



COMPORTAMENTO TÉRMICO DE PAINÉIS SANDUÍCHE CONSTITUÍDOS POR LÂMINAS EM BETÃO E CONECTORES DE COMPÓSITO DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS

Relatório 10-DEC/E-27

Lameiras, M.R.; Santos T.; Azenha, M.A.D.; Barros, J.A.O.

Outubro de 2010

PROJECTO LEGOUSE

– Pré-fabricação Modular de Edifícios de Custos Controlados –

Projecto em Co-Promoção nº2009/005387





1. COMPORTAMENTO TÉRMICO

A construção de um edifício envolve várias competências e sensibilidade, nomeadamente: técnicos, funcionais e estéticos. Quando um edifício é projectado não se pode esquecer que este deve satisfazer as exigências, quer a nível estrutural como a nível do conforto, necessárias para ser utilizado ao longo de décadas. A segurança sempre esteve em primeiro lugar, isto é, o conceito estrutural sempre prevaleceu em relação ao conforto. No entanto a sustentabilidade, o conforto e a energia são palavras-chave motivadoras de um cuidado crescente pela construção de edifícios energeticamente eficientes. Assim, estão a ser adoptadas estratégias de construção que conciliam o campo estrutural e a sustentabilidade de forma a minimizar os impactos sócio-ambientais e a maximizar o desempenho económico dos edifícios (Silva, 2009).

A disposição de um determinado edifício face à acção dos ventos, à incidência solar, bem como as especificidades construtivas, especialmente no que se refere aos envidraçados, afectam significativamente o seu desempenho energético. O custo da energia, bem como o facto de esta ser um bem escasso impõe a utilização de isolamento térmico na envolvente vertical opaca e horizontal do edifício, de modo a reduzir as perdas térmicas do edifício.

O objectivo do estudo que se descreve neste capítulo é avaliar o desempenho térmico dos painéis sandwich em desenvolvimento no âmbito do projecto LEGOUSE, bem como a influência que decorre de opções possíveis de adoptar nesta fase de desenvolvimento deste elemento estrutural.

Estes estudos são realizados através de modelos numéricos baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF) que tornam possível a consideração do efeito das pontes térmicas que possam existir nos painéis.

Para tal são estudados diferentes soluções variando os seguintes parâmetros:

- Conectores de diferentes materiais;
- Diferentes tipos de isolamentos;
- Diferentes tipos de conectores;
- Diferentes espessuras da camada de betão.

Estes estudos paramétricos serão apresentados no Capítulo 1.6, sendo dado destaque ao uso de conectores de matriz polimérica reforçada com fibras (*Fiber Reinforced Polymer*, FRP), de forma a avaliar as vantagens que advêm do seu uso, no que respeita à transferência de calores entre os elementos que liga.

A metodologia adoptada para avaliação do desempenho térmico segue a legislação térmica portuguesa (RCCTE, 2006). Através das simulações numéricas pretende-se determinar para cada tipo de isolamento e para cada tipo de conector utilizado, a espessura mínima de isolamento térmico de modo a alcançar o valor de resistência térmica (R) exigida para o painel. Pertende-se





também calcular o coeficiente de transmissão térmica (U), visto que o valor máximo térmico admissível, propostos pela legislação térmica portuguesa, é apresentado pelo U .

1.1. Noções gerais

Conforto térmico segundo a *American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning* (ASHRAE) e a ISO 7730 define-se como: “um estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico que envolve uma pessoa (nem quente nem frio)” (ISO 7730, 2005).

Características importantes do conforto térmico são as envolventes e as zonas. De acordo com o RCCTE (RCCTE, 2006) as zonas podem ser definidas como úteis e não úteis. As zonas úteis são os espaços correspondentes à área útil de pavimento, normalmente climatizados. As zonas não úteis é o conjunto dos locais fechados, fortemente ventilados ou não, que não se encontram englobados na definição de área útil de pavimento e que não se destinam à ocupação humana em termos permanentes, e portanto, geralmente, não são climatizados. Incluem-se aqui armazéns, garagens, sótãos e caves não habitados, circulações comuns a outras fracções autónomas do mesmo edifício, etc. Também as lojas não climatizadas com porta aberta ao público são consideradas como zonas não úteis. Existem diferentes tipos de envolventes, nomeadamente: Exterior; Interior; Em Contacto com o Solo; Sem Requisitos (RCCTE, 2006). A Envolvente Exterior é o conjunto dos elementos do edifício ou da fracção autónoma que estabelece a fronteira entre o espaço interior e o ambiente exterior, podendo ser definida também como envolventes horizontais (lajes) e verticais (paredes) (RCCTE, 2006). A Envolvente Interior é a fronteira que separa a fracção autónoma de ambientes normalmente não climatizados (espaços anexos não úteis), tais como garagens ou armazéns, bem como de outras fracções autónomas adjacentes em edifícios vizinhos (RCCTE, 2006). A Envolvente em Contacto com o Solo é o conjunto dos elementos construtivos que estão em contacto com o solo (RCCTE, 2006). A Envolvente Sem Requisitos é o conjunto dos elementos que não necessitam de cumprir os requisitos mínimos impostos pela legislação (RCCTE, 2006).

Assim uma boa eficiência energética da casa modular passa pela importância de garantir que a sua envolvente tenha uma resistência térmica mínima, de modo a garantir que os consumos de energia com o aquecimento ou arrefecimento do ambiente interior sejam reduzidos. Estes consumos de energia são provocados pela transferência de calor devido à diferença de temperatura entre o interior e exterior. A troca de energia térmica pode ocorrer segundo três mecanismos, condução, convecção e radiação (Figura 1). Neste estudo não se considera os efeitos de transmissão de calor por radiação e convecção pois são parcelas menos significativas no cálculo da resistência dos painéis, ou seja, os valores da resistência térmica (R) obtidos para comparação entre os diferentes modelos são em função da sua estrutura e materiais adoptados sendo portanto só calculada a parcela da transferência de calor por condução (Lee & Pessiki, 2008).



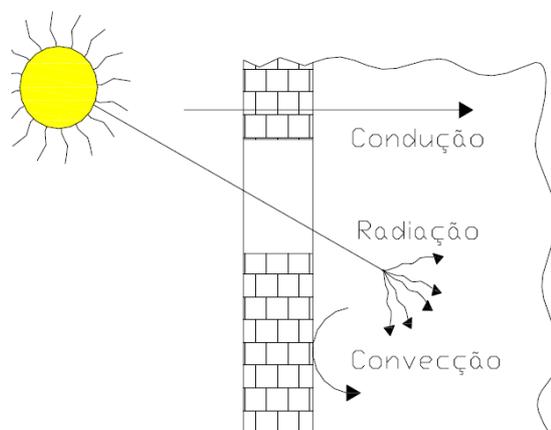


Figura 1 – Exemplos de mecanismos de transferência térmica (Silva, 2006).

As normas sobre o conforto térmico são uma ferramenta crucial para que no projecto de um edifício seja assegurada condições de ambiente interior termicamente confortáveis. Inicialmente, as normas utilizadas tinham apenas em consideração o conforto térmico, mas devido às actuais preocupações ambientais têm também em conta os consumos energéticos necessários para atingir esse conforto. Daqui decorre o conceito de sustentabilidade, em que as normas de conforto térmico têm de considerar formas de atingir o menor consumo energético possível (Nicol & Humphreys, 2002).

Em seguida serão apresentados, detalhadamente, os mecanismos de transmissão de calor por convecção, uma vez que será utilizado no cálculo da resistência térmica analítica, e condução e respectivas normas.

Numa superfície plana, i.e., uma parede em contacto com um fluído onde exista uma diferença de temperatura do ar entre estes dois elementos, o fluxo de calor transmitido por unidade de tempo é simulado pela lei de Fourier (1), Figura 2. **Error! Reference source not found.**

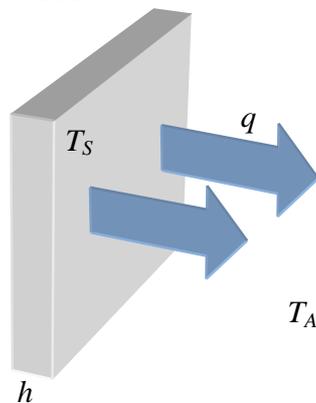


Figura 2 – Fluxo de calor por convecção.

$$q = h \times (T_S - T_A) \quad (1)$$

em que h é a espessura do elemento, T_S a temperatura da superfície e T_A a temperatura do ar. No entanto, a variação da temperatura ao longo do tempo de uma substância homogénea origina um mecanismo de transferência de calor por condução no interior da mesma. No caso de um elemento plano homogéneo, i.e., numa parede constituída pelo mesmo material (λ constante), o fluxo de transferência de calor por condução é obtido pela equação (2) – Lei de Newton (Incropera et al, 2007) – onde L é a espessura da parede, λ a condutibilidade térmica do material e T_{si} e T_{se} são as temperaturas superficiais interior e exterior, respectivamente (Figura 3).

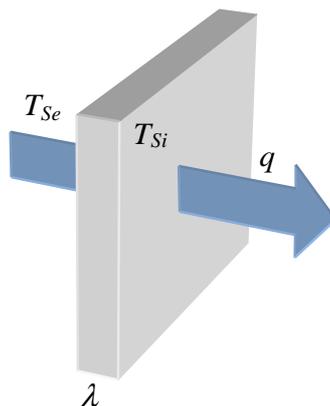


Figura 3 - Fluxo de calor por condução.

$$q = \frac{\lambda}{L} \times (T_{Si} - T_{Se}) \quad (2)$$

Mediante a combinação dos mecanismos de convecção e condução, o fluxo de transmissão de calor (q) de uma parede, ilustrado na Figura 4, é dado pelas expressões (3), (4) e (5).

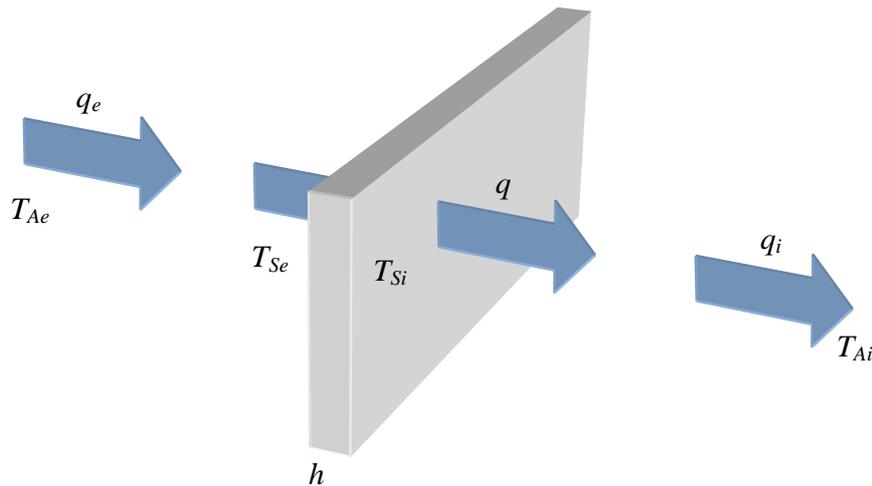


Figura 4 - Representação do fluxo de calor que passa numa parede.

– Convecção na superfície interna da parede: $q_i = h_i \times (T_{Ai} - T_{Si}) \quad (3)$

– Condução através da parede: $q = \frac{\lambda}{L} \times (T_{Si} - T_{Se}) \quad (4)$

– Convecção na superfície externa da parede: $q_e = h_e \times (T_{Se} - T_{Ae}) \quad (5)$

sendo, T_{Ae} e T_{Ai} as temperaturas ambiente exterior e interior, respectivamente, T_{Se} e T_{Si} as temperaturas superficial externa e interna da parede, h_e e h_i os coeficientes de transmissão térmica, externa e interna, por convecção, λ a condutibilidade térmica da parede, L a espessura da parede e q o fluxo de calor através da parede.

Para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica de um elemento composto por distintos materiais é necessário conhecer as resistências térmicas de cada um dos materiais que constituem esse elemento. A resistência térmica do elemento calcula-se através da expressão (6):



$$R = \sum_{i=1}^n \left(\frac{L}{\lambda} \right)_i \quad (6)$$

Através da conjugação das equações (3), (4), (5), dos coeficientes de transmissão térmica, externa e interna e da resistência térmica dos materiais (6), obtêm-se a equação que permite determinar o fluxo de calor por unidade de área (7):

$$q = \frac{(T_{Ai} - T_{Ae})}{\left(\frac{1}{h_i} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{L}{\lambda} \right)_i + \frac{1}{h_e} \right)} \quad (7)$$

Em cada elemento estão contabilizadas a parcela por convecção (R_{si} e R_{se}) e a parcela por condução, a partir da expressão (6). Assim, o coeficiente de transmissão térmica é dado pela expressão (8).

$$U = \frac{1}{\left(R_{si} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{L}{\lambda} \right)_i + R_{se} \right)} \quad (8)$$

onde U , o coeficiente de transferência de calor, pode ser relacionado com a resistência térmica total do sistema (R_T), através das expressões (9) e (10):

$$R_t = \frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{L}{\lambda} \right)_i + \frac{1}{h_e} \quad (9)$$

$$R_t = R_{si} + R + R_{se} = \frac{1}{h_i} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{L}{\lambda} \right)_i + \frac{1}{h_e} \quad (10)$$

sendo R_{se} a resistência térmica superficial externa e R_{si} a resistência térmica superficial interna.

Assim, o comportamento térmico de um edifício é caracterizado pela sua envolvente – neste estudo só será analisada a envolvente vertical opaca – existente entre dois espaços, sejam eles entre salas ou do exterior para o interior do edifício (ASTM C 1060 - 90, 1990).

A envolvente vertical opaca de um edifício pressupõe a continuidade do isolamento térmico. No entanto, devido à existência de conectores entre as lâminas de betão reforçado com fibras (BRF) na casa modular em estudo não se verifica isso, tal como na maior parte dos edifícios onde é



corrente a existência de pontes térmicas planas. A motivação principal da análise térmica realizado neste trabalho deve-se à presença de pontes térmicas originadas pelos conectores. Assim, pretende estudar a evolução do impacto das pontes térmicas neste tipo de edifícios.

1.2. Regulamentação Portuguesa

A regulamentação Portuguesa no domínio do conforto térmico nos edifícios foi publicada pela primeira vez em 1990 e actualizada em 2006 pelo RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (Decreto-Lei, nº 80/2006). O requisito mínimo de qualidade térmica definida em Portugal pelo RCCTE é apresentado sobre domínio do coeficiente de transmissão térmica (U). Sendo U definido como a capacidade de reduzir a taxa de transferência de calor ou de energia térmica, a sua determinação é necessária para a resolução do problema térmico, uma vez que é determinado a partir do valor da resistência térmica do elemento construtivo R .

O Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios aplica-se a:

- edifícios de habitação;
- edifícios de serviços com área útil inferior ou igual a 1000 m² e sem sistemas mecânicos de climatização ou com sistemas de climatização de potência inferior ou igual a 25 kW;
- grandes intervenções de remodelação ou de alteração na envolvente ou nas instalações de preparação de águas quentes sanitárias das duas tipologias de edifícios referidas anteriormente;
- ampliações de edifícios existentes, das duas tipologias atrás referidas.

Entende-se por grandes intervenções de remodelação ou de alteração na envolvente aquelas cujo custo seja superior a 25% do valor do edifício, sendo este último calculado por intermédio de um valor de referência C_{ref} por metro quadrado, sendo recomendado para C_{ref} o valor de 630 EUR/m² (Decreto de Lei nº 80/2006 – Artigo 2º, 2006).

O RCCTE define como temperaturas de referência para a existência de condições de conforto 20°C para condições de Inverno e 25°C para condições de Verão.

A Figura 5 ilustra a divisão do País, segundo o RCCTE, em três zonas climáticas de Inverno (I1, I2 e I3) e de Verão (V1, V2 e V3), sendo I3 e V3 as mais gravosas para o Inverno e Verão, respectivamente.



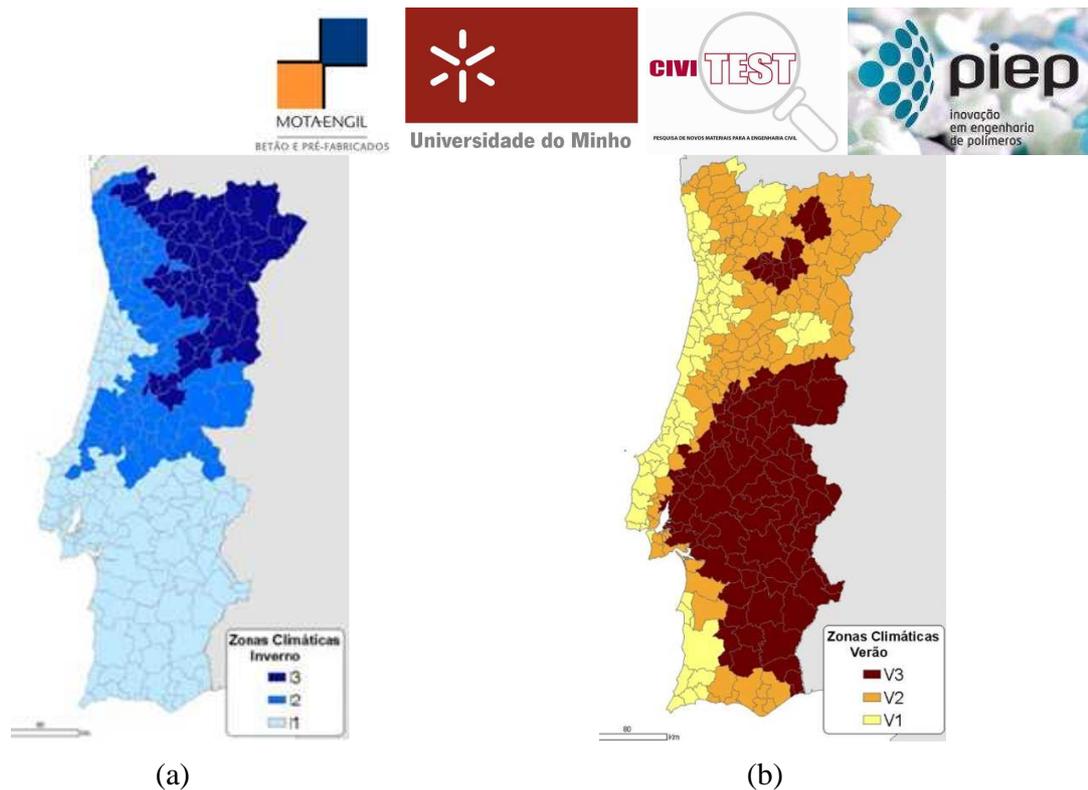


Figura 5 - Zonas climáticas segundo o RCCTE (a) zonas climáticas de Inverno e (b) zonas climáticas de Verão.

O quadro IX.1 do RCCTE define os valores máximos para o coeficiente de transmissão térmica (U) dos elementos da envolvente de qualquer edifício (Quadro 1)

Quadro 1- Coeficientes de transmissão térmica máximos (RCCTE, 2006) (unidades: $m^2 \times ^\circ C/W$).

Elementos da envolvente	Zona Climática (*)		
	I1	I2	I3
Elementos Exteriores em Zona Corrente (**)			
Zonas opacas verticais	1,80	1,70	1,45
Zonas opacas horizontais	1,25	1,00	0,90
Elementos Interiores em Zona Corrente (***)			
Zonas opacas verticais	2,00	2,00	1,90
Zonas opacas horizontais	1,65	1,30	1,20

(*) Ver anexo III do RCCTE

(**) Incluindo elementos interiores em situações em que $\tau > 0,7$

(***) Para outras zonas anexas não úteis

No entanto, no quadro IX.3 do RCCTE são definidos, implicitamente, os valores de referência para o coeficiente de transmissão térmica (U). Estes valores são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Coeficientes de transmissão térmica de referência (RCCTE, 2006)
(unidades: $m^2 \times ^\circ C/W$).

Elementos da envolvente	Zona Climática (*)			
	I1	I2	I3	RA (**)
Elementos Exteriores em Zona Corrente (**)				
Zonas opacas verticais	0,70	0,60	0,50	1,40
Zonas opacas horizontais	0,50	0,45	0,40	0,80
Elementos Interiores em Zona Corrente (***)				
Zonas opacas verticais	1,40	1,20	1,00	2,00
Zonas opacas horizontais	1,00	0,90	0,80	1,25
Envidraçados (****)	4,30	3,30	3,30	4,30

(*) Ver anexo III do RCCTE

(**) Regiões autónomas da Madeira e dos Açores, apenas para edifícios na zona I1

(***) Para outras zonas anexas não úteis

(****) Valor médio dia-noite (inclui efeito do dispositivo de protecção nocturna) para vãos envidraçados verticais

Nas zonas não correntes incluindo nas zonas de pontes térmicas planas, o RCCTE impõe o requisito mínimo do valor de U da seguinte forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} U \leq 2 \times U_{lat1} \\ U \leq 2 \times U_{lat2} \end{array} \right. \text{ ou } \left\{ \begin{array}{l} U \leq U_{m\acute{a}x} \end{array} \right.$$

em que o valor do U em situações de pontes térmicas é calculado de forma unidimensional na direcção normal à envolvente, não podendo este valor ser superior ao dobro do U dos elementos adjacentes (U_{lat1} e U_{lat2}) em zona corrente, respeitando sempre os valores máximos indicados no **Error! Reference source not found.**

1.3. Desempenho térmico através de métodos existentes (estado de arte)

Os métodos propostos pelo Manual da ASHRAE, pelos métodos experimentais da ASTM e pelo método dos elementos finitos (MEF) podem ser usados para estimar os valores de R de painéis sandwich. Os três métodos aqui referidos serão resumidos nos subcapítulos seguintes. Neste trabalho, a abordagem do MEF foi usada para estimar o valor de R da envolvente da casa



modular, uma vez que consegue determinar com boa precisão o valor da resistência de uma secção com pontes térmicas.

1.3.1. Métodos do Manual da ASHRAE

A *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) no seu manual, “Handbook – Fundamentals”, descreve três métodos para calcular os valores de R através de um material ou conjunto de materiais usando a analogia do circuito eléctrico (ASHRAE, 1997). Esses métodos são o *parallel flow*, *isothermal plane*, e *zone methods*. Nestes métodos, as resistências térmicas dos materiais são tratadas como resistências eléctricas que são dispostos em paralelo, em série, ou numa combinação dos dois, para estimar a resistência térmica do conjunto (ASHRAE, 1997).

1.3.2. Métodos experimentais

Existem várias técnicas de cálculo da resistência térmica de uma fachada, no entanto todas elas adoptam uma das seguintes metodologias: determinação do R recorrendo à diferença de temperatura constante ao longo do tempo, ou através do fluxo de calor constante.

Vários métodos de ensaio propostos pelas Normas da ASTM estão disponíveis para estimar a resistência em estado estacionário térmico de diferentes componentes dos edifícios, tais como paredes, lajes de pavimento e coberturas. Destaca-se a Norma C1115 – 95 e da Norma C1363 – 05 da ASTM. Dentro destas Normas evidencia-se a “Técnica do Somatório” (*The Summation Technique*) – que será apresentada no capítulo 1.4.5– e o método *Guarded Hot Box*.

O *Guarded Hot Box Method* é um método geral que, através da diferença de temperatura ao longo do tempo, pode ser usado para estimar o desempenho térmico dos conjuntos tais como os painéis de parede sandwich. A Figura 6 (Lee & Pessiki, 2006) mostra um esboço esquemático em planta dos principais elementos da caixa de ensaios do método *Guarded Hot Box*.

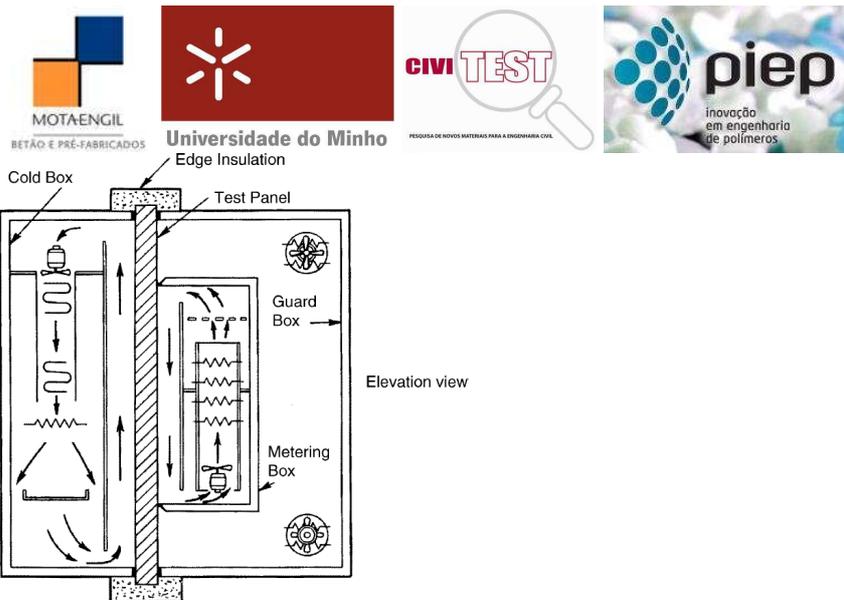


Figura 6 – Vista em planta da caixa de ensaio Guarded Hot Box (Lee & Pessiki, 2006).

Este método é constituído por uma caixa de medição inserida numa caixa de resguardo de um lado do painel e do outro lado uma caixa de resguardo a frio. O painel a ser ensaiado é colocado entre a caixa de medição e a caixa de resguardo da temperatura a frio. O elemento pré-fabricado é exposto a ar quente dentro de caixa de medição e da caixa de resguardo da temperatura quente e a ar frio na caixa de resguardo da temperatura a frio. O ensaio é realizado estabelecendo uma diferença de temperatura constante desejada entre o painel de teste por um período de tempo, do modo a assegurar que o fluxo de calor e a diferença de temperatura existente no painel sejam constantes. Quando a temperatura do ar dentro da caixa de medição é mantida sempre a mesma, a transferência de calor entre essa caixa e a caixa de resguardo é zero. Neste momento, o fluxo de calor no painel é medido. Este fluxo é uma medida de calor por uma área conhecida do painel. Além disso as temperaturas das superfícies do painel quente e frio são medidas em condições de estado estacionário. Então, a resistência térmica, pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$R = \frac{A \times (t_{Si} - t_{Se})}{q} \quad (11)$$

onde A (m^2) é a unidade de área, q (W) é o fluxo de calor que passa no painel sobre condições de estado estacionário e t_{Si} e t_{Se} ($^{\circ}C$) são as temperaturas da superfície interior (quente) e exterior (fria), respectivamente.

1.3.3. Modelos de Método dos elementos finitos

A abordagem do método dos elementos finitos também pode ser utilizada para estimativa dos valores de R . Existem várias abordagens para a determinação da resistência térmica recorrendo ao uso do MEF. Entre elas destacam-se a análise proposto por Lee e Pessiki (Lee & Pessiki, 2008). Nesta análise, usando um modelo MEF e um método proposto pelo ASHRAE (1997)

(*Zone method*), Lee e Pessiki apresentam uma metodologia para determinação do valor da resistência térmica em painéis sandwich.

1.4. Modelo numérico (MEF)

Esta parte do trabalho visa estudar o impacto que decisões tomadas no projecto estrutural têm no desempenho térmico dos painéis sandwich.

1.4.1. Geometria

As dimensões de todos os modelos MEF foram obtidas considerando uma sala de três metros de largura e de comprimento infinito. Como se trata de uma análise bidimensional a representação da sala nos modelos MEF é obtida através de condições de fronteira simétricas e adiabáticas, como mostra a Figura 9. Assim, a largura do modelo toma o valor de 1.5 m de maneira a representar a simetria da largura da sala real. O comprimento é determinado pelo espaçamento entre conectores do painel, o qual será alvo dos estudos paramétricos, sendo 1,25m o valor mínimo. A Figura 7 ilustra um exemplo do modelo numérico.

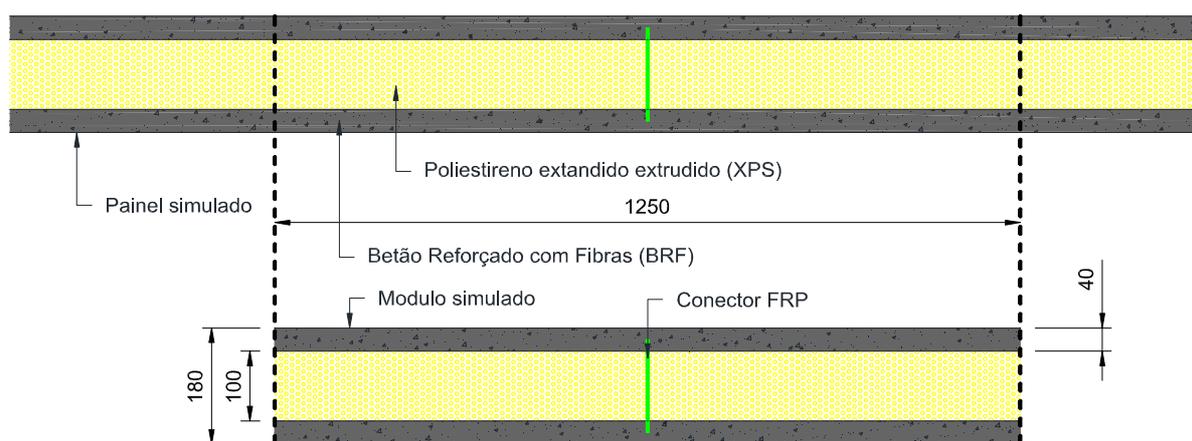


Figura 7 – Exemplo de um modelo simulado (vista em planta, unidades em milímetros).

1.4.2. propriedades térmicas dos materiais

Todos os materiais são considerados como um meio isotrópico com condutibilidade térmica constante. As condutibilidades e o calor específico dos materiais são representados nos Quadro 3 e Quadro 5 respectivamente. Os materiais aço e FRP (Fibre Reinforced Polymer) apenas são aplicados nos estudos paramétricos. Para o betão reforçado com fibras (BRF) aplicado nas camadas exteriores dos painéis sandwich adoptou-se o valor de condutibilidade térmica do betão normal, dado que a relativa pequena percentagem volumétrica de fibras (<1%) a ser usada não



afecta o valor daquele parâmetro. Por razões similares, para massa volúmica foi adoptado o valor de 2400 kg/m^3 (ITE50, 2006).

Todos os valores foram obtidos através de referências bibliográficas. Sendo a maior parte dos valores da condutibilidade térmica obtidos pela ITE50 “Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios” (ITE50, 2006) e do calor específico pelo Livro Fundamentals of Heat and Mass Transfer (Incropera et al., 2007).

Quadro 3 – Condutibilidade térmica adoptado para os materiais.

MATERIAL	Condutibilidade térmica	
	λ (W/m \times °C)	Referência Bibliográfica
Betão normal	2.0	(ITE50, 2006)
Poliestireno (XPS)	0.037	(ITE50, 2006)
Ar interior	0.025	(ITE50, 2006)
Aço	50	(ITE50, 2006)
FRP	0.22	(ASTM, 2004)

Uma vez que o calor específico de um dado material, introduzido no software, é em função do seu volume (m^3) e não da sua massa, é necessária a massa volúmica dos materiais de modo a obter o calor específico por densidade ($\text{J/m}^3 \times \text{°C}$).

O Quadro 4 apresenta os valores da massa volúmica (kg/m^3). O calor específico por massa ($\text{J/kg} \times \text{°C}$) e por densidade ($\text{J/m}^3 \times \text{°C}$), e a referência bibliográfica dos valores adoptados são apresentados no Quadro 5.

Quadro 4 – Massa volúmica adoptada dos isolamentos em estudo.

MATERIAL	Massa volúmica	
	Massa vol. (kg/m ³)	Referência Bibliográfica
Poliestireno (XPS)	55	(Incropera et al., 2007)
Poliuretano (PUR)	40	(ITE50)
Cortiça (ICB)	120	(ITE50)
Lã de Rocha (MW)	65	(ITE50)

Quadro 5 - Calor específico adoptado dos isolamentos em estudo.

MATERIAL	Calor específico		
	c_p (J/kg×°C)	c_p (J/m ³ ×°C)	Referência Bibliográfica
Poliestireno (XPS)	1210	66550	(Incropera et al., 2007)
Poliuretano (PUR)	1400	56000	(BING, 2006)
Cortiça (ICB)	1800	216000	(Incropera et al., 2007)
Lã de Rocha (MW)	1590	103350	(Incropera et al., 2007)

1.4.3. Condições iniciais e de fronteira

Nestes modelos bidimensionais é aplicada uma linha de fronteira, na camada exterior do betão, como elemento de convecção. Esta fronteira impõe, como um tipo de “carregamento”, uma temperatura uniforme de 0°C na superfície exterior. Segundo a Regulamentação Térmica Portuguesa, RCCTE, a temperatura de conforto do ar interior é de 20°C (para inverno). Nos elementos construtivos do painel é adoptado uma temperatura inicial de 20°C de modo a simular uma situação mais próxima da realidade. Assim, consegue-se uma diferença de temperatura entre a superfície exterior e o ar interior ao longo do tempo (Figura 8). É necessária uma temperatura constante de um lado (0°C) para uma rápida convergência do valor da resistência térmica (ASTM C1115, 1995).

O ponto de análise da temperatura interior está situado a 1.5 m da face da camada interior do painel sandwich, pois corresponde ao meio da sala com largura de 3 m, ilustrado na Figura 8.

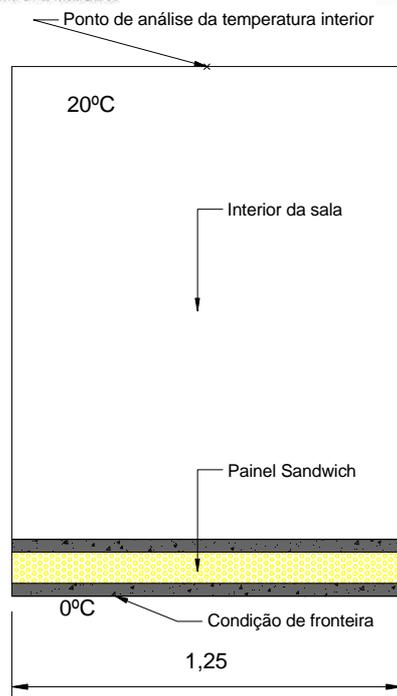


Figura 8 – Condição de fronteira e ponto de análise da temperatura interior.

O coeficiente de convecção da fronteira interior é de $8 \text{ W}/(\text{m}^2 \times ^\circ\text{C})$. Todas as fronteiras de simetria do modelo são assumidas como adiabáticas, isto é, estão isoladas completamente da vizinhança relativamente à troca de calor (Figura 9 **Error! Reference source not found.**).

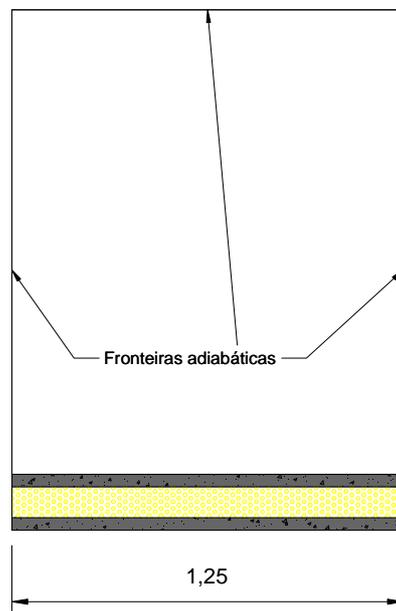


Figura 9 – Condições de fronteira adiabáticas e simétricas.

1.4.4. Malha adoptada

A malha escolhida é constituída por elementos de quatro nós isoparmétricos rectangular para análise geral de fluxo potencial, com excepção dos elementos da fronteira convectiva, onde se utilizaram elementos de 2 nós.

A malha adoptada para os estudos paramétricos consiste na divisão da largura pelo menos em 125 partes (consoante o modelo simulado) e de 72 partes na direcção da espessura do painel segundo os materiais em estudo de cada modelo, ou seja, a espessura da lâmina de BACFRA é dividida em 16 partes cada uma e a camada de isolamento é dividida em 40 partes. A Figura 10 mostra um exemplo de uma malha adoptada para o estudo térmico do painel.

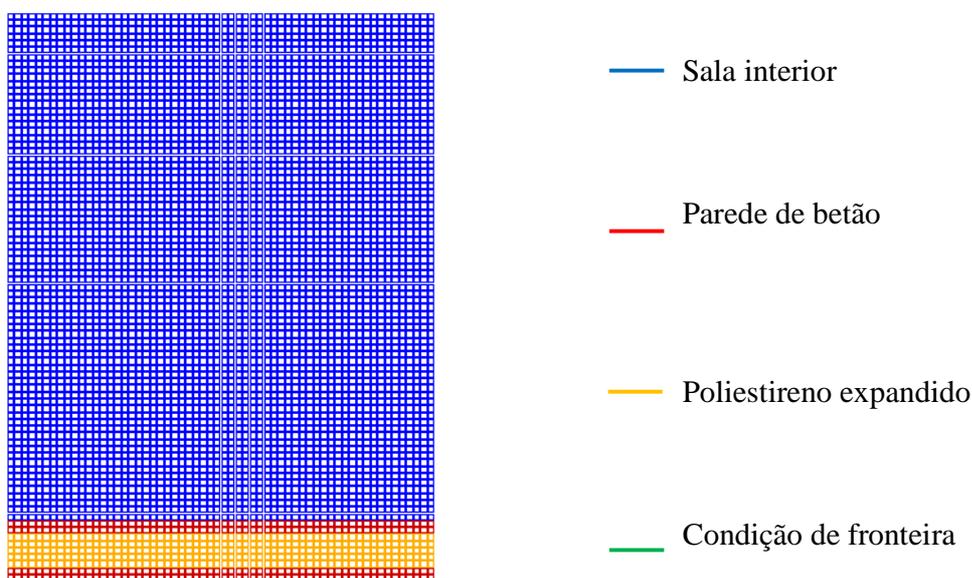


Figura 10 – Exemplo de uma malha adoptada.

1.4.5. Metodologia numérica do modelo MEF

O método aplicado para cálculo numérico da resistência térmica, R_{MEF} , é proposto pela ASTM (Norma C1115 – 95). Este processo de cálculo dos valores de R_{MEF} utiliza uma acumulação de informação do fluxo térmico e da diferença da temperatura nas superfícies ao longo do tempo, obtidas pelo software de cálculo TNO DIANA BV. Apesar dos mecanismos de transferência de calor por condução e por convecção (condição de fronteira) serem considerados no modelo MEF, apenas a resistência térmica dos materiais é obtido pelo DIANA. Para simplificar a análise admitiu-se que na superfície interna do painel as trocas de calor acontecem unicamente por condução.

O método proposto pela norma C1115 da ASTM, apresenta duas técnicas específicas. A “Técnica do Somatório” (*The Summation Technique*) e a “Técnica da Soma dos Quadrados Menores” (*The Sum of Least Squares Technique*). Permite ainda o uso de outras técnicas, desde que devidamente fundamentadas. A técnica utilizada neste trabalho foi a Técnica do Somatório.

O cálculo da resistência térmica proposto por este modelo da ASTM dita o cumprimento de certos requisitos para que seja possível obter a resistência térmica dos elementos da envolvente (painéis) com um elevado grau de confiança:

- O percurso do fluxo de calor tem de ser perpendicular à superfície em questão, ou seja, não convêm existirem fenómenos que perturbem o fluxo de calor, tais como pontes térmicas, entre outros;



- Tem de haver um gradiente térmico significativo entre o exterior e o interior;
- Têm de serem escolhidos intervalos de tempo, durante os quais não ocorram diferenças na resistência térmica calculada em mais de 10%. Esses intervalos devem ser múltiplos de 24h.

No presente caso de estudo os requisitos necessários para a obtenção de valores de R com baixa margem de erro são cumpridos de forma aceitável. No primeiro ponto, apesar de existir uma ponte térmica devido ao uso de conectores nos estudos paramétricos, o fluxo é considerado como um valor médio ao longo do painel e perpendicular à superfície, minimizando assim a influência da ponte térmica. O segundo ponto é cumprido visto existir uma diferença de temperatura garantida da superfície exterior (0 °C) e o ar interior (20 °C). No último ponto, os intervalos de tempo escolhidos foi de $n = 6h$. A escolha deste valor tem como referência Flanders (1985), em que recomenda o período para o intervalo da convergência de $n = 12h$.

Adoptando estas condições, o software DIANA permite obter com precisão os valores das temperaturas e fluxos nos vários pontos em análise, sendo a resistência térmica estimada obtida pela equação (12) para cada intervalo de tempo ($n = 6h$).

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta T_n}{\sum_{j=1}^n q_n}, \text{ com } n = \text{intervalos de } 6 \text{ h } \{6, 12, \dots, 96\} \quad (12)$$

em que n representa o intervalo de tempo, $\sum_{j=1}^n \Delta T = T_{Si} - T_{Se}$ representa o somatório da diferença de temperatura da superfície interior ao longo do tempo e exterior, $\sum_{j=1}^n q_i$ representa o somatório do fluxo ao longo do tempo.

No presente trabalho a diferença de temperaturas das superfícies é obtido directamente pelo DIANA para cada intervalo de tempo, sendo depois efectuado o somatório para cada intervalo de tempo {12, 18, ..., 96} (horas). Ao contrário da diferença de temperatura das superfícies, o fluxo ao longo do tempo é indirectamente dado pelo DIANA sendo depois calculada a média aritmética do fluxo de calor de todos os pontos ao longo da largura do painel (q_{med}). Em seguida calcula-se o somatório na direcção do fluxo, perpendicular à direcção da largura do painel.

A divisão dos pontos de análise no DIANA é de 125 para a largura do painel (Figura 11), perfazendo um valor para cada centímetro. No entanto a imagem só ilustra uma divisão de 50 pontos de análise do fluxo – de modo a que o leitor consiga interpretar esta divisão dos pontos de



análise – e de 5 para a espessura do painel (Figura 12). Como a espessura do paineil sandwich varia de modelo para modelo, a distância entre pontos de análise também varia.

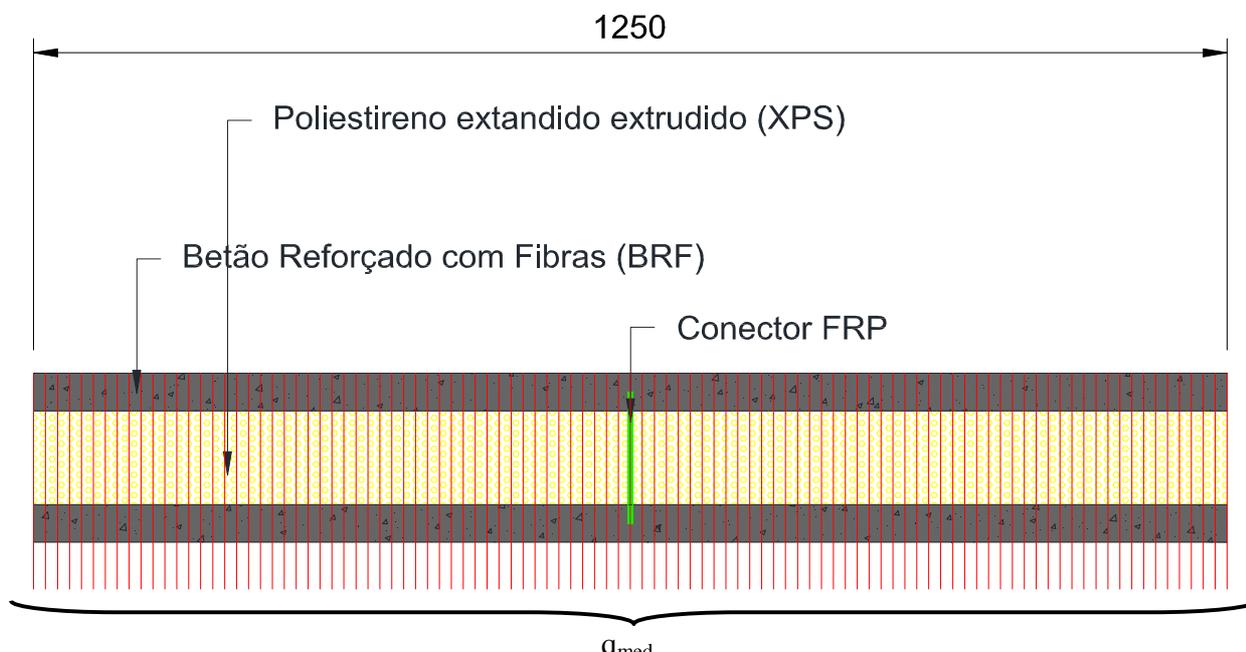


Figura 11 – Divisão fictícia da largura de um modelo simulado para o cálculo da média aritmética do fluxo de calor nos diferentes pontos ao longo do painel (vista em planta, unidades em milímetros).

Para cada intervalo de tempo $n = \{6, 12, \dots, 96\}$ horas, o cálculo do fluxo de calor, parcela $\sum_n^m q_n$ é obtido pela expressão (13):

$$\sum_n^m q_n = \frac{q_{medS1} + q_{medS2} + q_{medS3} + q_{medS4} + q_{medS5}}{5}, \text{ com } n = \text{intervalos de } 6 \text{ h } \{6, 12, \dots, 96\} \quad (13)$$

em que q_{medS1} , q_{medS2} , q_{medS3} , q_{medS4} , q_{medS5} representa o fluxo médio dos diferentes pontos ao longo da largura do painel na superfície S1, S2, ... e assim sucessivamente.

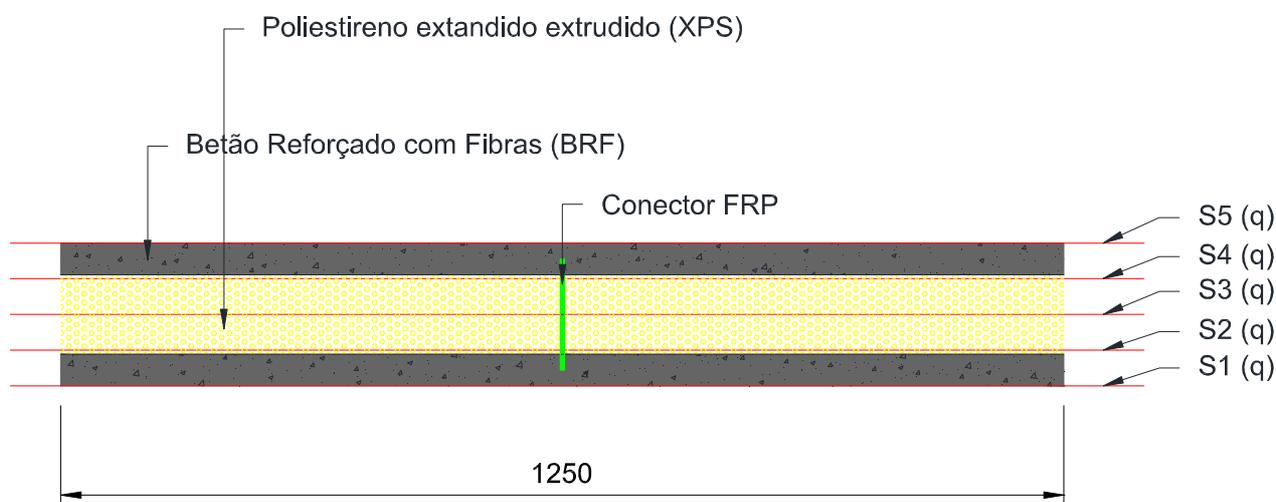


Figura 12 – Divisão fictícia da espessura de um modelo simulado para o cálculo da média aritmética do fluxo de calor nas diferentes superfícies de S1 a S5 (vista em planta, unidades em milímetros).

Com o intuito de avaliar o desempenho desta técnica, a ASTM fornece um teste da convergência (CR_n) de resistências térmicas entre dois intervalos de tempo consecutivos, pelo qual a convergência terá de ser inferior a 0,1. Assim, o teste de convergência é executado aplicando a equação (14).

$$CR_n = \frac{R(t) - R(t - n)}{R(t)} \quad (14)$$

Em todos os estudos foi utilizado o critério de convergência para verificação da existência de uma boa aproximação do valor de R_{MEF} .

1.5. Validação dos valores de R

Os modelos numéricos em análise bidimensional para a validação do valor de R_{MEF} através do uso do software DIANA são uma parede simples de betão, com uma espessura de 50 cm, e um painel sandwich constituído por uma lâmina exterior de betão, uma camada intermédia de poliestireno expandido extrudado e outra lâmina interior de betão.

A validação numérica do R_{MEF} descrita neste capítulo não tem em conta um possível erro originado pelas pontes térmicas existentes nos painéis sandwich. Este erro é evitado porque nesta análise, na validação da resistência térmica, não são consideradas as ligações existentes entre as lâminas de betão. Esta medida é aplicada pela necessidade de simplificação do modelo de validação do cálculo da resistência térmica.



As pontes térmicas são causadas pelos conectores das duas lâminas exteriores de betão com a função de equilíbrio estrutural dos painéis sandwich. Esta ligação das camadas de betão será alvo de atenção no capítulo dos estudos paramétricos.

1.5.1. Metodologia na validação do valor de R

A metodologia adoptada para a avaliação do cálculo da resistência térmica dos dois modelos numéricos será simplificada. Esta simplificação tem em conta apenas a resistência térmica dos materiais (condução), uma vez que os valores obtidos no software de cálculo do método dos elementos finitos (MEF) contem apenas o fenómeno de condução térmica, em vez da resistência térmica R (condução e convecção). No entanto a regulamentação existente em Portugal relativamente a resistência térmica (R), $RCCTE$, utiliza valores do coeficiente de transmissão térmica (U). Isto introduz a necessidade de contabilizar a parcela da transferência de calor por convecção, para a verificação se o painel respeita a regulamentação Portuguesa. No caso da casa modular e no âmbito do projecto LEGOUSE, for construída fora de Portugal, na averiguação do R_{min} , é inevitável ter em atenção se é necessária a contabilização da transferência de energia por convecção na regulamentação estrangeira, ou seja inclui R_{se} e R_{si} (h_e e h_i).

Tendo em conta o parágrafo anterior, o cálculo analítico do valor de R adoptado só irá contabilizar com a parcela por condução térmica. A equação (6) será utilizada para o cálculo analítico da resistência térmica do modelo numérico.

1.5.2. Painel simples de betão

1.5.2.1. Geometria e desenhos

A Figura 13 representa o modelo MEF de validação do valor de R da parede de betão. A parede possui uma espessura de 50 cm por 125 cm de largura.



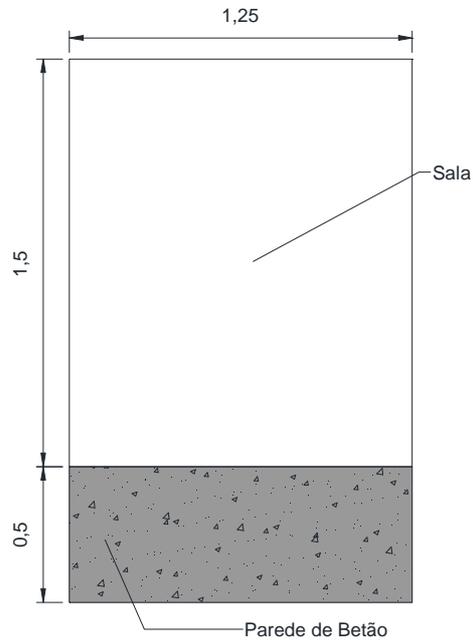


Figura 13 – Modelo bidimensional MEF da validação do valor de R da parede de betão.

1.5.2.2. Malha adoptada

A malha adoptada para o modelo da parede de betão foi de 60 divisões na sua largura e 25 na sua espessura. A Figura 14 ilustra a malha adoptada, onde a azul representa a malha da sala (ar interior), a vermelho a malha do betão e a verde a condição de fronteira.

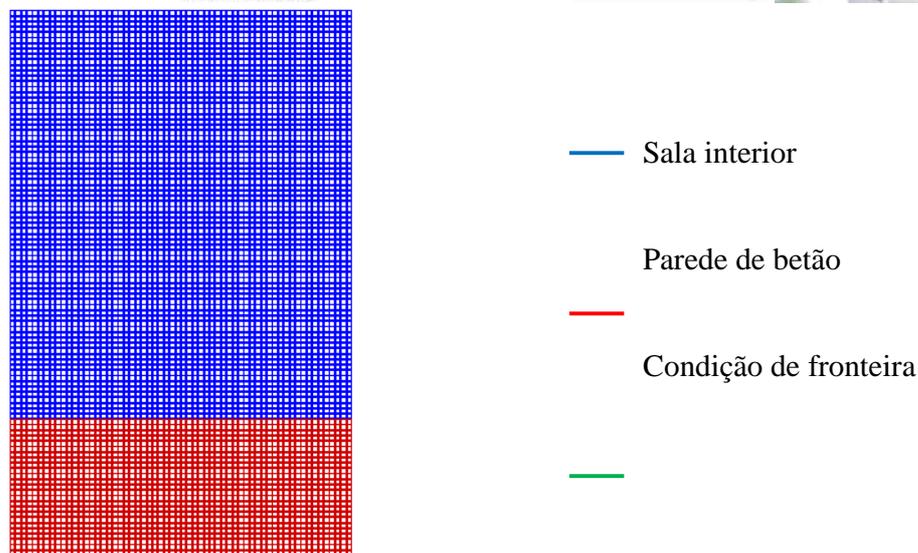


Figura 14 – Malha adoptada no caso de estudo da validação da parede de betão.

É adoptado uma temperatura inicial de 20°C para os elementos construtivos do painel.

1.5.2.3. Resultados

1.5.2.3.1. Cálculo analítico do valor de R

O valor de R analítico é obtido pela equação (6):

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{L}{\lambda} = \frac{0,50}{2,00} = 0,25 \left(\text{m}^2 \times \text{°C} / \text{W} \right) \quad (15)$$

1.5.2.3.2. Cálculo numérico do valor de R_{MEF}

Os resultados da resistência térmica da parede de betão são apresentados no **Error! Reference source not found.** Todos estes são apresentados para os intervalos de tempo adoptados – 6 (horas). Os fluxos médios, q_{med} , foram calculados pela média aritmética dos valores obtidos pelo DIANA. No **Error! Reference source not found.** são também apresentadas as diferenças de temperaturas, ΔT , determinadas directamente pelo DIANA, bem como o seu somatório, $\sum \Delta T$. Aplicando a equação (1) determina-se o valor da resistência térmica da parede de betão, cujos valores encontram-se também apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Valores da parede de betão.

n (h)	Fluxo de calor		Diferença de temperatura		Valores de R	
	q_{med} (W)	$\sum q_{med}$ (W)	ΔT (°C)	$\sum \Delta T$ (°C)	R_{MEF} ($m^2 \times ^\circ C/W$)	n (h)
6	34,85	34,85	7,91	7,91	0,22705	6
12	36,84	71,69	9,01	16,92	0,23601	12
18	35,41	107,10	8,81	25,73	0,24022	18
24	32,94	140,04	8,30	34,03	0,24300	24
30	30,27	170,31	7,64	41,67	0,24470	30
36	27,65	197,95	6,99	48,67	0,24584	36
42	25,21	223,16	6,37	55,04	0,24662	42
48	22,96	246,12	5,80	60,83	0,24716	48
54	20,93	267,05	5,27	66,10	0,24754	54
60	19,05	286,10	4,82	70,92	0,24789	60
66	17,31	303,41	4,39	75,31	0,24822	66
72	15,78	319,19	4,00	79,31	0,24847	72
78	14,36	333,55	3,63	82,94	0,24867	78
84	13,08	345,64	3,31	86,25	0,24883	84
90	11,90	358,53	3,01	89,27	0,24898	90
96	10,84	369,37	2,75	92,01	0,24911	96

Através dos valores apresentados no **Error! Reference source not found.**, o valor de R_{MEF} é de aproximadamente $0,249 \left(m^2 \times ^\circ C/W \right)$. Comparando com o valor obtido no cálculo analítico, equação (15), o erro é aproximadamente de 0,36%.

Na Figura 15, ilustra-se a evolução do valor da resistência térmica ao longo do tempo e a tendência para convergir assim que o fluxo se mantém constante (**Error! Reference source not found.**). O desenvolvimento das temperaturas da sala interior, superfície interna e superfície externa ao longo do estudo é apresentado no Figura 17.

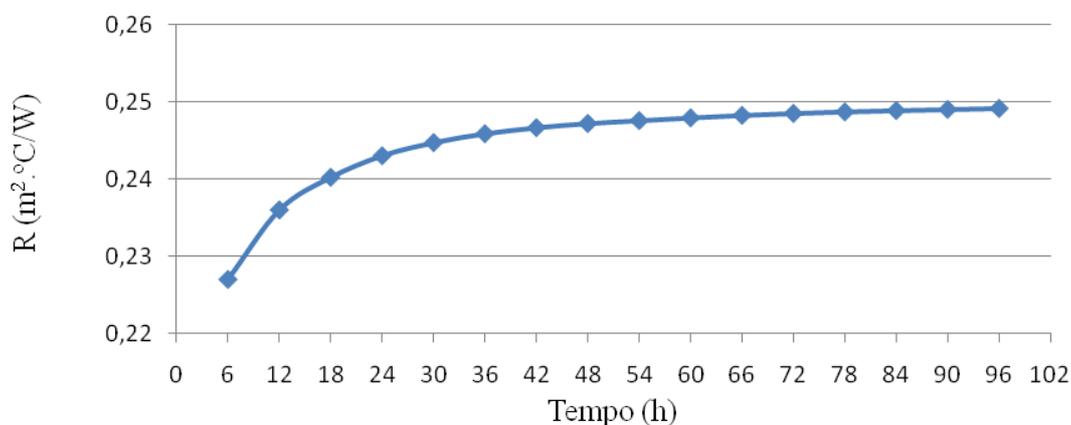


Figura 15 – R_{MEF} ao longo do tempo da parede de betão.

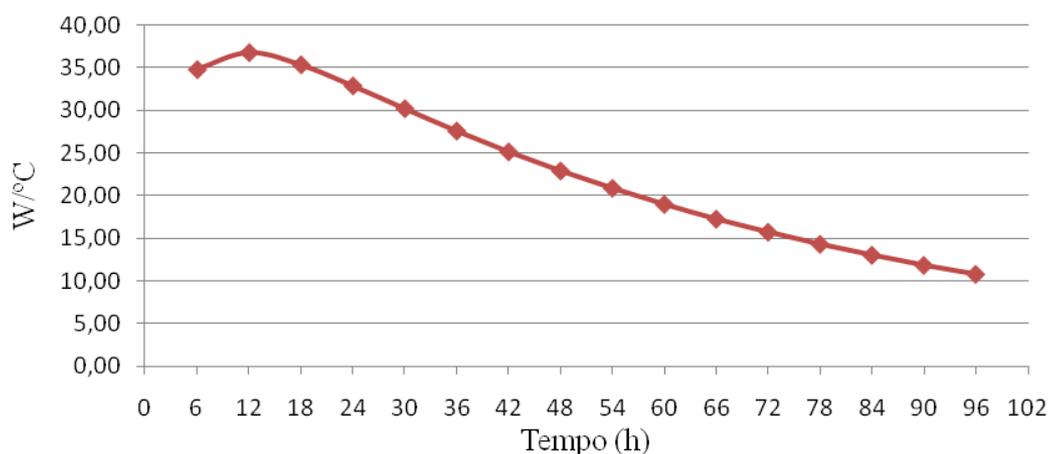


Figura 16 – Fluxo de calor médio ao longo do tempo da parede de betão.

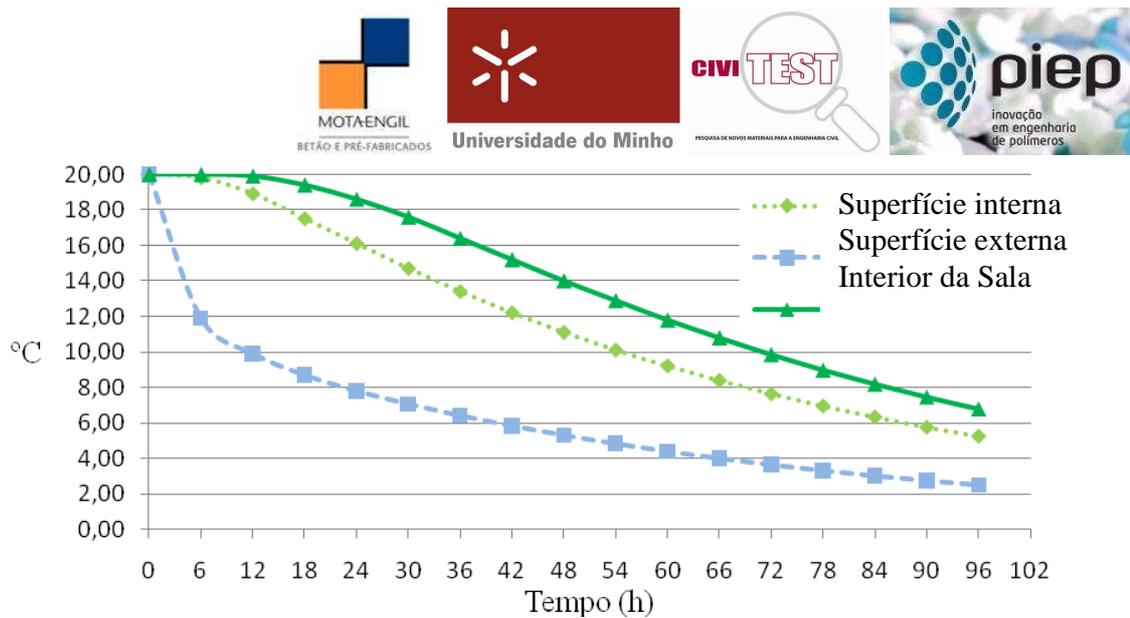


Figura 17 – Evolução das temperaturas da sala interior e das superfícies externa e interna ao longo do tempo.

1.5.3. Painel sandwich

1.5.3.1. Geometria e desenhos

O painel utilizado para validar a resistência térmica é ilustrado na Figura 18. Este é constituído por uma lâmina exterior de betão de 4 cm, uma camada intermédia de isolamento térmico (XPS) de 10 cm e por último outra lâmina de betão de 4 cm.

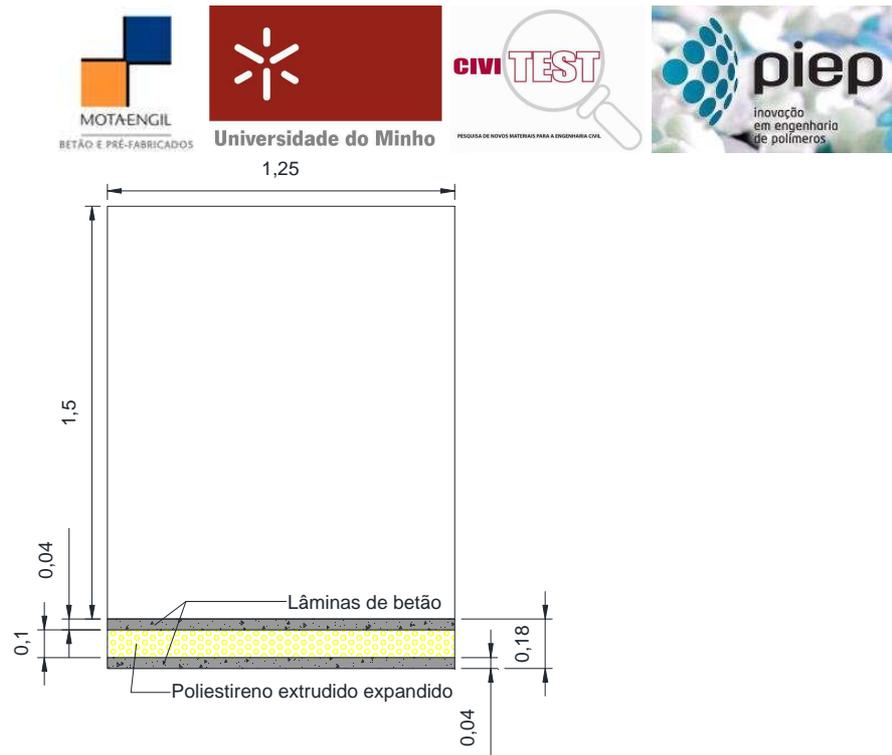


Figura 18 – Modelo bidimensional MEF da validação do valor de R do painel sandwich.

1.5.3.2. Malha adoptada

A malha adoptada para o modelo do painel sandwich é constituída por 60 divisões na sua largura e 9 na sua espessura. A Figura 19 ilustra a malha adoptada.

O azul na Figura 19 representa a parte da malha que discretiza a sala (ar interior), o vermelho a parte da malha relativa ao BACRFA, o laranja a parte da malha relativa ao poliestireno expandido extrudido (XPS) e o verde a condição de fronteira.

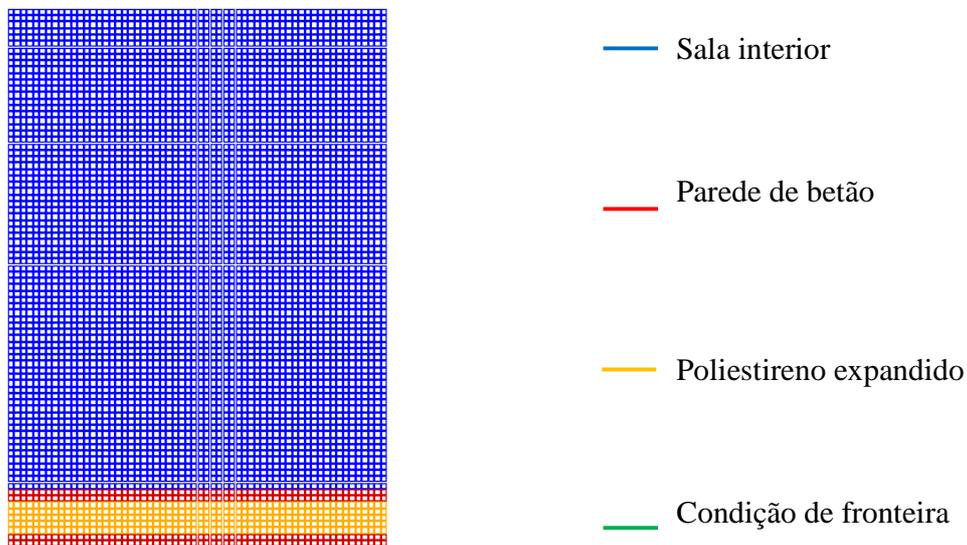


Figura 19 – Malha adoptada no caso de estudo da validação do painel sandwich.

É adoptado uma temperatura inicial de 20°C para os elementos construtivos do painel.

1.5.3.3. Resultados

1.5.3.3.1. Cálculo analítico do valor de R

O valor de R analítico é obtido pela equação referida acima (equação (6)). Este é calculado pela expressão (16):

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{L}{\lambda} = \frac{0,04}{2,00} + \frac{0,10}{0,037} + \frac{0,04}{2,00} = 2,743 \left(\text{m}^2 \times \text{°C} / \text{W} \right) \quad (16)$$

1.5.3.3.2. Cálculo numérico do valor de R_{MEF}

Os resultados da resistência térmica do painel sandwich são apresentados no **Error! Reference source not found.** Todos os dados são apresentados para os intervalos de tempo adoptados – 6 (horas). Os fluxos médios, q_{med} , foram calculados pela média aritmética dos valores obtidos pelo DIANA e o seu somatório. No centro são apresentadas as diferenças de temperatura obtidas directamente do DIANA e o seu somatório.

Os valores da resistência térmica do painel sandwich são apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 – Valores do painel sandwich.

n (h)	Fluxo de calor		Diferença de temperatura		Valores de R	
	q_{med} (W)	$\sum q_{med}$ (W)	ΔT (°C)	$\sum \Delta T$ (°C)	R_{MEF} ($m^2 \times ^\circ C/W$)	n (h)
6	8,80	8,80	15,06	15,06	1,71150	6
12	5,89	14,70	16,39	31,45	2,14033	12
18	5,02	19,72	15,53	46,99	2,38263	18
24	4,55	24,27	14,38	61,36	2,52880	24
30	4,17	28,43	13,25	74,61	2,62413	30
36	3,83	32,26	12,11	86,72	2,68818	36
42	3,52	35,78	11,15	97,88	2,73578	42
48	3,23	39,01	10,29	108,17	2,77293	48
54	2,97	41,98	9,42	117,59	2,80113	54
60	2,73	44,71	8,66	126,24	2,82361	60
66	2,51	47,22	7,96	134,20	2,84209	66
72	2,31	49,53	7,31	141,52	2,85741	72
78	2,12	51,64	6,72	148,24	2,87032	78
84	1,95	53,59	6,18	154,41	2,88124	84
90	1,79	55,38	5,68	160,10	2,89068	90
96	1,65	57,03	5,22	165,32	2,89866	96

Utilizando o critério de convergência da Norma C1115 – 95 da ASTM, valor de R_{MEF} é de aproximadamente $2,74 \left(m^2 \times ^\circ C/W \right)$. Comparando com o valor obtido no cálculo analítico, equação (16), o erro é aproximadamente de 0,25%.

Na Figura 20 ilustra-se a evolução do valor da resistência térmica ao longo do tempo e a tendência para convergir assim que o fluxo se mantém constante (Figura 21). O desenvolvimento das temperaturas da sala interior, superfície interna e superfície externa ao longo do estudo é apresentado no Figura 22.

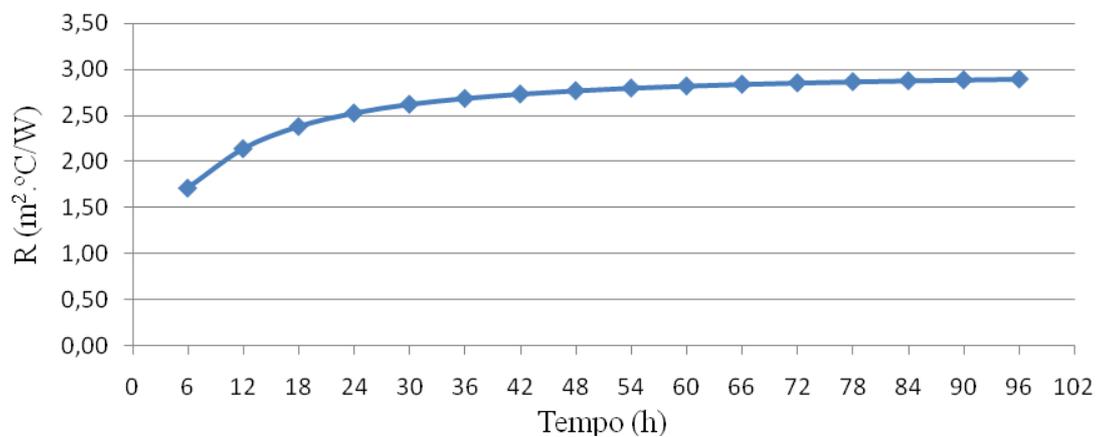


Figura 20 – R_{MEF} ao longo do tempo do painel.

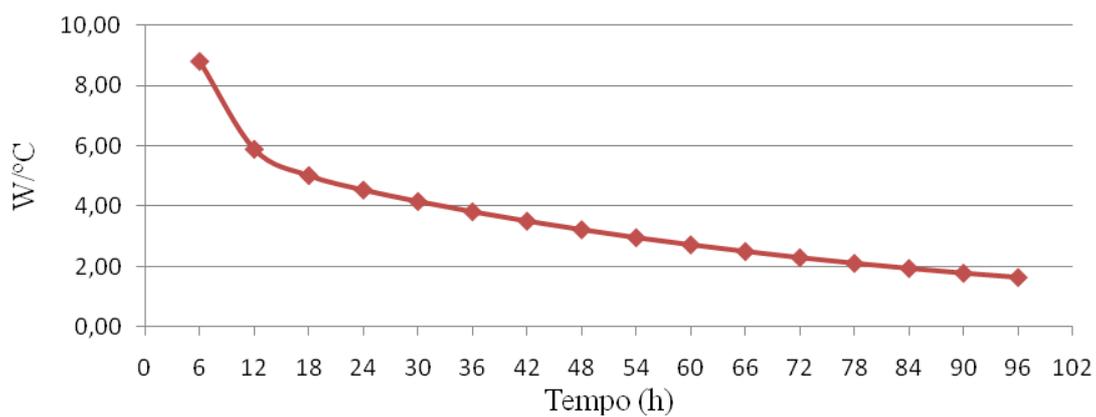


Figura 21 – Fluxo de calor médio ao longo do tempo da parede de betão.

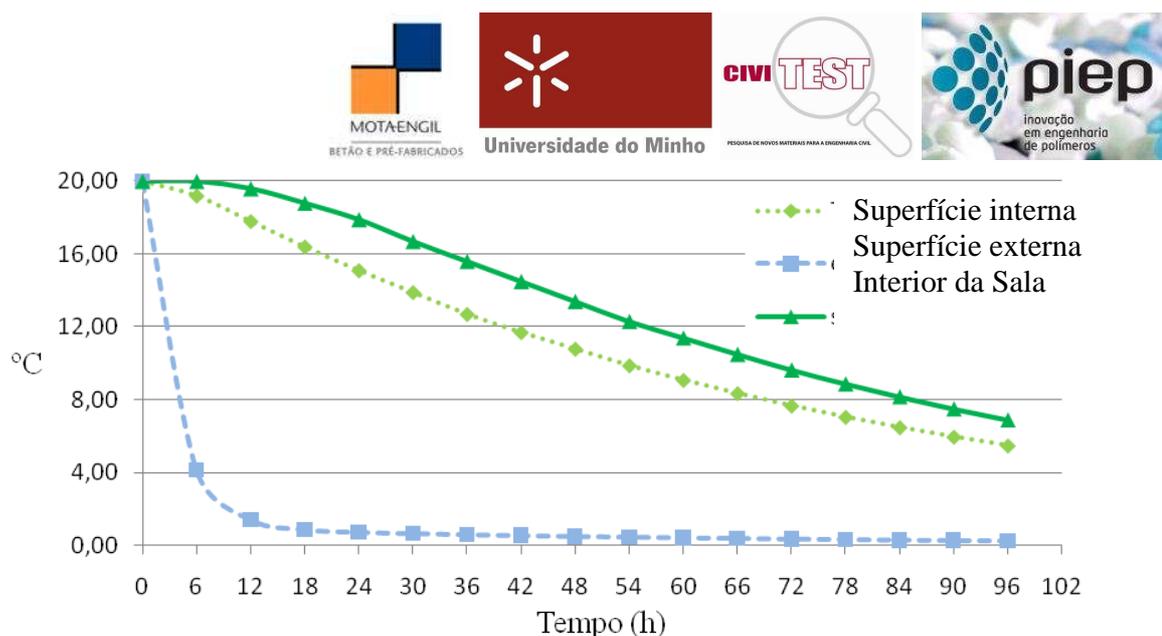


Figura 22 – Evolução das temperaturas da sala interior e das superfícies externa e interna ao longo do tempo.

1.5.4. Aplicação do cálculo R_{mef}

Pelos resultados obtidos nos dois estudos detalhados anteriormente, pode-se afirmar que a proposta do cálculo da resistência térmica do painel sandwich pelo Método dos elementos finitos é válida. Com uma margem de erro entre 0,3 a 0,4 (%), o cálculo da resistência térmica (R_{MEF}) do painel sandwich é bastante idêntico ao do cálculo analítico da resistência térmica (R). Salienta-se que na solução do painel sandwich a temperatura da superfície externa baixa muito nos instantes iniciais, quando comparada com a parede de betão de 50 cm. Este fenómeno deve-se à espessura reduzida do painel de betão externo. Tendo em conta estes resultados, o cálculo da resistência térmica pelo Método dos elementos finitos (R_{MEF}) será aplicado nos estudos apresentados em seguida.

1.6. Estudos paramétricos

O objectivo dos estudos paramétricos é avaliar a influência, que alterações possíveis de ser adoptadas no quadro da optimização estrutural do painel têm no desempenho térmico do sistema construtivo em desenvolvimento no quadro do projecto LEGOUSE.

As pontes térmicas geram um acréscimo de consumo de energia originando uma diminuição da sustentabilidade do edifício. As pontes térmicas causadas pelos conectores nos painéis sandwich são analisadas neste capítulo através de estudos paramétricos. Estes estudos são resumidamente apresentados no



Quadro 8.

Quadro 8 – Estudos paramétricos.

Conectores com diferentes materiais:
<ul style="list-style-type: none">◆ Treliça de Aço◆ Treliça de RFP
Diferentes soluções de conectores FRP:
<ul style="list-style-type: none">◆ Treliça◆ Treliça com nervura◆ Perfil I colado◆ Perfil I embebido em nervura
Diferentes espessuras de betão:
<ul style="list-style-type: none">◆ 20 mm◆ 40 mm◆ 60 mm◆ 80 mm
Diferentes tipos de isolamentos:
Poliestireno expandido extrudido (XPS):
<ul style="list-style-type: none">◆ 50 mm◆ 80 mm◆ 100 mm◆ 120 mm◆ 150 mm
Espuma rígida de poliuretano (PUR) injectado <i>in situ</i> :
<ul style="list-style-type: none">◆ 50 mm

<ul style="list-style-type: none"> ◆ 80 mm ◆ 100 mm ◆ 120 mm ◆ 150 mm

Quadro 8 – Estudos paramétricos (continuação).

Diferentes tipos de isolamentos (continuação):
Aglomerados de cortiça expandida (ICB):
<ul style="list-style-type: none"> ◆ 50 mm ◆ 80 mm ◆ 100 mm ◆ 120 mm ◆ 150 mm
Lã de rocha (MW):
<ul style="list-style-type: none"> ◆ 50 mm ◆ 80 mm ◆ 100 mm ◆ 120 mm ◆ 150 mm

A condutibilidade térmica, a massa volúmica e o calor específico adoptados são apresentados no Quadro 9 no

Quadro 10 e Quadro 11, respectivamente.

Quadro 9 – Condutibilidade térmica adoptado para os materiais de isolamento.

MATERIAL	Condutibilidade térmica	
	λ (W/m \times °C)	Referência

Poliestireno (XPS)	0.037	(ITE50, 2006)
Poliuretano (PUR)	0.042	(ITE50, 2006)
Cortiça (ICB)	0.045	(ITE50, 2006)
Lã de Rocha (MW)	0.040	(ITE50, 2006)

Quadro 10 – Massa volúmica adoptada para os materiais de isolamento.

MATERIAL	Massa volúmica	
	Massa vol. (kg/m ³)	Referência Bibliográfica
Poliestireno (XPS)	55	(Incropera et al., 2007)
Poliuretano (PUR)	40	(ITE50)
Cortiça (ICB)	120	(ITE50)
Lã de Rocha (MW)	65	(ITE50)

Quadro 11 – Calor específico adoptado para os materiais de isolamento.

MATERIAL	Calor específico		
	cp (J/kg×°C)	cp (J/m ³ ×°C)	Referência Bibliográfica
Poliestireno (XPS)	1210	66550	(Incropera et al., 2007)
Poliuretano (PUR)	1400	56000	(BING, 2006)
Cortiça (ICB)	1800	216000	(Incropera et al., 2007)
Lã de Rocha (MW)	1590	103350	(Incropera et al., 2007)

1.6.1. Conectores de aço e FRP

Optou-se inicialmente por comparar dois conectores com materiais diferentes. Os materiais escolhidos foram o aço, material muito corrente na construção civil, e o FRP, pois este último é um material com boas características mecânicas e térmicas. O objectivo desta comparação é comprovar as vantagens e desvantagens da utilização destes dois materiais.

O perfil do conector utilizado foi a treliça com uma espessura equivalente constante. Como se trata de uma análise bidimensional a espessura equivalente foi obtida de maneira a equivaler um perfil rectangular de 5 mm de espessura ao longo da vertical do painel, de modo a poder comparar com os estudos apresentados mais adiante. Como a treliça possui uma área significativamente menor ao longo do painel (Figura 23), era de esperar uma espessura equivalente menor. O diâmetro utilizado para o cálculo da área da treliça para equivaler ao perfil rectangular foi de 10 mm. Assim a espessura equivalente obtida foi de 0,64 mm.

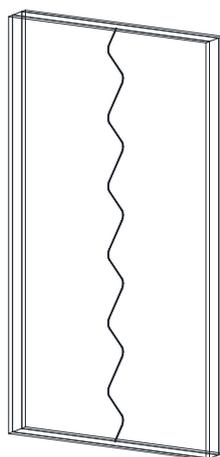


Figura 23 – Treliça simulada de diâmetro 10 mm.

1.6.1.1. Conectores de aço

1.6.1.1.1. Geometria e desenhos

A geometria do modelo de conectores de aço inserido no software DIANA é ilustrada na **Error! Reference source not found.** Figura 24 (a). Na Figura 24(b) é apresentado com pormenorização o conector de aço que faz a ligação mecânica entre as duas camadas de betão.

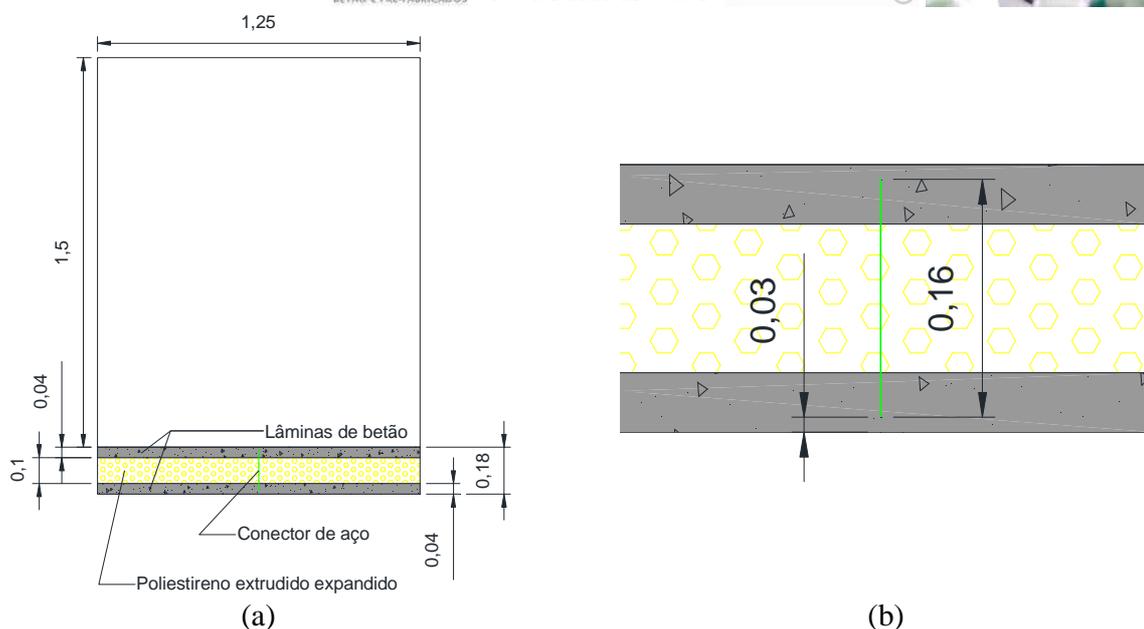


Figura 24 – Geometria do painel sandwich com conectores de treliça de aço (vista em planta e pormenor; unidades em metros).

1.6.1.1.2. Malha adoptada

A malha adoptada para o modelo do painel sandwich com conectores treliça de aço foi de 500 divisões na largura e 72 na espessura. A Figura 25 ilustra a malha adoptada.

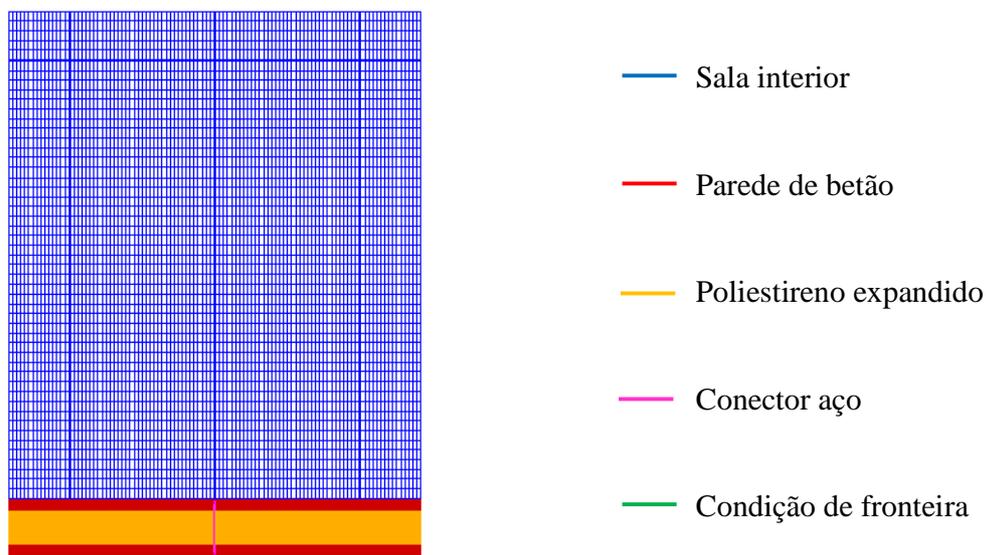


Figura 25 – Malha adoptada no estudo do painel sandwich com conector de treliça de aço.

1.6.1.1.3. Resultados

O valor da resistência térmica para o painel sandwich com conector de treliça de aço é de aproximadamente $R_{MEF} = 2,4516 \left(\frac{m^2 \times ^\circ C}{W} \right)$, tendo sido utilizado o critério de convergência, equação (14), para certificação de uma boa aproximação do valor de R_{MEF} .

Comparando com um valor de R teórico sem considerar as pontes térmicas, isto é, considerando um painel sandwich sem conectores, a diferença é aproximadamente de 10,61%.

1.6.1.2. Conectores de FRP

1.6.1.2.1. Geometria e desenhos

A geometria do modelo de conectores de FRP inserido no software DIANA é ilustrada na Figura 26(a). Na Figura 26(b) é apresentado com pormenorização o conector de FRP que faz a ligação mecânica entre as duas camadas de betão.

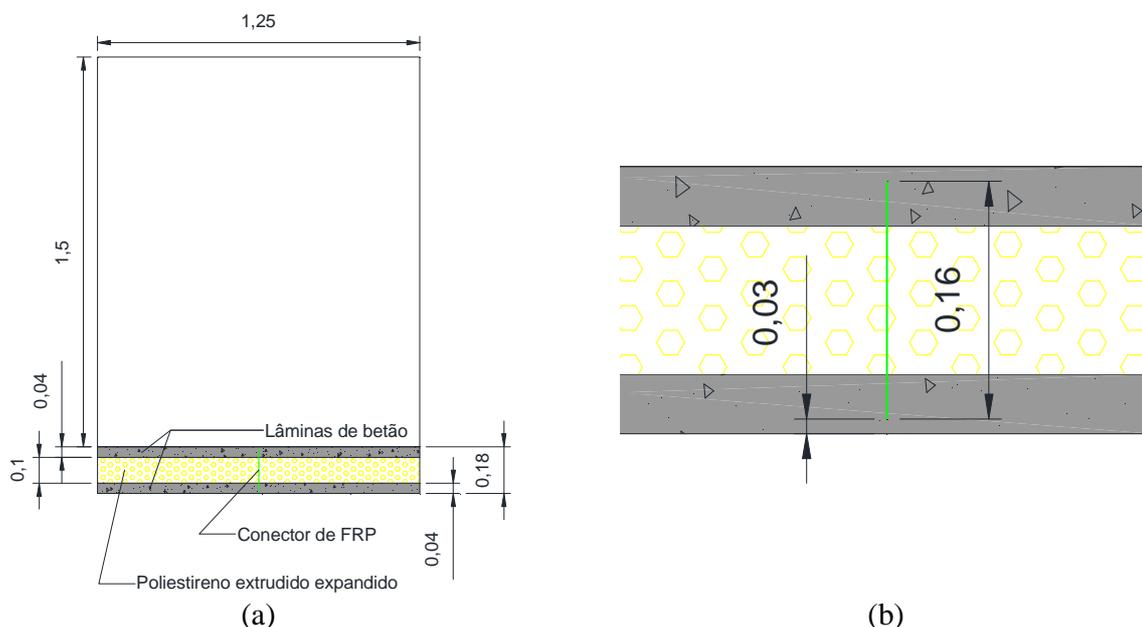


Figura 26 – Geometria do painel sandwich com conectores de treliça de FRP (vista em planta e pormenor; unidades em metros).

1.6.1.2.2. Malha adoptada

A malha adoptada para o modelo do painel sandwich com conectores treliça de FRP foi de 500 divisões na largura e de 72 na espessura. A Figura 27 ilustra a malha adoptada.

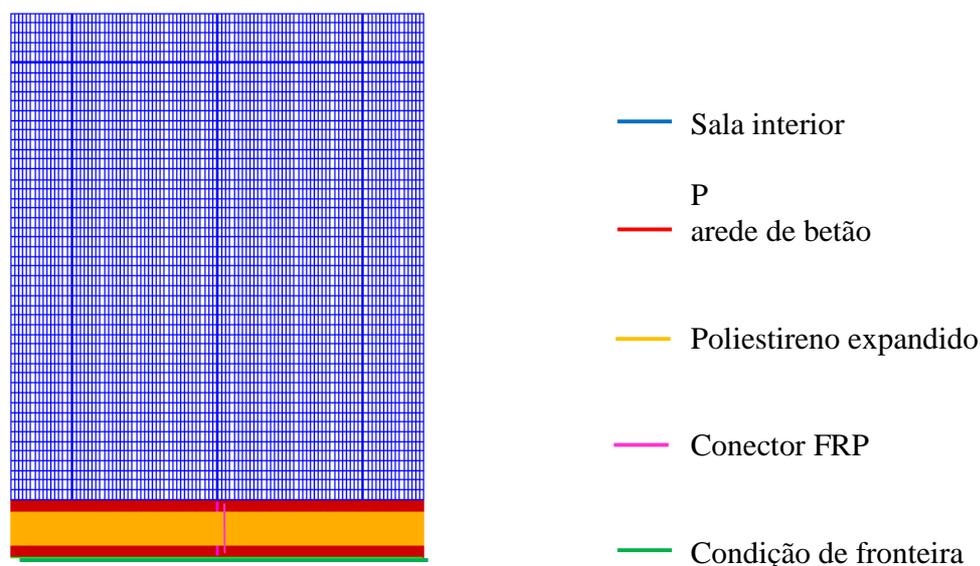


Figura 27 – Malha adoptada no estudo do painel sandwich com conector treliça de FRP.

1.6.1.2.3. Resultados

O valor da resistência térmica para o painel sandwich com conector de treliça de FRP é de aproximadamente $R_{MEF} = 2,7778 \left(m^2 \times ^\circ C / W \right)$, tendo sido utilizado o critério de convergência, equação (14), para certificação de uma boa aproximação do valor de R_{MEF} .

Comparando com um valor de R teórico sem considerar as pontes térmicas, isto é, considerando um painel sandwich sem conectores, a diferença entre os valores é aproximadamente de 0,39%.

1.6.1.3. Comparação e análise dos resultados

Com base nos valores obtidos anteriormente (R_{MEF}) verificou-se que o conector de FRP possui grande vantagem em relação ao conector de aço. Enquanto o valor de R_{MEF} do FRP é de $2,7778 \left(m^2 \times ^\circ C / W \right)$, o conector de aço demonstra uma perda de aproximadamente 11% da resistência térmica do painel sandwich, sendo $R_{MEF} = 2,4516 \left(m^2 \times ^\circ C / W \right)$.

Utilizando conectores de aço, o ponto de análise do interior da sala atinge a temperatura de 10°C aproximadamente às 54 horas, isto para uma situação extrema, em que a camada exterior do painel sandwich está continuamente a ser “mantida” a uma temperatura de 0°C. Mantendo as mesmas condições fronteira e de temperaturas iniciais, a utilização de conectores de FRP permite atingir no ponto de controlo uma temperatura de aproximadamente 10°C às 69 horas.

É assim de destacar a diferença significativa de 15 horas proporcionada pela utilização de conectores de aços e de FRP em termos do desempenho no critério utilizado neste estudo. É ainda de salientar que os conectores de FRP possuem uma espessura muito pequena (0,64 mm) e que, mesmo assim, ao fim de 96 horas (quatro dias) já proporciona uma diferença da temperatura interior (3°C), quando se compara com a utilização de conectores de aço. A Figura 28 ilustra a diferença de temperatura da sala interior ao longo do tempo quando se utilizada conector de aço versus conector de FRP.

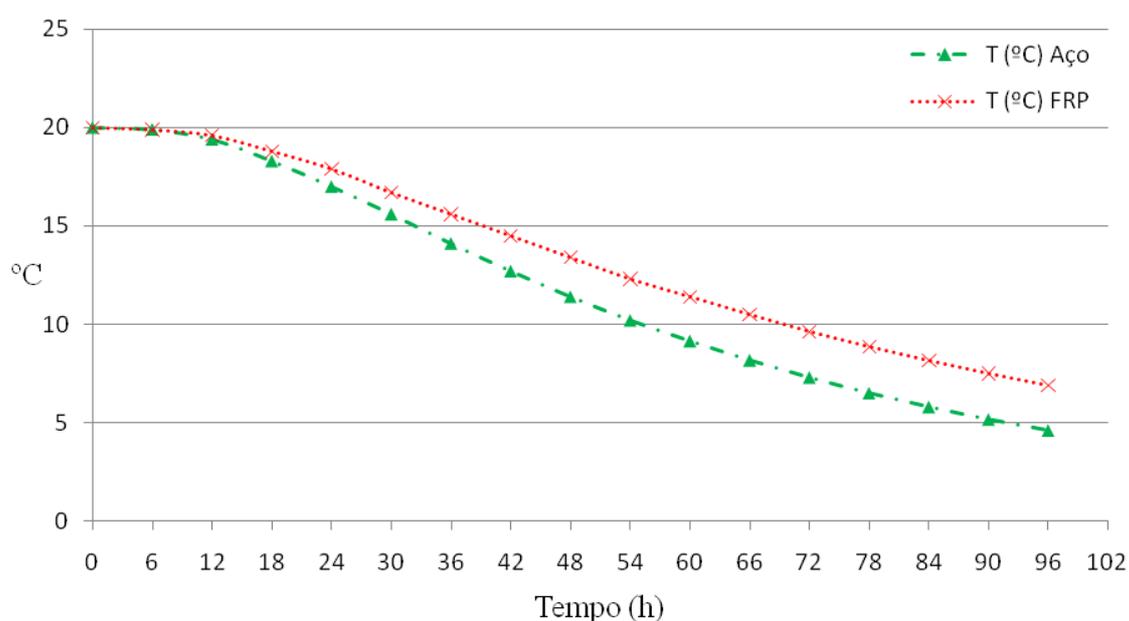


Figura 28 – Mudança da temperatura no interior da sala ao longo do tempo, com o uso de conectores de aço e de FRP.

A Figura 29 demonstra a influência da utilização dos conectores de FRP, de forma a melhorar significativamente a resistência térmica dos painéis. Pois trata-se do uso de conectores com espessura reduzida e já é possível visualizar uma diferença de temperatura significativa em volta do conector de aço (Figura 29(a), (b) e (c)). A evolução temperatura dos painéis ao longo do tempo apresentada na Figura 29, ilustra apenas a diferença da difusão da temperatura nas primeiras 24 horas.

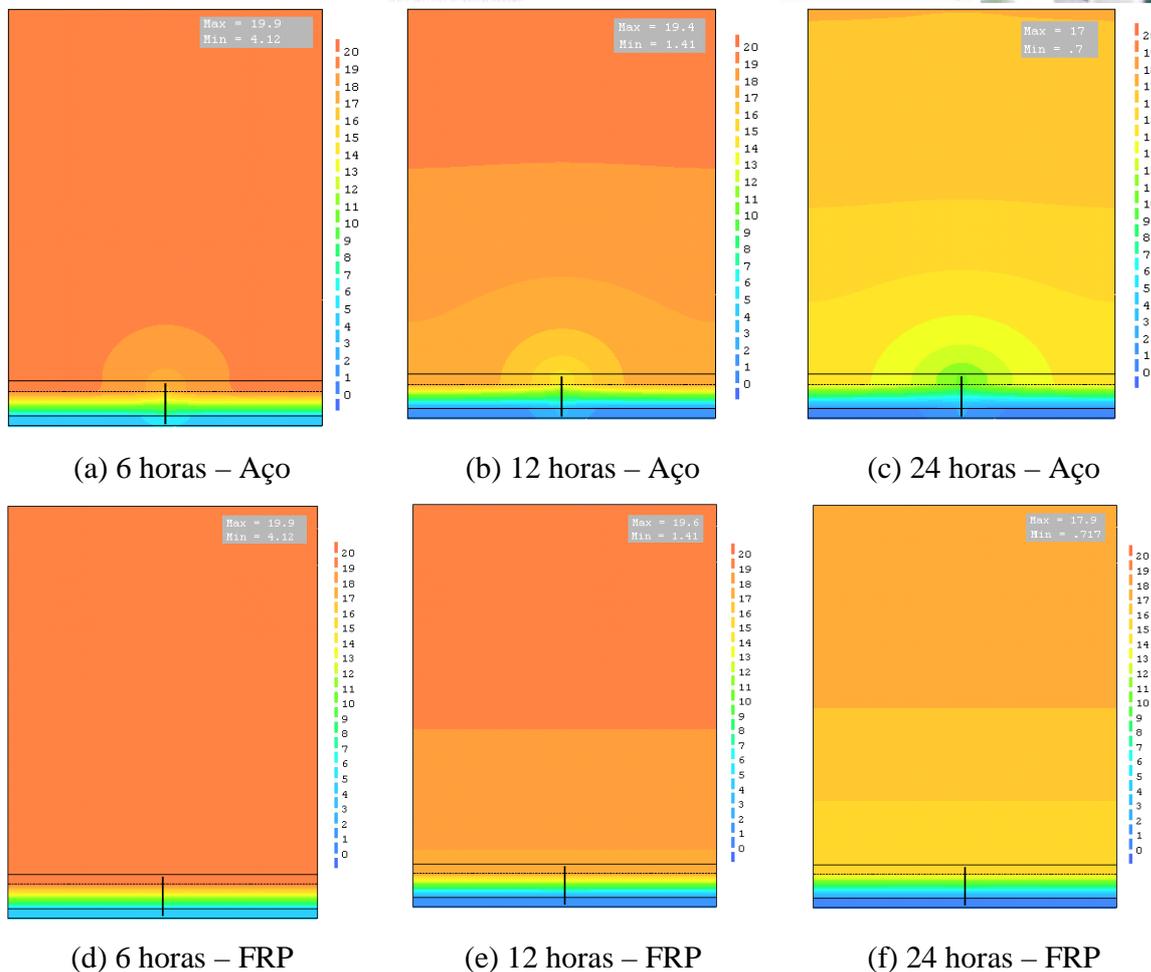


Figura 29 – Evolução da temperatura da sala interior passado 6 horas, 12 horas e 24 horas. (a), (b) e (c) representam o painel sandwich com conector de aço. (d), (e) e (f) representam o painel sandwich com conectores de FRP.

1.6.2. Diferentes soluções de conectores FRP

Na concepção estrutural da casa modular, foram propostas diferentes soluções. No entanto desconhece-se a performance destas soluções no campo do conforto térmico. Este subcapítulo tem como objectivo estudar apenas as soluções para as quais é espectável um bom comportamento estrutural e térmico.

Nas soluções estudadas, duas são de painéis com nervuras e duas sem nervura num total de quatro soluções. Existindo dois tipos de conectores, conectores de treliça e conectores de perfil em I, que combinam com painéis nervurados e painéis lisos. Todas as soluções são constituídas por conectores de FRP.

1.6.2.1. Treliça

1.6.2.1.1. Geometria e desenhos

A geometria do painel sandwich com conectores treliça de FRP inserido no software DIANA é ilustrada na Figura 30(a). Na Figura 30(b) é apresentado com pormenorização o conector treliça de FRP que faz a ligação mecânica entre as duas camadas de betão.

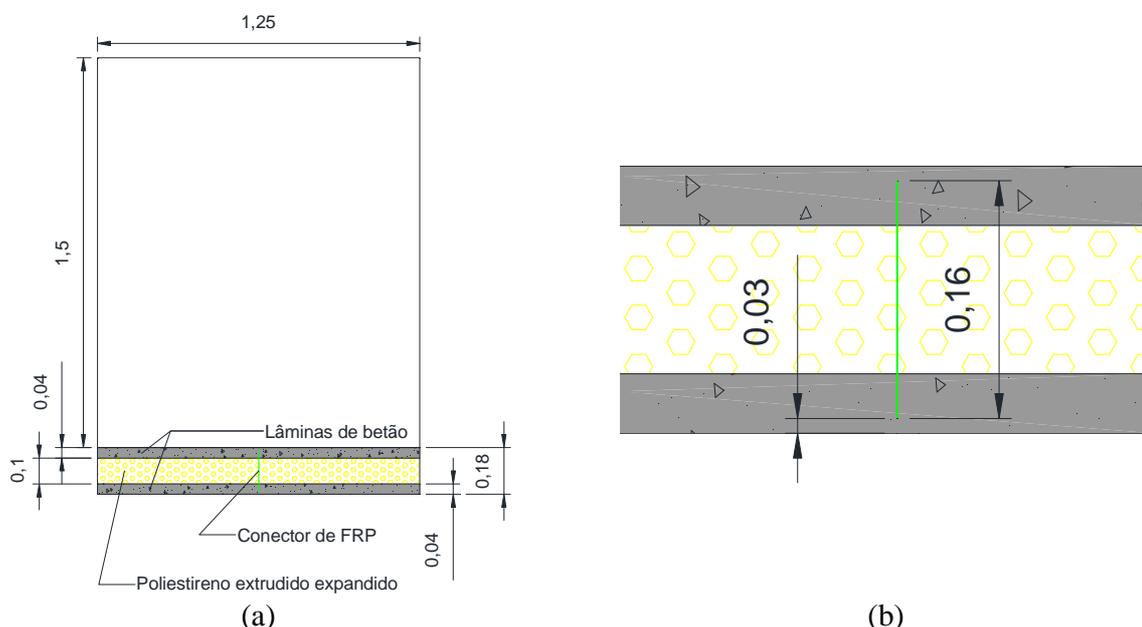


Figura 30 – Geometria do painel sandwich com conectores treliça de FRP (vista em planta e pormenor; unidades em metros).

1.6.2.1.2. Malha adoptada

A malha adoptada para o modelo do painel sandwich com conectores treliça de FRP foi de 500 divisões na sua largura e de 72 na sua espessura. A Figura 31 ilustra a malha adoptada.

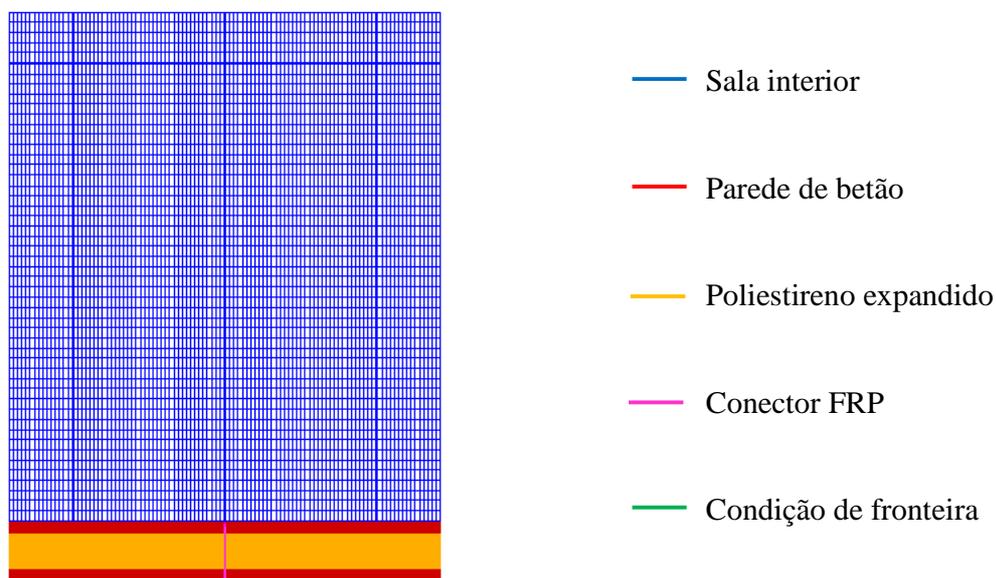


Figura 31 – Malha adoptada no estudo do painel sandwich com conector treliça de FRP.

1.6.2.1.3. Resultados

O valor da resistência térmica para o painel sandwich com conector treliça de FRP é de aproximadamente $R_{MEF} = 2,7098 \left(\text{m}^2 \times \frac{\text{C}}{\text{W}} \right)$, tendo sido utilizado o critério de convergência, equação (14), para certificação de uma boa aproximação do valor de R_{MEF} . Comparando com um valor do R teórico, isto é, sem considerar as pontes térmicas, a diferença é aproximadamente de 1,20%.

1.6.2.2. Treliça com nervura

1.6.2.2.1. Geometria e desenhos

A geometria do painel sandwich com nervuras e conectores treliça de FRP inserido no software DIANA é ilustrada na Figura 32(a). Na Figura 32(b) é apresentado com pormenorização o conector de FRP que faz a ligação mecânica entre as duas camadas de betão.

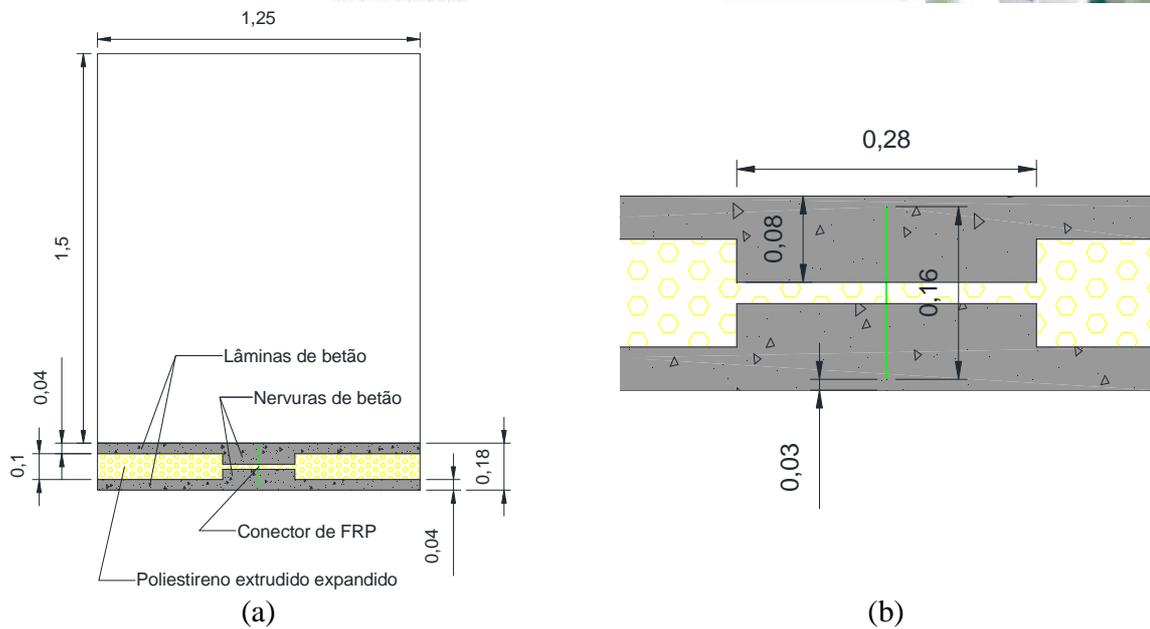


Figura 32 – Geometria do painel sandwich com nervuras e conectores treliça de FRP (vista em planta e pormenor; unidades em metros).

1.6.2.2.2. Malha adoptada

A malha adoptada para o modelo do painel sandwich com nervuras e conectores treliça de FRP foi de 500 divisões na sua largura e de 72 na sua espessura. A Figura 33 ilustra a malha adoptada.

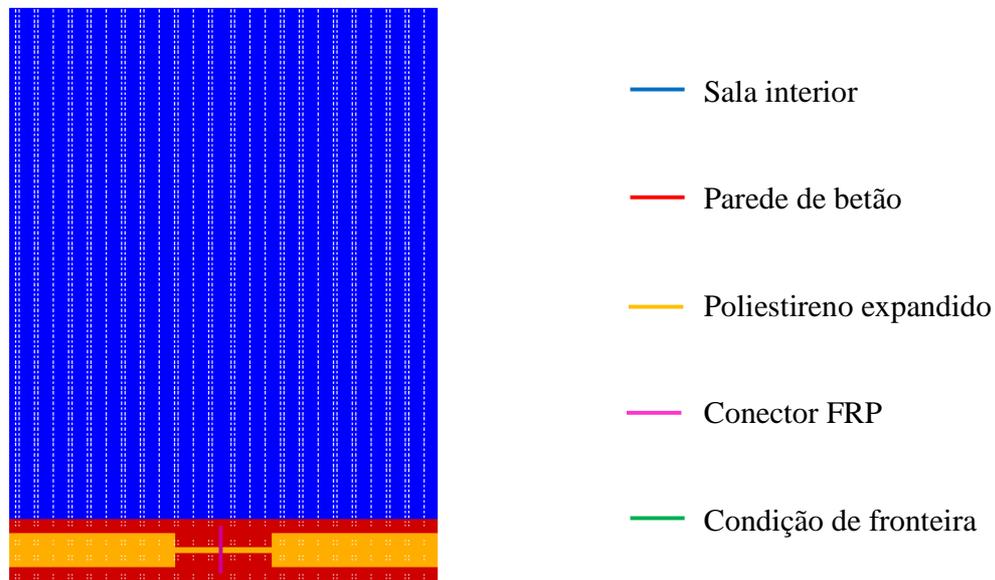


Figura 33 – Malha adoptada no estudo do painel sandwich com nervuras e conector treliça de FRP.

1.6.2.2.3. Resultados

O valor da resistência térmica para o painel sandwich com nervuras e conector treliça de FRP é de aproximadamente $R_{MEF} = 1,6462 \left(m^2 \times \frac{C}{W} \right)$, tendo sido utilizado o critério de convergência, equação (14), para certificação de uma boa aproximação do valor de R_{MEF} . Comparando com um valor do R teórico, isto é, sem considerar as pontes térmicas, a diferença é aproximadamente de 39,98%. Esta diferença deve-se à existência de nervuras no painel.

1.6.2.3. Perfil I colado

1.6.2.3.1. Geometria e desenhos

A geometria do painel sandwich com conectores perfil I de FRP colado, inserido no software DIANA, é ilustrada na Figura 34(a). Na Figura 34(b) é apresentada com pormenorização o conector perfil I de FRP que faz a ligação mecânica entre as duas camadas de betão.

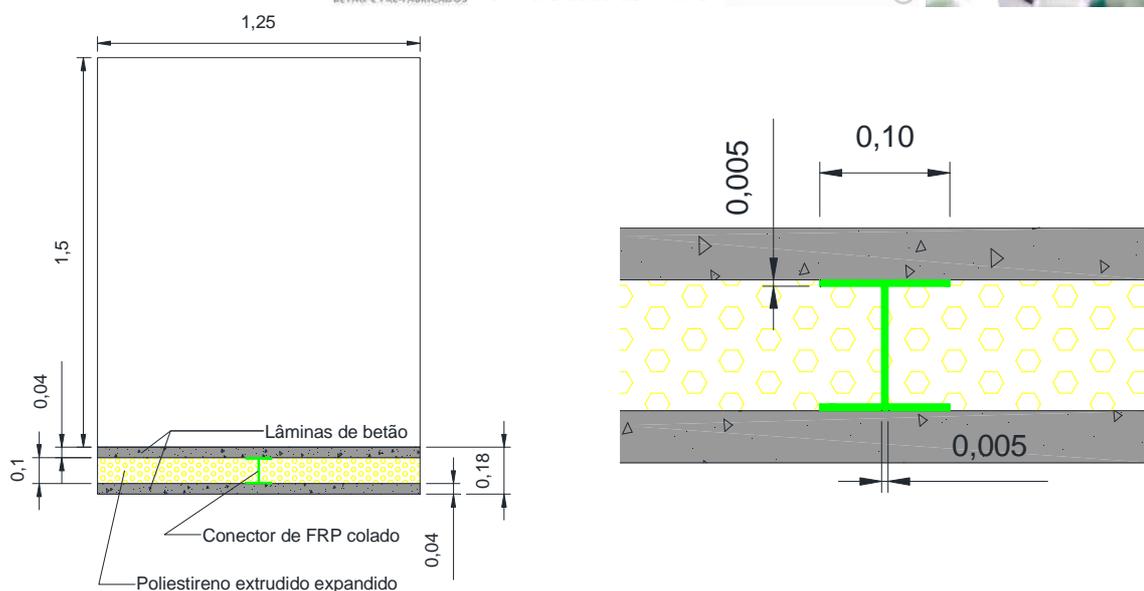


Figura 34 – Geometria do painel sandwich com conectores perfil I colados de FRP (vista em planta e pormenor; unidades em metros).

1.6.2.3.2. Malha adoptada

A malha adoptada para o modelo do painel sandwich com conector perfil I de FRP colados foi de 500 divisões na sua largura e de 72 na sua espessura, tal como representado na Figura 35.

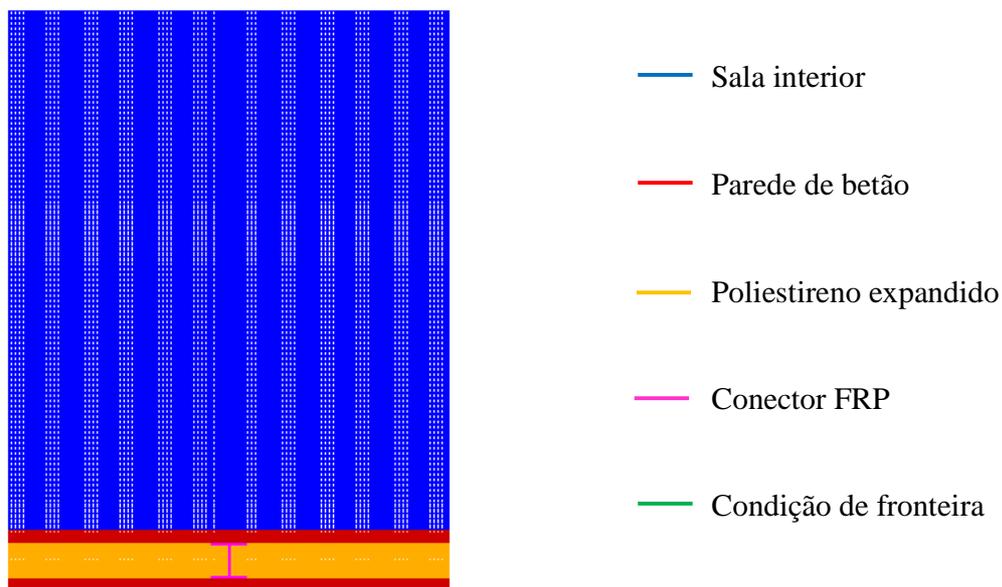


Figura 35 – Malha adoptada no estudo do painel sandwich com conector perfil I colado de FRP.

1.6.2.3.3. Resultados

O valor da resistência térmica para o painel sandwich com conector perfil I de FRP colado é de aproximadamente $R_{MEF} = 2,6752 \left(m^2 \times ^\circ C / W \right)$, tendo sido utilizado o critério de convergência, equação (14), para certificação de uma boa aproximação do valor de R_{MEF} . Comparando com um valor do R teórico, isto é, sem considerar as pontes térmicas, a diferença é aproximadamente de 2,46 %.

1.6.2.4. Perfil I embebido em nervura

1.6.2.4.1. Geometria e desenhos

A geometria do painel sandwich com conectores perfil I de FRP embebido em nervuras, inserido no software DIANA, é ilustrada na Figura 36(a). Na Figura 36(b) é apresentado com pormenorização o conector perfil I de FRP que faz a ligação mecânica entre as duas camadas de betão.

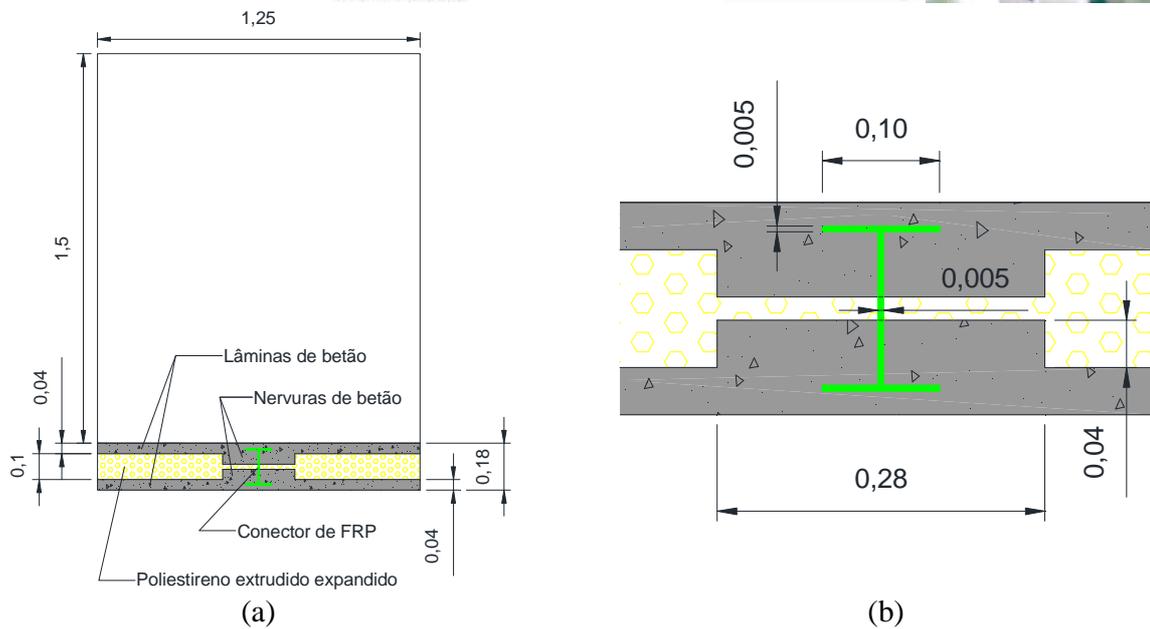


Figura 36 – Geometria do painel sandwich com conectores perfil I de FRP embebido em nervuras (vista em planta e pormenor; unidades em metros).

1.6.2.4.2. Malha adoptada

A malha adoptada para o modelo do painel sandwich com conectores perfil I de FRP embebido em nervuras foi de 500 divisões na sua largura e de 72 na sua espessura. A Figura 37 ilustra a malha adoptada.

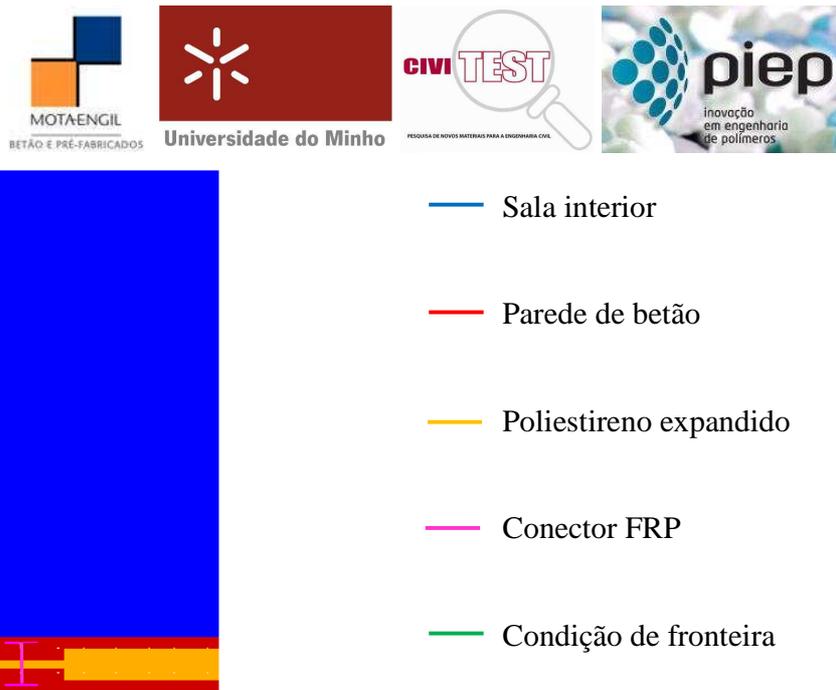


Figura 37 – Malha adoptada no estudo do painel sandwich com conector perfil I de FRP embebido em nervuras.

1.6.2.4.3. Resultados

O valor da resistência térmica para o painel sandwich com conector perfil I de FRP embebido em nervuras é de aproximadamente $R_{MEF} = 1,6161 \left(m^2 \times ^\circ C / W \right)$, tendo sido utilizado o critério de convergência, equação (14), para certificação de uma boa aproximação do valor de R_{MEF} . Comparando com um valor do R teórico, isto é, sem considerar as pontes térmicas, a diferença é aproximadamente de 41,08%.

1.6.2.5. Comparação e análise dos resultados

Após os resultados obtidos das diferentes soluções construtivas, pode-se afirmar que a escolha da melhor solução construtiva depende de vários factores. No contexto do comportamento térmico os painéis com nervuras devem ser evitados devido à grande influência que as nervuras têm na determinação da resistência térmica do painel. No entanto as nervuras apresentam grandes vantagens ao nível do comportamento estrutural. Daí conclui-se que a obtenção da melhor solução construtiva seja uma decisão onde tem de ser efectuada uma ponderação dos factores mais importantes para o projecto. No entanto, pode-se dizer que uma solução bastante prometedora é de um painel constituída por duas camadas de betão sem nervuras com um conector de perfil em I de FRP colado, pois possui boa resistência térmica e um bom índice de resistência mecânica.

No Quadro **Error! No text of specified style in document.12**, pode-se visualizar um resumo dos valores de R_{MEF} para as diferentes soluções construtivas.



Quadro **Error! No text of specified style in document.12** – Valores de R_{MEF} de diferentes soluções construtivas.

Painel constituído por conectores de:	$R_{MEF} \left(m^2 \times \frac{C}{W} \right)$
Treliça	2,71
Treliça com nervura	1,65
Perfil I colado	2,68
Perfil I embebido em nervura	1,61

1.6.3. Espessura do betão

Foi também efectuado um estudo paramétrico da espessura da camada de betão, de modo a verificar a sua importância na resistência do painel sandwich. Variando a espessura da camada de betão de 20 mm a 80 mm em incrementos de 20 mm, é também possível obter uma melhor percepção de custo/resistência térmica do painel sandwich.

O painel sandwich utilizado é constituído por uma camada de isolamento em poliestireno expandido de 100 mm de espessura, um conector perfil em I de FRP colado e duas camadas de betão cuja espessura variará no sentido de avaliar a sua influência no desempenho térmico do painel.

1.6.3.1. Espessura de 20 mm

1.6.3.1.1. Geometria e desenhos

A geometria do painel sandwich com conectores perfil I de FRP colado e espessura de 20mm para as camadas de betão, inserido no software DIANA, é ilustrada na Figura 38.



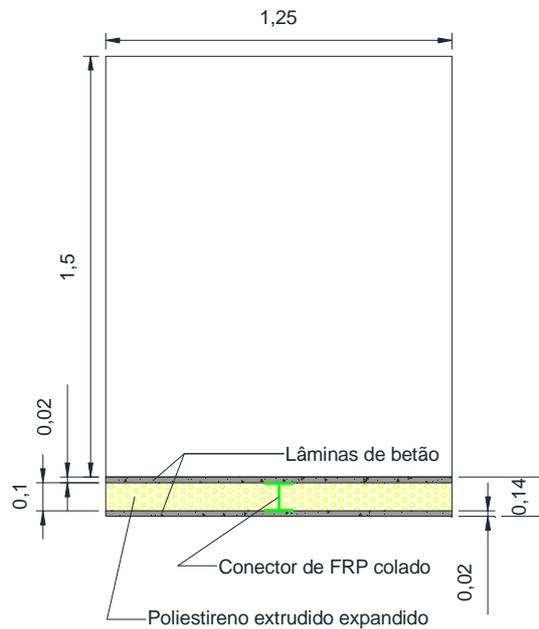


Figura 38 – Geometria do painel sandwich com conectores perfil I colados de FRP e espessura da camada de betão de 20 mm (vista em planta, unidades em metros).

1.6.3.1.2. Malha adoptada

A malha adoptada para o modelo do painel sandwich com conectores perfil I de FRP colado e com uma espessura de betão de 20 mm foi de 500 divisões na sua largura e de 72 na sua espessura. A Figura 39 ilustra a malha adoptada.

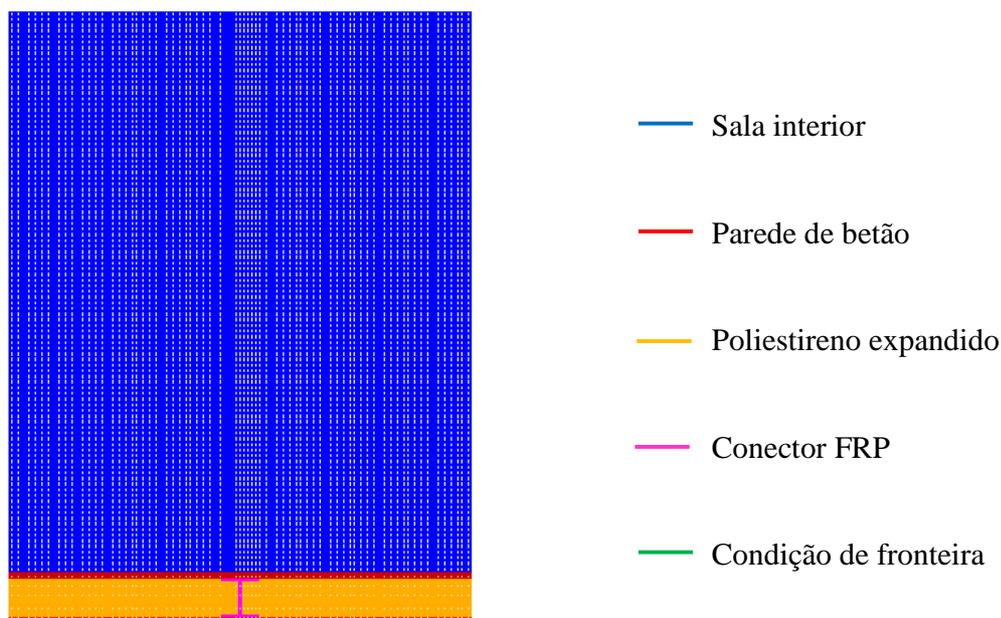


Figura 39 – Malha adoptada no estudo do painel sandwich com conector perfil I colado de FRP e espessura da camada de betão de 20 mm.

1.6.3.1.3. Resultados

O valor da resistência térmica para o painel sandwich com conector perfil I de FRP colado e com uma espessura de betão de 20 mm é de aproximadamente $R_{MEF} = 2,9564 \left(m^2 \times ^\circ C / W \right)$, tendo sido utilizado o critério de convergência imposto pela equação (14) para certificação de uma boa aproximação do valor de R_{MEF} . Comparando com um valor do R teórico ($2,72 \left(m^2 \times ^\circ C / W \right)$), sem considerar as pontes térmicas, a diferença é de aproximadamente 8,58%. Esta melhoria de comportamento deve-se à diminuição da espessura da camada de betão, que é o material com a maior condutibilidade térmica do painel.

1.6.3.2. Espessura de 40 mm

1.6.3.2.1. Geometria e desenhos

A geometria do painel sandwich com conectores perfil I de FRP colado e espessura de 40mm para as camadas de betão, inserido no software DIANA, é ilustrada na Figura 40.

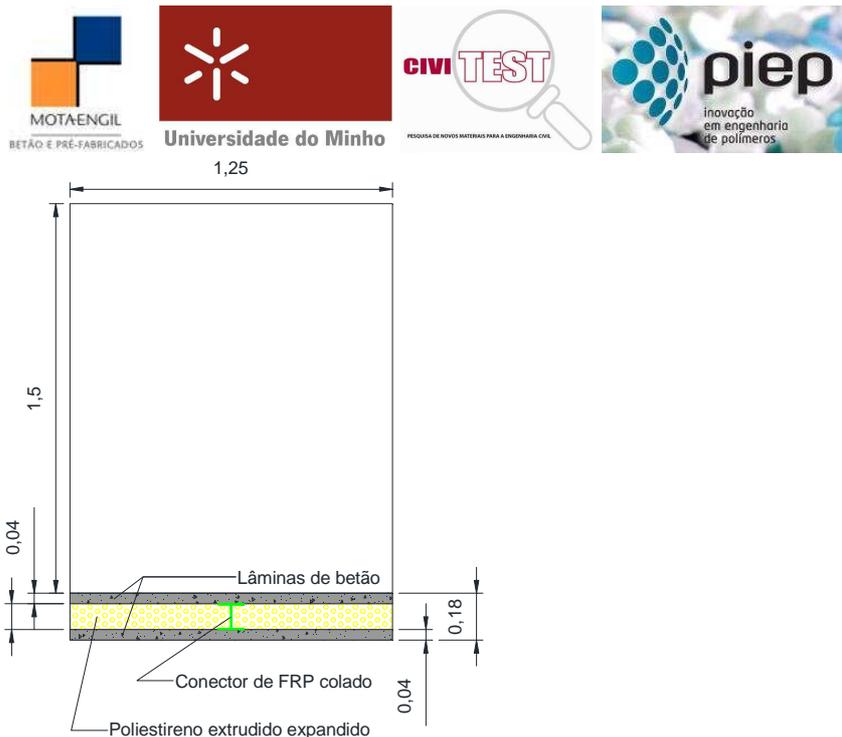


Figura 40 – Geometria do painel sandwich com conectores perfil I colados de FRP e espessura da camada de betão de 40 mm (vista em planta, unidades em metros).

1.6.3.2.2. Malha adoptada

A malha adoptada para o modelo do painel sandwich com conectores perfil I de FRP colado e com uma espessura de betão de 40 mm foi de 500 divisões na sua largura e de 72 na sua espessura. A Figura 41 ilustra a malha adoptada.

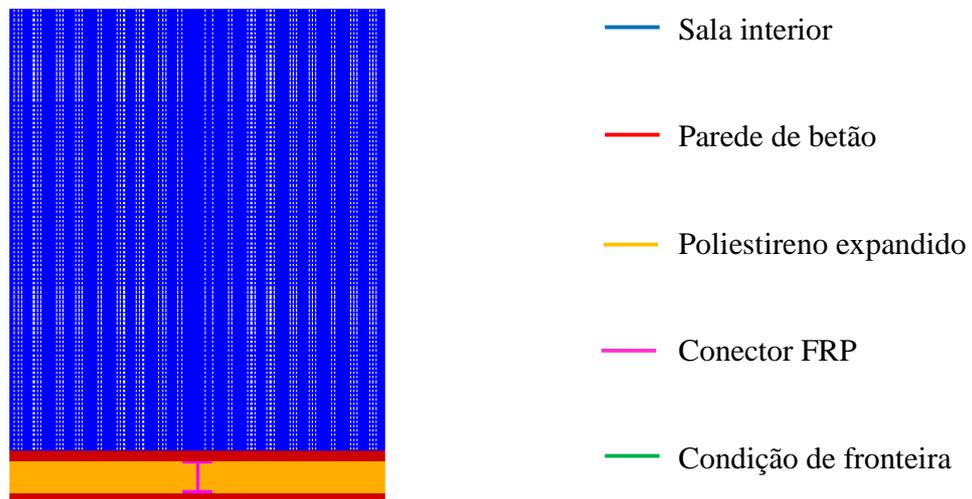


Figura 41 – Malha adoptada no estudo do painel sandwich com conector perfil I colado de FRP e espessura da camada de betão de 40 mm.

1.6.3.2.3. Resultados

O valor da resistência térmica para o painel sandwich com conector perfil I de FRP colado e com uma espessura de betão de 40 mm é de aproximadamente $R_{MEF} = 2,6752 \left(m^2 \times ^\circ C / W \right)$, tendo sido utilizado o critério de convergência indicado na equação (14) para certificação de uma boa aproximação do valor de R_{MEF} . Comparando com um valor do R teórico ($2,74 \left(m^2 \times ^\circ C / W \right)$), sem considerar as pontes térmicas, a diferença é aproximadamente de 2,46%.

1.6.3.3. Espessura de 60 mm

1.6.3.3.1. Geometria e desenhos

A geometria do painel sandwich com conectores perfil I de FRP colado e espessura de 60mm para as camadas de betão, inserido no software DIANA, é ilustrada na Figura 42.

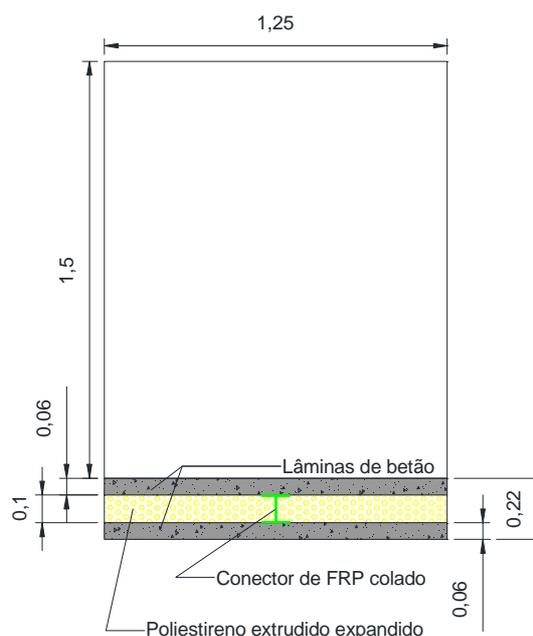


Figura 42 – Geometria do painel sandwich com conectores perfil I colados de FRP e espessura da camada de betão de 60 mm (vista em planta, unidades em metros).

1.6.3.3.2. Malha adoptada

A malha adoptada para o modelo do painel sandwich com conectores perfil I de FRP colado e com uma espessura de betão de 60 mm foi de 500 divisões na sua largura e de 72 na sua espessura. A Figura 43 ilustra a malha adoptada.

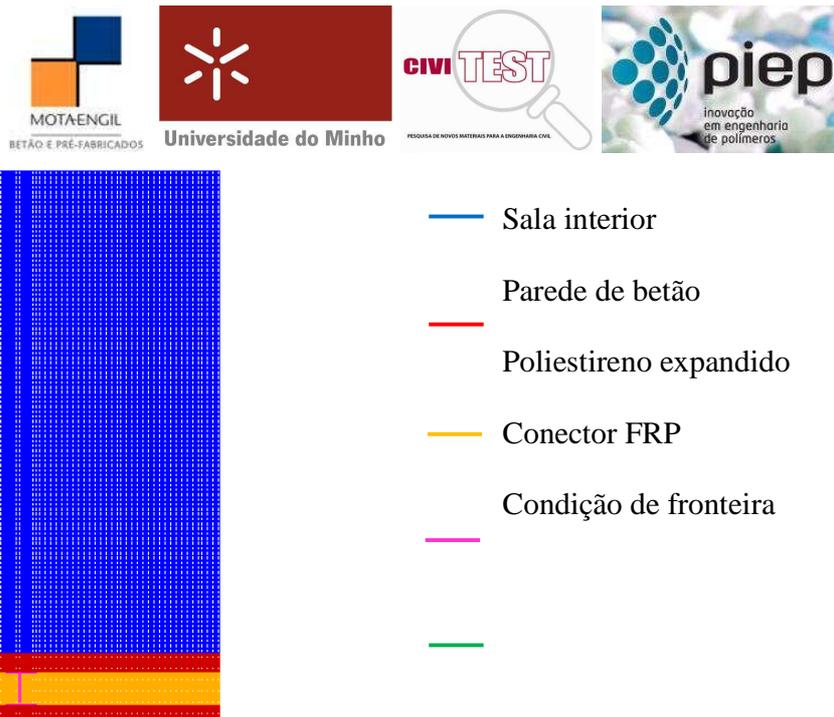


Figura 43 – Malha adoptada no estudo do painel sandwich com conector perfil I colado de FRP e espessura da camada de betão de 60 mm.

1.6.3.3. Resultados

O valor da resistência térmica para o painel sandwich com conector perfil I de FRP colado e com uma espessura de betão de 60 mm é de aproximadamente $R_{MEF} = 2,3556 \left(m^2 \times ^\circ C / W \right)$, tendo sido utilizado o critério de convergência indicado na equação (14) para certificação de uma boa aproximação do valor de R_{MEF} . Comparando com um valor do R teórico ($2,76 \left(m^2 \times ^\circ C / W \right)$), sem considerar as pontes térmicas, a diferença é aproximadamente de 14,74%.

1.6.3.4. Espessura de 80 mm

1.6.3.4.1. Geometria e desenhos

A geometria do painel sandwich com conectores perfil I de FRP colado e espessura de 80mm para as camadas de betão, inserido no software DIANA, é ilustrada na Figura 44.

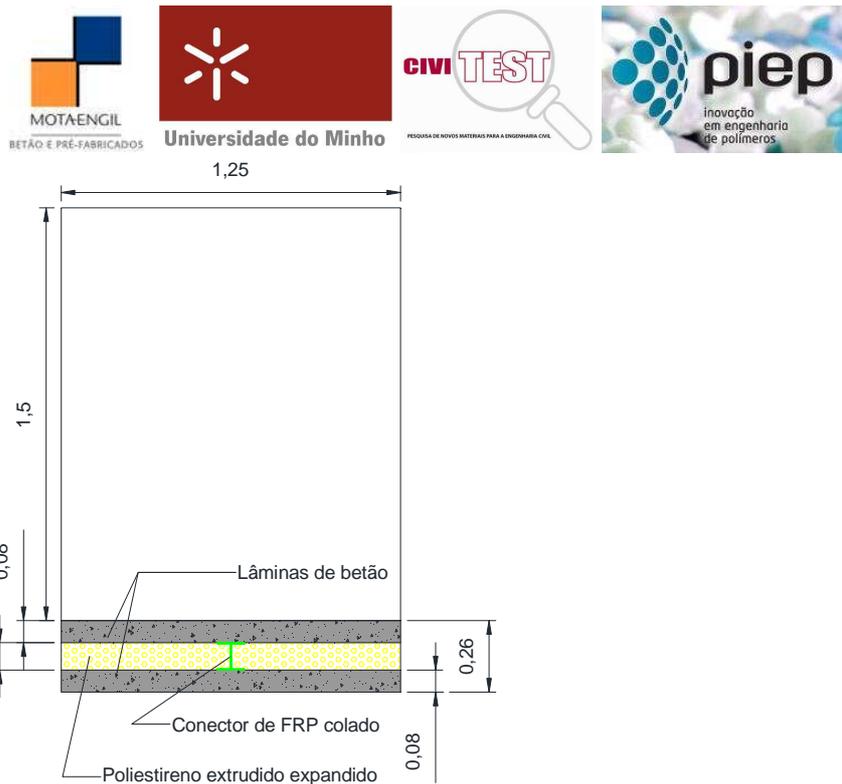


Figura 44 – Geometria do painel sandwich com conectores perfil I colados de FRP e espessura da camada de betão de 80 mm (vista em planta, unidades em metros).

1.6.3.4.2. Malha adoptada

A malha adoptada para o modelo do painel sandwich com conectores perfil I de FRP colado e com uma espessura de betão de 80 mm foi de 500 divisões na sua largura e de 72 na sua espessura. A Figura 45 ilustra a malha adoptada.

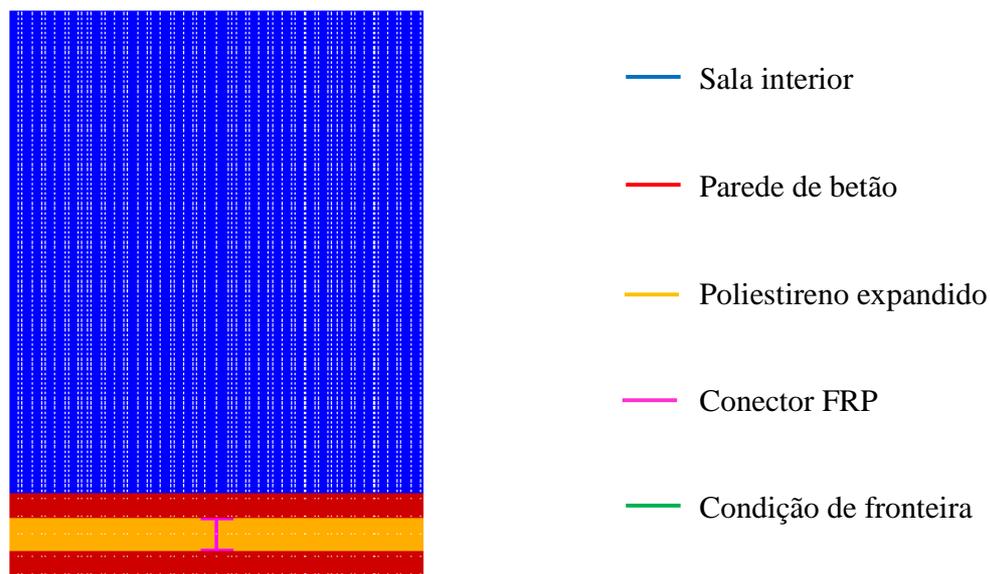


Figura 45 – Malha adoptada no estudo do painel sandwich com conector perfil I colado de FRP e espessura da camada de betão de 80 mm.

1.6.3.4.3. Resultados

O valor da resistência térmica para o painel sandwich com conector perfil I de FRP colado e com uma espessura de betão de 80 mm é de aproximadamente $R_{MEF} = 2,1309 \left(m^2 \times ^\circ C / W \right)$, tendo sido utilizado o critério de convergência indicado na equação (14) para certificação de uma boa aproximação do valor de R_{MEF} . Comparando com um valor do R teórico ($2,78 \left(m^2 \times ^\circ C / W \right)$), sem considerar as pontes térmicas, a diferença é aproximadamente de 23,42%.

1.6.3.5. Comparação e análise dos resultados

Dado que o BACRFA é o material constituinte do painel com maior condutibilidade térmica, o parâmetro R_{MEF} diminui com o aumento da espessura da camada de BACRFA, tal como ilustrado na Figura 46.

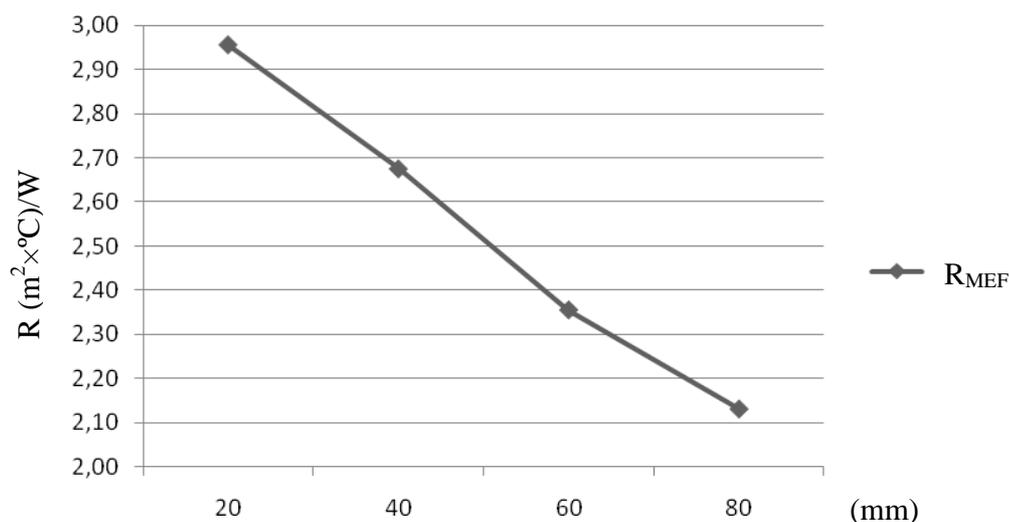


Figura 46 – Variação de R_{MEF} com a espessura da camada de BACRFA.

1.6.4. Tipos de isolamentos

Os estudos paramétricos iniciais deste trabalho incidiram sómente sobre os diferentes tipos de isolamentos dispostos no mercado e de aplicação julgada adequada para os painéis sandwich em desenvolvimento. Apesar de terem sido efectuados outros estudos, a análise da influência dos diferentes tipos de isolamentos e suas espessuras são um objectivo fulcral para a determinação da resistência térmica mínima exigida em diferentes países.

Os isolamentos térmicos utilizados nos estudos paramétricos e correspondentes propriedades térmicas são apresentadas no Quadro 13, Quadro 14 e no Quadro 15.

Quadro 13 – Condutibilidade térmica para os isolamentos em estudo.

MATERIAL	Condutibilidade térmica	
	λ (W/m×°C)	Referência
Poliestireno (XPS)	0.037	(ITE50, 2006)
Poliuretano (PUR)	0.042	(ITE50, 2006)
Cortiça (ICB)	0.045	(ITE50, 2006)
Lã de Rocha (MW)	0.040	(ITE50, 2006)

Quadro 14 – Massa volúmica adoptada para os isolamentos em estudo.

Massa volúmica		
MATERIAL	Massa vol. (kg/m ³)	Referência Bibliográfica
Poliestireno (XPS)	55	(Incropera et al., 2007)
Poliuretano (PUR)	40	(ITE50)
Cortiça (ICB)	120	(ITE50)
Lã de Rocha (MW)	65	(ITE50)

Quadro 15 – Calor específico adoptado para os isolamentos em estudo.

Calor específico			
MATERIAL	cp (J/kg \times °C)	cp (J/m ³ \times °C)	Referência Bibliográfica
Poliestireno (XPS)	1210	66550	(Incropera et al., 2007)
Poliuretano (PUR)	1400	56000	(BING, 2006)
Cortiça (ICB)	1800	216000	(Incropera et al., 2007)
Lã de Rocha (MW)	1590	103350	(Incropera et al., 2007)

Os requisitos térmicos mínimos para Portugal também serão alvo de atenção neste estudo, tendo sido já apresentados os coeficientes de transmissão térmica máximos ($U_{máx}$) no Capítulo 1.2.

1.6.4.1. Geometria e desenhos

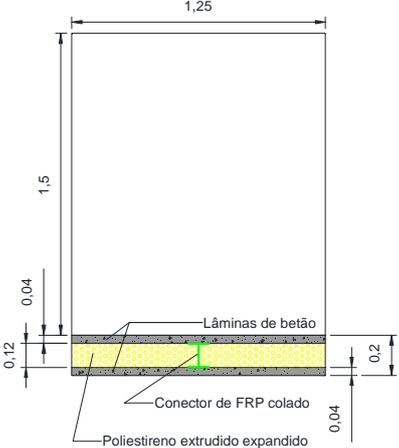
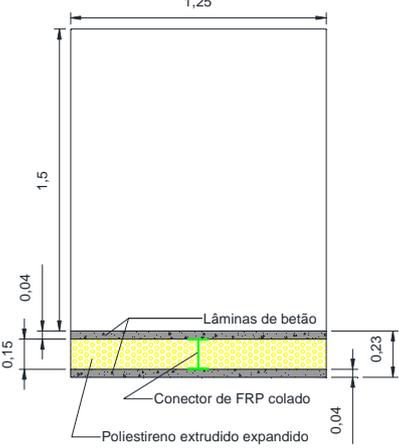
A geometria adoptada para os estudos dos diferentes tipos de isolamento e suas espessuras estão apresentados no

Quadro 16. O painel sandwich utilizado é constituído por duas camadas de betão de 40 mm, um conector em I colado de FRP e uma camada de isolamento cuja espessura varia consoante o estudo realizado.

Quadro 16 – Modelos simulados.

<p>Modelo com isolamento de 50 mm</p> <p>Isolamentos estudados:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Poliestireno expandido (XPS); ◆ Poliuretano (PUR) injectado; ◆ Aglomerados de Cortiça expandida (ICB); ◆ Lã de Rocha (MW). 	
<p>Modelo com isolamento de 80 mm</p> <p>Isolamentos estudados:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Poliestireno expandido (XPS); ◆ Poliuretano (PUR) injectado; ◆ Aglomerados de Cortiça expandida (ICB); ◆ Lã de Rocha (MW). 	
<p>Modelo com isolamento de 100 mm</p> <p>Isolamentos estudados:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Poliestireno expandido (XPS); ◆ Poliuretano (PUR) injectado; ◆ Aglomerados de Cortiça expandida (ICB); ◆ Lã de Rocha (MW). 	

Quadro 16 – Modelos simulados (continuação).

<p>Modelo com isolamento de 120 mm</p> <p>Isolamentos estudados:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Poliestireno expandido (XPS); ◆ Poliuretano (PUR) injectado; ◆ Aglomerados de Cortiça expandida (ICB); ◆ Lã de Rocha (MW). 	
<p>Modelo com isolamento de 150 mm</p> <p>Isolamentos estudados:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Poliestireno expandido (XPS); ◆ Poliuretano (PUR) injectado; ◆ Aglomerados de Cortiça expandida (ICB); ◆ Lã de Rocha (MW). 	

1.6.4.2. Malha adoptada

A malha adoptada para os estudos dos diferentes tipos e espessuras de isolamento é idêntica para todos. Variando apenas a divisão da malha na espessura do painel sandwich. Essa divisão é de 26 divisões para uma camada de 50 mm, de 32 divisões para 80 mm, de 36 divisões para 100 mm, de 40 divisões para 120 mm e de 46 divisões para 150 mm. A Figura 47 ilustra um exemplo da malha empregue nos modelos simulados.

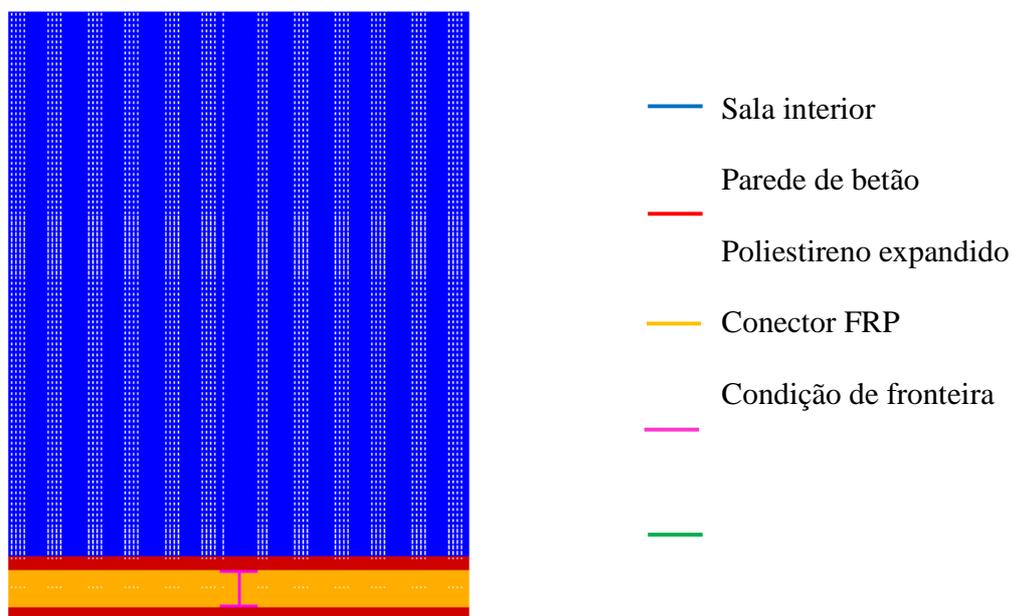


Figura 47 – Exemplo de malha adoptada nos estudos do painel sandwich com conector perfil I colado de FRP em diferentes tipos e espessuras de isolamento.

1.6.4.3. Resultados

1.6.4.3.1. Poliestireno expandido extrudado (XPS)

Os valores da resistência térmica para o painel sandwich com conector perfil I de FRP colado, com duas camadas de betão com espessura de 40 mm cada, e uma camada de isolamento em poliestireno expandido extrudado são apresentados no Quadro 17. É possível visualizar também no Quadro 17 a diferença da R_{MEF} com um valor R teórico – valor este considerando um painel fictício idêntico ao em estudo mas sem conector, ou seja, sem pontes térmicas.

Quadro 17 – Modelos simulados de poliestireno expandido extrudado (XPS)

Espessura (mm)	$R_{MEF} \left(m^2 \times ^\circ C / W \right)$	$R \left(m^2 \times ^\circ C / W \right)$	Diferença entre R e R_{MEF} (%)
50	1,4325	1,3914	-2,96
80	2,1740	2,2022	1,28
100	2,6752	2,7427	2,46
120	3,1372	3,2832	4,45
150	3,7565	4,0941	8,25

A Figura 48 representa a variação de R_{MEF} com a espessura do núcleo de isolamento em poliestireno expandido extrudido (XPS).

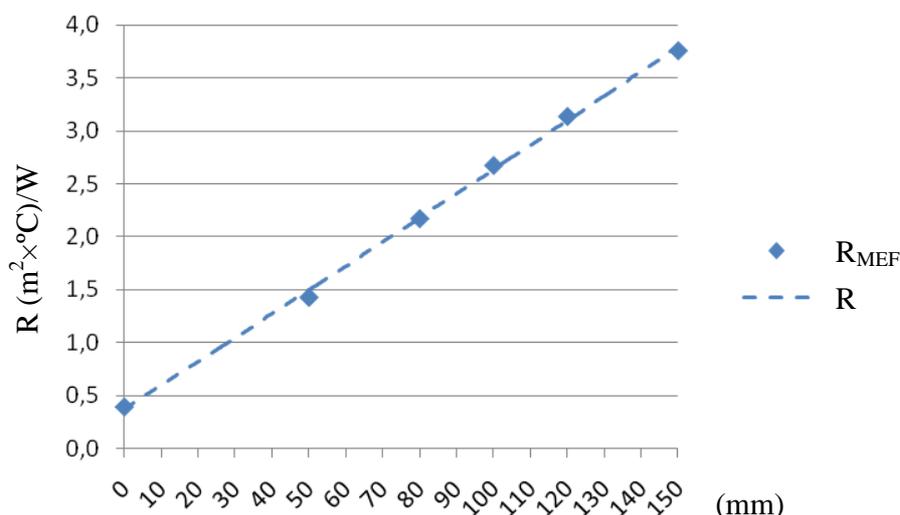


Figura 48 – Variação de R_{MEF} do painel sandwich com a espessura do isolamento em poliestireno expandido extrudido (XPS).

1.6.4.3.2. Espuma rígida de poliuretano (PUR)

Os valores da resistência térmica para o painel sandwich com conector em perfil I de FRP colado, com duas camadas de betão com espessura de 40 mm cada, e uma camada de isolamento espuma rígida de poliuretano são apresentados no Quadro 18. É possível visualizar também no Quadro 18 a diferença do R_{MEF} com um valor R teórico – valor este considerando um painel fictício idêntico ao em estudo mas sem conector, ou seja, sem pontes térmicas.

Quadro 18 – Modelos simulados de espuma rígida de poliuretano (PUR)

Espessura (mm)	R_{MEF} ($m^2 \cdot ^\circ C / W$)	R ($m^2 \cdot ^\circ C / W$)	Diferença entre R e R_{MEF} (%)
50	1,2970	1,2305	-4,28
80	1,9167	1,9448	1,45
100	2,4045	2,4210	0,68
120	2,8244	2,8971	2,51
150	3,4035	3,6114	5,76

A Figura 49 representa a variação de R_{MEF} com a espessura do núcleo de isolamento em espuma rígida de poliuretano (PUR)

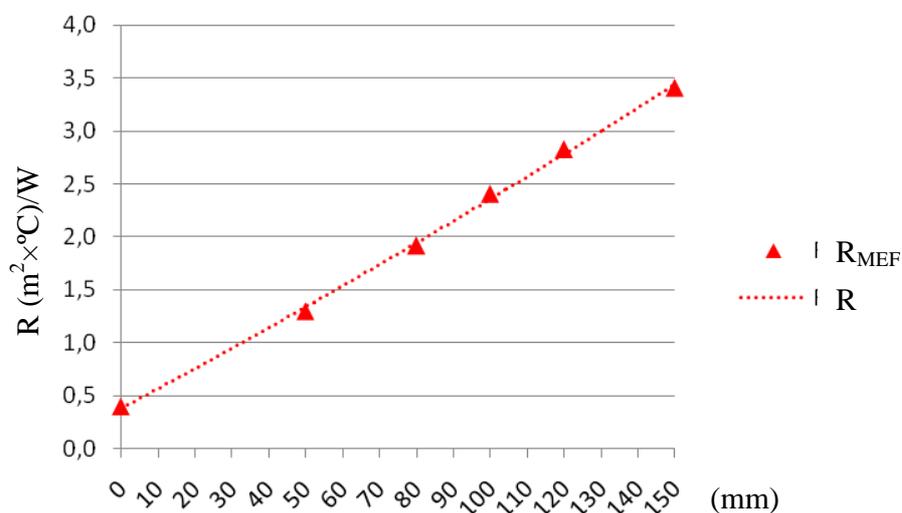


Figura 49 – Variação de R_{MEF} do painel sandwich com a espessura do isolamento em espuma rígida de poliuretano (PUR).

1.6.4.3.3. Aglomerados de cortiça expandida (ICB)

Os valores da resistência térmica para o painel sandwich com conector perfil I de FRP colado, com duas camadas de betão com espessura de 40 mm cada, e uma camada de isolamento aglomerados de cortiça expandida são apresentados no Quadro 19. É possível visualizar também no Quadro 19 a diferença do R_{MEF} com um valor R teórico – valor este considerando um painel fictício idêntico ao em estudo mas sem conector, ou seja, sem pontes térmicas.

Quadro 19 – Modelos simulados de aglomerados de cortiça expandida (ICB)

Espessura (mm)	R_{MEF} ($m^2 \times ^\circ C / W$)	R ($m^2 \times ^\circ C / W$)	Diferença entre R e R_{MEF} (%)
50	1,1973	1,1511	-4,01
80	1,7833	1,8178	1,90
100	2,2252	2,2622	1,64
120	2,6022	2,7067	3,86
150	3,1138	3,3733	7,69

A Figura 50 representa a variação de R_{MEF} com a espessura do núcleo de isolamento em aglomerado de cortiça expandida (ICB).

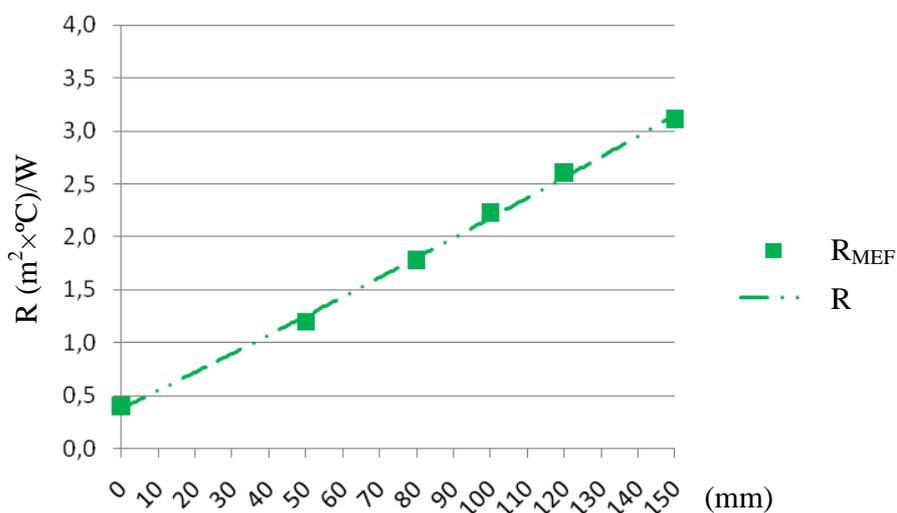


Figura 50 – Variação de R_{MEF} do painel sandwich com a espessura do isolamento em aglomerado de cortiça expandida (ICB).

1.6.4.3.4. Lã de Rocha

Os valores da resistência térmica para o painel sandwich com conector perfil I de FRP colado, com duas camadas de betão com espessura de 40 mm cada, e uma camada de isolamento em lã de rocha são apresentados no

Quadro 20. É possível visualizar também no

Quadro 20 a diferença do R_{MEF} com um valor R teórico – valor este considerando um painel fictício idêntico ao em estudo mas sem conector, ou seja, sem pontes térmicas.

Quadro 20 – Modelos simulados de lã de rocha.

Espessura (mm)	R_{MEF} ($m^2 \times ^\circ C / W$)	R ($m^2 \times ^\circ C / W$)	Diferença entre R e R_{MEF} (%)
50	1,3357	1,29	-3,54
80	2,0260	2,04	0,69
100	2,4925	2,54	1,87
120	2,9244	3,04	3,80

150	3,5030	3,79	7,57
-----	--------	------	------

A Figura 51 representa a variação de R_{MEF} com a espessura do núcleo de isolamento em lâ de rocha.

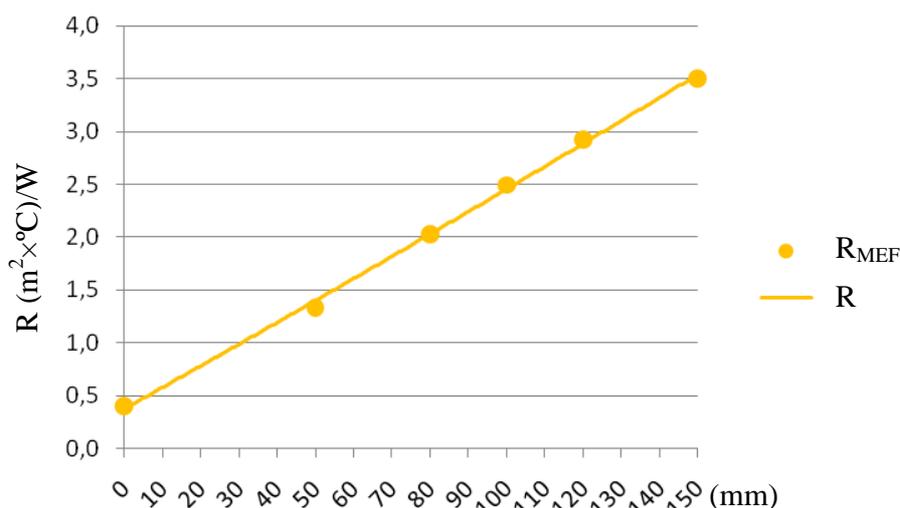


Figura 51 – Variação de R_{MEF} do painel sandwich com a espessura do isolamento em lâ de rocha.

1.6.4.4. Comparação e análise dos resultados

Os resultados obtidos nos estudos paramétricos dos diferentes tipos de isolamentos foram satisfatórios, no ponto de vista da resistência térmica, uma vez que estes são elevados e bastante semelhantes aos encontrados na literatura existente. O polierateno expandido extrudado (XPS) é o que apresenta melhor desempenho térmico e o aglomerado de cortiça expandida (ICB) é o que apresenta menor desempenho, sendo a diferença de resistência de aproximadamente de 18%. A espuma de poliuretano injectado (PUR) e a lâ de rocha apresentam valores intermédios ao XPS e ICB, sendo o comportamento térmico da lâ de rocha melhor do que o poliuretano (PUR). No entanto é necessário ter em conta o modo de compactação/densidade de cada isolamento, pois esta característica irá afectar de forma significativa a condutibilidade térmica do isolamento, variando consequentemente o valor da resistência térmica do painel sandwich.

A Figura 52 resume os resultados obtidos em termos da influência da espessura dos distintos tipos de materiais de isolamento no valor de R_{MEF} do painel.

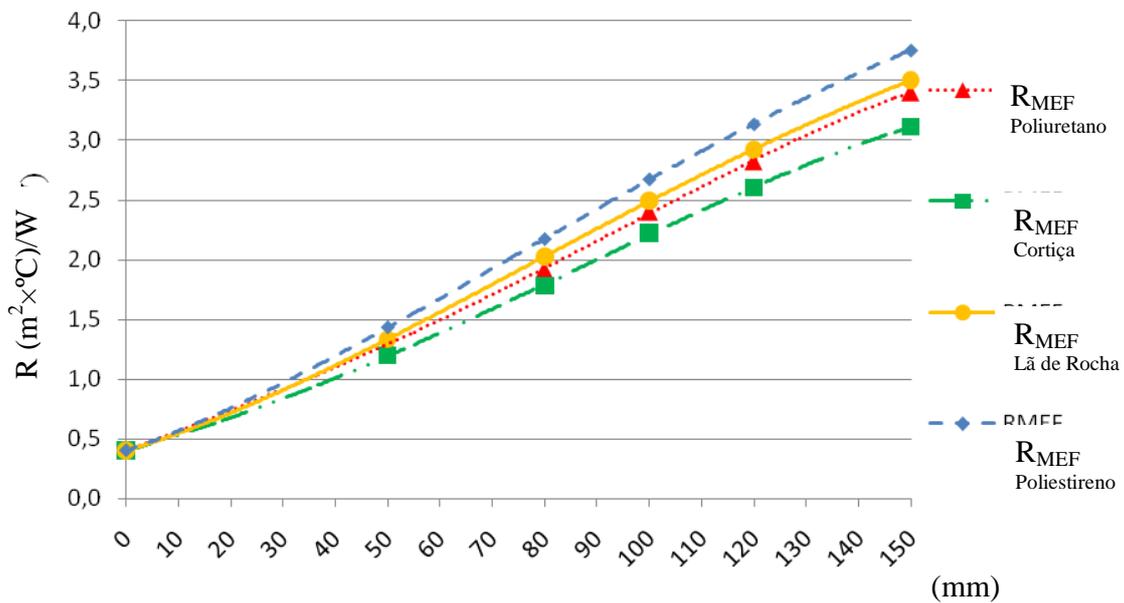


Figura 52 – Valores de R_{MEF} do painel sandwich em função da espessura de diferentes tipos de isolamentos.

O estudo económico dos isolamentos térmicos, parte constituinte do estudo desta dissertação, apresenta-se como uma mais-valia na identificação do tipo de isolamento térmico que mais se adequa ao projecto. Assim apresenta-se um estudo claro e resumido dos custos dos isolamentos térmicos por metro quadrado, tendo em conta a sua resistência térmica (R_{MEF}), de modo a tomar as melhores soluções construtivas, baseadas nestes parâmetros. Para tal, ilustra-se na Figura 53 a relação entre o R_{MEF} e o preço por metro quadrado. Os preços aqui expostos foram obtidos através de consulta a empresas privadas e não têm em conta os custos acrescidos referentes ao transporte, colocação, entre outros. No Quadro 21 apresentam-se os preços dos isolamentos térmicos por metro quadrado.

Quadro 21 – Preços dos isolamentos térmicos por metro quadrado.

Tipo de Isolamento	Preço (€/m ²) por espessura (mm)						Referência
	30 (mm)	40 (mm)	50 (mm)	60 (mm)	80 (mm)	100 (mm)	
Poliestireno (XPS)	5,88	7,84	9,81	11,77	15,69	19,61	DOW
Poliuretano (PUR)	3,44	4,59	5,73	6,88	9,17	11,47	DOW
Aglomerados de cortiça (ICB)	4,77	6,18	7,73	9,27	12,43	15,72	GRUPO AMORIM
Placas de lã de rocha (MW)	3,40	4,47	5,72	6,87	9,20	11,48	SOTECNISOL

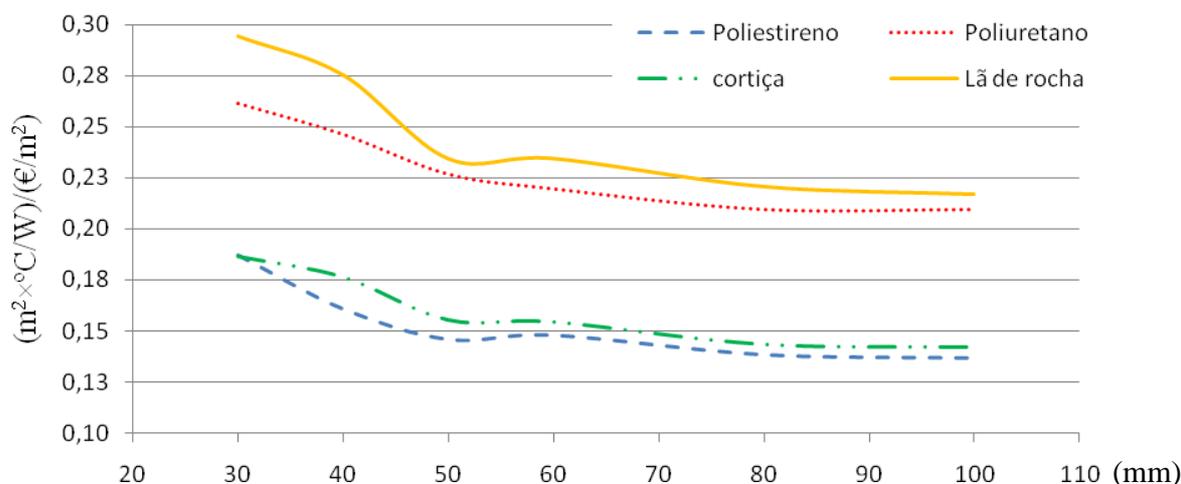


Figura 53 – Relação entre o R_{MEF} e o custo por metro quadrado dos isolamentos térmicos em estudo.

Como se pode observar na Figura 53, a lã de rocha (MW) e o poliuretano injectado (PUR) apresentam-se como as melhores soluções isolantes. A lã de rocha (MW) é o isolamento térmico que apresenta melhor relação de resistência térmica por preço/metro quadrado devido ao seu bom desempenho térmico e ao mais baixo custo. Por outro lado, o poliestireno expandido (XPS) que se apresenta como o melhor isolante térmico, (Figura 52), tem um custo de compra elevado, tornando-se assim uma solução menos atractiva. Como também é possível observar, os aglomerados de cortiça (ICB) apresentam valores bastante idênticos ao poliestireno expandido (XPS). No entanto é necessário ter em conta que nesta análise, a relação $R_{MEF}/(€/m^2)$ dos



diferentes isolamentos térmicos pode variar com os acréscimos de outro custos, já acima referenciados.

1.7. Conclusões do estudo paramétrico

Com base nos resultados obtidos, é de salientar, numa primeira análise que os conectores de FRP e as soluções construtivas sem nervuras apresentam vantagens significativas no comportamento térmico. No estudo paramétrico efectuado sobre a influência da espessura da camada de betão, a escolha da melhor solução no âmbito do projecto depende de vários factores, sendo os económicos e estruturais os mais relevantes.

Numa segunda análise, evidencia-se que todos os valores obtidos pelos estudos anteriores são em função da resistência térmica dos materiais, sendo os requisitos mínimos na legislação Portuguesa (RCCTE, 2006) apresentados pelo coeficiente de transmissão térmica (U). Assim foram calculados os valores de U usando a equação (8), apenas para o estudo paramétrico dos diferentes tipos de isolamentos, de modo a que os valores possam ser comparados. A Figura 54 **Error! Reference source not found.** representa os valores do coeficiente de transmissão térmica dos painéis sandwich com diferentes isolamentos térmicos, em função da espessura da camada isolante.

Pela Figura 54 pode-se comprovar que para uma camada de isolamento de 20 mm, o painel sandwich com conectores de perfil em I de FRP cumpre os requisitos definidos na legislação Portuguesa (RCCTE, 2006). No entanto recomenda-se a aplicação, neste tipo de painel, de uma camada de isolamento com pelo menos 90 mm de espessura de forma a aproximar-se dos valores do coeficiente de transmissão térmica de referência.

No Quadro 22 e Quadro 23 são apresentadas as espessuras de isolamento mínimas para as três zonas climáticas de Portugal. O Quadro 22 refere-se às espessuras necessárias com base nos U s de referência e o Quadro 23 com base no U máximo.

Quadro 22 – Espessuras necessárias para as zonas climáticas de Inverno de modo a cumprir o valor de U de referência do RCCTE (unidades em milímetros).

Espessura necessária de isolamento para as zonas climáticas de Inverno (mm) – U máximo			
Tipos de isolamentos	I1	I2	I3
Poliestireno (XPS)	43	53	65
Poliuretano (PUR)	48	59	74
Cortiça (ICB)	53	65	82
Lã de rocha	47	57	71



Quadro 23 – Espessuras mínimas para as zonas climáticas de Inverno de modo a cumprir o valor de U máximo do RCCTE (unidades em milímetros).

Espessura mínima de isolamento para as zonas climáticas de Inverno (mm) – U referência			
Tipos de isolamentos	I1	I2	I3
Poliestireno (XPS)	Não necessita	2	8
Poliuretano (PUR)	Não necessita	2	9
Cortiça (ICB)	Não necessita	2	10
Lã de rocha	Não necessita	2	9



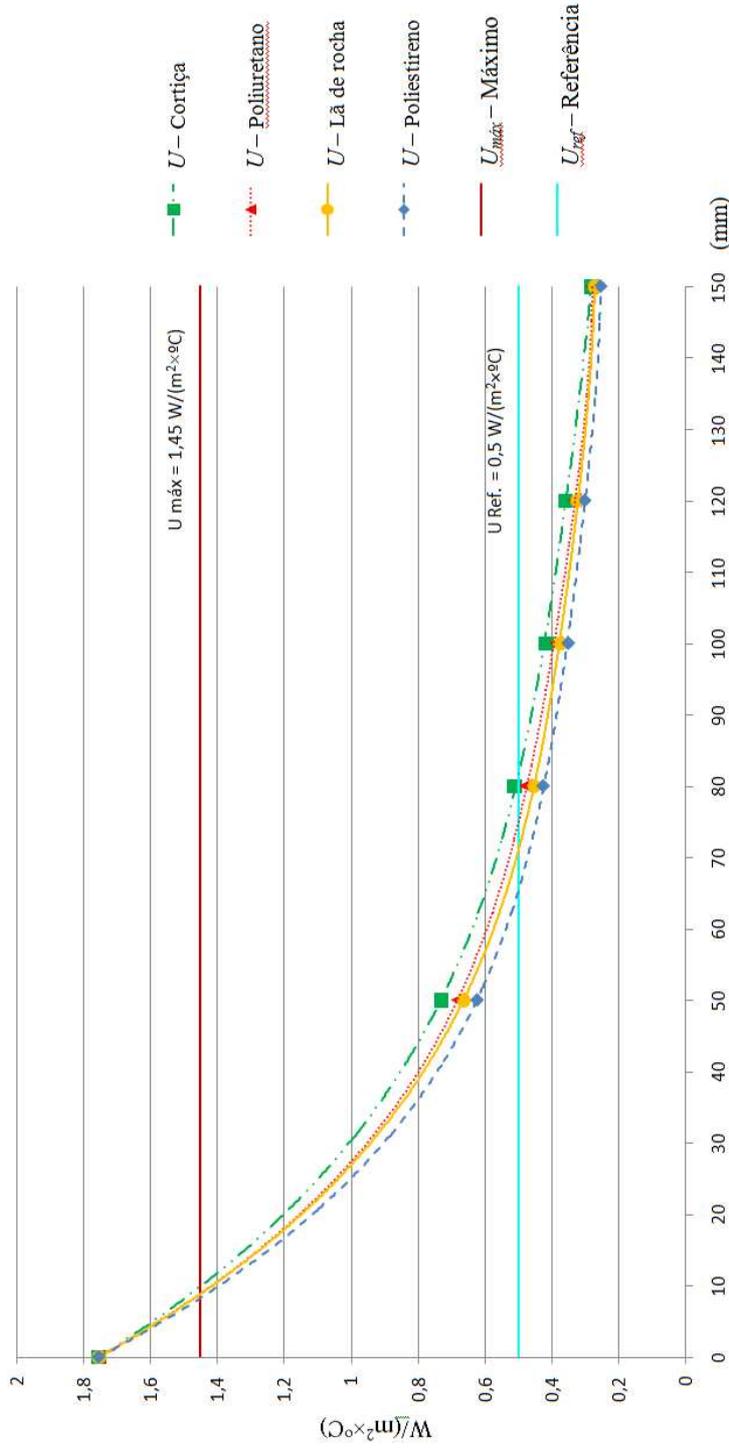


Figura 54 – Valores de coeficientes de transmissão térmica dos diferentes tipos de isolamentos e $U_{máx}$ e U_{ref} segundo diferentes isolamentos térmicos, em função da espessura da camada isolante.



REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials: ASTM C1060-90 (2003) “Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings”. ASTM

American Society for Testing and Materials: ASTM C1115-95 (1995). “Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-situ Data”.

American Society for Testing and Materials: ASTM C1363-05 (2005). “Standard Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus”

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) (1997). “ASHRAE Handbook: Fundamentals”. I-P ed. Atlanta, GA: ASHRAE.

Incropera, DeWitt, Bergman & Lavine (2007). “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, *Book*, 6ª Edition, Wiley.

ISO – International Organization for Standardization: ISO 7730:2005 (E) (2005). “Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD índices and local thermal comfort criteria”.

ITE 50 (2006). “Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios”, ISBN-10: 972-49-2065-8, 1ª ed., LNEC.

Lee, B. & Pessiki, S. (2006). “Thermal performance evaluation of precast concrete three-wythe sandwich wall panels”, *Energy and Buildings*, vol. 38, p. 1006-1014.

Lee, B. & Pessiki, S. (2008). “Revised zone method R-value calculation for precast concrete sandwich panels containing metal wythe connectors”, *Precast/Prestressed Concrete Institute Journal*, September-October.

Nicol, J.F. & Humphreys, M.A. (2002). “Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings”, *Energy and Buildings*, vol.34, p. 563-572.

RCCTE – “Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios - Decreto-Lei N°80/2006”, s.l. (2006). Porto Editora.

Silva, P.C.P. (2006). “Análise do comportamento térmico de construções não convencionais através de simulação em VisualDOE”, *Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil*, Março. Universidade do Minho.





Silva, S.M.G.M. (2009). “A Sustentabilidade e Conforto das Construções”, *Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil/Processos de Construção*, Setembro. Universidade do Minho.

