



• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo de Envolventes Térmicas de Câmaras de Refrigeração – Oportunidades de Melhoria

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

Autor

Marlene Coimbra de Melo

Orientadores

Engenheiro Francisco José Craveiro Bispo Pocinho Lamas

Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar

Júri

Presidente Professor Doutor José Baranda Ribeiro
Professor da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Avelino Virgílio Oliveira
Professor do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar
Professor da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



Coimbra, Setembro, 2014

“Success is 1% inspiration, 98% perspiration and 2% attention to detail.”

Phil Dunphy [Phil’s-osophy]

Aos meus pais e aos meus avós.

Agradecimentos

A elaboração desta dissertação é sem dúvida um passo final no meu projecto académico, no entanto, sei que serei Estudante de Coimbra para Sempre. Ao longo destes anos, são guardadas bastantes memórias com carinho e cada dia, foi uma nova lição.

Antes de mais, agradeço ao Departamento de Engenharia Mecânica e à Universidade de Coimbra que me acolheu tão bem e a todos os que me ensinaram nestes longos anos. Quero expressar uma enorme homenagem aos meus orientadores Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar e Engenheiro Francisco José Craveiro Bispo Pocinho Lamas por toda a assistência e colaboração oferecida nesta dissertação, uma prova de paciência e ensinamento, tendo sido o maior prazer ao elaborar com dois profissionais que tanto admiro e, pela determinação e crédito que depositaram em mim.

Esta dissertação teve a participação do Projecto Inovenergy – Eficiência no sector agro-industrial, COMPETE/SIAC/2011 e, quero agradecer por todo o apoio prestado pela equipa deste projecto, tal como a confiança que me tomaram na realização do mesmo. Um especial agradecimento ao Sr. Fernando Pereira da empresa visitada e onde recolheu-se o material de estudo e que se mostrou incansavelmente prestável.

A todos os meus colegas de laboratório, no qual tive o maior prazer de conviver, ao Bruno Cardoso, ao Nuno Correia, ao Victor Ferreira, ao Nélson e Gonçalo Brites pela prestável ajuda que sempre me deram, ao meu companheiro de tese João Beltrão pelo incentivo de cumprir esta etapa e, à Joana Ester pela prontidão de ajuda e companheirismo que me transmitiu ao longo dos anos.

Um enorme agradecimento aos meus pais, Fernando e Graça que foram incansavelmente os meus pilares desta formação, aos meus avós pelo apoio forte que sempre me acarinharam e ao meu irmão Filipe.

A todos os meus amigos que fiz ao longo deste percurso e aos que trouxe no coração e, a todos os meus familiares que acreditaram em mim.

Ao Hugo, o meu braço direito.

A todos, um enorme, profundo Obrigado.

Resumo

Nos edifícios industriais de refrigeração, a preocupação com a eficiência energética é cada vez mais importante, de modo a manter os seus produtos num nível adequado para chegar em qualidade ao consumidor. Uma construção apropriada pode ser crucial na condição final quer em termos energéticos, quer em termos económicos. A análise térmica é também importante para perceber a evolução da temperatura nos elementos construtivos e assim conhecer o estado físico da sua estrutura e as suas condições de armazenamento. Outros factores, como a localização do espaço, dimensões das câmaras de refrigeração, metodologia de trabalho, tipo de produto armazenados, são condicionantes decisivos na eficiência energética deste tipo de estrutura.

Neste sentido, este estudo foca-se nas características da envolvente das câmaras de refrigeração, onde se estudaram as soluções construtivas, nomeadamente ao nível das pontes térmicas lineares e das infiltrações ou danificações correntes nos elementos de construção de um determinado edifício industrial de refrigeração.

A temperatura interior de um espaço refrigerado terá sempre valores muito mais baixos de temperatura que o espaço exterior envolvente, assim, as cargas térmicas por condução nas fachadas do edifício de refrigeração e os ganhos de calor pelas envolventes são os principais pontos analisados. Estes parâmetros são factores importantes face aos consumos energéticos e custos de manutenção da indústria de refrigeração e para os analisar pormenorizadamente, foi usado, como ferramenta de cálculo dos coeficientes e resistências térmicas das envolventes, o programa *THERM*.

Nesta dissertação é apresentado um caso de estudo de um edifício de conservação de peixe onde se pretendeu encontrar uma solução de poupança eficiente, aplicando alternativas de execução e de novos melhoramentos possíveis.

Por fim, são apresentadas novas propostas de trabalhos futuros no âmbito da indústria de refrigeração.

Palavras-chave: Envolventes, câmaras frigoríficas, eficiência energética, Refrigeração Industrial, Pontes térmicas, *THERM*.

Abstract

In refrigeration buildings, the concern for energy efficiency is increasingly important to preserve their products to reach appropriate quality to the consumer. A suitable building can be crucial in the final condition in terms of energy and in economic terms. Thermal analysis is important to understand the evolution of the temperature in the building elements and also know the condition of the structure and its storage conditions. Other factors such as the location of the space, size of cooling chambers, working methodology, type of product stored, are key determinants in the energy efficiency of this type of structure. So, this study focuses on the characteristics of the envelope cooling chambers, where it studies the constructive solutions, particularly in terms of thermal bridges, the current leaks or damage to building elements, being the main theme in this work.

The inside temperature of a refrigerated space will always have much lower temperature values than the surrounding outer space, so the thermal conduction in the frontage of the building cooling loads and heat gains by engaging are the main points analyzed. These parameters are important factors compared to energy consumption and maintenance costs of the refrigeration industry and THERM was the program used for calculating the thermal coefficients of several possible solutions tool.

In this dissertation, is presented a case study of a building conservation of fish, and it was intended to find a suitable solution, applying alternatives to compare to the possible further improvements.

Finally, it will be presented new proposals for future work about the refrigeration industry.

Keywords Envelope, Refrigeration Stores, Energy Efficiency, Industrial Refrigeration, Thermal Bridges, THERM.

Índice

Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas.....	xii
Simbologia e Siglas.....	xv
Simbologia	xv
Siglas	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento e Motivação	2
1.2. Objectivos.....	3
1.3. Estrutura da dissertação	4
2. Envolvente térmica de câmaras de refrigeração.....	5
2.1. Envolvente e configuração das câmaras de conservação	5
2.1.1. Transferência de energia	8
2.1.2. Desvão ventilado	10
2.2. Caracterização dos sistemas de refrigeração	11
2.3. Pontes térmicas	12
2.4. Análise por termografia	13
3. Análise da norma iso 10211:2007 e aplicação ao therm.....	15
3.1. Elaboração do modelo a aplicar no <i>THERM</i>	16
3.1.1. Modelos de planos de corte	16
3.1.2. Planos de corte no solo	17
3.1.3. Método de cálculo - <i>THERM</i>	18
3.2. Programa THERM.....	28
3.3. Exemplos de cálculo de pontes térmicas lineares.....	32
3.3.1. Paredes – Ligação entre fachada e pavimento sobre espaço não útil.....	32
3.4. Ligação entre fachada e pavimento em contacto com o solo	35
3.4.1. Ligação de fachada com laje sobre piso térreo	35
3.4.2. Ligação de fachada com piso suspenso	38
3.4.3. Desvão aquecido	39
3.4.4. Desvão não aquecido.....	42
4. Aplicação ao Caso de estudo.....	45
4.1. Análise termográfica das fachadas	45
4.2. Ganhos térmicos pelo pavimento	47
4.2.1. Soluções de melhoria	49
4.3. Ganhos térmicos pela cobertura	53
4.4. Cargas térmicas da envolvente	55
5. Conclusão.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
ANEXO A.....	66

ANEXO B	71
ANEXO C	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Relação entre Volumetria média e Consumo Específico Anual (Ferreira <i>et al</i> ,2014)	6
Figura 2 – Planta do piso inferior da empresa de peixe do caso de estudo	8
Figura 3-Desenho descritivo da entrada de uma câmara frigorífica (IRH,2004)	9
Figura 4 - Figura demonstrativa de um tipo de desvão ventilado com ductos de aquecimento (IRH, 2004).....	11
Figura 5 – Figura descritiva do efeito do PSI sobre uma fachada em contacto com o terreno	13
Figura 6 - Modelo do plano de corte à distância d_{min} da ponte térmica (norma 10211:2007)	17
Figura 7 - Planos de corte e suas dimensões que incluem o solo (norma 10211:2007).....	17
Figura 8 - Ligação entre duas envolventes, Tint < Text.....	19
Figura 9 - Ligação em contacto com o pavimento (norma Iso 10211:2007)	20
Figura 10 - Ligações térmicas num piso suspenso (imagem adaptada norma 10211:2007).....	22
Figura 11 - Botão de comandos do <i>THERM</i>	28
Figura 12 - Figura com exemplo demonstrativo e características.....	28
Figura 13 - Interface das definições do material (imagem à esquerda) e definições de fronteira (imagem à direita) do programa <i>THERM</i>	29
Figura 14 - Modelo Obtido no Programa <i>THERM</i>	30
Figura 15 - Definição do <i>U-factor</i>	30
Figura 16 - Cálculo das linhas isotérmicas no <i>THERM</i>	30
Figura 17 – Cálculo do coeficiente de Transmissão de Calor	31
Figura 18 - Exemplo 1 e condições de Fronteira	33
Figura 19 - Solução construtiva tipo com isolamento interior à esquerda e isolamento exterior à direita	35
Figura 20 - Solução tipo do exemplo 2.1	38
Figura 21 - Solução tipo do exemplo 3.1	40
Figura 22 – Solução tipo do exemplo 4.1.....	42
Figura 23 - Gráfico representativo dos vários modelos e respectivos valores de PSI	44
Figura 24 - Fotografia digital e termográfica da fachada.....	45

Figura 25 - Fotografia digital e termográfica da fachada	46
Figura 26 - Fotografia digital e termográfica do espaço interior junto a uma porta de entrada	46
Figura 27 – Fotografias Termográficas no interior da câmara frigorífica.....	47
Figura 28 - Modelo demonstrativo da fachada em estudo na Figura à esquerda e a sua representação no <i>THERM</i> na Figura à direita – Solução inicial.....	48
Figura 29 – Figura demonstrativa da solução final e seus valores	55
Figura 30 - Gráfico de cargas térmicas totais da fachada exterior ao longo de um ano.....	56
Figura 31 - Gráfico com os valores de horários de carga térmica do desvão no período de um ano (solução inicial e solução final).....	57
Figura 32 - Gráfico da desagregação das Cargas Térmicas da envolvente no período de um ano	58
Figura 33 - Gráfico representativo das Cargas Iniciais e Finais para várias localidades ao longo de um ano para a mesma envolvente.....	60
Figura 34 - Figura demonstrativa da fachada exterior do edifício do caso de estudo e exemplo da câmara termográfica usada na amostragem	73

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela das Resistências Superficiais em relação ao fluxo de calor	29
Tabela 2 - Tabela dos coeficientes térmicos dos elementos dos exemplos segundo <i>ITE 50</i> (2006)	33
Tabela 3 - Tabela com os valores calculados para ligações entre fachada e espaço não útil	33
Tabela 4 - Tabela dos coeficientes térmicos dos elementos da solução 1.1 e 1.2, segundo <i>ITE 50</i> (2006)	36
Tabela 5 - Tabela com os valores calculados para ligações de piso térreo	36
Tabela 6 - Tabela com os valores calculados para ligações de piso térreo com isolamento na fachada do pavimento	37
Tabela 7 - Tabela com os valores calculados para ligações de piso suspenso	39
Tabela 8 – Tabela com os valores calculados para ligações de piso do desvão aquecido ..	40
Tabela 9 – Tabela com os valores calculados para ligações de desvão aquecido com isolamento na fachada do pavimento	41
Tabela 10 - Tabela com valores calculados de desvão não aquecido	42
Tabela 11 - Tabela com os valores do PSI comparativos face à norma ISO 10211:2007 [W/m.°C]	43
Tabela 12 - Tabela com os valores de condutibilidade térmica do modelo, segundo <i>ITE 50</i> (2006)	48
Tabela 13 - Tabela com os valores calculados para a solução inicial	49
Tabela 14 - Tabela das soluções e resultados para diferentes posições de isolamento e espessura	50
Tabela 15 - Tabela com novos valores de espessura da solução 4	52
Tabela 16 - Tabela das soluções e resultados para o modelo com abertura de Desvão	52
Tabela 17 - Tabela das soluções e resultados para o modelo adaptado “Laje sobre Piso Térreo”	53
Tabela 18 - Tabela de valores da Solução inicial e final de ganhos térmicos pela cobertura	54
Tabela 19 – Tabela de facturação anual para a envolvente de estudo da solução inicial e da solução final	59
Tabela 20 - Excel de cálculo dos valores das soluções construtivas para uma fachada e pavimento sobre espaço não útil	66

Tabela 21 - Excel de cálculo dos valores das soluções construtivas para uma fachada e pavimento em contacto com o terreno	67
Tabela 22 - Tabela demonstrativa dos modelos dos exemplos	71
Tabela 23 - Tabela com os valores de PSI nos vários modelos de pavimento com terreno [W/m.°C]	73
Tabela 24 - Tabela de Referência para a obtenção das Temperaturas exteriores ao longo de um ano nas diversas localidades.....	74
Tabela 25 - Tabela de cálculo da carga térmica da envolvente de estudo com pontes térmicas lineares e seus custos ao longo de 24h.....	75

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A	Área do pavimento	m^2
A_k	Área do elemento do modelo	m^2
A_{par}	Área da parede homogénea	m^2
B'	Dimensão característica do solo	m
B	Comprimento para o cálculo da ponte térmica	m
b	Largura do Modelo	m
cp	Capacidade de calor específico do ar a pressão constante, de acordo com a norma EN ISO 13370:2007 = 1000J/kg	$J/kg.^{\circ}C$
c	Comprimento do Modelo	m
d_g	Espessura total equivalente do pavimento inferior	m
d_{min}	Dimensão mínima da envolvente do modelo	m
d'	Espessura equivalente do isolamento	m
d_n	Espessura do isolamento	m
d_t	Espessura total equivalente do pavimento superior	m
d_w	Espessura equivalente total da laje	m
e	Espessura do elemento construtivo	m
fw	Factor de protecção do vento	
h	Altura entre o nível do solo e a laje do pavimento	m
h_f	Comprimento do pavimento do modelo	m
h_w	Comprimento da parede vertical do modelo	m
H_{se}	Inverso da Resistência Superficial externa	$W/m^2.^{\circ}C$
H_{si}	Inverso da Resistência Superficial interna	$W/m^2.^{\circ}C$
l	Comprimento do modelo	m
l_k	Comprimento unitário	m

L_{ie}	Coefficiente de transmissão térmica global entre o espaço interior e o exterior	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
L_{iu}	Coefficiente de transmissão térmica global entre o espaço interior e o espaço suspenso	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
L_{ue}	Coefficiente de transmissão térmica global entre o espaço suspenso e o exterior	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
$L_{ue,c}$	Coefficiente de transmissão térmico global de condução de calor através as paredes do espaço suspenso e do solo	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
$L_{ue,v}$	Coefficiente de transferência de calor entre as trocas de ar entre o espaço suspenso e o espaço exterior	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
L_{2D}	Coefficiente de transmissão térmica global	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
L_{ij}^{2D}	Coefficiente de transmissão térmica global entre dois ambientes	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
n	Taxa de ventilação do desvão	h^{-1}
N_k	Número de elementos	
P	Perímetro exposto do pavimento	m
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor	W
Q_{Ti}	Carga Térmica da solução inicial	W
Q_{par}	Carga Térmica transmitida pela parede homogénea	W
Q_{Tf}	Carga Térmica da solução final	W
Q_{pt}	Carga Térmica transmitida pelas pontes térmicas lineares	W
Q_{desv}	Carga térmica transmitida pelo desvão	W
$Q_{desv,si}$	Carga Térmica transmitida pelo desvão na solução inicial	W
$Q_{desv,sf}$	Carga Térmica transmitida pelo desvão na solução final	W
R'	Resistência térmica equivalente do isolamento	$m^2 \cdot ^\circ C/W$
R_f	Resistência Térmica da Laje do Pavimento	$m^2 \cdot ^\circ C/W$
R_g	Resistência Térmica do pavimento inferior	$m^2 \cdot ^\circ C/W$
R_n	Resistência Térmica do isolamento	$m^2 \cdot ^\circ C/W$
R_{si}	Resistência Superficial interna	$m^2 C/W$
R_{se}	Resistência Superficial Externa	$m^2 \cdot ^\circ C/W$
R_t	Resistência Térmica Total	$m^2 \cdot ^\circ C/W$
R_w	Resistência Térmica da parede vertical	$m^2 \cdot ^\circ C/W$

T_{ext}	Temperatura exterior	$^{\circ}C$
T_{int}	Temperatura interior	$^{\circ}C$
U	Coefficiente de transmissão térmica	$W/m^2.^{\circ}C$
U_{bf}	Coefficiente de transmissão térmica da laje do pavimento	$W/m^2.^{\circ}C$
U_{bw}	Coefficiente de transmissão térmica da parede vertical	$W/m^2.^{\circ}C$
U_f	Coefficiente de transmissão térmica do pavimento, entre o espaço interior e o espaço do desvão	$W/m^2.^{\circ}C$
U_{factor}	Coefficiente de transmissão térmica obtido no programa <i>THERM</i>	$W/m^2.^{\circ}C$
U_g	Coefficiente de de transmissão térmica do fluxo de calor através do solo	$W/m^2.^{\circ}C$
U_k	Coefficiente de transmissão térmica do modelo	$W/m^2.^{\circ}C$
U_{par}	Coefficiente de transmissão térmica da parede homogénea	$W/m^2.^{\circ}C$
U_w	Coefficiente de transmissão térmica da parede vertical acima do espaço sobre o pavimento	W/m^2C
U_x	Coefficiente de transmissão térmica entre o espaço suspenso e o exterior de acordo	$W/m^2.^{\circ}C$
W	Espessura da laje de pavimento	m
v	Velocidade média do vento a 10m de altura	m/s
V'	Caudal do volume do ar	m^3/s
V	Volume de ar do desvão	m^3
z	Profundidade desde o nível do solo e a laje inferior - m	m
$\Delta\theta$	Diferencial de temperatura entre o espaço exterior e interior	$^{\circ}C$
ε	Área de ventilação aberta por perímetro de comprimento do desvão	m^2/m
θ_{ext}	Temperatura do espaço exterior	$^{\circ}C$
θ_{int}	Temperatura do espaço interior	$^{\circ}C$
θ_{us}	Temperatura do desvão	$^{\circ}C$
θ_g	Temperatura do solo à superfície	$^{\circ}C$
λ	Condutibilidade Térmica	$W/m.^{\circ}C$
ρ	Densidade do ar (EN ISO 13370:2007) =1,23 kg/m ³	kg/m^3
ϕ	Fluxo de calor	W

$\phi_{i,j}$	Fluxo de calor entre dois ambientes	W
ψ	Coeficiente de transmissão Térmica linear	W/m.°C
$\psi_{g,e}$	Coeficiente de transmissão térmica linear para isolamentos em contacto com o terreno	W/m.°C

Siglas

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

IRH – Industrial Refrigeration Handbook

ISO - International Organization for Standardization

ITE – Informação Técnica dos edifícios

PUR – Espuma Rígida de Poliuretano

PSI – Coeficiente de transmissão térmica linear (Ψ)

THERM - Programa de cálculo e modelação para transferências de calor

XPS – Poliestireno Extruído

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a indústria de frio tem vindo cada vez mais a ganhar influência, tentando responder à elevada procura mundial, dada à crescente exigência de qualidade dos produtos e variedade (*Eurostat,2010*). No mercado global, cada vez mais, existe a procura da melhor qualidade ao melhor preço e para isso, o produto antes de chegar ao consumidor passa por diversos sectores. Nesta dissertação aborda-se o sector da refrigeração e os edifícios industriais que nele operam, inclusive as suas câmaras.

A refrigeração representa um consumo de energia significativo nas indústrias de frio podendo atingir os 90%, existe no entanto um conjunto de alternativas que podem conduzir a uma poupança de energia significativa até 20% de redução. Na maioria dos casos estas reduções são efectuadas através de investimentos e que representam tipicamente um período de retorno do investimento aceitável (Sá e Alexandre, 2007).

Em Portugal, as principais indústrias agro-alimentares podem agrupar-se nas fileiras da carne, do peixe, dos lacticínios, das hortofrutícola e da distribuição. Cada um destes sectores tem necessidades de refrigeração diferenciadas, ou seja, as temperaturas das câmaras e o seu processo de armazenamento dependem do produto conservado (*IRH,2004*). As câmaras de refrigeração devem proporcionar condições eficazes de modo a minimizar os riscos de saúde para o consumidor.

Além das normas e legislação estipuladas para o armazenamento dos alimentos, existem também regras de boas práticas que qualquer individuo deve ter em atenção, relacionadas com sua a conservação (denominadas de medidas preventivas), que consiste em preservar a qualidade do produto no maior período possível e evitar as más práticas de higiene na sua manipulação. O sector de Higiene e Segurança Alimentares tem vindo a ser cada vez mais exigente nas indústrias de refrigeração e em todas as restantes indústrias que operam directa ou indirectamente com a comercialização dos produtos refrigerados. A Legislação Europeia torna assim os operadores alimentares os principais responsáveis pela Higiene e Segurança dos Alimentos. Estes são, igualmente, responsáveis por definir e aplicar os meios para evitar a ocorrência de problemas de saúde pública relacionados com a segurança dos alimentos (Enformar, 2009). Além disso, alimentos e

outros produtos degradados, pós refrigerados que não são comercializados, traduzem em elevadas perdas económicas às empresas industriais.

Por conseguinte, a concepção e a manutenção da estrutura física dos edifícios industriais de refrigeração é um dos factores principais na segurança alimentar (Baptista *et al.*, 2007). A manutenção da temperatura das câmaras é importante na refrigeração ou na congelação dos produtos e a estrutura das câmaras frigoríficas e sua instalação são cruciais neste parâmetro.

Assim, neste trabalho estudam-se as características das envolventes térmicas deste tipo de edifício e analisam-se os pormenores construtivos das fachadas de câmaras frigoríficas para averiguar as anomalias ou deficiências mais comuns. Posteriormente, efectuam-se estudos para identificação de soluções de melhoria de modo a beneficiar a empresa e, conseqüentemente, o produto armazenado. O estudo das envolventes nos edifícios industriais de refrigeração tem como intuito: quantificar os ganhos térmicos através dos elementos construtivos nas ligações dos elementos e quantificar os ganhos térmicos pelo pavimento; determinar a distribuição de temperaturas de forma a analisar o seu comportamento térmico através do programa *THERM*; e encontrar medidas de melhoria nos pormenores construtivos de modo a reduzir os ganhos térmicos e evitar o risco de formação de gelo. Devem ser analisadas todas as condições de modo a encontrar uma solução eficaz, pois a espessura, o tipo de isolamento e até mesmo a posição irão fazer variar o modelo de solução de melhoria.

A inércia térmica é também um factor relevante na refrigeração dos edifícios de serviços, pois determina a capacidade que um determinado elemento absorve o calor do exterior ou o frio do interior com maior ou menor facilidade. Esta característica permite que haja um desfasamento temporal nos picos de temperatura e um amortecimento na onda de frio, contribuindo para uma redução significativa nos custos de refrigeração aos produtos congelados (Baptista *et al.*, 2007).

1.1. Enquadramento e Motivação

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito do projecto *InovEnergy* – eficiência energética no sector agro – alimentar, financiado pelo COMPETE/SIAC – AAC1/SIAC/2011. Teve como propósito a caracterização de sistemas de refrigeração na

indústria agro-industrial, realizando auditorias a empresas de vários sectores de modo a monitorizar os seus consumos energéticos, fazer levantamentos das características das câmaras frigoríficas e o tipo de produto armazenado, levando à minimização de medidas de risco e quantificação das medidas de eficiência energética. Assim, durante estas auditorias foram também recolhidos dados relativamente às envolventes das empresas e à sua estrutura física, para o estudo posterior nesta dissertação.

Actualmente, o frio constitui o único meio de preservação de alimentos no seu estado natural, e os seus sistemas de refrigeração têm vindo a evoluir adaptando-se às necessidades do consumidor, usando cada vez mais tecnologias avançadas. No entanto, os sistemas de refrigeração nunca serão eficazes se a estrutura e as envolventes térmicas não corresponderem. As câmaras frigoríficas, incluídas nos edifícios, requerem uma elevada manutenção, quer nas instalações, quer nos equipamentos que operam. Por vezes, essa manutenção chega a ter custos demasiado elevados e é necessário haver uma análise prévia de forma a encontrar a solução adequada, eficaz e com menos custos (Chagas, 2013).

Neste sector de frio, o estudo das soluções construtivas, tal como o cálculo das cargas térmicas e ganhos térmicos nas câmaras frigoríficas através das envolventes ainda é pouco abordado, não existindo normas ou cálculos específicos para esta situação. Além das exigências económicas e energéticas, e matéria-prima, nas empresas do sector de refrigeração existe uma crescente preocupação a nível ambiental e na redução da poluição, seja emissão de gases poluentes, seja a escolha adequada no sistema de refrigeração (fluidos frigoríficos, combustível, etc).

Assim, o estudo deste trabalho incide-se na poupança energética a aplicar neste tipo de edifícios de refrigeração, particularmente nas envolventes exteriores das câmaras de refrigeração.

1.2. Objectivos

Esta dissertação tem como intuito encontrar soluções que respondam às necessidades das câmaras frigoríficas, abrangendo todos os tipos de sector. É nesta tentativa de colmatar a informação existente, que este trabalho se foca particularmente no estudo de melhorias ou soluções ideais para as fachadas de edifícios industriais de refrigeração.

Através das auditorias e inquéritos efectuados, foi possível recolher informação bastante satisfatória acerca dos edifícios de serviços de vários sectores, no entanto, neste trabalho apenas é estudado um dos edifícios de refrigeração no sector de conservação de peixe, localizado numa zona costeira, Figueira da Foz. Pretende-se analisar as fachadas mais deterioradas e propor soluções de melhoria neste edifício industrial.

Assim, no decurso de um caso de estudo de um edifício industrial de refrigeração ambiciona-se criar uma base de hipótese para determinadas fachadas do sector agro-alimentar, apresentando poupanças expectáveis dependendo das suas soluções construtivas e outros factores térmicos. Tenciona-se também, calcular os valores das cargas térmicas da fachada das envolventes e comparar com a solução final de melhoria para que desta forma, seja perceptível o impacto das pontes térmicas lineares nas câmaras frigoríficas, quer na zona localizada do caso de estudo, quer noutras zonas do país.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta por 5 capítulos, dividida entre eles em subcapítulos, de acordo com o tema de estudo.

O primeiro capítulo é iniciado pela introdução e enquadramento do tema escolhido e apresentação dos objectivos.

No segundo capítulo estudam-se as envolventes térmicas em câmaras de refrigeração, com apresentação de exemplos e tipos de construção.

As pontes térmicas e o programa *THERM* utilizado na modelação são tratados no terceiro capítulo, com a análise do programa e aplicação em exemplos de estudo com diferentes soluções construtivas.

Desta forma, conhecendo todos os métodos de cálculo existentes para o tipo de modelo em questão, o capítulo 4 aborda o caso de estudo com apresentação de exemplos de melhorias de construção que se podem implementar neste tipo de instalação de refrigeração e os cálculos de cargas térmicas nas envolventes estudadas.

Por último, no capítulo 5 apresentam-se as conclusões finais desta dissertação e novas propostas futuras de trabalho.

2. ENVOLVENTE TÉRMICA DE CÂMARAS DE REFRIGERAÇÃO

Uma construção apropriada das câmaras frigoríficas em edifícios de refrigeração é crucial na sua eficiência quer em termos energéticos, quer em termos económicos. Deste modo, as envolventes e sua estrutura devem ser previamente estudadas de modo a serem eficazes, tal como o impacto térmico do ambiente exterior sobre as câmaras de refrigeração.

2.1. Envolvente e configuração das câmaras de conservação

As câmaras frigoríficas são compartimentos fechados, refrigerados e isolados à temperatura exterior. No seu interior a temperatura e a humidade são adequadas para a conservação de produtos alimentares. O seu funcionamento é provido de unidades técnicas de refrigeração centralizada ou individual. Cada câmara frigorífica é projectada para um determinado objectivo, ou seja, para um determinado produto e para uma determinada função sobre o produto, onde a carga térmica a ser retirada pelo equipamento frigorífico e o período de tempo necessário são previamente calculados.

Existem dois tipos de câmaras: câmaras de refrigeração, onde os produtos se mantêm próximos dos 0°C e câmaras de congelados onde os produtos estão a temperaturas negativas, próximos de -18°C (ASHRAE,2006).

As paredes e o tecto das câmaras de conservação de congelados são feitos com painéis sandwich na maioria dos casos, com isolamento interior em Poliuretano Injectado (PUR) ou Poliestireno Expandido (XPS). Os painéis de tecto são suspensos com uma armação fixa e os das paredes ajustados às colunas de betão, aço ou de alvenaria. Todo o revestimento exterior do edificio deve estar preparado para resistir às más condições atmosféricas, tal como o revestimento interior das câmaras deve suportar as temperaturas internas extremas, com possíveis formações de gelo devido à condensação do ar mais quente que entra através dos acessos.

As câmaras de baixa temperatura (-20°C a -29°C) mantêm no seu interior as condições necessárias para a conservação de produtos congelados a longo prazo. As

câmaras frigoríficas de refrigeração com temperatura próximas de 0°C e humidade relativa elevadas são utilizadas para conservação de produtos frescos por breves períodos de tempo. As câmaras frigoríficas de temperatura entre -2°C e -3°C são mais utilizadas para câmaras de hortofrutícolas, para conservação por maiores períodos de tempo. Estas câmaras frigoríficas podem ainda estar sujeitas a temperaturas negativas para uma maior longevidade de conservação (ASHRAE,2006).

Na Figura 1 é possível verificar a distribuição das câmaras nos vários sectores em empresas de Portugal e respectivos consumos anuais de energia. A Figura apresenta ainda uma distribuição entre as câmaras de refrigeração ($T > 0^{\circ}\text{C}$, frio positivo) e as de congelados ($T < 0^{\circ}\text{C}$, frio negativo). Verifica-se que a fileira de carnes apresenta o maior consumo específico de energia anual, no entanto, as fileiras com maior percentagem de câmaras com frio negativo (sector de distribuição) são as que apresentam consumos anuais específicos menores. Assim, o consumo energético das câmaras não depende apenas da sua temperatura interior, mas também, com as suas dimensões volumétricas e a percentagem de produtos neles armazenados. Além disso, quanto maior a percentagem de câmaras frigoríficas de frio positivo, reflecte-se num aumento de consumo específico, que poderá ser explicado pelo aumento de taxa de infiltração, ou seja, no maior número de acessos/hora (Ferreira *et al*, 2014).

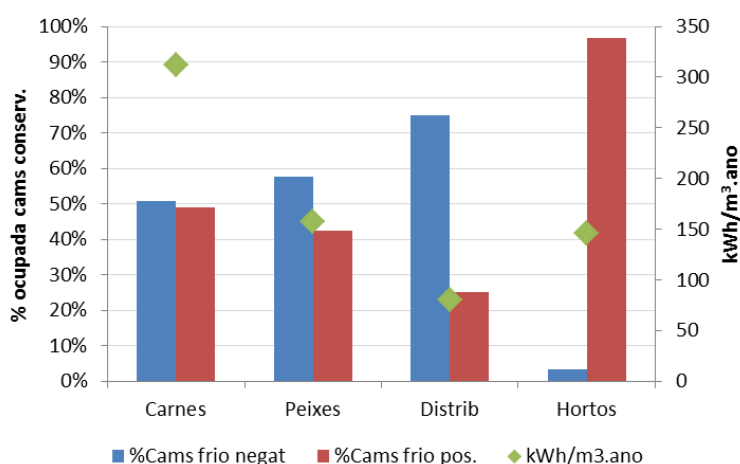


Figura 1- Relação entre Volumetria média e Consumo Específico Anual (Ferreira *et al*,2014)

Quanto à sua estrutura, as câmaras em alvenaria, utilização já pouco frequente verificado nas auditorias, são construídas sobre fundações convencionais, onde são

apoiadas por lajes de betão. As câmaras pré-moldadas, com o uso de painéis sandwich, são muito mais económicas e com um tempo de construção muito mais rápido que as câmaras em alvenaria. Têm também a vantagem de ser possível, rapidamente, colocar novas ampliações e construir câmaras de grandes dimensões (IRH,2004). Nas câmaras frigoríficas é comum serem construídas sobre um piso suspenso, criando-se um desvão ventilado. Este desvão minimiza o diferencial de temperatura entre a câmara, a superfície do terreno e o ambiente exterior.

Além do cuidado que é retratado nas envolventes, as portas também seguem determinadas características. São colocadas resistências eléctricas a fim de evitar a formação de placas de gelo que provocaria a derrapagem dos empilhadores e outros perigos para os operários, e são ainda equipadas com cortinas de ar ou cortinas de plástico laminares de modo a evitar a saída de ar frio/entrada de ar quente.

A abertura de portas deve ser minimizada e feita no menor tempo possível, pois implica perdas de ar “frio” e a entrada de ar “mais quente” exterior. Esta situação provoca uma perda de energia (aumento da carga de refrigeração) levando a maiores períodos de funcionamento do equipamento de refrigeração, formação de gelo junto ao solo, oscilações de temperatura levando assim à degradação dos produtos alimentares armazenados. As cortinas de plástico laminares ajudam à diminuição destas trocas de energia, contudo são normalmente consideradas não higiénicas por acumular bactérias nas suas lamelas e facilmente se degradarem. No entanto, são mais eficazes que as cortinas de ar e mais utilizadas nas entradas das câmaras de refrigeração e de congelação (IRH,2004).

Deste modo, as características construtivas das câmaras frigoríficas têm grande impacto na capacidade de refrigeração, havendo uma acção directa na redução do consumo de energia eléctrica da instalação. A eficiência do isolamento térmico nas paredes, pavimentos e pisos é dos principais factores a considerar aquando a instalação industrial, pois permite a redução de trocas térmicas indesejáveis e mantêm a temperatura interior, apresentando elevada resistência térmica. A Figura 2 representa a planta da instalação da fileira dos peixes, do caso de estudo, onde é possível verificar os vários compartimentos existentes. Além das câmaras, os edifícios de serviços e empresas de produção apresentam outras divisões necessárias na produção do alimento a armazenar, onde também, algumas dessas divisões são refrigeradas de modo manter a qualidade do produto.

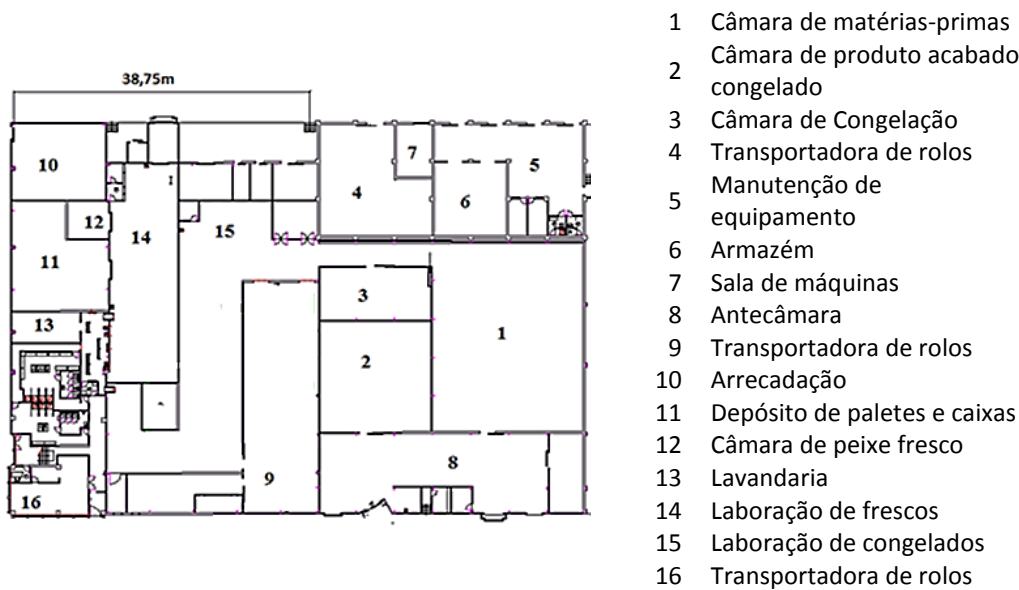


Figura 2 – Planta do piso inferior da empresa de peixe do caso de estudo

2.1.1. Transferência de energia

Para quantificar a transferência de energia nas câmaras, nomeadamente entre os elementos construtivos e o seu interior em relação ao exterior, é necessário conhecer a distribuição interna das temperaturas.

A transmissão de calor entre dois pontos ocorre sempre que se estabelece uma diferença de temperatura entre eles, havendo um fluxo de calor na direcção das temperaturas decrescentes, sendo definidas pelas leis da termodinâmica, ou seja, o fluxo de calor toma o sentido das temperaturas mais altas para as temperaturas mais baixas. No caso das envolventes de refrigeração o fluxo de calor direcciona-se do exterior para o interior da câmara (Anderson,2006). Os fenómenos de troca de calor são dependentes do tipo de materiais de construção e podem ser parametrizados pelo coeficiente de transmissão térmica U , [$W/m^2 \cdot ^\circ C$] e definido pelas suas resistências térmicas:

$$U = 1/R_{se} + 1/R_t + 1/R_{si} \quad (1)$$

sendo R_{se} e R_{si} as resistências térmicas superficiais exterior e interior respectivamente de um elemento [$m^2 \cdot ^\circ C/W$], e R_t a resistência térmica total da solução construtiva, determinada por:

$$R_t = \frac{e}{\lambda} \quad (2)$$

onde e é a espessura do elemento construtivo [m] e λ sua condutibilidade térmica [W/m.°C].

Assim, para um determinado elemento com uma determinada área, é possível calcular a taxa de transferência de calor, uniformizando a direção do fluxo, sendo θ_i e θ_e as temperaturas interiores e exteriores respectivamente:

$$\dot{Q} = U A (\theta_i - \theta_e) \quad (3)$$

A taxa de transferência de calor corresponde à potência (energia sob a forma de calor por unidade de tempo) [W], transmitida por condução através de paredes, tectos e pisos, ao espaço interior e aplica-se quando as temperaturas são constantes e a sua condutividade é uniforme em toda a fachada. É inversamente proporcional à espessura do material e proporcional à sua área da secção transversal.

Uma vez que o gradiente de temperatura entre o interior e o exterior das câmaras é bastante elevado, são construídas antecâmaras com temperaturas mais baixas de modo a evitar as perdas térmicas, havendo um menor desgaste quer no sistema de refrigeração, quer na estrutura construtiva, como é possível verificar na Figura 3.

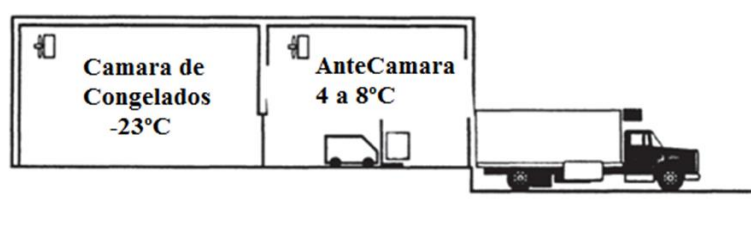


Figura 3-Desenho descritivo da entrada de uma câmara frigorífica (IRH,2004)

Um dos elementos cruciais na construção de câmaras de congelação é o isolamento térmico que é constituído por materiais de baixa condutividade térmica e porosos, originando uma elevada resistência térmica. São utilizados isolamentos como PUR, espuma rígida de Poliuretano, ou XPS, Poliestireno expandido, que apresentam uma condutibilidade térmica de $\lambda = 0,037 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ (ITE 50, 2006).

A espessura irá ser também um factor decisivo, quer no isolamento aplicado, quer em todo o elemento construtivo, sendo possível diminuir os gastos energéticos de arrefecimento nas câmaras de refrigeração e congelação modelando as características dos elementos construtivos. Além do isolamento nas paredes e no tecto, o pavimento das câmaras frigoríficas também requer medidas e precauções, para evitar o congelamento do piso. (Baptista *et al.*,2007)

2.1.2. Desvão ventilado

Após as visitas às câmaras frigoríficas, percebeu-se que a maioria das empresas opta por uma estrutura apoiada sobre um desvão ventilado, ou seja, o piso é suspenso em relação ao solo. A principal vantagem é que o desvão minimiza os riscos de degradação causados pelas diferenças de temperatura e os ganhos de calor.

No caso das instalações nas zonas costeiras (algumas das instalações visitadas junto à costa marítima) evita possíveis inundações ao local. Este aumento de espaço de desvão modifica o método de cálculo das pontes térmicas lineares.

Outro processo utilizado são as barreiras de vapor e ductos de aquecimento nos pavimentos em contacto com o solo. O método é idêntico ao desvão ventilado, sendo que estes últimos são tubos de elevada resistência, suportando as pressões exteriores e interiores. Os tubos são ainda revestidos com isolamento para evitar a sua degradação. Nos ductos existe a passagem de ar quente, onde não devem ter deformações para evitar a condensação de água e vedados para evitar a passagem de roedores. O seu diâmetro apresenta os 10cm. (IRH, 2004)

As barreiras de vapor estendem-se ao longo da envolvente onde é isolada e de reduzidas espessuras. Previnem a entrada de humidade no isolamento da envolvente e assim à sua degradação. As barreiras são finas camadas de plástico (folhas de plástico ou finas camadas de asfalto) e não devem ser quebradas nas uniões dos painéis. A Figura 4 representa um exemplo demonstrativo de um pavimento com ductos de aquecimento e barreiras de vapor.

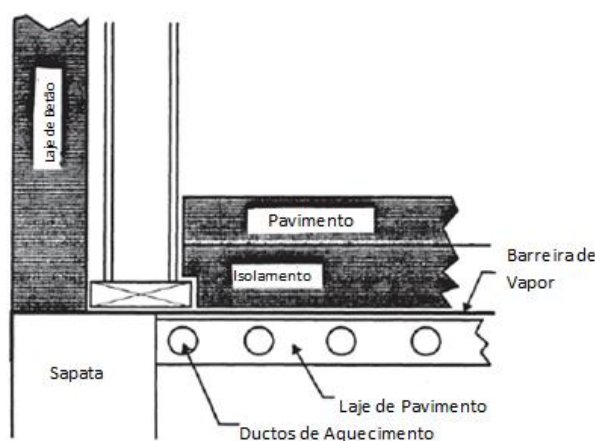


Figura 4 - Figura demonstrativa de um tipo de desvão ventilado com dutos de aquecimento (IRH, 2004)

2.2. Caracterização dos sistemas de refrigeração

Para cada tipo de produto alimentar existe uma temperatura ideal de conservação. A quantidade e o tipo de produto armazenado pode fazer variar a temperatura necessária, como é o caso nos peixes, onde há uma maior exigência na sua qualidade. Neste sector, a temperatura adequada é de -29°C ou inferior (IRH, 2004)

Como a temperatura média de entrada de produtos variam normalmente dos 5 aos 25°C , a câmara estará sempre sujeita a oscilações de temperatura interior. Assim, o sistema de refrigeração deve responder aos aumentos de carga térmica e ser devidamente dimensionado. Também a transmissão de calor através das envolventes e pontes térmicas lineares, a infiltração através das portas abertas e a carga interna de iluminação, a ocupação de pessoas, máquinas e empilhadoras são factores que influenciam bastante o dimensionamento, pois representam ganhos térmicos do espaço que está a ser refrigerado. Assim, a maior parte das câmaras frigoríficas são estruturadas com dimensões relativamente pequenas para que sejam minimizadas as oscilações de temperatura.

Um dos factores principais que afecta a eficiência energética das instalações frigoríficas é a infiltração de ar, que deve ser mantida em níveis mínimos e a boa resolução das temperaturas de evaporação e de condensação, tal como o tipo de refrigerante a ser usado. Quando a pressão de condensação e a pressão de evaporação são muito diferentes, o sistema é pouco eficiente e o consumo de energia aumenta (Chagas,2013).

Num sistema de refrigeração industrial, os componentes principais são: o compressor, o condensador, o dispositivo de expansão e o evaporador. Os três primeiros

estão situados geralmente na sala das máquinas (zona não climatizada), e o evaporador situa-se dentro da câmara frigorífica, normalmente no lado oposto da porta de entrada, tendo como função extrair o calor do espaço a ser arrefecido.

Os fluidos frigorígenicos usados no processo de refrigeração das câmaras variam consoante o tipo de instalação e o sector. O mais usado é o refrigerante R-404 seguido do R-22, onde este último está em fase de transição por ser prejudicial à camada de ozono (Ferreira *et al*, 2014).

2.3. Pontes térmicas

Designa-se ponte térmica quando existe uma alteração das características térmicas locais relativamente à zona corrente da fachada. É parte da envolvente onde o fluxo de calor não é unidireccional e deste modo deixa de ser válida a abordagem de cálculo em superfícies uniformes. Podem se dividir em pontes térmicas planas e pontes térmicas lineares. As pontes térmicas planas ocorrem devido a heterogeneidade inseridas na zona corrente da envolvente, ou seja, onde existe uma alteração na estrutura do elemento construtivo, seja um pilar ou coluna numa parede (Afonso, 2012)

As pontes térmicas lineares surgem na junção de dois elementos de diferentes planos, sejam ligações entre fachada e cobertura ou duas paredes verticais, onde é calculado o coeficiente de transmissão térmica linear, PSI ($\Psi(W/m.^{\circ}C)$), sendo as pontes térmicas analisadas nesta dissertação.

Em termos físicos, nas zonas de pontes térmicas as linhas do fluxo de calor não são rectilíneas e tomam as direcções onde a resistência de passagem é menor. Assim, estas junções têm como efeito um acréscimo das trocas de calor através da envolvente, levando ao aumento dos consumos energéticos do espaço em questão e a uma distribuição não homogénea da temperatura. A existência das pontes térmicas leva ao aparecimento de patologias construtivas e funcionais nas envolventes (Abreu e Corvacho, 1987), originando anomalias nas câmaras de refrigeração, ou seja, ganhos de calor nas zonas de ligação.

Existem soluções construtivas que reduzem esta irregularidade de modo a tornar a câmara e o espaço a refrigerar mais eficaz. Estas correcções devem ser realizadas consoante o tipo de pormenor construtivo que a causa, procedendo ao reforço do

isolamento térmico nessa zona de modo a minimizar o seu efeito, ou seja, para cada tipo de construção deve ser aplicada a melhor solução que subestime os efeitos causados.

A norma EN ISO 10211 consolida os diferentes valores de Ψ para as pontes térmicas lineares, tendo em conta diferentes soluções construtivas.

Apesar da deformação das linhas isotérmicas, o fluxo de calor é sempre perpendicular às mesmas. No entanto, as heterogeneidades existentes provocam uma maior taxa de transferência de energia devido à sua diminuição de resistência térmica. Conforme é visível na Figura 5, a maior concentração de linhas isotérmicas ocorre onde existe o isolamento localiza-se na superfície exterior. O parâmetro PSI toma assim o sentido das temperaturas decrescentes (Temperatura espaço exterior > Temperatura espaço interior), sendo um condicionante térmico que irá fazer aumentar a temperatura do espaço interior.

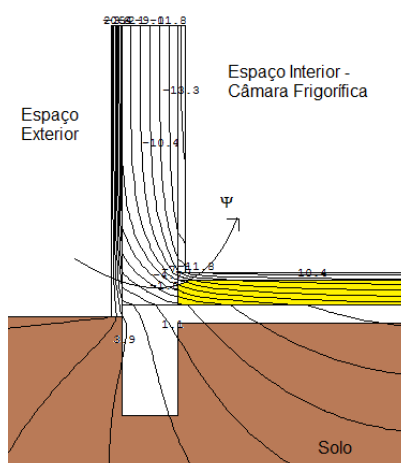


Figura 5 – Figura descritiva do efeito do PSI sobre uma fachada em contacto com o terreno

2.4. Análise por termografia

A termografia por infravermelhos é uma técnica que converte a radiação térmica emitida pela superfície de um objecto e não visível ao olho humano, em imagens retratadas pelo perfil de temperaturas dessa superfície. Para tal, é utilizada uma câmara termográfica que capta a radiação infravermelha de maneira eficaz, não necessitando de contacto com o objecto nem a estabilização das temperaturas dando origem a imagens térmicas ou termogramas. As imagens representam as distribuições de temperatura por uma escala de cores ou padrões de fluxo radiactivo (Garcia e Fontes,2007).

A câmara é de fácil utilização e possibilita uma medição em tempo real. No entanto, deve ter-se em atenção às imagens captadas dos objectos que podem interferir ou induzir em erros de interpretação, como os materiais de maior emissividade térmica. Deve-se sempre comparar com um termograma de referência com condições de ensaio semelhantes. A *FLIR*, câmara termográfica utilizada nas auditorias às câmaras frigoríficas, capta não só as imagens térmicas, como também fotografias. Deste modo, é possível detectar as patologias nas envolventes, sejam: isolamento em falta ou mal posicionado; formação excessiva de pontes térmicas; danos nos elementos de construção; perdas térmicas através de frestas ou fugas; infiltrações ou até mesmo antever futuras anomalias.

Esta câmara permite ainda fornecer os valores de temperatura em cada ponto da imagem, através do *software* da própria *FLIR*.

3. ANÁLISE DA NORMA ISO 10211:2007 E APLICAÇÃO AO THERM

Nesta dissertação usou-se o programa *THERM* para estudar os efeitos de transferência de calor em duas dimensões de componentes de construção. É um programa desenvolvido no Laboratório Nacional *Lawrence Berkeley* (LBNL). A análise de transferência de calor através do *THERM* avalia a eficiência energética de uma envolvente e o quadro de temperaturas locais. Deste modo, permite calcular as pontes térmicas das ligações de diferentes configurações de elementos construtivos.

O programa utiliza a análise de transferência de calor bidimensional (2D), condução e radiação, com base no método dos elementos finitos, podendo modelar as geometrias mais complexas como janelas e portas e/ou outros elementos de construção. O método consiste em dividir a secção interior, (transversal) numa malha, composta pelos elementos que a constituem. Definida a geometria da secção interior e as propriedades do material, é também necessário definir as condições de fronteira, aplicando os valores reais de temperatura, humidade e coeficiente térmico. Estando o modelo desenhado e definido, o programa elabora a análise de transferência de calor, chegando ao resultado do valor do Coeficiente de Transmissão Térmica (U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)) para a amostra ou ainda o valor da Resistência Térmica (R ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)), apresentando uma estimativa de erro. A malha pode ser ainda redefinida até chegar a uma solução mais convergente e precisa.

A interface do *THERM* apresenta uma vasta biblioteca com as propriedades dos materiais e várias condições de fronteira, prontas a serem aplicadas no modelo, mas o utilizador tem a liberdade de acrescentar o que pretender. É possível também observar as linhas isotérmicas do modelo, tal como a escala de cores de temperatura ao longo da amostra (*THERM*,2013).

Como já foi referido, a norma ISO 10211:2007 classifica as pontes térmicas lineares das envolventes, quando estas estão sujeitas a um gradiente de temperatura e existe transferência de calor através de um fluxo unidireccional de direcção perpendicular à superfície e de sentido das temperaturas decrescentes. Deste modo, irá verificar-se a precisão do programa *THERM* em relação à norma, utilizando como sua referência e tendo como base de estudo aos cálculos posteriores no caso de estudo desta dissertação. Embora

esteja direcionada ao estudo dos edifícios não industriais (Castro,2010), esta análise será apenas comparativa, de modo a elaborar um método de cálculo que seja aplicável à indústria do frio.

A norma ISO 10211:2007 define as especificações dos modelos geométricos bidimensionais e tridimensionais de pontes térmicas para o cálculo numérico de fluxos de calor e no caso das câmaras frigoríficas determina os ganhos de calor, sendo possível obter os coeficientes térmicos lineares e pontuais para qualquer tipo de envoltentes. Assim, definindo o método de cálculo, calibrando o programa e a norma, é analisado o caso de estudo, tornando os resultados precisos e seguros.

3.1. Elaboração do modelo a aplicar no *THERM*

Sendo impraticável a modelação de um edifício na sua totalidade no programa *THERM*, estudaram-se planos de corte específicos aos quais pretende-se analisar, segundo a norma ISO 10211:2007. Existem três tipos de sistemas de dimensões: dimensões internas, excluindo a espessura das divisórias internas; dimensões internas totais, incluindo a espessura das divisórias internas e as dimensões externas (White,2009).

Para simplificar o modelo, apenas se irá analisar o plano a duas dimensões, uma vez que a secção será uniforme no terceiro eixo ortogonal.

Segundo a norma existem ainda dois tipos de elementos que entram na modelação bidimensional: elementos marginais, representando as zonas correntes da envolvente, ou seja, como sendo partes do modelo que, quando consideradas isoladamente, consistem em elementos compostos por diferentes camadas planas e paralelas; e elementos centrais, como sendo, os que representam as zonas de ponte térmica linear.

3.1.1. Modelos de planos de corte

Os planos de corte devem responder a determinadas limitações:

- Em planos de simetria, caso se encontrem a menos de d_{min} do elemento central;
- Caso não exista um plano de simetria a menor distância, o plano de corte deve se encontrar a pelo menos d_{min} do elemento central.

Sendo d_{min} superior a 1 metro e a três vezes a espessura do elemento marginal em causa. O modelo geométrico é delimitado e inclui os elementos centrais, marginais e o

solo, como é possível verificar na Figura 6. Todas estas delimitações são cruciais na estrutura do modelo no programa *THERM*.

Todos os planos de corte devem representar fronteiras adiabáticas, ou seja, o fluxo de calor que os atravessa é nulo.

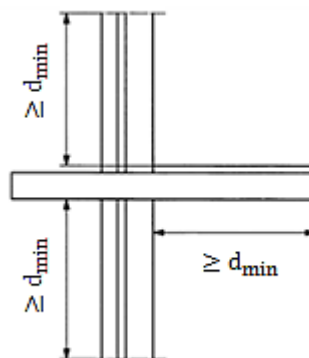


Figura 6 - Modelo do plano de corte à distância d_{\min} da ponte térmica (norma 10211:2007)

3.1.2. Planos de corte no solo

Quando o cálculo envolve a transferência de calor pelo solo, os planos de corte deverão seguir as seguintes características, uma vez que é impossível representar o solo na sua totalidade:

- A distância na horizontal ao plano de corte vertical no interior do edifício é $0,5 \times b$ (sendo b uma dimensão do pavimento).
- A distância na horizontal ao plano de corte vertical no exterior do edifício é $2,5 \times b$ ou 20m (o menor).
- A distância na vertical ao plano de corte horizontal abaixo do nível de pavimento é $2,5 \times b$ ou 20m (o menor).

A Figura 7 representa estas dimensões na estrutura modelada.

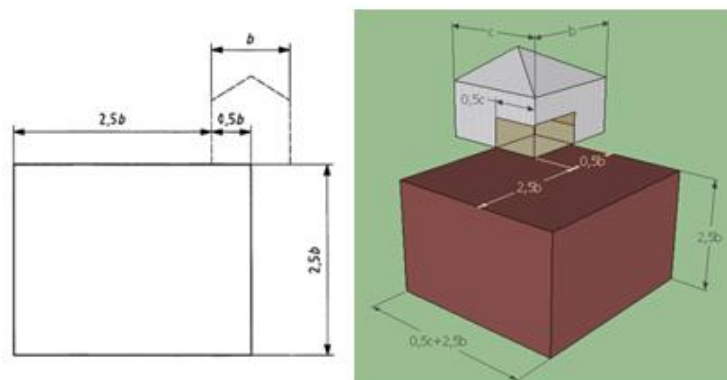


Figura 7 - Planos de corte e suas dimensões que incluem o solo (norma 10211:2007)

3.1.3. Método de cálculo - *THERM*

Para o cálculo do fluxo de calor que atravessa as envolventes devem ser conhecidos os detalhes de construção, como as condutividades térmicas dos materiais, resistências térmicas e as condições de fronteira.

O fluxo de calor, ϕ , é determinado pela seguinte expressão:

$$\phi_{i,j} = L_{ij}^{2D} \times (\theta_i \times \theta_j) \quad (4)$$

onde $\phi_{i,j}$ é o fluxo de calor entre dois ambientes i e j , expresso em [W] e L_{ij}^{2D} é o coeficiente de transmissão térmica global [W/m²C], onde aplicando as leis de conservação de energia ($div q = 0$) e de Fourier ($q = -\lambda grad\theta$) e tendo as condições de fronteira, é obtido um sistema de equações, em função de temperaturas (Stieldorf,2013).

Assim, o coeficiente de transmissão térmica global entre dois ambientes é dado pela expressão:

$$L_{ij}^{2D} = \sum_{k=1}^{N_k} (U_k \times A_k) + \Psi \times l \quad (5)$$

Simplificando para um comprimento unitário da ponte térmica linear ($l = 1m$) e $A_k = l_k \times l$

$$L_{ij}^{2D} = \sum_{k=1}^{N_k} (U_k \times l_k) + \Psi \quad (6)$$

Logo:

$$\Psi = L_{ij}^{2D} - \sum_{k=1}^{N_k} (U_k \times l_k) \quad (7)$$

onde U_k é o coeficiente de transmissão térmica dos elementos marginais, l_k o comprimento no modelo geométrico do elemento K e N_k o número total dos elementos marginais.

Aplicando a uma ligação simples de dois elementos, é possível calcular a ponte térmica linear dos elementos e calcular os ganhos de calor na ligação (caso das envolventes frigoríficas) - cálculo da transmissão térmica linear, PSI (Ψ) quando a envolvente está sujeita a trocas de calor e o PSI tem o sentido das temperaturas decrescentes, como é possível verificar na Figura 8.

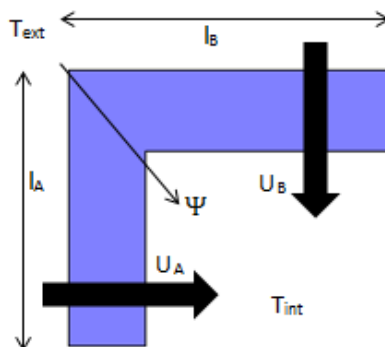


Figura 8 - Ligação entre duas envolturas, $T_{int} < T_{ext}$

$$\Psi = L_{ij}^{2D} - U_A \times l_A - U_B \times l_B \quad (8)$$

Deste modo, L_{ij}^{2D} representa o fluxo de calor pela diferença de temperaturas (exterior e interior), que será obtido no programa *THERM*.

$$L_{ij}^{2D} = \frac{Q}{T_{int} - T_{ext}} \quad (9)$$

O coeficiente de transmissão térmica global representa a taxa de fluxo de calor por metro quadrado e por grau de temperatura. Este cálculo é bastante sensível aos valores utilizados, pois a pequena diferença nas medidas do modelo pode comprometer os valores do PSI. Obtendo os valores dos coeficientes térmicos dos dois elementos e as suas dimensões, facilmente se calcula o valor do PSI da ligação.

Na junção dos elementos deve ter-se em atenção as dimensões utilizadas aos seus cálculos: dimensões externas ou dimensões internas. Utilizando as dimensões internas, a junção dos elementos é excluída dos cálculos. O contrário se passa usando as dimensões externas e a junção é sobreposta ao elemento, levando a PSI's negativos. Nos cálculos desta dissertação utilizam-se as dimensões internas, pois o método é mais simples e eficaz.

3.1.3.1. Ligações de fachada com pavimento

O modelo geométrico a considerar, em contacto com o solo deve incluir metade do comprimento do pavimento térreo ou 4m deste (o menor valor) e o elemento de parede (h_w) até uma altura de $h_w = d_{min}$, medida desde o elemento central. A altura h_f deve ser medida desde o nível do solo até ao topo da laje do pavimento térreo, tal como mostra a Figura 9.

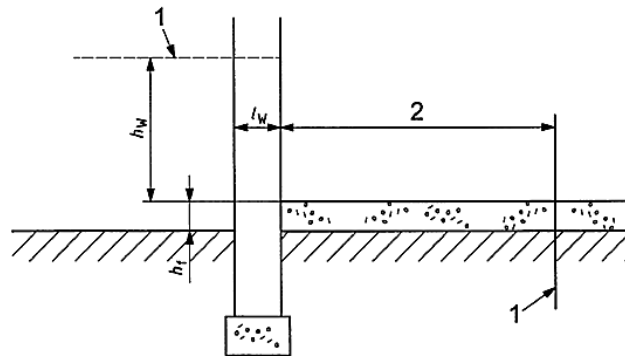


Figura 9 - Ligação em contacto com o pavimento (norma Iso 10211:2007)

A enumeração 1 representa a fronteira adiabática, ou seja, planos de corte onde não se considera a transferência de fluxo de calor e a enumeração 2 é representado pela expressão $0,5 \times B'$ ou 4m, sendo B' a dimensão característica do solo.

Para modelos em contacto com o solo utiliza-se a norma ISO 13370:2007, que melhor padroniza estas ligações.

O valor da dimensão característica do solo ou pavimento, B' [m], segundo a norma é dado pela expressão:

$$B' = \frac{A}{(0,5 \times P)} \quad (10)$$

sendo A [m²] a área do pavimento e P [m] o perímetro exposto. Este parâmetro depende do modelo a analisar, ou seja, as dimensões são reduzidas aos espaços climatizados, excluindo os espaços exteriores.

Tendo os dados dos elementos, obtém-se, então, o valor de Ψ de duas maneiras:

-Dimensões internas

$$\Psi = L^{2D} - h_w \times U_w - 0,5 \times B' \times U_g \quad (11)$$

Onde U_w e U_g correspondem ao coeficiente térmico da parede e ao coeficiente térmico da laje em contacto com o pavimento, respectivamente.

-Dimensões externas

$$\Psi = L^{2D} - (h_w + h_f) \times U_w - 0,5 \times (B' + l_w) \times U_g \quad (12)$$

No entanto, como já foi mencionado, apenas se utilizará as dimensões internas nos cálculos posteriores.

Assim, a transferência de calor pelo solo é caracterizada por:

- ❖ Taxa de calor relacionada com a área do pavimento e dependendo da sua construção;
- ❖ Taxa de calor relacionada com o perímetro do pavimento, dependendo da ponte térmica na junção do pavimento;
- ❖ Taxa de calor sazonal, ou seja, face às variações de temperatura ao longo do ano, que relaciona a inércia térmica do solo.

O método de cálculo deve ser avaliado segundo um dos seguintes parâmetros:

- a) Cálculo numérico tridimensional, onde o resultado é directo, e os cálculos são realizados de acordo com a norma ISO 10211:2007.
- b) Cálculo numérico bidimensional, utilizando um solo que é infinitamente longo e tem uma largura igual à dimensão característica do pavimento, B' . Os cálculos são também realizados segundo a norma ISO 10211:2007.
- c) Transferências de calor de acordo com a área calculada através da norma ISO 13370:2007.

Propriedade térmicas do solo

Caso sejam desconhecidos os valores específicos do solo para uma determinada região, os valores a usar devem ser:

$$\lambda = 2,0 \text{ W/m} \cdot \text{C} \text{ e } pc = 2,0 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{C}$$

3.1.3.2. Coeficiente de transmissão térmica global num piso suspenso

Num piso suspenso, existem mais elementos de ligação, logo o cálculo do coeficiente de transmissão térmica global irá ser diferente, dado que as condições de fronteira também se alteram.

Irá depender ainda, se o espaço é ventilado ou não ventilado, ou seja, se existe trocas de ar no espaço suspenso. O sentido das setas dos coeficientes de transmissão térmica global representam o fluxo de calor para o caso das câmaras frigoríficas, representado na Figura 10.

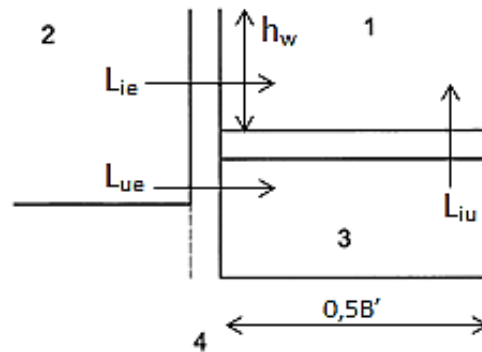


Figura 10 - Ligações térmicas num piso suspenso (imagem adaptada norma 10211:2007)

1 – Espaço interior, θ_i , °C

2 – Espaço exterior, θ_e , °C

3 – Espaço suspenso debaixo do pavimento, desvão, θ_u , °C

4 – Solo

B' - Dimensão característica do pavimento

h_w – Distância mínima entre a fachada do pavimento e o plano superior (altura da parede após a junção), m

L_{ie} – Coeficiente de transmissão térmica global entre o espaço interior e o exterior, W/m²C

L_{iu} – Coeficiente de transmissão térmica global entre o espaço interior e o espaço suspenso, W/m²C

L_{ue} – Coeficiente de transmissão térmica global entre o espaço suspenso e o exterior, W/m²C

O espaço suspenso é ventilado do exterior, se a ventilação não estiver incluída no modelo, L_{ue} é dividido em dois componentes:

$$L_{ue} = L_{ue,c} + L_{ue,v} \quad (13)$$

sendo,

$L_{ue,c}$ – Coeficiente de transmissão térmico global de condução de calor através as paredes do espaço suspenso e do solo, W/m²C

$L_{ue,v}$ – Representa a transferência de calor entre as trocas de ar entre o espaço suspenso e o espaço exterior, W/m²C e é calculado:

$$L_{ue,v} = \rho cp V' \quad (14)$$

onde:

ρ – Densidade do ar, kg/m³

cp – Calor específico do ar a uma pressão constante, J/kg°C

V' - Caudal de volume do ar, m³/s

Assim, o fluxo de calor total do modelo suspenso, em [W], tem a expressão:

$$\Phi = \left(\frac{L_{iu}L_{ue}}{L_{iu}+L_{ue}} + L_{ie} \right) (\theta_i - \theta_e) \quad (15)$$

Ou seja,

$$\Phi = L_{2D}(\theta_i - \theta_e) \quad (16)$$

Tal como nos modelos de dois elementos de ligação, os coeficientes de transmissão térmica global serão obtidos através do programa *THERM*, chegando assim à expressão:

$$L_{2D} = \left(\frac{L_{iu}L_{ue}}{L_{iu}+L_{ue}} + L_{ie} \right) \quad (17)$$

E o valor do PSI deste modelo é calculado através da expressão semelhante à equação número 11:

$$\Psi_g = L_{2D} - h_w \times U_w - 0,5 \times B' \times U \quad (18)$$

Dependendo da posição do pavimento em relação ao terreno, os modelos são divididos em 4 categorias - Laje sobre Piso Térreo, Piso Suspenso, Desvão Aquecido e Desvão não Aquecido, adaptados da norma ISO 13370:2007, apresentando cálculos específicos.

❖ Laje sobre Piso Térreo

Este modelo consiste na análise de trocas térmicas de uma laje em contacto com o terreno, seja qual for a sua dimensão. Podendo ou não ser isolada.

Os seus cálculos começam por determinar a espessura equivalente, [m]:

$$d_t = w + \lambda (R_{si} + R_f + R_{se}) \quad (19)$$

w – Espessura das paredes exteriores, m

R_f – Resistência térmica da laje do pavimento junto ao solo, m².°C/W

As lajes de betão densas na profundidade do solo podem ser menosprezadas, uma vez que a sua condutividade térmica é semelhante à do solo.

O cálculo do coeficiente térmico U_f [W/m²°C] é dependente do isolamento térmico, assim:

- Se $d_t < B'$

$$U_f = \frac{2\lambda}{\pi B' + d_t} \ln\left(\frac{\pi B'}{d_t} + 1\right) \quad (20)$$

- Se $d_t \geq B'$

$$U_f = \frac{\lambda}{0,457 \times B' + d_t} \quad (21)$$

Para modelos onde exista isolamento térmico em contacto com o terreno são divididos nos seguintes parâmetros:

Isolamento Vertical na fachada do pavimento

$$d' = R'\lambda \quad (22)$$

$$R' = R_n - \frac{d_n}{\lambda} \quad (23)$$

sendo R_n [m².°C/W], a resistência térmica do isolamento inserido na vertical e d_n a espessura do isolamento.

Assim, o coeficiente de transmissão térmica linear na posição vertical [W/m.°C], é dado por:

$$\Psi_{g,e} = -\frac{\lambda}{\pi} \left[\ln\left(\frac{2D}{d_t} + 1\right) - \ln\left(\frac{2D}{d_t + d'} + 1\right) \right] \quad (24)$$

E, o coeficiente de transmissão térmica do pavimento com isolamento [W/m²°C] é dado pela expressão:

$$U_g = U_f + \frac{2\Psi_{g,e}}{B'} \quad (25)$$

Isolamento Horizontal na fachada do pavimento

Apenas muda a expressão:

$$\Psi_{g,e} = -\frac{\lambda}{\pi} \left[\ln\left(\frac{D}{d_t} + 1\right) - \ln\left(\frac{D}{d_t + d'} + 1\right) \right] \quad (26)$$

❖ Piso Suspenso

Piso Suspenso, tal como o nome indica, o pavimento está afastado do solo, e o seu espaço entre o pavimento e o solo é naturalmente ventilado e o coeficiente de transmissão térmica é calculado por:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_f} + \frac{1}{U_g + U_x} \quad (27)$$

Onde,

U_f - Coeficiente de transmissão térmica da laje suspensa (entre o espaço interior e o espaço do desvão), $W/m^2\text{°C}$

U_g - Coeficiente de transmissão térmica da laje junta ao solo, $W/m^2\text{°C}$

U_x - Coeficiente de transmissão térmica equivalente entre o espaço do desvão e o espaço exterior, $W/m^2\text{°C}$

Calculando cada um dos parâmetros:

$$d_g = w + \lambda (R_{si} + R_g + R_{se}) \quad (28)$$

$$U_g = \frac{2\lambda}{\pi B' + d_g} \ln\left(\frac{\pi B'}{d_g} + 1\right) \quad (29)$$

sendo R_g [$m^2 \cdot \text{°C}/W$] a resistência térmica da laje junta ao solo.

$$U_x = 2 \times \frac{hU_w}{B'} + 1450 \times \frac{\varepsilon v f_w}{B'} \quad (30)$$

Onde:

h - altura entre a superfície do solo e a laje superior, m

U_w - Coeficiente de transmissão térmica do elemento da parede, m

ε - área de ventilação aberta por perímetro de comprimento no desvão, m^2/m

f_w - factor de resistência do vento (valor médio suburbano: 0,05)

Neste modelo é necessário também, calcular a temperatura da superfície do desvão no seu interior a colocar nas condições de fronteira (*William e Delsante, 2006*), pois além das trocas térmicas que este espaço está sujeito, existe a ventilação do exterior:

Assim, o balanço da temperatura é dado pela expressão:

$$\theta_{us} = \frac{AU_f \theta_{int} + V' cp \rho \theta_v + (AU_g + hPU_w) \theta_{ext}}{AU_f + V' cp \rho + AU_g + hPU_w} \quad (31)$$

onde:

θ_{int} – Temperatura do espaço interior, °C

θ_{ext} – Temperatura do espaço exterior, °C

θ_v – Temperatura da ventilação do ar, °C

cp – Calor específico do ar a uma temperatura constante ($cp = 1000 \text{ J/KgK}$)

ρ – Densidade do ar ($\rho = 1,230 \text{ kg/m}^3$)

V' - Caudal do volume do ar, m^3/s

$$V' = 0,59 \times \varepsilon v f_w P \quad (32)$$

❖ Desvão Aquecido

O modelo “desvão aquecido” segundo a norma ISO 13370, é representado para espaços habitáveis abaixo do nível do solo, podendo criar alguma dúvida quanto à designação dada ao modelo, no entanto, será adaptável às características das câmaras frigoríficas, alterando as suas condições térmicas, para o caso dos edifícios industriais de refrigeração.

Os cálculos são muito similares ao modelo 1, começa-se por calcular a espessura equivalente:

$$d_t = w + \lambda (R_{si} + R_f + R_{se}) \quad (33)$$

- Se $(d_t + 0,5z) < B'$

$$U_{bf} = \frac{2\lambda}{\pi B' + d_t + 0,5z} \ln\left(\frac{\pi B'}{d_t + 0,5z} + 1\right) \quad (34)$$

- Se $(d_t + 0,5z) \geq B'$

$$U_{bf} = \frac{\lambda}{0,457B' + d_t + 0,5z} \quad (35)$$

Sendo U_{bf} o coeficiente térmico da laje de pavimento junto ao solo [$\text{W/m}^2\text{°C}$].

Calculando U_{bw} , coeficiente térmico do elemento da parede vertical [$\text{W/m}^2\text{°C}$]:

$$d_w = \lambda (R_{si} + R_w + R_{se}) \quad (36)$$

onde R_w , resistência térmica do elemento da parede vertical.

$$U_{bw} = \frac{2\lambda}{\pi z} \left(1 + \frac{0,5d_t}{d_t + z}\right) \ln\left(\frac{z}{d_w} + 1\right) \quad (37)$$

A expressão é válida para valores $d_w \geq d_t$, caso contrário, d_t deve ser substituído por d_w .

Assim, o coeficiente térmico deste modelo [W/m²°C] é caracterizado pela expressão:

$$U = \frac{(AU_{bf}) + (zPU_{bw})}{A + (zP)} \quad (38)$$

❖ Desvão não Aquecido

Apresenta algumas semelhanças em relação ao modelo “piso suspenso”, no entanto, enquanto o desvão do piso suspenso é um espaço ventilado naturalmente, neste modelo, será introduzido uma taxa de ventilação ao espaço do desvão. Além disso, o nível do solo em relação à laje inferior no espaço interior deverá ser $z > 0,5m$.

Assim, os parâmetros da ventilação são um factor importante nos cálculos e o coeficiente térmico do modelo [W/m²°C] é dado pela expressão:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_f} + \frac{A}{(AU_{bf}) + (zPU_{bw}) + (hPU_w) + (0,33 \times nV)} \quad (39)$$

U_f - Coeficiente de transmissão térmica da laje suspensa (entre o espaço interior e o espaço do desvão), W/m²°C

U_w - Coeficiente de transmissão térmica da parede vertical, W/m²°C

n - Taxa de ventilação do desvão (trocas de ar por hora, onde $n = 0,3h^{-1}$);

V - Volume de ar do desvão, m³

No cálculo da temperatura superficial do desvão, representado pela equação 31, o volume do caudal de ar é dado pela expressão:

$$V' = \frac{0,34 \times n \times V}{cp \times \rho} \quad (40)$$

3.2. Programa THERM

Para compreender melhor o programa, inicia-se com uma exemplificação de um exemplo simples de ligação entre duas envoltentes, Figura 12.

A barra de ferramentas do programa, representada na Figura 11, apresenta algumas hipóteses pré-definidas, no entanto, é possível seguir por estas 3 fases:

- Geometria (dimensões e forma do modelo), onde é possível escolher a escala a trabalhar, tal como a grelha de desenho e o parâmetro de malha;
- Especificação do material (condutividade térmica e emissividade)
- Condições de fronteira (temperatura de superfície e coeficiente de transferência de calor).

É possível ainda, abrir ficheiros/modelos desenhados em outros programas. Contudo, deve-se ter em atenção que o programa não admite poli-linhas, tal como os polígonos sobrepostos.

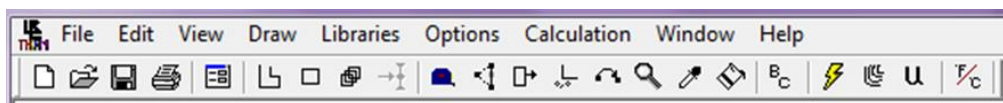


Figura 11 - Botão de comandos do THERM

A barra de ferramentas está dividida em vários comandos, sendo os primeiros relacionados com o armazenamento de ficheiros, os do meio na execução do desenho e os últimos no cálculo da malha dos elementos finitos e definição de unidades.

Material A

$$\lambda = 1,3 \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad e = 200\text{mm} \quad l_{int} = 0,8\text{m}$$

$$R_{si} = 0,13\text{m}^2\text{C/W} \quad R_{se} = 0,04\text{m}^2\text{C/W}$$

$$H_{si} = 7,69\text{W/m}^2\text{C} \quad H_{se} = 25\text{W/m}^2\text{C}$$

Material B

$$\lambda = 2 \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad e = 200\text{mm} \quad l_{int} = 1\text{m}$$

$$R_{si} = 0,17 \text{ m}^2\text{C/W} \quad R_{se} = 0,04\text{m}^2\text{C/W}$$

$$H_{si} = 5,88 \text{ W/m}^2\text{C} \quad H_{se} = 25\text{W/m}^2\text{C}$$

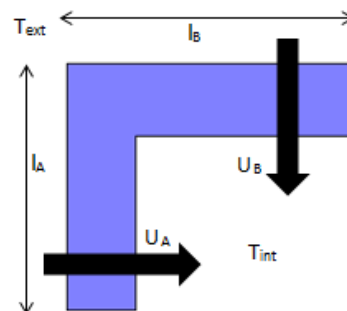


Figura 12 - Figura com exemplo demonstrativo e características

As características representadas na Figura 12, são implementadas no programa THERM, de acordo com as suas definições de material ou condição de fronteira, como mostra a Figura 13.

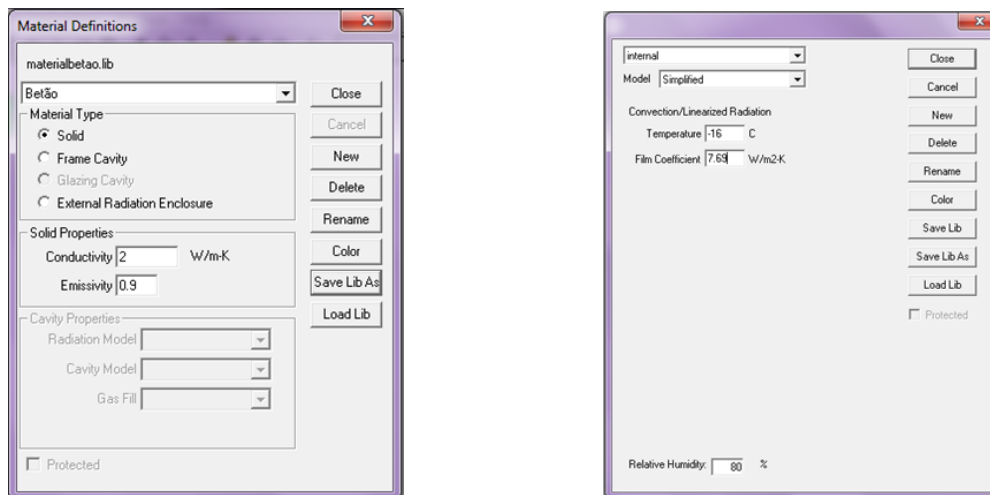


Figura 13 - Interface das definições do material (imagem à esquerda) e definições de fronteira (imagem à direita) do programa THERM

Definições de Material do Modelo:

Seleccionar *Libraries* > *Material Library*

Estas definições irão ficar gravadas na biblioteca e estarão disponíveis para outros ficheiros. Os materiais podem também ser distinguidos pelas suas cores.

O parâmetro da emissividade é usado em cálculos de radiação que, neste caso ficará pré-definido pelo programa. Para cavidades de ar utiliza-se *Frame Cavity* e usam-se também os valores pré-definidos. O parâmetro *External Radiation Enclosure* também não é aplicável neste exemplo.

Condições de Fronteira do modelo

Seleccionar *Libraries* > *Boundary Condition Library*

Indica-se a temperatura e a condutividade térmica consoante a posição da superfície da fronteira. A orientação da superfície é perpendicular ao fluxo de calor, e é definida consoante a Tabela 1, dependendo da direcção do fluxo de calor (MCRMA,2006).

Tabela 1 - Tabela das Resistências Superficiais em relação ao fluxo de calor

		Direcção do fluxo de calor		
		↑	↓	↔
Rsi	m^2C/W	0,10	0,17	0,13
1/Rsi	W/m^2C	10,00	5,88	7,69
Rse	m^2C/W	0,04	0,04	0,04
1/Rse	W/m^2C	25,0	25,0	25,0

O parâmetro da humidade também é aqui introduzido e analisado nos cálculos. Introduzindo todos os dados, obtém-se o modelo da Figura 14.

- 1 – Exterior ($T_{ext} = 0^{\circ}C$)
- 2 – Parede interior ($T_{int} = -16^{\circ}C$)
- 3 – Tecto ou superfície horizontal interior ($T_{int} = -16^{\circ}C$)
- 4 – Fronteira adiabática

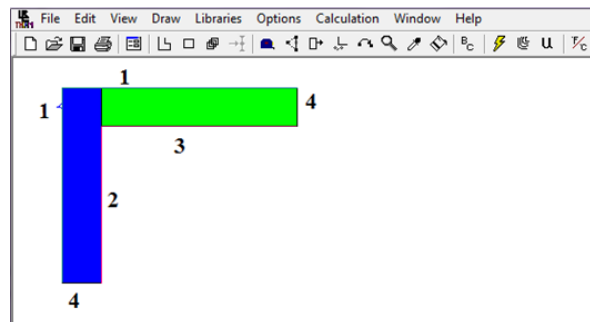


Figura 14 - Modelo Obtido no Programa THERM

Resta definir os limites de cálculo dos coeficientes de transmissão térmica – *U factor*, criando um novo *U factor*:

Libraries > U factor names > add > “insert name”

E selecciona-se duas condições de fronteira interior. O programa irá assim simular e converter uma solução para a região definida.

Na Figura 15 mostra *U-factor surface* definido pelas duas fronteiras interiores.

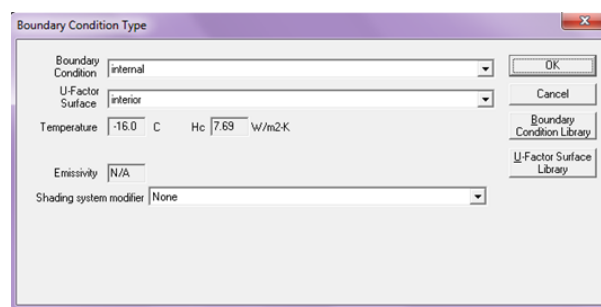


Figura 15 - Definição do *U-factor*

Tendo todas as condições definidas, procede-se assim à simulação. O programa *THERM* apresenta o modelo definido com as linhas isotérmicas e térmicas, mostrado pela Figura 16, calculando ainda o valor do U para a região delimitada.

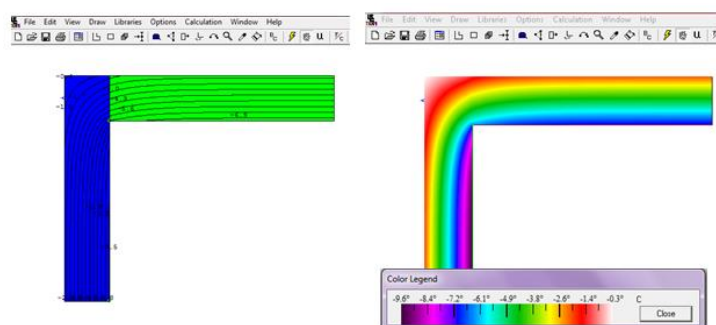


Figura 16 - Cálculo das linhas isotérmicas no *THERM*

Assim, na junção de dois elementos de fachada, de uma ligação simples, é retratada a escala de temperaturas da envolvente, tendo em conta a solução construtiva definida pelas características. Na Figura 16 verifica-se que as linhas de temperatura apresentam vários padrões de cor que representam cada temperatura, observando o gradiente térmico desde o espaço interior do modelo ao espaço exterior.

Determinando o *U-factor* de acordo com a Figura 17:

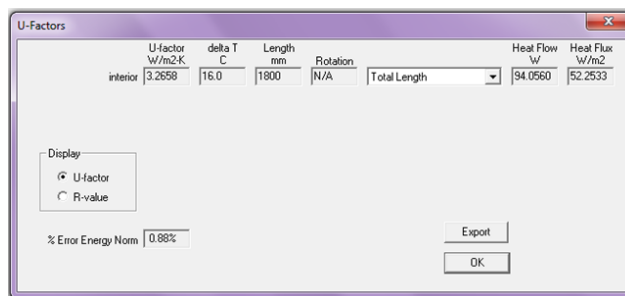


Figura 17 – Cálculo do coeficiente de Transmissão de Calor

$$U_{factor} = 3,2658 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} ; \Delta T = 16^\circ\text{C} ; l = 1800\text{mm}$$

$$\text{Assim, } L_{2D} = 3,2658 \times 1,8 = 5,878 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

$$\frac{1}{U_A} = 0,13 + \frac{0,2}{1,3} + 0,04 \Leftrightarrow U_A = 3,088 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\frac{1}{U_B} = 0,17 + \frac{0,2}{2} + 0,04 \Leftrightarrow U_B = 3,226 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\Psi = 5,878 - (3,088 \times 0,8) - (3,226 \times 1) = 0,182 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Calculando assim o valor do PSI (Ψ) para esta estrutura, sendo um fluxo de calor calculado por metro de dimensão e por grau de temperatura (West,2007).

Desta forma, verifica-se que o valor do PSI depende da solução construtiva do modelo, ou seja, da constituição dos elementos construtivos e espessura, e não é parametrizado pela diferença de temperatura nem pelo comprimento do modelo.

Além das normas apresentadas, os cálculos foram também obtidos através de propostas de resolução do Diário da República (2013) e do regulamento ADENE (2006) em conjunto com os resultados obtidos pelos autores Nyberg (2011) e Samuel (2012).

3.3. Exemplos de cálculo de pontes térmicas lineares

Os exemplos que se seguem representam vários tipos de ligações de soluções construtivas, onde a espessura e a posição do isolamento serão alterados, para que seja analisado o seu PSI. Serve ainda para testar o programa *THERM* face às normas ISO 10211:2007 e ISO 13370:2007 e posterior comparação com a norma ISO 14683:2008. Os exemplos representam parte do modelo, conforme os planos de corte apresentados, e relatam, aproximadamente, a mesma solução construtiva que os modelos de exemplo das normas anteriores, para uma melhor comparação de valores. Embora as condições de temperatura sejam equiparáveis às das câmaras frigoríficas, tal como as suas condições de fronteira, o tipo de solução construtiva não é o indicado. Os métodos de cálculo para os coeficientes de transmissão térmica linear, quer para ligações de fachadas, quer para pavimentos em contacto com o solo, foram apresentados anteriormente e neste subcapítulo são calculados com base nas normas e modelados com ajuda do programa *THERM*.

3.3.1. Paredes – Ligação entre fachada e pavimento sobre espaço não útil

O exemplo 1, representado na Figura 18, tem definido as condições de fronteira e apresenta as características dos elementos construtivos na Tabela 2. Os resultados são apresentados na Tabela 3 tal como como a representação das linhas isotérmicas.

A solução construtiva é representada por uma parede simples em alvenaria de tijolo 22 com isolamento XPS pelo exterior da fachada. A laje de pavimento de betão é maciça com isolamento XPS pelo exterior e betonilha de regularização. É revestido ainda com reboco no seu exterior e uma placa de resina epoxídica no pavimento.

No exemplo 2, o isolamento foi apenas colocado na parede de alvenaria, no exemplo 3, foi colocado acima da laje de betão do pavimento e no exemplo 4 o isolamento foi colocado em todo o seu interior.

O isolamento térmico está representado com a cor azul clara que, em certos casos, pode ser de difícil identificação, uma vez que as linhas isotérmicas são mais próximas nesse elemento, devido à elevada resistência térmica e conseqüente gradiente

térmico, tornando a região de cor mais densa (negra). Para melhor percepção, a Tabela 22 (anexo B) apresenta todos os exemplos na sua forma mais simples.

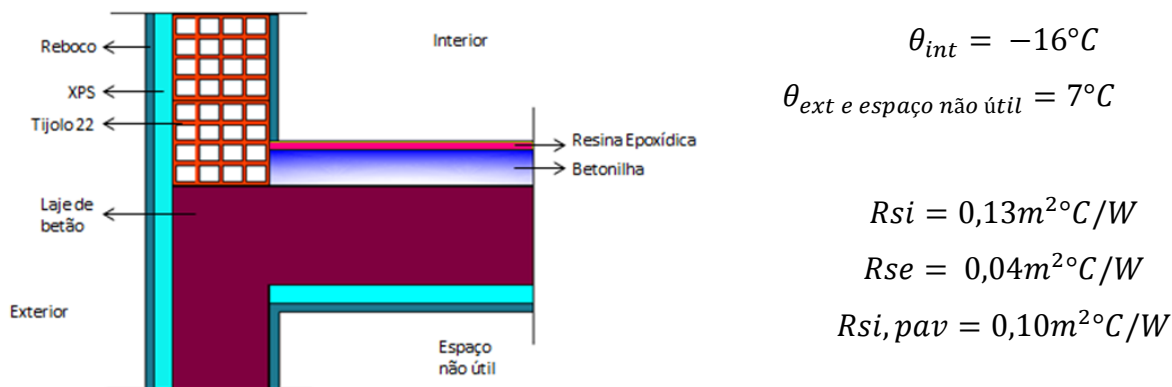


Figura 18 - Exemplo 1 e condições de Fronteira

Tabela 2 - Tabela dos coeficientes térmicos dos elementos dos exemplos segundo ITE 50 (2006)

Envolvente 1	Espessura (m)	Condutibilidade (W/m.°C)
Resina Epoxídica	0,03	0,20
Betonilha	0,08	1,8
Laje de Betão	0,22	2
XPS	0,04	0,037
Reboco	0,02	1,3
Tijolo 22	0,22	0,52

Tabela 3 - Tabela com os valores calculados para ligações entre fachada e espaço não útil

Exemplo	Tipo de Construção	Parâmetros
1		$U_f = 0,625W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ $U_w = 0,587W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ $L_{2D} = 1,721W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ $\Psi = 0,509W/m \cdot ^{\circ}C$

2		$U_f = 0,626 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $U_w = 0,589 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $L_{2D} = 1,891 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $\Psi = 0,675 W/m \cdot ^\circ C$
3		$U_f = 0,631 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $U_w = 0,589 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $L_{2D} = 1,552 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $\Psi = 0,343 W/m \cdot ^\circ C$
4		$U_f = 0,631 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $U_w = 0,589 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $L_{2D} = 1,233 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $\Psi = 0,050 W/m \cdot ^\circ C$

U_f e U_w Correspondem aos coeficientes de transmissão térmica do pavimento e da parede respectivamente. O comprimento das dimensões dos modelos é o valor unitário (1m) para cada elemento, para uma melhor simplificação. Recorde-se que anteriormente foi referido que $d_{min} \geq 1m$. Dado que o objectivo de cálculo é quantificar os ganhos térmicos da solução, quanto maior foi o valor do PSI, maior será o incremento térmico que a superfície exterior incute sobre o espaço interior.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que a solução 4, com isolamento XPS em todo o seu interior é a mais favorável, onde o seu valor de PSI diminuiu consideravelmente em relação às restantes soluções.

Estas observações coincidem com os valores de exemplo da norma ISO 10211:2007 (valores posteriormente apresentados na tabela 11). Quanto ao diagrama de cores de temperatura, verifica-se também que o exemplo 4 é o que mais difere dos restantes exemplos, devido ao posicionamento do isolamento.

3.4. Ligação entre fachada e pavimento em contacto com o solo

Esta junção segue a norma ISO 13370:2007, método que define as pontes térmicas lineares entre fachada e pavimento. Os exemplos seguem as divisões de categorias definidos pelo subcapítulo 3.1.3, para melhor exemplificação do método de cálculo.

Os elementos construtivos e as suas condições térmicas serão semelhantes aos do subcapítulo anterior. As temperaturas exteriores e interiores mantêm-se, sendo introduzido a temperatura superficial do solo, que neste estudo é igual à temperatura exterior, tratando-se de uma temperatura fronteira com o exterior, segundo a norma.

3.4.1. Ligação de fachada com laje sobre piso térreo

Exemplo 1.1 - Ligação simples entre fachada e pavimento em contacto com o terreno. A parede vertical é em alvenaria de tijolo 22 com isolamento XPS no interior. O pavimento é isolado sobre a laje de betão de 22cm de largura e com revestimento de betonilha e resina no pavimento. Exemplo 1.2 – Solução construtiva idêntica ao exemplo 1.1, excepto que o isolamento térmico está exposto no exterior da fachada vertical. Os exemplos estão representados na Figura 19 e os resultados de cálculo na Tabela 5.

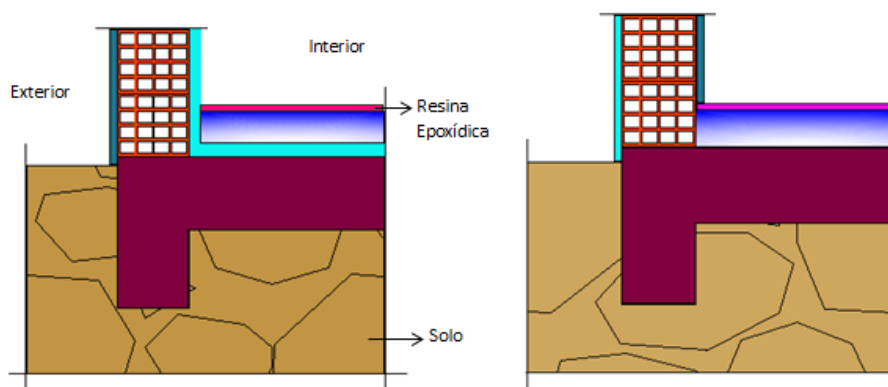
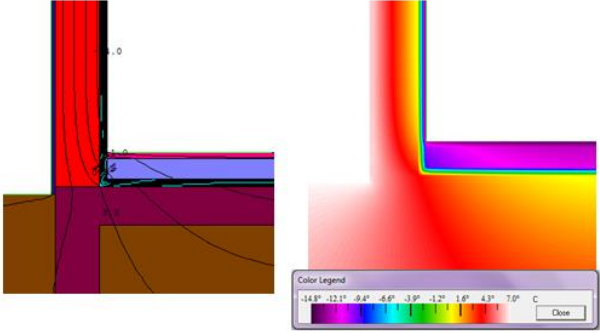
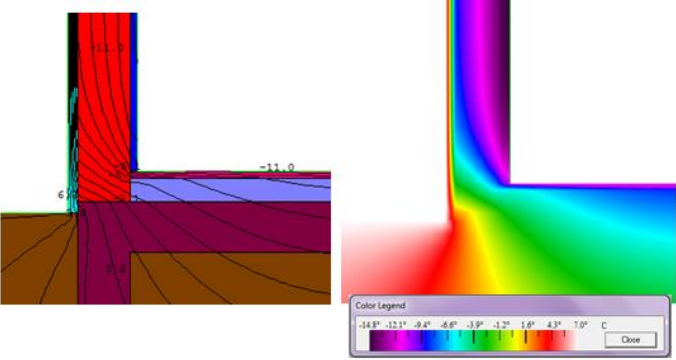


Figura 19 - Solução construtiva tipo com isolamento interior à esquerda e isolamento exterior à direita

Tabela 4 - Tabela dos coeficientes térmicos dos elementos da solução 1.1 e 1.2, segundo *ITE 50* (2006)

Envoltente 1	Espessura (m)	Condutibilidade (W/m.°C)
Resina Epoxídica	0,03	0,20
Betonilha	0,10	1,8
Laje de Betão	0,26	2
XPS	0,04	0,037
Reboco	0,02	1,3
Tijolo 22	0,22	0,52

Tabela 5 - Tabela com os valores calculados para ligações de piso térreo

Exemplo	Tipo de Construção	Parâmetros
1.1		$U_f = 0,480 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ $d_t = 3,253 \text{ m}$ $U_w = 1,515 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ $L_{2D} = 1,234 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ $\Psi = 0,122 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$
1.2		$U_f = 1,170 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ $d_t = 0,881 \text{ m}$ $U_w = 0,591 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ $L_{2D} = 2,055 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ $\Psi = 0,249 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

Uma vez que se trata de um modelo em contacto com o terreno é necessário introduzir no programa os planos de corte no solo e calcular a dimensão característica do solo, B' , seguindo os parâmetros referidos anteriormente. Como se trata de modelos de exemplo, e os planos de corte apresentam dimensões unitárias, $B' = 2\text{m}$. Para a profundidade do solo, o seu comprimento estende-se a 5m ($2,5b$ com $b=2$), dando uma correspondência mais realista no programa *THERM*.

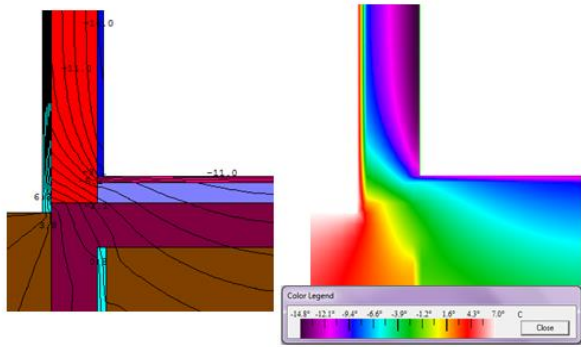
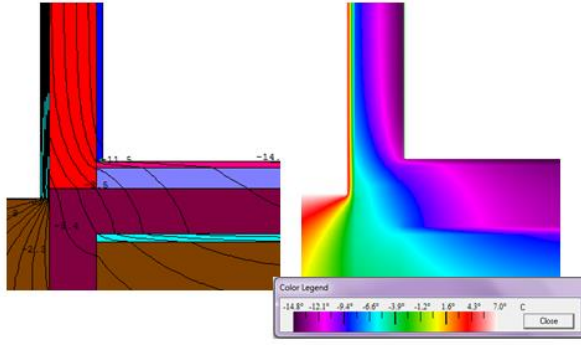
Além disso, é importante referir que a resistência superficial exterior do solo é $R_{se} = 0 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$. Assim, o valor a colocar nas condições de fronteira do programa ($H_{se} = 1/R_{se}$) deve ser o mais elevado possível. Os restantes valores são calculados pelas equações demonstradas anteriormente.

Verificando os resultados obtidos, observa-se mais uma vez que, a situação com a posição do isolamento XPS pelo interior apresenta valores de PSI muito mais baixos. Estes valores foram devidamente comparados com as normas referidas.

Para soluções com isolamentos na laje interior do pavimento em contacto com o terreno, existem outros parâmetros a ter em conta, que serão verificados pelos exemplos de que seguem.

A Tabela 6 mostra exemplos de isolamento térmico em contacto com o terreno (isolamento na vertical, exemplos 1.3 e 1.5 e na horizontal, exemplos 1.4 e 1.6), mantendo a solução construtiva e condições térmicas, aplicando 4cm de isolamento XPS, tal como os seus valores calculados.

Tabela 6 - Tabela com os valores calculados para ligações de piso térreo com isolamento na fachada do pavimento

Exemplo	Tipo de Construção	Parâmetros
1.3		$d' = 2,122 \text{ m}$ $U_w = 0,591 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$ $\Psi_{g,e} = -0,221 \text{ W/m} \cdot \text{C}$ $U_g = 0,921 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$ $L_{2D} = 1,955 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$ $\Psi = 0,461 \text{ W/m} \cdot \text{C}$
1.4		$d' = 2,122 \text{ m}$ $U_w = 0,591 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$ $\Psi_{g,e} = -0,068 \text{ W/m} \cdot \text{C}$ $U_g = 0,437 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$ $L_{2D} = 1,667 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$ $\Psi = 0,656 \text{ W/m} \cdot \text{C}$

1.5	Isolamento interior com isolamento vertical	$\Psi = 0,153 W/m.^{\circ}C$
1.6	Isolamento interior com isolamento Horizontal	$\Psi = 0,228 W/m.^{\circ}C$

Analisando os valores é possível verificar que a colocação de isolamento XPS ao longo da fachada de ligação com o pavimento em contacto com o terreno, os valores de PSI alteram significativamente, havendo um aumento face aos valores da Tabela 5. Nos dois primeiros exemplos desta Tabela, o isolamento está aplicado no exterior da fachada e nos dois últimos o isolamento está aplicado ao longo do seu interior. Verifica-se que a posição do isolamento térmico deve ser previamente estudada para todo o tipo de situações.

3.4.2. Ligação de fachada com piso suspenso

Os exemplos que se seguem, apresentam semelhante solução construtiva e condições térmicas que os exemplos anteriores, tal como, as temperaturas internas e externas e temperatura superficial do solo se mantêm. A Figura 20 representa o primeiro exemplo 2.1 e os valores estão apresentados na Tabela 7.

Exemplo 2.1 – Laje de betão suspensa com uma espessura de 22cm. A parede de alvenaria encontra-se sobre o pavimento e na vertical, revestida com reboco no exterior e isolamento térmico no interior. Sob a laje de pavimento encontra-se betonilha e resina epoxídica e também isolamento. $\varepsilon = 0,030 m^2/m$, $\theta_{ext e solo} = 7^{\circ}C$ e $\theta_{int} = -16^{\circ}C$.
 Exemplo 2.2 - Solução construtiva mantém-se, embora o isolamento térmico está exposto no exterior da fachada vertical.

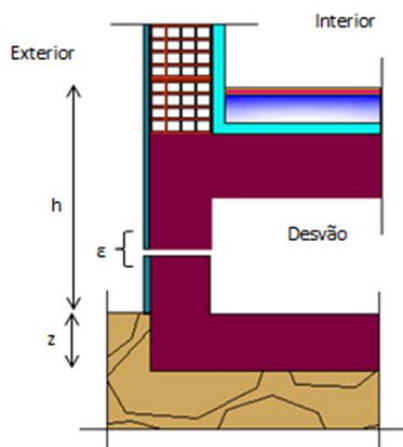
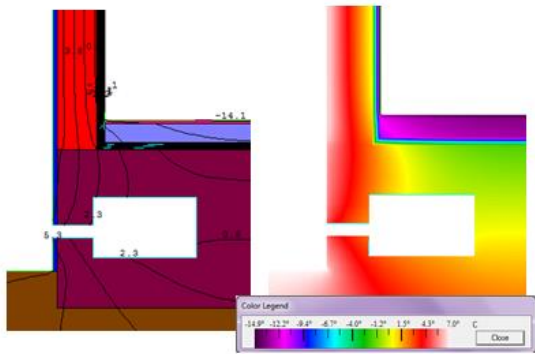
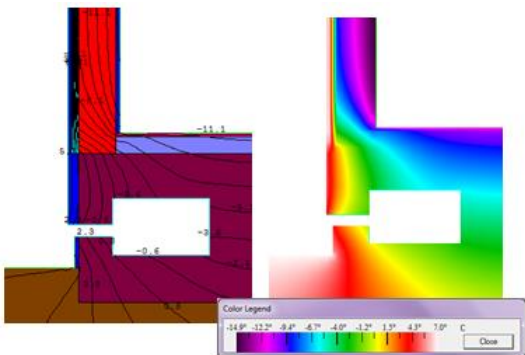


Figura 20 - Solução tipo do exemplo 2.1

Tabela 7 - Tabela com os valores calculados para ligações de piso suspenso

Exemplo	Tipo de Construção	Parâmetros
2.1		$U_f = 0,638W/m^2 \cdot ^\circ C$ $U_w = 0,592W/m^2 \cdot ^\circ C$ $U_x = 1,029W/m^2 \cdot ^\circ C$ $U = 0,445W/m^2 \cdot ^\circ C$ $\theta_{us} = 0,03 ^\circ C$ $L_{2D} = 1,582W/m^2 \cdot ^\circ C$ $\Psi = 0,373 W/m \cdot ^\circ C$
2.2		$U_f = 2,059W/m^2 \cdot ^\circ C$ $U_w = 0,587W/m^2 \cdot ^\circ C$ $U_x = 1,001W/m^2 \cdot ^\circ C$ $U = 1,005W/m^2 \cdot ^\circ C$ $\theta_{us} = -4,8 ^\circ C$ $L_{2D} = 2,097W/m^2 \cdot ^\circ C$ $\Psi = 0,311 W/m \cdot ^\circ C$

Analisando os valores obtidos na Tabela 7, verifica-se que o valor do PSI não se altera notadamente entre as soluções 2.1 e 2.2, embora o coeficiente de transmissão térmica global L_{2D} seja relativamente diferente. Neste modelo, deve-se ter em atenção também ao parâmetro da temperatura superficial do desvão, onde nestes exemplos a discrepância dos valores de temperatura de fronteira do desvão são muito baixos em relação à temperatura exterior, podendo levar a deformações da solução construtiva.

3.4.3. Desvão aquecido

Este modelo é muito semelhante ao modelo 1 – Laje sobre o piso térreo. Neste caso, a superfície do solo está mais elevada que a laje em contacto com o pavimento. Esta diferença de altura é caracterizada pelo parâmetro z . Caso $z = 0$, os cálculos devem ser formatados ao modelo 1. O método de cálculo é também alterado.

O exemplo 3.1 apresenta isolamento térmico por todo o seu interior e, as espessuras e as condições térmicas são iguais ao modelo anterior referido, como se verifica na Figura 21. O exemplo 3.2 também apresenta semelhante solução construtiva com

isolamento térmico no exterior da fachada, acima do nível do terreno. O resultado de valores é apresentado na Tabela 8.

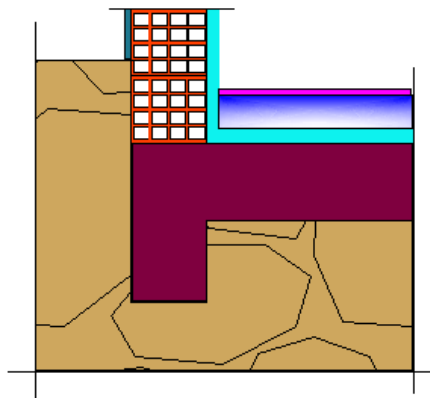


Figura 21 - Solução tipo do exemplo 3.1

Tabela 8 – Tabela com os valores calculados para ligações de piso do desvão aquecido

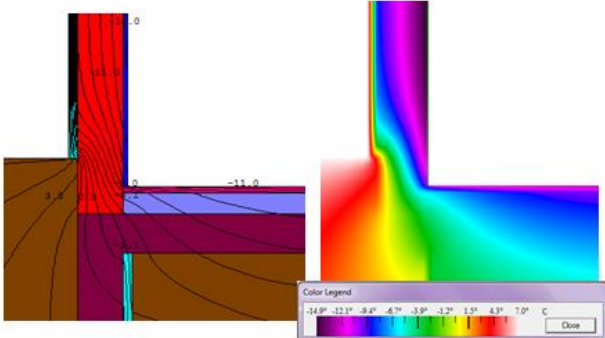
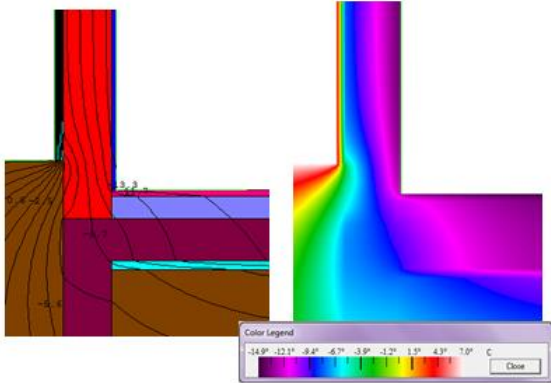
Exemplo	Tipo de Construção	Parâmetros
3.1		$U_{bf} = 0,478 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $U_{bw} = 0,509 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $U_w = 0,5934 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $U = 0,488 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $L_{2D} = 1,132 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $\Psi = 0,1323 W/m \cdot ^\circ C$
3.2		$U_{bf} = 1,028 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $U_{bw} = 0,472 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $U_w = 0,593 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $U = 0,855 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $L_{2D} = 2,071 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $\Psi = 0,623 W/m \cdot ^\circ C$

Analisando os valores calculados verifica-se que neste modelo a posição do isolamento pelo interior também faz descer o valor de PSI consideravelmente em relação ao exemplo 3.2. O diagrama de temperaturas também é alterado, onde na região junto ao

isolamento, o diagrama de cores das temperaturas entre o espaço interior ao espaço exterior, alteram imediatamente.

Para verificar o efeito do isolamento em contacto com o terreno neste modelo, foi colocado isolamento térmico XPS (4cm) na laje inferior, chegando aos valores referidos na Tabela 9. Os exemplos são 3.3 e 3.4 com isolamento XPS no exterior da fachada vertical e isolamento vertical e horizontal na fachada em contacto com o terreno respectivamente, os restantes 3.5 e 3.6 apresentam isolamento em todo o seu interior e isolamento na fachada do terreno.

Tabela 9 – Tabela com os valores calculados para ligações de devão aquecido com isolamento na fachada do pavimento

Exemplo	Tipo de Construção	Parâmetros
3.3		$U_{bf} = 1,006 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $U_{bw} = 0,479 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $\Psi_{g,e} = -0,276 W/m \cdot ^\circ C$ $U = 0,841 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $L_{2D} = 2,019 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $\Psi = 0,5848 W/m \cdot ^\circ C$
3.4		$U_{bf} = 0,476 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $U_{bw} = 0,505 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $\Psi_{g,e} = -0,070 W/m \cdot ^\circ C$ $U = 0,485 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $L_{2D} = 1,7554 W/m^2 \cdot ^\circ C$ $\Psi = 0,676 W/m \cdot ^\circ C$
3.5	Isolamento interior com isolamento vertical	$\Psi = 0,135 W/m \cdot ^\circ C$
3.6	Isolamento interior com isolamento horizontal	$\Psi = 0,174 W/m \cdot ^\circ C$

Analisando os valores apresentados, verifica-se que o isolamento térmico ao ser colocado na horizontal em contacto com o terreno promove o aumento do valor do PSI das soluções. Porventura, colocando verticalmente, em contacto com o terreno, o valor do

PSI também se altera, reduzindo consideravelmente na solução com isolamento exterior e na solução com isolamento em todo o seu interior.

3.4.4. Desvão não aquecido

Este modelo tem também as mesmas condições construtivas e térmicas que os modelos anteriormente referidos, introduzindo o parâmetro da taxa de ventilação do desvão. Apresenta ligeiras semelhanças com o modelo do “Piso Suspenso”.

Exemplo 4.1 - Laje de betão suspensa com uma espessura de 22cm. A parede de alvenaria encontra-se sobre o pavimento e na vertical, revestida com reboco no exterior e isolamento térmico no interior. Sob a laje de pavimento encontra-se betonilha e resina epoxídica e também isolamento, apresentada na Figura 22. Exemplo 4.2 – A solução difere no posicionamento do isolamento onde é colocado no exterior da fachada vertical. Os valores de cálculo estão apresentados na Tabela 10.

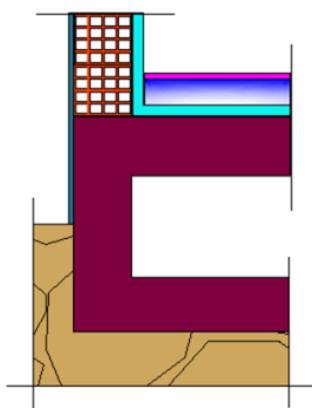
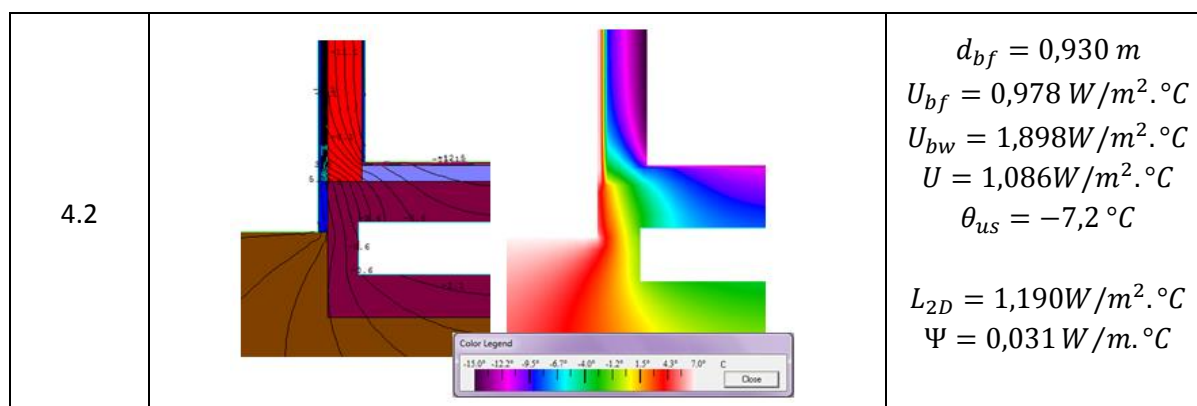


Figura 22 – Solução tipo do exemplo 4.1

Tabela 10 - Tabela com valores calculados de desvão não aquecido

Exemplo	Tipo de Construção	Parâmetros
4.1		$d_{bf} = 0,890 \text{ m}$ $U_{bf} = 0,999 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ $U_{bw} = 1,992 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ $U = 0,504 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ $\theta_{us} = -0,51 \text{ } ^\circ\text{C}$ $L_{2D} = 1,142 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ $\Psi = 0,146 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$



Ao contrário do expectável, verifica-se que a solução com valor de PSI mais baixo, é a solução 4.2, com isolamento no seu exterior. Embora os coeficientes de transmissão térmica global sejam relativamente semelhantes, verifica-se que a temperatura superficial do desvão, θ_{us} , é bastante mais baixa na última solução. Deste modo, é visível que, não só a solução construtiva tem impacto sobre o valor do PSI, como a estrutura do modelo e a disposição das condições de fronteira altera a direcção do fluxo de calor e das linhas isotérmicas, definindo o seu valor de PSI. No diagrama de temperaturas, as cores apresentam uma distribuição equiparável às soluções anteriores.

Apresentação dos Valores Calculados

A Tabela 11 representa a comparação entre os valores retirados do programa THERM face aos modelos representados para câmaras de refrigeração com os valores existentes da norma ISO 10211:2007 e o Catálogo *online* (ITeCons) para edifícios de habitação.

Tabela 11 - Tabela com os valores do PSI comparativos face à norma ISO 10211:2007 [W/m. $^\circ$ C]

Tipo de Elemento construtivo	Valores Obtidos THERM	Valores Norma ISO 10211:2007	Erro
Isolamento pelo exterior	0,509	0,48	6%
Isolamento acima da laje	0,676	0,67	1%
Isolamento acima da laje pelo interior	0,343	0,29	18%
Isolamento pelo interior	0,061	0,08	23%
Isolamento abaixo da laje	0,554	0,56	1%
Isolamento c/ caixa-de-ar	0,707	0,72	2%

Verifica-se assim que o método é adequado, pois o seu valor de erro é relativamente baixo, embora os modelos com isolamento pelo interior sejam um pouco mais exigentes e o valor de erro é um pouco mais alto.

A Figura 23 apresenta a variação do valor do PSI face aos modelos de pavimento com terreno apresentados, com isolamento exterior e interior na envolvente.

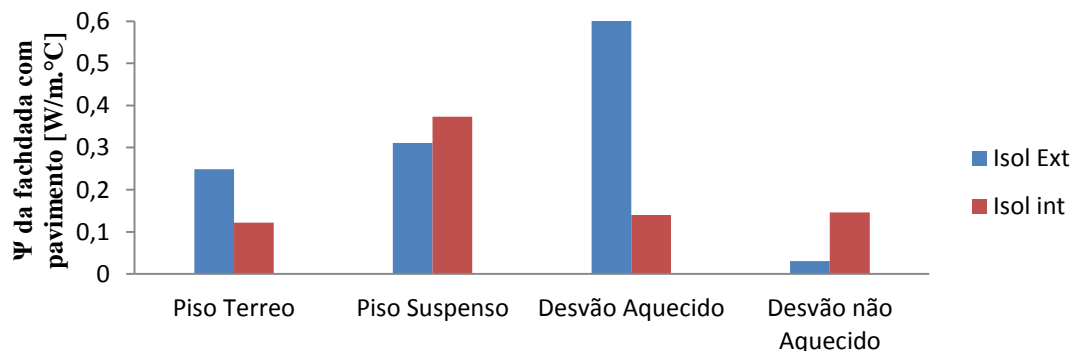


Figura 23 - Gráfico representativo dos vários modelos e respectivos valores de PSI

Assim, de acordo com o gráfico apresentado, verifica-se a discrepância do valor PSI face aos modelos apresentados. O modelo que se destaca é o “Desvão aquecido” pelo seu alto valor de PSI quando o isolamento é colocado no exterior reduzindo consideravelmente quando este é colocado no interior. O mesmo efeito é observável no modelo “Piso Térreo”, uma vez que estes modelos são muito semelhantes (a laje de pavimento está em contacto com o solo). Embora não seja muito comum nos edifícios de refrigeração, mas sim nos edifícios de habitação, o modelo “Desvão não aquecido” é o modelo que apresenta valores mais baixos de PSI, sendo explicável pelo facto de que, a solução construtiva usada nestes exemplos é também comum nos mesmos edifícios. O modelo “Piso Suspenso” foi o modelo usado no caso estudo, apresentando aqui valores relativamente altos, mais uma vez explicado pela errada solução construtiva.

Ainda na Tabela 23, Anexo B, é apresentado todos os valores calculados nos diferentes modelos para as envolventes em estudo, sendo facilmente observável que, apenas a posição do isolamento provoca um enorme efeito sobre o valor do PSI.

Deste modo é crucial analisar qual a solução ideal à solução construtiva em causa. Estas soluções construtivas foram apenas soluções de exemplo, adaptadas dos edifícios de habitação e não são adequadas a uma construção para edifícios de refrigeração, como se pode observar nos valores elevados de PSI. O valor de PSI deve ser o mínimo possível, de modo a diminuir o incremento de temperatura (baixos ganhos térmicos) à câmara frigorífica, na zona da envolvente e minimizar os prejuízos aos produtos refrigerados ou congelados e, ao próprio sistema de refrigeração.

4. APLICAÇÃO AO CASO DE ESTUDO

4.1. Análise termográfica das fachadas

Durante as visitas às empresas, foi possível detectar anomalias nas envolventes das câmaras e com ajuda de uma câmara termográfica (Figura 34, anexo B) verificar com pormenor elementos a deteriorados. Na Figura 24 apresenta-se um exemplo.

As imagens foram obtidas em dezembro de 2013 e representam uma fachada a oeste de uma empresa de peixe, situada na Figueira da Foz, Portugal. Na parte próxima do solo, é visível a junção da câmara frigorífica e da construção em betão. Esta ligação apresenta ainda uma abertura no seu interior que não está representada na imagem, correspondendo a um desvão. Esta fachada apresentava-se coberta com estruturas de paletes metálicas, onde a radiação solar não incidia directamente (Figura 34, anexo B).

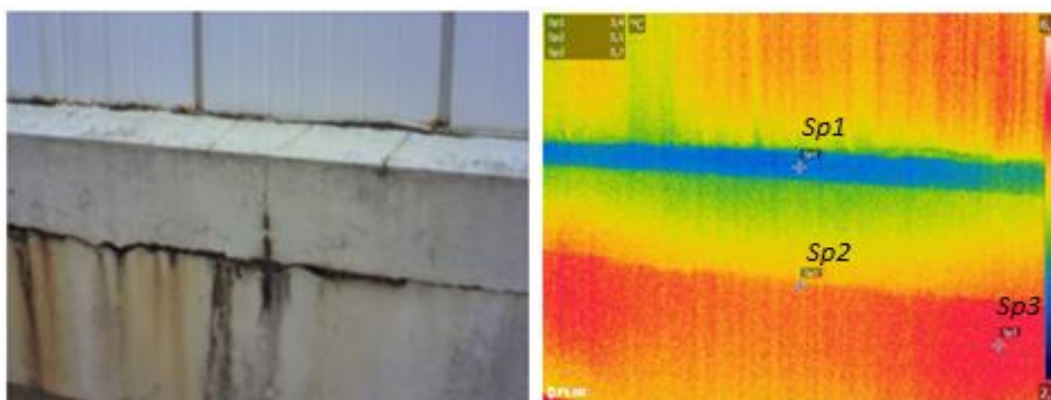


Figura 24 - Fotografia digital e termográfica da fachada

Analisando as imagens com detalhe repara-se na falha entre blocos, de cor mais escura, que corresponde a uma deterioração avançada. Comparando com a imagem termográfica na escala de temperaturas, verifica-se que existem zonas com temperaturas muito diferentes. A zona *sp1*, mais azulada, apresenta uma temperatura mais baixa que as restantes de 3,4°C. Isto é justificado pelo facto que se encontra numa zona de ligação com a câmara frigorífica com as temperaturas negativas, o que significa que existem trocas térmicas localizadas bastante incrementadas.

O segundo valor de temperatura marcado *sp2* (valor localizado a meio da imagem) tem um valor de $5,1^{\circ}\text{C}$, um pouco mais elevado que a temperatura *sp1*. Esta zona já se encontra mais afastada da câmara frigorífica, no entanto também se verificam perdas térmicas acentuadas, uma vez que este valor correspondente a cerca de 3°C abaixo da temperatura ambiente (8°C).

A amostra apresentada na Figura 25 foi obtida no mesmo dia que as imagens anteriores e localiza-se na mesma fachada. A imagem da esquerda representa a zona mais afectada das envolventes da instalação, como é facilmente visível pela degradação de toda a solução construtiva. Na imagem termográfica, na zona assinalada a *Ar1* apresenta valores de temperatura desde $6,1^{\circ}\text{C}$ a $3,7^{\circ}\text{C}$, deriva das fissuras apresentadas na imagem da esquerda.

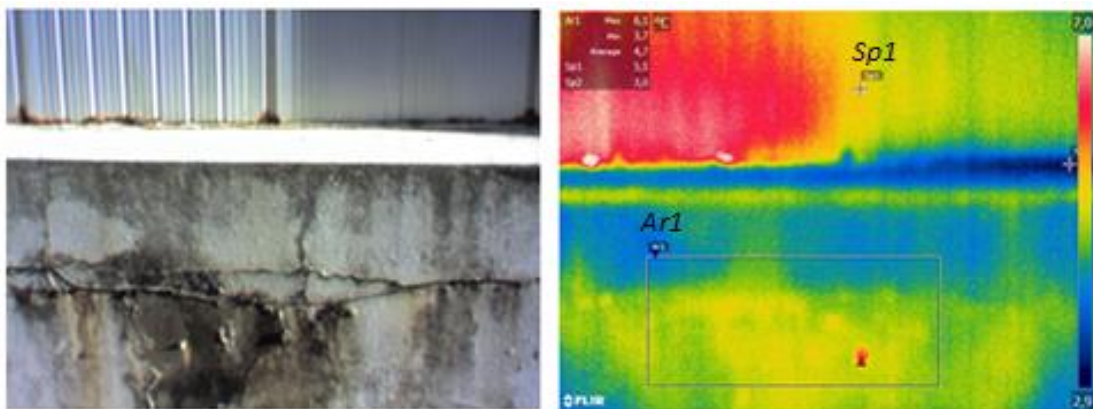


Figura 25 - Fotografia digital e termográfica da fachada

Estas anomalias no exterior, também se fazem corresponder no interior das câmaras frigoríficas, como é possível analisar na Figura 26.

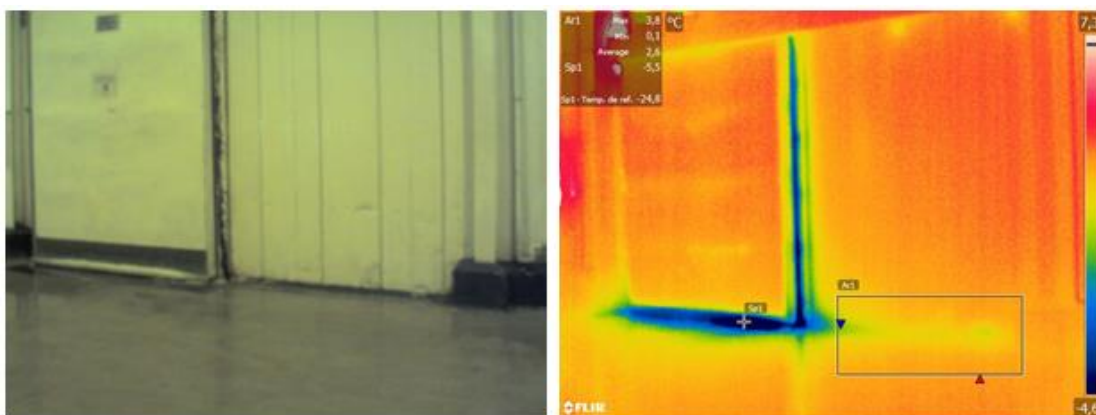


Figura 26 - Fotografia digital e termográfica do espaço interior junto a uma porta de entrada

As imagens da Figura 26 são referentes à entrada numa câmara frigorífica. À esquerda tem-se a porta de acesso, e a parede ao lado apresenta inúmeras amolgadelas devido ao embate das máquinas transportadoras. Como é visível na imagem termográfica, as trocas térmicas na junta da porta junto ao solo e na junção da parede são elevadas.

As imagens da Figura 27 representam o interior das câmaras frigoríficas sendo facilmente visível a formação de gelo no tecto do compartimento e ligeiramente na zona acima da porta de acesso.

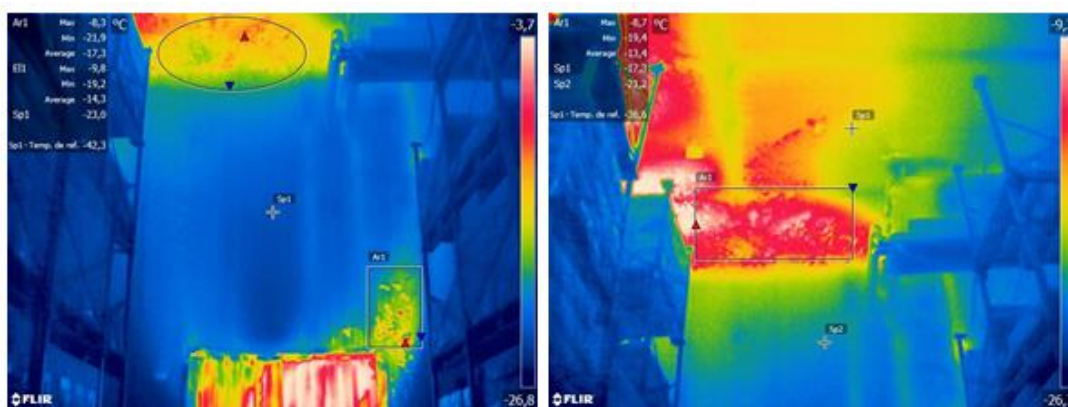


Figura 27 – Fotografias Termográficas no interior da câmara frigorífica

Esta formação de gelo, além de degradar as paredes envolventes, afecta todo o sistema de refrigeração e provoca um aumento de temperatura localizado. Como é possível verificar nas imagens, a temperatura da câmara frigorífica é aproximadamente -23°C , enquanto na zona do gelo as temperaturas rondam os -13°C a -17°C . Este fenómeno ocorre devido a grandes exposições de ar quente para a câmara frigorífica aquando a abertura da porta de acesso, o que leva à condensação de ar e consequente formação de gelo e, às correntes de ar provocadas pelo evaporador.

Dadas as anomalias apresentadas é importante encontrar soluções de melhoria para os casos expostos. Assim, os subcapítulos que se seguem destinam-se a possíveis análises de cálculo para este caso de estudo.

4.2. Ganhos térmicos pelo pavimento

Para uma melhor análise, começa-se por desenhar o modelo esquemático das envolventes das câmaras frigoríficas nas zonas afectadas. Assim, será analisado inicialmente a zona de ligação do pavimento, onde serão realizados cálculos

posteriormente, de acordo com os métodos referidos no capítulo anterior. Tratando-se de uma ligação em contacto com o terreno, é necessário proceder ao cálculo de planos de corte e determinar os parâmetros respectivos. Dado que, o comprimento da fachada a analisar é $l = 51,55m$, conforme verificado na Figura 2, o valor da dimensão característica do solo é $B' = 1,92m$.

Assim, começa-se por estruturar a solução construtiva da fachada deste edifício de refrigeração, e o seu esquema é representado na Figura 28.

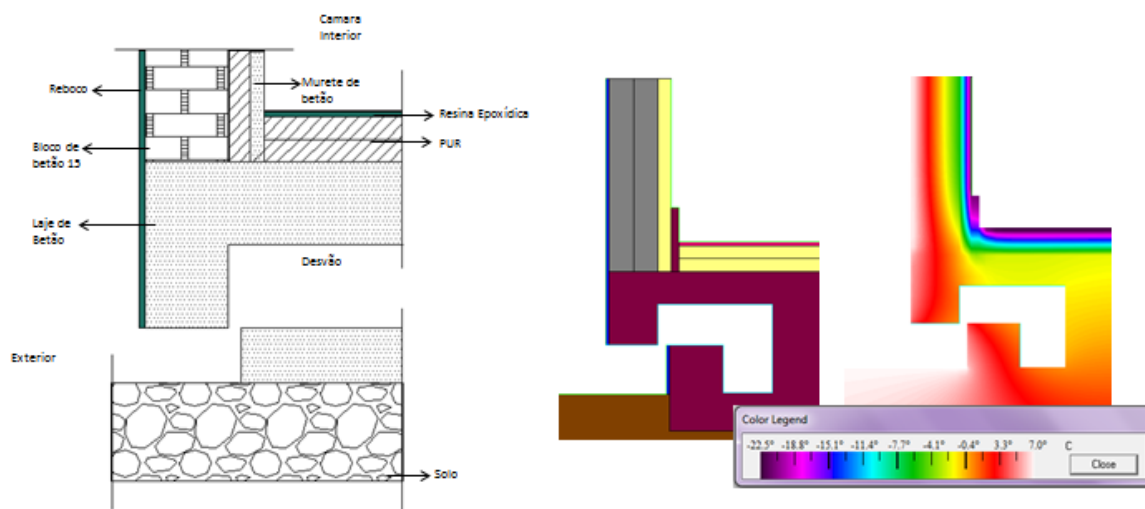


Figura 28 - Modelo demonstrativo da fachada em estudo na Figura à esquerda e a sua representação no *THERM* na Figura à direita – Solução inicial

Tabela 12 - Tabela com os valores de condutibilidade térmica do modelo, segundo *ITE 50* (2006)

Envolvente 1	Espessura (m)	Condutibilidade (W/m.°C)
PUR	0,08	0,037
Bloco de Betão 15	0,15	0,20
Bloco de betão 15	0,15	0,20
Betão	0,20	2
Reboco	0,02	1,3
Resina Epoxídica	0,02	0,20

No *THERM* desenha-se o modelo representado, definindo as soluções construtivas e as condições térmicas, conforme as dimensões estabelecidas e reais. As temperaturas consideradas foram $\theta_{ext} = 7^{\circ}C$, $\theta_{int} = -23^{\circ}C$ (temperatura interior da câmara 1, fig. 2) e $\theta_g = 7^{\circ}C$. Uma vez que o programa não aceita mais que um polígono em aberto, houve a necessidade de se fechar o modelo com a ligação com o pilar de betão.

No entanto, esta simplificação não interfere com os resultados, uma vez que a condutividade térmica do betão é igual à do solo.

Para modelação deste modelo do pavimento do edifício de refrigeração, foi considerado o método de “Piso Suspenso”, dadas as características apresentadas.

Assim, considerando os seguintes dados:

$$w = 0,32m; h = 0,92m; z = 0,22m; \lambda_{solo} = 2,0 W/mC, \varepsilon = 0,0012 m^2/m$$

Calculam-se os parâmetros necessários ao valor final PSI, apresentados na Tabela 13. A folha de cálculo está apresentada no Anexo A (folha - tipo dos exemplos calculados).

Tabela 13 - Tabela com os valores calculados para a solução inicial

U_f [W/m ² .°C]	U_w [W/m ² .°C]	U_x [W/m ² .°C]	U [W/m ² .°C]	θ_{us} [°C]	L_{2D} [W/m ² .°C]	Ψ [W/m.°C]
0,212	0,260	0,473	0,156	-0,86	0,966	0,555

Verifica-se que o valor do PSI obtido é elevado, comprovado pela distribuição de temperatura obtida nas imagens termográficas (ver Figuras 24 e 25).

Verifica-se ainda que a temperatura superficial do desvão é muito baixa, com valores próximos de 0°C. Para além dos ganhos térmicos, esta deficiência é a causa para a danificação do material construtivo, pois trata-se de uma área propensa à formação de condensação e de gelo.

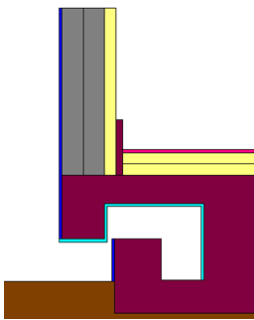
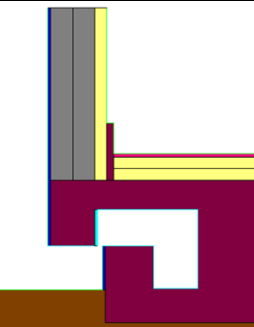
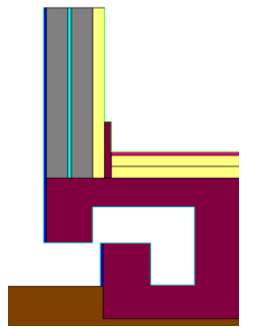
4.2.1. Soluções de melhoria

Para encontrar um valor de PSI mais favorável ao modelo inicial apresentado, as soluções de melhoria idealizadas foram:

- ❖ Alteração da posição do isolamento e variação da sua espessura;
- ❖ Aumento da área de abertura do desvão
- ❖ Alteração do tipo de modelo de pavimento

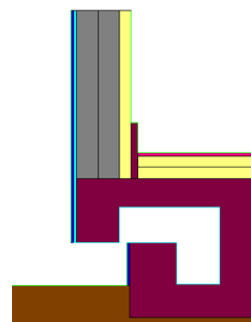
Na modelação todos os restantes elementos da solução construtiva será mantida, tal como as condições de fronteira. A Tabela 14 apresenta os valores obtidos de várias soluções com alteração do isolamento térmico e sua espessura.

Tabela 14 - Tabela das soluções e resultados para diferentes posições de isolamento e espessura

<p>Solução 1</p> <p>Isolamento térmico em todo o interior do desvão</p>					
Espessura Isolamento [m]	U_w [W/m ² .°C]	U [W/m ² .°C]	θ_{us} [°C]	L_{2D} [W/m ² .°C]	Ψ [W/m.°C]
0,03	0,260	0,126	-2,1	0,723	0,340
0,02	0,260	0,138	-1,2	0,734	0,341
<p>Solução 2</p> <p>Isolamento térmico no interior do desvão apenas colocado na envolvente em contacto com o exterior</p>					
Espessura Isolamento [m]	U_w [W/m ² .°C]	U [W/m ² .°C]	θ_{us} [°C]	L_{2D} [W/m ² .°C]	Ψ [W/m.°C]
0,03	0,260	0,143	-2,7	1,01	0,610
0,02	0,260	0,150	-1,7	0,958	0,553
<p>Solução 3</p> <p>Isolamento térmico no interior da envolvente vertical</p>					
Espessura Isolamento [m]	U_w [W/m ² .°C]	U [W/m ² .°C]	θ_{us} [°C]	L_{2D} [W/m ² .°C]	Ψ [W/m.°C]
0,03	0,215	0,153	-1,3	0,936	0,573
0,02	0,228	0,154	-1,2	0,948	0,572

Espessura Isolamento [m]		U_w [W/m ² .°C]	U [W/m ² .°C]	θ_{us} [°C]	L_{2D} [W/m ² .°C]	Ψ [W/m.°C]
0,03		0,215	0,153	-1,3	0,439	0,077
0,02		0,228	0,154	-1,2	0,466	0,089

Solução 4
Isolamento térmico no exterior da fachada



Verificando a Tabela 14, observa-se que para diferentes posições do isolamento térmico e diferentes espessuras, o valor do PSI altera-se notoriamente em todos os casos. Na solução 1, a colocação do isolamento no interior do desvão diminui consideravelmente o valor do PSI. Entre os valores das espessuras de isolamento, verifica-se também que, o valor de menor espessura com 20mm é mais favorável que o valor de 30mm. Esta conclusão está relacionada com o facto de uma menor espessura de isolamento térmico promover uma maior área de abertura e haver mais entrada de ar no desvão. Além disso, a temperatura superficial do desvão também diminuiu face ao modelo inicial, o que não é favorável à solução construtiva.

Na solução 2 os valores do PSI variam em relação às soluções anteriores, sendo mais favoráveis que a solução inicial, no entanto ligeiramente superiores ao da solução 1.

Na solução 3 verifica-se que os valores do PSI são próximos dos do modelo inicial, sendo até ligeiramente superior, não se tratando assim de uma melhoria.

Na solução 4 os valores do PSI são consideravelmente inferiores, tornando o valor do PSI quase nulo. Além disso, esta será a solução mais fácil de ser aplicada, pois só envolve a recuperação pelo exterior, não havendo necessidade de perturbar o funcionamento da empresa. No entanto, os valores no interior do desvão continuam a ser negativos. De modo a perceber o seu efeito da espessura de isolamento térmico, na Tabela 15, listam-se valores com espessuras entre os 4 a 7cm.

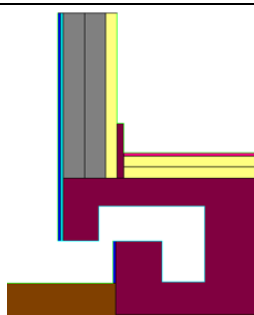
Tabela 15 - Tabela com novos valores de espessura da solução 4

Espessura Isolamento [m]	U_w [W/m ² .°C]	U [W/m ² .°C]	θ_{us} [°C]	L_{2D} [W/m ² .°C]	Ψ [W/m.°C]
0,04	0,203	0,152	-1,46	0,409	0,059
0,05	0,192	0,151	-1,57	0,388	0,050
0,06	0,183	0,150	-1,67	0,357	0,029
0,07	0,174	0,150	-1,77	0,342	0,023

Verifica-se que o aumento de espessura de isolamento no exterior, faz diminuir o valor do PSI, apresentando situações bastante favoráveis.

No entanto, o valor de temperatura superficial do desvão aumenta directamente com o aumento da espessura do isolamento térmico no exterior. Desta forma, a Tabela 16 analisa o modelo inicial, com isolamento térmico no exterior da fachada vertical (espessura de 3cm) e com aumento de área de abertura no desvão, de modo a solucionar a baixa temperatura superficial do desvão.

Tabela 16 - Tabela das soluções e resultados para o modelo com abertura de Desvão

Solução 5 Isolamento no exterior com aumento de abertura no desvão					
Espessura Isolamento [m]	U_w [W/m ² .°C]	U [W/m ² .°C]	θ_{us} [°C]	L_{2D} [W/m ² .°C]	Ψ [W/m.°C]
0,03	0,215	0,171	1,25	0,381	0,001
0,02	0,228	0,171	1,32	0,419	0,026

Assim, aumentando ligeiramente a área de abertura do desvão é possível verificar que as temperaturas superficiais também aumentam. Além disso, os valores de PSI, tornaram-se também muito mais baixos, tornando esta solução, uma solução ideal.

A solução seguinte, apresentada na Tabela 17 serve apenas como demonstração, uma vez que retirar o desvão não é uma solução vantajosa ao edifício de refrigeração.

Tabela 17 - Tabela das soluções e resultados para o modelo adaptado “Laje sobre Piso Térreo”

Solução 6 Solução construtiva sem o desvão – Solução adaptada ao modelo “Laje sobre piso térreo”				
Espessura Isolamento [m]	U_w [W/m ² .°C]	U [W/m ² .°C]	L_{2D} [W/m ² .°C]	Ψ [W/m.°C]
Sem isolamento	0,260	0,189	0,493	0,056
0,03	0,214	0,189	0,445	0,058
0,02	0,227	0,189	0,462	0,057

No entanto, analisando os resultados do PSI, os valores são muito mais baixos que a solução construtiva original, e esta poderia ser uma boa hipótese a ponderar. Além que, não seria necessário a colocação de isolamento, dado apresentarem valores de PSI relativamente baixos.

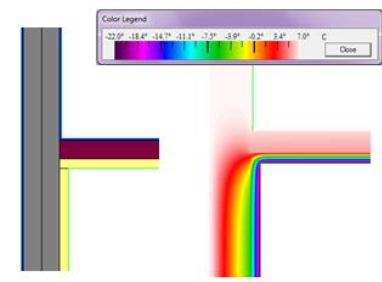
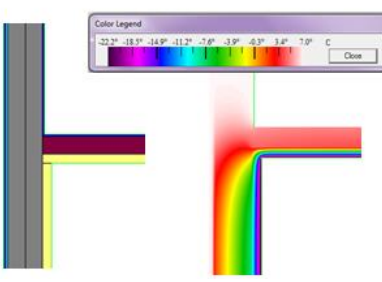
Estes cálculos foram efectuados segundo o modelo “Laje sobre o piso térreo”, dado que a laje do pavimento está em contacto com o terreno.

4.3. Ganhos térmicos pela cobertura

Neste subcapítulo serão analisados os ganhos térmicos pela cobertura. Entre a cobertura do edifício industrial e as câmaras existe uma platibanda que corresponde às dimensões de um piso não climatizado. As condições de fronteira são: espaço exterior, espaço interior da câmara e espaço não útil designado por desvão, tendo este último a mesma temperatura que o espaço exterior.

A Tabela 18 representa os valores de cálculos da solução inicial e final referente à cobertura deste edifício de refrigeração para a situação mais complexa (com viga na cobertura). A solução inicial (solução do modelo inicial do caso de estudo) consiste na ligação entre fachada da parede e a cobertura com viga de betão com espessura de 15cm, com a placas PUR no seu interior, e a solução final ou solução de melhoria, apresenta as mesmas características que a anterior solução, sendo aplicado isolamento térmico no exterior.

Tabela 18 - Tabela de valores da Solução inicial e final de ganhos térmicos pela cobertura

Solução Inicial				
U_w [W/m ² .°C]	U [W/m ² .°C]	L_{2D} [W/m ² .°C]	Ψ [W/m.°C]	
0,260	0,386	0,675	0,029	
Solução Final				
Espeçura Isolamento [m]	U_w [W/m ² .°C]	U_f [W/m ² .°C]	L_{2D} [W/m ² .°C]	Ψ [W/m.°C]
0,03	0,215	0,386	0,637	0,037
0,02	0,228	0,386	0,648	0,035

Dada a Tabela apresentada, verifica-se que na solução inicial, o valor de PSI é relativamente favorável. No entanto, a colocação do isolamento no exterior da fachada junto à cobertura da câmara frigorífica observa-se que os seus valores de PSI aumentaram. Deste modo, a solução final não apresenta uma solução de melhoria e a estrutura inicial de ligação na cobertura mantém-se inalterável.

Não foram apresentados os valores para a solução inicial simples (sem a viga de cobertura) pois os valores dos resultados obtidos foram aproximadamente iguais.

Solução Final de Melhoria

Assim, estão definidas as condições para apresentar a solução final da fachada em estudo. Uma vez que, a região do desvão é a mais afectada, apenas se estruturam alterações nessa zona. Deste modo, a solução final está representada na Figura 29, onde foi colocado isolamento térmico na fachada exterior e apenas na zona do desvão, criando a

necessidade de aumentar a área de entrada do desvão. Assim, o valor PSI apresenta-se negativo, muito próximo de zero, sendo um valor favorável nesta solução construtiva.

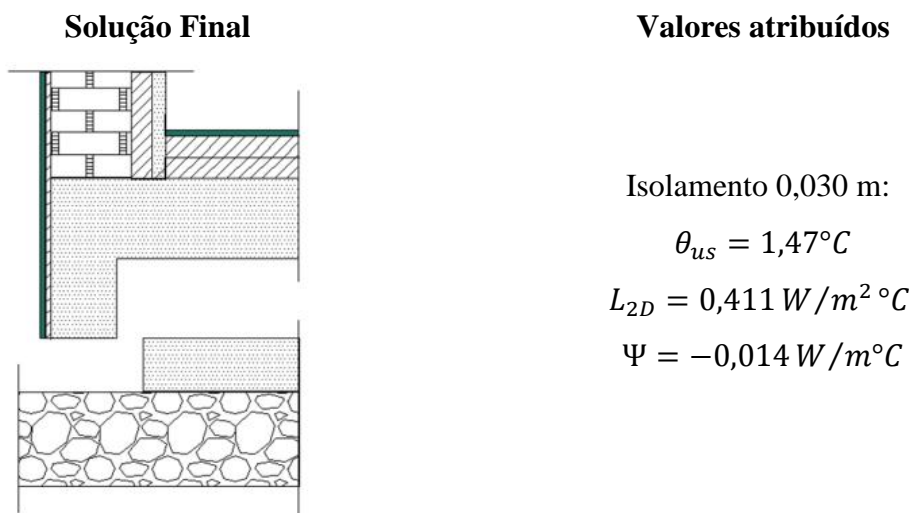


Figura 29 – Figura demonstrativa da solução final e seus valores

Apresentado o valor do PSI na solução de melhoria, são considerados ganhos térmicos mínimos pelo pavimento nesta solução. Desta forma, refere-se que não existe incremento térmico à ligação da solução construtiva entre o espaço interior da câmara frigorífica com o espaço exterior e desvão, pela ligação do piso suspenso.

4.4. Cargas térmicas da envolvente

A carga térmica de refrigeração das envolventes corresponde à quantidade de calor transmitida por condução através de paredes, tectos e pavimento. Esta carga irá depender da área de troca e do diferencial de temperatura. Assim, para a fachada em estudo, o cálculo de cargas térmicas representa o somatório das cargas da parede, das pontes térmicas lineares e do desvão. Ao longo de um ano, as cargas térmicas da câmara frigorífica irão variar consoante a temperatura exterior (admitindo que a temperatura interior se mantém constante).

A Figura 30 apresenta valores correspondentes às cargas térmicas da fachada exterior da câmara frigorífica em estudo da solução inicial ao longo de um ano.

O seu cálculo é dado por:

$$Q_{Ti} = Q_{par} + Q_{pt} + Q_{desv} \quad (41)$$

A carga térmica total é a soma do produto da área da zona da fachada da envolvente a considerar pelo respectivo coeficiente de transmissão térmica, com o produto do comprimento da ponte térmica linear pelo respectivo coeficiente de transmissão térmica linear e com a carga térmica transmitida pela temperatura do desvão, tal como mostra a expressão:

$$Q_{Ti} = \left(\sum (U_{par} \times A_{par}) + \sum (\Psi_{pt,T} \times B_{pt,T}) \right) \Delta\theta + \sum Q_{desv\ si} \quad (42)$$

onde:

Q_{par} – Carga térmica transmitida pela parede homogénia da câmara, W

$Q_{pt,T}$ – Carga térmica transmitida pelas pontes térmicas lineares totais (pontes térmicas lineares do pavimento e do tecto), W

$Q_{desv\ si}$ – Carga térmica transmitida pela superfície do desvão da solução inicial, W

U_{par} – Coeficiente de transmissão térmica da parede homogénia da câmara, $W/m^2 \cdot ^\circ C$

A_{par} – Área da fachada da parede homogénia da câmara, m^2

$B_{pt,T}$ – Comprimento linear das pontes térmicas lineares, m

$\Delta\theta$ – Diferencial de temperatura entre a temperatura do espaço exterior da câmara e temperatura interior (localização – Figueira da Foz) $^\circ C$

Analisando a Figura 30, observa-se que as cargas térmicas apresentam maiores valores nas temperaturas mais elevadas (horas de verão). Assim, supondo que a temperatura interior da câmara frigorífica é constante, a temperatura do espaço ambiente é um dos principais factores de variação no cálculo das cargas térmicas (valores obtidos do programa CLIMAS –SCE, Anos Meteorológicos de Referência de Simulação dinâmica, LNEG, anexo B).

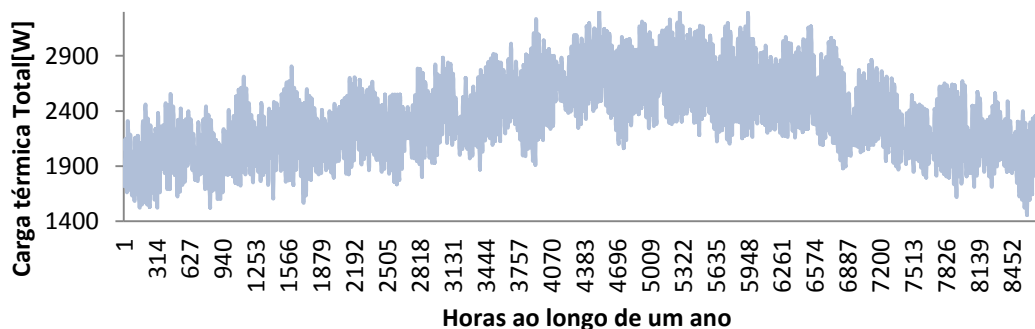


Figura 30 - Gráfico de cargas térmicas totais da fachada exterior ao longo de um ano

A carga térmica transmitida pelo desvão para espaços refrigerados é calculada pela seguinte equação:

$$Q_{desvão} = A(\theta_g - \theta_{us}) / (R_{si} - R_f) \quad (43)$$

onde:

θ_g – Temperatura do solo à superfície, °C

θ_{us} – Temperatura do desvão, °C, calculada através da equação 31

R_f – Resistência térmica da laje suspensa do desvão m²C/W

A Figura 31, representa o gráfico para as cargas do desvão do modelo da câmara frigorífica, na solução inicial apresentada, $Q_{desvão\ si}$, e na solução final de melhoria, $Q_{desvão\ sf}$, onde também a temperatura exterior e a temperatura do solo à superfície são um dos principais factores de variação no cálculo das cargas térmicas para esta superfície.

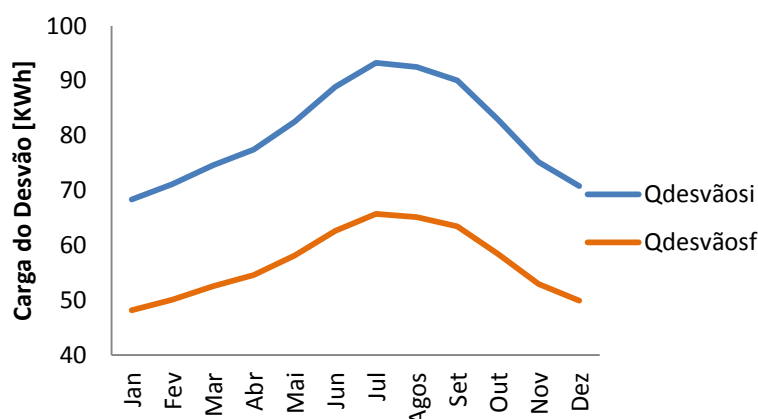


Figura 31 - Gráfico com os valores de horários de carga térmica do desvão no período de um ano (solução inicial e solução final)

Como é possível verificar, a carga térmica do desvão na solução inicial é bem superior à carga térmica do desvão na solução final (embora a solução final apresentasse temperaturas superficiais do desvão ligeiramente superiores: média dos valores da solução final da temperatura superficial do desvão =8,7°C e média dos valores da solução inicial da temperatura superficial do desvão =5,6°C). Logo, também este parâmetro faz diminuir o valor de cálculo das cargas térmicas na solução final.

Assim, a Figura 32 representa a desagregação das várias cargas térmicas da envolvente, correspondente à solução inicial do modelo do caso de estudo:

Cargas Térmicas da fachada

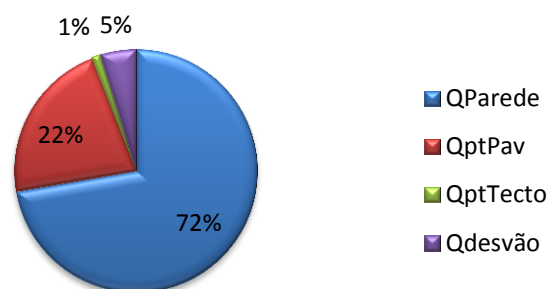


Figura 32 - Gráfico da desagregação das Cargas Térmicas da envolvente no período de um ano

Verifica-se que a carga térmica da parede homogénea apresenta a maior parcela, seguida da carga térmica da ponte térmica linear pelo pavimento. Assim, a percentagem das cargas de pontes térmicas lineares totais representam 23% das cargas térmicas da fachada de envolvente.

A análise da percentagem de ganhos térmicos é obtida através da relação entre a carga térmica total da situação inicial com pontes térmicas e a carga térmica total da situação ideal por minimização das pontes térmicas.

A carga térmica total correspondente à situação ideal (Q_{Tf}) resulta do produto da área da parede homogénea a considerar pelo seu coeficiente de transmissão térmica, do cálculo das pontes térmicas lineares do tecto e o valor da carga térmica do desvão na solução final, ou seja, retirando o cálculo das pontes térmicas lineares pelo pavimento (admitindo que o PSI final das pontes térmicas lineares pelo pavimento é zero):

$$Q_{Tf} = \sum (U_{par} \times A_{par}) \Delta\theta + \sum (\Psi_{tecto} \times B_{tecto}) + \sum Q_{desv\ sf} \quad (44)$$

Deste modo, obtendo todos os valores da equação, a percentagem de redução de ganhos térmicos ao longo de um ano entre a envolvente de estudo, de acordo com a solução final apresentada, e a solução inicial é de

$$\% \text{ redução de ganhos térmicos} = \left(\frac{Q_{Ti} - Q_{Tf}}{Q_{Ti}} \right) \times 100 = 23\% \quad (45)$$

Em termos económicos, e sabendo que o custo de electricidade (facturação da empresa no ano 2012) apresenta um valor de 0,11€/kWh, é possível calcular a poupança

na facturação eléctrica anual para a fachada em estudo, como é apresentado na Tabela 19 (os valores foram atribuídos para um COP da câmara frigorífica de 4).

Tabela 19 – Tabela de facturação anual para a envolvente de estudo da solução inicial e da solução final

	Facturação anual energia eléctrica da envolvente de estudo	Facturação anual energia eléctrica da envolvente de estudo (por m^2)
Solução Inicial	554,73 €	3,30 €
Pontes Térmicas Lineares	121,14 €	0,72 €
Solução Final	425,87 €	2,53 €
Poupança	23%	

Assim, a solução final apresentada para a fachada da câmara frigorífica permite uma redução de custos em 23% anuais na factura de energia eléctrica nesta empresa de refrigeração referentes à parte da envolvente da fachada estudada, ou seja, ao valor despendido pelos ganhos térmicos da fachada com envolvente exterior e pelo pavimento (ver cálculos detalhados no Anexo C).

Assim, resta calcular o investimento necessário a aplicar na solução final. Sabendo que o preço de custo do isolamento XPS, para uma espessura de 3cm na parede tem um valor de $3,752€/m^2$ (*Topeca*) e que a área exterior a aplicar perfaz um total de $24 m^2$ (uma vez que seria aplicado apenas na zona do desvão) o seu custo de aplicação seria de aproximadamente 90euros (fora custos adicionais de construção e custos de aumento de desvão). Este valor teria um *payback* de menos de 1 ano (9 meses), com a poupança estabelecida na sua aplicação.

Os resultados anteriormente apresentados referem-se a uma localização específica, Figueira da Foz, onde está situado o edifício de refrigeração. A Figura 33 representa o gráfico de cargas térmicas da envolvente em estudo, caso esta estivesse inserida em diferentes localidades (Coimbra e Guarda) ao longo de um ano. É possível ainda verificar, os diferentes valores de cargas térmicas da solução inicial, Q_{ti} , e consequente solução final (melhoria) do edifício de refrigeração, Q_{tf} .

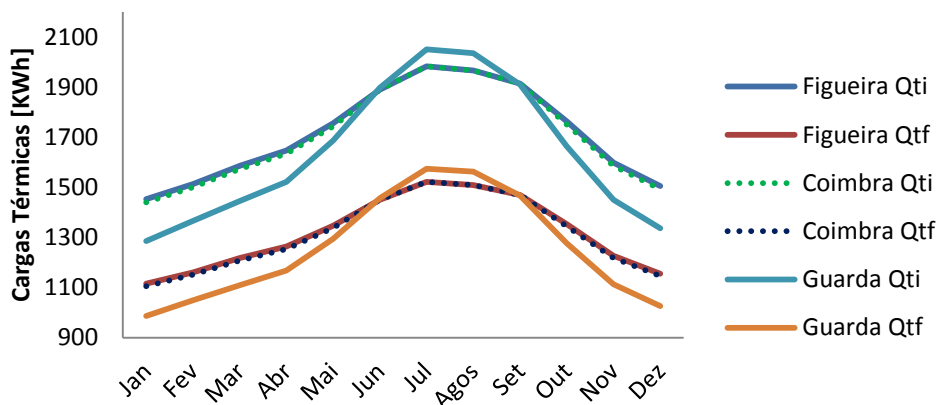


Figura 33 - Gráfico representativo das Cargas Iniciais e Finais para várias localidades ao longo de um ano para a mesma envolvente

Através da Figura 33 verifica-se que as cargas térmicas da fachada do edifício de refrigeração variam proporcionalmente nas diferentes localidades. Ou seja, comparando em termos percentuais os valores de cargas térmicas da solução inicial com os valores das cargas térmicas da solução final, a percentagem de redução ganhos térmicos na fachada de estudo apresenta sempre o mesmo valor, 23%.

Admite-se assim que, embora as cargas térmicas estejam dependentes da temperatura das envolventes, a sua redução térmica não é variável com este factor de temperatura, mas sim com o valor PSI da solução construtiva.

Verifica-se ainda que os valores de carga térmica de Guarda são mais baixos nos meses de frio e apresentam valores mais altos nos meses de calor que as restantes regiões geográficas, devido às condições atmosféricas existentes nessa região. Enquanto que, os valores de carga térmica da Figueira da Foz e de Coimbra sobrepõem-se, quase sendo indistinguível os seus gráficos.

5. CONCLUSÃO

Na indústria de refrigeração é muito importante a manutenção da temperatura interior, quer em termos energéticos, quer em termos económicos, quer em termos de conservação de produtos e devem ser minimizados todos os ganhos térmicos possíveis a ocorrer nas câmaras frigoríficas.

Das auditorias realizadas no âmbito do projecto *InovEnergy*, foram detectadas várias anomalias nas empresas de refrigeração visitadas, tendo este trabalho sido focado no estudo de soluções de correcção de pontes térmicas lineares nas fachadas exteriores de uma câmara frigorífica. Posteriormente foi realizado um estudo dos métodos de cálculo dos ganhos térmicos por pavimentos e coberturas.

Todos estes cálculos foram efectuados com ajuda do programa *THERM*, que após o seu estudo de funcionamento e de estruturação, ou seja, após análise dos planos de corte a serem aplicados, os valores dos coeficientes térmicos pretendidos foram adquiridos no programa, tal como o seu diagrama de linhas de temperatura. As normas ISO 10211:2007 e ISO 13370:2007 foram cruciais no desenvolvimento deste estudo, pois padronizaram os métodos de cálculo elaborados.

O caso de estudo da fachada exterior da câmara frigorífica foi também estruturado pelo programa e feitas análises de cálculo de forma a encontrar a solução ideal ao problema apresentado: fachada em degradação junto ao desvão. Concluiu-se que esta degradação dos elementos construtivos se devia à formação de gelo instalada na superfície superior do desvão que era facilmente corrompido, devido à sua localização. Assim, foi apresentada uma solução construtiva que consistia no aumento da área de abertura do desvão e aplicação de isolamento térmico no exterior da fachada.

Quanto aos ganhos térmicos pela cobertura, conclui-se que a colocação do isolamento pioraria o valor do PSI e a sua estrutura mantém-se inalterável. No entanto, seria de esperar que os seus valores fossem um pouco mais altos devido à formação de gelo no tecto, mas como essa localização realiza-se com maior gravidade na envolvente interior da fachada, ao lado da porta de acesso, a razão principal de formação de gelo deve-se aos ganhos térmicos provocados pelos acessos da porta à antecâmara (espaço exterior da antecâmara fracamente refrigerado).

No cálculo das cargas térmicas das envolventes, devem ser introduzidos todos os factores que agravam os ganhos térmicos, uma vez que se trata de um elevado diferencial de temperatura, tal como as suas dimensões de área e comprimento.

Todos estes cálculos foram específicos para uma determinada câmara frigorífica, numa determinada localização, com determinadas condições térmicas, assim, caso um destes factores se altere, os seus valores de cargas térmicas também se alteram. Deste modo, foi verificado a variação das cargas térmicas para diferentes localidades ao longo de um ano, tendo-se observado que, embora as cargas térmicas variem consoante o diferencial de temperaturas de cada localização, este factor não altera a redução percentual entre a solução inicial do modelo de estudo e a solução de melhoria. O PSI é assim um parâmetro que depende da solução construtiva do modelo e da sua estrutura na câmara frigorífica, e embora seja um incremento térmico ao espaço refrigerado, não é alterado pelo diferencial de temperatura das envolventes.

O tema estudado nesta dissertação é apenas um de muitos no mundo da indústria de refrigeração, e cada vez mais, procura-se novas soluções que melhorem a eficiência da empresa, satisfazendo o cliente a nível de qualidade e preço, e satisfazendo o operador deste tipo de edifícios.

Um dos trabalhos futuros a desenvolver, seria o estudo de melhoria aos acessos às câmaras frigoríficas de modo a prevenir a formação de gelo, sendo interessante estudar os métodos existentes ou criar novas soluções de melhoria. Outro trabalho interessante, seria o estudo de um edifício de refrigeração com pavimento com ductos de aquecimento, em vez do desvão ventilado e a posterior comparação entre os dois modelos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, I., Corvacho, H., (1987), “Reabilitação de zonas de ponte térmica da envolvente dos edifícios” Universidade do Porto, Porto
- Anderson, B., (2006), “Conventions for U-value calculations”, BR 443:2006, second edition, Scotland
- ASHRAE HANDBOOK (2006), Refrigeration, USA, Chapter 14, “Refrigerated – Facility Design”
- Baptista, P., Gaspar P., Oliveira, J., (2007), “Higiene e Segurança Alimentar na Distribuição de Produtos Alimentares”, Forvisão, Consultoria em formação Integrada, Guimarães
- Castro, J., (2010), “Quantificação dos coeficientes de Transmissão Térmica Linear – Pontes Térmicas”, Universidade do Porto, Porto
- Catálogo Online de Pontes Térmicas Lineares, ITeCons, <http://www.itecons.uc.pt/catalogoptl/>
- Chagas, J., (2013), YORK Refrigeration, “Projecto e construção de câmaras frigoríficas”, Contracting Division, Joinville – SC
- CLIMAS-SCE 1_05, 2014, Anos Meteorológicos de Referência para simulação dinâmica, LNEG, <http://www.lneg.pt/servicos/328/2263/>
- Decreto-Lei nº 118/2013 de 20 de Agosto, “Diário da República, 2ª série – Nº234 – 3 de Dezembro de 2013”, Lisboa
- Diário da República, 2ª serie – Nº 234 – 3 de Dezembro de 2013, 35088
- EN ISO 10211 (2007), “Thermal bridges in building construction – heat flows and surface temperatures – Detailed calculations”, ON – Committee ON-K 175, Austrian Standards Institute, Wien
- Environment and energy (2010), Eurostat, Statistics in focus 43/2010, “Statistical aspects of the energy economy in 2009” http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-SF-10-043/EN/KS-SF-10-043-EN.PDF
- Enformar (2009), “Guia de Boas Práticas de Higiene e Segurança Alimentar”, Câmara Municipal do Porto – Divisão de Feiras, Mercados e Inspeção Sanitária, Porto
- European Standard, EN ISO 14683 (2008), “Thermal Bridges in building construction”, UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia

- Ferreira,V.,Lamas F.,Gaspar A.,Costa J.,Baranda,J., (2014), InovEnergy, “Caracterização dos sistemas de Refrigeração da Industria agro-industrial”, ADAI - LAETA, DEM - UC, Coimbra
- Garcia,J.,Fontes,P.,(2007), “Termografia de Infravermelhos Aplicada a Instalações de Rfrigeração”,EST Setubal, Setubal, Portugal
- Industrial Refrigeration Handbook (2004), Digital Engineering Library, Chapter 17 “The refrigeration and freezing of food”
- Industrial Refrigeration Handbook (2004), Digital Engineering Library, Chapter 18 “Refrigeration Load Calculations”
- Industrial Refrigeration Handbook (2004), Digital Engineering Library, Chapter 19 “Refrigerated Structures”
- International Standard ISO 13370 (second edition 2007), “Thermal performance of buildings – Heat transfer via the ground – Calculation methods”, Geneva, Switzerland
- MCRMA Technical Paper (2006), “Conventions for Calculating U-Values, F-values and, Ψ – Values for metal cladding systems using two – and three – Dimensional Thermal Calculations”, The metal Cladding & Roofing Manufacturers Association Limited
- Nyberg,H.,(2011), “Thermal bridges at foundations, Evaluations of heat calculation methods”,CHALMERS, Sweden
- Norma Europea (2008),UNI EN ISO 14683, Ponti termici in edilizia, Coefficiente di trasmissione termica lineica, UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia
- Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos edificios D.L. 80/2006 de 4 de Abril, ADENE, Agência para a energia
- Sá,E.,Alexandre,J.(2007), “Auditorias Energéticas no Sector de Frio Industrial. Medidas de Poupança e de Eficiência Energética”, 8ºCongresso IBEROAMERICANO de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto
- Samuel,A. (2012), “Analysis of Thermal Bridges”, Scottish Energy Systems Group embedding simulation within energy sector businesses, University of Strathclyde
- Santos, C., (2006), “Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios”, Versão Actualizada, Edifícios ITE 50, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa
- Software FLIR Tools, ALAVA INGENIEROS, www.flir.com

- Sousa, L. et al,(2014) “Manual de Boas práticas Construtivas”, ITECons – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção, Coimbra, Portugal
- Stieldorf,K.,(2013),”Heat losses from large buildings through the ground”, Institut fur hochbau, Vienna, Austria
- Topeca online, Ourém, Portugal, [http://www.topeca.pt/index.php/pt/section/subsub/38/THERM_6.3/Window_6.3_NFRC_Simulation_Manual_\(2013\),_Lawrence_Berkeley_National_Laboratory](http://www.topeca.pt/index.php/pt/section/subsub/38/THERM_6.3/Window_6.3_NFRC_Simulation_Manual_(2013),_Lawrence_Berkeley_National_Laboratory)
- THERM 6.3 validation according to EN ISO 10211:2007, Passiefhuis-Platform, berchem
- Wang, S., (2000), “ Handbook of air conditioning and refrigeration” Second Edition, Mcgraw – Hill, Library of Congress
- West, C. (2007), “Thermal Bridge analysis”, Passive House Academy, Eco Houses of Vermont, LLC, Jericho, Vt
- William,T., Delsante,A.,“Investigation of a model for the ventilation of suspended floors”, University of Adelaide, ANZAScA
- White,D., (2009), “Thermal Bridge analysis for the PHPP, passive house conference” PH Consultant Session, Urbana

ANEXO A

Tabela 20 - Excel de cálculo dos valores das soluções construtivas para uma fachada e pavimento sobre espaço não útil

CASO 6- cobertura com isol exterior 30mm			
R_f	2,16	2,162	m^2C/W
	<i>Layer</i>	<i>d</i>	<i>lamb</i>
	1	0,080	0,037
	2	0,000	1,000
	3	0,000	1,000
	4	0,000	1,000
	5	0,000	1,000
	6	0,000	1,000
	S	0,08	m
R_{si}	0,17	m^2C/W	
R_{se}	0,17	m^2C/W	
U_f		0,400	W/m^2C
Parameter			
R_w		4,488	m^2C/W
	<i>Layer</i>	<i>d</i>	<i>lamb</i>
	1	0,020	1,300
	2	0,030	0,037
	3	0,150	0,200
	4	0,150	0,200
	5	0,080	0,037
	6	0,000	1,800
	S	0,43	m
R_{si}	0,13	m^2C/W	
R_{se}	0,04	m^2C/W	
U_w		0,215	W/m^2C
Ufactor int		L(m)	
	L(m)		
Ufactor (int)	2,000	0,32640	W/m^2C
L2D		0,65280	W/m^2C

hw	1,00	<i>m</i>
hf	1,00	<i>m</i>

PSI	0,03848	W/mC
------------	----------------	-------------

Tabela 21 - Excel de cálculo dos valores das soluções construtivas para uma fachada e pavimento em contacto com o terreno

Solução Inicial

Parâmetro

A	103,1	<i>m²</i>	
b	2,0	<i>m</i>	
c	51,6	<i>m</i>	
P	107,1	<i>m</i>	
w	0,32	<i>m</i>	
B'	1,93	<i>m</i>	
h	0,92	<i>m</i>	
z	0,22	<i>m</i>	
<i>Lamb solo</i>	2,00	<i>W/mC</i>	
R_f		4,524	<i>m²C/W</i>
	<i>elemento</i>	<i>d</i>	<i>lamb</i>
	1	0,200	2,000
	2	0,080	0,037
	3	0,080	0,037
	4	0,020	0,200
	5	0,000	1,000
	6	0,000	1,000
	S	0,38	<i>m</i>
R_{si}	0,10	<i>m²C/W</i>	
R_{se}	0,10	<i>m²C/W</i>	
d_t		9,769	<i>m</i>
U_f		0,212	<i>W/m²C</i>

Parâmetro

R_g		0,250	<i>m²C/W</i>
	<i>elemento</i>	<i>d</i>	<i>lamb</i>
	1	0,500	2,000

	2	0,000	1,000
	3	0,000	1,000
	4	0,000	1,000
	5	0,000	1,000
	6	0,000	1,000
	S	0,50	m
d_g	9,769		m
U_g	0,122		W/m ² C

Parâmetro

D	0,00	m	
dn	0,000	m	
Rn		0,00	m ² C/W
	elemento	d	lamb
		0,000	1,000
R'	0,000		m ² C/W
d'	0,000		m
Ψ_{g,e}	0,000		W/mC
U_g	0,122		W/m ² C

Parâmetro

D	0,00	m	
dn	0,000	m	
Rn		0,00	m ² C/W
	elemento	d	lamb
		0,000	1,000
R'	0,000		m ² C/W
d'	0,000		m
Ψ_{g,e}	0,000		W/mC
U_g	0,122		W/m ² C

Total U_g

U_g	0,122		W/m ² C
----------------------	-------	--	--------------------

Parâmetro

R_w		3,678	m ² C/W
	elemento	d	lamb
	1	0,080	0,037
	2	0,020	1,300

	3	0,150	0,200
	4	0,150	0,200
	5	0,000	1,000
	6	0,000	1,000
	S	0,40	m
R_{si}	0,13	m^2C/W	
R_{se}	0,04	m^2C/W	
U_w		0,260	W/m^2C

Parâmetro

v	5	m/s
fw	0,05	-
e	0,0012	m^2/m

U_x	0,473	W/m^2C
-------	-------	----------

(Se $z > 0,5$ m)

Parâmetro

dw		m
U_{bw}		W/m^2C
U_{bf}		W/m^2C

Parameter

$1/U$	6,405	m^2C/W
U	0,156	W/m^2C

Parâmetro

q_i	-23,0	$^{\circ}C$
q_e	7,0	$^{\circ}C$
r	1,230	kg/m^3
c_p	1000	J/kgC
V	0,018957	m^3/s
U_q	0,122	W/m^2C
q_c	-0,857	$^{\circ}C$

Ufactor int

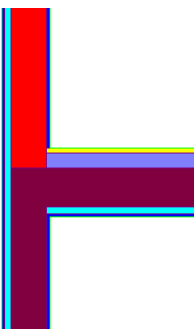
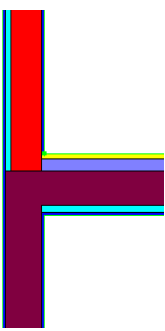
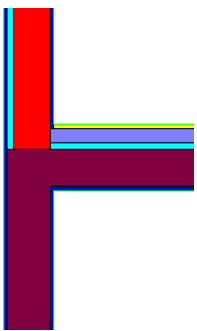
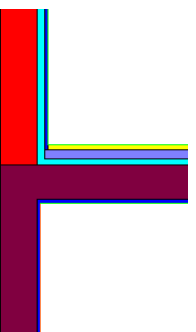
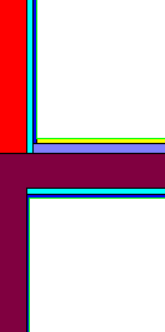
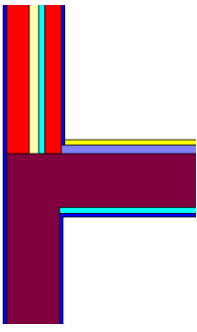
L(m)

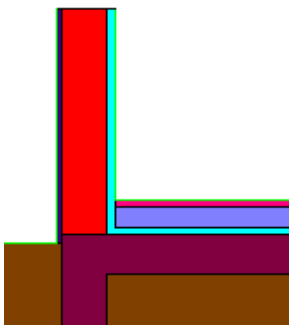
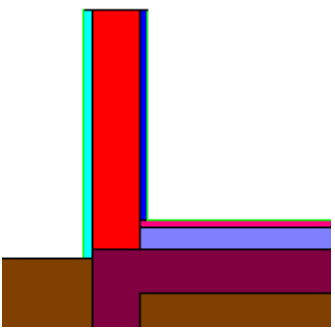
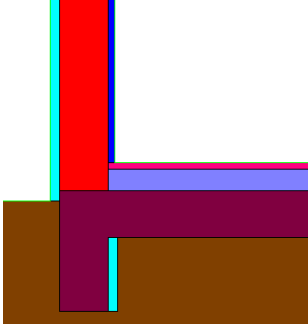
Liu	0,22880	1,000	0,22880	W/m^2C
Lue	0,39220	0,250	0,09805	W/m^2C
Lie	0,55050	1,630	0,89732	W/m^2C
$L2D$			0,96595	W/m^2C

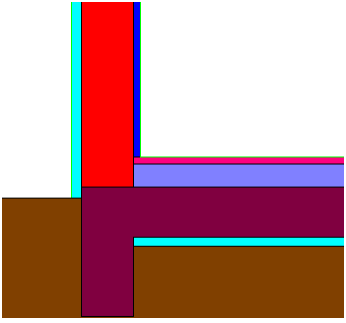
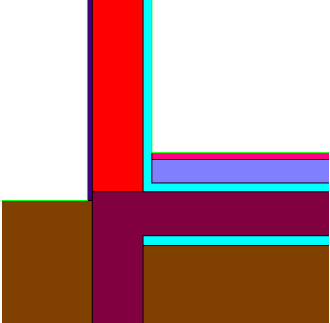
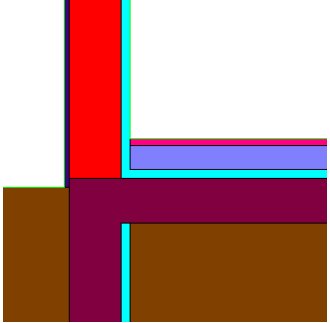
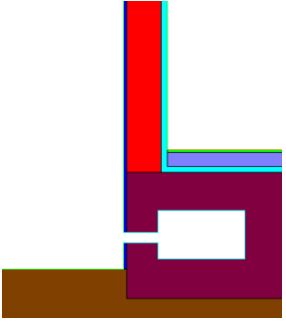
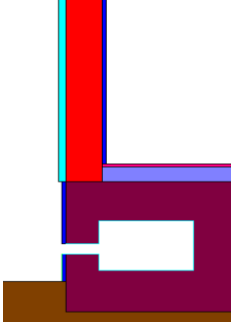
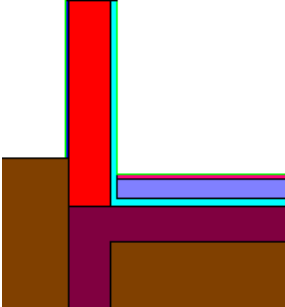
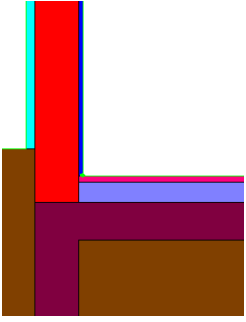
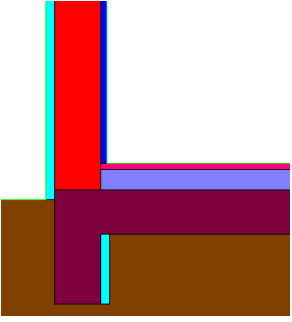
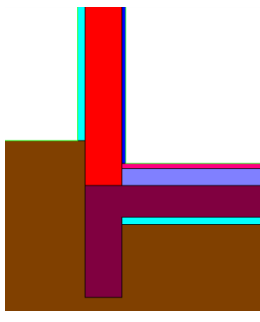
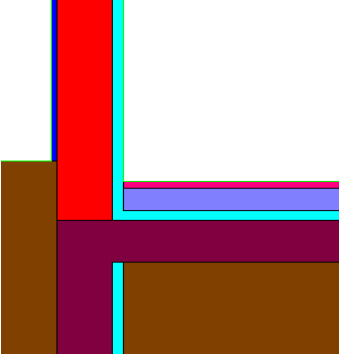
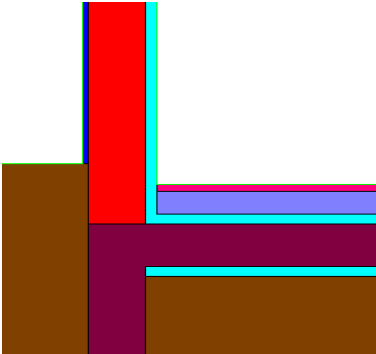
hw	1,0	m
PSI	0,55537	W/mC

ANEXO B

Tabela 22 - Tabela demonstrativa dos modelos dos exemplos

Ligação entre fachada e espaço não útil		
Isolamento pelo exterior	Isolamento acima da laje	Isolamento acima da laje pelo interior
		
Isolamento pelo interior	Isolamento abaixo da laje	Isolamento c/ caixa-de-ar
		

Ligação entre fachada e pavimento em contacto com solo		
Laje sobre Piso Térreo		
Isolamento interior	Isolamento exterior	Isolamento exterior vertical
		

Laje sobre Piso Térreo		
Isolamento exterior horizontal	Isolamento interior horizontal	Isolamento Interior vertical
		
Piso Suspenso		Desvão Aquecido
Isolamento Interior	Isolamento exterior	Isolamento Interior
		
Desvão Aquecido		
Isolamento exterior	Isolamento exterior vertical	Isolamento exterior horizontal
		
Desvão Aquecido		
Isolamento interior vertical	Isolamento interior horizontal	
		

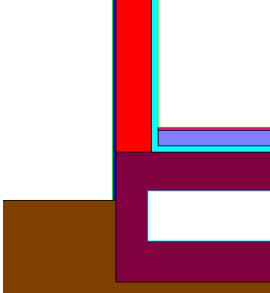
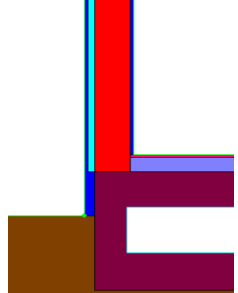
Desvão Não aquecido	
Isolamento interior	Isolamento exterior
	

Tabela 23 - Tabela com os valores de PSI nos vários modelos de pavimento com terreno [W/m.°C]

	Piso Térreo		Piso Suspenso		Desvão aquecido		Desvão não aquecido	
	Isol ext	Isol int	Isol ext	Isol int	Isol ext	Isol int	Isol ext	Isol int
	0,249	0,122	0,311	0,373	0,623	0,140	0,031	0,146
Isol vertical	0,461	0,153			0,585	0,135		
Isol horizontal	0,656	0,228			0,676	0,174		



Figura 34 - Figura demonstrativa da fachada exterior do edifício do caso de estudo e exemplo da câmera termográfica usada na amostragem

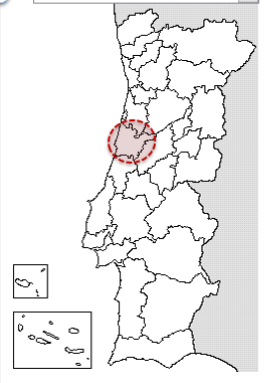
Tabela 24 -Tabela de Referência para a obtenção das Temperaturas exteriores ao longo de um ano nas diversas localidades

Anos Meteorológicos de Referência para simulação dinâmica

versão 1.05 (13 fevereiro 2014)

Seleção por município

Figueira da Foz



Zona climática

NUTS 3: Baixo Mondego
 Latitude: 40.3 °N (nominal)
 Longitude: 8.6 °W (nominal)
 Altitude: 67 m (referência)

Local específico

Município: Figueira da Foz
 Altitude: 9 m

Dados climáticos

Referência: Neste local

Estação de aquecimento	
Período: 6.3	6.3 meses
T média: 9.7	10.0 °C
Graus-dia: 1304	1246 °C
Estação de arrefecimento	
T média: 20.9	20.9 °C

Zonas de verão e inverno

V 2 I 1

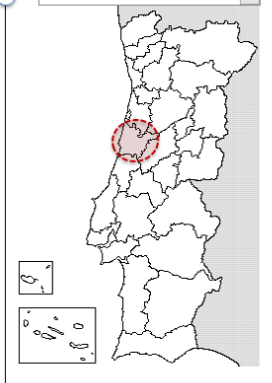
preparar ficheiro
EPW (formato EnergyPlus Weather)

Anos Meteorológicos de Referência para simulação dinâmica

versão 1.05 (13 fevereiro 2014)

Seleção por município

Coimbra



Zona climática

NUTS 3: Baixo Mondego
 Latitude: 40.3 °N (nominal)
 Longitude: 8.6 °W (nominal)
 Altitude: 67 m (referência)

Local específico

Município: Coimbra
 Altitude: 67 m

Dados climáticos


Referência: Neste local

Estação de aquecimento	
Período: 6.3	6.3 meses
T média: 9.7	9.7 °C
Graus-dia: 1304	1304 °C
Estação de arrefecimento	
T média: 20.9	20.9 °C

Zonas de verão e inverno

V 2 I 2

preparar ficheiro
EPW (formato EnergyPlus Weather)



Software para Políticas Públicas

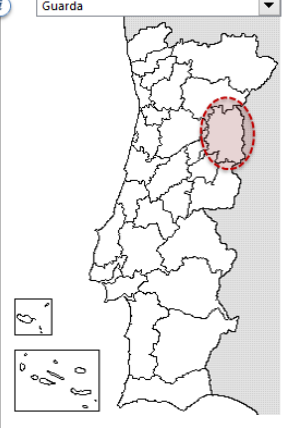
Sistema Nacional de Certificação de Edifícios
Decreto-Lei 118/2013 de 20 agosto

Anos Meteorológicos de Referência para simulação dinâmica

versão 1.05 (13 fevereiro 2014)

Seleção por município

Guarda



Zona climática

NUTS 3: Beira Interior Norte
 Latitude: 40.6 °N (nominal)
 Longitude: 7.1 °W (nominal)
 Altitude: 717 m (referência)

Local específico

Município: Guarda
 Altitude: 717 m

Dados climáticos


Referência: Neste local

Estação de aquecimento	
Período: 7.5	7.5 meses
T média: 6.3	6.3 °C
Graus-dia: 1924	1924 °C
Estação de arrefecimento	
T média: 21.7	21.7 °C

Zonas de verão e inverno

V 2 I 3

preparar ficheiro
EPW (formato EnergyPlus Weather)



Software para Políticas Públicas

Sistema Nacional de Certificação de Edifícios
Decreto-Lei 118/2013 de 20 agosto

ANEXO C

Tabela 25 - Tabela de cálculo da carga térmica da envolvente de estudo com pontes térmicas lineares e seus custos ao longo de 24h

H	Text °C	Tint °C	Tdesvaoi °C	Q desvao W	Qdesvaoi W	Tdesvao f °C	Qdesvao f W	Qdesvaof W	Qpar W	Qpt W	Qpt tecto W	Qtot W	Q final	Et=Q*H kWh(t)	Eel=Ete/EER kWh(el)	Custototal €	CustoPT €	Custo s/PT €
1	7,39	-23	-0,57733	-86,4449	86,44485	1,777282	-60,8975	60,89748	1327,44	401,15	21,88	1836,91	1410,21	1,84	0,46	0,05 €	0,01 €	0,04 €
2	6,79	-23	-1,02003	-84,7381	84,73814	1,288096	-59,6952	59,69516	1301,23	393,23	21,45	1800,64	1382,37	1,80	0,45	0,05 €	0,01 €	0,04 €
3	6,39	-23	-1,31516	-83,6003	83,60034	0,961972	-58,8936	58,89362	1283,76	387,95	21,16	1776,46	1363,81	1,78	0,44	0,05 €	0,01 €	0,04 €
4	5,99	-23	-1,6103	-82,4625	82,46253	0,635848	-58,0921	58,09207	1266,28	382,67	20,87	1752,29	1345,25	1,75	0,44	0,05 €	0,01 €	0,04 €
5	5,69	-23	-1,83165	-81,6092	81,60918	0,391255	-57,4909	57,49091	1253,18	378,71	20,66	1734,15	1331,33	1,73	0,43	0,05 €	0,01 €	0,04 €
6	5,49	-23	-1,97921	-81,0403	81,04027	0,228192	-57,0901	57,09014	1244,44	376,07	20,51	1722,06	1322,05	1,72	0,43	0,05 €	0,01 €	0,04 €
7	5,39	-23	-2,05299	-80,7558	80,75582	0,146661	-56,8897	56,88975	1240,08	374,75	20,44	1716,02	1317,41	1,72	0,43	0,05 €	0,01 €	0,04 €
8	5,79	-23	-1,75786	-81,8936	81,89363	0,472786	-57,6913	57,6913	1257,55	380,03	20,73	1740,20	1335,97	1,74	0,44	0,05 €	0,01 €	0,04 €
9	6,79	-23	-1,02003	-84,7381	84,73814	1,288096	-59,6952	59,69516	1301,23	393,23	21,45	1800,64	1382,37	1,80	0,45	0,05 €	0,01 €	0,04 €
10	8,19	-23	0,01293	-88,7205	88,72047	2,42953	-62,5006	62,50057	1362,38	411,71	22,46	1885,26	1447,34	1,89	0,47	0,05 €	0,01 €	0,04 €
11	9,79	-23	1,193459	-93,2717	93,27169	3,734027	-65,7068	65,70676	1432,27	432,83	23,61	1981,98	1521,58	1,98	0,50	0,05 €	0,01 €	0,04 €
12	11,19	-23	2,226422	-97,254	97,25402	4,875462	-68,5122	68,51217	1493,42	451,31	24,62	2066,60	1586,55	2,07	0,52	0,06 €	0,01 €	0,04 €
13	12,19	-23	2,964252	-100,099	100,0985	5,690772	-70,516	70,51604	1537,10	464,51	25,34	2127,04	1632,95	2,13	0,53	0,06 €	0,01 €	0,04 €
14	12,49	-23	3,185601	-100,952	100,9519	5,935365	-71,1172	71,1172	1550,20	468,47	25,55	2145,18	1646,87	2,15	0,54	0,06 €	0,01 €	0,04 €
15	12,49	-23	3,185601	-100,952	100,9519	5,935365	-71,1172	71,1172	1550,20	468,47	25,55	2145,18	1646,87	2,15	0,54	0,06 €	0,01 €	0,04 €
16	12,29	-23	3,038035	-100,383	100,383	5,772303	-70,7164	70,71642	1541,47	465,83	25,41	2133,09	1637,59	2,13	0,53	0,06 €	0,01 €	0,04 €
17	11,99	-23	2,816686	-99,5296	99,52963	5,52771	-70,1153	70,11526	1528,36	461,87	25,19	2114,95	1623,67	2,11	0,53	0,06 €	0,01 €	0,04 €
18	11,59	-23	2,521554	-98,3918	98,39182	5,201586	-69,3137	69,31372	1510,89	456,59	24,90	2090,78	1605,11	2,09	0,52	0,06 €	0,01 €	0,04 €
19	11,09	-23	2,152639	-96,9696	96,96956	4,793931	-68,3118	68,31178	1489,05	449,99	24,54	2060,55	1581,91	2,06	0,52	0,06 €	0,01 €	0,04 €
20	10,59	-23	1,783723	-95,5473	95,54731	4,386275	-67,3099	67,30985	1467,21	443,39	24,18	2030,33	1558,71	2,03	0,51	0,05 €	0,01 €	0,04 €
21	9,99	-23	1,341025	-93,8406	93,8406	3,897089	-66,1075	66,10753	1441,00	435,47	23,75	1994,06	1530,86	1,99	0,50	0,05 €	0,01 €	0,04 €
22	9,29	-23	0,824544	-91,8494	91,84943	3,326372	-64,7048	64,70483	1410,43	426,23	23,25	1951,75	1498,38	1,95	0,49	0,05 €	0,01 €	0,04 €
23	8,69	-23	0,381846	-90,1427	90,14272	2,837186	-63,5025	63,50251	1384,22	418,31	22,82	1915,49	1470,54	1,92	0,48	0,05 €	0,01 €	0,04 €
24	7,99	-23	-0,13464	-88,1516	88,15156	2,266468	-62,0998	62,0998	1353,64	409,07	22,31	1873,18	1438,06	1,87	0,47	0,05 €	0,01 €	0,04 €