80 ^{b)}	80 ^{b)}
CAE ótimo (€/ano)	9 181	20 367	184 721	377 821	90 839
CAE sem isolam (€/ano)	9 529	21 627	188 076	392 624	93 109
Poupança (€/ano)	348	1 260	3 355	14 803	2 270
Poupança (%/ano)	3,6%	5,8%	1,8%	3,8%	2,4%

A título de resumo, os principais aspetos a reter são:

- O conceito de custo da eficiência energética do isolamento térmico (*CEEIT*) indica claramente que é muito mais vantajoso isolar termicamente os edifícios recorrendo ao EPS (poliestireno expandido) do que ao XPS (poliestireno extrudido). Da aplicação do *CEEIT* aparece uma espessura de 40 mm de EPS como a solução economicamente mais vantajosa para isolar termicamente as soluções construtivas opacas dos edifícios Portugueses. Ora, o valor do custo anual equivalente (*CAE*), obtido com recurso a

simulação energética dinâmica, claramente sugere que são recomendadas espessuras de isolamento superiores. Logo, o *CEEIT* serve para efetuar uma análise comparativa entre tipos de isolamento térmico, mas não é indicado para determinar a localização e a espessura ótimas.

- Construir e manter qualquer um dos edifícios estudados fica mais dispendioso, ou seja, tem um maior *CAE* em zonas climáticas mais intensas. Ou seja, o *CAE* do ciclo de vida dos edifícios aumenta com o aumento da severidade do clima. Para além disto, nas zonas de clima mais intenso a espessura recomendada de isolamento térmico a aplicar é normalmente superior à indicada para os restantes climas.

- O edifício que exhibe uma maior poupança em termos económicos com a aplicação de isolamento térmico é a moradia. Esta poupança é um indicador comparativo entre os *CAE* para a situação de isolamento ótimo e o *CAE* desse edifício sem isolamento térmico. Logo a seguir aparece o apartamento e a escola com uma poupança não tão alta, mas igualmente considerável. Os casos da clínica e do supermercado apresentam baixas percentagens de economias com a aplicação de isolamento térmico nas suas soluções construtivas opacas.

- Em termos de isolamento a aplicar, todas as soluções ótimas pressupõem uma aplicação do EPS pelo meio das soluções construtivas opacas. O supermercado e a escola são os edifícios que necessitam de menos espessura para se atingir um gasto anual mais baixo e no caso destes se localizarem no concelho de Odemira.

- No caso do edifício escolar é mais vantajoso não isolar termicamente as soluções construtivas opacas do que aplicar-lhe isolamento pelo exterior ou pelo interior.

- De um modo geral, os edifícios residências carecem de maiores necessidades de isolamento térmico do que os edifícios destinados a serviços e a comércio. Ou seja, consoante o tipo de utilização de um edifício os requisitos da sua construção, nomeadamente no isolamento a aplicar, apresentam diferenças.

5. CONCLUSÃO

Este estudo centrou-se na procura das soluções, economicamente mais viáveis, de isolamento térmico das soluções construtivas opacas a utilizar na construção dos edifícios portugueses. Para o efeito selecionaram-se cinco tipologias de edifícios (1 apartamento, 1 moradia, 1 clínica, 1 escola e 1 supermercado), os quais foram sendo “localizados” em três concelhos representativos do clima de Portugal continental (climas suave, moderado e intenso). Para efeitos de análise recorreu-se aos conceitos de custo da eficiência energética do isolamento térmico (*CEEIT*) e de custo anual equivalente (*CAE*) do ciclo de vida dos edifícios.

As placas de isolamento térmico mais vendidas e utilizadas na construção de edifícios em Portugal têm espessuras que variam entre os 30 e os 100 mm. Através do conceito de *CEEIT* foi possível inferir que é economicamente muito mais vantajoso utilizar um isolamento em EPS (poliestireno expandido) do que em XPS (poliestireno extrudido). O *CEEIT* indicou uma espessura de 40 mm de EPS como a com maior probabilidade de ser a mais vantajosa em termos económicos. Isto não foi confirmado pelos valores obtidos de *CAE*, os quais sugeriram espessuras de isolamento térmico superiores.

A simulação energética dinâmica com recursos ao *software* *SEnergEd* revelou que o consumo, e logo os gastos, com a energia necessária para a climatização dos edifícios aumenta com o aumento da severidade do clima.

Os valores previstos para o *CAE* dos edifícios demonstram que a posição economicamente mais vantajosa para o isolamento térmico das soluções construtivas opacas é a de isolamento intermédio, na caixa de ar das mesmas. Isto independentemente do tipo de edifício e da região climática. Soluções de isolamento pelo interior ou pelo exterior só devem ser equacionadas em situações de reabilitação para casos em que existam restrições a nível de construção. No caso do edifício escolar é mais vantajoso não isolar termicamente as soluções construtivas opacas do que aplicar-lhe isolamento pelo interior ou pelo exterior. Visto não se verificar no caso das outras tipologias de edifício, isto tem a ver com o uso muito específico das escolas.

A espessura economicamente ótima de isolamento térmico EPS varia com a tipologia de edifício, apresentando valores superiores para os edifícios residenciais (apartamento e moradia) do que para os restantes (clínica, escola e supermercado). Para cada tipologia de edifício, esta espessura aumenta com o aumento da severidade do clima. Obtiveram-se valores recomendados de espessura de EPS entre 40 mm (supermercado e escola, quando localizados em clima suave) e 100 mm (apartamento, moradia e clínica, quando localizados em clima severo).

Independentemente da sua viabilidade económica, a aplicação de isolamento térmico nas soluções construtivas opacas leva sempre a que os edifícios tenham menores consumos energéticos, tenham melhor qualidade do ar interior e sejam termicamente mais confortáveis. Isolar termicamente um edifício é um ato amigo do ambiente e consentâneo com os princípios da utilização racional dos recursos, estando, assim, alinhado com a política de um desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adene (2016a). 10 soluções de eficiência energética # 1 - Isolamento para paredes, Revista Adene, Agência para a Energia, Certificação Energética e Ar Interior de Edifícios, maio de 2016.
- Adene (2016b). 10 soluções de eficiência energética # 2 - Isolamento de coberturas”, Revista Adene, Agência para a Energia, Certificação Energética e Ar Interior de Edifícios, maio de 2016.
- Al-Homoud M S (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials, *Building and Environment*, 40: 353-366.
- Al-Khawaja M J (2004). Determination and selecting the optimum thickness of insulation for buildings in hot countries by accounting for solar radiation, *Applied Thermal Engineering*, 24: 2601-2610.
- AREAM (2007). Qualidade térmica dos edifícios... e qualidade de vida, Brochura da Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira.
- Claro J A (2015). Viabilidade da instalação em escolas secundárias de sistemas de geração em regime de produção para autoconsumo, Dissertação de MIEM, Universidade de Coimbra, julho de 2015.
- Crawley D, Pless S, Torcellini P (2009). Getting to net zero, *ASHRAE Journal*, September 2009.
- Cype (2017). Gerador de Preços Cype, Versão livre do gerador de preços de soluções construtivas e de sistemas de edifícios. Acedido em abril de 2017, a partir do site: <http://www.geradordeprecos.info/>
- Directiva EPBD (2010). Energy Performance of Buildings Directive, Directiva 2010/31/EU do Parlamento e do Conselho de 19 de maio.
- ECEEE (2011). Nearly zero energy buildings - achieving the EU 2020 target, European Council for an Energy Efficient Economy, 08-02-2011, <http://www.eceee.org/>.
- Ferreira M, Almeida M, Rodrigues A, Silva S M (2016). Comparing cost-optimal and net-zero energy targets in building retrofit, *Building Research & Information*, 44(2): 188-201.
- Gouveia P A (2008). Caracterização dos impactes da envolvente no desempenho térmico dos edifícios, Dissertação Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, janeiro de 2008.
- ISO 13790 (2006). Energy performance of buildings - calculation of energy use for space heating and cooling, International Standard Organization.
- Kolaitis D I, Malliotakis E, Kontogeorgos D A, Mandilaras I, Katsourinis D I, Founti M A (2013). Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems

- for energy efficient retrofitting of residential buildings, *Energy and Buildings*, 64: 123-131.
- Kossecka E, Kosny J (2002). Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building, *Energy and Buildings*, 34: 321-331.
- Santos C A P, Matias L M C (2006). ITE-50: Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios, Versão de 2006, ICT Informação Técnica Edifícios, LNEC.
- Raimundo A M (2008). Cálculo do comportamento térmico de edifícios através do modelo dinâmico horário monozona 5RIC, II Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica de Fluidos e Termodinâmica, Universidade de Aveiro, 8-9 de maio.
- Raimundo A M, Gaspar A R, Lamas F B (2011a). Projeto RCCTE de um apartamento (caso prático), Cursos de formação sobre o SCE, DEM-FCTUC, Universidade de Coimbra.
- Raimundo A M, Gaspar A R, Lamas F B (2011b). Projeto RCCTE de uma moradia (caso prático), Cursos de formação sobre o SCE, DEM-FCTUC, Universidade de Coimbra.
- Raimundo A M, Gaspar A R, Lamas F B (2011c). Projeto RSECE de um edifício de serviços (caso prático), Cursos de formação sobre SCE, DEM-FCTUC, Universidade de Coimbra.
- Raimundo A M (2012). Exequibilidade dos edifícios com necessidades quase nulas de energia em clima mediterrânico, *Revista Climatização*, N°79, pp. 68-72.
- Raimundo A M (2015). Elementos de apoio à disciplina Economia e Gestão Industrial, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra.
- Raimundo A M (2016). CalProTerm – folha de cálculo das propriedades termofísicas das soluções construtivas dos edifícios, Departamento de Engenharia Mecânica, FCTUC, Universidade de Coimbra.
- Raimundo A M (2017). SEnergEd – software de simulação dinâmica monozona e de cálculo do custo anual equivalente do ciclo de vida de edifícios, Departamento de Engenharia Mecânica, FCTUC, Universidade de Coimbra.
- Rebelo A C (2016). Ponto ótimo de rentabilidade económica dos envidraçados aplicados em edifícios localizados em Portugal, Dissertação de MIEM, Universidade de Coimbra, fevereiro de 2016.
- SCE (2006). Legislação de suporte do Sistema de Certificação Energética de Edifícios em vigor a partir de 4 de julho de 2006, entre outros: Decretos-Lei 78/2006, 79/2006 e 80/2006, todos de 4 de abril; Portaria 461/2007 de 5 de junho; Portaria 835/2007 de 7 de agosto; Despacho 10250/2008 de 8 de abril; e correspondentes alterações posteriores. *Diário da República Portuguesa*.
- SCE (2013). Legislação de suporte do Sistema de Certificação Energética de Edifícios em vigor a partir de 1 de dezembro de 2013, entre outros: Lei 58/2013 de 20 de agosto; Decreto-Lei 251/2015 de 25 de novembro, que republica o Decreto-Lei 118/2013 de 20 de agosto; Portarias 349/2013 de 29 de novembro; Despachos 15793/2013 de

3 de dezembro; e correspondentes alterações posteriores. Diário da República Portuguesa.

Sisman N, Kahya E, Aras N, Aras H (2007). Determination of optimum insulation thicknesses of the external walls and roof (ceiling) for Turkey's different degree-day regions, *Energy Policy*, 35: 5151–5155.

Torcellini P, Pless S, Deru M, Crawley D (2006). Zero energy buildings: a critical look at the definition, *Proceedings of the 2006 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, Pacific Grove, California, August 14-18, 2006.

Vidigueira V (2006). Influência da estratégia de ventilação no consumo energético dos edifícios de serviços com utilização intermitente e elevadas cargas térmicas internas, *Dissertação de MIEM, Universidade de Coimbra*, janeiro de 2013.

ANEXO A – EDIFÍCIOS

Informação relativa aos edifícios em estudo: plantas, ocupação e custos do edifício.

Moradia



Figura 0.1 – Planta do Piso 0 [Raimundo et al, 2011b]



Figura 0.2 – Planta do Piso 1 [Raimundo et al, 2011b]



Figura 0.3 – Planta do Piso 2 [Raimundo et al, 2011b]

Tabela 0.1 - Moradia: custos de investimento, rendimentos e gastos anuais (sem IVA)

Investimento inicial	358 208,5 €
Vãos envidraçados:	9 384,86 €
Terreno e infraestruturas:	200 000,00 €
Sistemas de iluminação:	20 000,00 €
Sistemas de AVAC:	20 000,00 €
Sistemas de água e esgotos:	10 000,00 €
Sistemas para preparação de AQS:	10 000,00 €
Sistemas de energia renovável: (fotovoltaicos, eólicos, biomassa, etc.)	3 000,00 €
Acabamentos e pinturas:	10 000,00 €
Outros encargos (licenças, etc.):	10 000,00 €
Outros encargos:	75 20,50 €

Vida útil do edifício (Análise a preços constantes)	
Período de vida útil do edifício:	50 anos
Taxa média de inflação neste período:	3,00 %/ano
Rendimentos líquidos de energia vendida:	0,00 €/ano
Rendimentos líquidos de rendas:	0,00 €/ano
Outros rendimentos líquidos:	0,00 €/ano
Gastos em conservação e manutenção:	1 000,00 €/ano
Gastos em impostos (IMI, etc.):	1 000,00 €/ano

Clínica



Figura 0.4 – Planta do piso 0 [Raimundo et al, 2011c]

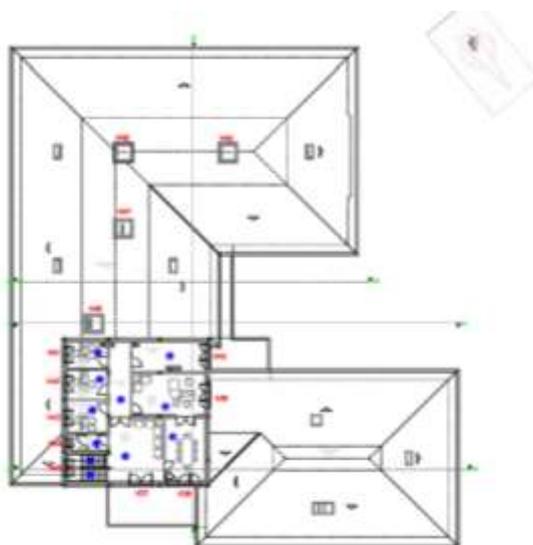


Figura 0.5 – Planta do piso 1 [Raimundo et al, 2011c]

Tabela 0.2 – Perfil de ocupação para a clínica

Perfil de ocupação Para o edifício a funcionar a 100%					
2ª a 6ª feira		Sabados		Domingos	
Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)
0 - 1	50	0 - 1	50	0 - 1	50
1 - 2	50	1 - 2	50	1 - 2	50
2 - 3	50	2 - 3	50	2 - 3	50
3 - 4	50	3 - 4	50	3 - 4	50
4 - 5	50	4 - 5	50	4 - 5	50
5 - 6	50	5 - 6	50	5 - 6	50
6 - 7	50	6 - 7	50	6 - 7	50
7 - 8	50	7 - 8	50	7 - 8	50
8 - 9	100	8 - 9	100	8 - 9	100
9 - 10	100	9 - 10	100	9 - 10	100
10 - 11	100	10 - 11	100	10 - 11	100
11 - 12	100	11 - 12	100	11 - 12	100
12 - 13	100	12 - 13	100	12 - 13	100
13 - 14	100	13 - 14	100	13 - 14	100
14 - 15	100	14 - 15	100	14 - 15	100
15 - 16	100	15 - 16	100	15 - 16	100
16 - 17	100	16 - 17	100	16 - 17	100
17 - 18	50	17 - 18	50	17 - 18	50
18 - 19	50	18 - 19	50	18 - 19	50
19 - 20	50	19 - 20	50	19 - 20	50
20 - 21	50	20 - 21	50	20 - 21	50
21 - 22	50	21 - 22	50	21 - 22	50
22 - 23	50	22 - 23	50	22 - 23	50
23 - 24	50	23 - 24	50	23 - 24	50

Tabela 0.3 – Clínica: custos de investimento, rendimentos e gastos anuais (sem IVA)

Investimento inicial	1 766 557,68 €
Vãos envidraçados:	455 016,33 €
Terreno e infraestruturas:	500 000,00 €
Sistemas de iluminação:	200 000,00 €
Sistemas de AVAC:	300 000,00 €
Sistemas de água e esgostos:	100 000,00 €
Sistemas para preparação de AQS:	80 000,00 €
Sistemas de energia renovável: (fotovoltaicos, eólicos, biomassa, etc.)	42 000,00 €
Acabamentos e pinturas:	160 000,00 €
Outros encargos (licenças, etc.):	50 000,00 €
Outros encargos:	299 280,00 €

Vida útil do edifício (Análise a preços constantes)	
Período de vida útil do edifício:	50 anos
Taxa média de inflação neste período:	3,00 %/ano
Rendimentos líquidos de energia vendida:	0,00 €/ano
Rendimentos líquidos de rendas:	0,00 €/ano
Outros rendimentos líquidos:	0,00 €/ano
Gastos em conservação e manutenção:	20 000,00 €/ano
Gastos em impostos (IMI, etc.):	10 000,00 €/ano

Escola



Figura 0.6 – Vista da entrada principal da Escola Secundária Avelar Brotero, correspondente ao Bloco C



Figura 0.7 – Vista geral dos blocos da Escola Avelar Brotero: Bloco A – o mais distante, Bloco B – o mais próximo, Bloco C – do lado esquerdo (entrada principal), Bloco D – colado ao A (e por baixo do campo de jogos), Bloco E – do lado direito (pavilhão ginodesportivo, aberto lateralmente ao exterior).

Tabela 0.4 – Perfil de ocupação da escola secundária

Perfil de ocupação Para o edifício a funcionar a 100%					
2ª a 6ª feira		Sabados		Domingos	
Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)
0 - 1	0	0 - 1	0	0 - 1	0
1 - 2	0	1 - 2	0	1 - 2	0
2 - 3	0	2 - 3	0	2 - 3	0
3 - 4	0	3 - 4	0	3 - 4	0
4 - 5	0	4 - 5	0	4 - 5	0
5 - 6	0	5 - 6	0	5 - 6	0
6 - 7	0	6 - 7	0	6 - 7	0
7 - 8	40	7 - 8	0	7 - 8	0
8 - 9	60	8 - 9	0	8 - 9	0
9 - 10	100	9 - 10	0	9 - 10	0
10 - 11	100	10 - 11	0	10 - 11	0
11 - 12	90	11 - 12	0	11 - 12	0
12 - 13	80	12 - 13	0	12 - 13	0
13 - 14	100	13 - 14	0	13 - 14	0
14 - 15	100	14 - 15	0	14 - 15	0
15 - 16	100	15 - 16	0	15 - 16	0
16 - 17	70	16 - 17	0	16 - 17	0
17 - 18	60	17 - 18	0	17 - 18	0
18 - 19	40	18 - 19	0	18 - 19	0
19 - 20	7	19 - 20	0	19 - 20	0
20 - 21	7	20 - 21	0	20 - 21	0
21 - 22	7	21 - 22	0	21 - 22	0
22 - 23	7	22 - 23	0	22 - 23	0
23 - 24	0	23 - 24	0	23 - 24	0

Tabela 0.5 – Escola: custos de investimento, rendimentos e gastos anuais (sem IVA)

Investimento inicial	3 584 271,36 €
Vãos envidraçados:	549 002,36 €
Terreno e infraestruturas:	500 000,00 €
Sistemas de iluminação:	400 000,00 €
Sistemas de AVAC:	900 000,00 €
Sistemas de água e esgostos:	300 000,00 €
Sistemas para preparação de AQS:	240 000,00 €
Sistemas de energia renovável: (fotovoltaicos, eólicos, biomassa, etc.)	42 000,00 €
Acabamentos e pinturas:	260 000,00 €
Outros encargos (licenças, etc.):	50 000,00 €
Outros encargos:	343 269,00 €

Vida útil do edifício (Análise a preços constantes)	
Período de vida útil do edifício:	50 anos
Taxa média de inflação neste período:	3,00 %/ano
Rendimentos líquidos de energia vendida:	0,00 €/ano
Rendimentos líquidos de rendas:	0,00 €/ano
Outros rendimentos líquidos:	0,00 €/ano
Gastos em conservação e manutenção:	20 000,00 €/ano
Gastos em impostos (IMI, etc.):	0,00 €/ano

Supermercado

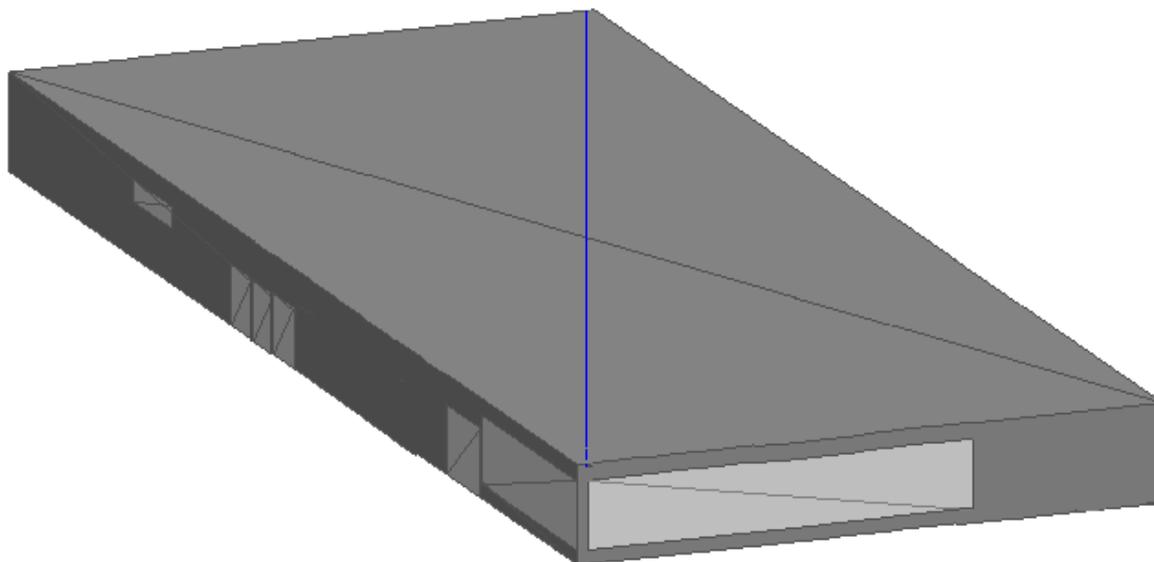


Figura 0.8 – Vista geral exterior do supermercado [Vidigueira, 2013].

Tabela 0.6 – Perfil de ocupação do edifício

Perfil de ocupação					
Para o edifício a funcionar a 100%					
2ª a 6ª feira		Sabados		Domingos	
Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)
0 - 1	0	0 - 1	0	0 - 1	0
1 - 2	0	1 - 2	0	1 - 2	0
2 - 3	0	2 - 3	0	2 - 3	0
3 - 4	0	3 - 4	0	3 - 4	0
4 - 5	0	4 - 5	0	4 - 5	0
5 - 6	0	5 - 6	0	5 - 6	0
6 - 7	0	6 - 7	0	6 - 7	0
7 - 8	5	7 - 8	5	7 - 8	5
8 - 9	5	8 - 9	5	8 - 9	5
9 - 10	30	9 - 10	10	9 - 10	10
10 - 11	60	10 - 11	50	10 - 11	50
11 - 12	60	11 - 12	80	11 - 12	80
12 - 13	60	12 - 13	80	12 - 13	80
13 - 14	60	13 - 14	80	13 - 14	80
14 - 15	60	14 - 15	80	14 - 15	80
15 - 16	60	15 - 16	80	15 - 16	80
16 - 17	60	16 - 17	80	16 - 17	80
17 - 18	70	17 - 18	90	17 - 18	90
18 - 19	80	18 - 19	100	18 - 19	100
19 - 20	60	19 - 20	70	19 - 20	70
20 - 21	50	20 - 21	60	20 - 21	60
21 - 22	30	21 - 22	40	21 - 22	40
22 - 23	10	22 - 23	10	22 - 23	10
23 - 24	5	23 - 24	5	23 - 24	5

Tabela 0.7 – Supermercado: custos de investimento, rendimentos e gastos anuais (sem IVA)

Investimento inicial	633 370,63 €
Vãos envidraçados:	17 320,63 €
Terreno e infraestruturas:	200 000,00 €
Sistemas de iluminação:	100 000,00 €
Sistemas de AVAC:	100 000,00 €
Sistemas de água e esgotos:	40 000,00 €
Sistemas para preparação de AQS:	8 000,00 €
Sistemas de energia renovável: (fotovoltaicos, eólicos, biomassa, etc.)	12 000,00 €
Acabamentos e pinturas:	80 000,00 €
Outros encargos (licenças, etc.):	20 000,00 €
Outros encargos:	10 000,00 €

Vida útil do edifício	(Análise a preços constantes)	
Período de vida útil do edifício:	50	anos
Taxa média de inflação neste período:	3,00	%/ano
Rendimentos líquidos de energia vendida:	0,00	€/ano
Rendimentos líquidos de rendas:	0,00	€/ano
Outros rendimentos líquidos:	0,00	€/ano
Gastos em conservação e manutenção:	10 000,00	€/ano
Gastos em impostos (IMI, etc.):	8 000,00	€/ano

ANEXO B – SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS OPACAS

Tabelas relativas à descrição dos elementos construtivos. Tabelas relativas aos coeficientes de transmissão térmica, massas superficiais úteis e custos por metro quadrado isolando pelo interior, intermédio e pelo exterior.

Tabela 0.1 – Descrição dos elementos construtivos da envolvente opaca interior

Envolvente Opaca Interior		
Elemento Construtivo	Espessura [cm]	Descrição (do exterior para o interior)
Paredes em contato com outros espaços interiores	27	Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm, Tijolo furado normal de 11 cm, Espaço de ar fracamente ventilado com 1 cm, Tijolo furado normal de 11 cm, Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm.
Pilares e Vigas em contato com espaços interiores	38	Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm, Betão armado (vol de ferro < 1%) de inertes com 22 cm, Espaço de ar fracamente ventilado com 1 cm, Tijolo furado normal de 11 cm, Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm.
Pavimento sobre espaço interior	55	Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm, Laje aligeirada a 1 vigota com 38 cm, Betão isolante só com areia leve com 7.5 cm, Betonilha (argamassa) com 5.5 cm, Madeira de carvalho com 2 cm.
Cobertura sob interior	55	Madeira de carvalho com 2 cm, Betonilha (argamassa) com 5.5 cm, Betão isolante só com areia leve com 7.5 cm, Laje aligeirada a 1 vigota com 38 cm (betão leve 1 furo, 35cm + betão 3cm, base 16-30cm), Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm.

Tabela 0.2 – Descrição dos elementos da compartimentação interior

Elementos da compartimentação interior		
Elemento Construtivo	Espessura [cm]	Descrição (do exterior para o interior)
Parede fina	15	Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm, Tijolo furado normal de 11 cm, Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm.
Parede grossa	27	Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm, Tijolo furado normal de 11 cm, Espaço de ar fracamente ventilado com 1 cm, Tijolo furado normal de 11 cm, Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm.
Pilar/Viga exterior	38	Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm, Betão armado (vol de ferro < 1%) de inertes com 22 cm, Espaço de ar fracamente ventilado com 1 cm, Tijolo furado normal de 11 cm, Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm.
Pavimento de compartimentação	55	Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm, Laje aligeirada a 1 vigota com 38 cm, Betão isolante só com areia leve com 7.5 cm, Betonilha (argamassa) com 5.5 cm, Madeira de carvalho com 2 cm.
Cobertura de compartimentação	55	Madeira de carvalho com 2 cm, Betonilha (argamassa) com 5.5 cm, Betão isolante só com areia leve com 7.5 cm, Laje aligeirada a 1 vigota com 38 cm (betão leve 1 furo, 35cm + betão 3cm, base 16-30cm), Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm.

Tabela 0.3 – Descrição dos elementos em contato com o solo

Elementos em contato com o solo		
Elemento Construtivo	Espessura [cm]	Descrição (do exterior para o interior)
Pavimento sobre o exterior	55	Reboco tradicional (argamassa) com 2 cm, Laje aligeirada a 1 vigota com 38 cm, Betão isolante só com areia leve com 7.5 cm, Betonilha (argamassa) com 5.5 cm, Madeira de carvalho com 2 cm.

Tabela 0.4 - Tabela comparativa da aplicação do isolamento no pilar/viga exterior

Espessura [mm]	Isolamento pelo interior			Isolamento intermédio			Isolamento pelo exterior		
	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]
0	150,00	1,36	141,49	150,00	1,36	141,49	150,00	1,36	141,49
30	9,00	0,68	153,40	134,00	0,69	147,65	150,00	0,68	184,50
40	9,00	0,59	154,15	134,00	0,59	148,40	150,00	0,59	185,50
50	9,00	0,51	154,90	134,00	0,52	149,15	150,00	0,51	186,25
60	9,00	0,46	155,65	134,00	0,46	149,90	150,00	0,46	187,00
80	9,00	0,38	157,14	134,00	0,38	151,39	150,00	0,38	188,49
100	9,00	0,32	159,04	134,00	0,32	153,29	150,00	0,32	190,39
120	9,00	0,28	161,95	134,00	0,28	156,20	150,00	0,28	193,30

Tabela 0.5 – Tabela comparativa da aplicação do isolamento caixa de estore

Espessura [mm]	Isolamento pelo interior			Isolamento intermédio			Isolamento pelo exterior		
	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]
0	38,00	1,01	96,67	38,00	1,01	96,67	38,00	1,01	96,67
30	9,00	0,58	110,83	38,00	0,59	106,31	38,00	0,59	139,93
40	9,00	0,51	112,32	38,00	0,52	107,80	38,00	0,52	140,68
50	9,00	0,45	113,83	38,00	0,46	109,31	38,00	0,46	141,43
60	9,00	0,41	115,32	38,00	0,41	110,80	38,00	0,41	142,18
80	9,00	0,34	118,31	38,00	0,35	113,79	38,00	0,35	143,67
100	9,00	0,30	122,12	38,00	0,30	117,60	38,00	0,30	145,57
120	9,00	0,26	127,93	38,00	0,26	123,41	38,00	0,26	148,48

Tabela 0.6 – Tabela comparativa da aplicação do isolamento na parede em contato com outros espaços interiores

Espessura [mm]	Isolamento pelo interior			Isolamento intermédio			Isolamento pelo exterior		
	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]
0	134,00	1,02	47,02	134,00	1,02	47,02	134,00	1,02	47,02
30	9,00	0,58	58,93	134,00	0,59	53,18	150,00	0,58	61,16
40	9,00	0,51	59,68	134,00	0,52	53,93	150,00	0,51	61,91
50	9,00	0,46	60,43	134,00	0,46	54,68	150,00	0,46	62,66
60	9,00	0,41	61,18	134,00	0,42	55,43	150,00	0,41	63,41
80	9,00	0,34	62,67	134,00	0,35	56,92	150,00	0,34	64,90
100	9,00	0,30	64,57	134,00	0,30	58,82	150,00	0,30	66,80
120	9,00	0,26	67,48	134,00	0,26	61,73	150,00	0,26	69,71

Tabela 0.7 – Tabela comparativa da aplicação do isolamento no pilar/viga em contato com outros espaços interiores

Espessura [mm]	Isolamento pelo interior			Isolamento intermédio			Isolamento pelo exterior		
	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]
0	150,00	1,22	141,49	150,00	1,22	141,49	150,00	1,22	141,49
30	9,00	0,64	153,40	134,00	0,65	147,65	150,00	0,64	155,63
40	9,00	0,56	154,15	134,00	0,56	148,40	150,00	0,56	156,38
50	9,00	0,49	154,90	134,00	0,50	149,15	150,00	0,49	157,13
60	9,00	0,44	155,65	134,00	0,44	149,90	150,00	0,44	157,88
80	9,00	0,36	157,14	134,00	0,37	151,39	150,00	0,36	160,08
100	9,00	0,31	159,04	134,00	0,31	153,29	150,00	0,31	161,27
120	9,00	0,27	161,95	134,00	0,27	156,20	150,00	0,27	164,18

Tabela 0.8 – Tabela comparativa da aplicação do isolamento no pavimento exterior

Espessura [mm]	Isolamento pelo interior			Isolamento intermédio			Isolamento pelo exterior		
	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]
0	150,00	1,17	177,21	150,00	1,17	177,21	150,00	1,17	177,21
30	113,00	0,64	184,24	-	-	-	150,00	0,64	172,55
40	113,00	0,55	184,99	-	-	-	150,00	0,56	173,30
50	113,00	0,49	185,74	-	-	-	150,00	0,49	174,05
60	113,00	0,44	186,49	-	-	-	150,00	0,44	174,77
80	113,00	0,36	187,98	-	-	-	150,00	0,36	176,29
100	113,00	0,31	189,88	-	-	-	150,00	0,31	178,19
120	113,00	0,27	192,79	-	-	-	150,00	0,27	181,10

Tabela 0.9 – Tabela comparativa da aplicação do isolamento no pavimento sobre espaço interior

Espessura [mm]	Isolamento pelo interior			Isolamento intermédio			Isolamento pelo exterior		
	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]
0	150	1,015	177,21	150	1,015	177,21	150	1,015	177,21
30	113	0,588	184,24	-	-	-	150	0,58	191,37
40	113	0,516	184,986	-	-	-	150	0,51	192,116
50	113	0,46	185,7382	-	-	-	150	0,454	192,8682
60	113	0,414	186,486	-	-	-	150	0,41	193,616
80	113	0,346	187,982	-	-	-	150	0,343	195,112
100	113	0,297	189,884	-	-	-	150	0,295	197,014
120	113	0,26	192,79	-	-	-	150	0,259	199,92

Tabela 0.10 – Tabela comparativa da aplicação do isolamento na cobertura exterior

Espessura [mm]	Isolamento pelo interior			Isolamento intermédio			Isolamento pelo exterior		
	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]
0	150,00	2,40	83,63	150,00	2,40	83,63	150,00	2,40	83,63
30	9,00	0,87	95,46	-	-	-	150,00	0,88	88,13
40	9,00	0,72	96,21	-	-	-	150,00	0,73	88,88
50	9,00	0,61	96,96	-	-	-	150,00	0,62	89,63
60	9,00	0,54	97,71	-	-	-	150,00	0,54	90,38
80	9,00	0,43	99,20	-	-	-	150,00	0,43	91,87
100	9,00	0,35	101,10	-	-	-	150,00	0,36	93,77
120	9,00	0,30	104,01	-	-	-	150,00	0,31	96,68

Tabela 0.11 – Tabela comparativa da aplicação do isolamento na cobertura sob espaço interior

Espessura [mm]	Isolamento pelo interior			Isolamento intermédio			Isolamento pelo exterior		
	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]
0	150,00	1,22	177,17	150,00	1,22	177,17	150,00	1,22	177,17
30	9,00	0,64	189,00	150,00	0,65	181,67	150,00	0,65	181,67
40	9,00	0,56	189,75	150,00	0,56	182,42	150,00	0,56	182,42
50	9,00	0,49	190,50	150,00	0,50	183,17	150,00	0,50	183,17
60	9,00	0,44	191,25	150,00	0,45	183,92	150,00	0,45	183,92
80	9,00	0,36	192,74	150,00	0,37	185,41	150,00	0,37	185,41
100	9,00	0,31	194,64	150,00	0,31	187,31	150,00	0,31	187,31
120	9,00	0,27	197,55	150,00	0,27	190,22	150,00	0,27	190,22

Tabela 0.12 – Tabela comparativa da aplicação do isolamento no pavimento térreo

Espessura [mm]	Isolamento pelo interior			Isolamento intermédio			Isolamento pelo exterior		
	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]	M_{si} [kg/m ²]	U [W/m ² .K]	Custo [€/m ²]
0	150,00	1,17	177,21	150,00	1,17	177,21	150,00	1,17	177,21
30	113,00	0,64	184,24	-	-	-	150,00	0,64	172,55
40	113,00	0,55	184,99	-	-	-	150,00	0,56	173,30
50	113,00	0,49	185,74	-	-	-	150,00	0,49	174,05
60	113,00	0,44	186,49	-	-	-	150,00	0,44	174,77

Custo ótimo das soluções construtivas opacas de edifícios localizados em Portugal

80	113,00	0,36	187,98	-	-	-	150,00	0,36	176,29
100	113,00	0,31	189,88	-	-	-	150,00	0,31	178,19
120	113,00	0,27	192,79	-	-	-	150,00	0,27	181,10

ANEXO C – CUSTO ANUAL EQUIVALENTE

Tabela 0.1 – Razão entre o gasto em energia e o custo anual equivalente (CAE) da escola

ODEMIRA						
	Isolamento pelo interior		Isolamento pelo intermédio		Isolamento pelo exterior	
Espessura [mm]	CAE do edifício [Euro/ano]	Gasto em energia/CAE	CAE do edifício [Euro/ano]	Gasto em energia/CAE	CAE do edifício [Euro/ano]	Gasto em energia/CAE
0	374 129,25	30,0%	374 129,25	30,0%	374 129,25	30,0%
30	380 278,80	28,5%	370 251,57	27,8%	389 621,18	26,3%
40	380 132,62	28,3%	370 197,21	27,6%	389 593,71	26,1%
50	380 277,24	28,1%	370 452,09	27,4%	389 838,46	26,0%
60	380 604,46	28,0%	370 878,52	27,3%	390 257,27	25,9%
80	381 546,90	27,8%	372 021,67	27,2%	391 380,36	25,8%
100	383 097,43	27,6%	373 741,09	27,0%	393 068,45	25,6%

MIRANDELA						
	Isolamento pelo interior		Isolamento pelo intermédio		Isolamento pelo exterior	
Espessura [mm]	CAE do edifício [Euro/ano]	Gasto em energia/CAE	CAE do edifício [Euro/ano]	Gasto em energia/CAE	CAE do edifício [Euro/ano]	Gasto em energia/CAE
0	392 624,88	33,3%	392 624,88	33,3%	392 624,88	33,3%
30	389 481,46	30,2%	380 734,64	29,8%	400 065,92	28,2%
40	388 145,99	29,8%	379 320,09	29,3%	398 701,00	27,8%
50	387 354,35	29,4%	378 488,96	29,0%	397 853,24	27,5%
60	386 942,19	29,2%	378 027,53	28,7%	397 396,05	27,2%
80	386 755,64	28,8%	377 821,71	28,3%	397 158,99	26,8%
100	387 482,83	28,4%	378 543,47	28,0%	397 774,98	26,5%

Tabela 0.2 – Razão entre o gasto em energia e o custo anual equivalente (CAE) do supermercado

ODEMIRA						
	Isolamento pelo interior		Isolamento pelo intermédio		Isolamento pelo exterior	
Espessura [mm]	CAE do edifício [Euro/ano]	Gasto em energia/CAE	CAE do edifício [Euro/ano]	Gasto em energia/CAE	CAE do edifício [Euro/ano]	Gasto em energia/CAE
0	89 913,52	40,6%	89 913,52	40,6%	89 913,52	40,6%
30	89 733,10	39,4%	89 080,39	39,4%	89 170,24	39,4%
40	89 685,76	39,3%	89 046,41	39,3%	89 141,71	39,3%
50	89 680,43	39,2%	89 052,22	39,2%	89 151,51	39,2%

60	89 698,52	39,1%	89 080,53	39,2%	89 181,34	39,1%
80	89 773,86	39,0%	89 172,37	39,1%	89 279,73	39,0%
100	89 919,85	38,9%	89 329,43	39,0%	89 439,23	38,9%

MIRANDELA						
Espessura [mm]	Isolamento pelo interior		Isolamento pelo intermédio		Isolamento pelo exterior	
	CAE do edifício [Euro/ano]	Gasto em energia/CAE	CAE do edifício [Euro/ano]	Gasto em energia/CAE	CAE do edifício [Euro/ano]	Gasto em energia/CAE
0	93 109,04	42,7%	93 109,04	42,7%	93 109,04	42,7%
30	91 785,75	40,8%	91 226,24	40,8%	91 256,96	40,7%
40	91 601,30	40,6%	91 042,51	40,6%	91 074,34	40,5%
50	91 490,87	40,4%	90 934,02	40,5%	90 965,96	40,4%
60	91 428,48	40,3%	90 873,95	40,4%	90 906,32	40,3%
80	91 386,23	40,1%	90 838,65	40,2%	90 873,80	40,1%
100	91 449,69	39,9%	90 906,59	40,0%	90 939,61	39,9%