



Pedro Couceiro Dias de Carvalho

CARACTERIZAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS SUJEITAS A UM REGIME DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DINÂMICO

CHARACTERIZATION OF THE THERMAL PERFORMANCE OF CONSTRUCTIVE SOLUTIONS SUBJECT TO
A DYNAMIC HEAT TRANSFER REGIME

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pelo Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões e pela Doutora Maria Inês Vieira Simões

Coimbra, 12 de outubro de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



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

Pedro Couceiro Dias de Carvalho

Caracterização do desempenho térmico de soluções construtivas sujeitas a um regime de transferência de calor dinâmico

Characterization of the thermal performance of constructive solutions subject to a dynamic heat transfer regime

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções, orientada pelo Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões e pela Doutora Maria Inês Vieira Simões

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Coimbra, 12 de outubro de 2017

AGRADECIMENTOS

Apesar de este documento ter um único autor, nunca teria sido realizado sem a contribuição de muitas outras pessoas às quais quero agradecer, e destacar:

Aos Professores Doutores Nuno Albino Vieira Simões e Maria Inês Vieira Simões pela disponibilidade, apoio e paciência demonstrados durante todo este processo, e também por todos os conhecimentos partilhados, explicações dadas e correções efetuadas no decorrer deste trabalho.

A toda a minha família, pelo apoio incondicional, aposta e crença nas minhas capacidades.

E, é claro, à minha namorada Tânia, cujo apoio, orientação, amizade, inteligência, paciência e amor, sempre constantes, tornaram esta dissertação possível.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto POCI-01-0247-FEDER-003408 - “Slimframe PV & Cork Skin”, financiado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização, Portugal 2020 e União Europeia, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.

RESUMO

Esta dissertação aborda o comportamento térmico de soluções construtivas sujeitas a transferência de calor transiente, uma vez que são sujeitas a variações de temperatura. A imposição de um regime dinâmico, contrariamente ao permanente, permite uma análise e compreensão dos fenômenos térmicos mais próxima da situação real, permitindo estudos mais detalhados de otimização no consumo energético dos edifícios. Esta abordagem abrange todo o tipo de parede exterior, seja ela um elemento estrutural ou não.

Este estudo tem como objetivo a caracterização do desempenho térmico de soluções construtivas sujeitas a uma variação sinusoidal da temperatura na superfície exterior, através da determinação das características térmicas dinâmicas. Esta caracterização abrange a determinação de parâmetros como o atraso térmico, a transmissão térmica de calor e o fator decremental.

A determinação do atraso térmico e fator decremental é realizada com recurso a dois tipos de ferramentas: através de procedimentos de cálculo propostos em normas e através de modelos analíticos. Os procedimentos de cálculo, estão expostos na Norma ISO/FDIS 13786:2006(E) e na Norma ABNT Projeto 02:135.07-001/2. Alternativamente às normas, os modelos analíticos (baseados em funções de Green) permitem estudar a propagação de calor, por condução, em sistemas multicamada. Estas formulações são feitas no domínio da frequência, ou seja, após a aplicação de transformadas de Fourier às equações no domínio do tempo, tendo sido, anteriormente a este trabalho, validadas experimentalmente.

Na presente dissertação apresenta-se, inicialmente, a validação das ferramentas desenvolvidas. Posteriormente aplica-se a ferramenta baseada na Norma ISO/FDIS 13786:2006(E), numa análise de sensibilidade para conhecer a influência das características das camadas nos resultados finais. De seguida, as ferramentas de cálculo são utilizadas para determinar os parâmetros mencionados para um conjunto de soluções construtivas reais.

Os resultados obtidos revelam que quanto menor a condutibilidade térmica e quanto maiores os valores da massa volúmica, calor específico e espessura do isolamento melhor é o comportamento dinâmico das soluções, sendo a condutibilidade térmica a propriedade que mais influencia a resposta.

ABSTRACT

This thesis addresses the thermal behaviour of constructive solutions subject to transient heat transfer since they are exposed to temperature variations. The imposition of a dynamic regime, unlike the permanent one, allows an analysis and understanding of thermal phenomena closest to reality, allowing more detailed studies of optimization in the energy consumption of buildings. This approach covers all types of exterior walls, may they be structural elements or not.

This study aims to characterize the thermal performance of constructive solutions subject to a sinusoidal variation of the temperature on the outer surface, by determination of the dynamic thermal characteristics. In this characterization, the determination of parameters such as the thermal delay, the thermal transmission and decremental factor are determined.

The determination of the thermal delay and decremental factor is performed using two types of tools: through calculation procedures proposed in standards and through analytical models. The calculation procedures are set out in ISO/FDIS Standard 13786:2006(E) and ABNT Standard Project 02:135.07-001/2. As an alternative to standards, analytical models (based on Green's functions) allow the study of heat propagation by conduction in multilayer systems. These formulations are made in the frequency domain, that is, after the application of Fourier transforms in the time domain, having previously been validated experimentally.

In the present dissertation is presented, initially, the validation of the tools developed. Afterwards, the tool based on ISO/FDIS 13786:2006(E) is applied, in a sensitivity analysis to know the influence of the characteristics of the layers in the final results. Next, the calculation tools are used to determine the mentioned parameters for a set of constructive solutions.

The results show that the lower thermal conductivity and the higher the values of density, specific heat and thickness of the insulation, the better the dynamic behaviour of the solutions, with the thermal conductivity being the property that most influences the response.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
SIMBOLOGIA.....	1
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos	5
1.3 Resumo da estrutura da dissertação.....	6
2 CONCEITOS INTRODUTÓRIOS	8
2.1 Propriedades Térmicas.....	8
2.2 Regime Permanente e Regime Dinâmico.....	10
3 FERRAMENTAS DE CÁLCULO	12
3.1 Norma ISO/FDIS 13786:2006(E)	12
3.1.1 Introdução	12
3.1.2 Dados necessários	12
3.1.3 Limitações.....	12
3.2 Ferramenta de cálculo baseada na Norma ISO/FDIS 13786:2006(E).....	13
3.3 Norma Brasileira ABNT Projeto 02:135.07-001/2	15
3.3.1 Introdução	15
3.3.2 Validação da ferramenta.....	15
3.3.3 Conclusão	16
3.4 Programa Analítico.....	18
4 DEFINIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO.....	20
4.1 Análise de sensibilidade	20
4.1.1 Introdução	20
4.1.2 Variação da Condutibilidade Térmica, λ	21

4.1.3	Variação do Calor Específico, c	24
4.1.4	Variação da Massa Volúmica, ρ	27
4.1.5	Considerações finais dos casos teóricos	29
4.2	Casos Reais	29
4.2.1	Introdução	29
4.2.2	Painel de madeira (OSB) e argamassa (BM).....	30
4.2.3	Argamassa (BM), chapa metálica (MP) e tijolo cerâmico (CB).....	31
4.2.4	Análise de sensibilidade	31
4.2.5	Considerações finais dos casos reais.....	33
5	COMPARAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	34
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
6.1	Conclusões.....	37
6.2	Propostas de trabalhos futuros.....	38
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
	ANEXOS	1
	Anexo A – Resultados dos exemplos da norma ISO/FDIS 13786:2006(E).....	1
	A1. Exemplo D1	1
	A2. Exemplo D2	1
	Anexo B – Resultados dos exemplos da norma ABNT Projecto02:135.07-001/2.....	2
	B1. Exemplo C1: Parede de tijolos maciços rebocados em ambas as fases.....	2
	B2. Exemplo C2: Parede com blocos de concreto colados, sem reboco.....	2
	B3. Exemplo C3: Parede de tijolos cerâmicos de seis furos rebocados em ambas as faces	3
	B4. Exemplo C4: Parede dupla com placas de concreto e câmara de ar não ventilada	3
	Anexo C – Variação da condutibilidade térmica, λ	5
	C1. Resultados para 1 cm de isolamento	5
	C2. Resultados para 6 cm de isolamento	6
	C3. Resultados para 19 cm de isolamento	7
	Anexo D – Variação do calor específico, c	8
	D1. Resultados para 1 cm de isolamento.....	8
	D2. Resultados para 6 cm de isolamento.....	9
	D3. Resultados para 19 cm de isolamento.....	10

Anexo E – Variação da massa volúmica, ρ	11
E1. Resultados para 1 cm de isolamento	12
E2. Resultados para 6 cm de isolamento	13
E3. Resultados para 19 cm de isolamento	14
Anexo F – Casos de Estudo.....	15
F1. Caso de Estudo 1	15
F2. Caso de Estudo 2	16
F3. Caso de Estudo 3	17
F4. Caso de Estudo 4	18
F5. Caso de Estudo 5	19
F6. Caso de Estudo 6	20
F7. Caso de Estudo 7	21
Anexo G – Variação da espessura e da posição da camada de isolamento.....	22
G1. Isolamento colocado no meio da solução construtiva	22
G2. Isolamento colocado no meio e no exterior da solução construtiva	23
G3. Isolamento colocado no meio e no interior da solução construtiva	24

SIMBOLOGIA

C_T	Capacidade térmica total do componente
C_{Text}	Capacidade térmica da camada externa do componente
U	Coefficiente de transmissão térmica
T	Período das variações
Z_I	Matriz de transferência de calor da camada interna
Z_{ei}	Matriz de transferência de calor do ambiente exterior até ao ambiente interior
Z_n	Matriz de transferência de calor da camada externa
Z_{se}	Matriz de transferência de calor da superfície exterior
Z_{si}	Matriz de transferência de calor da superfície interior
c	Calor específico
f	Fator decremental
j	Unidade no eixo imaginário para um número complexo; $J=-1$
ΔT	Variação de temperatura
ΔT_i	Variação de temperatura do ambiente interior
Φ	Atraso térmico
δ	Profundidade de penetração periódica de uma onda de calor
ζ	Rácio entre a espessura da camada e a profundidade de penetração periódica
λ	Condutibilidade térmica
ρ	Massa volúmica

ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
AG	Caixa de ar (Air Gap)
BM	Argamassa (Bonding Mortar)
CB	Tijolo cerâmico (Ceramic Brick)
CE _n	Caso de estudo (n=[1,7])
EPS	Poliestireno Expandido (Expanded Polystyrene)
EU	União Europeia (European Union)
FDIS	Final Draft International Standard
HVAC	Heating ventilation and air-conditioning
ICB	Aglomerado de Cortiça Expandida (Expanded Insulation Corkboard)
ISO	International Organization for Standardization
ITeCons	Instituto de investigação e desenvolvimento tecnológico para a construção, energia, ambiente e sustentabilidade
MP	Chapa metálica (Metal Plate)
OP	Perfil Ómega (Omega Profile)
OSB	Painel de madeira (Oriented Strand Board)
RS	Resistência superficial
R _{si}	Resistência superficial do ambiente interior
R _{se}	Resistência superficial do ambiente exterior
RT	Reboco tradicional
TB	Bloco térmico (Thermal Block)
XPS	Poliestireno Extrudido (Expandable Polystyrene)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

No início do século XXI, uma crise financeira catalisada pela falência do banco Lehman Brothers, rapidamente se tornou numa crise económica global. A “Grande Recessão” como foi intitulada, deu origem a grandes mudanças não só na qualidade de vida do cidadão comum, mas também nas ideologias políticas defendidas pelos líderes governamentais de todo o mundo.

Na Europa, instalou-se um clima de poupança e de redução de consumos a todos os níveis.

Um dos temas que esta dissertação aborda é a redução do consumo energético. Através de uma estratégia designada por “Eficiência energética” é possível reduzir o consumo energético, e reduzir simultaneamente as emissões de gases de efeito de estufa e dependência energética, originando benefícios económicos e ambientais.

O parlamento europeu aprovou, em Maio de 2010, a diretiva (Directive 2010/31/EU) referente ao desempenho energético dos edifícios e, em Outubro de 2012, a diretiva (Directive 2012/27/EU) que contém medidas que promovem a eficiência energética, estudos, pesquisa e desenvolvimento de soluções tecnologicamente inovadoras com o objetivo de alcançar uma redução do consumo total de energia.

Um estudo realizado por Iwaro e Mwasha (2010), sobre a regulamentação da eficiência energética em países em desenvolvimento concluiu que os países da América Latina ainda se encontram nos primórdios do tratamento deste tipo de problema. A China, pelo contrário, viu a sua primeira regulamentação sobre o tema a ser aplicada em 1986, e países como México, Egito, Hong Kong, Índia e Brasil só recentemente implementaram estes regulamentos (Asan 2000).

Devido às altas necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento dos edifícios, o setor da construção é uma das áreas onde a redução do consumo energético pode ter mais impacto na redução da emissão dos gases com efeito de estufa, uma vez que, nos últimos anos, o consumo energético a nível residencial tem vindo a aumentar.

Para que se alcance a redução energética e se aumente a eficiência energética dos edifícios é necessária uma cuidada caracterização térmica dinâmica. Esta obtém-se através de parâmetros que identificam ou qualificam o comportamento térmico da envolvente do edifício, quando

sujeita a variações de temperatura ao longo de um período de tempo. As trocas de calor através da envolvente do edifício contribuem de uma forma importantíssima para o comportamento térmico, assim como, para a determinação dos requisitos energéticos do mesmo. Deste modo torna-se claro que, para a finalidade pretendida, a solução passa por aumentar a resistência térmica dos elementos de construção e melhorar a performance térmica, através de parâmetros como a inércia térmica ou o atraso térmico.

Enquanto a inércia térmica é um conceito bastante popular na engenharia civil e que está diretamente associado à capacidade da envolvente de um edifício reter energia em forma de calor e libertá-la lentamente, o conceito de atraso térmico não é aplicado e explorado correntemente nos estudos de comportamento térmico dos edifícios, embora seja um conceito tratado por vários investigadores e que tem sido objeto de estudo nos últimos anos em todo o mundo.

O atraso térmico em edifícios pode ser definido como o tempo necessário para que a temperatura interior, que difere ΔT da temperatura exterior, mude exatamente essa quantia de ΔT_i (Antonopoulos e Koranaki, 2000). Por outras palavras, o atraso térmico pode ser definido pela diferença de tempo entre uma variação de temperatura numa das superfícies do sistema construtivo e a manifestação dessa variação na face oposta, quando o sistema é sujeito a um regime variável de transmissão de calor. Soluções com um atraso térmico mais elevado contribuem para a melhoria do comportamento térmico de edifícios, visto que retardam a perda ou ganho de calor através da envolvente.

A norma ISO/FDIS 13786:2006(E) referente às componentes de performance térmica de edifícios descreve as trocas de calor entre o ambiente interior e o exterior num regime periódico permanente através de formulação matricial. Com essas matrizes é possível avaliar as capacidades e necessidades térmicas do ambiente em estudo, e calcular o coeficiente de transmissão térmica teórica usada para avaliar o atraso térmico e o fator decremental (Aste *et al.*, 2009).

Os parâmetros anteriormente mencionados são determinados tendo por base um período de 24h, considerando que a variação de temperatura do ar exterior tem um comportamento muito similar ao de uma curva sinusoidal, que a temperatura interior se mantém constante, e considerando apenas os coeficientes de transferência de calor convectivos e radiativos para as trocas de calor da superfície interna e externa. Fenómenos de condução não são contabilizados devido ao facto de se considerar que é necessário um meio sólido para a sua ocorrência (Aste *et al.*, 2009).

Luo, Moghtaderi, Sugo e Page (2007), definem o conceito de fator decremental como a razão entre a amplitude da evolução temporal da temperatura no interior de uma superfície multicamada, e a amplitude da temperatura na superfície externa ou da temperatura ar-sol (Luo *et al.*, 2007).

Asan (2000), define atraso térmico como o intervalo de tempo que uma onda de calor demora a propagar-se desde a superfície exterior até à superfície interior, e que o decréscimo da relação da amplitude desse processo é denominado por fator decremental (Asan, 2000).

Uma vez que os edifícios em geral estão sujeitos a condições térmicas e climáticas variáveis, é importante que as performances térmicas e energéticas dos seus elementos sejam estimadas através de modelos em que a variável tempo condiciona o comportamento das soluções (Simões, I. *et al.*, 2012). No entanto, existem outros fatores para além das condições climáticas exteriores que influenciam a performance energética do edifício tais como as condições climáticas interiores, o *design* do edifício e as respetivas características térmicas da sua envolvente, ganhos internos e ganhos solares no interior da estrutura e também os sistemas HVAC (heating ventilation and air-conditioning) (Melo *et al.*, 2016).

O interesse pelo estudo das propriedades térmicas dinâmicas de uma parede multicamada, sujeita a um regime periódico constante tem vindo a aumentar, e consequentemente, os estudos sobre o tema também. Os principais objetivos deste tipo de estudo são a avaliação ou identificação da influência das propriedades termofísicas dos materiais constituintes e sua posição, da orientação da parede, a espessura da camada do material isolante, a ventilação natural e as condições climáticas exteriores sobre o fator decremental e atraso térmico. (Aste *et al.*, 2009).

Antonopoulos e Koronaki apresentam um método simplificado, baseado no método de diferenças finitas para calcular o atraso térmico de um edifício de paredes de betão, que incorporam camadas de isolamento térmico com diferentes espessuras (Antonopoulos & Koronaki, 2000).

Os autores previamente referidos, apresentaram também um procedimento para avaliar a influência que os elementos de compartimentação interiores e mobiliário podem ter no atraso térmico do edifício, e que ao mesmo tempo analisa a capacidade térmica, a constante do tempo e o atraso térmico em secções discretas da envolvente de edifícios. Uma das conclusões desse estudo é que quando se reforça o elemento da envolvente do edifício que mais contribui para a capacidade térmica efetiva, as temperaturas de pico interiores são inferiores e o consumo de energia baixa, uma vez que, a capacidade de reter energia em forma de calor do edifício aumentou. De forma idêntica, quando se reforça o elemento da envolvente do edifício que mais contribui para o atraso térmico, a influência das variações meteorológicas exteriores sobre as condições térmicas interiores é reduzida (Antonopoulos & Koronaki, 2000).

Antonopoulos (2011) ainda publicou outro artigo, juntamente com Kravvaritis e Tzivanidis, no qual é referido que o método do atraso térmico apresentado anteriormente, é uma versão de um método mais conhecido intitulado de método T-history que é usado para quantificar as propriedades térmicas de materiais de mudança de fase (Antonopoulos & Koronaki, 2000).

Em estudos realizados em 1998, investigou-se o efeito que as propriedades termofísicas e a espessura das camadas da parede têm sobre o fator decremental, e o atraso térmico tanto isoladamente como de forma combinada. Nessas investigações concluiu-se que a espessura, o tipo e as propriedades termofísicas dos elementos que constituem a parede afetam drasticamente o atraso térmico e o fator decremental (Asan, 1998; Asan & Sancaktar, 1998).

Também à luz da literatura, torna-se pertinente investigar as consequências da espessura e posicionamento da camada de isolamento no atraso térmico e fator decremental, com o objetivo de encontrar a solução ótima, a qual maximiza o atraso térmico e minimiza o fator decremental (Asan 1988 e 2000). Estes estudos permitiram concluir que não é possível, em simultâneo, otimizar a posição do isolamento do ponto de vista do atraso térmico e do fator decremental. Concluiu-se também que a posição do isolamento que proporciona um maior atraso térmico não é muito prática, uma vez que, para esse efeito, é necessário colocar duas camadas de isolamento separadas por uma certa distância, no interior da parede. Por último, o autor sugere uma configuração mais prática e que é realizada sem dificuldade durante a construção. Consiste em colocar metade da camada de isolamento no meio da parede, e a outra metade do lado de fora da superfície da parede. Desta configuração resultam os melhores resultados para o atraso térmico (maiores intervalos), e fator decremental (menores intervalos), que são os valores mais próximos dos valores ótimos (Ulgen, 2002; Simões, I. *et al.*, 2012).

Simões, I. *et al.* propuseram a determinação do atraso térmico com recurso a soluções analíticas. Neste estudo a transferência de calor por condução foi simulada através de um sistema multicamadas quando sujeitas a condições variáveis de fronteira, com auxílio a soluções analíticas baseadas em funções de *Green*. Este estudo visava o cálculo analítico do atraso térmico em sistemas de multicamadas constituídos por cortiça natural, aglomerada e expandida, lã mineral ou poliestireno extrudido. Os resultados demonstraram que a contribuição das características térmicas do material isolante apresentava maior relevância em sistemas de poucas camadas (Simões, I. *et al.*, 2012).

Dois anos mais tarde, deu-se seguimento ao estudo referido anteriormente e incorporaram-se camadas de cortiça expandida, proveniente de desperdício, num pavimento, e analisou-se o respetivo atraso térmico. Os resultados indicaram que a incorporação das camadas de cortiça conduzia a uma performance térmica melhorada, principalmente ao nível da resistência térmica e do atraso térmico (Tadeu *et al.*, 2014).

Na Turquia, foi desenvolvida uma metodologia teórica para estimar o atraso térmico e o fator decremental. Nesse estudo foi usada a técnica de transformação complexa finita de Fourier para converter o problema da transmissão dinâmica de calor, num formato que não depende do tempo. É de referir que foi tido em consideração a radiação solar e a temperatura ar-sol (Yumrutas *et al.*, 2007).

Kontoleon e Bikas (2007), implementaram um modelo dinâmico para investigar o efeito do coeficiente de absorção de uma parede exterior opaca no atraso térmico, o fator decremental e na variação de temperatura. Dessa análise concluíram que a capacidade de absorção solar tem um grande impacto no atraso térmico, no fator decremental e nas variações de temperatura. Além disso, concluíram também que, durante a estação de aquecimento, uma cor refletiva no revestimento de parede interior confere os resultados mais rentáveis, e ainda, que a colocação de duas camadas de isolamento no interior da parede melhora substancialmente os dois parâmetros térmicos em estudo (Kontoleon & Bikas, 2007).

Os estudos apresentados anteriormente não contemplam a presença de variações de temperatura na superfície interna da parede. Esta simplificação permite que se considere, para o ambiente interior, uma situação de regime permanente.

É prática comum, usar uma simplificação do comportamento real da temperatura exterior para se determinar o atraso térmico e o fator decremental. O ambiente exterior é, muitas vezes, esquematizado por uma oscilação sinusoidal, representativa da temperatura do ar exterior ou da temperatura ar-sol, enquanto a temperatura do ar interior é mantida num regime contínuo (constante). Esta simplificação é usual uma vez que, nestas condições, o comportamento dinâmico das paredes depende unicamente da posição, espessura e propriedades termofísicas das camadas constituintes (Aste *et al.*, 2009).

Com base neste enquadramento, a motivação do presente trabalho é implementar ferramentas de cálculo baseadas nas normas de caracterização do comportamento dinâmico de soluções construtivas e aplica-las num conjunto de elementos construtivos, assim como comparar resultados com os obtidos através da formulação analítica proposta por Simões, N. *et al.* (Simões, N. *et al.*, 2012)

1.2 Objetivos

Esta dissertação apresenta como objetivo principal o estudo e caracterização do comportamento térmico de soluções construtivas, quando sujeitas a um regime de transferência de calor dinâmico, através de simulações. Para tal efeito, identificam-se e definem-se os parâmetros que influenciam a análise térmica dinâmica, sendo eles o atraso térmico e o fator decremental. Estuda-se o efeito que cada propriedade térmica tem sobre esses parâmetros, tais como a variação da condutibilidade térmica, da massa volúmica e do calor específico. E ainda se efetua uma análise consoante a espessura, posicionamento e tipo de material utilizado como camada de isolamento presente nas soluções construtivas.

Com base nestes objetivos estabeleceram-se as seguintes tarefas:

- Implementação das normas ISO/FDIS 13786:2006(E) e ABNT Projeto 02:135.07-001/2;

- Validação das duas normas com recurso a soluções de *benchmark*;
- Aplicação do modelo analítico desenvolvido no âmbito do trabalho (Simões, N. *et al.*, 2012);
- Definição, simulação e análise de casos fictícios e casos reais;
- Comparação de resultados obtidos pelas normas com os dos modelos analíticos;

A simulação e análise de casos fictícios foi realizada com o objetivo de se compreender a influência de cada uma das propriedades dos materiais nos resultados finais. Já a aplicação dos modelos de cálculo em casos reais permite obter os parâmetros da resposta dinâmica de soluções, os quais poderão ser utilizados por projetistas na fase de seleção das soluções construtivas.

1.3 Resumo da estrutura da dissertação

Esta dissertação é constituída por 6 capítulos. No primeiro capítulo apresenta-se resumidamente a importância do tema, o trabalho desenvolvido nos últimos anos por outros autores, os objetivos do trabalho e o conteúdo do mesmo. Salienta-se como objetivo a perceção da influência dos diversos parâmetros no comportamento térmico das soluções construtivas.

O capítulo dois engloba o esclarecimento de alguns conceitos fundamentais relacionados com as propriedades e características térmicas das soluções construtivas, e das suas camadas constituintes mais utilizados. Salienta-se o atraso térmico, fator decremental e o coeficiente de transmissão térmica. Destaca-se, também, uma breve comparação entre o regime permanente e o regime dinâmico, do ponto de vista térmico.

No terceiro capítulo apresentam-se as ferramentas utilizadas e respetivas validações. Começar-se-á por apresentar o procedimento exposto na Norma ISO/FDIS 13786:2006(E). Segue-se a referência à Norma Brasileira ABNT Projeto 02:135.07-001/2:2003. Por último, apresenta-se um resumo dos modelos analíticos. É de frisar que os modelos analíticos se utilizam para geometrias mais simples, como por exemplo, em casos onde as geometrias são circulares e as camadas constituintes são planas. Para os casos mais complexos, utilizam-se modelos numéricos como o método dos elementos finitos.

No capítulo quatro, definem-se os casos de estudo, elaborando-se a diferenciação entre casos teóricos e casos reais. Os primeiros auxiliam na compreensão da influência de cada parâmetro no atraso térmico e no fator decremental.

O capítulo cinco mostra a diferença de resultados entre o cálculo do atraso térmico pela norma europeia ISO/FDIS 13786:2006(E) e pelo modelo analítico. Neste capítulo avalia-se também a diferença da posição do material de isolamento térmico.

No sexto e último capítulo, enunciam-se as conclusões provenientes da análise do capítulo anterior e também algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 CONCEITOS INTRODUTÓRIOS

2.1 Propriedades Térmicas

Através da envolvente existem trocas de calor constantes entre o edifício e o exterior. Quanto maior for o controlo sobre essas trocas melhor será a otimização do consumo energético do edificado. O comportamento térmico dos elementos que definem a separação física entre ambientes interior e exterior é avaliado com auxílio de várias propriedades e parâmetros.

Conhecer a capacidade que, a envolvente do edifício, tem em armazenar energia em forma de calor e libertá-la lentamente para o seu interior ou exterior, aquilo a que se intitula inércia térmica, é um dos parâmetros supracitados, e calcula-se pela raiz quadrada do produto da condutibilidade térmica pela massa volúmica e calor específico.

Outro exemplo, é o do coeficiente de transmissão térmica, U , que é a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária de um elemento por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que ele separa. Analiticamente, este coeficiente é o inverso da soma das resistências térmicas de todas as camadas que constituem a solução construtiva.

Depois de se definir estes dois parâmetros, torna-se necessário explicar as propriedades que os influenciam como a condutibilidade térmica, massa volúmica e o calor específico.

A condutibilidade térmica é uma característica dos materiais e que representa a quantidade de calor que atravessa perpendicularmente 1 m desse material, quando sujeito a um gradiente de temperatura unitário ($^{\circ}\text{C}$). Quanto menor o seu valor, maior será a capacidade de isolamento térmico do material, em regime permanente. As unidades são expressas em Watt por metro Kelvin [$\text{W}/(\text{m.K})$].

A massa volúmica de um material é a quantidade de massa por unidade de volume. Numa linguagem mais ligeira, quanto maior a massa volúmica de um material mais pesado ele será. As unidades são expressas em quilograma por metro cúbico [Kg/m^3].

O calor específico é uma propriedade física que define a quantidade de energia necessária para que um quilograma de material sofra uma variação de temperatura de um grau. As unidades são expressas em Joule por quilograma e por Kelvin [$\text{J}/(\text{Kg.K})$].

A resistência térmica de materiais homogéneos pode ser definida como o oposto da condutibilidade térmica, uma vez que o seu cálculo é realizado pelo quociente da espessura do

material pela sua condutibilidade térmica. As unidades são expressas em metro quadrado Kelvin por Watt [(m².K)/W].

Os termos anteriormente mencionados são utilizados para a análise térmica em regimes permanentes. Para o estudo realizado neste documento, surge o interesse em explorar outros conceitos que se aplicam em regimes dinâmicos, conceitos esses que só têm significado na análise térmica dinâmica de soluções construtivas.

As propriedades dinâmicas térmicas de cada material determinam o comportamento térmico dinâmico da solução construtiva quando sujeita a condições de fronteira variáveis. Essas condições impõem a variação do sentido do fluxo de calor devido à variação de temperatura, em uma ou nas duas, faces da solução construtiva.

Este trabalho tem o objetivo de introduzir e avaliar dois parâmetros dinâmicos, sendo eles o atraso térmico e o fator decremental. O atraso térmico pode ser definido como a amplitude máxima da variação de temperatura numa superfície exterior e a amplitude máxima do seu efeito na superfície interior da mesma solução. Apresenta-se uma representação gráfica do atraso térmico na figura 2.1.

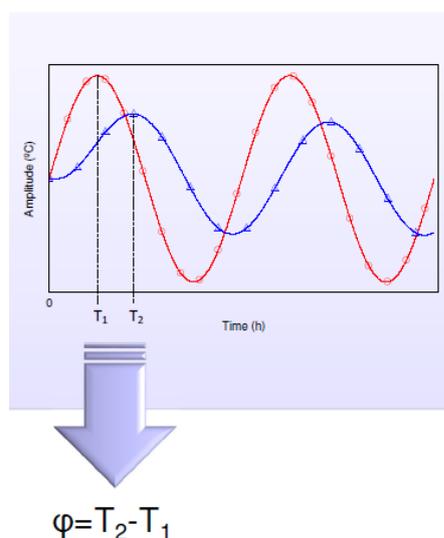


Figura 2.1 – Representação gráfica do atraso térmico (Adaptado de Simões, I. et al., 2012).

Desta forma, quanto maior for o atraso térmico de uma dada solução construtiva melhor será o seu desempenho térmico dinâmico, pois a energia necessária para climatizar o espaço interior poderá ser menor.

Nesta dissertação, o fator decremental é definido, segundo a Norma ISO/FDIS 13786:2006(E), como o rácio entre a transmissão térmica periódica e o coeficiente de transmissão térmica, *U*. Esta transmissão térmica periódica, é também definida na norma ISO/FDIS 13786:2006(E), como uma quantidade complexa da amplitude da quantidade do

fluxo de calor através da superfície adjacente à face interior, dividida pela amplitude de temperatura na face exterior, quando a temperatura junto à face interior é mantida constante.

2.2 Regime Permanente e Regime Dinâmico

A transferência de calor por condução poderá ocorrer em regime permanente ou dinâmico. O primeiro é caracterizado por um fluxo de calor constante ao longo do tempo, em resultado de condições de fronteira constantes. O regime dinâmico resulta de variações das condições de fronteira variáveis ao longo do tempo. De uma forma simplista, o regime permanente pode ser definido através do seguinte exemplo, imagine-se uma solução construtiva que separa o interior do exterior. A temperatura interior é superior à temperatura exterior. Como o fluxo de calor se desloca sempre do meio com temperatura superior para o meio com temperatura inferior, neste caso, o fluxo dar-se-á de dentro para fora.

A este fenómeno atribui-se a designação de regime permanente, pois o fluxo de calor é unidirecional e nunca se altera. Este exemplo académico não é de todo irreal, pois existem instantes e até mesmo períodos, ao longo do dia, mês ou ano em que este fenómeno se verifica. A questão aqui será a longevidade destas condições, ou seja, dificilmente se verificam tais circunstâncias ao longo de todo o dia, mês e muito menos durante um ano inteiro. Na figura 2.2, apresenta-se uma representação esquemática da transferência de calor unidirecional em regime permanente.

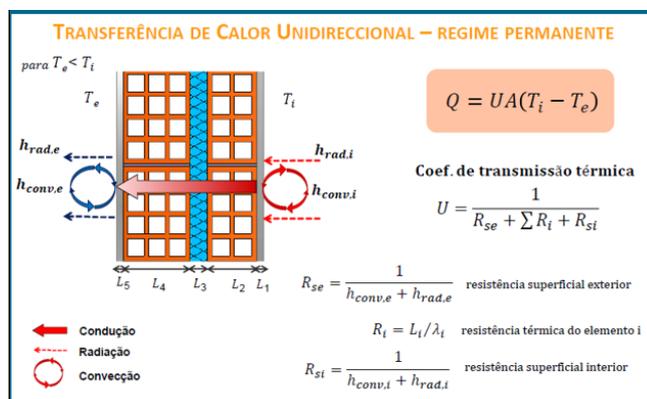


Figura 2.2 – Regime Permanente (Simões, N. (2016) Sebenta da disciplina Comportamento Térmico e Energético de Edifícios).

Ao longo de um dia, é mais provável que a temperatura sofra oscilações. Essas oscilações não são completamente aleatórias, podendo ser aproximadas a curvas sinusoidais, como sugere a norma ISO/FDIS 13786:2006(E), semelhante à apresentada na figura 2.3.

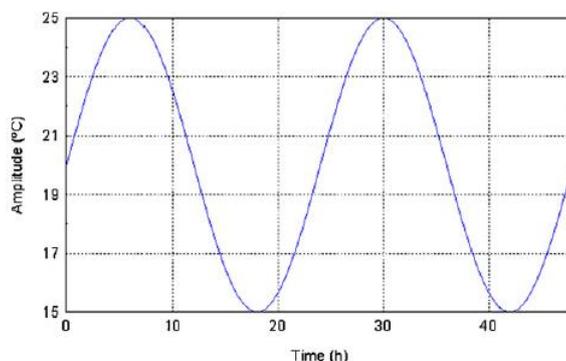


Figura 2.3 – Regime Variável (Simões, I. et al., 2012).

Pela figura anterior, facilmente se percebe que o fluxo de calor passa a ter os dois sentidos ao longo de 24 horas. Se a temperatura interior for mantida constante nos 20°C, durante as primeiras 12 horas do dia o fluxo de calor tem o sentido do exterior para o interior, mas nas últimas 12 horas o sentido será o inverso. Esta é a razão pela qual se designa de regime dinâmico, pois o fluxo varia o seu sentido ao longo do tempo, tornando a análise térmica mais próxima da realidade, a qual permite maior otimização no consumo energético.

3 FERRAMENTAS DE CÁLCULO

3.1 Norma ISO/FDIS 13786:2006(E)

3.1.1 Introdução

A ISO (the International Organization for Standardization) é uma federação mundial cujos trabalhos têm como função definir padrões internacionais consensuais. Com o auxílio de organizações internacionais, governamentais e não-governamentais padronizam-se práticas, métodos de cálculo e resultados de forma a dissipar possíveis disparidades.

A Norma ISO/FDIS 13786:2006(E) define os métodos de cálculo para avaliação da performance térmica e uso de energia em soluções construtivas, e providencia os meios para analisar o impacto dos materiais e serviços utilizados na conservação de energia e na performance energética dos edifícios.

Como já foi referido anteriormente, este documento assume que a temperatura interior é constante e que a variação da temperatura exterior tem um comportamento sinusoidal num período de 24 h.

Desta forma surge ainda uma outra simplificação. Apesar de a análise variar no tempo, o que faz com que esta seja dinâmica, ocorre aquilo a que se chama regime periódico permanente, que é o fenómeno no qual em cada instante existe um regime permanente de trocas de calor, o qual apresenta valores diferentes do instante seguinte, mas com raciocínios e abordagens de calculo exatamente iguais.

A grande vantagem destas simplificações é que o comportamento dinâmico das soluções construtivas depende apenas da posição, espessura e propriedades termofísicas das camadas constituintes.

3.1.2 Dados necessários

Para aplicação desta Norma são necessários os seguintes dados relativos a cada material constituinte da solução construtiva: espessura, e ; condutibilidade térmica, λ ; calor específico, c ; massa volúmica, ρ ; posição de cada material.

3.1.3 Limitações

O período, T , é de 24 horas e isso origina uma limitação relativamente ao atraso térmico. Essa limitação é de que o valor máximo, para o atraso térmico, é de 12 horas e consequentemente

qualquer valor que ultrapasse as 12 horas será apresentado como “superior a 12 horas” e não pelo valor resultante do cálculo.

3.2 Ferramenta de cálculo baseada na Norma ISO/FDIS 13786:2006(E)

A ferramenta de cálculo baseada na Norma ISO/FDIS 13786:2006(E) que foi desenvolvida perfilha o método de cálculo estipulado nesse documento. De uma forma resumida, cada camada é definida por uma matriz [2x2], designada por “matriz de transferência de calor”, a qual relaciona a amplitude complexa de temperatura e o rácio do fluxo de calor de um lado do componente com a amplitude complexa de temperatura e rácio do fluxo de calor do outro lado do componente. Apresenta-se a equação da matriz de transferência de calor de uma componente, tal como é apresentada na norma.

$$Z = \begin{matrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{matrix} \quad (\text{Eq. 1})$$

Os elementos da matriz são calculados a partir das fórmulas de cálculo de cada um dos elementos da matriz, como a se ilustram nas equações 2,3 e 4:

$$Z_{11} = Z_{22} = \cosh(\xi) \cos(\xi) + j \sinh(\xi) \sin(\xi) \quad (\text{Eq. 2})$$

$$Z_{12} = -\frac{\delta}{2\lambda} \{ \sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi) + j [\cosh(\xi) \sin(\xi) - \sinh(\xi) \cos(\xi)] \} (\text{Eq. 3})$$

$$Z_{21} = -\frac{\lambda}{\delta} \{ \sinh(\xi) \cos(\xi) - \cosh(\xi) \sin(\xi) + j [\sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi)] \} (\text{Eq. 4})$$

Destaque para “ ξ ” que é um rácio entre a espessura da camada e a profundidade de penetração, e se calcula pela seguinte expressão $\xi = \frac{e}{\delta}$, e “ δ ” que é definida na norma como a profundidade em que a amplitude das variações de temperatura é reduzida pelo fator “e” (base de logaritmos naturais, $e = 2.718$) num material homogéneo de espessura infinita submetido a variações de temperatura sinusoidais na sua superfície, e se obtém pela equação 5.

$$\delta = \sqrt{\lambda T / \pi \rho c}. \quad (\text{Eq. 5})$$

A matriz de transferência de calor da solução construtiva é obtida pelo produto de todas as matrizes de cada um dos componentes constituintes, no entanto, como a propriedade comutativa da multiplicação não é válida para matrizes, é necessário ordenar as matrizes do exterior para o interior. A equação 6 define a matriz de transferência de calor da solução construtiva.

$$Z = \begin{matrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{matrix} = Z_N Z_{N-1} \dots Z_3 Z_2 Z_1 \quad (\text{Eq. 6})$$

A matriz Z_1 corresponde à camada interna e a matriz Z_N corresponde à camada externa da solução construtiva. Para se obter a matriz que atravessa um ambiente ao outro (do exterior até ao interior), introduzem-se as matrizes de transferência de calor relativas aos ambientes

exterior e interior, para tal utiliza-se a seguinte expressão: $Z_{ei} = Z_{se} Z Z_{si}$ (Eq. 7). Estas matrizes são calculadas de acordo com a equação 8:

$$Z_s = \begin{bmatrix} 1 & -R_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 8})$$

Para a matriz de transferência de calor relativa à resistência superficial exterior, substitui-se “ R_s ” por 0.04, que é o valor da resistência superficial do ambiente exterior, e para a matriz de transferência de calor relativa à resistência superficial interior, substitui-se “ R_s ” por 0.16, que é o valor da resistência superficial do ambiente interior, de acordo com a norma ISO 6946.

A norma apresenta dois exemplos de aplicação do procedimento de cálculo, um sistema constituído por uma camada e um sistema multicamada. Por forma a validar a ferramenta de cálculo baseada na norma ISO/FDIS 13786:2006(E), anteriormente a aplicá-la em casos de estudo, compararam-se os resultados da norma com os resultados da ferramenta.

Os resultados do exemplo para a solução constituída por uma camada são apresentados na Tabela 3.1.

Property	Modulus	Time shift		
Internal thermal admittance Y_{11}	5,70 W/(m ² ·K)	0,95 h	U	3.56 W/(m ² ·K)
External thermal admittance Y_{22}	11,59 W/(m ² ·K)	1,87 h	f	0.514 -
Periodic thermal transmittance Y_{12}	1,83 W/(m ² ·K)	-5,68 h	K1	86 KJ/(m ² ·K)
Internal areal heat capacity κ_1	86 kJ/(m ² ·K)		K2	171 KJ/(m ² ·K)
External areal heat capacity κ_2	171 kJ/(m ² ·K)		Y11	0.95 h
Thermal transmittance U	3,56 W/(m ² ·K)		Y22	1.87 h
Decrement factor f	0,514		Y12	-5.68 h

Tabela 3.1 – Validação da folha de cálculo.

Uma vez que a introdução de camadas origina a utilização de um número maior de matrizes, foi validado o procedimento de cálculo, repetindo-se o exemplo anterior, mas desta vez dividindo-se a camada de 20cm de betão em 10 camadas de 2cm, que se traduz numa alteração matemática sem originar uma alteração física. Na tabela 3.2, apresentam-se os resultados obtidos e um exemplo do produto final da ferramenta de cálculo desenvolvida, que, para um utilizador que pretenda calcular o coeficiente de transmissão térmica, U , o atraso térmico, Φ e o fator decremental, f , necessita apenas de colocar os valores correspondentes à condutibilidade térmica, λ , massa volúmica, ρ , calor específico, c e espessura de cada camada, e , ordenadas do exterior para o interior.

Do Exterior para o Interior		λ [W/(m.K)]	ρ [Kg/m ³]	c [J/(Kg.K)]	e [m]	Resultados	
1ª Camada	Betão	1.8	2400	1000	0.02	U [W/(m ² .K)]	3.56
2ª Camada	Betão	1.8	2400	1000	0.02	ϕ [Horas]	-5.68
3ª Camada	Betão	1.8	2400	1000	0.02	f [-]	0.514
4ª Camada	Betão	1.8	2400	1000	0.02		
5ª Camada	Betão	1.8	2400	1000	0.02		
6ª Camada	Betão	1.8	2400	1000	0.02		
7ª Camada	Betão	1.8	2400	1000	0.02		
8ª Camada	Betão	1.8	2400	1000	0.02		
9ª Camada	Betão	1.8	2400	1000	0.02		
10ª Camada	Betão	1.8	2400	1000	0.02		

Tabela 3.2 – Cálculo do exemplo D.1 da norma dividindo a camada de betão em 10 partes iguais.

Para além de se confirmarem os valores, valida-se a ferramenta de cálculo para uma solução construtiva até 10 camadas. Este é um marco importante deste estudo, pois após esta validação foram simulados mais de 500 casos, onde se variaram todas as propriedades que influenciam a análise térmica dinâmica.

3.3 Norma Brasileira ABNT Projeto 02:135.07-001/2

3.3.1 Introdução

A ABNT (Associação Brasileira de Normas e Técnicas) é um grupo que, tal como a ISO, define normas para práticas e cálculos a nível nacional no Brasil. Neste caso, em cooperação com o Comitê Brasileiro de Construção Civil e com a Comissão de Estudos de Desempenho Térmico de Edificações, a ABNT elaborou um documento, dividido em cinco partes, sob o título geral “Desempenho térmico de edificações”.

Das cinco partes que constituem o documento destacam-se as duas primeiras (Parte 1: Definições, símbolos e unidades; Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações).

3.3.2 Validação da ferramenta

Para validar a ferramenta de cálculo que determina o atraso térmico de acordo com a Norma Brasileira, foram inseridos os exemplos apresentados na mesma norma. Para a determinação do atraso térmico, adotaram-se os mesmos princípios e métodos, de forma a serem obtidos os resultados presentes no Anexo C da norma brasileira. Na equação 9, apresenta-se a fórmula do atraso térmico segundo o Projeto 02:135.07-001/2.

$$\Phi = 1.383 \times e \times \sqrt{\frac{\rho \times c}{3.6 \times \lambda}} \quad (\text{Eq. 9})$$

Neste capítulo será apenas apresentado o resultado do exemplo C.4 – Parede dupla com placas de betão e caixa de ar não ventilada - como prova da validação, sendo que os restantes foram submetidos para anexo. A equação 10 apresenta o resultado como exposto na Norma Brasileira.

$$\Phi = 1.383 \cdot R_t \cdot \sqrt{B_1 + B_2} = 1,382 \cdot 0,1943 \cdot \sqrt{83,7} = 2,5 \text{ horas} \quad (\text{Eq. 10})$$

3.3.3 Conclusão

No subcapítulo anterior optou-se por apresentar apenas o exemplo 4, dado que, este exemplo foi escolhido para testar as limitações da presente norma.

Como se pode verificar no documento, trata-se de uma solução construtiva resultante de 3 camadas (“Parede dupla com placas de betão e câmara de ar não ventilada”) no qual foram introduzidas duas alterações matemáticas, as quais não têm implicações físicas.

A primeira alteração foi dividir a meio a camada interna de betão, originando uma solução construtiva de 4 camadas – Betão + Betão + Caixa de Ar + Betão. Matematicamente passámos a ter mais uma camada, mas fisicamente não se verifica alteração na solução construtiva. Apresenta-se na figura 3.1 um esquema da divisão da camada interna da parede dupla com placas de betão e câmara de ar não ventilada em duas camadas iguais.

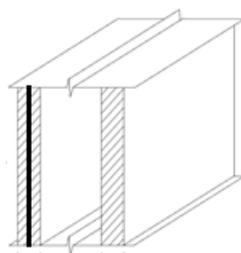


Figura 3.1 – Divisão em 2 da camada interna da parede dupla com placas de betão e câmara de ar não ventilada (Adaptado da Norma Brasileira, 2003).

Como esperado, a resistência térmica da parede, a resistência térmica total, a transmitância térmica, a capacidade térmica da parede e o atraso térmico, mantiveram-se inalterados (anexo B).

A segunda alteração foi dividir ambas as camadas de betão ao meio, tanto a interior como a exterior, originando uma solução construtiva de 5 camadas – Betão + Betão + Caixa de Ar + Betão + Betão. Mais uma vez, matematicamente o número de camadas aumentou, mas mantém-se o significado físico inicial do exemplo. Ilustra-se na figura 3.2 um esquema da divisão das camadas interna e externa, da parede dupla com placas de betão e câmara de ar não ventilada, cada uma em duas camadas iguais

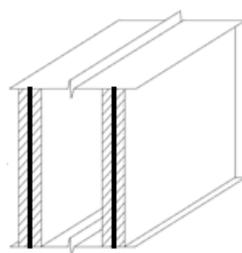


Figura 3.2 – Divisão de ambas as camadas de betão da parede dupla com placas de betão e câmara de ar não ventilada (Adaptado da Norma Brasileira, 2003).

A resistência térmica da parede, a resistência térmica total, a transmitância térmica, a capacidade térmica da parede, mantiveram-se inalterados, no entanto, o atraso térmico já sofreu alteração no seu valor. Na equação 11 apresenta-se o resultado do atraso térmico referente ao esquema da figura 3.10.

$$\Phi = 1.383 \cdot R_t \cdot \sqrt{B_1 + B_2} = 3 \text{ horas} \quad (\text{Eq. 11})$$

Esta alteração do valor deve-se ao facto do método de cálculo do atraso térmico da Norma Brasileira ter um coeficiente (B_0), que é calculado subtraindo a capacidade térmica da última camada à capacidade térmica total da parede, como demonstrado na equação 12.

$$B_0 = C_T - C_{T_{ext}} (\text{Eq. 12})$$

Onde:

C_T é a capacidade térmica total do componente;

$C_{T_{ext}}$ é a capacidade térmica da camada externa do componente.

No cálculo do coeficiente B_0 , subtrai-se a capacidade térmica da camada exterior. O coeficiente é afetado caso se considere uma só camada com uma determinada espessura, ou duas camadas do mesmo material com uma espessura total igual. Se fisicamente, o que foi referido anteriormente não tem diferenciação, matematicamente também não deveria ter, uma vez que, a norma não prevê esta situação, por isso optou-se por excluir este método.

3.4 Programa Analítico

As soluções analíticas utilizadas neste trabalho foram desenvolvidas por Simões, N. *et al.* (Simões, N. *et al.*, 2012) e possibilitam a modelação unidimensional da transferência de calor por condução em sistemas multicamada quando estes se encontram sujeitos a uma variação de temperatura no tempo. De acordo com os autores, as soluções analíticas foram obtidas no domínio da frequência com recurso a funções de Green, por aplicação da transformada de Fourier no domínio do tempo. A solução do problema é determinada no domínio do tempo por aplicação da transformada inversa de Fourier à resposta obtida no domínio da frequência. De salientar que não existe nenhuma restrição quanto à variação da temperatura imposta.

Para a utilização destes modelos é necessário definir: as condições de fronteira, nomeadamente variação da temperatura na superfície exterior do sistema construtivo e no ambiente interior; e as propriedades dos materiais das camadas que constituem a parede (espessura, coeficiente de condutibilidade térmica e calor específico).

Os modelos analíticos foram experimentalmente validados pelos autores (Simões, N. *et al.*, 2012), através da comparação dos resultados analíticos com resultados experimentais. Os resultados experimentais foram adquiridos para vários sistemas multicamada, obtidos por sobreposição de placas de diferentes materiais. Os diferentes sistemas foram sujeitos à transferência de calor unidimensional com recurso a um equipamento usualmente utilizado para determinar o coeficiente de condutibilidade dos materiais, apresentado na figura 3.3.



Figura 3.3 – Equipamento utilizado nas validações experimentais (Simões, N. *et al.*, 2012)

Este equipamento possui dois pratos que contactam com as superfícies exteriores do sistema, um de aquecimento e outro de arrefecimento, o qual permite impor um fluxo de calor dinâmico através dos sistemas. Durante o ensaio, em que se fizeram variar a temperatura dos pratos, as variações de temperatura nas interfaces das camadas foram registadas. A evolução das temperaturas dos pratos do equipamento foi imposta nas superfícies exteriores do sistema nas simulações analíticas. Os resultados da aplicação das soluções analíticas foram comparados com os resultados experimentais, evidenciando uma adequada correlação.

O atraso térmico é calculado assumindo que a superfície exterior do sistema é sujeita a uma variação de temperatura sinusoidal e que são registadas as temperaturas na superfície oposta (superfície interior ou recetora), quando o ambiente interior apresenta uma temperatura constante de 20 °C. Neste estudo, o atraso térmico corresponde ao intervalo de tempo entre o instante em que a variação de temperatura imposta na superfície exterior atinge o seu máximo e o instante em que o correspondente máximo é verificado na superfície interior. Os modelos analíticos implementados neste trabalho consideram a simulação da transferência de calor durante 8 dias.

4 DEFINIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO

4.1 Análise de sensibilidade

4.1.1 Introdução

Uma vez que um dos pressupostos da norma ISO/FDIS 13786:2006(E) é o de que a análise dinâmica térmica só depende de: espessura, e ; condutibilidade térmica, λ ; calor específico, c ; massa volúmica, ρ e posição dos materiais, o objetivo deste capítulo será avaliar a influência impacto da variação de cada uma destas propriedades, na análise dinâmica térmica da solução construtiva. Para isso, simularam-se aquilo a que se apelidaram de “Casos Teóricos”, onde se leva, individualmente, cada uma destas propriedades aos seus limites, exceto a posição dos materiais que será apresentada no capítulo 4.2.

Todas as soluções construtivas referentes aos “Casos Teóricos” são compostas por uma parede uma espessura total de 20cm, e constituídas por 3 camadas, sendo que as camadas junto às superfícies interiores e exteriores são compostas por betão. As camadas 1 e 3 são constituídas pelo mesmo material, sendo designado por material 1 (ou betão). Nesta análise fazem-se variar as propriedades do material que constitui a camada 2, sendo designado por material 2 (ou material fictício). Apresenta-se na figura 4.1 um esquema ilustrativo da solução e na tabela 4.1 as propriedades térmicas de cada material, para a situação de referência.

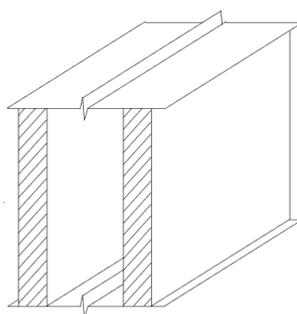


Figura 4.1 – Parede dupla de betão com material fictício no interior (Norma Brasileira, 2003)..

Na primeira situação, o material fictício tem 1cm de espessura, sendo que cada camada de betão tem 9.5 cm. Na segunda situação o material fictício tem 6 cm de espessura e cada camada de betão 7 cm. Na terceira situação o material fictício tem 19 cm de espessura e cada camada de betão tem 0.5 cm.

As propriedades dos materiais utilizados neste capítulo são apresentadas na tabela 4.1.

	λ [W/(m.K)]	ρ [Kg/m ³]	c [J/(Kg.K)]
Betão	1.4	2300	880
ICB	0.038	100	1560

Tabela 4.1 – Propriedades térmicas.

4.1.2 Variação da Condutibilidade Térmica, λ

Neste subcapítulo a condutibilidade térmica, λ do material varia e para cada situação foram simulados 40 casos. Fez-se variar o coeficiente de condutibilidade térmica entre 0.001 W/(m.K) e 2 W/(m.K).

Começa-se por analisar a influência da condutibilidade térmica, λ no coeficiente de transmissão térmica, U , através dos resultados presentes na figura 4.2.

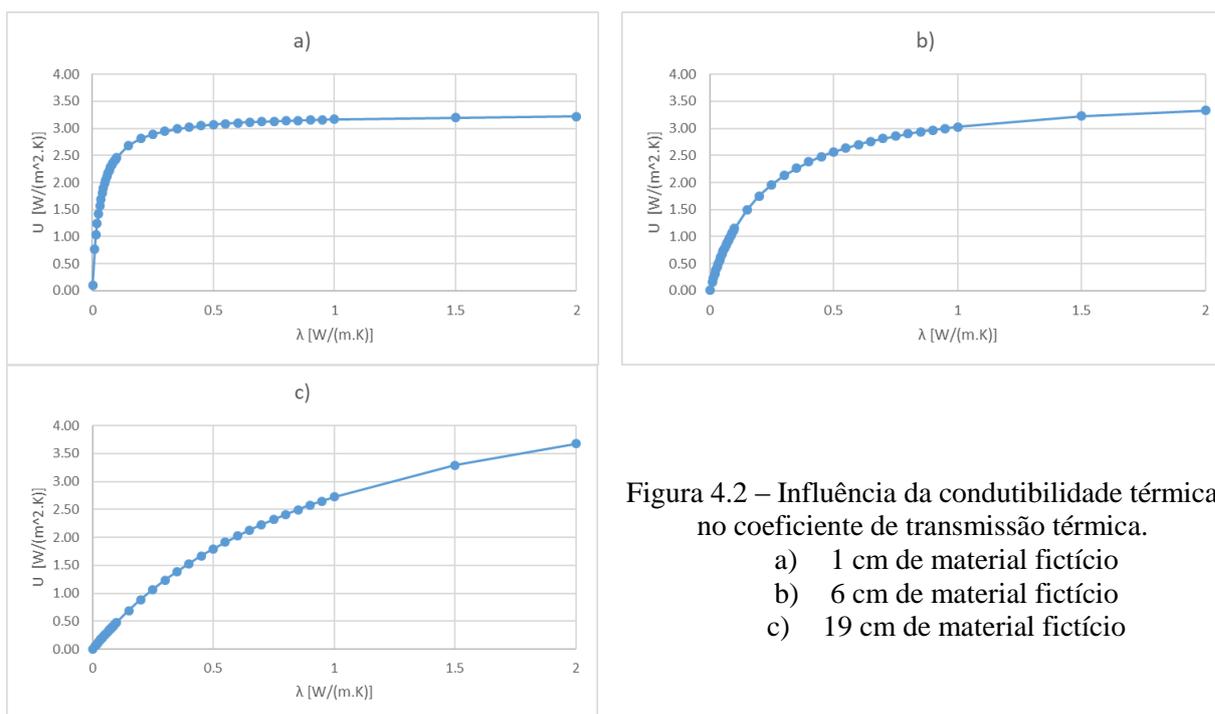


Figura 4.2 – Influência da condutibilidade térmica no coeficiente de transmissão térmica.

- a) 1 cm de material fictício
- b) 6 cm de material fictício
- c) 19 cm de material fictício

Confirma-se que o aumento da condutibilidade térmica, λ se traduz num aumento do coeficiente de transmissão térmica, U , esse aumento é muito mais significativo para os valores mais baixos.

É de referir que na primeira situação, quando $\lambda=0.01$ W/(m.K), $U=0.77$ W/(m².K) e para $\lambda=0.02$ W/(m.K), $U=1.24$ W/(m².K), ou seja, o valor da condutibilidade térmica duplica e o coeficiente de transmissão térmica aumenta 61%. No entanto, quando $\lambda=1$ W/(m.K), $U=3.17$

$W/(m^2.K)$ e para $\lambda=2 W/(m.K)$, $U=3.22 W/(m^2.K)$, ou seja, o valor da condutibilidade térmica volta a duplicar, mas o coeficiente de transmissão térmica só aumenta 0.05 unidades.

Repare-se também que quando o material isolante representa 5% da solução construtiva, o maior crescimento do coeficiente de transmissão térmica, U , realiza-se até uma condutibilidade térmica de $\lambda=0.5 W/(m.K)$, sendo que posteriormente tende a estabilizar. Na outra situação extrema, em que o material fictício constitui 95% da solução construtiva, o aumento é mais constante e a curva tem um comportamento quase linear.

Segue-se a análise da influência da condutibilidade térmica, λ no atraso térmico, Φ , presente na figura 4.3.

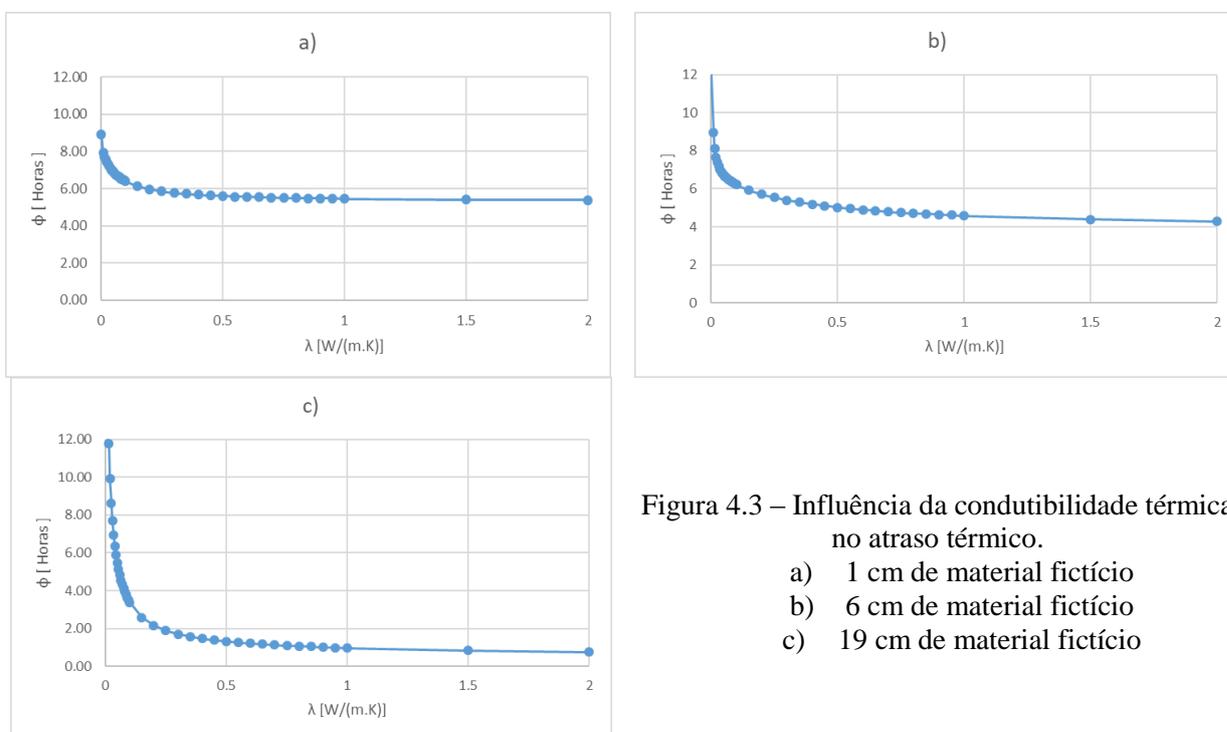


Figura 4.3 – Influência da condutibilidade térmica no atraso térmico.
a) 1 cm de material fictício
b) 6 cm de material fictício
c) 19 cm de material fictício

Confirma-se que o aumento da condutibilidade térmica, λ se traduz numa diminuição do atraso térmico, Φ . Contudo, essa relação não é linear, sendo uma diminuição muito mais significativa para os valores mais baixos do coeficiente de condutibilidade térmica. Da análise das três situações, pode-se concluir que a influência do coeficiente de condutibilidade térmica no valor do atraso térmico da solução é diminuta para valores superiores a $0.5 W/(m.K)$.

Relativamente ao atraso térmico, Φ , da primeira situação, quando $\lambda=0.01 W/(m.K)$, $\Phi=7.91 h$ e para $\lambda=0.02 W/(m.K)$, $\Phi=7.56 h$, ou seja, perdem-se aproximadamente 30 minutos de atraso térmico quando se duplica o valor da condutibilidade térmica. Enquanto, quando $\lambda=1$

$W/(m.K)$, $\Phi=5.46$ h e para $\lambda=2$ $W/(m.K)$, $\Phi=5.38$ h, ou seja, o valor da condutibilidade térmica voltou a ser duplicado, no entanto, a diferença no atraso térmico são 4 minutos e meio (27.6 minutos menos 23.1 minutos).

Note-se também que a amplitude aumenta substancialmente, quando se analisa a terceira situação. O atraso térmico para $\lambda=0.01$ $W/(m.K)$ é superior a 12 horas e quando $\lambda=0.02$ $W/(m.K)$ o seu valor é de 9.41 horas, ou seja, perdem-se mais de 2 horas de atraso térmico ao duplicar a condutibilidade térmica. Para $\lambda=1$ $W/(m.K)$ o atraso térmico é de 0.98 horas e para $\lambda=2$ $W/(m.K)$ o seu valor é 0.76 horas, ou seja, há um decréscimo de pouco mais de 13 minutos.

Por último efetua-se a análise da influência da condutibilidade térmica, λ no fator decremental, f . Os resultados dessa análise constam da figura 4.4.

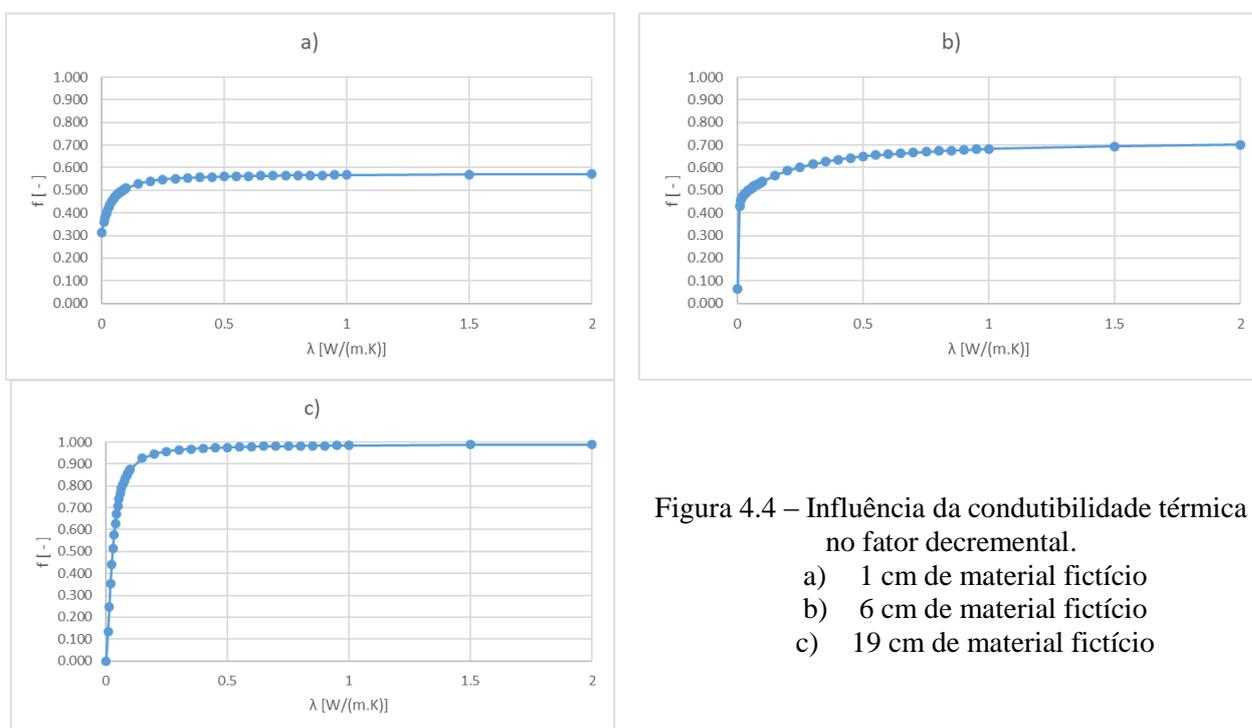


Figura 4.4 – Influência da condutibilidade térmica no fator decremental.

- a) 1 cm de material fictício
- b) 6 cm de material fictício
- c) 19 cm de material fictício

O fator decremental aumenta com o aumento do coeficiente de condutibilidade térmica, tendo, como expectável, menor influência no sistema com uma menor espessura de material fictício.

Na primeira situação, o fator decremental, f , apresenta os seguintes valores, para $\lambda=0.01$ $W/(m.K)$, $f=0.361$ e para $\lambda=0.02$ $W/(m.K)$, $f=0.397$, ou seja, o rácio aumenta 0.037 unidades quando se duplica o valor da condutibilidade térmica. No outro extremo, quando $\lambda=1$

$W/(m.K)$, $f=0.567$ e para $\lambda=2 W/(m.K)$, $f=0.571$, ou seja, o rácio aumenta 0.003, o que corresponde a um crescimento de 8% face ao primeiro.

Na terceira situação, o fator decremental, f , apresenta os seguintes valores, para $\lambda=0.01 W/(m.K)$, $f=0.133$ e para $\lambda=0.02 W/(m.K)$, $f=0.352$, ou seja, o rácio aumenta 0.218 unidades quando se duplica o valor da condutibilidade térmica. No outro extremo, quando $\lambda=1 W/(m.K)$, $f=0.985$ e para $\lambda=2 W/(m.K)$, $f=0.989$, ou seja, o rácio aumenta 0.004, o que corresponde a um crescimento inferior a 2% face ao primeiro.

Conclui-se que quanto menor for o valor de λ melhores são os resultados de U , Φ e f , e também que a influência da condutibilidade térmica, no coeficiente de transmissão térmica, no atraso térmico e no fator decremental tem maior relevância para os valores mais baixos λ .

Com esta análise conclui-se ainda que quanto menor for a condutibilidade térmica e maior for a espessura do material isolante melhores serão os resultados do ponto de vista térmico, no entanto, é muito mais vantajoso procurar um material com menor o coeficiente de condutibilidade térmica do que aumentar a espessura do isolante.

4.1.3 Variação do Calor Específico, c

Neste subcapítulo o calor específico, c do material fictício varia, tendo sido simulados 53 casos para cada espessura de material fictício. Fez-se variar o coeficiente do calor específico, c , de 1 J/(Kg.K) a 2000 J/(Kg.K).

É importante referir que como o calor específico do material não influencia o coeficiente de transmissão térmica, a análise referente a esse parâmetro não é abordada neste subcapítulo uma vez que este coeficiente não varia.

Começa-se pela análise da influência do calor específico, c no atraso térmico Φ , presente na figura 4.5.

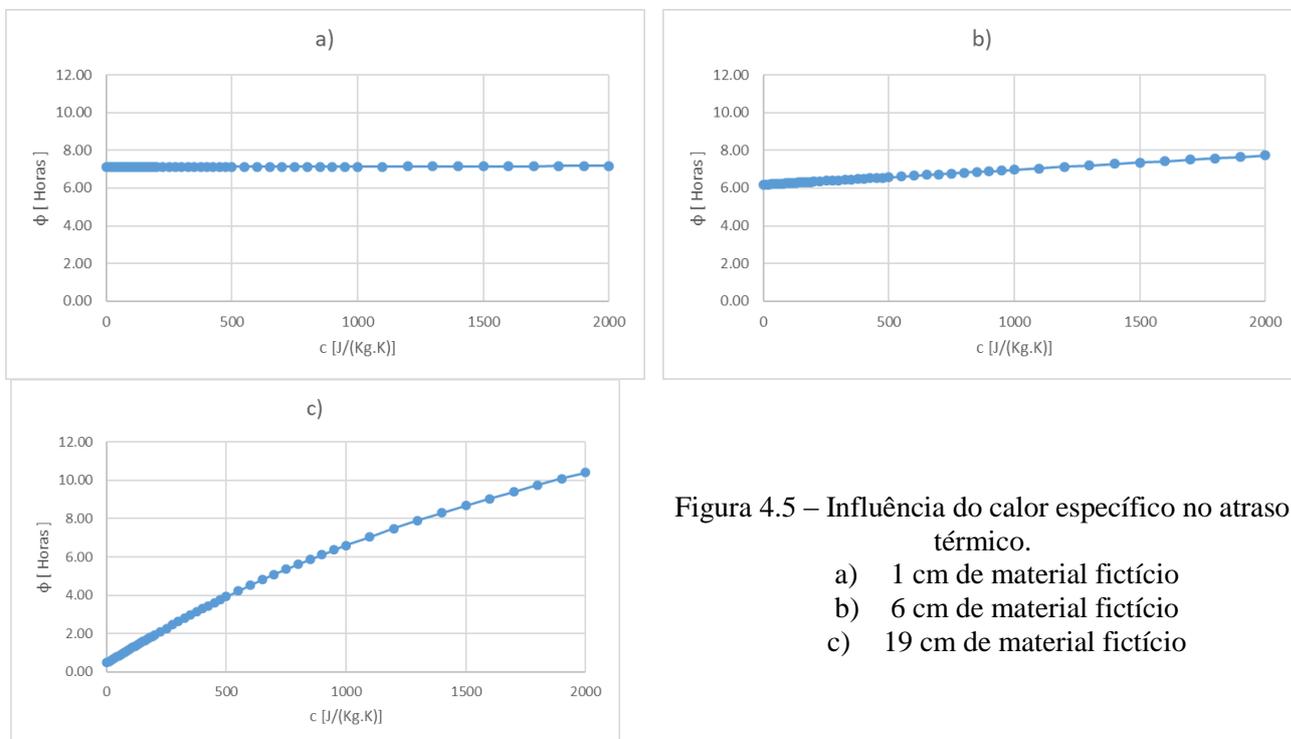


Figura 4.5 – Influência do calor específico no atraso térmico.

- a) 1 cm de material fictício
- b) 6 cm de material fictício
- c) 19 cm de material fictício

O aumento do calor específico traduz-se num aumento do atraso térmico aproximadamente linear. Este aumento é mais significativo, como esperado, na situação em que o material fictício é maior. Note-se que a influência do calor específico no atraso térmico é menor que a influência do coeficiente de condutibilidade térmica.

Na primeira situação, quando $c=1$ J/(Kg.K) o atraso térmico é de 7.10 horas e quando $c=2000$ J/(Kg.K) o atraso térmico é de 7.17 horas, ou seja, houve um aumento de aproximadamente 4 minutos.

Quando o material fictício representa 95% da constituição da parede, o atraso térmico é de 0.48 horas para $c=1$ J/(Kg.K) e de 10.41 horas quando $c=2000$ J/(Kg.K), o que representa uma variação bastante substancial de quase 30 minutos para $c=1$ J/(Kg.K) até 10 horas e 24 minutos para $c=2000$ J/(Kg.K).

Segue-se, na figura 4.6, a análise da influência do calor específico, c no fator decremental, f .

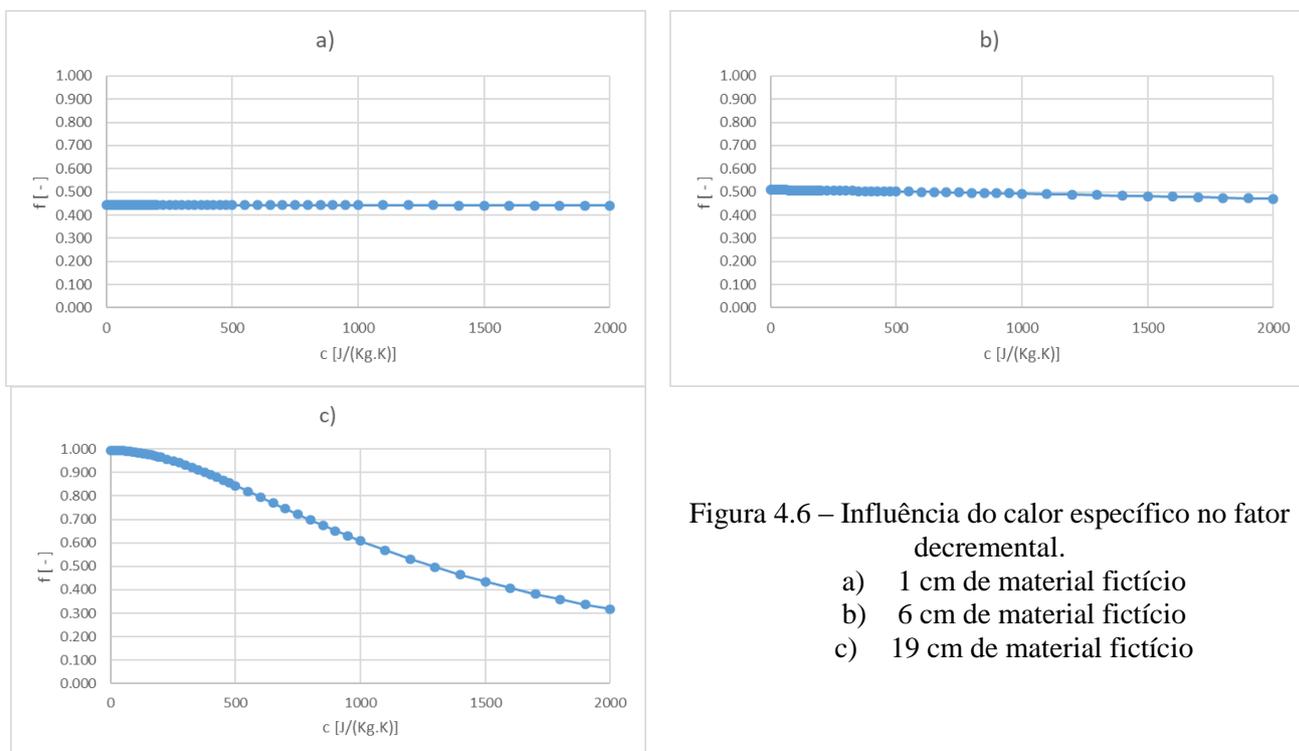


Figura 4.6 – Influência do calor específico no fator decremental.

- a) 1 cm de material fictício
- b) 6 cm de material fictício
- c) 19 cm de material fictício

No que toca ao fator decremental, para $c=1$ J/(Kg.K) obtém-se $f=0.444$ e para $c=2000$ J/(Kg.K) obtém-se $f=0.441$, uma diminuição insignificante de apenas 0.003.

Para a terceira situação, o valor do fator decremental é de 0.995 (muito perto do limite máximo =1) para $c=1$ J/(Kg.K) e atinge os 0.318 quando $c=2000$ J/(Kg.K), ou seja, uma diminuição de grande importância quando comparada com a primeira.

Note-se que o caso intermédio tem um comportamento muito similar ao primeiro, a variação do fator decremental é maior, mas de apenas 0.039 unidades.

Como a maioria dos materiais utilizados para isolamento térmico estão mais próximos da segunda situação do que da terceira, conclui-se que a influência do calor específico do material isolante não é significativa na análise térmica dinâmica da solução construtiva.

4.1.4 Variação da Massa Volúmica, ρ

Neste subcapítulo a massa volúmica, ρ , do material varia e para cada situação foram simulados 63 casos. Fez-se variar a massa volúmica ρ de 1 Kg/m^3 até 3000 Kg/m^3 .

Mais uma vez destaca-se que como a massa volúmica do material não influencia o coeficiente de transmissão térmica, a análise referente a esse parâmetro não é abordada neste subcapítulo uma vez que este coeficiente não varia com a variação da massa volúmica.

Apresenta-se na figura 4.7 a influência da massa volúmica, ρ , no atraso térmico, Φ .

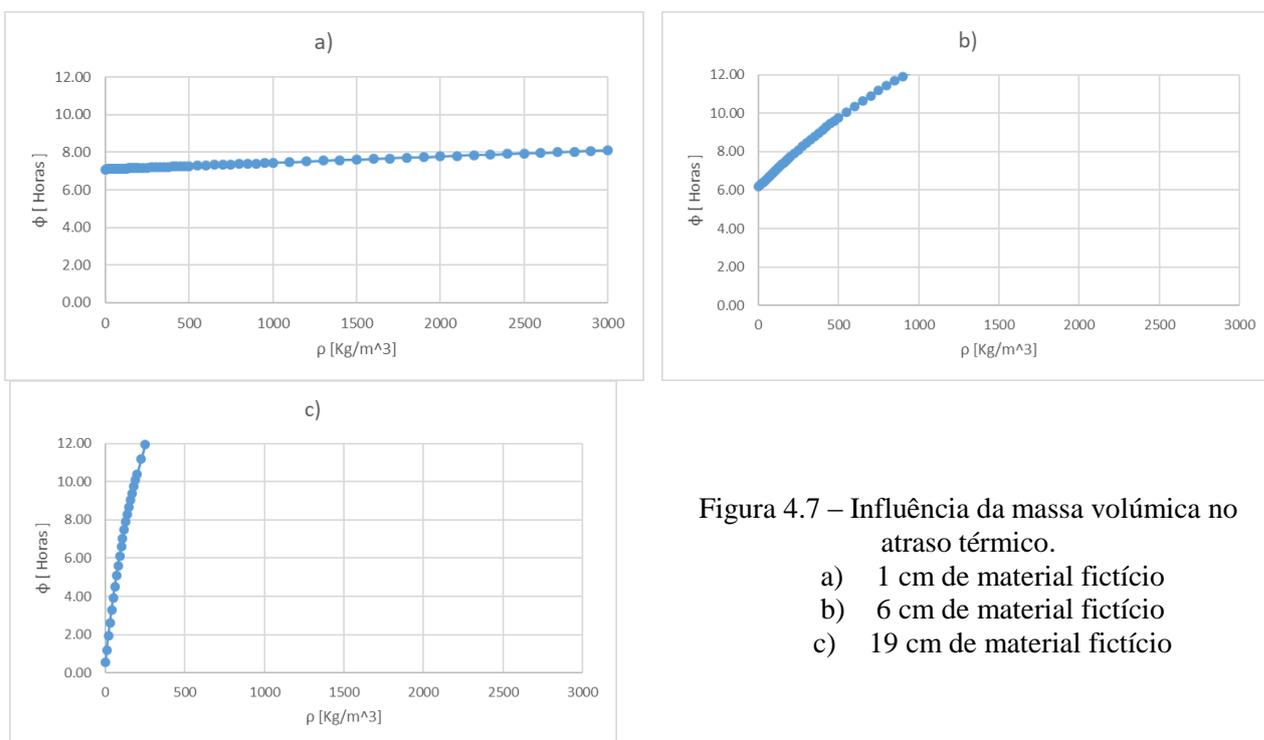


Figura 4.7 – Influência da massa volúmica no atraso térmico.

- a) 1 cm de material fictício
- b) 6 cm de material fictício
- c) 19 cm de material fictício

Pela observação das figuras verifica-se que aumento da massa volúmica confere um aumento do atraso térmico.

Quando o material fictício representa apenas 5% da solução construtiva, o aumento no atraso térmico é pouco significativo. Quando $\rho = 1 \text{ Kg/m}^3$, o valor do atraso térmico é de 7 horas e 6 minutos ($\Phi = 7.10\text{h}$) e quando o $\rho = 3000 \text{ Kg/m}^3$, o valor do atraso térmico é de 8 horas e 6 minutos ($\Phi = 8.10\text{h}$), ou seja, um aumento de 1 hora.

Na terceira situação, em que o material fictício tem 19 cm de espessura, o aumento é muito significativo. Quando $\rho = 1 \text{ Kg/m}^3$, o atraso térmico é de 33 minutos ($\Phi = 0.55\text{h}$) e quando atinge $\rho = 275 \text{ Kg/m}^3$, o atraso térmico já ultrapassou o valor máximo de 12 horas.

Na segunda situação, em que o material isolante tem 6 cm de espessura e representa 30% da solução construtiva, o gráfico tem mais semelhanças com a terceira situação do que com a primeira, onde o atraso térmico é de cerca de 6 horas e 11 minutos quando $\rho=1 \text{ Kg/m}^3$ e quando $\rho=950 \text{ Kg/m}^3$ já o atraso térmico ultrapassou o seu valor máximo de 12 horas.

Para terminar, observa-se, pela figura 4.8, a influência da massa volúmica, ρ , no fator decremental, c .

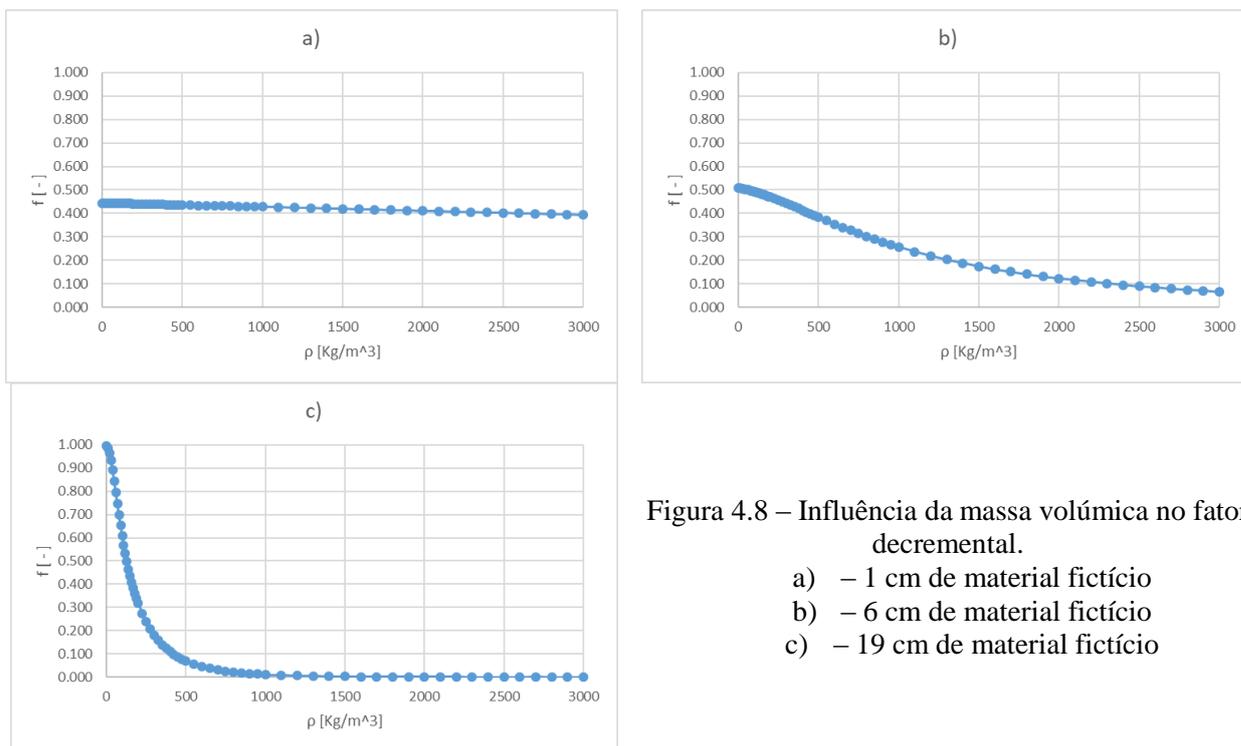


Figura 4.8 – Influência da massa volúmica no fator decremental.

- a) – 1 cm de material fictício
- b) – 6 cm de material fictício
- c) – 19 cm de material fictício

Observando as figuras verifica-se que o aumento da massa volúmica confere uma melhoria no fator decremental.

Mais uma vez, quando o material fictício representa apenas 5% da solução construtiva as melhorias não são significativas. Quando $\rho=1 \text{ Kg/m}^3$ o fator decremental é 0.444 e quando $\rho=3000 \text{ Kg/m}^3$ o fator decremental é de 0.393, uma variação de 0.051.

Na segunda situação, a amplitude de valores aumenta, o que significa que a melhoria no fator decremental é mais significativa, começando em 0.508 quando $\rho=1 \text{ Kg/m}^3$, decaindo até 0.066 quando $\rho=3000 \text{ Kg/m}^3$.

Na terceira situação, em que o material fictício tem 19 cm de espessura, o aumento da massa volúmica origina uma diminuição do fator decremental com oscilações de elevada amplitude, principalmente de 1 Kg/m^3 a 500 Kg/m^3 . O fator decremental para $\rho=1 \text{ Kg/m}^3$ é de 0.995,

quase o valor máximo de 1, e para $\rho=275 \text{ Kg/m}^3$ já diminuiu quase 80% atingindo o valor de 0.207.

Deduz-se, pelos resultados obtidos, que quando o material fictício isolante representa uma pequena percentagem da solução construtiva, a massa volúmica pouco influência o atraso térmico e o fator decremental. No entanto, quando constitui 30% a influência já se apresenta bastante significativa, tanto para o atraso térmico como para o fator decremental.

4.1.5 Considerações finais dos casos teóricos

Pela análise realizada conclui-se que um aumento do calor específico e da massa volúmica contribuem para o aumento do atraso térmico e redução do fator decremental. Esta influência é tanto maior quanto a espessura da camada, porém, em situações reais em que o material isolante representa cerca de 30% da constituição da parede essas melhorias são pouco significativas.

No entanto, deve ser feita a distinção dos benefícios provocados pelo aumento do calor específico dos provados pelo aumento da massa volúmica.

Quando o material isolante representa 30% da solução construtiva, as melhorias na análise térmica dinâmica quando se aumenta o calor específico continuam a ser pouco significativas, contrariamente, quando se aumenta a massa volúmica essas mesmas melhorias já são muito significativas.

Por outro lado, uma diminuição na condutibilidade térmica origina não só melhorias no atraso térmico e no fator decremental, como também benefícios no coeficiente de transmissão térmica.

Do ponto de vista teórico, para uma análise térmica, seja ela dinâmica ou não, os melhores resultados são obtidos com materiais com baixa condutibilidade térmica.

4.2 Casos Reais

4.2.1 Introdução

Neste subcapítulo apresentam-se 7 situações de soluções construtivas, todas têm uma camada de reboco tradicional com 2 cm de espessura e como isolamento térmico uma camada de aglomerado de cortiça expandida (ICB), a qual varia a sua espessura desde 7 a 12 cm. Para cada uma das situações, a camada de ICB estará tanto do lado de dentro, imediatamente a seguir ao reboco tradicional, como do lado de fora, primeira camada no sentido do exterior para o interior.

A ordem das camadas é apresentada do exterior para o interior. Nos dois subcapítulos seguintes são apenas apresentadas 2 das 7 situações, sendo que as restantes, são apresentadas, quando se confrontarem todas as situações, na secção 4.2.4.

A tabela 4.2 apresenta as propriedades de cada material utilizado neste capítulo.

Material	λ [W/(m.K)]	ρ [Kg/m ³]	c [J/(Kg.K)]
ICB	0.045	156	1530
OSB	0.13	550	1200
AG	0.222	1.2928	1000
OP	0.245	1.2928	1000
TB	0.4032	612	1000
CB	0.405	720	680
BM	0.61	1400	1000
RT	1.3	1900	840
MP	50	7800	480

Tabela 4.2 – propriedades térmicas.

4.2.2 Painel de madeira (OSB) e argamassa (BM)

A primeira solução construtiva, apresentada na figura 4.9, é constituída por ICB, BM, OSB e RT, quando o isolante é colocado do lado de fora e BM, OSB, ICB e RT, quando o isolante é colocado por dentro. A argamassa (BM) tem 5 mm de espessura e o painel de madeira (OSB) 2 cm.

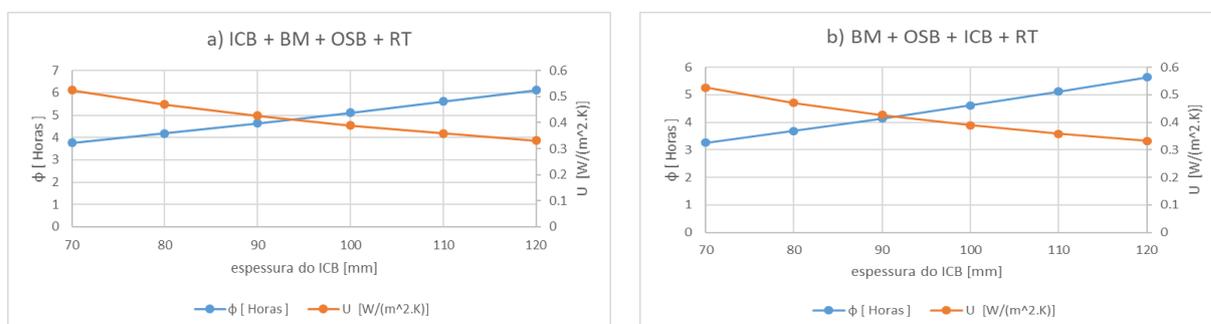


Figura 4.9 – Aglomerado de cortiça+argamassa+painel de madeira+reboco tradicional: a)ICB por fora; b)ICB por dentro.

4.2.3 Argamassa (BM), chapa metálica (MP) e tijolo cerâmico (CB)

A outra solução construtiva escolhida, ilustrada na figura 4.10, é constituída por ICB, BM, MP, CB e RT, quando o isolante é colocado do lado de fora e BM, MP, CB, ICB e RT, quando o isolante é colocado por dentro. A argamassa (BM) tem 5 mm de espessura, a chapa metálica (MP) 2 mm e o tijolo cerâmico (CB) 22 cm.

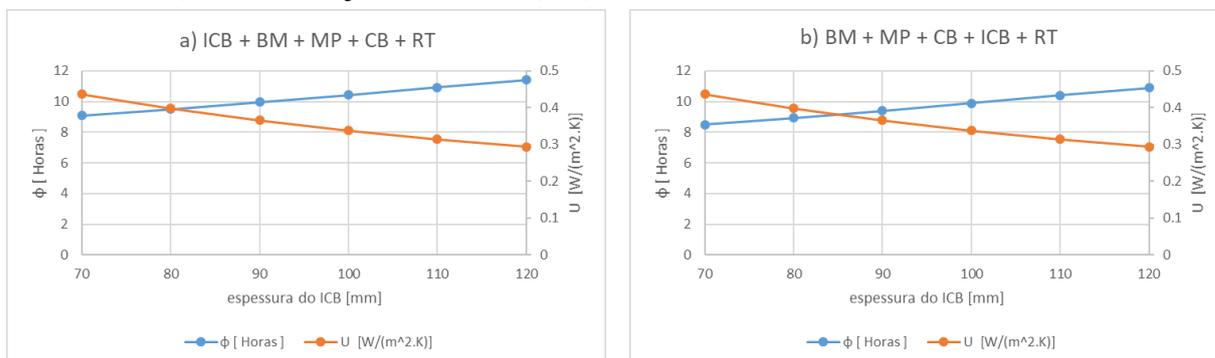


Figura 4.10 – Aglomerado de cortiça+argamassa+chapa metálica+tijolo cerâmico+reboco tradicional:
a) ICB por fora ; b) ICB por dentro.

4.2.4 Análise de sensibilidade

Previamente à análise de sensibilidade é necessário, em primeira instância, definir todos os casos que constam dessa mesma análise, para tal, e de modo a facilitar a explicação opta-se por se disponibilizar a tabela 4.3 com a constituição de cada caso.

		Do exterior para o interior				
Materiais		ICB	BM	OSB	RT	
C.E.1	Espessura [m]	0.07 a 0.12	0.005	0.02	0.02	
Materiais		ICB	OP	TB	RT	
C.E.2	Espessura [m]	0.07 a 0.12	0.025	0.25	0.02	
Materiais		ICB	OP	CB	RT	
C.E.3	Espessura [m]	0.07 a 0.12	0.025	0.22	0.02	
Materiais		ICB	BM	TB	RT	
C.E.4	Espessura [m]	0.07 a 0.12	0.005	0.25	0.02	
Materiais		ICB	BM	CB	RT	
C.E.5	Espessura [m]	0.07 a 0.12	0.005	0.22	0.02	
Materiais		ICB	BM	MP	CB	RT
C.E.6	Espessura [m]	0.07 a 0.12	0.005	0.002	0.22	0.02
Materiais		ICB	MP	AG	CB	RT
C.E.7	Espessura [m]	0.07 a 0.12	0.002	0.04	0.22	0.02

Tabela 4.3 – Definição dos casos de estudo

Com os casos definidos, seguiu-se a simulação dos mesmos, com a variação da posição do aglomerado de cortiça, ICB, que é colocado tanto do lado exterior como no lado interior da parede, imediatamente adjacente à camada de reboco tradicional, como demonstra a figura 4.11.

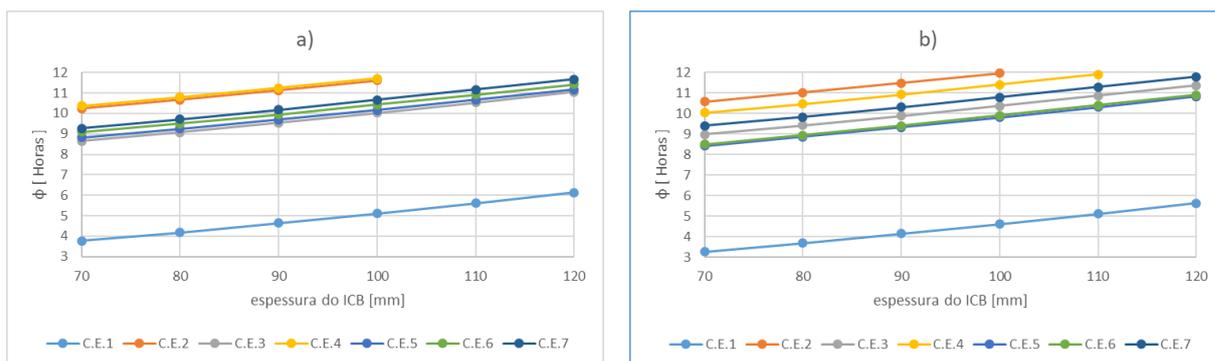


Figura 4.11 – Evolução do atraso térmico dos casos de estudo com o aumento da espessura de ICB: a) ICB por fora ; b) ICB por dentro.

Apesar de ser perceptível que o caso de estudo 2 apresenta os melhores resultados e o caso de estudo 1 apresenta os piores resultados, relativamente ao atraso térmico, uma vez que cada caso tem materiais diferentes e uma espessura total da solução construtiva também diferente, poderá ser mais interessante, do ponto de vista do projetista, um gráfico que mostre a evolução do atraso térmico em função do coeficiente de transmissão térmica, U , como o que se apresenta na figura 4.12.

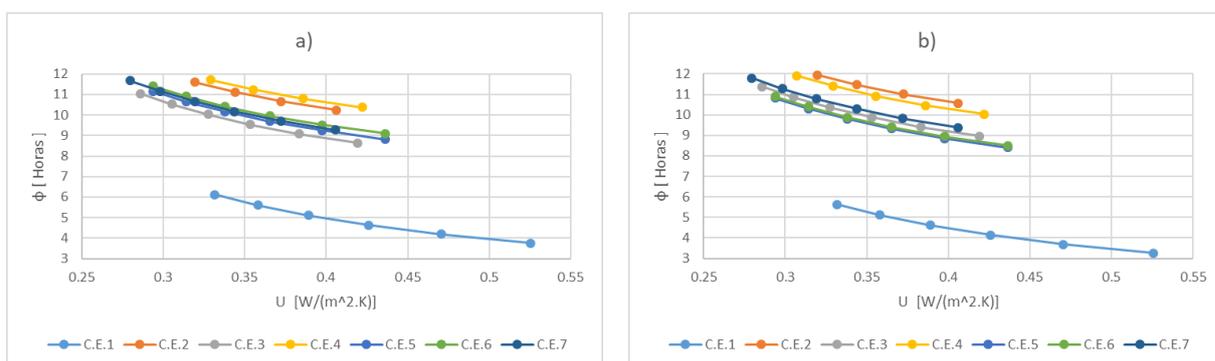


Figura 4.12 –Evolução do atraso térmico em função do coeficiente de transmissão térmica, U : a) ICB por fora ; b) ICB por dentro.

Para além da conclusão já obtida previamente de que o posicionamento dos materiais influencia o valor do atraso térmico, pela análise da figura anterior também se verifica que o aumento do coeficiente de transmissão térmica, U , origina uma redução do atraso térmico, Φ .

É de frisar, que para valores iguais do coeficiente de transmissão térmica, U , quando se altera a posição dos materiais os valores do atraso térmico variam.

4.2.5 Considerações finais dos casos reais

Como expectável, o valor do coeficiente de transmissão térmica diminui com o aumento da espessura do ICB, no entanto, apresenta os mesmos valores independentemente da posição da camada isolante. Relativamente ao atraso térmico, quando o isolamento é colocado no lado de fora obtém-se um aumento de atraso térmico, ou seja, do ponto de vista térmico confirma-se a influência da ordem das camadas e verifica-se a vantagem de colocar o material isolante no lado exterior da solução.

5 COMPARAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são analisados e comparados alguns resultados, de atraso térmico, obtidos de acordo com a norma ISO/FDIS 13786:2006(E) e com recurso a modelos analíticos.

Retoma-se o exemplo dos casos teóricos da secção 4.1, uma parede dupla de betão, com um material isolante no seu interior e com uma espessura total de 20cm. O material isolante varia a sua espessura desde 1cm a 19cm e são usados como isolantes o aglomerado de cortiça expandida (ICB), o poliestireno extrudido (XPS) e o poliestireno expandido (EPS). Seguem-se as suas propriedades na tabela 5.1.

Material	λ [W/(m.K)]	ρ [Kg/m ³]	c [J/(Kg.K)]
XPS	0.035	35	1400
EPS	0.041	14.3	1430
ICB	0.045	156	1430

Tabela 5.1 –Propriedades dos materiais isolantes.

Para além da comparação direta dos resultados obtidos pelos dois métodos, também se procura neste capítulo testar uma nova hipótese, que é dividir a camada isolante em duas camadas iguais, colocá-las, em situações distintas, nas duas faces da solução construtiva e verificar essa diferença no atraso térmico.

Na figura 5.1 apresentam-se do lado esquerdo os resultados obtidos de acordo com a norma, e do lado direito apresentam-se os resultados obtidos pelos métodos analíticos.

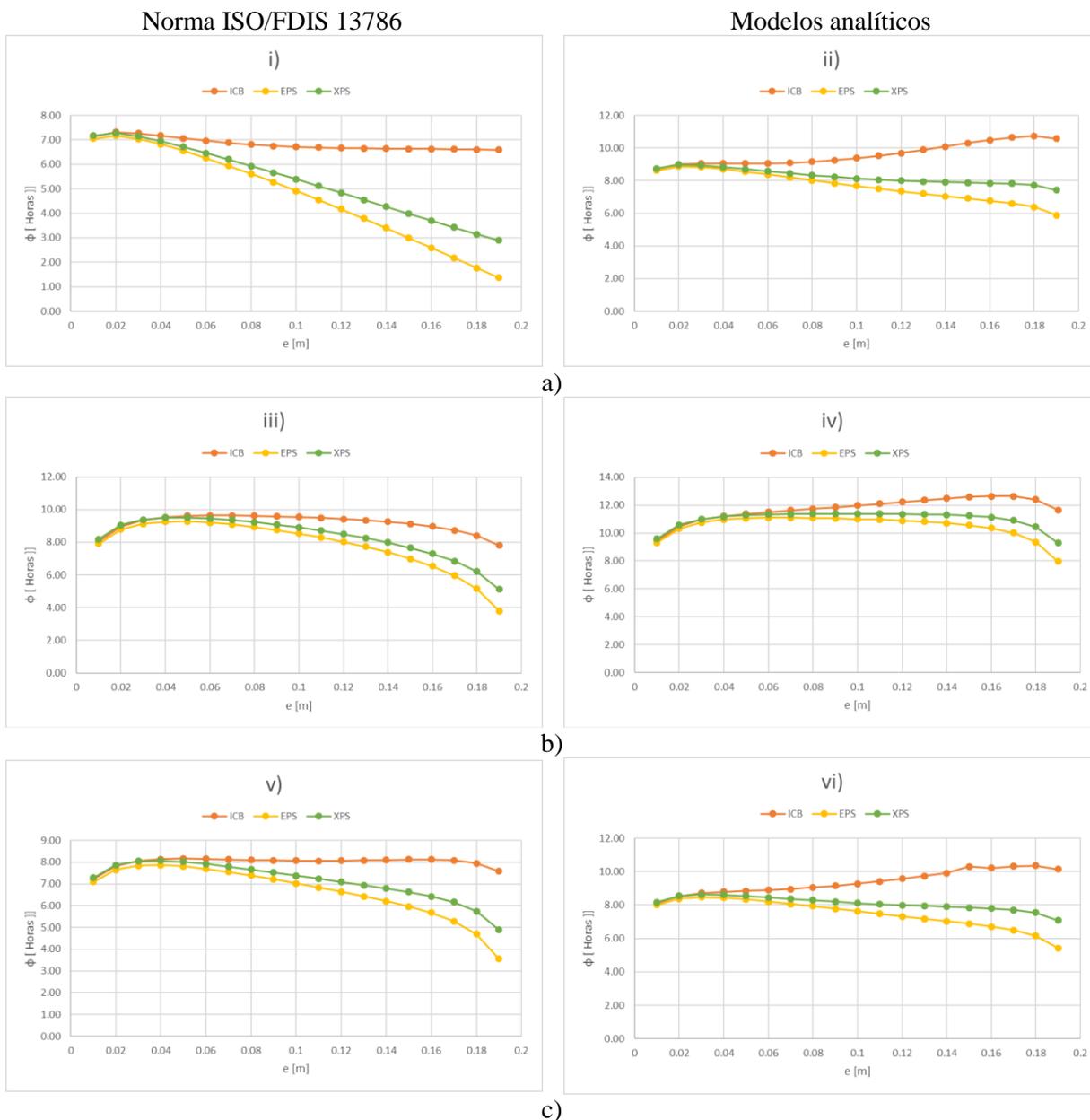


Figura 5.1 – Evolução do atraso térmico com o aumento da espessura do material isolante através da Norma ISO/FDIS 13786 (coluna esquerda) e com recurso a modelos analíticos (coluna direita):
 a) camada de isolamento térmico posicionado a meio da parede; b) camada de isolamento térmico posicionado no meio e junto à superfície exterior; c) camada de isolamento térmico posicionado no meio e junto à superfície interior.

Começando pela figura *i)*, verifica-se que existe um máximo no atraso térmico, para os três materiais seleccionados, quando a espessura do material isolante é igual a 2 cm, o que significa, para este exemplo, que a situação óptima é obtida quando o isolante representa 10%

da solução construtiva. À medida que se aumenta a percentagem de isolante na parede dupla de betão, o atraso térmico vai diminuindo, sendo que para o poliestireno expandido (EPS) esse decaimento é o mais acentuado e para o aglomerado de cortiça (ICB) o decaimento é ligeiro. Esta variação de comportamento deve-se à diferença da massa volúmica dos materiais. Voltando à figura 5.1, comprova-se que a condutibilidade térmica e o calor específico dos três materiais são muito semelhantes e a grande diferença entre os três está na massa volúmica, sendo que o XPS tem mais do dobro da massa volúmica do EPS e o ICB ultrapassa dez vezes mais a referida propriedade quando comparado com o EPS.

Em relação ao mesmo exemplo, mas desta vez calculado com os modelos analíticos os resultados já têm um comportamento diferente. Para EPS e XPS o valor ótimo continua a ser os 2 cm de espessura, os mesmos 10% da solução construtiva, mas para ICB, o atraso térmico apresenta maiores valores quando este isolante representa 90% da solução construtiva, ou seja, 18 cm.

Quando o isolante é colocado no meio e no exterior obtém-se os melhores resultados. Percebe-se, pela leitura das figuras *iii*) e *iv*), que as variações no atraso térmico são muito menos acentuadas à medida que se aumenta a percentagem de isolante na solução construtiva. Curiosamente, o maior valor do atraso térmico surge quando se aplica ICB, e acontece quando este tem 6 cm de espessura, enquanto que tanto o EPS com XPS apresentam o maior valor para 5 cm de espessura.

Relativamente aos últimos dois casos, em que a camada de isolante é colocada no meio e no interior da parede dupla de betão, comprova-se que o comportamento das curvas tem semelhanças com o exemplo anterior em que o isolante é colocado no meio e no exterior, no entanto, os valores do atraso térmico são inferiores, comprovando desta forma que a opção mais vantajosa é a de colocar o isolante no meio e no lado exterior da solução construtiva.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

Após a análise dos resultados obtidos ao longo deste estudo podem tecer-se algumas conclusões.

Quanto menor for a condutibilidade térmica, λ , do material melhor são os resultados dos parâmetros térmicos propostos para a análise térmica dinâmica: esta é a propriedade térmica que mais influencia o atraso térmico e o fator decremental e influencia também o coeficiente de transmissão térmica, U . Conclui-se que é a propriedade mais importante dos materiais constituintes da solução construtiva quando se efetua uma análise térmica seja ela em regime permanente (em que se recorre apenas ao parâmetro U) ou regime dinâmico.

Quanto maior for o calor específico do material, c , melhores os resultados da análise térmica dinâmica. Esta é a propriedade térmica que menos afeta a análise dinâmica.

Quanto maior for a massa volúmica, ρ , do material melhor são os resultados da análise térmica dinâmica. Esta propriedade é pouco importante quando o material representa apenas 5% da constituição da parede, porém apresenta grande impacto para percentagens maiores ou iguais a 30% da solução construtiva.

Quanto maior for a espessura, e , do material isolante melhores os resultados da análise térmica dinâmica. Quando se aumenta a espessura do material isolante e , conseqüentemente, se aumenta a espessura da parede conferem-se melhorias do ponto de vista térmico à solução construtiva, no entanto, se se aumentar a espessura do material mantendo a solução construtiva sempre com a mesma espessura, os resultados da análise térmica dinâmica são prejudicados.

Quando se divide a camada de isolamento em duas partes iguais e se coloca uma no interior do elemento construtivo e outra do lado de dentro, melhoram-se os resultados da análise térmica dinâmica. No entanto, conseguem-se ainda melhores resultados, se se optar por colocar metade do material isolante no interior e a outra metade no exterior.

Para concluir, relativamente aos materiais ICB, XPS e EPS, apesar do aglomerado de cortiça expandida (ICB) apresentar o maior valor de condutibilidade térmica, ele é o que apresenta atrasos térmicos maiores. E entre o poliestireno expandido (XPS) e o poliestireno extrudido (EPS) o primeiro é o que tem melhores resultados.

6.2 Propostas de trabalhos futuros

Neste capítulo propõem-se algumas sugestões para dar continuidade ao tema abordado.

Começando pela norma europeia que apenas tem exemplos de aplicação para períodos de variação de temperatura de 24 horas, sugere-se que se efetue a análise térmica dinâmica para períodos diferentes de 24 horas.

Determinação do atraso térmico e do fator decremental de soluções reais por via experimental. Para tal, sugere-se a monitorização de temperaturas superficiais e do ambiente, tanto interiores como exteriores. Adicionalmente, se conhecidas as propriedades das camadas que constituem as soluções construtivas monitorizadas, os registos efetuados poderão ser incorporados nos modelos analíticos, para determinação do atraso térmico e do fator decremental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT/CB-02 & CE-02:135.07

Projecto 02:1350.7-001/2 – Desempenho térmico de edificações, Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações

Antonopoulos & Koronaki, 2000

Antonopoulos K.A, Koronaki E.P, 'Effect of indoor mass on the time constant and thermal delay', International Journal of Energy Research 24, pg. 391-402, 2000

Antonopoulos & Koronaki, 2000

Antonopoulos K.A, Koronaki E.P, 'Thermal parameter components of building envelope', Applied Thermal Engineering 20, pg. 1193-1211, 2000

Asan, 1998

Asan H, 'Effects of walls' insulation thickness and position on time lag and decrement factor', Energy and Buildings 28, pg. 299-305, 1998

Asan & Sancaktar, 1998

Asan H, Sancaktar Y.S, 'Effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor', Energy and Buildings 28, pg. 159-166, 1998

Asan, 2000

Asan H, 'Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view', Energy and Buildings 32, pg. 197-203, 2000

Asan, 2006

Asan H, 'Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials', *Building and Environment* 41, pg.615-620, 2006

Aste *et al.*, 2009

Aste N, Angelotti A, Buzzetti M, 'The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings', *Energy and Buildings* 41, pg. 1181-1187, 2009

ISO/FDIS, 2006

ISO/FDIS 13786:2006(E) – Thermal performance of building components – Dynamic thermal characteristics – Calculation methods

Iwaro & Mwasha, 2010

Iwaro J, Mwasha A, 'A review of building energy regulation and policy for energy conservation in developing countries', *Energy Policy* 38, pg. 7744-7755, 2010

Kontoleon & Bikas, 2007

Kontoleon K.J, Bikas D.K, 'The effect of south wall's outdoor absorption coefficient on time lag, decrement factor and temperature variations', *Energy and Buildings* 39, pg. 1011-1018, 2007

Kravvaritis *et al.*, 2011

Kravvaritis E.D, Antonopoulos K.A, Tzivanidis C, 'Experimental determination of the effective thermal capacity function and other thermal properties for various phase change materials using the thermal delay method', *Applied Energy* 88, pg. 4459-4469, 2011

Luo *et al.*, 2007

Luo C, Moghtaderi B, Sugo H, Page A, 'Time Lags and Decrement Factors under Air-Conditioned and Free-Floating conditions for Multi-Layer Materials', *Proceedings: Building Simulation*, 2007

Mazzeo *et al.*, 2016

Mazzeo D, Oliveti G, Arcuri N, 'Influence of internal and external boundary conditions on the decrement factor and time lag heat flux of building walls in steady periodic regime', *Applied Energy* 164, pg. 509-531, 2016

Melo *et al.*, 2016

Melo A.P, Fossati M, Versage R.S, Sorgato M.J, Scalco V.A, Lamberts R, 'Development and analysis of a metamodel to represent the thermal behavior of naturally ventilated and artificially air-conditioned residential buildings', *Energy and Buildings* 112, pg. 209-221, 2016

Simões, I. *et al.*, 2012

Simões I, Simões N, Tadeu A, 'Thermal delay simulation in multilayer systems using analytical solutions', *Energy and Buildings* 49, pg. 631-639, 2012

Simões, N. *et al.*, 2012

Simões N, Simões I, Tadeu A, Vasconcellos C.A.B, Mansur W.J, '3D transient heat conduction in multilayers systems – Experimental validation of semi-analytical solution', *International Journal of Thermal Sciences* 57, pg.192-203. 2012

Sun *et al.*, 2013

Sun C., Shu S, Ding G, Zhang X, Hu X, 'Investigation of time lags and decrement factors for different building outside temperatures', *Energy and Buildings* 61, pg. 1-7, 2013

Tadeu *et al.*, 2014

Tadeu A, Moreira A, António J, Simões N, Simões I, 'Thermal delay provided by floors containing layers that incorporate expanded cork granule waste', *Energy and Buildings* 68, pg. 611-619, 2014

Ulgen, 2002

Ulgen K, 'Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor', *Energy and Buildings* 34, pg. 273-278

Yumrutas *et al.*, 2007

Yumrutas R, Kaska O, Yildirim E, 'Estimation of total equivalent temperature difference values for multilayer walls and flat roofs by using periodic solution', *Building and Environment* 42, pg. 1878-1885, 2007

ANEXOS

Anexo A – Resultados dos exemplos da norma ISO/FDIS 13786:2006(E)

Neste anexo apresentam-se os resultados obtidos para os exemplos presentes na norma ISO/FDIS 13786:2006(E)

A1. Exemplo D1

. Em primeiro repetem-se, na tabela A.1, os resultados do exemplo D.1, onde a camada de betão é dividida em duas e três partes iguais, respetivamente.

Exemplo D.1 em 2 camadas		
U	3.56	W/(m ² ·K)
f	0.514	-
K1	86	KJ/(m ² ·K)
K2	171	KJ/(m ² ·K)
Y11	0.95	h
Y22	1.87	h
Y12	-5.68	h

Exemplo D.1 em 3 camadas		
U	3.56	W/(m ² ·K)
f	0.514	-
K1	86	KJ/(m ² ·K)
K2	171	KJ/(m ² ·K)
Y11	0.95	h
Y22	1.87	h
Y12	-5.68	h

Tabela A.1 – Validações adicionais do exemplo D.1 da norma ISO/FDIS 13786:2006(E).

A2. Exemplo D2

Seguem-se, na Tabela A.2, os resultados presentes na norma lado a lado com os obtidos para o exemplo D.2.

Table D.4 — Dynamic thermal characteristics for example 2

Property	Modulus	Time shift
Internal thermal admittance Y_{11}	5,94 W/(m ² ·K)	0,85 h
External thermal admittance Y_{22}	0,85 W/(m ² ·K)	4,03 h
Periodic thermal transmittance Y_{12}	0,061 W/(m ² ·K)	-8,11 h
Internal areal heat capacity κ_1	82 kJ/(m ² ·K)	
External areal heat capacity κ_2	12 kJ/(m ² ·K)	
Thermal transmittance U	0,359 W/(m ² ·K)	
Decrement factor f	0,169	

Exemplo D.2		
U	0.359	W/(m ² ·K)
f	0.169	-
K1	82	KJ/(m ² ·K)
K2	12	KJ/(m ² ·K)
Y11	0.85	h
Y22	4.03	h
Y12	-8.11	h

Tabela A.2 – Validação do exemplo D.2 da norma ISO/FDIS 13786:2006(E).

Anexo B – Resultados dos exemplos da norma ABNT Projecto02:135.07-001/2

Neste anexo encontram-se os resultados obtidos para os exemplos presentes na norma brasileira.

B1. Exemplo C1: Parede de tijolos maciços rebocados em ambas as fases

Exemplo C1		
Aa	0.0025	m ²
Ra	0.1130	(m ² .K)/W
Ab	0.0095	m ²
Rb	0.1348	(m ² .K)/W
Rt	0.1296	(m ² .K)/W
RT	0.2996	(m ² .K)/W
U	3.34	W/(m ² .K)
Cta	260	kJ/(m ² .K)
Ctb	212	kJ/(m ² .K)
CtT	220	kJ/(m ² .K)
B0	180	-
B1	313.9	-
B2	22.4	-
φ	3.3	Horas

Tabela B.1 – Resultados obtidos para o exemplo C1.

B2. Exemplo C2: Parede com blocos de concreto colados, sem reboco

Exemplo C2		
Aa	0.0038	m ²
Ra	0.0514	(m ² .K)/W
Ab	0.03135	m ²
Rb	0.1829	(m ² .K)/W
Rt	0.1312	(m ² .K)/W
RT	0.3012	(m ² .K)/W
U	3.32	W/(m ² .K)
Cta	216	kJ/(m ² .K)
Ctb	96	kJ/(m ² .K)
CtT	105	kJ/(m ² .K)
B0	57	-
B1	98.2	-
B2	-3.6	-
φ	1.8	Horas

Tabela B.2 – Resultados obtidos para o exemplo C2.

B3. Exemplo C3: Parede de tijolos cerâmicos de seis furos rebocados em ambas as faces

Este exemplo é resolvido, na norma brasileira, por duas formas, seguem-se os resultados pela primeira e segunda formas, respetivamente.

Exemplo C3 1ª forma			Exemplo C3 2ª forma			Exemplo C3		
A1	0.0032	m ²	Aa	0.0049	m ²	Cta	280	kJ/(m ² .K)
R1	0.1111	(m ² .K)/W	Ra	0.1217	(m ² .K)/W	Ctb	227	kJ/(m ² .K)
A2	0.0128	m ²	Ab	0.0032	m ²	Ctc	139	kJ/(m ² .K)
R2	0.3644	(m ² .K)/W	Rb	0.1459	(m ² .K)/W	CT	160	kJ/(m ² .K)
Rtijolo	0.2321	(m ² .K)/W	Ac	0.0128	m ²	B0	120	-
Aa	0.0049	m ²	Rc	0.3992	(m ² .K)/W	B1	108.4	-
Ra	0.1217	(m ² .K)/W	Rt	0.2503	(m ² .K)/W	B2	-11.1	-
Ab	0.0512	m ²	RT	0.420255	(m ² .K)/W	φ	3.6	Horas
Rb	0.2669	(m ² .K)/W	U	2.3795	W/(m ² .K)			
Rt	0.2417	(m ² .K)/W						
RT	0.4117	(m ² .K)/W						
U	2.43	W/(m ² .K)						

Tabela B.3 – resultados obtidos para o exemplo C3.

B4. Exemplo C4: Parede dupla com placas de betão e câmara de ar não ventilada

Uma vez que os resultados são iguais tanto para o exemplo presente na norma, como para o caso em que se divide a camada interna de betão em duas iguais, apresenta-se apenas uma figura para ambos os casos.

Exemplo C4		
Rt	0.1943	(m ² .K)/W
RT	0.3643	(m ² .K)/W
U	2.74	W/(m ² .K)
Ct	144	kJ/(m ² .K)
B0	72	-
B1	83.7	-
B2	-2.5	-
φ	2.5	Horas

Tabela B.4 – Resultados obtidos para o exemplo C4.

Os resultados para o exemplo C4, com a divisão da camada externa de betão em duas partes iguais são apresentados a seguir.

Exemplo C4		
Rt	0.1943	(m ² .K)/W
RT	0.3643	(m ² .K)/W
U	2.75	W/(m ² .K)
Ct	144	kJ/(m ² .K)
B0	108	-
B1	125.6	-
B2	-44.3	-
ϕ	3.0	Horas

Tabela B.5 – Resultados obtidos para o exemplo C4 quando se divide a camada externa de betão em duas partes iguais.

Como foi referido na secção 3.3.3., o valor do coeficiente B₀ tem um valor diferente e consequentemente, o atraso térmico também difere o seu valor.

Anexo C – Variação da condutibilidade térmica, λ

Neste anexo constam os resultados obtidos do estudo da variação da condutibilidade.

Apresenta-se um exemplo de simulação utilizado neste capítulo, a vermelho está identificada a propriedade que variou de 0.001 até 2.

Do Exterior para o Interior		λ [W/(m.K)]	ρ [Kg/m ³]	c [J/(Kg.K)]	e [m]	Resultados	
1ª Camada	Betão	1.4	2300	880	0.07	U [W/(m ² .K)]	0.623701
2ª Camada	ICB	0.045	156	1530	0.06	ϕ [Horas]	-7.17568
3ª Camada	Betão	1.4	2300	880	0.07	f [-]	0.488908

Tabela C.1 –Exemplo de simulação pela folha de cálculo desenvolvida.

C1. Resultados para 1 cm de isolamento

Os resultados que se seguem foram utilizados na construção dos gráficos a) presentes nas figuras 4.2., 4.3. e 4.4.

λ [W/(m.K)]	U [W/(m ² .K)]	ϕ [Horas]	f [-]
0.001	0.10	8.90	0.314
0.01	0.77	7.91	0.361
0.015	1.03	7.72	0.380
0.02	1.24	7.56	0.397
0.025	1.42	7.43	0.412
0.03	1.56	7.30	0.425
0.035	1.69	7.19	0.436
0.04	1.80	7.10	0.446
0.045	1.89	7.01	0.455
0.05	1.98	6.93	0.463
0.055	2.05	6.85	0.470
0.06	2.12	6.78	0.476
0.065	2.18	6.72	0.482
0.07	2.23	6.66	0.487
0.075	2.28	6.61	0.491
0.08	2.32	6.56	0.496
0.085	2.36	6.52	0.499
0.09	2.40	6.47	0.503
0.095	2.43	6.43	0.506
0.1	2.46	6.40	0.509
0.15	2.69	6.12	0.529
0.2	2.81	5.96	0.540
0.25	2.89	5.85	0.547
0.3	2.95	5.77	0.552
0.35	2.99	5.71	0.555
0.4	3.02	5.67	0.557
0.45	3.05	5.63	0.559
0.5	3.07	5.60	0.561
0.55	3.09	5.58	0.562
0.6	3.10	5.56	0.563
0.65	3.11	5.54	0.564
0.7	3.13	5.52	0.564
0.75	3.13	5.51	0.565
0.8	3.14	5.50	0.566
0.85	3.15	5.49	0.566
0.9	3.16	5.48	0.567
0.95	3.16	5.47	0.567
1	3.17	5.46	0.567
1.5	3.20	5.41	0.569
2	3.22	5.38	0.571

Tabela C.2 – Resultados para 1 cm de isolamento.

C2. Resultados para 6 cm de isolamento

Os resultados que se seguem foram utilizados na construção dos gráficos *b)* presentes nas figuras 4.2., 4.3. e 4.4.

λ [W/(m.K)]	U [W/(m ² .K)]	ϕ [Horas]	f [-]
0.001	0.02	superior a 12	0.065
0.01	0.16	8.95	0.430
0.015	0.23	8.12	0.456
0.02	0.31	7.68	0.468
0.025	0.37	7.39	0.477
0.03	0.44	7.19	0.484
0.035	0.50	7.04	0.489
0.04	0.56	6.92	0.494
0.045	0.62	6.82	0.499
0.05	0.68	6.74	0.504
0.055	0.73	6.66	0.508
0.06	0.79	6.60	0.512
0.065	0.84	6.54	0.516
0.07	0.89	6.48	0.519
0.075	0.93	6.43	0.523
0.08	0.98	6.39	0.527
0.085	1.02	6.34	0.530
0.09	1.07	6.30	0.533
0.095	1.11	6.26	0.536
0.1	1.15	6.23	0.539
0.15	1.49	5.93	0.566
0.2	1.75	5.72	0.587
0.25	1.96	5.55	0.603
0.3	2.13	5.41	0.616
0.35	2.27	5.29	0.627
0.4	2.38	5.19	0.636
0.45	2.48	5.10	0.643
0.5	2.56	5.03	0.649
0.55	2.64	4.96	0.655
0.6	2.70	4.90	0.660
0.65	2.76	4.85	0.664
0.7	2.81	4.80	0.667
0.75	2.86	4.76	0.671
0.8	2.90	4.72	0.673
0.85	2.94	4.68	0.676
0.9	2.97	4.65	0.678
0.95	3.00	4.62	0.680
1	3.03	4.59	0.682
1.5	3.23	4.40	0.694
2	3.33	4.29	0.700

Tabela C.3 – Resultados para 6 cm de isolamento.

C3. Resultados para 19 cm de isolamento

Os resultados que se seguem foram utilizados na construção dos gráficos c) presentes nas figuras 4.2., 4.3. e 4.4.

λ [W/(m.K)]	U [W/(m ² .K)]	ϕ [Horas]	f [-]
0.001	0.01	superior a 12	0.000
0.01	0.05	superior a 12	0.133
0.015	0.08	11.78	0.248
0.02	0.10	9.91	0.352
0.025	0.13	8.64	0.440
0.03	0.15	7.70	0.515
0.035	0.18	6.96	0.577
0.04	0.20	6.37	0.629
0.045	0.23	5.89	0.672
0.05	0.25	5.48	0.708
0.055	0.28	5.13	0.739
0.06	0.30	4.83	0.765
0.065	0.32	4.57	0.787
0.07	0.35	4.34	0.806
0.075	0.37	4.13	0.822
0.08	0.39	3.95	0.836
0.085	0.41	3.79	0.848
0.09	0.44	3.64	0.859
0.095	0.46	3.51	0.868
0.1	0.48	3.39	0.877
0.15	0.69	2.58	0.926
0.2	0.89	2.16	0.946
0.25	1.07	1.89	0.957
0.3	1.23	1.71	0.964
0.35	1.39	1.57	0.969
0.4	1.53	1.47	0.972
0.45	1.67	1.39	0.974
0.5	1.79	1.32	0.976
0.55	1.91	1.26	0.978
0.6	2.03	1.21	0.979
0.65	2.13	1.17	0.980
0.7	2.23	1.13	0.981
0.75	2.32	1.10	0.982
0.8	2.41	1.07	0.982
0.85	2.50	1.04	0.983
0.9	2.58	1.02	0.984
0.95	2.65	1.00	0.984
1	2.72	0.98	0.985
1.5	3.29	0.84	0.987
2	3.67	0.76	0.989

Tabela C.4 – Resultados para 19 cm de isolamento.

Anexo D – Variação do calor específico, c

Neste anexo constam os resultados obtidos do estudo da variação do calor específico.

Apresenta-se um exemplo de simulação utilizado neste capítulo, a vermelho está identificada a propriedade que variou de 1 até 2000 J/(Kg.K).

Do Exterior para o Interior		λ [W/(m.K)]	ρ [Kg/m ³]	c [J/(Kg.K)]	e [m]	Resultados	
1ª Camada	Betão	1.4	2300	880	0.07	U [W/(m ² .K)]	0.623701
2ª Camada	ICB	0.045	156	1530	0.06	ϕ [Horas]	-7.17568
3ª Camada	Betão	1.4	2300	880	0.07	f [-]	0.488908

Tabela D.1 –Exemplo de simulação pela folha de cálculo desenvolvida.

D1. Resultados para 1 cm de isolamento

Os resultados que se seguem foram utilizados na construção dos gráficos *a*) presentes nas figuras 4.5. e 4.6.

c [J/(Kg.K)]	U [W/(m ² .K)]	ϕ [Horas]	f [-]
1	1.76	7.10	0.444
10	1.76	7.10	0.444
20	1.76	7.10	0.444
30	1.76	7.10	0.444
40	1.76	7.10	0.444
50	1.76	7.10	0.444
60	1.76	7.10	0.444
70	1.76	7.10	0.444
80	1.76	7.10	0.444
90	1.76	7.10	0.444
100	1.76	7.10	0.444
110	1.76	7.10	0.444
120	1.76	7.10	0.444
130	1.76	7.10	0.444
140	1.76	7.10	0.444
150	1.76	7.10	0.444
160	1.76	7.10	0.444
170	1.76	7.10	0.444
180	1.76	7.10	0.444
190	1.76	7.11	0.444
200	1.76	7.11	0.444
225	1.76	7.11	0.444
250	1.76	7.11	0.444
275	1.76	7.11	0.444
300	1.76	7.11	0.444
325	1.76	7.11	0.444
350	1.76	7.11	0.444
375	1.76	7.11	0.444
400	1.76	7.11	0.444
425	1.76	7.11	0.443
450	1.76	7.11	0.443
475	1.76	7.12	0.443
500	1.76	7.12	0.443
550	1.76	7.12	0.443
600	1.76	7.12	0.443
650	1.76	7.12	0.443
700	1.76	7.12	0.443
750	1.76	7.13	0.443
800	1.76	7.13	0.443
850	1.76	7.13	0.443
900	1.76	7.13	0.443
950	1.76	7.13	0.443
1000	1.76	7.13	0.443
1100	1.76	7.14	0.442
1200	1.76	7.14	0.442
1300	1.76	7.14	0.442
1400	1.76	7.15	0.442
1500	1.76	7.15	0.442
1600	1.76	7.16	0.442
1700	1.76	7.16	0.441
1800	1.76	7.16	0.441
1900	1.76	7.17	0.441
2000	1.76	7.17	0.441

Tabela D.2 – Resultados para 1cm de isolamento.

D2. Resultados para 6 cm de isolamento

Os resultados que se seguem foram utilizados na construção dos gráficos *b)* presentes nas figuras 4.5. e 4.6.

c [J/(Kg.K)]	U [W/(m ² .K)]	φ [Horas]	f [-]
1	0.54	6.18	0.509
10	0.54	6.18	0.508
20	0.54	6.19	0.508
30	0.54	6.20	0.508
40	0.54	6.21	0.508
50	0.54	6.22	0.508
60	0.54	6.22	0.508
70	0.54	6.23	0.508
80	0.54	6.24	0.508
90	0.54	6.25	0.507
100	0.54	6.26	0.507
110	0.54	6.26	0.507
120	0.54	6.27	0.507
130	0.54	6.28	0.507
140	0.54	6.29	0.507
150	0.54	6.30	0.507
160	0.54	6.30	0.507
170	0.54	6.31	0.506
180	0.54	6.32	0.506
190	0.54	6.33	0.506
200	0.54	6.34	0.506
225	0.54	6.36	0.506
250	0.54	6.38	0.505
275	0.54	6.40	0.505
300	0.54	6.42	0.505
325	0.54	6.44	0.504
350	0.54	6.46	0.504
375	0.54	6.48	0.503
400	0.54	6.50	0.503
425	0.54	6.52	0.503
450	0.54	6.54	0.502
475	0.54	6.55	0.502
500	0.54	6.57	0.501
550	0.54	6.61	0.501
600	0.54	6.65	0.500
650	0.54	6.69	0.499
700	0.54	6.73	0.498
750	0.54	6.77	0.497
800	0.54	6.81	0.496
850	0.54	6.85	0.495
900	0.54	6.89	0.494
950	0.54	6.93	0.493
1000	0.54	6.97	0.492
1100	0.54	7.04	0.490
1200	0.54	7.12	0.488
1300	0.54	7.20	0.486
1400	0.54	7.27	0.484
1500	0.54	7.35	0.482
1600	0.54	7.43	0.479
1700	0.54	7.50	0.477
1800	0.54	7.58	0.475
1900	0.54	7.65	0.472
2000	0.54	7.73	0.470

Tabela D.3 – Resultados para 6 cm de isolamento.

D3. Resultados para 19 cm de isolamento

Os resultados que se seguem foram utilizados na construção dos gráficos c) presentes nas figuras 4.5 e 4.6.

c [J/(Kg.K)]	U [W/(m ² .K)]	g [Horas]	f [-]
1	0.19	0.48	0.995
10	0.19	0.55	0.995
20	0.19	0.62	0.995
30	0.19	0.70	0.994
40	0.19	0.77	0.994
50	0.19	0.84	0.993
60	0.19	0.92	0.992
70	0.19	0.99	0.991
80	0.19	1.06	0.990
90	0.19	1.14	0.988
100	0.19	1.21	0.987
110	0.19	1.28	0.985
120	0.19	1.35	0.984
130	0.19	1.43	0.982
140	0.19	1.50	0.980
150	0.19	1.57	0.978
160	0.19	1.64	0.975
170	0.19	1.71	0.973
180	0.19	1.78	0.970
190	0.19	1.86	0.968
200	0.19	1.93	0.965
225	0.19	2.10	0.958
250	0.19	2.28	0.950
275	0.19	2.45	0.941
300	0.19	2.62	0.932
325	0.19	2.79	0.922
350	0.19	2.96	0.912
375	0.19	3.13	0.901
400	0.19	3.29	0.890
425	0.19	3.45	0.879
450	0.19	3.61	0.868
475	0.19	3.77	0.856
500	0.19	3.92	0.844
550	0.19	4.23	0.820
600	0.19	4.52	0.795
650	0.19	4.81	0.770
700	0.19	5.08	0.746
750	0.19	5.35	0.722
800	0.19	5.62	0.698
850	0.19	5.87	0.675
900	0.19	6.12	0.652
950	0.19	6.36	0.630
1000	0.19	6.60	0.609
1100	0.19	7.05	0.569
1200	0.19	7.48	0.531
1300	0.19	7.89	0.497
1400	0.19	8.29	0.465
1500	0.19	8.67	0.435
1600	0.19	9.04	0.408
1700	0.19	9.40	0.383
1800	0.19	9.74	0.359
1900	0.19	10.08	0.338
2000	0.19	10.41	0.318

Tabela D.4 – Resultados para 19 cm de isolamento.

Anexo E – Variação da massa volúmica, ρ

Neste anexo constam os resultados obtidos do estudo da variação da massa volúmica.

Apresenta-se um exemplo de simulação utilizado neste capítulo, a vermelho está identificada a propriedade que variou de 1 até 3000 Kg/m³.

Do Exterior para o Interior		λ [W/(m.K)]	ρ [Kg/m ³]	c [J/(Kg.K)]	e [m]	Resultados	
1ª Camada	Betão	1.4	2300	880	0.07	U [W/(m ² .K)]	0.623701
2ª Camada	ICB	0.045	156	1530	0.06	ϕ [Horas]	-7.17568
3ª Camada	Betão	1.4	2300	880	0.07	f [-]	0.488908

Tabela E.1 –Exemplo de simulação pela folha de cálculo desenvolvida.

E1. Resultados para 1 cm de isolamento

Os resultados que se seguem foram utilizados na construção dos gráficos *a)* presentes nas figuras 4.7 e 4.8.

ρ [Kg/m ³]	U [W/(m ² .K)]	ϕ [Horas]	f [-]
1	1.76	7.10	0.444
10	1.76	7.10	0.444
20	1.76	7.11	0.444
30	1.76	7.11	0.444
40	1.76	7.11	0.444
50	1.76	7.12	0.443
60	1.76	7.12	0.443
70	1.76	7.12	0.443
80	1.76	7.13	0.443
90	1.76	7.13	0.443
100	1.76	7.13	0.443
110	1.76	7.14	0.442
120	1.76	7.14	0.442
130	1.76	7.14	0.442
140	1.76	7.15	0.442
150	1.76	7.15	0.442
160	1.76	7.16	0.442
170	1.76	7.16	0.441
180	1.76	7.16	0.441
190	1.76	7.17	0.441
200	1.76	7.17	0.441
225	1.76	7.18	0.440
250	1.76	7.19	0.440
275	1.76	7.20	0.440
300	1.76	7.20	0.439
325	1.76	7.21	0.439
350	1.76	7.22	0.438
375	1.76	7.23	0.438
400	1.76	7.24	0.437
425	1.76	7.25	0.437
450	1.76	7.26	0.437
475	1.76	7.27	0.436
500	1.76	7.27	0.436
550	1.76	7.29	0.435
600	1.76	7.31	0.434
650	1.76	7.33	0.433
700	1.76	7.34	0.432
750	1.76	7.36	0.432
800	1.76	7.38	0.431
850	1.76	7.40	0.430
900	1.76	7.41	0.429
950	1.76	7.43	0.428
1000	1.76	7.45	0.427
1100	1.76	7.48	0.426
1200	1.76	7.52	0.424
1300	1.76	7.55	0.422
1400	1.76	7.58	0.420
1500	1.76	7.62	0.419
1600	1.76	7.65	0.417
1700	1.76	7.68	0.415
1800	1.76	7.71	0.413
1900	1.76	7.75	0.412
2000	1.76	7.78	0.410
2100	1.76	7.81	0.408
2200	1.76	7.85	0.406
2300	1.76	7.88	0.405
2400	1.76	7.91	0.403
2500	1.76	7.94	0.401
2600	1.76	7.97	0.400
2700	1.76	8.00	0.398
2800	1.76	8.04	0.396
2900	1.76	8.07	0.394
3000	1.76	8.10	0.393

Tabela E.2 – Resultados para 1 cm de isolamento.

E2. Resultados para 6 cm de isolamento

Os resultados que se seguem foram utilizados na construção dos gráficos *b)* presentes nas figuras 4.7 e 4.8.

ρ [Kg/m ³]	U [W/(m ² .K)]	ϕ [Horas]	f [-]
1	0.54	6.18	0.508
10	0.54	6.26	0.507
20	0.54	6.34	0.506
30	0.54	6.42	0.505
40	0.54	6.50	0.503
50	0.54	6.57	0.501
60	0.54	6.65	0.500
70	0.54	6.73	0.498
80	0.54	6.81	0.496
90	0.54	6.89	0.494
100	0.54	6.97	0.492
110	0.54	7.04	0.490
120	0.54	7.12	0.488
130	0.54	7.20	0.486
140	0.54	7.27	0.484
150	0.54	7.35	0.482
160	0.54	7.43	0.479
170	0.54	7.50	0.477
180	0.54	7.58	0.475
190	0.54	7.65	0.472
200	0.54	7.73	0.470
225	0.54	7.91	0.463
250	0.54	8.09	0.456
275	0.54	8.27	0.449
300	0.54	8.45	0.442
325	0.54	8.62	0.435
350	0.54	8.79	0.428
375	0.54	8.96	0.420
400	0.54	9.13	0.413
425	0.54	9.29	0.406
450	0.54	9.45	0.398
475	0.54	9.60	0.391
500	0.54	9.76	0.383
550	0.54	10.06	0.369
600	0.54	10.35	0.354
650	0.54	10.63	0.340
700	0.54	10.91	0.327
750	0.54	11.17	0.314
800	0.54	11.43	0.301
850	0.54	11.68	0.289
900	0.54	11.92	0.278
950	0.54	superior a 12	0.267
1000	0.54	superior a 12	0.256
1100	0.54	superior a 12	0.237
1200	0.54	superior a 12	0.219
1300	0.54	superior a 12	0.203
1400	0.54	superior a 12	0.188
1500	0.54	superior a 12	0.175
1600	0.54	superior a 12	0.162
1700	0.54	superior a 12	0.151
1800	0.54	superior a 12	0.141
1900	0.54	superior a 12	0.131
2000	0.54	superior a 12	0.123
2100	0.54	superior a 12	0.115
2200	0.54	superior a 12	0.108
2300	0.54	superior a 12	0.101
2400	0.54	superior a 12	0.095
2500	0.54	superior a 12	0.089
2600	0.54	superior a 12	0.084
2700	0.54	superior a 12	0.079
2800	0.54	superior a 12	0.074
2900	0.54	superior a 12	0.070
3000	0.54	superior a 12	0.066

Tabela E.3 – Resultados para 6 cm de isolamento.

E3. Resultados para 19 cm de isolamento

Os resultados que se seguem foram utilizados na construção dos gráficos c) presentes nas figuras 4.2., 4.3. e 4.4.

ρ [Kg/m ³]	U [W/(m ² .K)]	Δ [Horas]	f [-]
1	0.19	0.55	0.995
10	0.19	1.21	0.987
20	0.19	1.93	0.965
30	0.19	2.62	0.932
40	0.19	3.29	0.890
50	0.19	3.92	0.844
60	0.19	4.52	0.795
70	0.19	5.08	0.746
80	0.19	5.62	0.698
90	0.19	6.12	0.652
100	0.19	6.60	0.609
110	0.19	7.05	0.569
120	0.19	7.48	0.531
130	0.19	7.89	0.497
140	0.19	8.29	0.465
150	0.19	8.67	0.435
160	0.19	9.04	0.408
170	0.19	9.40	0.383
180	0.19	9.74	0.359
190	0.19	10.08	0.338
200	0.19	10.41	0.318
225	0.19	11.19	0.274
250	0.19	11.93	0.238
275	0.19	superior a 12	0.207
300	0.19	superior a 12	0.181
325	0.19	superior a 12	0.159
350	0.19	superior a 12	0.140
375	0.19	superior a 12	0.124
400	0.19	superior a 12	0.110
425	0.19	superior a 12	0.098
450	0.19	superior a 12	0.087
475	0.19	superior a 12	0.078
500	0.19	superior a 12	0.070
550	0.19	superior a 12	0.056
600	0.19	superior a 12	0.046
650	0.19	superior a 12	0.037
700	0.19	superior a 12	0.031
750	0.19	superior a 12	0.025
800	0.19	superior a 12	0.021
850	0.19	superior a 12	0.018
900	0.19	superior a 12	0.015
950	0.19	superior a 12	0.013
1000	0.19	superior a 12	0.011
1100	0.19	superior a 12	0.008
1200	0.19	superior a 12	0.006
1300	0.19	superior a 12	0.004
1400	0.19	superior a 12	0.003
1500	0.19	superior a 12	0.002
1600	0.19	superior a 12	0.002
1700	0.19	superior a 12	0.001
1800	0.19	superior a 12	0.001
1900	0.19	superior a 12	0.001
2000	0.19	superior a 12	0.001
2100	0.19	superior a 12	0.001
2200	0.19	superior a 12	0.000
2300	0.19	superior a 12	0.000
2400	0.19	superior a 12	0.000
2500	0.19	superior a 12	0.000
2600	0.19	superior a 12	0.000
2700	0.19	superior a 12	0.001
2800	0.19	superior a 12	0.000
2900	0.19	superior a 12	0.000
3000	0.19	superior a 12	0.000

Tabela E.4 – Resultados para 19 cm de isolamento.

Anexo F – Casos de Estudo

Neste anexo constam os resultados obtidos dos casos de estudo da secção 4.2.

Apresenta-se um exemplo de simulação por caso, o gráfico da influência da espessura do isolante ICB no atraso térmico e no coeficiente de transmissão térmica e os respetivos resultados.

F1. Caso de Estudo 1

O Caso de Estudo 1 é constituído por argamassa (BM), painel de madeira (OSB), reboco tradicional (RT) e o isolante de aglomerado de cortiça expandida (ICB), colocado do lado exterior e do lado interior, entre RT e OSB.

Do Exterior para o Interior		λ [W/(m.K)]	ρ [Kg/m ³]	c [J/(Kg.K)]	e [m]	Resultados	
1ª Camada	BM	0.61	1400	1000	0.005	U [W/(m ² .K)]	0.525491
2ª Camada	OSB	0.13	550	1200	0.02	ϕ [Horas]	-3.25936
3ª Camada	ICB	0.045	156	1530	0.07	f [-]	0.898261
4ª Camada	RT	1.3	1900	840	0.02		

Tabela F.1 –Exemplo de simulação para o Caso de Estudo 1.

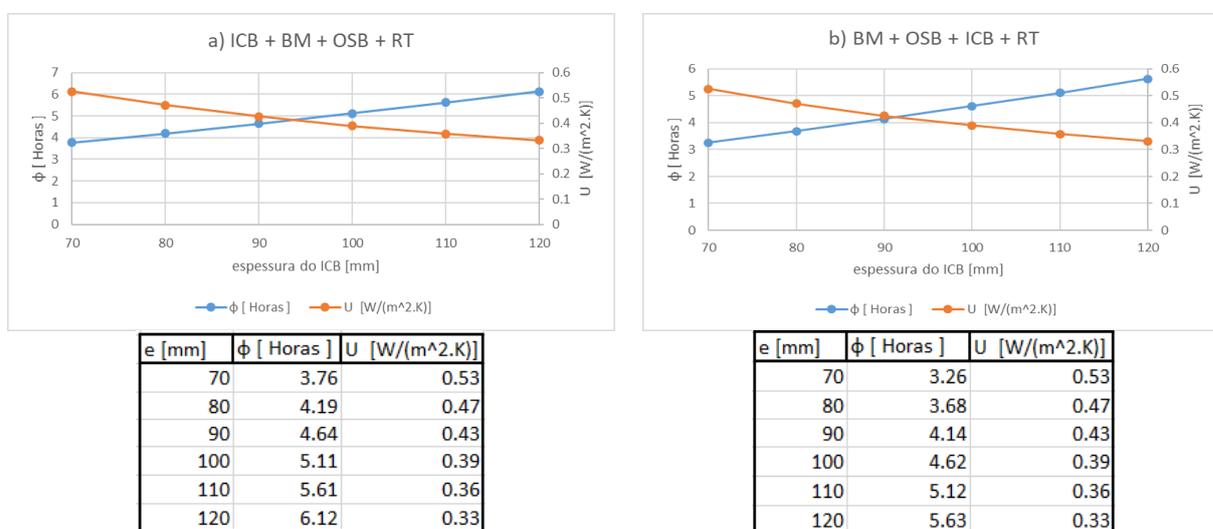


Figura F.1 – Resultados do Caso de Estudo 1: a) ICB por fora; b) ICB por dentro.

F2. Caso de Estudo 2

O caso de estudo 2 é constituído por um perfil ómega (OP), bloco térmico (TB), reboco tradicional (RT) e o isolante de aglomerado de cortiça expandida (ICB), colocado do lado exterior e do lado interior, entre RT e OSB.

Do Exterior para o Interior		λ [W/(m.K)]	ρ [Kg/m ³]	c [J/(Kg.K)]	e [m]	Resultados	
1ª Camada	OP	0.245	1.2928	1000	0.025	U [W/(m ² .K)]	0.372406
2ª Camada	TB	0.4032	612	1000	0.25	ϕ [Horas]	-11.0135
3ª Camada	ICB	0.045	156	1530	0.08	f [-]	0.224587
4ª Camada	RT	1.3	1900	840	0.02		

Tabela F.2 –Exemplo de simulação para o Caso de Estudo 2.

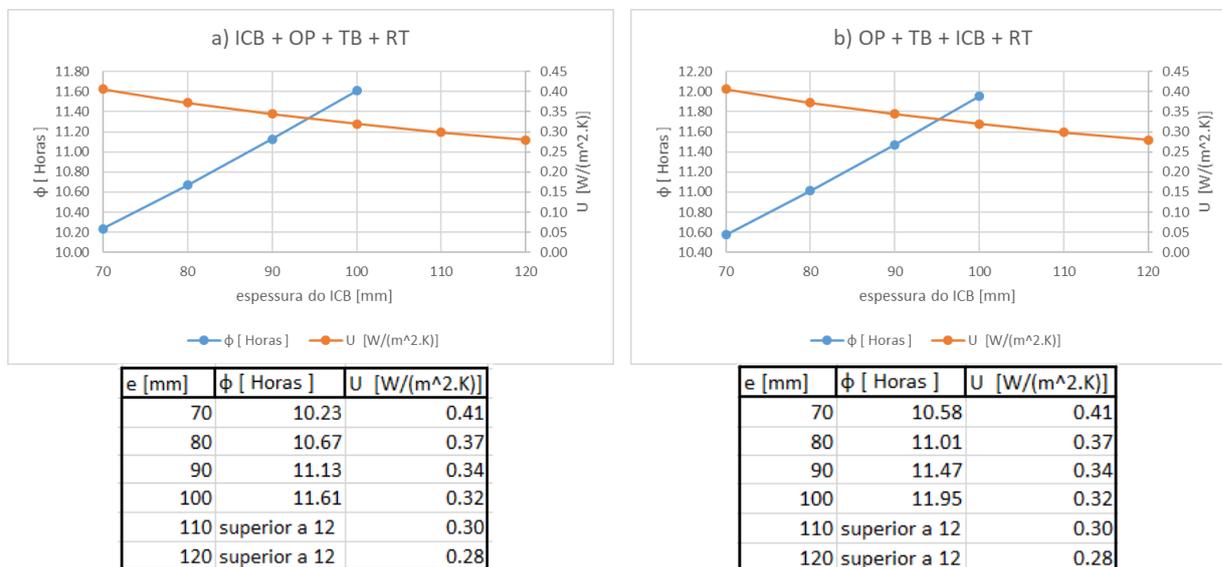


Figura F.2 – Resultados do Caso de Estudo 2: a) ICB por fora; b) ICB por dentro.

F3. Caso de Estudo 3

O Caso de Estudo 3 é constituído por um perfil Ómega (OP), tijolo cerâmico (CB), reboco tradicional (RT) e o isolante de aglomerado de cortiça expandida (ICB), colocado do lado exterior e do lado interior, entre RT e OSB.

Do Exterior para o Interior		λ [W/(m.K)]	ρ [Kg/m ³]	c [J/(Kg.K)]	e [m]	Resultados	
1ª Camada	OP	0.245	1.2928	1000	0.025	U [W/(m ² .K)]	0.353278
2ª Camada	CB	0.405	720	680	0.22	ϕ [Horas]	-9.87381
3ª Camada	ICB	0.045	156	1530	0.09	f [-]	0.318358
4ª Camada	RT	1.3	1900	840	0.02		

Tabela F.3 –Exemplo de simulação para o Caso de Estudo 3.

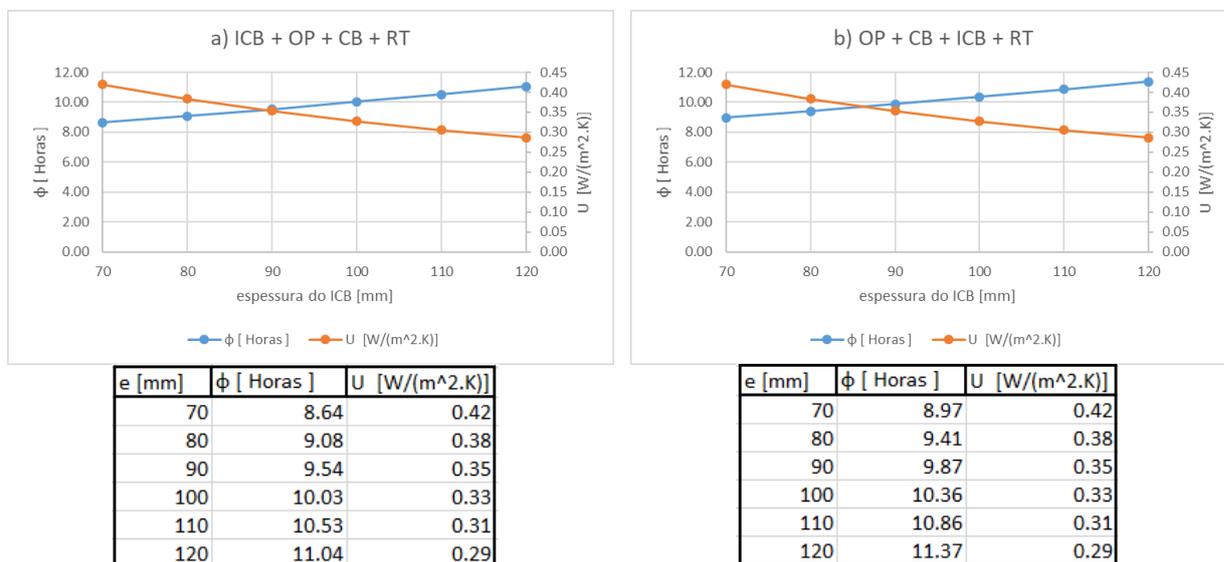


Figura F.3 – Resultados do Caso de Estudo 3: a) ICB por fora; b) ICB por dentro.

F4. Caso de Estudo 4

O Caso de Estudo 4 é constituído por argamassa (BM), bloco térmico (TB), reboco tradicional (RT) e o isolante de aglomerado de cortiça expandida (ICB), colocado do lado exterior e do lado interior, entre RT e OSB.

Do Exterior para o Interior		λ [W/(m.K)]	ρ [Kg/m ³]	c [J/(Kg.K)]	e [m]	Resultados	
1ª Camada	BM	0.61	1400	1000	0.005	U [W/(m ² .K)]	0.329398
2ª Camada	TB	0.4032	612	1000	0.25	ϕ [Horas]	-11.4036
3ª Camada	ICB	0.045	156	1530	0.1	f [-]	0.251375
4ª Camada	RT	1.3	1900	840	0.02		

Tabela F.4 –Exemplo de simulação para o Caso de Estudo 4.

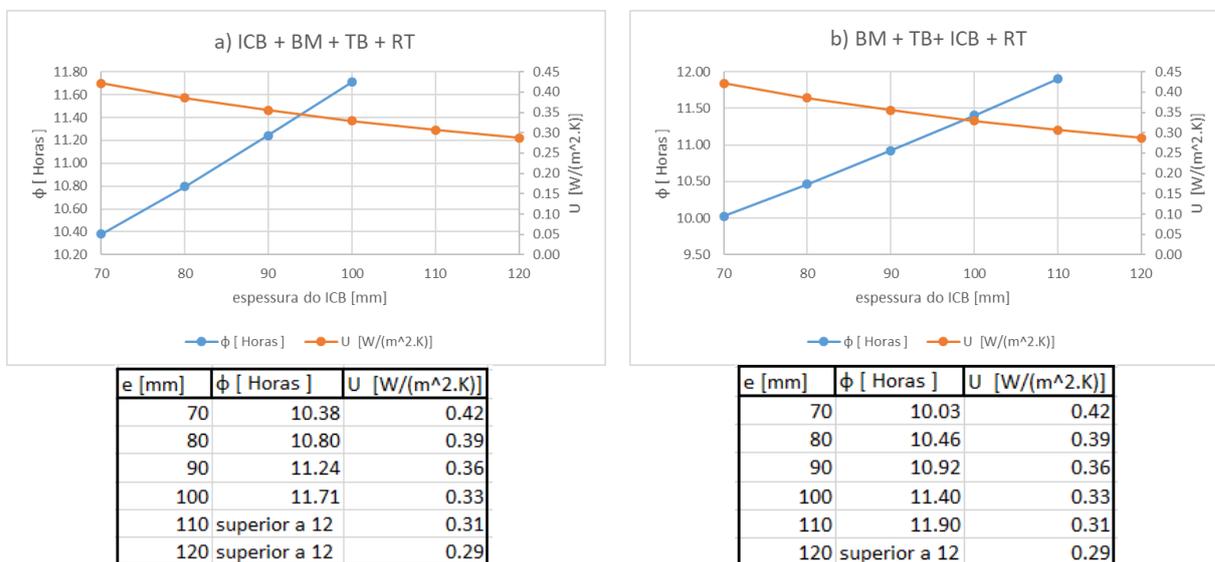


Figura F.4 – Resultados do Caso de Estudo 4: a) ICB por fora; b) ICB por dentro.

F5. Caso de Estudo 5

O Caso de Estudo 5 é constituído por argamassa (BM), tijolo cerâmico (CB), reboco tradicional (RT) e o isolante de aglomerado de cortiça expandida (ICB), colocado do lado exterior e do lado interior, entre RT e OSB.

Do Exterior para o Interior		λ [W/(m.K)]	ρ [Kg/m ³]	c [J/(Kg.K)]	e [m]	Resultados	
1ª Camada	BM	0.61	1400	1000	0.005	U [W/(m ² .K)]	0.314343
2ª Camada	CB	0.405	720	680	0.22	ϕ [Horas]	-10.3035
3ª Camada	ICB	0.045	156	1530	0.11	f [-]	0.34913
4ª Camada	RT	1.3	1900	840	0.02		

Tabela F.5 –Exemplo de simulação para o Caso de Estudo 5.

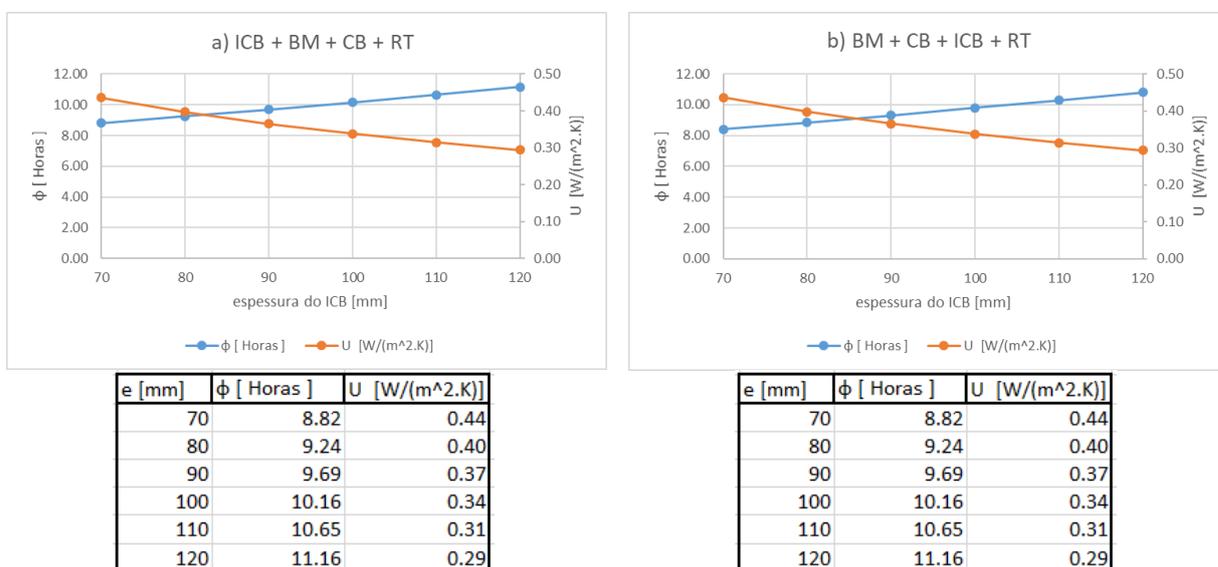


Figura F.5 – Resultados do Caso de Estudo 5: a) ICB por fora; b) ICB por dentro.

F6. Caso de Estudo 6

O Caso de Estudo 6 é constituído por argamassa (BM), chapa metálica (MP), tijolo cerâmico (CB), reboco tradicional (RT) e o isolante de aglomerado de cortiça expandida (ICB), colocado do lado exterior e do lado interior, entre RT e OSB.

Do Exterior para o Interior		λ [W/(m.K)]	ρ [Kg/m ³]	c [J/(Kg.K)]	e [m]	Resultados	
1ª Camada	BM	0.61	1400	1000	0.005	U [W/(m ² .K)]	0.293815
2ª Camada	MP	50	7800	480	0.002	ϕ [Horas]	-10.9037
3ª Camada	CB	0.405	720	680	0.22	f [-]	0.325941
4ª Camada	ICB	0.045	156	1530	0.12		
5ª Camada	RT	1.3	1900	840	0.02		

Tabela F.6 –Exemplo de simulação para o Caso de Estudo 6.

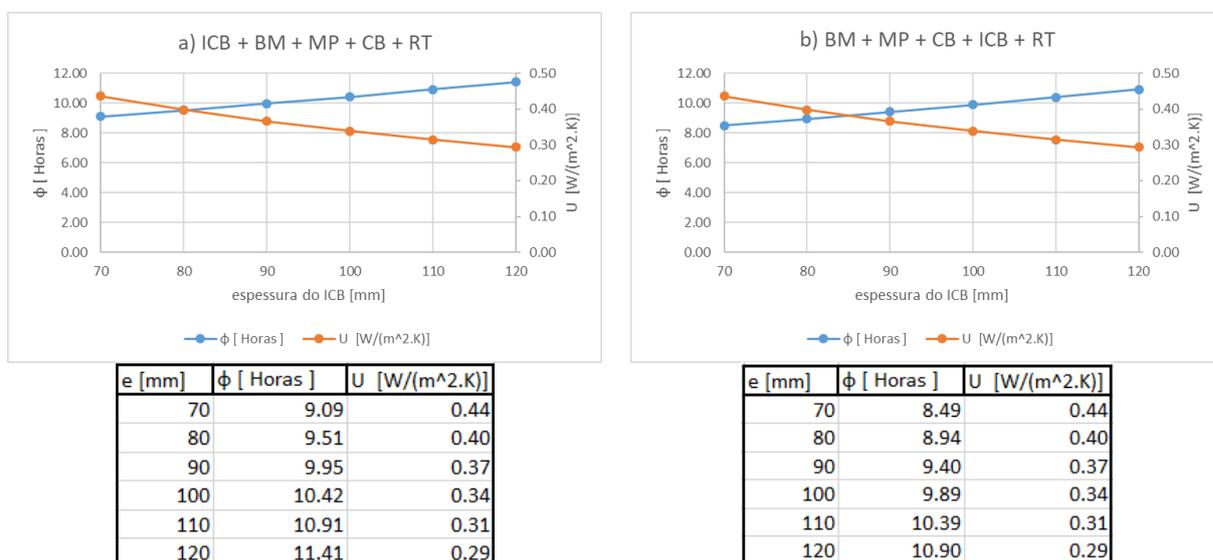


Figura F.6 – Resultados do Caso de Estudo 6: a) ICB por fora; b) ICB por dentro.

F7. Caso de Estudo 7

O Caso de Estudo 7 é constituído por uma chapa metálica (MP), caixa de ar (AG), tijolo cerâmico (CB), reboco tradicional (RT) e o isolante de aglomerado de cortiça expandida (ICB), colocado do lado exterior e do lado interior, entre RT e OSB.

Do Exterior para o Interior		λ [W/(m.K)]	ρ [Kg/m ³]	c [J/(Kg.K)]	e [m]
1ª Camada	MP	50	7800	480	0.002
2ª Camada	AG	0.222	1.2928	1000	0.04
3ª Camada	CB	0.405	720	680	0.22
4ª Camada	ICB	0.045	156	1530	0.07
5ª Camada	RT	1.3	1900	840	0.02

Resultados	
U [W/(m ² .K)]	0.405783
ϕ [Horas]	-9.38886
f [-]	0.30634

Tabela F.7 –Exemplo de simulação para o Caso de Estudo 7.

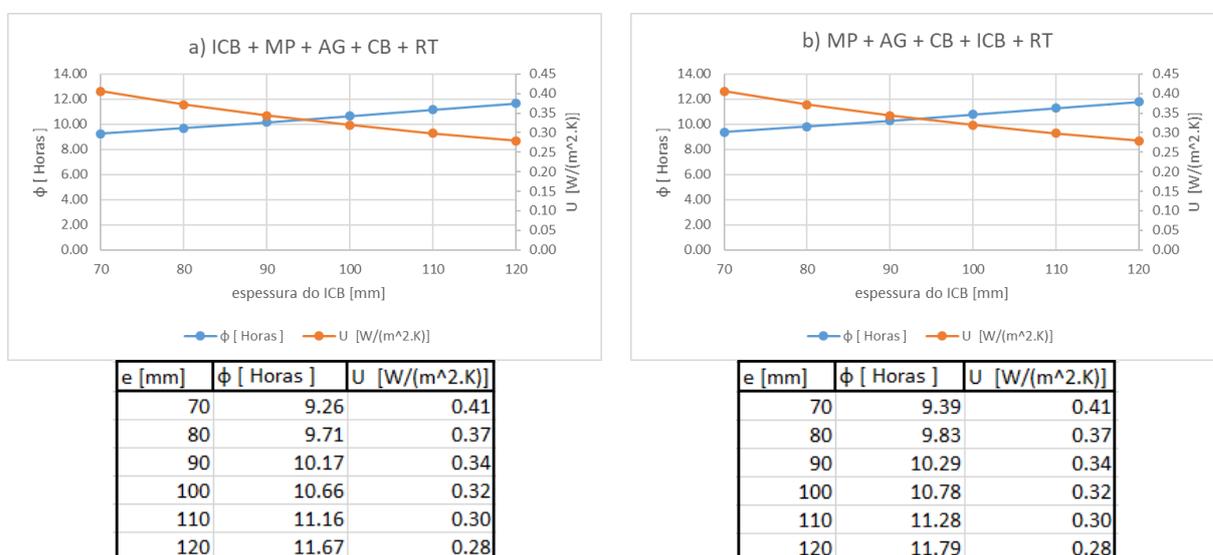


Figura F.7 – Resultados do Caso de Estudo 7: a) ICB por fora; b) ICB por dentro.

Anexo G – Variação da espessura e da posição da camada de isolamento

Neste último anexo apresentam-se os resultados obtidos dos casos de estudo do capítulo 5, onde primeiro aparecem os resultados obtidos pela folha de cálculo e por último os resultados do atraso térmico pelo programa analítico.

G1. Isolamento colocado no meio da solução construtiva

U [W/(m².K)]			
e [m]	ICB	EPS	XPS
0.01	1.76	1.82	1.69
0.02	1.21	1.27	1.15
0.03	0.93	0.98	0.87
0.04	0.75	0.79	0.70
0.05	0.63	0.67	0.59
0.06	0.54	0.58	0.50
0.07	0.48	0.51	0.44
0.08	0.42	0.45	0.39
0.09	0.38	0.41	0.35
0.1	0.35	0.37	0.32
0.11	0.32	0.34	0.30
0.12	0.30	0.32	0.27
0.13	0.27	0.29	0.25
0.14	0.26	0.28	0.24
0.15	0.24	0.26	0.22
0.16	0.23	0.24	0.21
0.17	0.21	0.23	0.20
0.18	0.20	0.22	0.19
0.19	0.19	0.21	0.18

φ [Horas]			
e [m]	ICB	EPS	XPS
0.01	7.13	7.05	7.17
0.02	7.31	7.18	7.28
0.03	7.27	7.05	7.16
0.04	7.18	6.82	6.95
0.05	7.07	6.55	6.72
0.06	6.97	6.26	6.46
0.07	6.88	5.94	6.20
0.08	6.81	5.61	5.94
0.09	6.75	5.27	5.67
0.1	6.71	4.92	5.39
0.11	6.69	4.56	5.12
0.12	6.67	4.18	4.84
0.13	6.65	3.79	4.56
0.14	6.64	3.40	4.27
0.15	6.64	3.00	3.99
0.16	6.62	2.59	3.70
0.17	6.61	2.18	3.42
0.18	6.60	1.77	3.15
0.19	6.60	1.37	2.89

f [-]			
e [m]	ICB	EPS	XPS
0.01	0.443	0.450	0.438
0.02	0.422	0.430	0.419
0.03	0.427	0.436	0.427
0.04	0.444	0.454	0.446
0.05	0.466	0.480	0.472
0.06	0.492	0.509	0.502
0.07	0.521	0.543	0.535
0.08	0.550	0.580	0.572
0.09	0.579	0.620	0.611
0.1	0.606	0.624	0.651
0.11	0.631	0.706	0.693
0.12	0.652	0.751	0.735
0.13	0.667	0.796	0.776
0.14	0.677	0.840	0.814
0.15	0.679	0.880	0.849
0.16	0.673	0.917	0.879
0.17	0.659	0.947	0.901
0.18	0.638	0.970	0.914
0.19	0.609	0.983	0.917

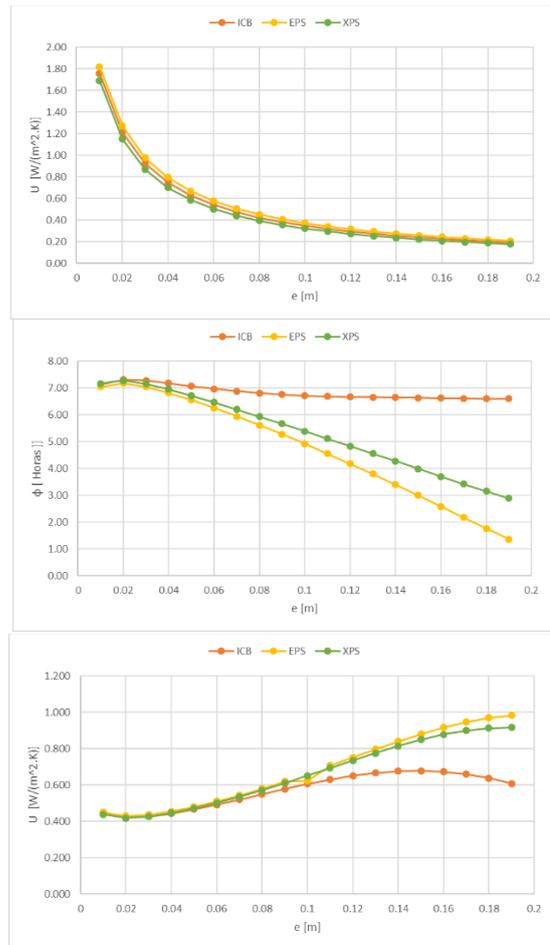


Figura G.1 – Resultados quando isolamento é colocado no meio.

φ [Horas]			
e [m]	ICB	EPS	XPS
0.01	8.72	8.63	8.75
0.02	9.00	8.87	8.98
0.03	9.05	8.84	8.94
0.04	9.05	8.71	8.84
0.05	9.05	8.55	8.72
0.06	9.06	8.38	8.59
0.07	9.09	8.20	8.46
0.08	9.16	8.03	8.34
0.09	9.26	7.85	8.24
0.1	9.39	7.68	8.14
0.11	9.53	7.51	8.06
0.12	9.70	7.36	8.00
0.13	9.89	7.21	7.95
0.14	10.09	7.05	7.91
0.15	10.30	6.91	7.88
0.16	10.49	6.77	7.85
0.17	10.65	6.61	7.82
0.18	10.75	6.39	7.73
0.19	10.98	5.98	7.43

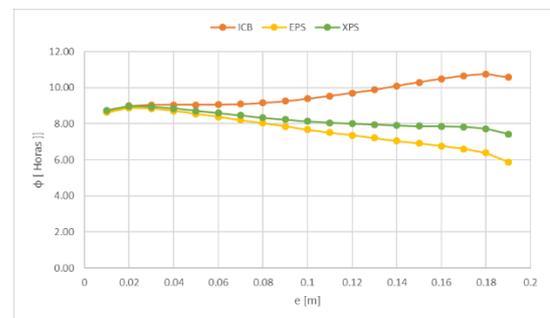


Figura G.2 – Resultados do atraso térmico pelo programa analítico quando isolamento é colocado no meio.

G2. Isolamento colocado no meio e no exterior da solução construtiva

U [W/(m².K)]			
e [m]	ICB	EPS	XPS
0.01	1.76	1.82	1.69
0.02	1.21	1.27	1.15
0.03	0.93	0.98	0.87
0.04	0.75	0.79	0.70
0.05	0.63	0.67	0.59
0.06	0.54	0.58	0.50
0.07	0.48	0.51	0.44
0.08	0.42	0.45	0.39
0.09	0.38	0.41	0.35
0.1	0.35	0.37	0.32
0.11	0.32	0.34	0.30
0.12	0.30	0.32	0.27
0.13	0.27	0.29	0.25
0.14	0.26	0.28	0.24
0.15	0.24	0.25	0.22
0.16	0.23	0.24	0.21
0.17	0.21	0.23	0.20
0.18	0.20	0.22	0.19
0.19	0.19	0.21	0.18

φ [Horas]			
e [m]	ICB	EPS	XPS
0.01	8.06	7.91	8.18
0.02	8.96	8.78	9.05
0.03	9.36	9.14	9.39
0.04	9.54	9.26	9.51
0.05	9.62	9.27	9.51
0.06	9.65	9.20	9.45
0.07	9.64	9.09	9.36
0.08	9.62	8.93	9.23
0.09	9.59	8.75	9.08
0.1	9.54	8.54	8.91
0.11	9.49	8.30	8.71
0.12	9.43	8.03	8.49
0.13	9.35	7.73	8.25
0.14	9.25	7.38	7.98
0.15	9.13	6.99	7.67
0.16	8.96	6.53	7.30
0.17	8.74	5.96	6.84
0.18	8.40	5.16	6.21
0.19	7.81	3.80	5.13

f [-]			
e [m]	ICB	EPS	XPS
0.01	0.303	0.316	0.291
0.02	0.213	0.226	0.201
0.03	0.169	0.182	0.159
0.04	0.146	0.158	0.137
0.05	0.132	0.145	0.125
0.06	0.125	0.137	0.118
0.07	0.121	0.135	0.115
0.08	0.121	0.135	0.116
0.09	0.123	0.139	0.118
0.1	0.127	0.145	0.123
0.11	0.133	0.154	0.131
0.12	0.142	0.167	0.142
0.13	0.154	0.184	0.156
0.14	0.169	0.208	0.175
0.15	0.190	0.240	0.202
0.16	0.217	0.287	0.239
0.17	0.256	0.358	0.297
0.18	0.315	0.478	0.393
0.19	0.412	0.700	0.580

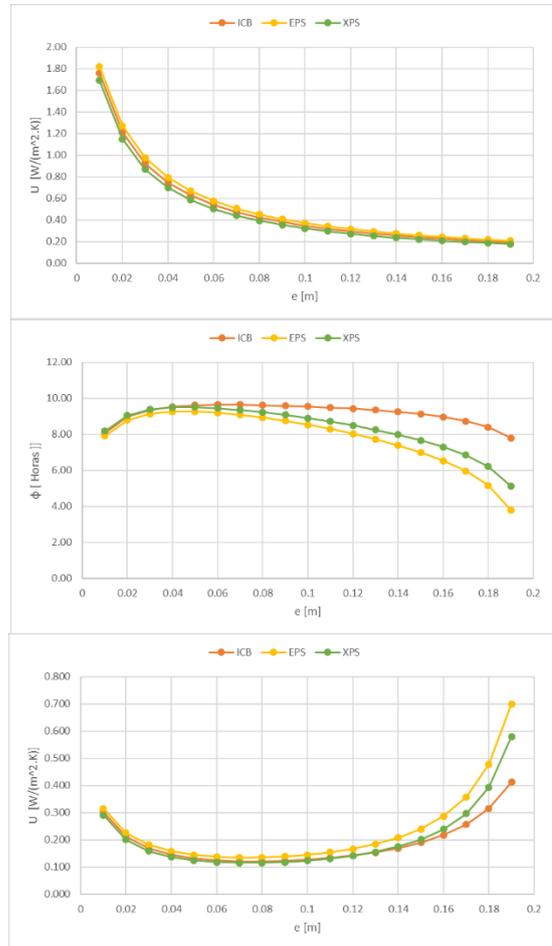


Figura G.3 – Resultados quando isolamento é colocado no meio e no exterior.

φ [Horas]			
e [m]	ICB	EPS	XPS
0.01	9.46	9.30	9.59
0.02	10.48	10.30	10.58
0.03	10.96	10.75	10.99
0.04	11.21	10.96	11.19
0.05	11.38	11.05	11.29
0.06	11.51	11.09	11.33
0.07	11.63	11.10	11.36
0.08	11.74	11.07	11.37
0.09	11.85	11.05	11.38
0.1	11.96	11.00	11.37
0.11	12.09	10.96	11.37
0.12	12.22	10.89	11.36
0.13	12.35	10.82	11.33
0.14	12.48	10.71	11.30
0.15	12.59	10.57	11.24
0.16	12.64	10.35	11.13
0.17	12.62	10.01	10.91
0.18	12.39	9.36	10.43
0.19	11.66	7.96	9.29

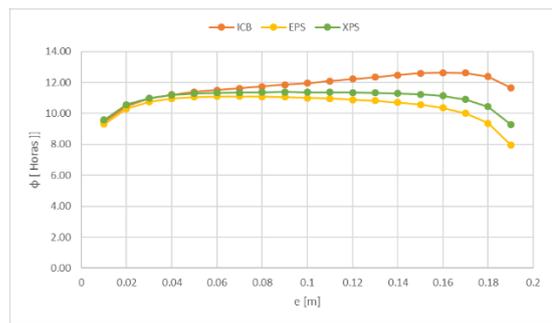


Figura G.4 – Resultados do atraso térmico pelo programa analítico quando isolamento é colocado no meio e no exterior.

G3. Isolamento colocado no meio e no interior da solução construtiva

U [W/(m².K)]			
e [m]	ICB	EPS	XPS
0.01	1.76	1.82	1.69
0.02	1.21	1.27	1.15
0.03	0.93	0.98	0.87
0.04	0.75	0.79	0.70
0.05	0.63	0.67	0.59
0.06	0.54	0.59	0.50
0.07	0.48	0.51	0.44
0.08	0.42	0.45	0.39
0.09	0.38	0.41	0.35
0.1	0.35	0.37	0.32
0.11	0.32	0.34	0.30
0.12	0.30	0.32	0.27
0.13	0.27	0.29	0.25
0.14	0.26	0.28	0.24
0.15	0.24	0.26	0.22
0.16	0.23	0.24	0.21
0.17	0.21	0.23	0.20
0.18	0.20	0.22	0.19
0.19	0.19	0.21	0.18

φ [Horas]			
e [m]	ICB	EPS	XPS
0.01	7.21	7.09	7.29
0.02	7.91	7.65	7.86
0.03	8.05	7.85	8.05
0.04	8.14	7.97	8.07
0.05	8.16	7.91	8.02
0.06	8.15	7.70	7.92
0.07	8.13	7.55	7.80
0.08	8.10	7.39	7.67
0.09	8.08	7.21	7.53
0.1	8.07	7.03	7.38
0.11	8.06	6.84	7.24
0.12	8.07	6.64	7.09
0.13	8.08	6.43	6.95
0.14	8.10	6.21	6.79
0.15	8.12	5.96	6.63
0.16	8.12	5.67	6.43
0.17	8.09	5.29	6.17
0.18	7.95	4.70	5.75
0.19	7.58	3.56	4.89

f [-]			
e [m]	ICB	EPS	XPS
0.01	0.382	0.384	0.370
0.02	0.290	0.305	0.277
0.03	0.239	0.255	0.227
0.04	0.209	0.225	0.198
0.05	0.190	0.206	0.180
0.06	0.178	0.194	0.169
0.07	0.170	0.187	0.162
0.08	0.166	0.184	0.159
0.09	0.164	0.184	0.158
0.1	0.165	0.185	0.160
0.11	0.168	0.182	0.165
0.12	0.173	0.202	0.172
0.13	0.181	0.215	0.183
0.14	0.193	0.234	0.198
0.15	0.209	0.263	0.221
0.16	0.232	0.305	0.255
0.17	0.267	0.371	0.308
0.18	0.322	0.487	0.401
0.19	0.415	0.704	0.583

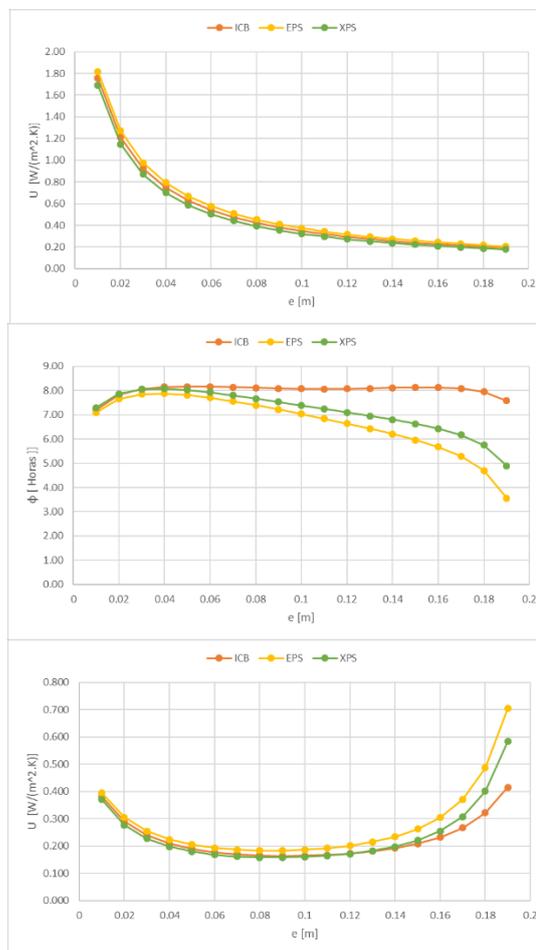


Figura G.5 – Resultados quando isolamento é colocado no meio e no interior.

φ [Horas]			
e [m]	ICB	EPS	XPS
0.01	8.11	8.00	8.17
0.02	8.55	8.39	8.55
0.03	8.72	8.47	8.64
0.04	8.79	8.44	8.61
0.05	8.85	8.34	8.55
0.06	8.89	8.21	8.46
0.07	8.96	8.07	8.37
0.08	9.05	7.93	8.29
0.09	9.15	7.78	8.20
0.1	9.27	7.63	8.12
0.11	9.41	7.48	8.05
0.12	9.57	7.32	7.99
0.13	9.74	7.18	7.95
0.14	9.91	7.03	7.90
0.15	10.30	6.88	7.85
0.16	10.22	6.71	7.80
0.17	10.32	6.49	7.71
0.18	10.35	6.15	7.54
0.19	10.15	5.43	7.08

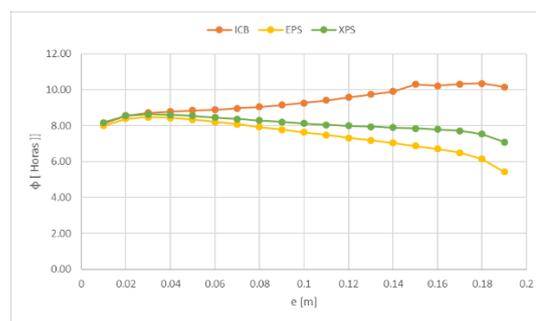


Figura G.6 – Resultados do atraso térmico pelo programa analítico quando isolamento é colocado no meio e no interior.