



Bruno Duarte Pereira Lopes

Previsão das Características Térmicas e Acústicas do Módulo de Parede Pré-fabricada da Habitação Modular de Custos Controlados

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Duarte Pereira Lopes

Previsão das Características Térmicas e
Acústicas do Módulo de Parede Pré-fabricada
da Habitação Modular de Custos Controlados

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professora Doutora Sandra Monteiro Silva
Professor Doutor Joaquim Barros

Dezembro de 2012

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação não estaria inteiramente concluída se não apresentasse aqui os meus mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que, direta ou indiretamente, me apoiaram neste percurso.

Agradeço à minha orientadora Professora Doutora Sandra Monteiro da Silva por todo o apoio, pela orientação, pela disponibilidade demonstrada para o esclarecimento de dúvidas e pelas sugestões e conhecimentos transmitidos.

Agradeço ao meu co-orientador Professor Doutor Joaquim António Barros pelo fornecimento de documentos e acima de tudo pela informação e orientação transmitidas.

Este trabalho é parte de um projeto de pesquisa QREN número 5387, LEGOUSE. Agradece-se também o contributo e apoio fornecido pelas empresas parceiras: Mota Engil, Civitest e PIEP.

Aos amigos, que conheci ao longo do curso e que estiveram presentes em todos os momentos, um muito obrigado.

Um agradecimento especial à Cláudia pelo apoio, compreensão e incentivo constante, que foram essenciais no desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Por último, deixar um agradecimento muito especial aos meus pais e irmão, pelo apoio incondicional e por toda a compreensão demonstrada.

Mais uma vez, a todos os meus sinceros agradecimentos.

Bruno Lopes

RESUMO

A habitação modular de custos controlados é uma nova solução no mercado da construção modular, que pretende tirar partido do uso adequado de novos materiais e de ferramentas de cálculo avançado na conceção, dimensionamento e construção. Este tipo de habitação é construído pela assemblagem de painéis sandwich pré-fabricados, constituídos por camadas externas em BACRFA ligadas por materiais leves e de baixo custo.

O objetivo desta dissertação foi prever o desempenho térmico e acústico do módulo de parede pré-fabricada da habitação modular de custos controlados. O estudo do desempenho acústico foi realizado através de modelos simplificados de previsão do isolamento sonoro, baseados na Lei da Massa e da Frequência, e com recurso ao programa de cálculo de isolamento sonoro, Acoubat Sound. O comportamento térmico da habitação foi efetuado utilizando o programa de simulação dinâmica, EnergyPlus. Recorrendo ao programa Therm, de modulação bidimensional de transferência de calor, foram analisados as pontes térmicas das diferentes ligações existentes na habitação modular. Posteriormente, foi realizada uma análise comparativa, do desempenho térmico e acústico, entre a solução de painel sandwich e uma solução convencional (alvenaria de tijolo).

Observou-se que, relativamente ao comportamento acústico, a habitação modular com solução em painel sandwich cumpre com a legislação em vigor, apesar de apresentar valores de isolamento sonoro entre interior e exterior menores que a solução convencional.

Os resultados da simulação térmica dinâmica permitiram chegar à conclusão que a habitação apresenta melhor comportamento térmico no período de verão do que no inverno. Apresentando uma menor amplitude nas variações da temperatura ambiente interior e temperaturas mais próximas da zona de conforto, a solução em painel sandwich apresenta menores necessidades energéticas comparando com a solução convencional.

Palavras-chave: Térmica; Acústica; EnergyPlus; Habitação Modular; Lei da Massa.

ABSTRACT

The modular house with controlled costs is a new solution in modular construction market, who wants take advantage of the use appropriate of new materials, and calculation tools advanced in conception, design and construction. This type of homes is constructed by the assembly of sandwich panels prefabricated, constituted of outer layers in BACRFA connected by lightweight materials and low cost.

The objective of this dissertation is to estimate the thermal and acoustic performance of the prefabricated wall module of modular house with controlled costs. The study of the acoustic performance was performed using simplified models of sound prediction, based on the Law of Mass and frequency, and using the calculation program of sound insulation, Acoubat Sound. The thermal performance of the housing was made using the dynamic simulation program, EnergyPlus. Using the program Therm, modulation two-dimensional heat transfer, were analyzed the diferents thermal bridges existing in modular home. Subsequently, we performed a comparative analysis of the thermal and acoustic performance, between the solution of sandwich panel and a conventional solution (brickwork).

It was observed, that for the acoustic performance of modular house with sandwich panel complies with the legislation in force, despite having values of sound insulation between interior and exterior smaller than the conventional solution.

The results of dynamic thermal simulation, it became evident that housing has better thermal performance in summer than in winter. Featuring a low-amplitude variations of inside temperature, and temperatures closer to the comfort zone, the solution in sandwich panel has lower energy requirements compared to a conventional solution.

Keywords: Thermal, Acoustic, EnergyPlus; Modular Homes; Law of Mass.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Enquadramento	1
1.2.	Objetivos.....	1
1.3.	Estrutura da Dissertação	2
2.	ESTADO DE ARTE.....	5
2.1.	Conceito de Habitação Modular	5
2.2.	Enquadramento Histórico	6
2.3.	Construção Modular	10
2.4.	Soluções Existentes de Construção Modular.....	12
2.4.1.	MOOD.....	12
2.4.2.	SIT.....	14
2.4.3.	Modular System	17
2.4.4.	Módulo Técnico	19
2.4.5.	TreeHouse	21
2.4.6.	Módulos VIROC	23
2.5.	Habitação Modular de Custos Controlados	25
2.6.	Painéis Sandwich	27
2.6.1.	Ligação entre Painéis Sandwich.....	31
2.7.	Betão Auto-Compactável Revestido a Fibras de Aço.....	33
2.8.	Métodos de Previsão do Comportamento Térmico e Acústico	35
2.8.1.	Métodos de Previsão do Comportamento Acústico	35
2.8.1.1.	Caraterização Experimental.....	36
2.8.1.2.	Modelos Simplificados de Previsão e Isolamento Sonoro	37
2.8.2.	Métodos de Previsão do Comportamento Térmico.....	44
2.9.	Exigências Regulamentares Aplicáveis - Portugal	45
2.9.1.	Comportamento Acústico.....	45

2.9.2.	Comportamento Térmico.....	47
3.	METODOLOGIA.....	51
3.1.	Descrição do Edifício.....	51
3.2.	Programas e Metodologia Simplificada.....	58
3.2.1.	Previsão do desempenho Acústico.....	58
3.2.1.1.	Acoubat Sound.....	58
3.2.1.2.	Metodologia Simplificada.....	60
3.2.2.	Previsão do desempenho Térmico.....	69
3.2.2.1.	EnergyPlus.....	70
3.2.2.1.1.	Análise dinâmica - EnergyPlus.....	72
3.2.2.2.	THERM.....	86
3.2.2.3.	Análise das Pontes Térmicas Lineares.....	87
4.	RESULTADOS.....	89
4.1.	Comportamento Acústico.....	89
4.1.1.	Traçado da Curva de Estimativa de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea.....	89
4.1.1.1.	Painel Sandwich.....	89
4.1.1.2.	Envidraçado.....	92
4.1.1.3.	Portas.....	94
4.1.1.4.	Elementos Heterogéneos.....	95
4.1.2.	Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea Padronizado entre o Interior e o Exterior.....	97
4.1.3.	Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea Padronizado entre Espaços Interiores.....	100
4.1.4.	Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea Padronizado entre o Exterior e Interior, com recurso ao Acoubat Sound.....	101
4.1.4.1.	Envidraçado tipo 4 (12) 4 com caixilharia em PVC.....	102
4.1.4.2.	Envidraçado tipo 4 (14) 8 com caixilharia em PVC.....	104

4.1.5.	Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea – Acoubat Sound.....	106
4.2.	Comportamento Térmico	108
4.2.1.	Avaliação do Desempenho Térmico	108
4.2.1.1.	Temperatura Ambiente Interior	109
4.2.1.2.	Necessidades Energéticas	113
4.2.2.	Análise das Pontes Térmicas Lineares	117
4.3.	Análise de Resultados	122
4.3.1.	Comportamento Acústico.....	122
4.3.2.	Comportamento Térmico	125
4.4.	Síntese dos resultados obtidos	129
5.	CONCLUSÃO.....	133
5.1.	Trabalhos Futuros	134
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135
	Anexo I – Acústica	141
I.1.	Comportamento Acústico – Tabelas & Ábacos	141
I.2.	Traçado da Curva de Estimativa de Isolamento Sonoro	145
I.3.	Ajustamento da curva de valores estimados à curva de referência	148
I.4.	Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea - Acoubat Sound.....	150
	Anexo II – Térmica.....	163
II.1.	Pormenores de Ligação – Therm	163
II.2.	Comportamento Térmico – EnergyPlus.....	165

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ISO – International Organization for Standardization (Organização Internacional de Standardização)

CEN – European Committee for Standardization (Organização Europeia de Standardização)

NP – Norma Portuguesa

EN – European Standard (Norma Europeia)

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Transporte de casas pré-fabricadas	5
Figura 2 – Sears Modern Home N.º 102	6
Figura 3 - Casas pré-fabricadas construídas após a II Guerra Mundial.....	8
Figura 4 – Casa Eames, à esquerda e Sthal House, à direita	9
Figura 5 – Plantas de arquitetura de diferentes tipologias das casas modulares MOOD	13
Figura 6 – Pormenor construtivo da Habitação MOOD2A.....	13
Figura 7 – Pormenor construtivo da base e paredes exteriores	15
Figura 8 – Módulos standard da SIT	15
Figura 9 – Diferentes ofertas de produtos modulares SIT.....	16
Figura 10 – Diferentes tipologias de habitações modulares SIT	17
Figura 11 – Série L.1+ (Área – 143m ² , T3).	18
Figura 12 – Exemplo de “Mobile home”.	18
Figura 13 – Exemplo de Tipologia “nomad”.	19
Figura 14 – Exemplo de casa modular da empresa Módulo Técnico.....	20
Figura 15 – Pormenores construtivos das paredes da Módulo Técnico.	20
Figura 16 – Cobertura plana e respetivo corte transversal	21
Figura 17 – Diferentes tipologias da TreeHouse	22
Figura 18 – Processo de montagem TreeHouse	22
Figura 19 – Exemplo de casa modular TreeHouse.....	23
Figura 20 – Planta de arquitetura das diferentes tipologias do Módulo F.....	24
Figura 21 – Representação virtual da habitação modular.....	26
Figura 22 - Painéis sandwich depositados em obra.....	27
Figura 23 – Constituição de um painel sandwich.....	28
Figura 24 – Painéis sandwich com material de núcleo homogéneo e não homogéneo.....	29
Figura 25 – Exemplos de diferentes sistemas de painéis sandwich.	30
Figura 26 – Ligações entre painéis sandwich.....	32
Figura 27 - Ligações de painéis dispostos em “L” e dispostos em “T”	33
Figura 28 - Aplicação de betão auto-compactável	34
Figura 29 - Betão Reforçado com Fibras de Aço (BRFA)	35
Figura 30 - Redução da transmissão sonora de elementos de compartimentação homogéneos, simples, em função da sua massa superficial	40

Figura 31 - Ábaco para determinação do acréscimo de isolamento sonoro por acrescento de novo pano de divisória	41
Figura 32 – Representação esquemática do efeito de coincidência	42
Figura 33 – Efeitos responsáveis pela não verificação da Lei da Massa ou da Frequência.....	42
Figura 34 – Mecanismos de transferência térmica em edifícios	44
Figura 35 - Planta de arquitetura.....	52
Figura 36 – Representação e identificação dos painéis em planta.....	53
Figura 37 – Esquema 3D dos diferentes painéis	53
Figura 38 – Cortes verticais com pormenores da secção da base (à direita) e topo (à esquerda) dos painéis.....	54
Figura 39 – Coeficiente de transmissão térmica, U, dos diferentes painéis sandwich	55
Figura 40 – Corte vertical com pormenor de ligação dos painéis à fundação	55
Figura 41 – Pormenor de corte vertical.....	56
Figura 42 – Corte em planta com os diferentes tipos de ligação entre painéis.	56
Figura 43 – Esquema de colocação dos perfis de FRP.	57
Figura 44 – Exemplo de ficheiro Acoubat com geometria e valores de isolamento sonoro....	59
Figura 45 – Modos próprios de vibração, por flexão transversal do painel, que influenciam o isolamento acústico	61
Figura 46 – Curva de referência para os valores estimados de isolamento sonoro a sons de condução aérea, normalizado – EN ISO 717-1:1996.....	65
Figura 47 – Esquema da influência da transmissão marginal	67
Figura 48 – Estrutura de funcionamento do programa EnergyPlus	70
Figura 49 – Ferramenta EP-Launch do EnergyPlus.....	72
Figura 50 – Campo “Simulation Control”	73
Figura 51 – Campo “Building”	74
Figura 52 – Campo “Run Period”	76
Figura 53 – Campo “Schedules: Tyme Limits”	77
Figura 54 – Campo “Schedule: Compact”	77
Figura 55 – Campo “Material”.....	78
Figura 56 – Campo “Material: No Mass”	79
Figura 57 – Campo “Window Material: Simple Glazing System”	79
Figura 58 – Campo “Construction”	80
Figura 59 – Diferentes zonas térmicas da habitação modular	81
Figura 60 – Campo “Zone”	81

Figura 61 – Campo “Building Surface: Detailed”	82
Figura 62 - Campo “Fenestration Surface: Detailed”	82
Figura 63 – Campo “Lights”	83
Figura 64 – Campo “Zone Ventilation: Design Flow Rate”	84
Figura 65 - Campo “ <i>HVAC Template:Thermostat</i> ”	85
Figura 66 – Campo “Output: Variable”	85
Figura 67 – Envidraçado duplo com caixilharia em madeira, linhas isométricas	87
Figura 68 – Identificação dos diferentes Pormenores de ligação entre os diferentes painéis. .	88
Figura 69 – Condições fronteira do programa Therm.	88
Figura 70 – Curva de estimativa de isolamento sonoro para o painel sandwich, considerando elemento simples.	91
Figura 71 - Curva de estimativa de isolamento sonoro para o painel sandwich, considerando elemento duplo.	91
Figura 72 - Curva de estimativa de isolamento sonoro para o envidraçado.....	94
Figura 73 - Curva de estimativa de isolamento sonoro para porta em madeira (35mm)	95
Figura 74 – Diferentes conjugações da habitação modular em banda	100
Figura 75 - Índice de atenuação sonoro da janela, à esquerda e da porta, à direita.....	102
Figura 76 - Evolução da temperatura interior, na zona Sala/Cozinha, ao longo do ano – solução com painel sandwich	109
Figura 77 - Evolução da temperatura interior, na zona Sala/Cozinha, ao longo do ano - solução convencional.....	110
Figura 78 - Evolução da temperatura interior, na zona Quarto 2, ao longo do ano - solução com painel sandwich	110
Figura 79 - Evolução da temperatura interior, na zona Quarto 2, ao longo do ano - solução convencional.....	111
Figura 80 - Evolução da temperatura interior, na zona Hall Quartos, ao longo do ano - solução com painel sandwich	112
Figura 81 - Evolução da temperatura interior, na zona Hall Quartos, ao longo do ano - solução convencional.....	112
Figura 82 – Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Sala/Cozinha, ao longo do ano - solução painel sandwich.....	114
Figura 83 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Sala/Cozinha, ao longo do ano - solução convencional	114

Figura 84 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Quarto 2, ao longo do Ano - solução painel sandwich	115
Figura 85 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Quarto 2, ao longo do Ano - solução convencional.....	115
Figura 86 - Necessidades Energéticas Totais de Aquecimento e Arrefecimento, ao longo do Ano - solução painel sandwich	116
Figura 87 - Necessidades Energéticas Totais de Aquecimento e Arrefecimento, ao longo do Ano - solução convencional.....	116
Figura 88 – Variação do fluxo de calor (esquerda) e variação da temperatura (direita) do pormenor de ligação n.º 1 em “L”.....	118
Figura 89 - Variação do fluxo de calor (esquerda) e variação da temperatura (direita) do pormenor de ligação n.º 3 em “L”.....	118
Figura 90 - Variação do fluxo de calor (esquerda) e variação da temperatura (direita) do pormenor de ligação n.º 2 em “T”.....	119
Figura 91 - Variação do fluxo de calor (esquerda) e variação da temperatura (direita) do pormenor de ligação n.º 4 em “T”.....	120
Figura 92 - Variação do fluxo de calor (esquerda) e variação da temperatura (direita) do pormenor de ligação da cobertura n.º 1.....	121
Figura 93 - Variação do fluxo de calor (esquerda) e variação da temperatura (direita) do pormenor de ligação da cobertura n.º 2.....	121
Figura 94 - Evolução da temperatura interior, na zona Sala/Cozinha, ao longo dos meses ..	125
Figura 95 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Quarto 2, ao longo dos meses, solução com painel sandwich	126
Figura 96 - Necessidades Energéticas de Aquecimento na zona da sala/cozinha, ao longo dos meses.....	127
Figura 97 - Necessidades Energéticas de Aquecimento na zona Quarto 2, ao longo dos meses	127
Figura 98 - Necessidades Energéticas de Arrefecimento na zona da sala/cozinha, ao longo dos meses.....	128
Figura 99 - Necessidades Energéticas de Arrefecimento na zona Quarto 2, ao longo dos meses	128
Figura 100 – Necessidades energéticas totais de aquecimento e arrefecimento, ao longo dos meses do ano	129

Figura 101 - Marcação do índice de redução sonora dado pela lei experimental da massa em elementos simples (adaptado de: Mendonça, 2005).....	146
Figura 102 - Marcação do índice de redução sonora dado pela lei experimental da massa em elementos duplos (adaptado de: Mendonça, 2005)	147
Figura 103 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Sala/Cozinha) e exterior – solução em painel sandwich	151
Figura 104 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Sala/Cozinha) e exterior – solução convencional	151
Figura 105 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Quarto 1) e exterior – solução em painel sandwich.....	152
Figura 106 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Quarto 1) e exterior – solução convencional	152
Figura 107 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Quarto 1) e exterior – solução em painel sandwich.....	153
Figura 108 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Quarto 1) e exterior – solução convencional	153
Figura 109 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Quarto 2) e exterior – solução em painel sandwich.....	154
Figura 110 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Quarto 2) e exterior – solução convencional.	154
Figura 111 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Quarto 3) e exterior – solução em painel sandwich.....	155
Figura 112 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Quarto 3) e exterior – solução convencional	155
Figura 113 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos interiores (Sala/Cozinha → Quarto 1) – solução em painel sandwich	156
Figura 114 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos interiores (Sala/Cozinha → Quarto 1) – solução convencional	157
Figura 115 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos interiores (Quarto 2 → Quarto 1) – solução em painel sandwich	157
Figura 116 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos interiores (Quarto 2 → Quarto 1) – solução convencional.....	158
Figura 117 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos interiores (Quarto 1 → Quarto 2) – solução em painel sandwich	158

Figura 118 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos interiores (Quarto 1 → Quarto 2) – solução convencional	159
Figura 119 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos interiores (WC → Quarto 3) – solução em painel sandwich	159
Figura 120 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos interiores (WC → Quarto 3) – solução convencional.....	160
Figura 121 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos de fogos adjacentes (Sala/Cozinha → Sala/Cozinha) – solução em painel sandwich.....	160
Figura 122 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos de fogos adjacentes (Sala/Cozinha → Sala/Cozinha) – solução convencional	161
Figura 123 - Evolução da temperatura interior, na zona Quarto 1, ao longo do ano - solução painel sandwich.....	165
Figura 124 - Evolução da temperatura interior, na zona Quarto 3, ao longo do ano - solução com painel sandwich.....	166
Figura 125 - Evolução da temperatura ambiente interior, na zona do WC, ao longo do ano - solução com painel sandwich.....	166
Figura 126 - Evolução da temperatura interior, na zona Quarto 1, ao longo do ano - solução convencional	167
Figura 127 - Evolução da temperatura interior, na zona Quarto 3, ao longo do ano - solução convencional	168
Figura 128 - Evolução da temperatura interior, na zona do WC, ao longo do ano - solução convencional	168
Figura 129 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Quarto 1, ao longo do ano – solução com painel sandwich.....	169
Figura 130 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Quarto 3, ao longo do ano - solução com painel sandwich.....	170
Figura 131 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona do WC, ao longo do ano - solução com painel sandwich	170
Figura 132 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Hall Quartos, ao longo do ano - solução com painel sandwich.....	171
Figura 133 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Quarto 1, ao longo do ano - solução convencional	171
Figura 134 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Quarto 3, ao longo do ano - solução convencional	172

Figura 135 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona do WC, ao longo do ano - solução convencional	172
Figura 136 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Hall Quartos, ao longo do ano - solução convencional	173

INDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Vencimentos médios anuais nos EUA entre 1900 e 1940.....	7
Tabela 2 - Tipologias, Áreas Brutas e Valor das casas modular VIROC.....	25
Tabela 3 – Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).....	48
Tabela 4 – Fatores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados com mais de 5% da área útil do espaço que servem	49
Tabela 5 - Coeficientes de transmissão térmica de referência em elementos opacos ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	49
Tabela 6 – Composição adotada para o BACRFA (por m^3 de betão).....	52
Tabela 7 – Características dos materiais dos elementos construtivos	57
Tabela 8 - Fatores de correção relativos à influência da Transmissão Marginal	67
Tabela 9 – Características do painel sandwich de BACRFA	90
Tabela 10 – Frequências críticas do painel sandwich e respetivas quebras	90
Tabela 11 – Características do envidraçado duplo – 4 (6) 4 (mm).....	92
Tabela 12 – Frequências próprias de vibração, relativas aos modos próprios de vibração por flexão transversal do painel	93
Tabela 13 - Frequências críticas do envidraçado e respetivas quebras	93
Tabela 14 – Características genéricas de uma porta em contraplacado	94
Tabela 15 – Frequência crítica e respetiva quebra do elemento porta.....	95
Tabela 16 – Área de superfície dos diferentes componentes dos elementos heterogéneos.....	96
Tabela 17 – Índice de redução sonora para elementos heterogéneos	96
Tabela 18 – Área de superfície dos diferentes painéis	98
Tabela 19 – Índice de redução sonora dos diferentes painéis.....	98
Tabela 20 - Áreas e Volumes dos diferentes compartimentos	99
Tabela 21 - Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior e interior padronizado, $D_{2m,nT,w}$, para os diferentes compartimentos	99
Tabela 22 - Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre espaços interiores	101
Tabela 23 - Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos de fogos adjacentes.....	101
Tabela 24 - Índice de redução sonora para elementos heterogéneos.....	103

Tabela 25 - Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior e interior padronizado, $D_{2m,nT,w}$, para os diferentes compartimentos com envidraçado 4 (12) 4	104
Tabela 26 - Índice de redução sonora para elementos heterogêneos	105
Tabela 27 - Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior e interior padronizado, $D_{2m,nT,w}$, para os diferentes painéis com envidraçado 4 (14) 18.....	105
Tabela 28 – Índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre interior e exterior com recurso ao Acoubat Sound	107
Tabela 29 - Índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre espaços interiores com recurso ao Acoubat.....	108
Tabela 30 – Índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre interior e exterior, segundo o modelo misto	123
Tabela 31 - Índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre interior e exterior	123
Tabela 32 – Índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre espaços interiores	124
Tabela 33 – Valor da diferença (Dif), para diferente conjugação de casos	141
Tabela 34 - Frequências críticas e quebra de isolamento por efeito de coincidência de diversos materiais para paredes de 1cm de espessura	142
Tabela 35 - Descrição paramétrica da curva de referência para isolamento a sons de condução aérea, em bandas de frequência de 1/3 de oitava e 1/1 oitava	143
Tabela 36 - Exemplos de fatores de correção, ΔL_f s	144
Tabela 37 – Ajustamento da curva de valores estimados, para o painel sandwich, à curva de referência.....	148
Tabela 38 - Ajustamento da curva de valores estimados, do envidraçado, à curva de referência	149
Tabela 39 – Ajustamento da curva de valores estimados, da porta, à curva de referência....	149

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

As habitações pré-fabricadas são vistas normalmente como construções provisórias e de baixa qualidade e capacidade estrutural. No entanto, num período onde a sustentabilidade e os parâmetros de qualidade têm vindo a ser valorizados, o processo de construção e execução deste tipo de habitação modular pré-fabricada tem vindo a ser realizado de forma a cumprir todos estes requisitos.

A habitação modular em estudo pretende tirar partido do adequado uso de novos materiais e de ferramentas de cálculo avançado na conceção, dimensionamento e construção de habitações modulares de custos controlados.

Este tipo de habitação será construído pela assemblagem de elementos pré-fabricados, os quais se baseiam no conceito de painel sandwich pré-fabricado, resultando num edifício com propriedades estruturais e de isolamento térmico e acústico adequadas.

Com o baixo custo dos elementos construtivos e rapidez de construção, o objetivo da habitação modular com solução em painel sandwich passa por oferecer uma solução de habitação mais competitiva face às soluções tradicionais.

Por se tratar de uma solução nova, enquadrado no projeto de pesquisa LEGOUSE, o estudo da habitação modular de custos controlados vai permitir conhecer as suas características funcionais e otimizar o comportamento da solução, dando assim resposta às exigências em vigor.

1.2. Objetivos

No desenvolvimento de soluções construtivas é muito importante conhecer o desempenho dos elementos em estudo. Para tal, é necessário prever e quando possível avaliar, através da

simulação, realização de ensaios em laboratório ou “in situ” o comportamento destes elementos em função das características dos materiais que os constituem.

Assim, o objetivo da presente dissertação consiste em estimar o desempenho térmico da parede pré-fabricada em painel sandwich da habitação modular com recurso ao software EnergyPlus, analisando o comportamento térmico que esta irá apresentar e efetuar, posteriormente, uma análise comparativa, entre a solução de painel sandwich e uma solução convencional.

Quanto ao comportamento acústico da mesma, pretende-se estimar o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado ($D_{2m,nT}$) de parede de fachada, através de modelos simplificados e a determinação do índice de isolamento sonoro a condução aérea ($D_{2m,nT,w}$) por comparação com a descrição convencional de referência constante da norma ISO 717-1:1996 (CEN, 1996).

Por fim, pretende-se comparar o desempenho térmico e acústico com as exigências regulamentares.

1.3. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação organiza-se em cinco capítulos.

No Capítulo 1 é efetuado o enquadramento da dissertação, onde se apresentam os objetivos, organização e estrutura do documento.

No Capítulo 2 são apresentados os conhecimentos atuais ao nível do conceito de habitação modular e sua história, características e pormenores de ligação dos painéis sandwich, levantamento de soluções existentes no mercado nacional, diferentes métodos de previsão do comportamento térmico e acústico, sendo ainda apresentadas as exigências regulamentares nacionais aplicáveis ao comportamento térmico e acústico das habitações.

No Capítulo 3 é apresentada a descrição da habitação modular de custos controlados em estudo, a identificação dos constituintes da parede pré-fabricada, a descrição dos programas

usados no trabalho e a apresentação dos métodos de cálculo usados na análise do comportamento térmico e acústico do edifício.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados do estudo realizado, relativamente ao comportamento térmico e acústico da habitação, sendo também apresentados os resultados do comportamento térmico e acústico para soluções construtivas tradicionais, identificando assim as vantagens e desvantagens do sistema de construção modular da habitação em estudo perante o sistema de construção tradicional. Por fim, faz-se ainda uma análise aos resultados obtidos.

Por último, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho realizado, bem como as perspectivas e sugestões para trabalhos a serem efetuados futuramente.

2. ESTADO DE ARTE

2.1. Conceito de Habitação Modular

Segundo Ebong (2005), desde sempre houve o sonho de adquirir casas pré-fabricadas através de catálogo, sendo este um dos conceitos da arquitetura moderna.

Quando se fala de casas pré-fabricadas, uma das imagens que vem à mente é a de uma casa semi-acabada sendo transportada num gigantesco camião. Esta ideia é assente em exemplos como os presentes na Figura 1.



Figura 1 - Transporte de casas pré-fabricadas (casasprefab, 2012 & illumin, 2012)

Numa primeira observação, a única vantagem destas casas é a sua facilidade de transporte. Contudo, este tipo de casa é sofisticado o suficiente para se considerarem casas funcionais. Assim que são ligadas a uma fundação, conectadas com as redes de abastecimento de água, eletricidade e saneamento, transformam-se em verdadeiras casas funcionais.

Em termos de pré-fabricação de habitações, existem quatro grandes categorias: modular; por painéis; por componentes; móvel. A diferença entre os três primeiros tipos é a percentagem da totalidade da casa que é pré-fabricada na fábrica, antes de a deixar em direção à obra. O tipo modular é o mais completo, cerca de 95% da totalidade da casa é produzida em fábrica e só

depois transportado para a obra (Kwan, 2007). É neste tipo de construção pré-fabricada que a dissertação irá incidir.

2.2. Enquadramento Histórico

A construção modular é muitas vezes considerada o futuro da indústria de construção de habitações. As raízes deste tipo de construção remontam de há quase um século atrás, quando dois eventos significativos no início do século XX contribuíram para a evolução da casa modular como se conhece atualmente.

Em 1908, a Sears, Roebuck & Company iniciou a fabricação e venda de casas construídas por vários elementos/módulos. Aos compradores de casas da Sears foi-lhes facultado o “Book of Modern Homes”. Tratava-se de um catálogo onde figuravam diversos projetos de casas (Figura 2).

**\$2,065⁰⁰ Completely BUILDS AND FINISHES
This \$3,000.00 Ten-Room Residence**

As Proven by Our FREE Plans, Specifications and Complete Itemized Bill of Materials.
THESE PLANS ARE FREE OF CHARGE TO YOU ON CONDITIONS EXPLAINED ON PAGE 2.

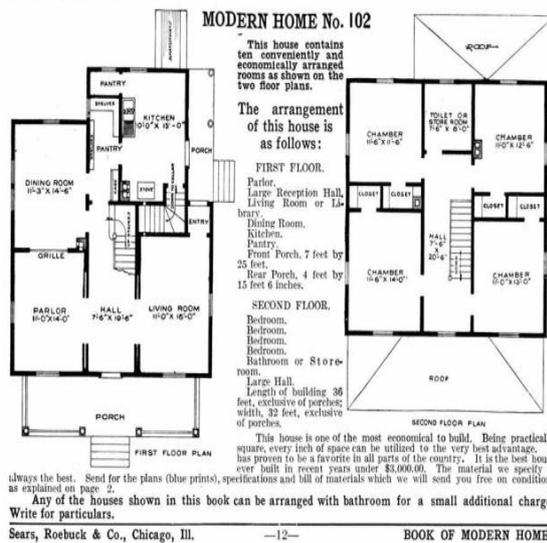


Figura 2 – Sears Modern Home N.º 102 (adaptado de: “Sears Modern Homes Mail Order Catalog”, 1914)

Este primeiro catálogo tinha 68 páginas e possibilitava a escolha de mais de 44 projetos de casas modulares e uma escola, onde os preços variavam entre os \$695 e \$4.119 (Irontown Homes, 2012).

Na Tabela 1, encontram-se os vencimentos médios anuais nos Estados Unidos da América (EUA) entre 1900 e 1940, o que permite ter uma noção do custo destas casas naquela época.

Tabela 1 – Vencimentos médios anuais nos EUA entre 1900 e 1940 (adaptado de: The Value of a Dollar 1860-1999, 1999)

Ano	1900	1910	1920	1930	1940
Setor Privado	\$ 438/ano	\$ 574/ano	\$ 1407/ano	\$ 1388/ano	\$ 1315/ano
Setor Público	\$ 590/ano	\$ 699/ano	\$ 1164/ano	\$ 1517/ano	\$ 1497/ano

Após a escolha do projeto de casa pretendido, os compradores recebiam por correio todos os dados do projeto. Com toda a burocracia tratada, dois contentores de carga chegavam por via férrea contendo cerca de 30.000 peças da casa escolhida. Num manual de 75 páginas os compradores podiam ler as instruções para montar as peças. Além destas, o “kit” também incluía 750 quilos de pregos, 20 mil telhas e cerca de 83 litros de tintas e vernizes (Irontown Homes, 2012).

Entre 1908 e 1940 foram encomendadas mais de 75.000 casas modulares da Sears, embora se tenha verificado uma redução de aquisição das mesmas em meados de 1932, durante os tempos da Grande Depressão, com as vendas a caírem até 40% num único ano. O que ditou o fim do catálogo de casas modulares (Irontown Homes, 2012).

Nos Estado Unidos houve também um elevado interesse nas habitações pré-fabricadas após a I Guerra Mundial (1914 - 1918), devido ao regresso dos soldados e uma elevada expansão da população. O mesmo ocorreu aquando e depois da II Guerra Mundial (1939 - 1945), que foi seguida do fenómeno de “baby boom” (Ebong, 2005). Estas foram as principais razões da evolução significativa que as casas modulares apresentaram, já que ofereciam uma ótima relação de custo/eficiência.

Durante esse mesmo período na Europa ocorreu, também, um elevado aumento na produção de construções temporárias, ou até mesmo habitação permanente, uma vez que existia uma enorme devastação causada pela guerra e era necessário acomodar toda a população deslocada (ver Figura 3). Consequentemente, a procura por casas pré-fabricadas aumentou, surgindo na forma de complexos apartamentos (Kwan, 2007).



Figura 3 - Casas pré-fabricadas construídas após a II Guerra Mundial

Para fazer frente ao significativo crescimento das casas pré-fabricadas, muitos designers e arquitetos famosos dedicaram uma grande parte da sua carreira no desenvolvimento de soluções de habitação modular, incluindo grandes nomes como Frank Lloyd Wright, Le Corbusier, Mies van der Rohe e Walter Gropius.

Frank Lloyd Wright foi dos primeiros arquitetos a investir no conceito de habitações pré-fabricadas. A partir de 1911 Wright começou a desenhar casas que podiam ser construídas por peças em fábrica e montadas no local de implantação da casa, tornando as casas mais acessíveis devido à redução de mão-de-obra (Housing, 2012). Em 1936, com os EUA sob efeitos da depressão, Wright desenvolveu uma série de projetos de casas, num estilo a que ele chamou Usonian, concebidas para ter custos controlados. Estas casas não possuíam sótão, porão ou grande decoração (eHow, 2012).

Walter Gropius teve uma ideia semelhante, desenvolveu diversas casas pré-fabricadas que vieram colmatar o défice de habitações pós-guerra. Num estilo moderno, as habitações pré-fabricadas de Gropius vieram não só influenciar as casas pré-fabricadas como, também, a arquitetura nos anos seguintes (eHow, 2012).

Em 1913, Henry Ford introduziu um novo conceito de produção em série na sua fábrica de automóveis. Esta ideia revolucionária permitiu aos fabricantes reduzir o tempo de construção de um automóvel, mantendo o controlo da qualidade durante todo o processo de fabrico. Quase 50 anos depois, os conceitos introduzidos pela empresa Sears, Roebuck & Company e

por Henry Ford foram fundidos, originando assim uma nova era na indústria da construção de casas modulares (Irontown Homes, 2012).

Em 1950, a revista Arts and Architecture, sediada em Los Angeles, iniciou uma campanha habitacional experimental, denominada de Case Study Houses (CSH). A campanha levou inúmeros arquitetos a desenhar protótipos de casas que fossem baratas e eficientes. Dos 36 pedidos efetuados, 20 destes foram construídos até final da campanha. Os exemplos mais famosos incluem a Heames House (Case Study House #8), pertencente a Charles e Ray Eames (ver Figura 4, à esquerda), que foi erguida manualmente em 3 dias, e a Sthal House (Case Study House #22), desenhada por Piere Koenig (ver Figura 4, à direita) (Smith et al., 2009).



Figura 4 – Casa Eames, à esquerda (comjeitoearte, 2012) e Sthal House, à direita (designapplause, 2012)

Pela eficiência e enorme facilidade de montagem, a campanha Case Study Houses influenciou a evolução da habitação pré-fabricada moderna.

Em 1958 foi produzida, de acordo com as normas que se encontravam em vigor, a primeira casa modular de duas secções. Atualmente, este é considerado o início da indústria de casas modulares. Nas décadas seguintes, os fabricantes de habitação modular trabalharam no sentido de melhorar as tecnologias de fabrico deste tipo de habitação.

Até 1980, a maioria das casas modulares eram compostas por 2 ou 4 módulos. No entanto, com a evolução dos computadores e programas de design, a indústria de construção de habitações modulares teve uma enorme evolução.

Nos últimos 20 anos, com o recurso a gruas com capacidade de elevar maiores pesos e volumes, houve uma grande evolução na habitação modular. Com os novos métodos e tecnologias, grandes módulos poderiam ser construídos e encaminhados para todo o lado. A única limitação destes módulos seria a largura da estrada entre a fábrica e o local de implantação da casa. Sendo que, atualmente as habitações modulares são compostas normalmente por 3 a 6 módulos (Irontown Homes, 2012).

Com o aumento de produção de casas modulares, os potenciais compradores tinham muito mais opções para personalizar a sua habitação. Alterando a configuração dos diversos módulos, ou até mesmo criando novos módulos, tornava possível adquirir casas, com a altura e largura desejadas.

2.3. Construção Modular

A construção modular, como integrante da indústria de pré-fabricação é o caminho para a industrialização do sector da construção civil. Contudo, embora seja uma tecnologia com todas as vantagens inerentes a esse processo, apresenta inconvenientes que estão na base de, na maior parte dos Países desenvolvidos e em vias de desenvolvimento, ainda se continuar a preferir (na maior parte das situações), a construção tradicional (de alvenaria e de betão) à pré-fabricação (Couto et al., 2007).

De seguida, são apresentados alguns dos aspetos positivos que caracterizam a construção modular (Couto et al., 2007):

- Produção em unidades industriais vocacionadas especificamente para esse fim, com rotinas de produção e pessoal especializado possibilitando um controle de qualidade eficiente;
- Rapidez de execução das estruturas em obra, fruto da capacidade de armazenamento dos produtos em fábrica e dos elevados ritmos de montagem conseguidos.
- Menor dependência das condições atmosféricas, sendo mais fácil cumprir prazos e controlar os programas estabelecidos;
- Redução da necessidade de cimbres e andaimes, permitindo uma redução de custo;
- Potencialização das condições de segurança segundo duas vertentes: segurança estrutural, pois permite ensaiar as peças antes da sua colocação em obra; e a segurança

de acidentes de trabalho, que está diretamente relacionada com o número de horas de trabalho em estaleiro, que no caso da pré-fabricação é muito inferior, o nível de profissionalismo aliado à eficácia dos equipamentos, também contribui para a diminuição do risco de acidente;

- Reaproveitamento, em fábrica das cofragens, pela grande quantidade de elementos iguais que se fabricam;
- Possibilidade de conceber pensando no processo de desmantelamento e conseqüente reaproveitamento;
- Redução da área de estaleiro, redução da produção de resíduos e ruído em obra e diminuição dos gastos em energia;
- Redução dos custos de fiscalização e manutenção;
- Oportunidade duma crescente qualidade e eficiência, no processo construtivo, uma vez que a experiência que vai sendo adquirida permite aperfeiçoar a segurança e rapidez das operações.

Com base na informação exposta anteriormente, conclui-se que a pré-fabricação é competitiva, fornece maior qualidade, maior durabilidade, maior fiabilidade, maior segurança e possibilita uma gestão mais fácil e eficiente (Couto et al, 2007).

Mas quando comparada com a produção em obra enfrenta, ainda, algumas dificuldades que têm vindo a ser consideradas por alguns agentes do sector como grandes entraves, mas que devem sobretudo ser encaradas como desafios a ultrapassar. Assim, destacam-se os seguintes desafios (Couto et al, 2007):

- Necessidade, na maioria dos casos, de recorrer a elementos de ligação adicionais (p. ex. parafusos, cantoneiras), que exigem grande rigor e controlo na execução das ligações;
- Maior exatidão no estudo do projeto e pormenorização;
- Maior necessidade de controlo de fabricação;
- Necessidade de recorrer quase exclusivamente a mão-de-obra especializada.

Com base nas vantagens e desafios que a construção modular oferece, seria de esperar um aumento do investimento científico para novas pesquisas neste sector, principalmente nos países desenvolvidos. A pré-fabricação de casas modulares em betão auto-compactável é um

sector em crescimento, quer na investigação científica, quer no mercado. Países como os Estados Unidos da América, Canadá, Austrália, Japão já desenvolveram vários estudos científicos neste campo (Santos, 2010).

2.4. Soluções Existentes de Construção Modular

Neste subcapítulo são apresentadas algumas das soluções existentes no mercado português, onde se indicam as diversas características das diferentes soluções existentes, e quando disponível pelos fornecedores, são apresentados os custos de execução.

2.4.1. MOOD

Após várias pesquisas sobre tipologias e conceitos de construção pré-fabricada, a MOOD – Casas Modulares (www.casasmood.com), criou um sistema modular otimizado em painel do tipo sandwich que possibilita a rápida execução de obra, agregado a uma forte componente estética, que vão ao encontro das várias necessidades de espaços habitacionais e não só.

Segundo a MOOD, este conceito de construção modular poderá ainda ser aplicado em projetos e tipologias diferentes das fornecidas, sendo a sua conceção e execução elaborada de acordo com os mesmos pressupostos e métodos construtivos. Conseguindo, segundo eles, custos e prazos de execução bastante reduzidos em relação à construção tradicional em alvenaria e betão (MOOD, 2012).

Esta empresa apresenta dois tipos de casas modulares, a MOOD2A e MOODPLUS. A principal diferença entre elas é a sua tipologia e interação com os espaços exteriores, uma vez que em termos de soluções construtivas são iguais. A MOOD2A apresenta as seguintes tipologias: T1, T2 e T3, por sua vez a MOODPLUS apresenta tipologias: T3 e T4.

A Figura 5 apresenta um exemplo das plantas de arquitetura destes dois modelos (MOOD, 2012).



a) MOOD2A – T2

b) MOODPLUS – T3

Figura 5 – Plantas de arquitetura de diferentes tipologias das casas modulares MOOD (MOOD, 2012)

Os elementos que constituem as paredes exteriores e sub-teto, conforme ilustra a Figura 5, são formados por painéis metálicos do tipo sandwich de 50mm, com material de isolamento em poliuretano (MOOD, 2012).

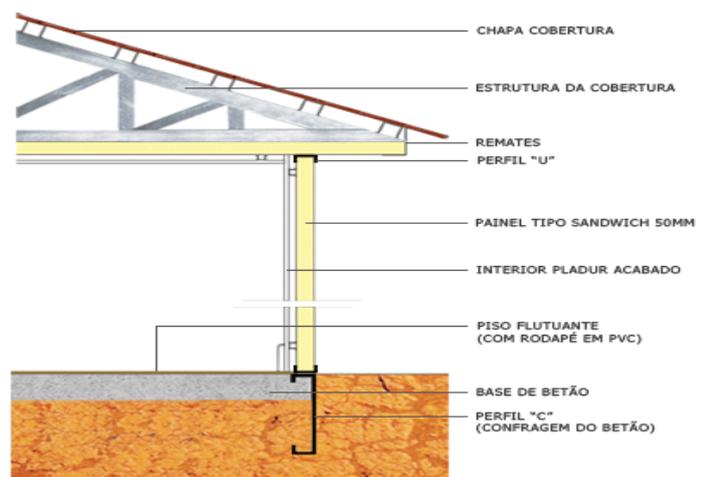


Figura 6 – Pormenor construtivo da Habitação MOOD2A (MOOD, 2012)

Os painéis, providos de encaixe próprio e aplicados dentro de perfis galvanizados do tipo U, garantem rigidez ao conjunto de forma a constituir uma estrutura autoportante, que compõe o bloco principal. Esta é assente sobre uma base de betão, na qual se efetuam as ligações às

infraestruturas existentes (águas, eletricidade, saneamento). A cobertura, em duas águas com pendentes livres, é executada em chapa metálica, imitando a telha lusa de cor vermelha (MOOD, 2012).

Relativamente aos acabamentos, as paredes interiores e tetos são revestidos a gesso cartonado e pintados. O pavimento, geralmente, é em piso flutuante. Os vãos exteriores são equipados com caixilharia de alumínio lacado e vidro duplo (MOOD, 2012).

A MOOD apresenta ainda uma outra solução de habitação modular, dirigida ao mercado africano. Esta solução visa desenvolver uma linha de habitações de caris social, de baixo custo de construção e rapidez de execução, sendo a sua estereotomia igual à solução MOOD2A. Com solução estrutural igual, a principal diferença será a nível de área bruta e de acabamentos (MOOD, 2012).

2.4.2. SIT

O projeto SIT – Modular Solutions (www.siturbandesign.com) foi concebido e desenvolvido com base no conceito de construção rápida, versátil e de elevado valor estético. A estrutura, em betão armado reforçado com fibra, e o isolamento térmico e acústico contínuo conferem às soluções modulares SIT uma boa resistência, conforto e durabilidade.

A base destas casas modulares, tal como representa a Figura 7, é constituída por uma estrutura mista, metal e madeira, e placagem superior de aglomerado de madeira e cimento, o isolamento térmico em poliuretano expandido de 4cm e um revestimento à escolha (SIT, 2012).

As paredes exteriores são em betão reforçado com fibra de vidro, auxiliado com uma estrutura metálica, no interior encontra-se uma camada de isolamento térmico em poliuretano expandido com espessura média de 4cm. A superfície interior é em gesso cartonado. As janelas são em caixilharia de alumínio com perfil em T e vidro duplo (SIT, 2012).

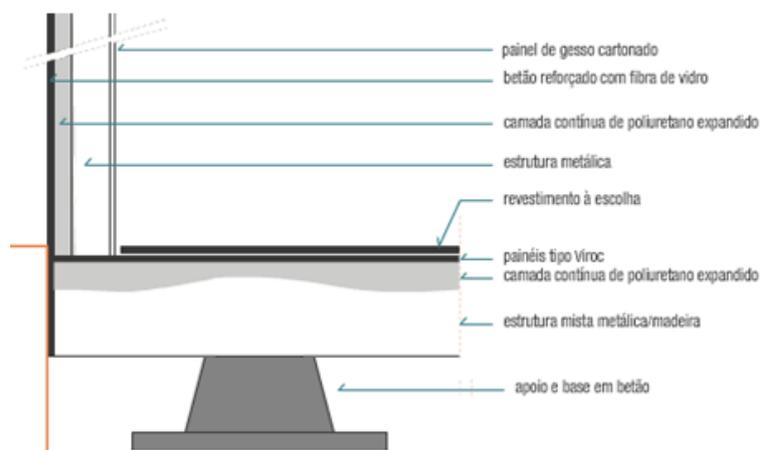


Figura 7 – Pormenor construtivo da base e paredes exteriores (SIT, 2012)

A cobertura é formada por uma camada contínua (sem juntas) de betão reforçado com fibras de vidro, auxiliada por uma estrutura metálica, uma camada de isolamento térmico em poliuretano expandido com espessura média de 4cm, e teto falso em gesso cartonado. A impermeabilização da superfície exterior é realizada com membrana elástica (SIT, 2012).

Cada módulo destas soluções modulares SIT é constituído por uma única peça, existindo vários tipos de módulos base (ver Figura 8) que podem ser combinados entre si de forma a obter o projeto arquitetónico desejado, em função da área e tipologia pretendidas (SIT, 2012).

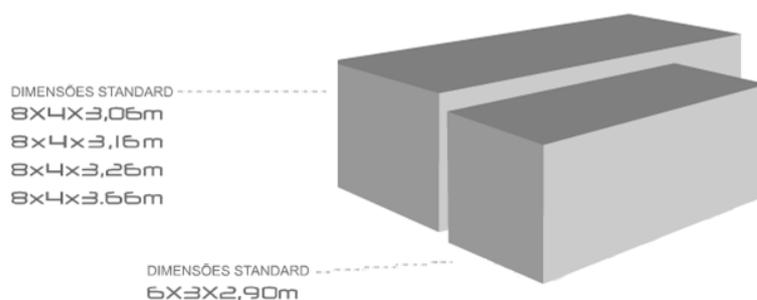


Figura 8 – Módulos standard da SIT (SIT, 2012)

Os primeiros modelos base (6m×3m), com custo a partir de 9000€, são vocacionados para bungalows, escritórios, bares, restaurantes e/ou sanitários. Alguns destes exemplos encontram-se representados na Figura 9. Os novos módulos base para habitação são compostos por módulos de (8m×4m) a partir de 9500 € (aproximadamente 300 €/m²) (Santos, 2010).

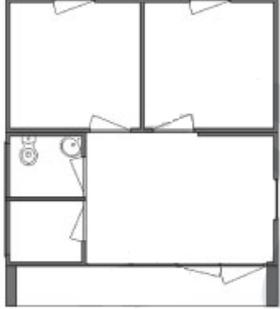
<p>Bungalows T1 – Tipo L</p>		
<p>Escritórios 2 Módulos c/ WC + Arrumos</p>		
<p>Bar/Restaurante</p>		

Figura 9 – Diferentes ofertas de produtos modulares SIT (SIT, 2012).

Segundo o fabricante, estas edificações apresentam como vantagem a rápida construção e versatilidade, uma vez que os módulos podem acoplar-se entre si, permitindo assim inúmeras tipologias de edifícios. No caso de edifícios para habitação, a SIT oferece dois modelos (Air e Sand), cuja principal diferença se situa ao nível dos acabamentos (SIT, 2012).

Na Figura 10 encontram-se representados duas versões de casas com tipologia T1, estas apresentam diferentes disposições dos módulos e possibilidade de diferentes acabamentos. A área útil, bem como o preço de custo também se encontram representados.



Figura 10 – Diferentes tipologias de habitações modulares SIT (Santos, 2010)

2.4.3. Modular System

O sistema modular de casas em madeira, denominado de Modular System (www.modular-system.com), dispõe de 5 tipologias distintas de produto que pretendem agrupar o âmbito de aplicação do conceito modular: Séries, Base, Custom, Mobile e Nomad.

As “séries” são projetos que pretendem demonstrar as potencialidades da construção modular a partir de algumas combinações possíveis, elaboradas de forma a abranger as necessidades e desejos dos clientes. As séries englobam 5 exemplos distintos (XS, S, M, L e XL) que divergem uns dos outros consoante a composição, e que apresentam variantes dentro do mesmo modelo. Os exemplos estão ainda divididos segundo a área útil dos módulos em, módulo “m” que tem 11 m^2 e módulo “m+” com $13,5 \text{ m}^2$ (Torres, 2010).

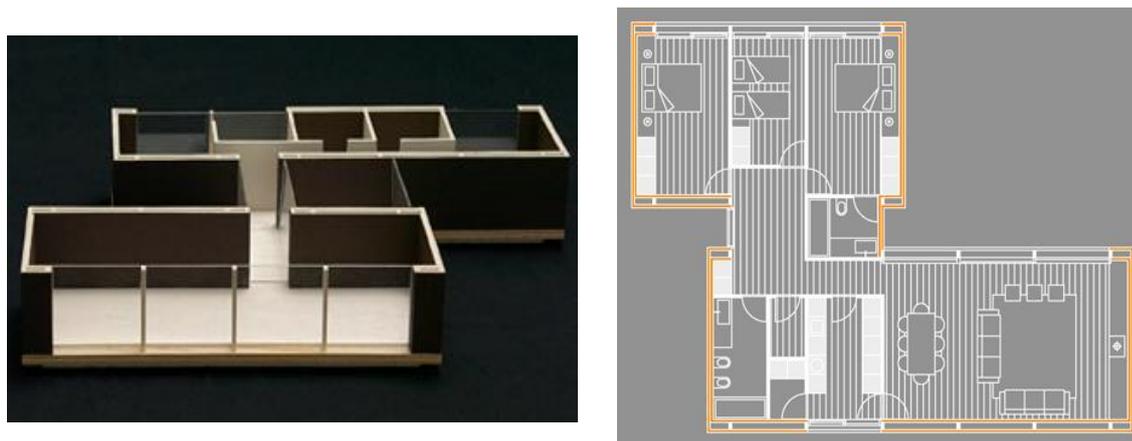


Figura 11 – Série L.1+ (Área – 143m², T3) (Modular System, 2012).

As casas tipologia “base” são projetadas a partir da conjugação de módulos predefinidos, permitindo ao cliente a criação de soluções personalizadas (Modular System, 2012).

As casas da linha “custom” são obtidas utilizando as metodologias adquiridas do Modular System, não utilizando no entanto os módulos predefinidos. Permitem uma maior personalização da solução, sendo esta modalidade a única que permite a execução de habitações com mais de um piso (Torres, 2010).

As “mobile home” são unidades habitacionais modulares e transportáveis, que seguem a lógica da modularidade aplicada à mobilidade, como se pode ver pela Figura 12. Possuem uma área útil de 42m² (Modular System, 2012).



Figura 12 – Exemplo de “Mobile home” (Modular System, 2012).

A tipologia “nomad” consiste em módulos triangulares facilmente transportáveis. Estas casas assemelham-se a abrigos, aos quais se podem acrescentar módulos consoante o programa pretendido. Na Figura 13 encontra-se um exemplo deste tipo de construção modular.



Figura 13 – Exemplo de Tipologia “nomad” (Modular System, 2012).

As estruturas das casas modulares estão sobrelevadas do terreno através de distanciadores metálicos que permitem a adaptação a qualquer topografia, evitando perdas de tempo e custos associados aos movimentos de terra. As fundações são feitas através de sapatas pontuais de betão ou estacas de madeira (Torres, 2010).

A cobertura destas casas modulares é formada por um painel multicamada, uma barreira para-vapor, lã mineral e impermeabilização. As paredes exteriores são em duplo painel OSB (aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas), caixa-de-ar e isolamento em lã mineral.

As paredes interiores são em painel duplo de gesso cartonado, com o núcleo preenchido com lã mineral. Os tetos são em contraplacado de madeira, e os pavimentos interiores e exteriores em madeira. As caixilharias são em madeira maciça e vidro duplo (Modular System, 2012).

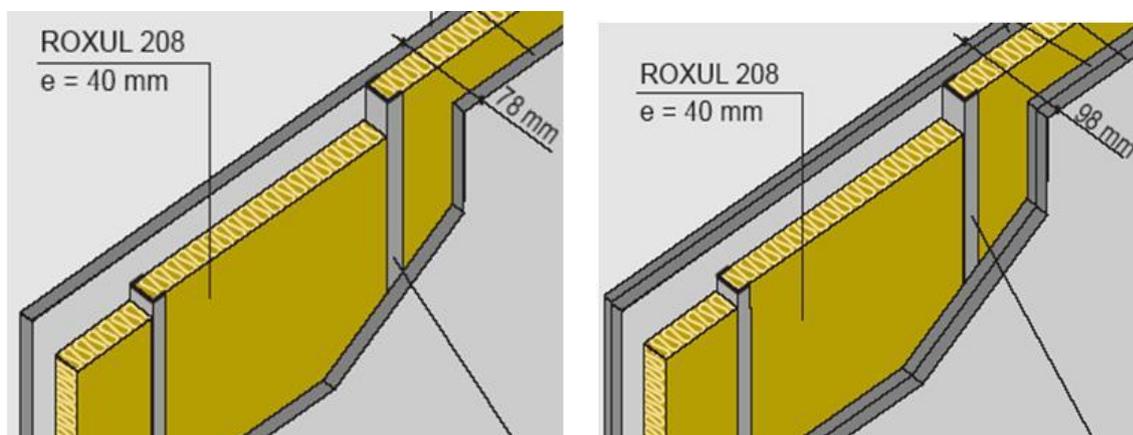
2.4.4. Módulo Técnico

Segundo a empresa Módulo Técnico (www.modulotecnico.com) as suas casas modulares tornam-se únicas pela robustez da conceção da estrutura e a facilidade da adaptação às exigências específicas de cada projeto. No entanto, estas casas modulares apresentam certas limitações, tais como limitação a 2 pisos e um comprimento, largura e altura máxima de 12 m em cada direção (Modular Técnico, 2012).



Figura 14 – Exemplo de casa modular da empresa Módulo Técnico

As casas modulares da Módulo Técnico possuem paredes constituídas por uma camada, simples ou dupla, de gesso cartonado em cada face da parede e uma camada intermédia de isolamento, de 40 mm de espessura. O isolamento térmico e acústico utilizado é a lã de rocha e o acabamento interior da fachada é em gesso cartonado (Modular Técnico, 2012). A pormenorização destes elementos encontra-se representada na Figura 15.



a) Parede com contraplacado em cada face e camada intermédia de isolamento ($R_w = 44\text{dB}$).

b) Parede com duplo contraplacado em cada face e camada intermédia de isolamento ($R_w = 57\text{dB}$).

Figura 15 – Pormenores construtivos das paredes da Módulo Técnico (Modular Técnico, 2012).

Para revestimento exterior existem várias soluções, desde ripados de madeira, painéis de madeira, painéis metálicos ou alumínio, e placas de cimento portland revestidas por camada de fibra de vidro em ambas as faces (Modular Técnico, 2012).

A Modulo Técnico possibilita dois tipos de cobertura: plana ou de duas águas. Como se pode ver na Figura 16, a composição da cobertura plana é formada por um painel sandwich, uma barreira de vapor, lã de rocha e impermeabilização, e interior revestido a lã de rocha e gesso cartonado.

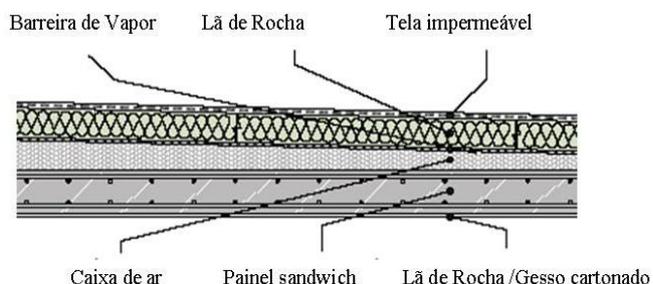
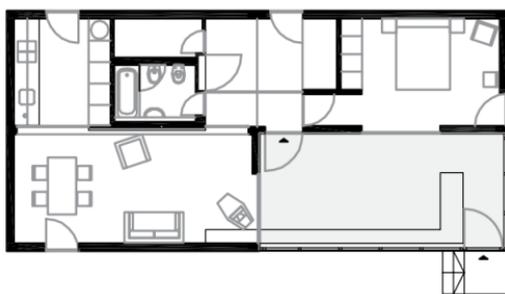


Figura 16 – Cobertura plana e respetivo corte transversal (Modular Técnico, 2012)

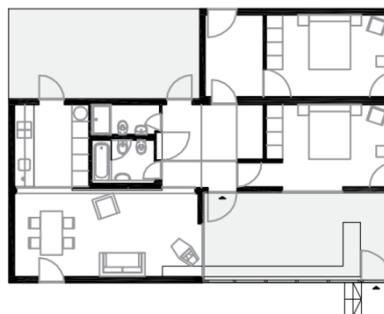
2.4.5. TreeHouse

Desenvolvido pela Jular, o conceito TreeHouse (www.treehouse.pt) é “eco-friendly”, isto é, é fabricado com materiais ecológicos, provenientes de florestas certificadas, de gestão sustentada. Sendo que todos os componentes em madeira apresentam certificação PEFC (cadeia de responsabilidade florestal) (TreeHouse, 2012).

A construção da Treehouse é concebida módulo a módulo, com uma dimensão standard de 22 m² cada. Os módulos são acopláveis entre si e permitem o crescimento da habitação quer em extensão, quer em altura. As tipologias base da TreeHouse permitem a combinação de diversas soluções. Na vertente habitacional, a casa pode crescer com a família, através da colocação de novos módulos, aumentando assim o espaço disponível sem prejuízo da estrutura já existente, a Figura 17 exemplifica essa versatilidade (TreeHouse, 2012).



TreeHouse T1 – 4 Módulos



TreeHouse T2A – 6 Módulos

Figura 17 – Diferentes tipologias da TreeHouse (TreeHouse, 2012)

A construção dos módulos é feita totalmente em fábrica e o processo de montagem, ilustrado na Figura 18, é realizado de modo a causar um baixo impacto no meio envolvente.



Figura 18 – Processo de montagem TreeHouse (TreeHouse, 2012)

Os revestimentos de fachada e interiores podem ser escolhidos a partir de uma paleta de materiais. Segundo o fabricante, a Treehouse possui um bom desempenho no que toca ao isolamento térmico e acústico. Os tetos, as paredes e o pavimento são construídos num sistema multicamada, concebido para assegurar eficiência energética. Os vãos envidraçados possuem caixilharia com corte térmico e de vidro duplo (TreeHouse, 2012).



Figura 19 – Exemplo de casa modular TreeHouse

O preço da área encerrada varia entre os 800€/m² e os 1.100€/m² (sem IVA). Os módulos mais caros são os que têm mais especialidades e envidraçados (TreeHouse, 2012).

2.4.6. Módulos VIROC

De forma a enfrentar os diversos mercados onde atua, a VIROC (www.viroc.pt) apresenta dois tipos de casas modulares, a Modular F e Modular S. A principal diferença entre elas é a forma da sua cobertura, apresentando a primeira cobertura plana e a segunda cobertura inclinada.

As soluções apresentadas foram idealizadas a partir de um Módulo Base (5m×5m). Este é constituído por uma sala, uma cozinha e uma instalação sanitária. Ambas as soluções (Modular F e Modular S) apresentam as seguintes tipologias: T0, T1, T2 e T3. As tipologias T1, T2 e T3 foram concebidas a partir do Módulo Base (T0) e, consoante as necessidades de cada cliente, será acrescentado o módulo dos quartos, lateralmente ao Módulo Base (VIROC, 2012a).

Na Figura 20 encontram-se alguns exemplos de tipologias que a Modular F pode apresentar, onde se pode ver o acréscimo de outros módulos consoante a necessidade.



Figura 20 – Planta de arquitetura das diferentes tipologias do Módulo F (VIROC, 2012b)

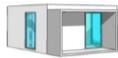
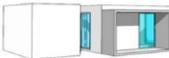
A fundação da casa consiste num ensoleiramento de betão armado, assente diretamente sobre o terreno, que serve de base à estrutura da casa que é realizada através de perfis metálicos em aço galvanizado enformado a frio, dando forma às paredes que são elementos resistentes e que irão suportar a cobertura, constituída por um conjunto de vigas e madres metálicas. O revestimento do pavimento é realizado em painéis de aglomerado de madeira e cimento com 19 mm de espessura, os tetos com os mesmos painéis, mas de 12 mm de espessura, com acabamento final através de uma tinta ou verniz, sendo isolados acusticamente com lã mineral (VIROC, 2012b).

As paredes da casa são constituídas por uma estrutura de aço galvanizado enformado a frio, revestidas por painéis de aglomerado de madeira e cimento com 16 mm de espessura do lado exterior e de 12 mm no lado interior, entre os painéis é colocada lã mineral que lhe irá conferir o isolamento térmico e acústico (VIROC, 2012b).

A cobertura da casa é constituída por painéis de aglomerado de madeira e cimento com espessura de 16 mm assente sobre a estrutura em aço enformado a frio, que servirá de suporte a painéis de poliestireno extrudido XPS, revestido com um sistema de impermeabilização (VIROC, 2012b).

Como se pode ver pela Tabela 2, as casas modulares da VIROC, dependendo da sua tipologia, apresentam um preço que varia entre os 18750€ e os 38500€. O pacote inclui a estrutura em aço galvanizado, paredes exteriores, paredes interiores, cobertura, teto falso, isolamento térmico e acústico, impermeabilização, janelas e portas, rede de águas, rede de esgotos e rede elétrica. A base de fundação, as loiças sanitárias, torneiras, armários de cozinha, transporte, montagem e painéis solares não estão incluídos no preço final (VIROC, 2012b).

Tabela 2 - Tipologias, Áreas Brutas e Valor das casas modular VIROC (VIROC, 2012b)

MODULAR F				
Tipologia	T0	T1	T2	T3
Área Bruta (m ²)	30,92	42,42	49,67	62,17
Valor Venda	18 750 €	23 750€	26 250€	32 250€

MODULAR S				
Tipologia	T0	T1	T2	T3
Área Bruta (m ²)	33,50	50,15	58,47	75,12
Valor Venda	19 900 €	26 450€	30 500€	38 500€

2.5. Habitação Modular de Custos Controlados

A habitação modular de custos controlados em estudo está a ser desenvolvida no âmbito do projeto em Copromoção nº 2009/005387, LEGOUSE, gerido pela Agência de Inovação (ADI), cofinanciado pelo FEDER - Programa Operacional Fatores de Competitividade, em copromoção com a Mota-Engil – Betão e Pré-fabricados, Lda. (MEBEP) do Grupo Internacional Mota-Engil, com a Universidade do Minho, com a CiviTest (empresa direcionada para a pesquisa de novos materiais para a engenharia civil), e com o PIEP - Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros.

Atualmente os betões reforçados com fibras (BRF) têm sido desenvolvidos no sentido de eliminar total ou parcialmente a armadura convencional presente nas estruturas de betão, com melhorias técnicas e económicas.

Por outro lado, a utilização de programas de cálculo que disponham de modelos constitutivos adequados permite que se otimizem diversos sistemas estruturais pré-fabricados, uma vez que é possível simular o comportamento e a ligação dos materiais intervenientes e modelar as suas fases construtivas.

Assim, a casa modular pretende tirar partido do adequado uso de novos materiais e de ferramentas de cálculo avançado na conceção, dimensionamento e construção de habitações modulares de custo controlado. Este tipo de habitação será construído pela assemblagem de elementos pré-fabricados, os quais se baseiam no conceito de painel sandwich pré-fabricado constituído por camadas externas em BACRFA, ligadas por materiais leves e de baixo custo, resultando num painel com propriedades estruturais e de isolamento térmico e acústico apropriado.

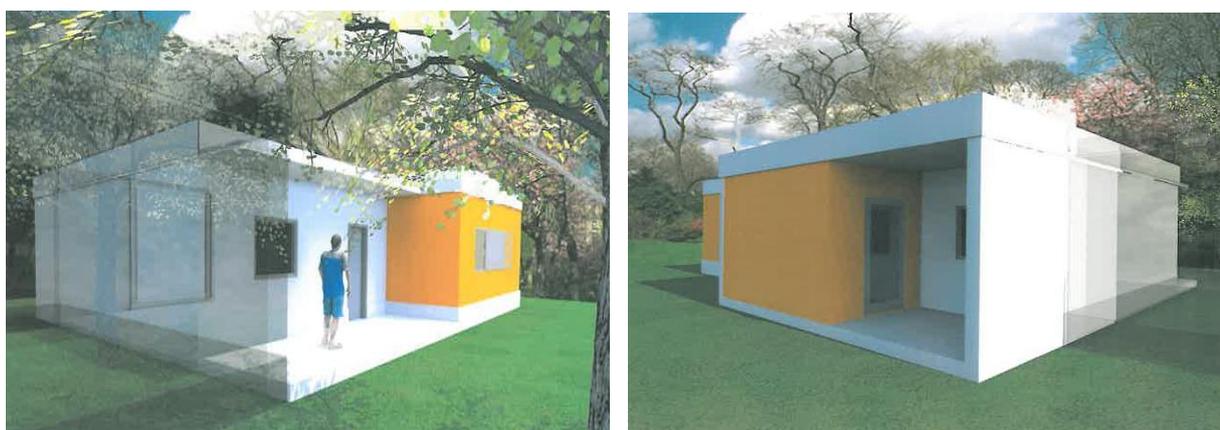


Figura 21 – Representação virtual da habitação modular.

Devido ao custo dos elementos construtivos e à rapidez de construção deste tipo de habitações, estas tornam-se mais competitivas face às soluções tradicionais.

Este conceito de habitação modular é especialmente vocacionado para países com fraco poder sócio/económico, como é o caso dos Países Africanos de Língua Oficial Portuguesa – PALOP, tendo também o objetivo de alargar este conceito a outros países, nomeadamente outros países do Continente Africano, Índia e países da América Latina. Seria então uma alternativa de construção em locais mais carenciados de habitação unifamiliar.

O objetivo deste projeto é o desenvolvimento e caracterização das propriedades dos materiais intervenientes nos sistemas construtivos, a construção e o ensaio dos elementos construtivos do sistema modular (Santos, 2010).

2.6. Painéis Sandwich

Ao longo do tempo e com o avanço tecnológico, os requisitos exigidos aos materiais sofreram alterações no sentido de se conseguirem atingir melhores desempenhos. Essa evolução levou ao desenvolvimento e utilização de materiais compósitos. Os materiais compósitos resultam da combinação de dois ou mais materiais, os quais, por si só, não são adequados como materiais de construção mas que, ao serem combinados e dispostos de uma superfície de contacto adequada, criam um novo material que combina as propriedades positivas de cada material constituinte, podendo até eliminar algumas das suas propriedades negativas (Almeida, 2009).

Na Figura 22 é possível observar um destes painéis sandwich sendo depositados em obra.



Figura 22 - Painéis sandwich depositados em obra

Os painéis sandwich são um tipo de material compósito formado estruturalmente por três camadas: duas lâminas finas, rígidas e resistentes de material denso, que são separadas por uma camada de um material de baixa densidade, podendo ser menos rígido do que as lâminas.

As diferentes tipologias e formas estruturais dos painéis sanduíche podem ser obtidas através da combinação das diferentes formas do material de núcleo (Almeida, 2009).

Como referido anteriormente o seu núcleo é de baixa densidade, a ligação entre este e as duas camadas resistentes de material denso efetua-se por intermédio de um adesivo ou conectores, resultando numa estrutura que pode apresentar a rigidez e resistência mecânica pretendida para determinada aplicação (Leite, 2004). Na Figura 23 é possível observar a constituição deste tipo de painéis.

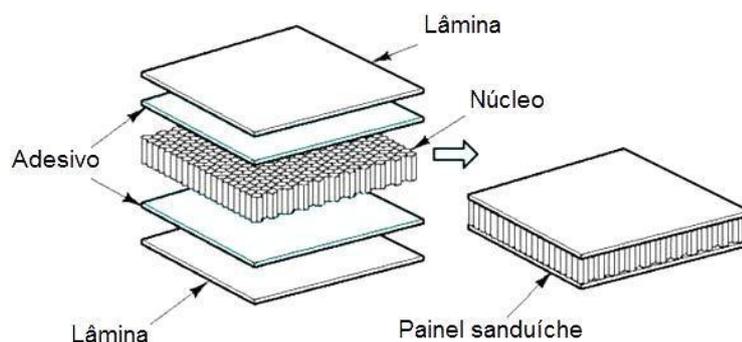


Figura 23 – Constituição de um painel sandwich (Almeida, 2009)

Quanto à sua configuração podem distinguir-se dois grupos de painéis sandwich de acordo com os seguintes materiais do núcleo: núcleos homogêneos e núcleos não homogêneos ou estruturados (Almeida, 2009).

Os núcleos homogêneos podem ser constituídos por espumas (poliuretano, poliestireno expandido – EPS, poliestireno extrudido – XPS e resina fenólica – PF), materiais orgânicos (lã mineral, lã de rocha e lã de vidro), diferentes tipos de plásticos expandidos, madeira de balsa ou até mesmo betão leve e produtos de argila.

Em relação aos núcleos de material não homogêneo, estes podem ser distinguidos em núcleos canelados, núcleos de favos de mel e painéis em que as lâminas são suportadas apenas por elementos pontuais.

Os núcleos canelados são constituídos por células abertas na direção das lâminas, ligadas pontualmente às duas lâminas do painel e podem apresentar-se de diversas formas. Ao contrário dos núcleos canelados, os núcleos de favos de mel são constituídos por células

abertas na direção transversal às lâminas, proporcionando um suporte bidirecional das mesmas (Almeida, 2009).

Na Figura 24 é possível observar os diferentes tipos de núcleo de acordo com as diferentes formas de suporte das lâminas.

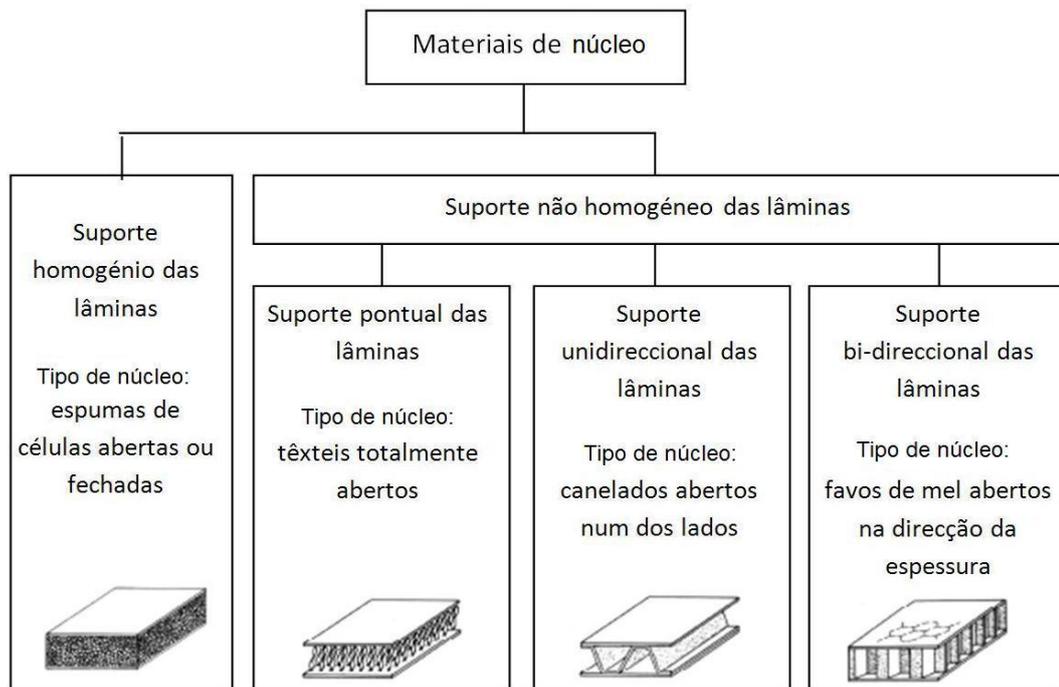


Figura 24 – Painéis sandwich com material de núcleo homogêneo e não homogêneo (Almeida, 2009).

A escolha dos diferentes materiais do núcleo do painel vai depender de diversos fatores, tais como: desempenho mecânico; processo de fabrico; propriedades térmicas e acústicas exigidas; fatores económicos; etc.

As lâminas que constituem os painéis sandwich devem cumprir requisitos a nível funcional, estrutural, e até mesmo ao nível do processo de fabrico. Só assim é possível obter o comportamento pretendido para o painel.

A nível funcional, as lâminas devem cumprir condições de estanqueidade à água, ao vapor de água e isolamento sonoro. A nível estrutural é indispensável uma resistência adequada não só às solicitações dos carregamentos a que vai estar sujeito, mas também apresentar uma adequada resistência ao fogo e, caso disponha de armaduras de aço, a qualidade do betão e a

espessura do recobrimento destas deve ser suficiente para evitar a ocorrência de fenômenos de corrosão. A rigidez da secção e a resistência dos materiais constituintes devem assegurar a estabilidade do painel para os estados limites de utilização e últimos (Leite, 2004).

A utilização de conectores nos painéis sandwich permite assim o aumento da resistência ao corte e garante um comportamento típico de peça única, sem ocorrência de deslocamentos significativos entre os elementos que constituem o painel (Santos, 2010).

Existem diferentes sistemas de painéis sandwich no mercado Americano e Europeu. Estes podem ser divididos mediante o tipo de conectores usados. Os principais tipos de conectores existentes consistem em sistemas de nervuras de betão, elementos de aço ou a combinação destes dois (painel composto) (Einea et al., 1994).

A Figura 25 apresenta alguns exemplos de painéis sandwich com os diferentes tipos de sistema de conectores.

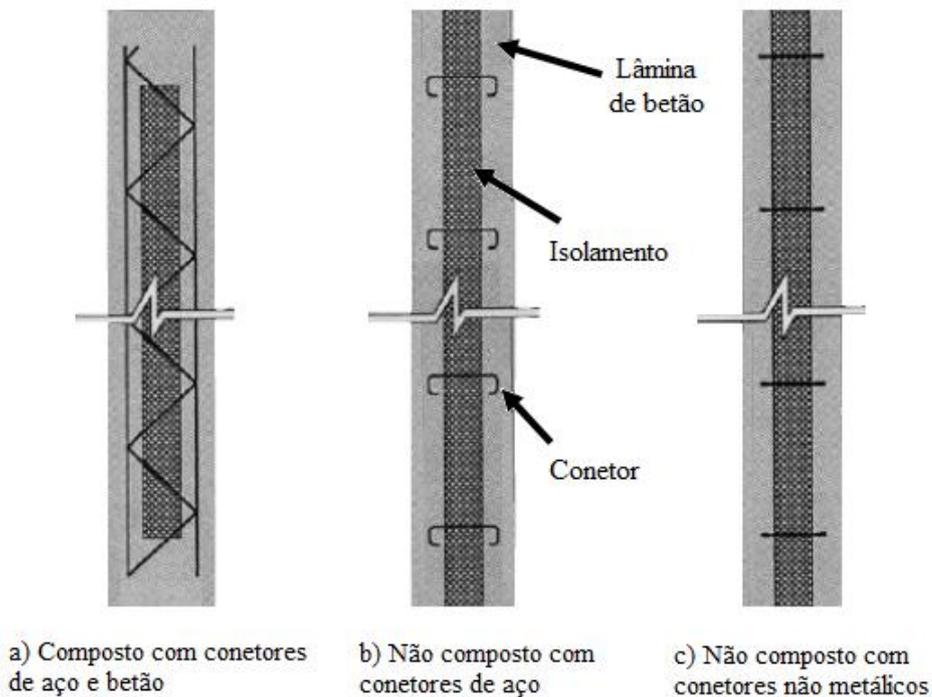


Figura 25 – Exemplos de diferentes sistemas de painéis sandwich (adaptado de: Einea et al., 1994).

O sistema com conectores de aço e betão reduz significativamente a eficiência térmica do painel. Assim, de forma a manter uma eficiência a nível estrutural e a nível térmico, têm sido propostos conectores de matriz polimérica reforçada com fibras contínuas - FRP (Fiber Reinforced Polymer) (Einea et al, 1994).

A eficiência dos painéis com conectores de FRP, quando comparados com painéis com conectores de aço, para as mesmas condições climáticas, apresentam valores de cerca de 13% e 30%, para a resistência superior a picos de calor e de frio, respetivamente (Einea et al., 1994).

Estes conectores podem ser produzidos através de diversas técnicas, tais como: o “bordado” (*embroidery*); a pregagem (*z-pinning*); e através de técnicas têxteis como a tecelagem (*weaving*), o entrelaçado (*braiding*), a costura (*stitching*) e a malha (*knitting*). Originando assim diferentes configurações de conectores de FRP.

2.6.1. Ligação entre Painéis Sandwich

Cada projeto requer atenção especial para a conceção e pormenorização das ligações entre painéis, de modo a obter uma solução com uma boa resistência estrutural, esteticamente agradável e mais económica.

Uma vez que os painéis são elementos pré-fabricados, as suas dimensões são limitadas, sendo, por isso, necessário dispor de métodos que estabeleçam a ligação entre os diferentes painéis. Existem diversas soluções para o efeito, devendo ser adotada aquela que melhor se adequa ao local e à função que o elemento de painel desempenha.

A ligação de painéis dispostos de forma adjacente pode ser feita através de colagem (Figura 26 b)), encaixe (Figura 26 b) e c)), adição de elementos de ligação (Figura 26 d), e) e f)) ou aparafusamento (Figura 26 g)) (Almeida, 2009).

A ligação por colagem terá de ser efetuada com a máxima aderência e é necessário garantir o nivelamento da junta (Figura 26 a)). As ligações por encaixe, devem ser complementadas com o auxílio da colagem (Figura 26 b) e c)). Outra técnica, muito corrente é a adição de elementos auxiliares à ligação, desde chapas laterais a perfis (Figura 26 d), e) e f)). Esta

solução permite a utilização de materiais, nas zonas de ligações, com outras propriedades (térmica, acústica, resistência ao fogo, etc.), como o caso do FRP (Santos, 2010).

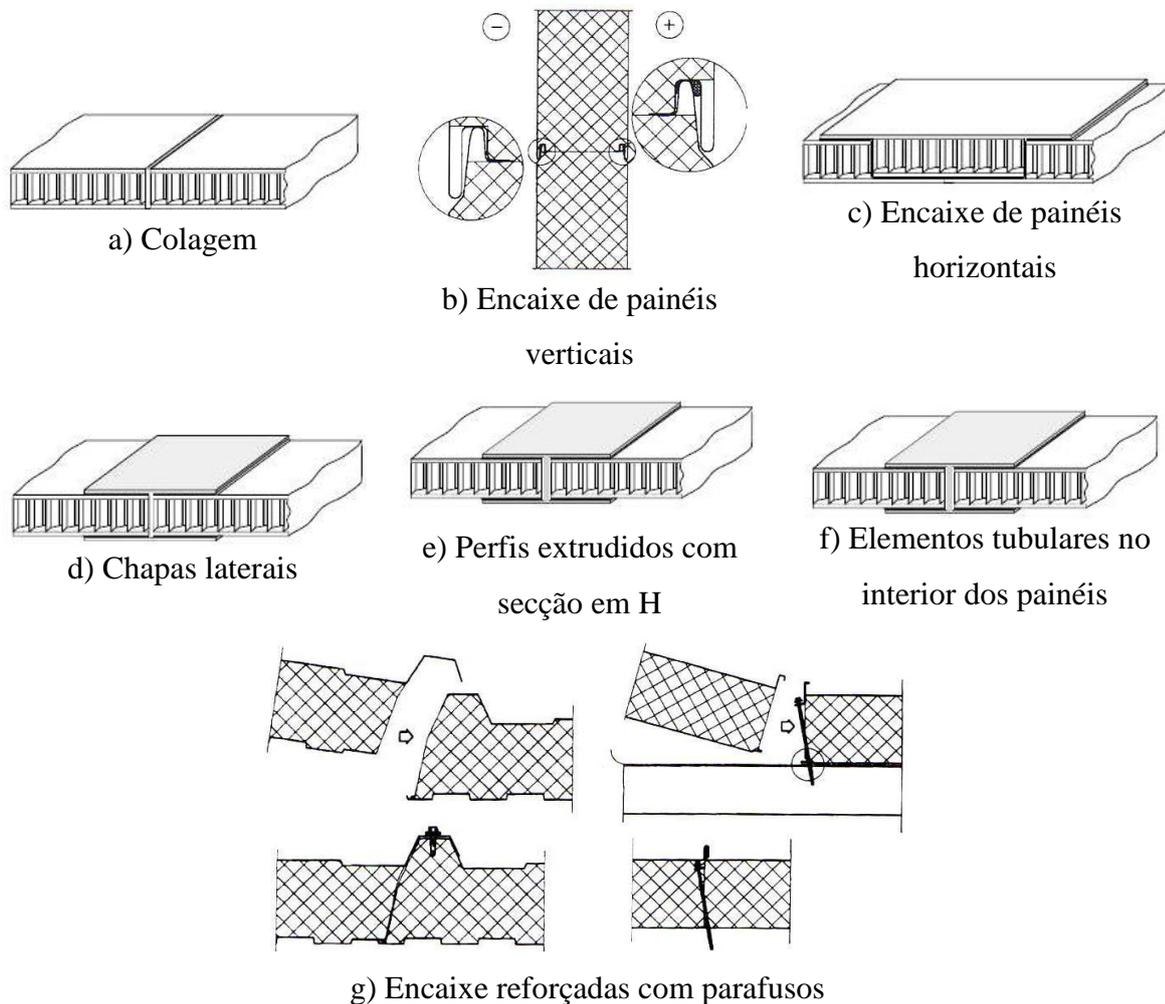


Figura 26 – Ligações entre painéis sandwich (adaptado de: Almeida, 2009)

Para a ligação de painéis dispostos de forma ortogonal entre si, a Figura 27 apresenta algumas das soluções possíveis para ligações em “L” e em “T”. No primeiro caso a união pode ser feita apenas com simples remates (não assegurando, contudo uma estanquidade perfeita), com elementos extrudidos em “L”, redondos, criando esquinas curvas, ou com formas mais complexas. No caso de ligações em “T”, podem ser unidos também com elementos extrudidos ou através de encaixe (Almeida, 2009).

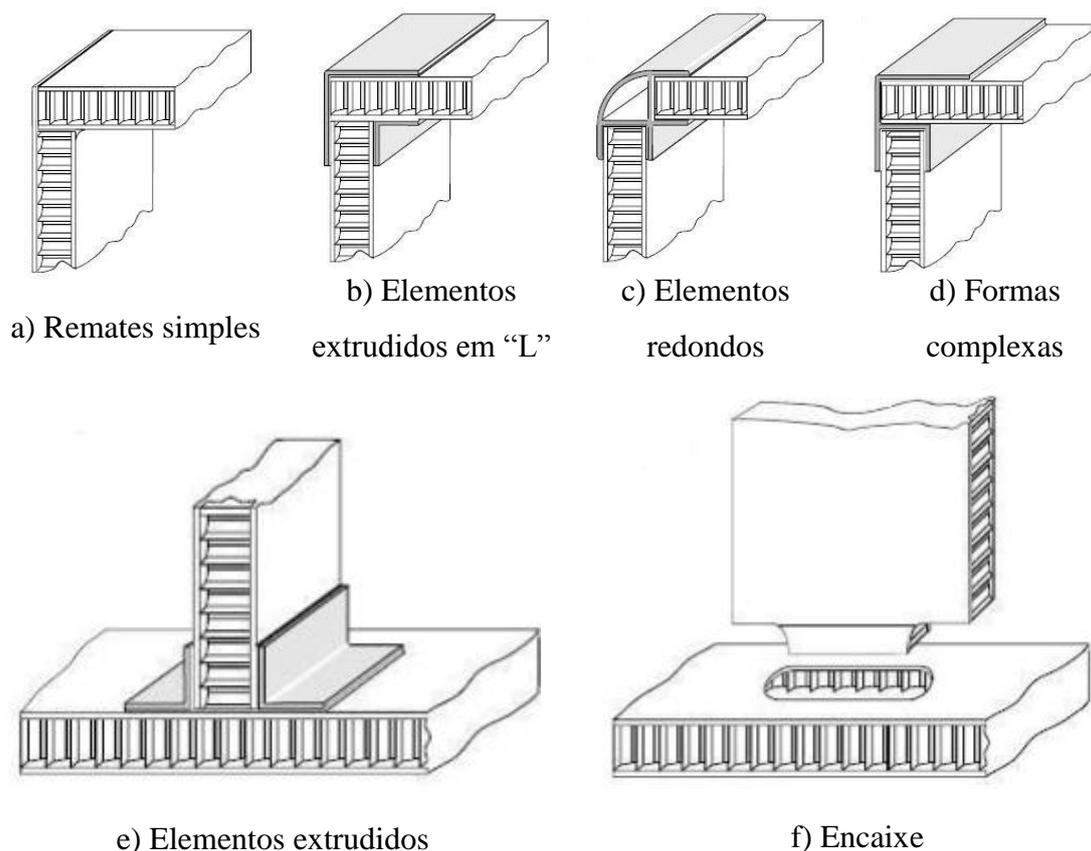


Figura 27 - Ligações de painéis dispostos em “L” e dispostos em “T” (adaptado de Almeida, 2009)

2.7. Betão Auto-Compactável Revestido a Fibras de Aço

O betão auto-compactável (BAC) pode definir-se como um betão capaz de fluir quando colocado num molde, que sobre o efeito do seu peso próprio vai escoando de uma forma natural entre as armaduras, envolvendo-as e preenchendo o respetivo molde.

Com este tipo de betão, é obtida a consolidação desejada sem recorrer a qualquer tipo de equipamento de vibração, evitando, à partida, os fenómenos de segregação que podem ocorrer durante a sua aplicação (Barros et al., 2005). Com a necessidade de vibração eliminada, é possível reduzir o ruído inerente a este processo, bem como a mão-de-obra e o tempo consumido neste processo (Gonçalves et al., 2008).

O desenvolvimento de betões com propriedades de auto-compactabilidade começou a dar os primeiros passos na Universidade de Tóquio, no Japão, em 1986. No entanto, a primeira aplicação do protótipo realizou-se em 1988 (Okamura et al., 1999).

Desde então, observa-se um esforço por parte dos investigadores no desenvolvimento, melhoria e aproveitamento das propriedades deste tipo de betões. Devido às suas propriedades de auto-compactação, o BAC tem sofrido ao longo dos tempos melhorias significativas. No seu estado fresco é necessário que este apresente três propriedades fundamentais: fluidez, viscosidade e coesão. A fluidez elevada permite que o BAC tenha aptidão para fluir dentro da cofragem, preenchendo-a na totalidade apenas sob o efeito do seu peso próprio. O BAC tem capacidade para fluir entre as armaduras (ver Figura 28) e quaisquer outros obstáculos, tais como estreitamentos de secções, orifícios, etc. A viscosidade e coesão que apresenta permitem a estabilidade necessária para evitar a segregação dos seus componentes, garantindo uma deformabilidade uniforme dos inertes no processo de colocação (Barros et al, 2005).



Figura 28 - Aplicação de betão auto-compactável

Com a adição de fibras à sua composição, é possível obter um BAC com ductilidade elevada depois de endurecido. Trata-se de um desafio suplementar dado que, para que se assegurem os requisitos de auto-compactabilidade, o efeito das fibras na perturbação do fluxo do BAC no estado fluido tem que ser tido em conta na conceção das misturas, elevando a complexidade desta tarefa. Da conjugação das vantagens do betão auto-compactável com as que advêm da adição de fibras a materiais de matriz cimentícia, obtêm-se um composto designado betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) (Barros et al, 2006).

Na Figura 29 é possível observar um provete de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço.



Figura 29 - Betão Reforçado com Fibras de Aço (BRFA)

Assim, o BACRFA permite a total ou parcial substituição de armaduras em certos elementos de betão, proporcionando algumas vantagens, nomeadamente, económicas (provenientes da eliminação da mão-de-obra de montagem e colocação de armaduras) e técnicas (homogeneidade do reforço, aumento de ductilidade, maior durabilidade e resistência ao choque, e melhoria do comportamento do betão quando fendilhado) (Barros et al., 2010).

2.8. Métodos de Previsão do Comportamento Térmico e Acústico

2.8.1. Métodos de Previsão do Comportamento Acústico

O isolamento sonoro a sons aéreos e a sons de percussão depende da inércia e das características elásticas (rigidez e amortecimento interno) dos elementos definidores da compartimentação considerada, existindo diversas modelações para a sua caracterização, algumas delas implementadas em sistemas de cálculo automático (Silva, 2009).

A avaliação do isolamento sonoro a sons aéreos, assim como acontece para os sons de percussão, pode ser realizada segundo dois métodos: metodologia de caracterização experimental; modelos simplificados de previsão de isolamento sonoro.

2.8.1.1. Caraterização Experimental

Na avaliação do isolamento acústico a sons aéreos através de métodos de medição ou análise experimental é possível recorrer a três tipos de métodos distintos: o método de caraterização experimental, que se baseia na normalização da Organização Internacional de Standardização (ISO - International Organization for Standardization) ou da Comissão Europeia de Standardização (CEN - European Committee for Standardization) - método ISO/CEN; o método da holografia acústica; o método de intensimetria sonora (Patrício, 1999).

Os métodos da holografia acústica e da intensimetria sonora não são normalmente aplicados na avaliação do isolamento acústico e exigem condições de ensaio muito específicas, nomeadamente, câmaras anecoicas (paredes, teto e pavimento com coeficiente de absorção¹ próximo de 1), semi-anecoicas (pavimento refletor e teto e paredes com coeficiente de absorção próximo de 1) ou em campo aberto no exterior, de forma a restringir o campo sonoro refletido (Mateus, 2008).

O método de caraterização experimental (método ISO/CEN) permite a caraterização do isolamento a sons aéreos de acordo com os procedimentos indicados nas normas ISO 140-3:1995 (ISO, 1995), NP EN ISO 140-4:2009 (IPQ, 2009a) e NP EN ISO 140-5:2009 (IPQ, 2009b) aplicáveis a medições em laboratório, entre compartimentos “in situ”, e entre o exterior e o interior dos edifícios (isolamento de fachada e de elementos de fachada), respetivamente.

Com base nestas normas, a caracterização do isolamento é efetuada no domínio da frequência permitindo, no entanto, uma posterior quantificação com um valor único, através do ajustamento das curvas de isolamento (R_w , $D_{nT,w}$ ou $D_{2m,nT,w}$) a uma descrição convencional de referência, de acordo com as técnicas preconizadas na norma EN ISO 717-1:1996 (CEN, 1996a). No caso de fachadas ou elementos de fachada, a caracterização experimental está prevista apenas para medições “in situ”.

¹ Entende-se por coeficiente de absorção, a relação entre a energia sonora absorvida e a energia sonora incidente. Trata-se de uma grandeza cujo valor pode variar entre 0 e 1. Por exemplo uma janela aberta à partida terá um valor de absorção igual a 1, ou seja, toda a energia incidente é absorvida, pelo contrário uma parede de betão apresenta um valor de absorção próximo de zero, ou seja, a maioria da energia sonora é refletida.

2.8.1.2. Modelos Simplificados de Previsão e Isolamento Sonoro

A transmissão sonora entre dois compartimentos é um fenómeno complexo que envolve, geralmente, transmissões diretas (quando existe um elemento de separação comum aos dois compartimentos) e transmissões secundárias (através dos elementos adjacentes ou de espaços laterais).

Mesmo na situação mais simples, onde a propagação se faz essencialmente por via direta, o fenómeno de transmissão envolve um elevado número de fatores, destacando-se entre eles a frequência do som incidente na parede, a massa da parede, o ângulo de incidência das ondas sonoras, a porosidade da parede, a existência de pontos fracos de isolamento, a rigidez do elemento, o amortecimento do elemento e, no caso de elementos múltiplos, o número de painéis, as características de cada um deles e da sua separação (Mateus, 2008; Almeida & Silva, 2011).

Devido a este elevado número de fatores, o estudo do isolamento acústico torna-se complicado. Normalmente o estudo é realizado fazendo variar apenas um número limitado de fatores em jogo, nomeadamente a massa, a rigidez e o amortecimento interno dos elementos de separação (Mateus, 2008).

Surge assim um conjunto de modelos simplificados de previsão do isolamento sonoro, baseados nos seguintes métodos (Dias, 2009):

- Método Elasto-dinâmico (Lei da Massa ou Frequência);
- Método baseado na norma EN 123544:2000 (CEN, 2000);
- Método da Análise Modal;
- Método dos Elementos Finitos (FEM);
- Método de Análise Estatística (SEA).

De seguida apresentam-se algumas considerações gerais relativamente aos diferentes métodos, aprofundando de certa forma o método elasto-dinâmico, uma vez que se trata do método de previsão adotado na presente dissertação.

A metodologia baseada nas normas EN 12354:2000 especifica métodos de cálculo no âmbito da acústica de edifícios. Esta encontra-se subdividida em seis partes, sendo que a EN 12354-1:2000 (CEN, 2000a) corresponde ao isolamento a sons aéreos entre compartimentos e a EN 12354-3:2000 (CEN, 2000c) ao isolamento a sons aéreos das paredes fachada. Esta norma foi concebida com o intuito de serem usados resultados de medições realizadas em laboratório como dados iniciais, sendo também possível obter esses dados iniciais a partir da formulação teórica descrita nos Anexos da norma, bem como através de estimativas empíricas ou medições “in situ” (Dias, 2009).

O método de análise modal é utilizado essencialmente no estudo de problemas relacionados com a vibração de um qualquer sistema estrutural. Permite estimar determinados parâmetros modais, tais como a frequência natural, o fator de amortecimento e a configuração modal de um dado elemento quando submetido a uma excitação de natureza pontual ou distribuída, no caso de sons de percussão ou sons aéreos, respetivamente (Dias, 2009).

O método dos elementos finitos (FEM) aplica-se no estudo da propagação de vibrações através de uma determinada malha. Este método tem a grande vantagem de permitir definir a complexidade das condições de fronteira dos sistemas e o seu elevado número de graus de liberdade, não se restringindo apenas às geometrias mais simples. Este método consiste na resolução de um conjunto de equações diferenciais parciais através da subdivisão do sistema estrutural em elementos de dimensões finitas, constituindo uma malha, podendo ser utilizado na previsão da transmissão sonora a sons de condução aérea ou de percussão. O número de elementos finitos a considerar depende da frequência, pois a dimensão mínima de cada um destes elementos não deve ser consideravelmente inferior ao comprimento de onda, assim, para altas frequências é necessário definir elementos com uma dimensão muito reduzida (Dias, 2009).

O método da análise estatística (SEA) consiste na estimativa de níveis sonoros, em diversos pontos de um edifício, resultantes da ação mecânica de choque sobre um elemento ou da excitação de um compartimento por um campo sonoro de condução aérea, assumindo que as propriedades do sistema em vibração são retiradas de uma distribuição aleatória. Apresenta a grande vantagem de não necessitar de grande informação relativamente às propriedades dos materiais e suas dimensões (Dias, 2009).

O método elasto-dinâmico tem origem conceptual num modelo inercial, integrando o efeito de rigidez (fundamentalmente de flexão) e o amortecimento interno.

Considerando um hipotético elemento com rigidez nula, o seu nível de isolamento sonoro para uma determinada frequência está diretamente relacionado com a massa do elemento, esta relação é denominada de Lei da Massa. Ao acréscimo do índice de redução sonora de 6dB/oitava, por duplicação da massa e para uma determinada frequência, intitula-se de Lei da Massa Teórica. No entanto, em termos práticos verifica-se que em média o aumento é de cerca de 4dB/oitava – Lei da Massa Experimental. Por outro lado, para uma determinada massa, o índice de redução sonora é tanto maior quanto maior for a frequência do som incidente, denominando-se este fenómeno de Lei da Frequência. Para uma parede simples com uma determinada massa, quando a frequência duplica, o índice de redução sonora aumenta 6dB/oitava – Lei da Frequência Teórica. Na prática, verifica-se que o aumento é em média de cerca de 4dB/oitava, traduzindo-se assim na Lei da Frequência Experimental.

Baseado na Lei da Massa, o método elasto-dinâmico trata-se de um método de cálculo do isolamento sonoro bastante simplificado, uma vez que, apenas se aplica a elementos simples e não contabiliza os fenómenos de ressonância e coincidência responsáveis por quebras significativas no isolamento sonoro do elemento de compartimentação. Assim, tendo em conta estas limitações, surgem modelos e métodos, tais como o método gráfico e modelo misto, capazes de corrigir estas limitações e aproximar mais este método da realidade.

O método gráfico permite a previsão de um valor global do isolamento a sons aéreos de um elemento construtivo em função da sua massa superficial, baseia-se na Lei Teórica da Massa e estabelece uma clara distinção entre divisórias simples e divisórias duplas.

Recorrendo ao gráfico da Figura 30, para divisórias simples é possível obter o valor do índice de redução sonora ponderado, R_w , em função da respetiva massa superficial do elemento, no entanto, a utilização deste gráfico deve ser dirigida a elementos com massa por unidade de superfície razoavelmente elevada, não sendo pois válido para envidraçados (Bragança & Silva, 2000; Almeida & Silva, 2011).

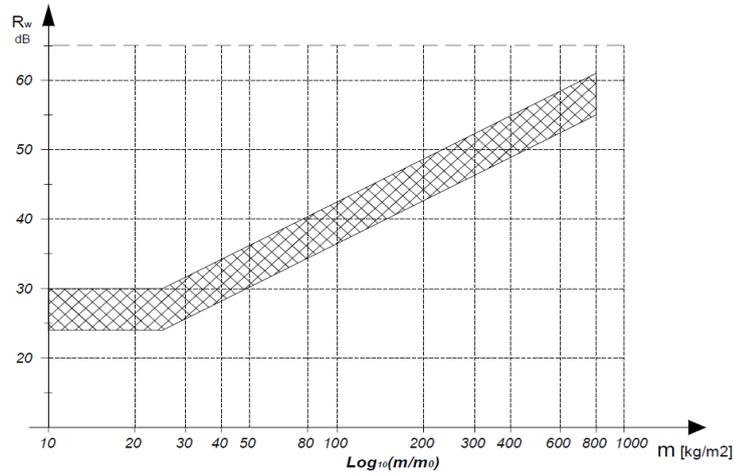


Figura 30 - Redução da transmissão sonora de elementos de compartimentação homogéneos, simples, em função da sua massa superficial (Mateus, 2008)

O intervalo de valores indicados no gráfico pretende representar a dispersão normal de comportamento para diferentes divisórias com a mesma massa por unidade de superfície.

Esta metodologia gráfica pode ser traduzida através de expressões analíticas. Assim sendo, o valor do índice de redução sonora ponderado, R_w , de uma divisória simples pode ser obtido pelas equações (1) e (2).

$$R_w = 27 \pm 3,15 \rightarrow \text{Se } m < 25 \text{ kg/m}^2 \quad (1)$$

$$R_w = 20,4 \times \log(m) - 1,5 \pm 3,15 \rightarrow \text{Se } m \geq 25 \text{ kg/m}^2 \quad (2)$$

No entanto, é sempre necessário verificar a contribuição da transmissão marginal, mediante o valor obtido de R_w esta poderá ser desprezável ou não.

Na estimativa do isolamento sonoro destes sistemas simples com o acréscimo de um novo pano com espessura igual ou diferente, pode-se recorrer ao ábaco da Figura 31, onde através do valor da massa do pano adicional é possível estimar o acréscimo do valor de isolamento sonoro, relativamente ao valor calculado para o sistema simples.

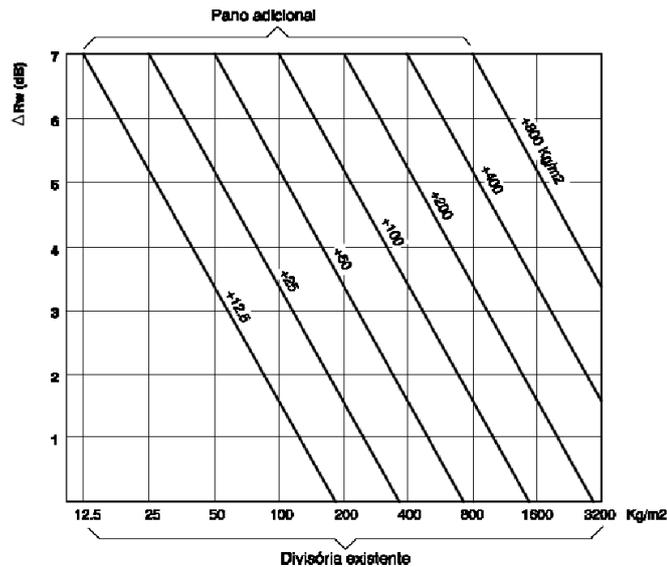


Figura 31 - Ábaco para determinação do acréscimo de isolamento sonoro por acréscimo de novo pano de divisória (Almeida & Silva, 2011)

Pela interpretação do ábaco, verifica-se que, quando se duplica a massa da divisória, o acréscimo é de 7dB, no entanto, devido a questões de ordem pragmática e com base na experiência prática adquirida ao longo dos anos é aconselhável considerar, no máximo, o valor de 5dB (Almeida & Silva, 2011).

Contudo, os modelos referidos anteriormente apenas são válidos se a rigidez do elemento e os fenómenos de amortecimento forem desprezados. Consequentemente, cada um deles terá um modo de vibração e uma frequência de ressonância que provoca quebras no isolamento acústico impedindo, deste modo, que se estabeleçam relações diretas entre a massa e o isolamento sonoro, para uma determinada frequência do som, bem como entre a frequência do som e o isolamento, para um determinado elemento de separação (Almeida & Silva, 2011).

Por outro lado, verifica-se que as ondas sonoras quando incidem no elemento separador com um ângulo θ tal que a projeção do comprimento de onda do som coincida com o modo de vibração dessa parede, as oscilações da parede são amplificadas, sendo que a transmissão sonora irá fazer-se quase sem atenuação, fenómeno esse que surge a frequências mais elevadas e é intitulado de efeito de coincidência. Este fenómeno encontra-se ilustrado de forma esquemática na Figura 32. À frequência mais baixa a que este fenómeno ocorre, denomina-se de frequência crítica.

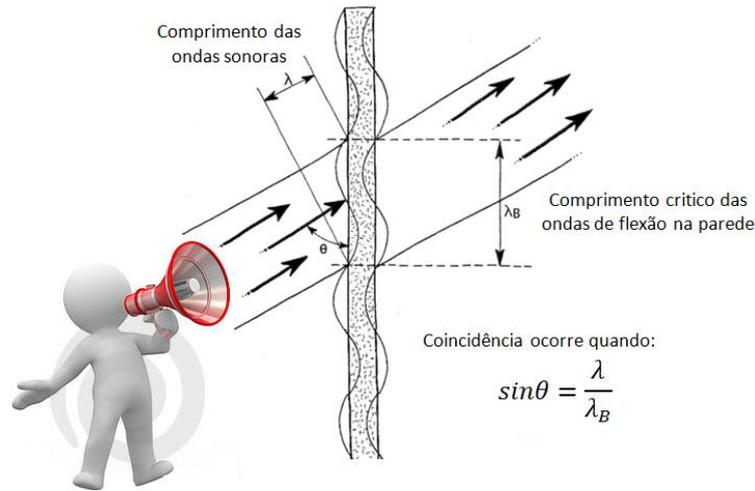


Figura 32 – Representação esquemática do efeito de coincidência (adaptado de: Almeida & Silva, 2011)

Considerando todos os efeitos que não validam a verificação da Lei da Massa ou Lei da Frequência, em determinadas zonas da frequência do som, a curva apresentada na Figura 33 representa o comportamento real do índice de isolamento sonoro de um elemento de construção.

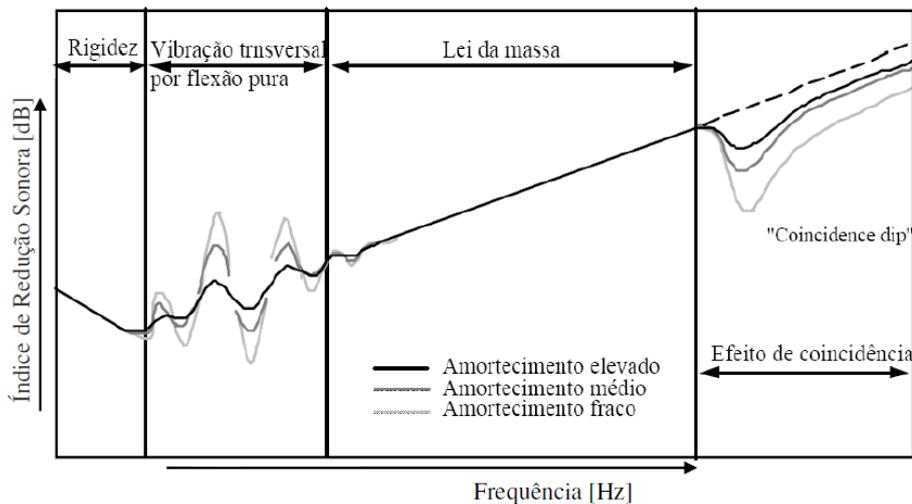


Figura 33 – Efeitos responsáveis pela não verificação da Lei da Massa ou da Frequência (adaptado de: Almeida & Silva, 2011)

Com base na análise experimental e nos modelos inerciais (Lei da Massa e Lei da Frequência), surgem de vários autores modelos simplificados de previsão.

O modelo proposto por Meisser (Meisser, 1973) admite um índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, para uma frequência de 500Hz e para uma massa de 100kg/m² de

40dB. Admitindo igualmente uma lei experimental traduzida por um acréscimo de 4dB por duplicação da massa.

Divergindo ligeiramente dos valores propostos por Meisser, segundo Tadeu e Mateus (Tadeu & Mateus, 2001), a lei experimental da massa para uma frequência de 500Hz, pode ser definidos pelas equações (4) e (5).

$$R=13,3 \times \log(m) + 13,4\text{dB} \text{ com } m < 200 \text{ kg/m}^2 \quad (4)$$

$$R=14,3 \times \log(m) + 11,1\text{dB} \text{ com } m \geq 200 \text{ kg/m}^2 \quad (5)$$

Com a análise experimental, constatou-se que na generalidade o isolamento acústico em elementos duplos é superior ao que se verifica em elementos simples, com a mesma massa superficial total. Esta diferença (Dif) normalmente ronda, os 4dB para caixas-de-ar de 2 a 4cm para panos com massas não muito diferentes, e os 9dB para caixas-de-ar de 5 a 10cm com panos com massas não muito diferentes e com preenchimento da caixa-de-ar com material absorvente. Estes valores de acréscimo de isolamento sonoro, devido à existência de caixas-de-ar encontram-se tabelados no Anexo I.

Assim, as equações da lei experimental da massa propostas por Tadeu e Mateus, anteriormente definidas, tomam a expressão apresentada nas equações (6) e (7).

$$R=13,3 \times \log(m) + 13,4\text{dB} + \text{Dif} \text{ com } m < 200 \text{ kg/m}^2 \quad (6)$$

$$R=14,3 \times \log(m) + 11,1\text{dB} + \text{Dif} \text{ com } m \geq 200 \text{ kg/m}^2 \quad (7)$$

Após a marcação da curva inicial, a partir das leis experimentais da massa e da frequência, proceder-se à correção da mesma, nomeadamente, as quebras nas frequências críticas nos elementos simples e, nos elementos compostos, além destas, as eventuais quebras ocasionadas pelos modos próprios de vibração por flexão transversal do painel, pelas frequências de ressonância do conjunto painéis/caixa-de-ar e pelas frequências de ressonância da caixa-de-ar (Almeida & Silva, 2011).

No Anexo I apresentam-se, de forma resumida, os procedimentos para o traçado da curva de estimativa de isolamento sonoro para os diferentes tipos de elementos, simples e duplos.

2.8.2. Métodos de Previsão do Comportamento Térmico

Define-se conforto térmico como a sensação de bem-estar relativamente à temperatura ambiente, este bem-estar depende de um equilíbrio entre o calor produzido pelo corpo e as perdas de calor do corpo para o meio ambiente. A sensação de conforto térmico depende da conjugação e da influência de diversos fatores, variáveis individuais (assim como o tipo de atividade, o vestuário e a climatização) e variáveis ambientais (temperatura do ar, humidade relativa do ar, temperatura média de radiação das superfícies vizinhas e velocidade do ar). Não se pode afirmar que existam condições de conforto ideais, já que estas são afetadas por diversos aspetos: saúde, idade, atividade, roupas, sexo, etc. (ISO, 2005; Silva, 2009).

Assim, de maneira a obter as condições de conforto térmico adequadas e uma boa eficiência energética, é necessário garantir a qualidade da envolvente, através de isolamento adequado, inércia térmica, ganhos solares, etc., garantido assim que os consumos com a energia para aquecimento e arrefecimento do ambiente interior sejam reduzidos (RCCTE, 2006; Silva, 2009).

Nos edifícios de habitação as trocas de energia térmica ocorrem essencialmente através da envolvente exterior, no entanto a existência de compartimentos interiores com diferentes temperaturas vai originar igualmente trocas de calor dentro da habitação. Tal como ilustra a Figura 34, esta troca de energia térmica pode ocorrer segundo três mecanismos, condução, convecção e radiação.

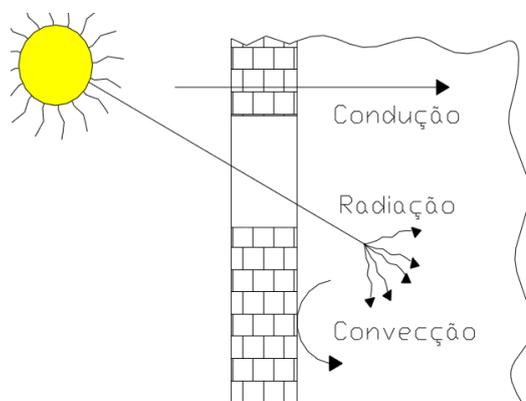


Figura 34 – Mecanismos de transferência térmica em edifícios (Silva, 2006)

De uma maneira geral parte da radiação solar que incide num edifício é refletida, outra absorvida e a restante transmitida. Por sua vez, alguma da energia transmitida flui para o interior da habitação através de fenómenos de condução que, posteriormente, dão origem a mecanismos de convecção superficial (sólido-fluido). Por outro lado, dentro da habitação poder-se-ão gerar fenómenos de convecção entre fluidos, dando, assim, origem aos três mecanismos de transferência de calor (Afonso, 2009).

O estudo do comportamento térmico de um edifício pode ser realizado com base numa análise estática, numa análise dinâmica ou ambas em simultâneo.

O Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE, 2006) consiste num exemplo de análise do comportamento térmico do tipo estático, possibilitando o cálculo das necessidades energéticas do edifício em períodos de aquecimento e arrefecimento. Este obriga a que os projetistas identifiquem medidas concretas no sentido de assegurar as exigências de conforto térmico definidas. Elaborado de modo a poder servir de método de análise para a generalidade dos edifícios, o RCCTE parte de um conjunto de pressupostos que poderão não corresponder à situação de alguns edifícios existentes. No entanto, embora pouco rigorosa, este tipo de análise produz uma boa estimativa das necessidades energéticas apresentadas pelos edifícios (Afonso, 2009).

Contrariamente à análise estática, a dinâmica permite ao utilizador elaborar simulações de grande complexidade com base num elevado número de variáveis, obtendo-se resultados mais próximos da realidade. Esta análise pode ser feita recorrendo a programas como o BLAST, DOE2.1.E, TRACE, ECOTEC e o EnergyPlus.

2.9. Exigências Regulamentares Aplicáveis - Portugal

2.9.1. Comportamento Acústico

Os critérios de desempenho acústico exigidos numa determinada situação devem abranger quer as exigências regulamentares aplicáveis, quer critérios complementares que assegurem as condições de conforto acústico compatíveis com a situação em causa.

A legislação portuguesa relativa às exigências acústicas em edifícios é o Decreto-Lei n.º 96/2008, de 11 de Maio - Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) que regula a vertente do conforto acústico no âmbito do regime da edificação, contribuindo para a melhoria da qualidade do ambiente acústico e para o bem-estar e saúde das populações, em articulação com o regime jurídico relativo ao ruído ambiente (RRAE, 2008). Esta legislação define um conjunto de valores de isolamento sonoro a sons de condução aérea, em função do tipo de edifício e da natureza dos espaços emissor e recetor.

Segundo o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, os edifícios estão sujeitos ao cumprimento dos seguintes requisitos acústicos (RRAE, 2008):

- O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado, $D_{2m,nT,w}$ entre o exterior do edifício e quartos ou zonas de estar dos fogos deve satisfazer o seguinte:

$$D_{2m,nT,w} \geq 28\text{dB (em zonas sensíveis}^2\text{);}$$

$$D_{2m,nT,w} \geq 33\text{dB (em zonas mistas}^3\text{).}$$

- O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado, $D_{nT,w}$ entre compartimentos de um fogo, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar de outro fogo, como locais recetores, deve satisfazer o seguinte:

$$D_{nT,w} \geq 50 \text{ dB}$$

- O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado, $D_{nT,w}$ entre locais de circulação comum de edifícios, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar de outro fogo, como locais recetor, deverá satisfazer o seguinte:

$$D_{nT,w} \geq 48 \text{ dB}$$

$D_{nT,w} \geq 40 \text{ dB}$, se o local emissor for um caminho de circulação vertical, quando o edifício seja servido por ascensores;

$D_{nT,w} \geq 50 \text{ dB}$, se o local emissor for uma garagem de estacionamento automóvel;

² Entende-se por zona sensível, a área definida em plano municipal de ordenamento do território como vocacionada para uso habitacional, ou para escolas, hospitais ou similares, ou espaços de lazer, existentes ou previstos, podendo conter pequenas unidades de comércio e de serviços destinadas a servir a população local, tais como cafés e outros estabelecimentos de restauração, papelarias e outros estabelecimentos de comércio tradicional, sem funcionamento no período noturno (das 23 às 7 horas) (RGR, 2007).

³ Entende-se por zona mista, a área definida em plano municipal de ordenamento do território, cuja ocupação seja afeta a outros usos, existentes ou previstos, para além dos referidos na definição de zona sensível (RGR, 2007).

- O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado, $D_{nT,w}$, entre locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais recetores, deve satisfazer o seguinte:

$$D_{nT,w} \geq 58 \text{ dB}$$

2.9.2. Comportamento Térmico

A regulamentação Portuguesa no domínio do conforto térmico nos edifícios foi publicada pela primeira vez em 1990 e atualizada em 2006 pelo RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (Decreto-Lei, nº 80/2006) (Silva, 2009). Este regulamento é aplicável a (RCCTE, 2006):

- Edifícios de habitação;
- Grandes intervenções de remodelação ou de alteração na envolvente⁴ ou nas instalações de preparação de águas quentes sanitárias das duas tipologias de edifícios referidas anteriormente;
- 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;
- Ampliações de edifícios existentes, das duas tipologias atrás referidas.

O requisito mínimo de qualidade térmica definida em Portugal pelo RCCTE é apresentado sobre domínio do coeficiente de transmissão térmica (U). Sendo o 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 (RCCTE, 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. Ainda no domínio da temperatura este regulamento divide o país em três zonas climáticas de inverno (I1, I2 e I3) e três zonas climáticas de verão (V1, V2 e V3).

⁴ 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 por metro quadrado.

Os requisitos mínimos de qualidade térmica para a envolvente dos edifícios, definidos pelo RCCTE são os seguintes (RCCTE, 2006):

- Coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis: nenhum elemento da envolvente de qualquer edifício pode ter um coeficiente de transmissão térmica em zona corrente (U) superior ao valor correspondente no Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) (adaptado de: RCCTE, 2006)

Elementos da envolvente	Zona Climática (*)		
	I1	I2	I3
Elementos exteriores em zona corrente (*)			
Zonas opacas verticais	1,80	1,60	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 II do RCCTE

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

(***) Para outras zonas anexas não úteis

- Zonas não correntes da envolvente: nenhuma zona de qualquer elemento opaco da envolvente, incluindo as zonas de ponte térmica plana, nomeadamente pilares, vigas, caixas de estore, pode ter valor de U, calculado de forma unidimensional na direção normal à envolvente, superior ao dobro do dos elementos homólogos (verticais ou horizontais) em zona corrente, respeitando sempre, no entanto, os valores máximos indicados no Tabela 3.
- Fator solar máximo admissível: nenhum vão envidraçado da envolvente de qualquer edifício com área total superior a 5% da área útil de pavimento do espaço que serve, desde que não orientado a norte (entre noroeste e nordeste), pode apresentar um fator solar correspondente ao vão envidraçado com o(s) respetivo(s) dispositivo(s) de proteção 100% ativo(s) que exceda os valores indicados no Tabela 4.

Tabela 4 – Fatores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados com mais de 5% da área útil do espaço que servem (adaptado de: RCCTE, 2006)

Classe de inércia térmica	Zona climática		
	V1	V2	V3
Fraca	0,15	0,15	0,1
Média	0,56	0,56	0,5
Forte	0,56	0,56	0,5

O regulamento apresenta ainda valores de referência para o coeficiente de transmissão térmica, apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Coeficientes de transmissão térmica de referência em elementos opacos ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) (adaptado de: RCCTE, 2006)

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	3,30	3,30	4,30

(*) Ver anexo II do RCCTE.

(**) Regiões Autónomas da Madeira e Açores, apenas para edifícios na zona I₁.

(***) Para outras zonas anexas não úteis.

3. METODOLOGIA

A seleção da solução construtiva correta para uma determinada situação assume grande relevância uma vez que, a tranquilidade e o bem-estar dos utilizadores está em causa. A escolha do método de previsão do isolamento a sons aéreos mais adequado para cada situação assume-se como de grande importância, permitindo o uso correto dos materiais e a escolha da melhor solução construtiva, em função das exigências funcionais do elemento construtivo e de acordo com a legislação em vigor (Bragança & Silva, 2000).

O objetivo de estudo neste capítulo, é a descrição dos métodos e metodologias usados na previsão do isolamento sonoro a sons de condução aérea e na previsão do comportamento térmico da habitação modular de custos controlados. É também realizada uma descrição do edifício e dos componentes e elementos que o constituem.

3.1. Descrição do Edifício

Como anteriormente referido, o conceito da habitação modular de custos controlados é especialmente vocacionado para países com fraco poder sócio/económico, no entanto de forma a comparar os valores obtidos do comportamento térmico e acústico com a legislação portuguesa, a localização usada para o estudo foi a cidade do Porto.

A casa modular destina-se a uso unifamiliar e apresenta uma tipologia T3, apresentando cerca de 82,4 m² de área útil.

Na Figura 35, apresenta-se a planta de arquitetura desta moradia unifamiliar. A moradia no seu interior é composta por três quartos, uma instalação sanitária, uma cozinha e uma sala comum.



Figura 35 - Planta de arquitetura

A Habitação modular é formada estruturalmente por painéis sandwich, constituídos por duas camadas externas de betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço (BACRFA) separadas por uma camada de material isolante (EPS) e ligadas através de conectores (FRP).

A composição do BACRFA que constitui os painéis de sandwich encontra-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição adotada para o BACRFA (por m³ de betão)

CEM 42,5R [kg]	Água [kg]	Super Plastificante [kg]	Filler Calcário [kg]	Areia fina [kg]	1/2 Areia [kg]	Brita [kg]	Fibras de Aço [kg]
413,00	148,00	7,83	35,00	233,00	700,00	582,00	60,00

Os painéis ficam ligados à fundação a partir de selagem em betão e, a partir de ferrolhos, à cobertura, as ligações preconizadas ao longo da altura são por simples encosto, tendo em vista minorar custos.

A casa modular é formada por um total de dez painéis. Estes painéis podem conter ou não aberturas, que darão origem a portas e janelas e ter secção transversal diferente ao longo da sua altura.

Na Figura 36 estão apresentados e identificados todos os painéis que formam a habitação modular.

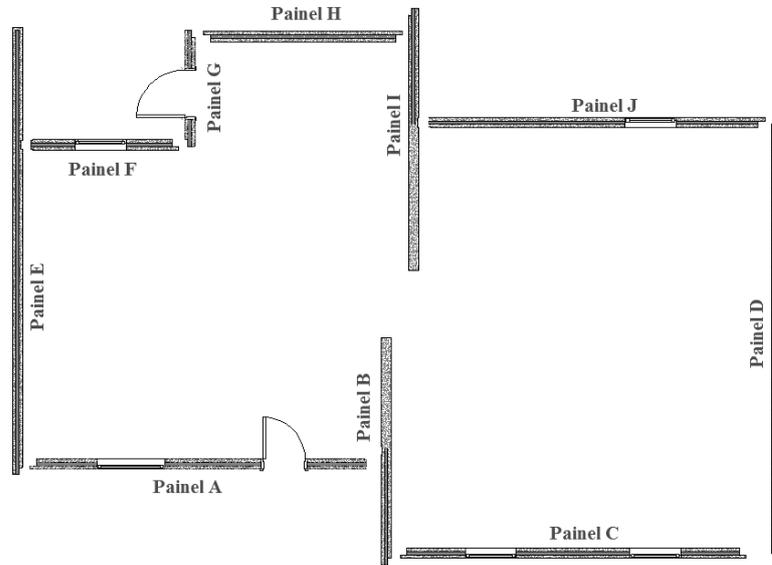


Figura 36 – Representação e identificação dos painéis em planta

A Figura 37 permite visualizar as diferentes secções e disposições dos painéis da habitação modular. De referir que no painel I e painel B a secção do painel que se encontra no interior da habitação é na sua totalidade constituída por betão com fibras e de espessura 180mm.

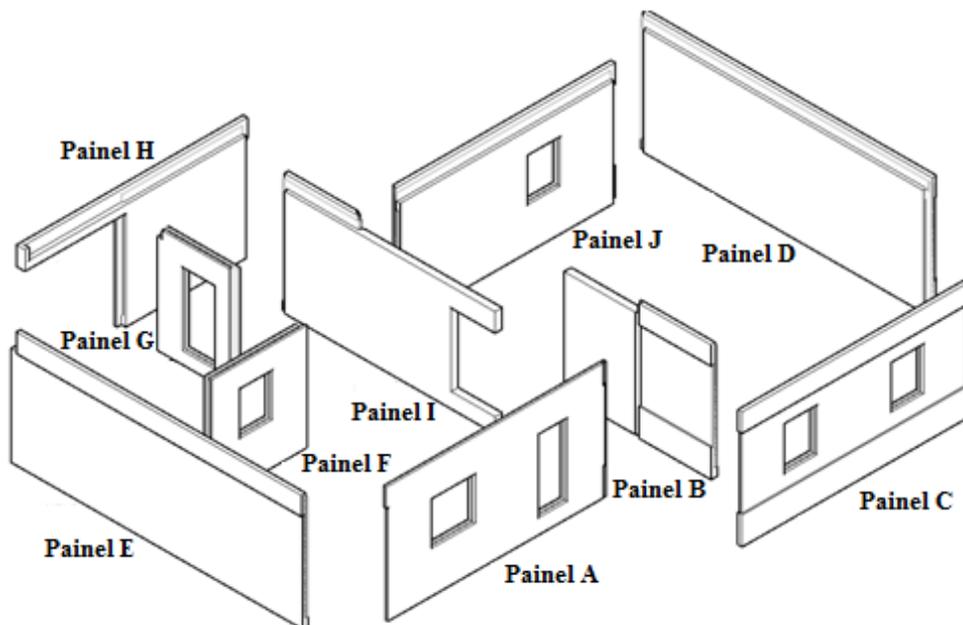


Figura 37 – Esquema 3D dos diferentes painéis

A secção tipo dos painéis sandwich que constituem os elementos de fachada é composta por duas camadas de 60mm de BACRFA separadas por uma camada de EPS com 60mm. No entanto, em certos painéis as secções podem variar, nomeadamente, na base e topo do painel.

No topo do painel existiram duas camadas de BACRFA com 100mm e 90mm, separadas por uma camada de EPS de 30mm. Na base do painel duas camadas de BACRFA com 100mm e 60mm, separadas por uma camada de EPS de 60mm.

Os pormenores construtivos, das diferentes secções dos painéis, encontram-se representados na Figura 38.

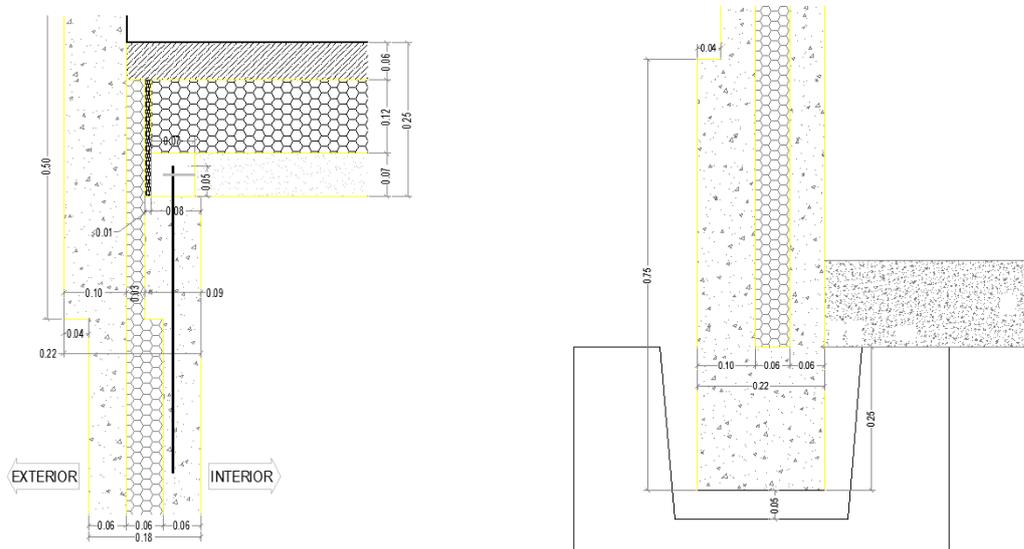


Figura 38 – Cortes verticais com pormenores da secção da base (à direita) e topo (à esquerda) dos painéis

O coeficiente de transmissão térmica, U , dos diferentes painéis sandwich é obtido através da equação (8).

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

Sendo:

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

R_{se} → Resistência térmica superficial interna ($m^2 \cdot ^\circ C/W$);

λ → Condutibilidade térmica ($W/m \cdot ^\circ C$);

L → Espessura da camada (m).

Os valores da resistência térmica superficial externa e a resistência térmica superficial interna foram obtidos recorrendo ao quadro VII.1 do Anexo VII do RCCTE. O valor da condutibilidade térmica, λ , dos materiais foi obtido segundo o ITE50 (ITE50, 2006).

Tendo em conta a diferente secção em altura ao longo do painel, o valor do coeficiente de transmissão térmica foi obtido através de uma média ponderada em função da área das diferentes secções. Os resultados encontram-se apresentados na Figura 39.

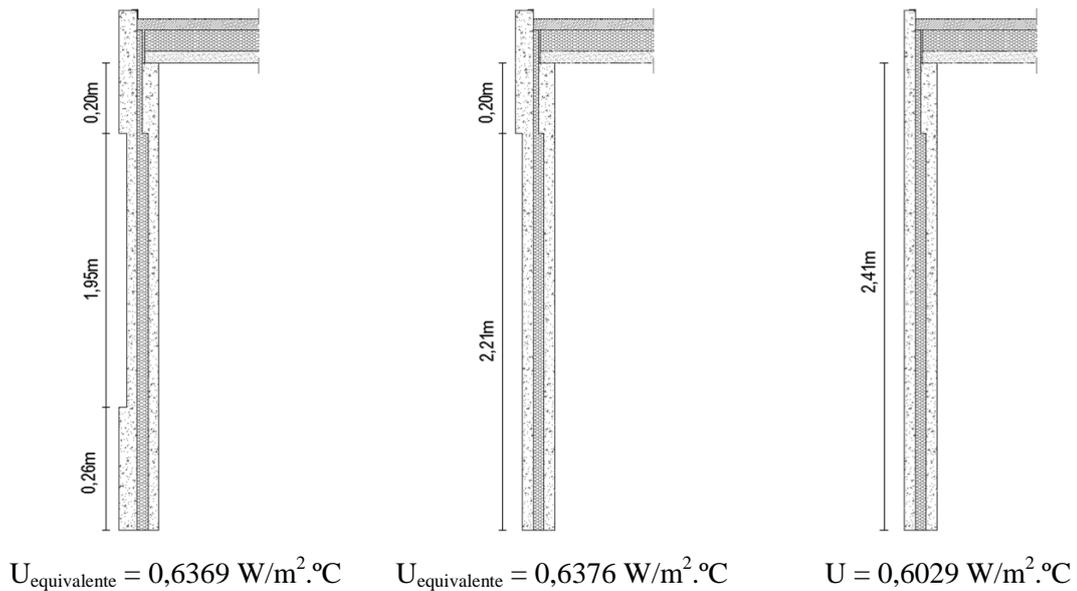


Figura 39 – Coeficiente de transmissão térmica, U , dos diferentes painéis sandwich

A Figura 40 apresenta o pormenor da ligação dos painéis à fundação, encontrando-se também representado a laje térrea betonada “in situ” com 150mm de espessura.

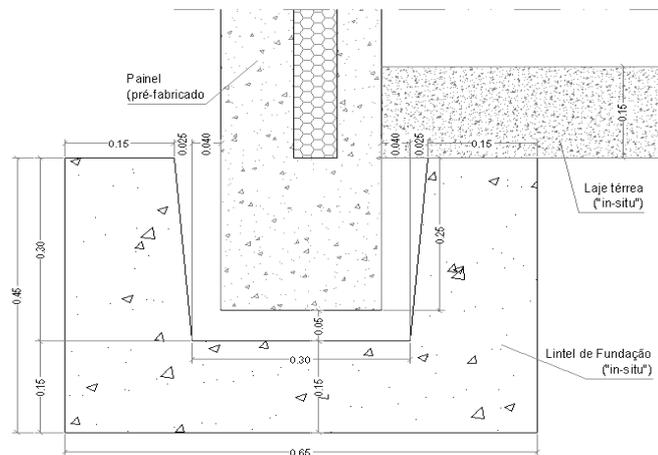


Figura 40 – Corte vertical com pormenor de ligação dos painéis à fundação

A colocação dos perfis de FRP está posicionada tendo em vista que o afastamento entre perfis verticais não ultrapasse largamente os 1,5m. Em torno das aberturas dos painéis também se verifica a existência de perfis.

Na Figura 43 encontra-se representado o esquema de colocação dos perfis de FRP em alguns dos painéis que constituem a habitação modular, nomeadamente os alçados frontais do painel F (à esquerda) e painel J (à direita).

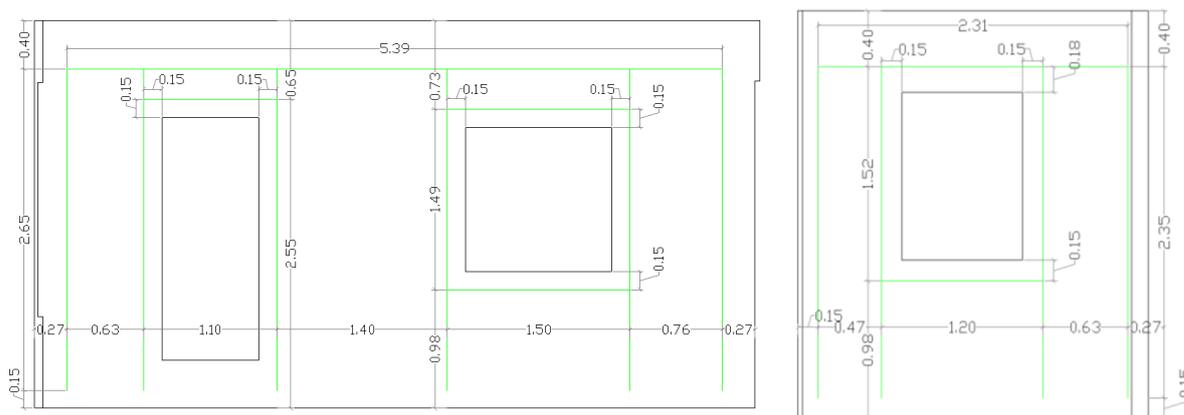


Figura 43 – Esquema de colocação dos perfis de FRP.

Na Tabela 7 apresentam-se os valores das características dos materiais, que constituem os elementos construtivos da habitação modular, necessárias ao estudo do comportamento acústico e térmico. Os valores da massa volúmica e dos coeficientes de condutibilidade térmica foram obtidos recorrendo ao ITE50 (ITE50, 2006), os valores do calor específico foram retirados do livro “Fundamentals of Heat and Mass Transfer” (Incropera et al, 2007).

Tabela 7 – Características dos materiais dos elementos construtivos

Material	Massa Volúmica (kg/m ³)	Condutibilidade Térmica, λ (W/m×°C)	Calor Específico, cp (J/kg×°C)
Betão armado	2500	2,5	880
Betão normal (BACRFA)	2400	2,0	880
Poliestireno Expandido - EPS	14	0,042	-
Lã de Rocha	35 -100	0,04	-
Gesso Cartonado	1000	0,4	-
Contraplacado (Portas)	600	0,15	-

No que diz respeito aos vãos envidraçados, foi adotado uma solução de envidraçado presente no mercado, ou seja, serão envidraçados duplos de 4mm + 4mm com caixa-de-ar de 10mm. O coeficiente de transmissão térmica será igual a $3,0\text{W/m}^2\cdot\text{°C}$ e o fator solar igual a 0,75 (Vidromax, 2012).

3.2. Programas e Metodologia Simplificada

No estudo da previsão do comportamento acústico e térmico. Existe vários programas possíveis de utilizar. Na presente dissertação foram usados os programas Acoubat, EnergyPlus e Therm. As características de cada um destes programas serão descritas de seguida de uma forma resumida, assim como a metodologia aplicada ao estudo da previsão do comportamento acústico.

3.2.1. Previsão do desempenho Acústico

3.2.1.1. Acoubat Sound

Utilizado para efeitos de previsão acústica, o programa Acoubat Sound foi desenvolvido pelo Centre Scientifique e Technique du Bâtiment (CSTB) localizado em França. Este modelo permite efetuar o cálculo do isolamento sonoro no domínio da frequência entre espaços, quer para sons de condução aérea, quer para sons de percussão, em conformidade com o disposto na EN 12354-1:2000 (CEN, 2000a) e EN 12354-2:2000 (CEN, 2000b), respetivamente.

O Acoubat Sound permite verificar os critérios exigidos pelo Regulamento Geral do Ruído (RGR, 2007), modelar e calcular as situações reais de transmissão sonora em edifícios, quer para sons de condução aérea quer para sons de percussão, em conformidade com o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE, 2008) e com os parâmetros definidos nas normas EN ISO 140 e EN ISO 717 (Silva, 2009).

A previsão do comportamento sonoro de soluções construtivas a sons de condução aérea realiza-se considerando a propagação sonora que ocorre pelas várias vias de transmissão existentes entre os dois compartimentos adjacentes (transmissão direta, transmissão indireta e transmissão lateral). De forma a quantificar a transmissão sonora de uma forma mais real, o Acoubat Sound considera estas três formas de transmissão.

O índice de isolamento sonoro $D_{nT,w}$ e $D_{2m,nT,w}$ correspondente às descrições obtidas no domínio da frequência, é determinado com base na norma EN ISO 717-1:1996 (CEN, 1996a), a influência da transmissão marginal é considerada quantificando os fatores de amortecimento de vibrações, geradas no processo de transmissão de energia sonora entre os compartimentos em análise, para os diferentes tipos de junções que definem a malha de compartimentação.

O índice de isolamento sonoro $L'_{nT,w}$ correspondente às descrições obtidas no domínio da frequência, é determinado com base na norma EN ISO 717-2:1996 (CEN, 1996b).

Na realização do cálculo de estimativa do comportamento acústico, quer a sons aéreos quer de percussão, o modelo recorre a uma base de dados, integrada no mesmo, onde se encontram as características de comportamento acústico, determinadas com base em ensaios realizados em laboratório, de várias soluções de elementos de compartimentação. A estrutura da base de dados permite ainda a inclusão de novos produtos e soluções construtivas (Silva, 2009).

A Figura 44 apresenta um exemplo da base de dados do programa Acoubat Sound, onde é possível identificar a curva de isolamento sonoro para os diferentes elementos de compartimentação.

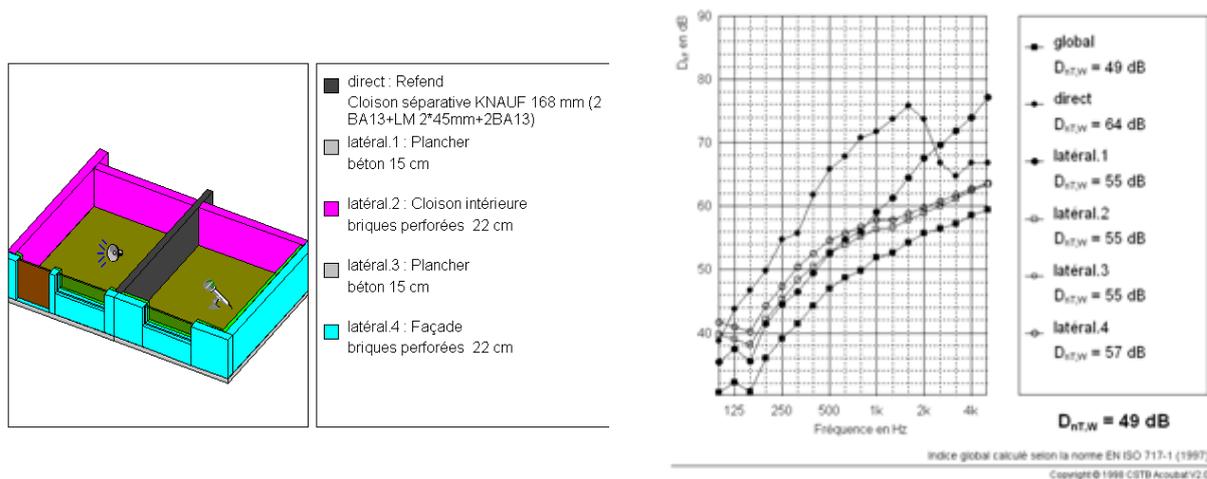


Figura 44 – Exemplo de ficheiro Acoubat com geometria e valores de isolamento sonoro.

3.2.1.2. Metodologia Simplificada

Partindo das equações (4) e (5) propostas por Mateus e Tadeu, que representam a lei experimental da massa para uma frequência de 500Hz, determina-se o índice de atenuação sonora para elementos simples.

Para elementos duplos na generalidade o isolamento acústico é superior ao que se verifica em elementos simples, com a mesma massa superficial. Assim as equações (5) e (6) propostas por Mateus e Tadeu deverão ser corrigidas considerando essa diferença (Dif).

Correções da curva inicial

No traçado da curva de estimativa de isolamento sonoro, partindo da curva inicial proveniente das leis experimentais da massa e frequência, é necessário proceder à correção desta mesma curva. Nomeadamente é necessário representar as quebras nas frequências críticas nos elementos simples e elementos compostos, as quebras provenientes dos modos próprios de vibração por flexão transversal dos painéis e as quebras oriundas da ressonância do conjunto painéis/caixa-de-ar e da ressonância da caixa-de-ar.

Relativamente às quebras pelos modos próprios de vibração por flexão transversal dos painéis, estas normalmente só se fazem sentir significativamente em placas finas, ou seja, em elementos de construção leve. Quando se trata de elementos com espessura e área considerável, as primeiras frequências próprias de vibração, por flexão transversal do painel, situam-se fora da zona audível, logo não afetam significativamente o isolamento acústico.

Os modos próprios de vibração, por flexão transversal do painel, são assim obtidos recorrendo à equação (9) (Tadeu & Mateus, 2001).

$$f_{nm} = \frac{\pi}{2} \times \left(\frac{n^2}{a^2} + \frac{m^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad (9)$$

Sendo:

$a, b \rightarrow$ Comprimento e largura da placa, respetivamente (m);

$n, m \rightarrow$ Número de modos de vibração;

$\rho \rightarrow$ Massa por unidade de volume do material que constitui a placa (kg/m^3);

$h \rightarrow$ Espessura da placa (m);

$D \rightarrow$ Rigidez da placa (N.m)

A rigidez da placa é obtida através da equação (10).

$$D = \frac{h^3 E}{12 \times (1 - \nu^2)} \quad (10)$$

Sendo:

$E \rightarrow$ módulo de Young ou módulo de elasticidade (N/m^2);

$\nu \rightarrow$ Coeficiente de Poisson.

A partir equação (9), verifica-se que o número de modos de vibração podem ser inúmeros, contudo são os primeiros modos de vibração que vão influenciar significativamente o isolamento acústico do elemento. Na Figura 45 encontram-se representados os primeiros modos de vibração, por flexão transversal de um painel.

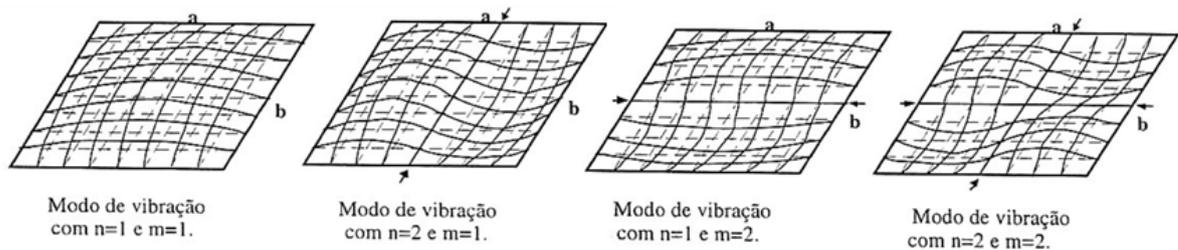


Figura 45 – Modos próprios de vibração, por flexão transversal do painel, que influenciam o isolamento acústico (adaptado de: Mendonça, 2005)

Nos painéis sandwich e por exemplo no caso de duplicação das placas de gesso cartonado, as frequências de vibração pelos modos próprios de vibração transversal por flexão podem ser desprezados, uma vez que não têm influência direta no isolamento acústico. Assim na presente dissertação, como se estudam painéis sandwich a correção pelos modos próprios de vibração por flexão transversal dos painéis não será considerado.

Segue-se a correção devido ao efeito de coincidência. A frequência crítica é a frequência mais baixa a que ocorre o efeito de coincidência, pode ser obtida através de valores tabelados (ver Anexo I) propostos por Meisser (Meisser, 1975), dividindo a frequência crítica pela espessura do elemento, tal como indica a equação (11).

$$f_c = \frac{\text{Frequência Crítica para uma espessura de 1cm de material}}{\text{Espessura do material em cm}} \quad (11)$$

Os valores de quebra de frequência tabelados (Anexo I) aplicam-se a paredes com panos desligados e de igual espessura bem como a paredes simples.

Os revestimentos das paredes de alvenaria ou lajes, normalmente não se consideram no cálculo da frequência crítica, uma vez que apresentam valores de espessura reduzida, conduzindo a valores de frequência crítica fora da zona audível.

Na situação de elementos com materiais não tabelados, a frequência crítica pode ser obtida através da equação (12) proposta por Mateus e Tadeu (Tadeu & Mateus, 2001) ou pela equação (13) mais simplificada sugerida por Meisser (Meisser, 1975).

$$f_c = \frac{c^2}{1,8138 \times h} \times \sqrt{\frac{\rho(1 - \nu^2)}{E}} \quad (12)$$

$$f_c = \frac{c^2}{1,8 \times h} \times \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (13)$$

Sendo:

c → Velocidade de propagação do som (m/s);

h → Espessura do elemento (m);

ρ → Densidade do material (kg/m^3);

ν → Coeficiente de Poisson;

E → Módulo de Young ou módulo de elasticidade (N/m^2).

Se a frequência crítica estiver numa zona próxima das frequências médias da sensibilidade auditiva humana, a queda de isolamento é muito acentuada, sendo assim, sempre que possível, é de evitar quebras nesta zona.

Outra das correções a ter em conta é devido ao fenómeno de **ressonância do conjunto**, que só se aplica a elementos com caixa-de-ar. A frequência de ressonância do conjunto é a frequência para a qual a amplitude de vibração, devido à sua própria natureza, é máxima. A ressonância dá-se quando existe excitação do conjunto de panos que constituem o elemento construtivo, a uma frequência igual a um dos panos, ocorrendo uma grande acumulação de energia vibratória, elevando significativamente a amplitude de vibração geral. Esta frequência de ressonância só deverá ser considerada caso se encontre no intervalo de frequências audíveis, ou seja, entre 100Hz e 3150Hz (NP 2073:1974).

No caso de paredes duplas de alvenaria convencional, a frequência de ressonância, geralmente, encontra-se fora da zona audível. Por outro lado, quando se trata de divisórias leves ou de envidraçados duplos correntes, como se trata de elementos com massa e espessura de caixa-de-ar reduzida, a sua frequência de ressonância vai situar-se dentro da zona audível, apresentando quebras no isolamento na ordem dos 6 a 8dB, não podendo portanto ser desprezadas.

Para elementos duplos a frequência de ressonância do conjunto das massas dos painéis e caixa-de-ar, pode ser obtida através da equação (14).

$$f_{\text{ress}} = 84 \times \sqrt{\frac{1}{d} \times \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (14)$$

Sendo:

d → Espessura da caixa-de-ar (m);

m_1, m_2 → Massa dos panos constituintes da parede (kg/m^2)

Além das quebras provenientes da ressonância do conjunto, nos elementos duplos e triplos, verificam-se outras quebras, nomeadamente, quebras devidas às reflexões múltiplas no

interior da caixa-de-ar. Este fenómeno de ampliação do som é geralmente conhecido como **ressonância da caixa-de-ar**, e é dado pela equação (15).

$$f_1 = \frac{c}{2d}, f_2 = 2 \frac{c}{2d}, \dots, f_n = n \frac{c}{2d} \quad (15)$$

Sendo:

c → velocidade de propagação do som no ar ao nível do mar (340 m/s);

d → espessura da caixa-de-ar (m);

n → número natural (pode tomar valores de 1,2,3,4,...,n).

As quebras de isolamento provenientes destas frequências tendem a atingir maiores valores na primeira frequência e a decrescerem nas seguintes, sendo que a sua amplitude pode variar dependendo sobretudo da absorção do material existente no interior da caixa-de-ar.

No caso de envidraçados correntes, na impossibilidade de colocar qualquer tipo de material absorvente no interior da caixa-de-ar, considera-se quebras próximas dos 3 a 4dB. No que diz respeito a paredes de alvenaria ou outras situações comuns, poderá admitir-se um valor para a primeira quebra na ordem dos 2dB (Almeida & Silva, 2011).

Traçado da curva de Estimativa de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea

Depois de calcular as correções à curva de estimativa de isolamento sonoro, procede-se então ao traçado da respetiva curva. Embora o processo do traçado das curvas seja semelhante para os diferentes tipos de elementos, simples e duplos, no Anexo I, de forma resumida, descreve-se separadamente o modo de as traçar.

Índice de Redução Sonora, Ponderado, a Sons de Condução Aérea

Independentemente do tipo de elemento (simples, duplo ou triplo) os valores do índice de redução sonora, ponderado, R_w , serão obtidos através da comparação das curvas de estimativa anteriormente determinadas, com um curva convencional de referência, representada na Figura 46.

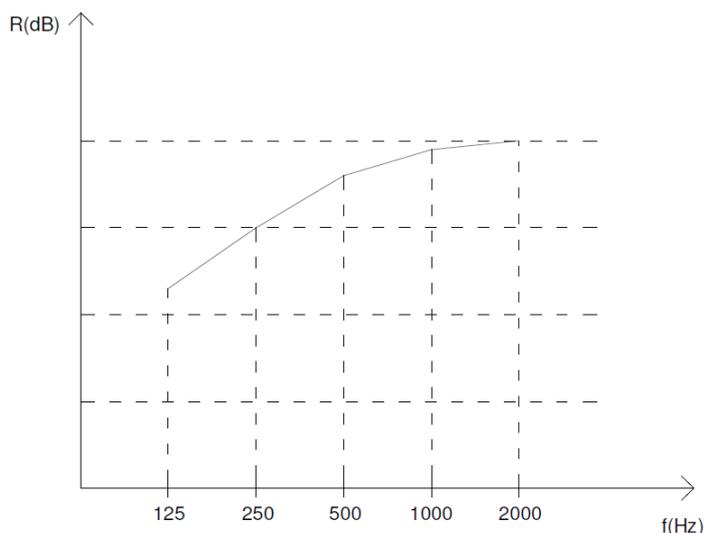


Figura 46 – Curva de referência para os valores estimados de isolamento sonoro a sons de condução aérea, normalizado – EN ISO 717-1:1996 (CEN, 1996a)

Sobrepõe-se a curva de referência à curva dos valores estimados, considerando que o desvio desfavorável para uma determinada banda de frequência ocorre quando o valor estimado é inferior ao de referência. Os valores de R devem ser incrementados em intervalos de 1dB. Ao comparar as duas curvas, segundo a norma EN ISO 717-1:1996 (CEN, 1996a), o somatório dos desvios desfavoráveis deve ser inferior a 32dB e ser o mais próximo possível de 32dB para gama estimada em terços de oitava e inferior a 10dB e ser o mais próximo possível de 10dB para gama estimada em oitavas.

Os valores da curva de referência para isolamento a sons de condução aérea, tanto para bandas de frequência de 1/3 de oitava como para bandas de frequência de 1/1 oitava encontram-se tabelados no Anexo I.

Após este ajustamento, o valor do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea normalizado, ponderado, $D_{nT,w}$, é dado pelo valor da ordenada da curva de referência para a frequência de 500Hz.

Índice de Redução Sonora a Sons Condução Aérea em Elementos Heterogéneos

A estimativa do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea dum elemento de separação heterogéneo, composto por elementos simples ou múltiplos que apresentem diferentes características de isolamento sonoro ao longo do seu desenvolvimento em

superfície, como é o caso das paredes exteriores, constituído por portas e janelas, pode fazer-se utilizando a equação (16).

$$R = 10 \log \left(\frac{\sum_i S_i}{\sum_i \frac{S_i}{10^{R_i/10}}} \right) \quad (16)$$

Sendo:

$R \rightarrow$ índice de redução sonora homogeneizado (dB);

$R_i \rightarrow$ índice de redução sonora do componente i (dB);

$S_i \rightarrow$ área do componente i (m²).

Quantificação da Transmissão Marginal

A transmissão marginal é um outro aspeto a considerar no cálculo do índice de redução sonora, ponderado, R_w . Pode ser entendida como toda a propagação de energia sonora que ocorre por via indireta, ou seja, a que não é irradiada diretamente pelo elemento de separação entre compartimentos adjacentes ou o interior do edifício do próprio exterior (Patrício, 1999).

A transmissão marginal depende principalmente das características das junções – por exemplo, tipo T ou L – nomeadamente das reações entre as massas superficiais dos elementos de compartimentação em presença, e do amortecimento que aí possa ocorrer, não sendo fácil quantificar o seu valor, no entanto a influência deste fenómeno é relativa, os casos em que se torna mais relevante a influência deste tipo de transmissão dizem respeito às junções de elementos relativamente pesados com elementos de compartimentação aligeirados (Patrício, 1999).

A Figura 47 apresenta, esquematicamente, a influência da transmissão marginal em função das características das junções. Sendo que W_i representa a transmissão que ocorre por via indireta e W_d a transmissão que ocorre por via direta.

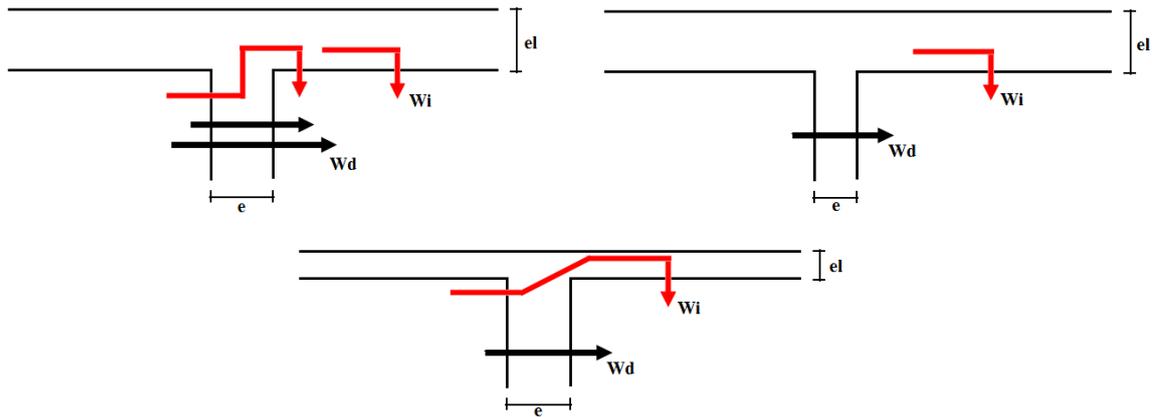


Figura 47 – Esquema da influência da transmissão marginal (adaptado de: Patrício, 1999)

Portanto, designando a influência da transmissão marginal pela sigla ΔTM , o valor do índice de redução sonora ponderado, R_w , pode ser obtido pela equação (17).

$$R'_w = R_w - \Delta TM \quad (17)$$

Sendo:

R'_w → índice de redução sonora ponderado aparente (dB);

R_w → índice de redução sonora ponderado (dB)

ΔTM → fator de correção relativo à influência da transmissão marginal (dB)

Assim, no cálculo do índice de redução sonora entre espaços interiores, de uma forma simplificada, pode definir-se alguns valores para o fator de correção relativo à influência da transmissão marginal, estes valores podem ser definidos através de dois critérios (Mendonça, 2005). Estes critérios encontram-se resumidos na Tabela 8.

Tabela 8 - Fatores de correção relativos à influência da Transmissão Marginal

	$\Delta TM = 0$	$\Delta TM = 3\text{dB}$	$\Delta TM = \text{indefinido}$
1.º Critério	$R_w \leq 35\text{dB}$	$35 < R_w \leq 45\text{dB}$	$R_w > 45\text{dB}$
2.º Critério	Massa superficial do elemento separador igual à massa dos elementos adjacentes	Massa superficial do elemento separador muito menor que a massa dos elementos adjacentes	Massa superficial do elemento separador muito maior que a massa dos elementos adjacentes*

* O valor de ΔTM pode variar de 3dB a valores da ordem dos 10dB para casos particulares, sendo prudente a consideração de 5dB para as situações e soluções construtivas típicas (Almeida & Silva, 2011).

Na quantificação do fator de correção relativo à influência da transmissão marginal para a situação de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre interior e exterior, uma vez que para os sistemas construtivos correntes, o valor é inferior ao que se verifica entre dois espaços interiores, segunda a norma EN 12354-3:2000 (CEN, 2000c) é aconselhável adotar o valor de $\Delta TM = 2\text{dB}$.

Relação entre redução sonora aparente e índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado

Na previsão do desempenho do isolamento sonoro a sons de condução aérea, é necessário relacionar o parâmetro do índice de redução sonora ponderado ou aparente com o índice utilizado na regulamentação em vigor.

No caso da legislação portuguesa, o parâmetro usado é o Índice de Isolamento Sonoro a Sons de condução aérea padronizado, $D_{nT,w}$. Este parâmetro pode ser obtido pela equação (18).

$$D_{nT,w} = R'_w + 10 \log \frac{0,16V}{T_0 \times S} \quad (18)$$

Sendo:

$D_{nT,w}$ → índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado (dB);

R'_w → índice de redução sonora ponderado aparente;

V → volume do compartimento recetor (m^3)

T_0 → tempo de reverberação de referência (s), igual a 0,5s para situações comuns;

S → área do elemento construtivo (m^2).

Na definição do tempo de reverberação entende-se por situações comuns, edifícios destinados a habitação. No caso de salas de aula, salas de espetáculo, etc., o valor de T_0 será diferente.

No caso do isolamento a sons aéreos provenientes do exterior, para soluções e sistemas construtivos correntes, o efeito da transmissão marginal é inferior ao verificado entre dois espaços interiores, segundo a norma EN 12354-3:2000 (CEN, 2000c) é aconselhável usar um valor de ΔTM igual a 2dB para a quantificação do índice R'_w a partir do índice R_w (Almeida & Silva, 2011).

Ainda no que diz respeito a fachadas, ou seja, isolamento entre o exterior e interior, a expressão do isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado deve ser afetada por um fator corretivo, ΔL_{fs} , referente à forma da mesma.

$$D_{2m,nT,w} = R'_w + 10 \log \frac{0,16V}{T_0 \times S} + \Delta L_{fs} \quad (19)$$

Sendo:

$D_{2m,nT,w}$ → índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior e interior padronizado (dB);

R'_w → índice de redução sonora ponderado aparente;

V → volume do compartimento recetor (m^3)

T_0 → tempo de reverberação de referência (s), igual a 0,5s para situações comuns;

S → área do elemento construtivo (m^2);

ΔL_{fs} → fator de correção devido à forma da fachada.

De acordo com o definido na EN 12354-3:2000 (CEN, 2000c), o fator de correção devido à forma da fachada, é dado em função da absorção média da superfície de reflexão exterior, e da altura da linha visível entre a fonte de ruído e o espaço interior em estudo (Almeida & Silva, 2011). Alguns dos exemplos destes fatores de correção encontram-se no Anexo I.

3.2.2. Previsão do desempenho Térmico

No estudo do comportamento térmico da habitação modular foi utilizado o programa EnergyPlus, tal como foi referido aquando da abordagem dos diferentes métodos de previsão do comportamento térmico, esta ferramenta baseia-se numa metodologia de cálculo dinâmico, permitindo assim um maior rigor e versatilidade na análise do comportamento térmico.

E numa perspetiva de análise do comportamento das pontes térmicas presentes na habitação modular, recorreu-se ainda ao programa de análise bidimensional Therm.

Assim, nesta secção são descritos os diversos grupos e campos utilizados para introduzir todos os parâmetros necessários para a caracterização da habitação modular no programa

EnergyPlus – ficheiro IDF (input data file), e alguns dos pressupostos adotados no estudo das pontes térmicas com recurso ao Therm.

3.2.2.1. EnergyPlus

O EnergyPlus é um programa informático de simulação dinâmica que visa auxiliar o estudo e análise de edifícios do ponto de vista térmico.

Desenvolvido nos Estados Unidos (US Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy, Lawrence Berkley National Laboratory), o EnergyPlus é um programa de simulação numérica, com base em programas já existentes como o DOE-2 e o BLAST (*Bluind Loads Analysis and System Thermodynamics*), com numerosas potencialidades adicionais, permitindo a realização de simulações com intervalos de tempo inferiores a um hora (análise do comportamento térmico do edifício ao longo de um dia e não apenas ao longo dos diversos meses), estuda sistemas modulares, fluxos de ar multizona, conforto térmico e de sistemas voltaicos (Crawley et al, 2005; Silva, 2009).

Como se pode ver na representação da Figura 48 a estrutura do EnergyPlus é constituída por três componentes básicos: um módulo de simulação (*Simulation Manager*), um módulo de simulação do balanço térmico e de massa (*Heat and Mass Balance Simulation Module*) e um módulo de simulação de sistemas (*Building Systems Simulation Module*).

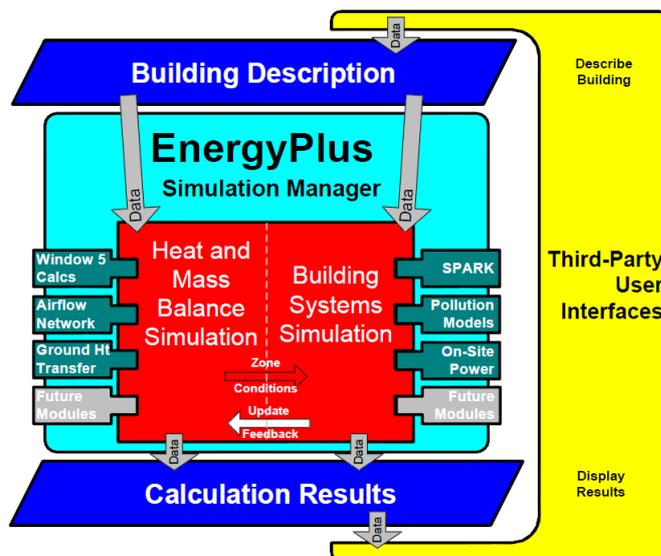


Figura 48 – Estrutura de funcionamento do programa EnergyPlus (EnergyPlus, 2012)

O módulo de simulação controla toda a simulação, fornecendo os dados de entrada e liga os outros módulos a outros programas. O módulo de balanço térmico e de massa aplica os princípios de conservação de massa e energia para calcular a transferência de energia através de uma zona. O módulo de simulação dos sistemas lida com a comunicação entre a equação de balanço de calor e os módulos dos sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado – AVAC (Silva, 2009).

Na realização dos cálculos o EnergyPlus utiliza o conceito de zona. Entende-se por zona um conjunto de espaços sujeitos ao mesmo controle térmico, que podem interagir entre si, através de fluxos de calor nas superfícies adjacentes (Afonso, 2009).

Este programa contém um editor de texto, em formato IDF (*Input Data File*), onde o utilizador introduz todos os parâmetros necessários para a caracterização do edifício em estudo, tais como características da envolvente, sombreamentos, ganhos internos e sistemas AVAC. A construção do edifício efetua-se introduzindo as coordenadas dos vértices de cada elemento que constituem as diferentes zonas do edifício. Esta construção do edifício também pode ser feita através de uma interface gráfica, que permite de maneira mais fácil criar a geometria do edifício. Na presente dissertação o programa utilizado foi *SketchUp*, desenvolvido pela Google, que complementado com um plug-in (*Legacy OpenStudio Plug-in for Google SketchUp*) permite importar a geometria do edifício para o editor do EnergyPlus.

Na Figura 49 encontra-se representada outra das ferramentas deste programa, o EP-Launch, aqui é onde o utilizador insere os ficheiros climáticos (*Weather File*) e executa as simulações previamente definidas no editor (IDF). Também permite verificar a existência de erros provenientes da modelação da geometria do edifício, esta verificação é possível através da geração de um ficheiro CAD (*Drawing File*).

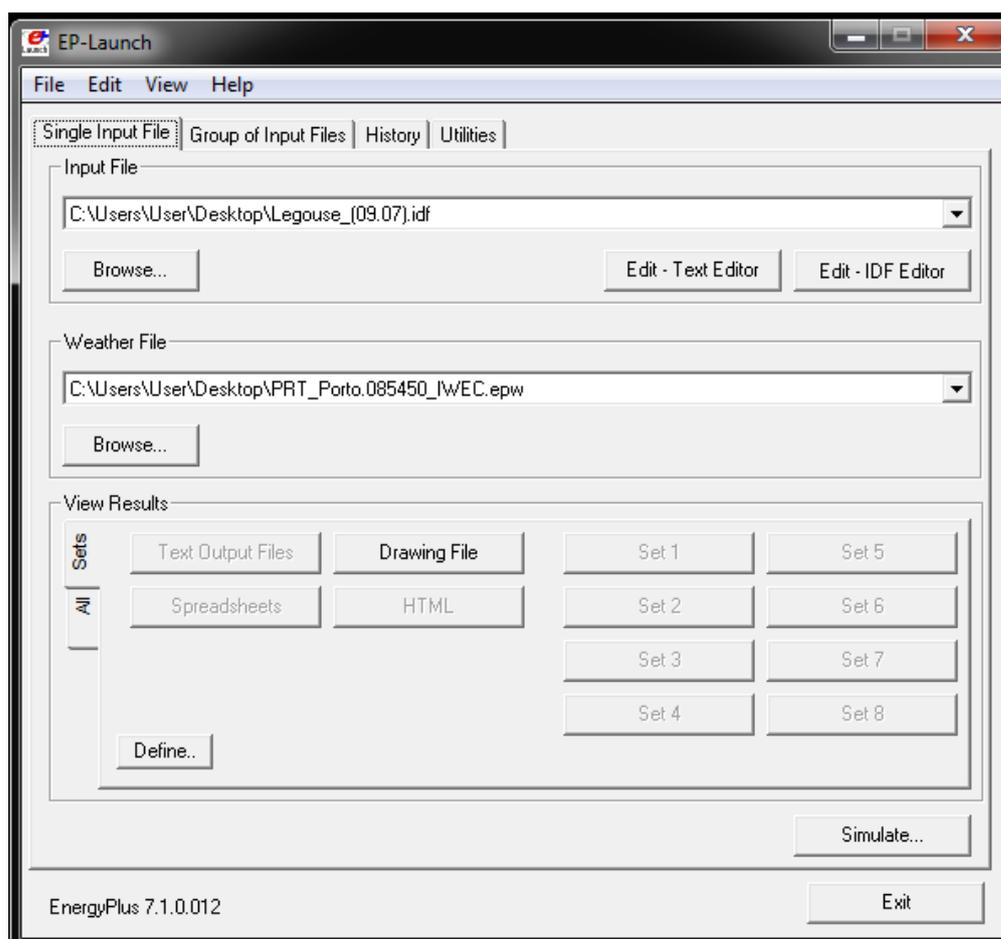


Figura 49 – Ferramenta EP-Launch do EnergyPlus

Como anteriormente referido o EnergyPlus permite a introdução de ficheiros climáticos (*Weather File*), os dados climáticos são dos parâmetros mais importantes na simulação térmica dos edifícios. Na resposta dessas necessidades o EnergyPlus disponibiliza na sua plataforma dois tipos de ficheiros climáticos. Um onde constam valores climáticos registados em tempo real, por estações meteorológicas estrategicamente posicionadas, e outro com base em dados estatísticos respetivos ao país e à zona em estudo. Na presente dissertação foi usado um ficheiro climático, da zona do Porto, baseado em dados estatísticos (EnergyPlus, 2012).

3.2.2.1.1. Análise dinâmica - EnergyPlus

Posteriormente são descritos os diversos grupos e campos utilizados para a elaboração deste trabalho. Há que realçar que existem outros grupos no grupo, mas como não fazem parte do âmbito deste trabalho não serão abordados.

- **Grupo “Simulation Parameters”**

Campo “Version”

A versão do programa EnergyPlus, utilizada na presente dissertação, foi a 7.1. Trata-se, portanto, da versão mais atualizada até à data, disponibilizada pelo departamento de energia dos Estados Unidos.

Campo “Simulation Control”

Este campo permite definir condições de controlo da simulação, nomeadamente, se é pretendido o cálculo das dimensões em planta, da zona ou do sistema, permitindo, ainda especificar se a simulação será anual ou se será para um intervalo pré-definido (Silva, 2010).

A simulação será anual e para um ficheiro climático, não para um período restrito e não serão calculadas dimensões em planta.

Na Figura 50 encontram-se representadas as opções adotadas para o campo de controlo de simulação do EnergyPlus.

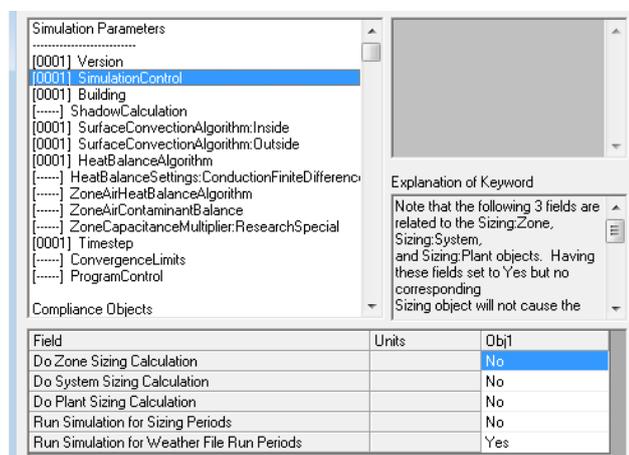


Figura 50 – Campo “Simulation Control”

Campo “Building”

Este campo permite introduzir a orientação do edifício relativamente ao norte (0° - valor por defeito), o tipo de zona onde se encontra localizado (cidade), as tolerâncias de convergência quer de temperaturas quer de cargas, a distribuição solar e o número máximo de dias de simulação para a verificação das ditas convergências.

No parâmetro relativo à distribuição solar, foi adotado a opção “*MinimalShadowing*”, significando que não existe sombreamento da radiação solar através de elementos exteriores horizontais e verticais.

O parâmetro “*Maximum Number of Warmup Days*”, relativo ao máximo de dias de preparação da simulação, é definido consoante a complexidade do edifício, como se trata de um edifício corrente é pré-definido que 25 é o indicado, mais do que 25 definiria um edificio bastante complexo.

Na Figura 51 encontram-se representadas as opções adotadas para o campo “*Building*” do EnergyPlus.

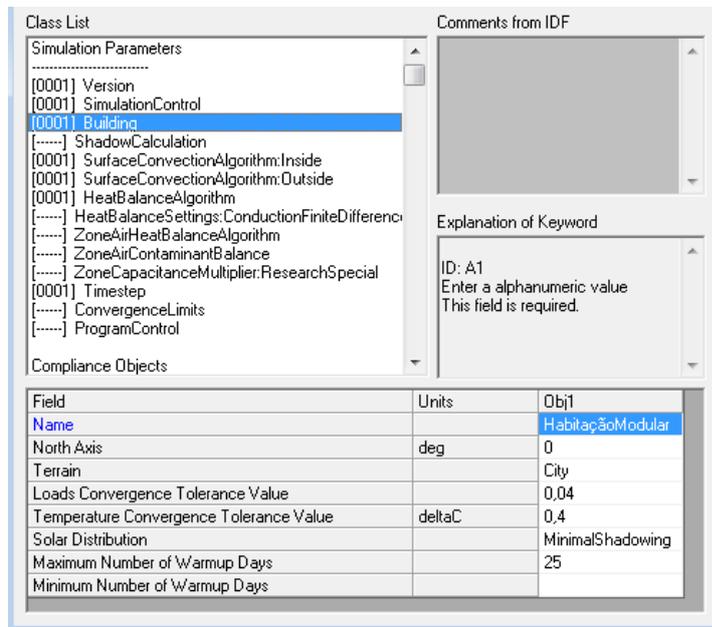


Figura 51 – Campo “Building”

Campo “Heat Balance Algorithm”

O algoritmo de transferência de calor considerado para a envolvente do edifício foi o “*ConductionTransferFunction*”, que considera apenas o calor sensível, uma vez que para efeitos de simulação apenas se considera a ocorrência de fenómenos de transmissão de calor por condução.

Campo “Timestep”

Este campo permite definir um intervalo de tempo de simulação. É possível definir intervalos de tempo inferiores a uma hora. Definiu-se um intervalo de tempo de 15 em 15 minutos, assim o valor a introduzir no editor será igual a 4, uma vez que quatro intervalos de 15 minutos correspondem a uma hora.

• Grupo “Simulation and Climate”

Campo “Site: Location”

Neste campo são introduzidos os dados referentes à localização do edifício (latitude, longitude, elevação e o fuso horário). No entanto, uma vez que será usado um ficheiro climático, o seu preenchimento é desnecessário, já que o programa sobrepõe os dados dos ficheiros climáticos aos indicados pelo utilizador. O ficheiro climático diz respeito à zona do Porto e foi obtido com base em dados estatísticos (EnergyPlus, 2012).

Campo “Run Period”

Aqui define-se o dia e o mês em que começa e termina o período de simulação. A simulação será anual, terá início no dia 1 de janeiro e fim no dia 31 de dezembro. Uma vez que o ficheiro climático pode ter informação relativa a férias e feriados ou dias especiais, é indicado ao programa que não faça esta distinção. Indica-se ainda que tenha em consideração dados relativos a pluviosidade e neve, caso estes façam parte do ficheiro climático.

O campo “*Day of Week for Start Day*” permite indicar em que dia da semana começa a simulação, adotou-se a opção “*UseWeatherFile*” pois indica que o dia da semana começa segundo o indicado pelo ficheiro climático. Os valores indicativos do vento e neve são tidos em conta segundo o ficheiro climático.

Na Figura 52 encontram-se representadas as opções adotadas para o campo “RunPeriod” do EnergyPlus.

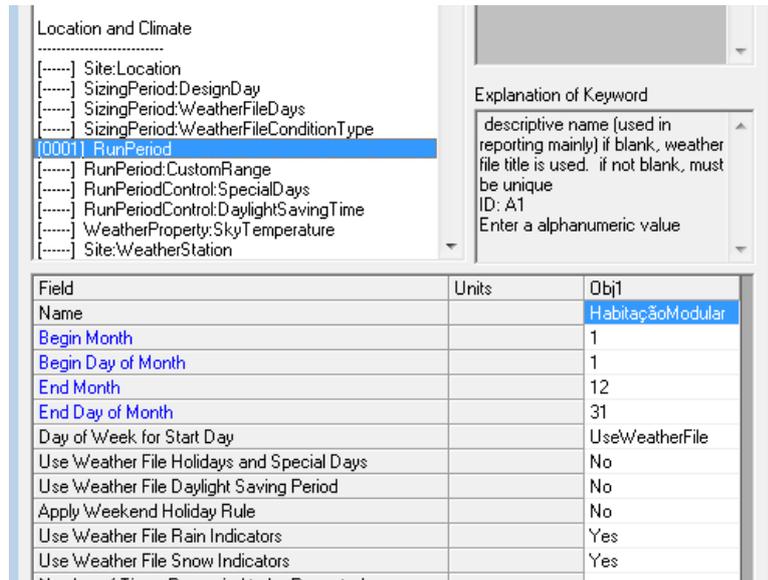


Figura 52 – Campo “Run Period”

Campo “Site: Ground Temperature: Building Surface”

Neste campo é indicado a temperatura superficial do solo, afetando todos os elementos construtivos que estão em contacto com o solo. Os valores adotados foram os presentes no ficheiro climático.

- **Grupo “Schedules”**

Campo “Schedules: Tyme Limits”

Como o próprio nome indica, *Schedules*, são agendamentos/horários (Figura 53). São definidas de modo a influenciar os horários de funcionamento ou ativação dos diversos sistemas presentes na habitação (período ocupação, e de utilização do sistema de iluminação, controlo das temperaturas de sistemas de aquecimento e arrefecimento, infiltrações de ar, etc.), para isso neste ponto são definidos os valores máximos (*Upper Limit Value*) e mínimos (*Lower Limit Value*) para o programa. Estes limites vão servir de complemento aos horários definidos posteriormente no campo “Schedules: Compact”. Serão então definidos cinco objetos, com os seus limites mínimos e máximos, podendo estes intervalos tomar valores discretos ou contínuos.

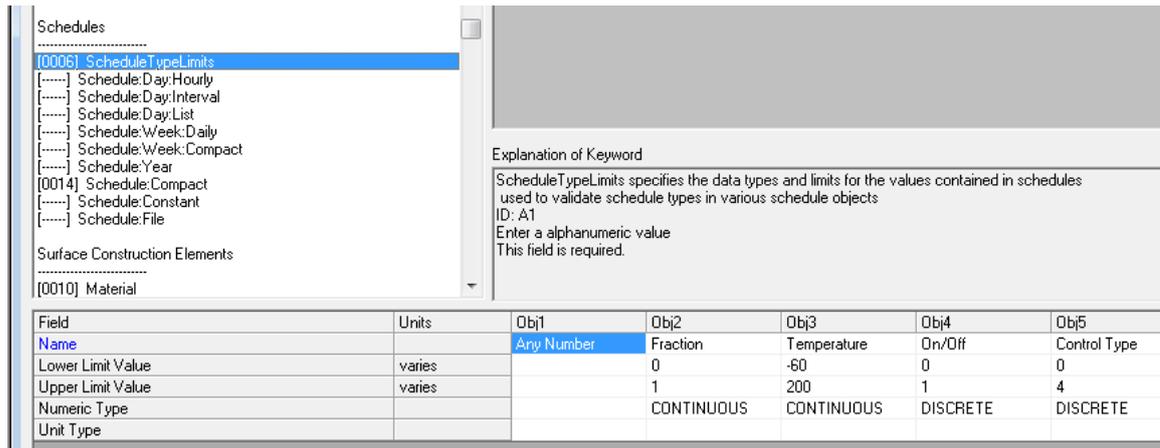


Figura 53 – Campo “Schedules: Tyme Limits”

Campo “*Schedules: Compact*”

Aqui são definidos os horários de funcionamento de cada item, as datas de início e de fim, se são tidos em conta dias especiais e ainda os valores limites que indicam ao programa, por exemplo, quando o sistema deve ligar/desligar (Silva, 2010). Assim, na Figura 54 encontram-se representadas algumas das “*ScheduleCompact*” adotadas.

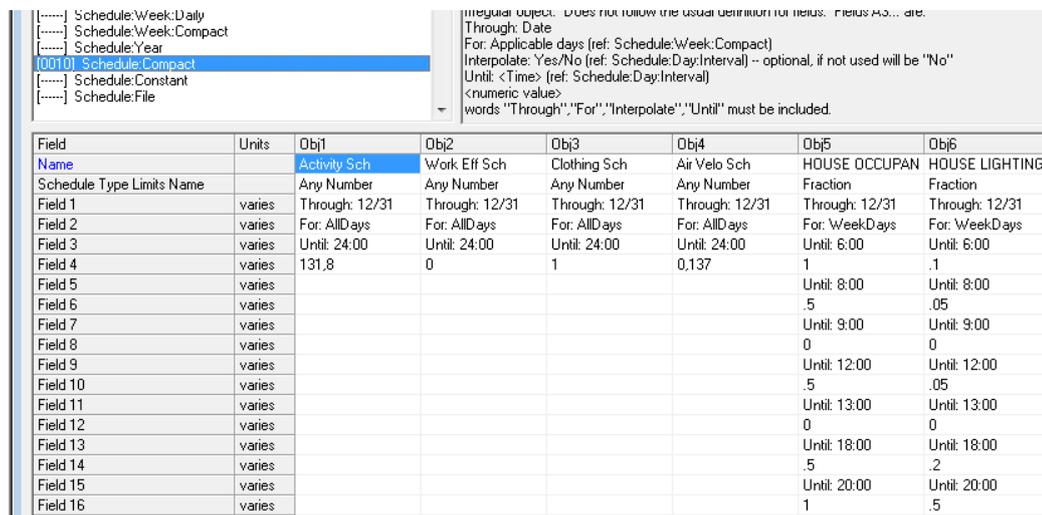


Figura 54 – Campo “Schedule: Compact”

Apresenta-se como exemplo uma *Schedule* de funcionamento e de ocupação. Assim, a “*INF-SCHED*” foi idealizada para apoiar os cálculos relativos à ventilação natural, esta pode tomar qualquer valor (*ANYNUMBER*), decorre até dia 31 de Dezembro (*Through:12/31*), para todos os dias (*For:AllDays*), até às 24 horas de cada dia (*Until:24:00*).

A Schedule “HOUSE OCCUPANCY” foi idealizada para simular a ocupação, apenas pode tomar valores entre 0 e 1 (*Fraction*), decorre até dia 31 de Dezembro (*Through:12/31*). De uma forma geral, para os dias da semana (*For:WeekDays*) considerou-se que durante o período da manhã e da tarde não se encontra ninguém no edifício, na hora de almoço apenas se encontra 50% das pessoas, e ao fim do dia encontram-se 100% das pessoas. Nos restantes dias (*For:AllOtherDays*), durante o período da manhã, encontram-se 100% das pessoas no edifício, entre a hora de almoço e o fim da tarde não se encontra ninguém e ao fim do dia encontram-se 100% das pessoas no edifício.

- Grupo “Surface Construction Elements”

Campo “Material”

Aqui são introduzidos os vários materiais e suas características que constituem os elementos estruturais da habitação, apenas são considerados os materiais que contribuem de maneira significativa para a inércia térmica (Figura 55). As características dos materiais a introduzir são: a rugosidade (*Roughness*), a espessura (*Thickness*), a condutibilidade (*Conductivity*), a densidade (*Density*) e o calor específico (*Specific Heat*).

Como se trata de elementos de betão, mais propriamente BACRFA, admitiu-se uma rugosidade média.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		BACRFA 60mm	BACRFA 100mm	Betão Compl. C/ FE	Betão Armado	Laje Térrea 150mm	BACRFA 90mm
Roughness		MediumRough	MediumRough	MediumRough	MediumRough	MediumRough	MediumRough
Thickness	m	0,06	0,1	0,06	0,07	0,15	0,09
Conductivity	W/m-K	2	2	2	2,5	2	2
Density	kg/m3	2400	2400	2400	2500	2400	2400
Specific Heat	J/kg-K	750	750	750	750	750	750
Thermal Absorptance							

Figura 55 – Campo “Material”

Campo “Material: No Mass”

Este campo permite definir os materiais cuja principal característica é a resistência térmica (R), é o caso dos materiais de isolamento térmico (Figura 56).

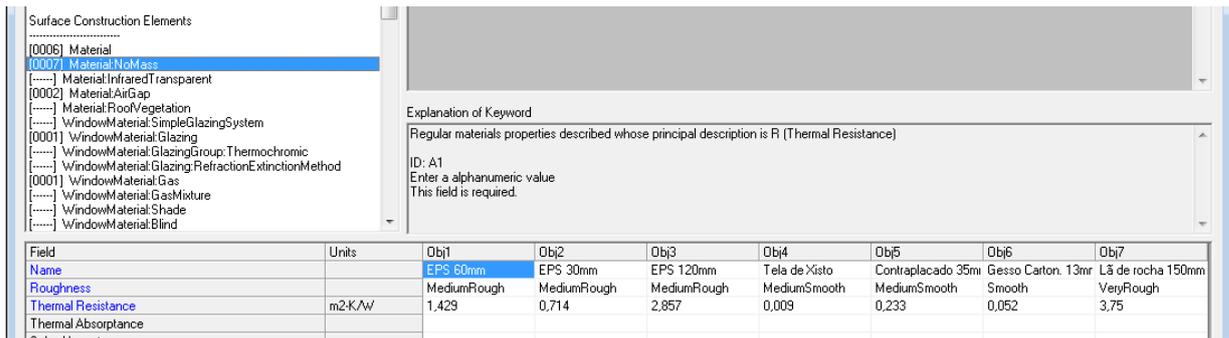


Figura 56 – Campo “Material: No Mass”

O valor da resistência térmica de uma camada de um dado elemento, é obtido pelo quociente da espessura dessa camada e do coeficiente de condutibilidade térmica do material (λ).

Campo “Material: Air Gap”

Neste campo são introduzidos todos os espaços de ar presentes nos elementos que constituem o edifício. Como não existem elementos com caixa-de-ar, não se considera nada neste campo.

Campo “Window Material: Simple Glazing System”

Este campo possibilita definir o envidraçado como um todo, ao invés de o definir por camadas (*Window Material: Glazing* e *Window Material: Simple Gas*), sendo o coeficiente de transmissão térmica (U) e o fator solar (g), as principais características a considerar (Figura 57). Como descrito no ponto 3.1, o envidraçado a adotar será do tipo 4 (10) 4 (dimensões em milímetros), com um coeficiente de transmissão térmica igual a 3,0 W/m.²°C e um fator solar igual a 0,75.

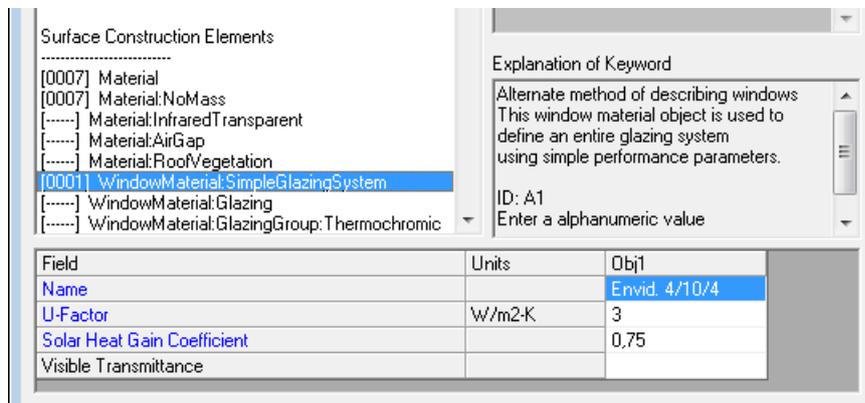


Figura 57 – Campo “Window Material: Simple Glazing System”

Campo “Construction”

Aqui são definidas a constituição dos elementos, com base nos materiais introduzidos anteriormente (Figura 58). A metodologia seguida consiste na definição dos elementos por camadas (*Layers*), começando da camada exterior para a interior.

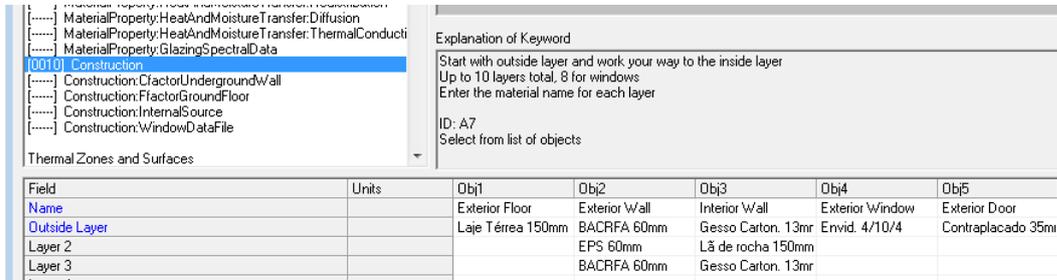


Figura 58 – Campo “Construction”

- **Grupo “Thermal Zones and Surfaces”**

Campo “Global Geometry Rules”

Neste campo são definidas os parâmetros relativos à geometria do edifício. Podemos dividir este campo em três pontos.

O primeiro ponto refere-se à introdução das coordenadas de cada elemento, ou seja, convencionou-se que a primeira coordenada a introduzir deve começar num determinado vértice. Adotou-se que o primeiro vértice dum determinado elemento é o situado no canto superior esquerdo (*UpperLeftCorner*). No ponto seguinte é definido o sentido de introdução dos vértices que constituem o elemento, o sentido adotado foi o anti-horário (*CounterClockWise*). Por fim, define-se o sistema de coordenadas, adotou-se o *Relative*, o que significa que cada zona possui o seu sistema de coordenadas.

Campo “Zone”

Este grupo permite definir as diferentes zonas térmicas. O edifício foi dividido em 6 zonas térmicas, ou seja, a sala/cozinha, os 3 quartos, o WC e o Hall de acesso aos quartos.

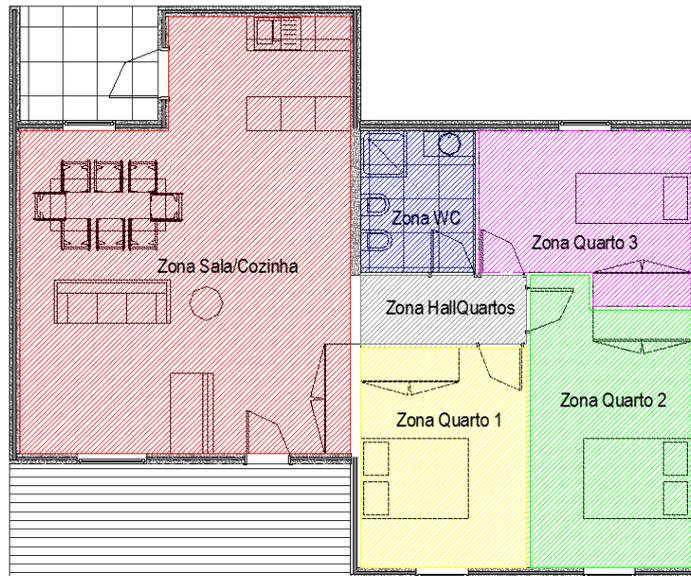


Figura 59 – Diferentes zonas térmicas da habitação modular

Tal como exemplifica a Figura 60, todas as zonas definidas têm origem no vértice (0;0;0).

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		Sala/Cozinha	Quarto 1	Quarto 2	Quarto 3
Direction of Relative North	deg	0	0	0	0
X Origin	m	0	0	0	0
Y Origin	m	0	0	0	0
Z Origin	m	0	0	0	0
Type					
Multiplier		1	1	1	1

Figura 60 – Campo “Zone”

Campo “Building Surface: Detailed”

Este campo permite introduzir as coordenadas e definir as condições fronteiras dos elementos construtivos que constituem o edifício.

Aqui é preciso especificar o tipo de superfície (*Surface Type*), ou seja, identificar se o elemento construtivo é uma parede, teto ou pavimento (Figura 61). Após identificar o tipo de superfície é necessário identificar a que zona térmica pertence o elemento e definir as condições fronteira (*Outside Boundary Condition*) em que este se encontra, isto é, se o elemento se encontra em contato com o solo, com o exterior, com outras zonas térmicas, etc..

Por fim, é ainda necessário definir se a face exterior dos elementos se encontra exposta ao sol e ao vento.

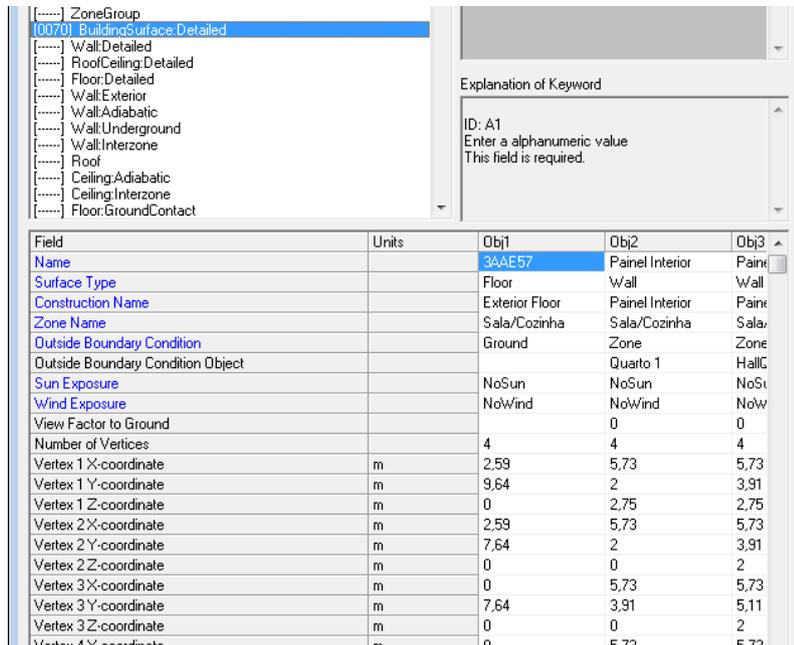


Figura 61 – Campo “Building Surface: Detailed”

Campo “Fenestration Surface: Detailed”

Aqui são definidos os vãos envidraçados e as portas, a metodologia é semelhante à descrita no campo “Building Surface: Detailed”, inicialmente define-se o tipo de superfície, o nome da sua solução construtiva, o elemento construtivo em que está inserido, se possui sombreamento e, por fim, as suas coordenadas geométricas (Figura 62).

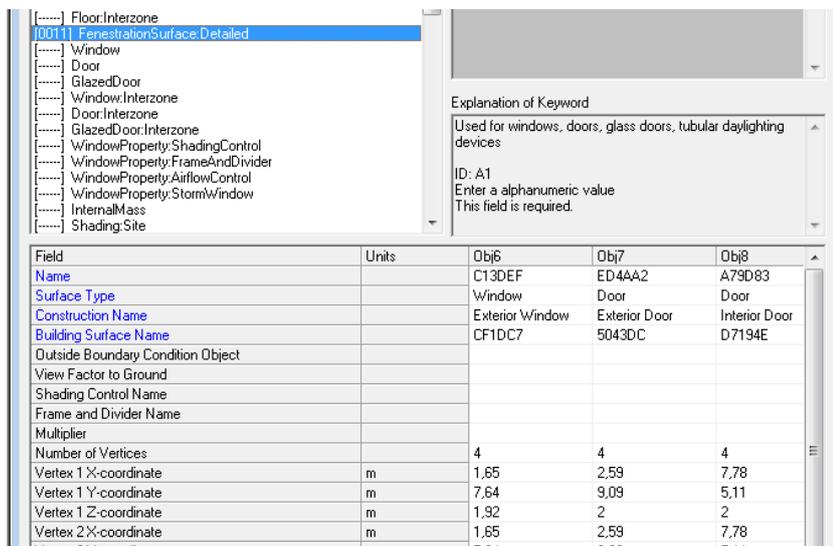


Figura 62 - Campo “Fenestration Surface: Detailed”

- Grupo “Internal Gains”

Os ganhos internos dos edifícios podem resultar da iluminação, dos equipamentos e da ocupação humana. Assim neste grupo é possível definir quais os ganhos relativos a cada uma destas componentes.

Os ganhos devidos à ocupação humana resultam da energia despendida no desenvolvimento das atividades ao longo do dia, assim recorreu-se a uma “Schedule” a indicar as horas em que os ocupantes se encontram na habitação (*Schedule Compact: House Occupation*) e as atividades a desenvolver (*Schedule Compact: Activity Sch*). Para os ganhos relativos à iluminação e equipamentos, recorreu-se na mesma a duas *Schedule (House Lighting e Intermitent*, respetivamente), segundo o RCCTE o valor dos ganhos internos para residências aconselhável é de 4W/m^2 , com base neste valor de referência adotou-se o valor de 1W/m^2 para iluminação e 3W/m^2 para equipamentos.

Na Figura 63 encontra-se representado parte dos valores introduzidos no campo “Lights” referentes aos ganhos internos devido à iluminação.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		Sala/Cozinha Lights	Quarto1 Lights	Quarto2 Lights	Quarto3 Lights
Zone or ZoneList Name		Sala/Cozinha	Quarto 1	Quarto 2	Quarto 3
Schedule Name		HOUSE LIGHTING	HOUSE LIGHTING	HOUSE LIGHTING	HOUSE LIGHTING
Design Level Calculation Method		LightingLevel	LightingLevel	LightingLevel	LightingLevel
Lighting Level	W				
Watts per Zone Floor Area	W/m2	1	1	1	1
Watts per Person	W/person				
Return Air Fraction		0	0	0	0
Fraction Radiant		0,2	0,2	0,2	0,2
Fraction Visible		0,2	0,2	0,2	0,2
Fraction Replaceable		1	1	1	1

Figura 63 – Campo “Lights”

- **Grupo “Zone Airflow”**

Neste grupo é definido o fluxo de ar proveniente do exterior, quer seja por infiltração ou por ventilação natural ou mecânica. Admitindo uma boa estanquidade da habitação, considera-se somente a componente de ventilação natural (*ZoneVentilation: DesignFlowRate*). Com base na metodologia proposta pelo RCCTE, tendo em conta a localização do edifício e considerando caixilharia sem classificação, o valor adotado foi de $0,9h^{-1}$ (RCCTE, 2006).

Utilizando a *Schedule* criada para este efeito (*INF-SCHE*), considerando o valor adotado de $0,9h^{-1}$, admitiu-se ventilação natural para todas as zonas térmicas do edifício com exceção da zona do hall que dá acesso aos quartos.

Na Figura 64 encontra-se representado os valores introduzidos no campo “Zone Ventilation: Design Flow Rate”.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		Sala/Cozinha Ventil	Quarto1 Ventilation	Quarto2 Ventilation	Quarto3 Ventilation	WC Ventile
Zone or ZoneList Name		Sala_Cozinha	Quarto 1	Quarto 2	Quarto 3	WC
Schedule Name		INF-SCHE	INF-SCHE	INF-SCHE	INF-SCHE	INF-SCHE
Design Flow Rate Calculation Method		AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChange:
Design Flow Rate	m3/s					
Flow Rate per Zone Floor Area	m3/s-m2					
Flow Rate per Person	m3/s-person					
Air Changes per Hour	1/hr	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Ventilation Type		Natural	Natural	Natural	Natural	Natural
Fan Pressure Rise	Pa					
Fan Total Efficiency		1	1	1	1	1
Constant Term Coefficient		1	1	1	1	1
Temperature Term Coefficient						
Velocity Term Coefficient						

Figura 64 – Campo “Zone Ventilation: Design Flow Rate”

- **Grupo “HVAC Templates”**

Neste campo o objetivo é definir as condições de controlo do sistema AVAC, através dos intervalos horários e limites máximos e mínimos de temperatura definidos no campo “*Schedule: Compact*”. Assim no Campo “*HVAC Template:Thermostat*” serão introduzidas as temperaturas consideradas, para efeitos de análise de comportamento térmico (Figura 65).

Estas serão delimitadas por diferentes *Schedule*, para a situação de inverno (*Heating Setpoints*) e de verão (*Cooling Setpoints*).

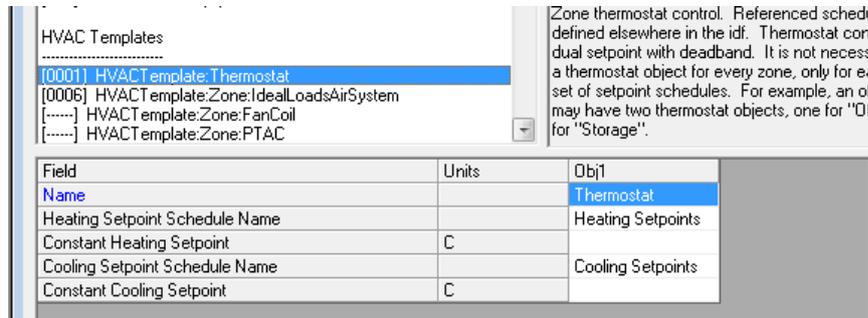


Figura 65 - Campo “HVAC Template:Thermostat”

Os equipamentos encarregados pela manutenção da temperatura nas diferentes zonas serão inseridos no grupo “HVAC Template:Zone:IdealLoadAirSystem“. O “Ideal Load Air System” é usado para calcular as cargas de aquecimento e arrefecimento em cada zona, sem a necessidade de modelar um sistema completo de climatização.

- Grupo “Output Reporting”

Neste grupo definem-se quais os resultados que o EnergyPlus deve apresentar. Este programa possibilita uma vasta lista de resultados, sobre a forma de variáveis. A definição das variáveis a apresentar é conseguida com recurso ao campo “Output: Variable“. Assim foram definidas variáveis como temperatura do ar interior (*Zone Air Temperature*), energia despendida para aquecimento do interior (*Ideal Loads Total Heating Rate*) e energia despendida para arrefecimento do interior (*Ideal Loads Total Cooling Rate*).

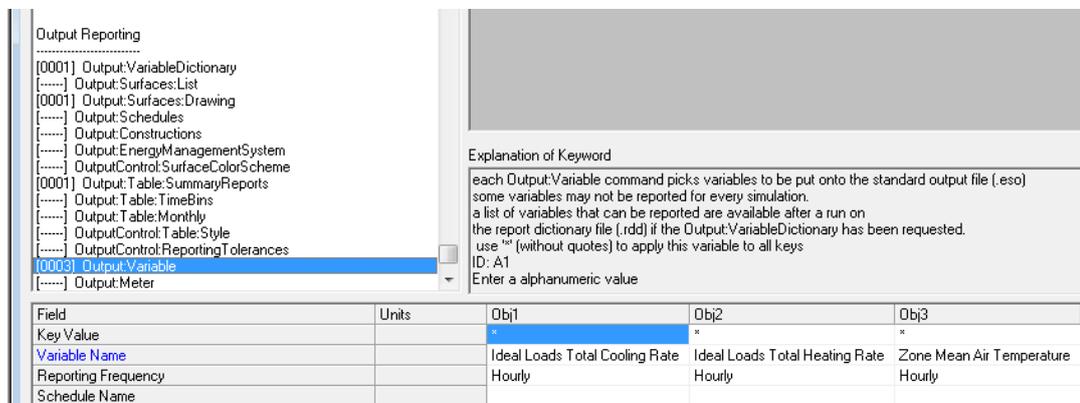


Figura 66 – Campo “Output: Variable”

Introduzidos todos os dados necessários no ficheiro IDF e selecionado o ficheiro climático procede-se então à simulação.

3.2.2.2. THERM

O programa THERM foi desenvolvido pelo Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), (Therm, 2012).

O THERM permite realizar modelações bidimensionais de transferência de calor em componentes de construção, tais como janelas, paredes, fundações, telhados, portas e quaisquer outros elementos em que a análise das pontes térmicas seja de especial interesse.

O programa THERM permite fazer uma análise bidimensional de transferência de calor com base no método de elementos finitos, permitindo modelar diversas geometrias de materiais ou componentes de construção. Depois de definida a geometria da secção transversal, as propriedades dos materiais e as condições de fronteira, o programa gera uma malha de elementos na secção, executa a análise de transferência de calor, realiza um erro de estimação, refina a malha de elementos se necessário e recalcula até a solução convergir (Therm, 2012).

O programa apresenta essencialmente três componentes:

- Interface gráfica destinada ao utilizador: que permite desenhar secções transversais de produtos ou componentes para o qual se pretende efetuar a análise térmica;
- Análise de transferência de calor: este componente apresenta um gerador de malha automático para criar os elementos para a análise de elementos finitos, permitindo adaptar a malha gerada;
- Resultados, esta componente permite apresentar resultados sob a forma de coeficientes de condução térmica (U), linhas isotérmicas com possibilidade de preenchimento colorido, e temperaturas máximas e mínimas.

A Figura 67 apresenta dois dos resultados possíveis segundo o programa THERM, assim no primeiro caso (à esquerda) é possível ver o resultado sob a forma de linhas isotérmicas, no segundo caso (à direita) o resultado vem segundo uma malha colorida obtida segundo as linhas isotérmicas.

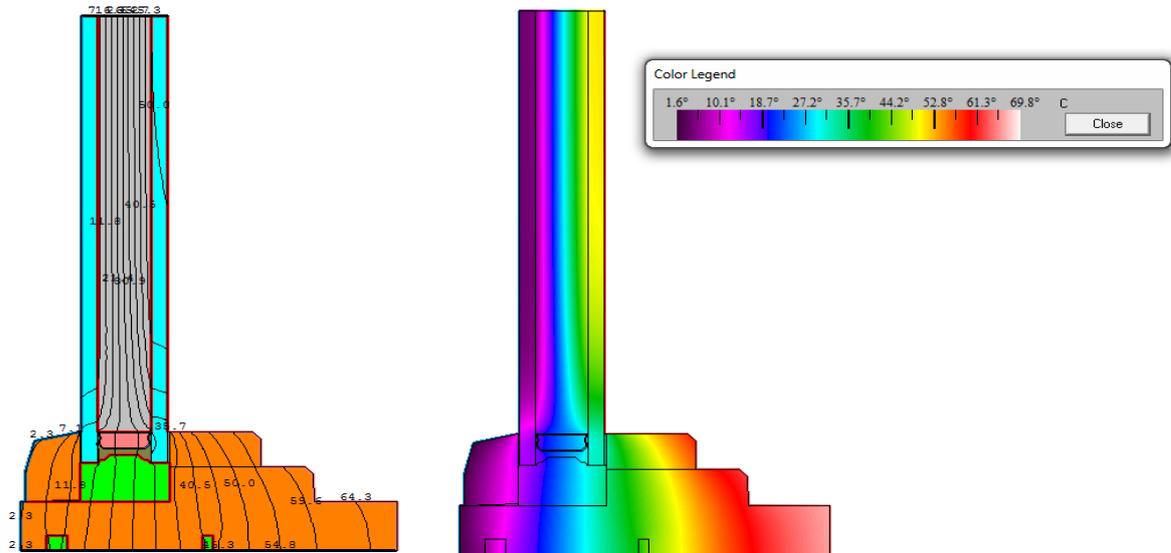


Figura 67 – Envidraçado duplo com caixilharia em madeira, linhas isométricas

3.2.2.3. Análise das Pontes Térmicas Lineares

Tal como referido anteriormente, a análise das pontes térmicas lineares presentes na habitação modular, será feita com recurso ao programa de análise bidimensional Therm.

Como não existem heterogeneidades inseridas em zona corrente da envolvente, como seria o caso de pilares e vigas, não se admite a existência de pontes térmicas planas. Assim as pontes térmicas lineares consideradas na habitação modular foram as seguintes:

- Ligação fachada com cobertura;
- Ligação fachada com pavimento (contato com solo);
- Ligação em “L” de paredes de fachada;
- Ligação dos vãos.

Na Figura 68 encontram-se numerados os diferentes casos de ligações em “L” e em “T” entre os diferentes painéis que constituem as paredes de fachada da habitação modular. Estes diferentes casos, bem como os pormenores de ligação da fachada com a cobertura serão analisados individualmente. No Anexo II encontram-se representados todos os pormenores de ligação cotados.

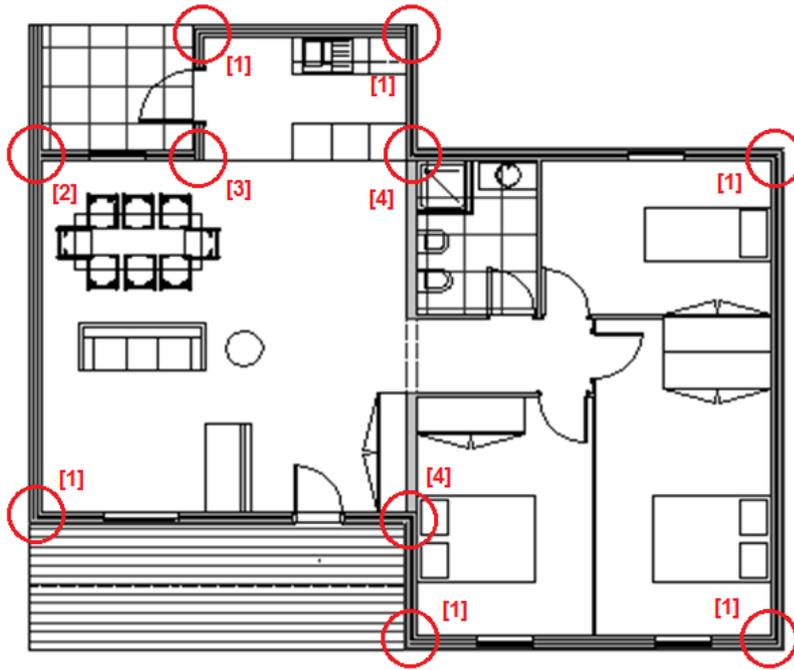


Figura 68 – Identificação dos diferentes Pormenores de ligação entre os diferentes painéis.

Como condições fronteira, adotaram-se valores de 20°C para a temperatura interior e 5°C para a temperatura exterior. O valor adotado para a temperatura exterior foi a temperatura média mínima registada na cidade do Porto no mês mais frio. Estas condições encontram-se representadas na Figura 69.

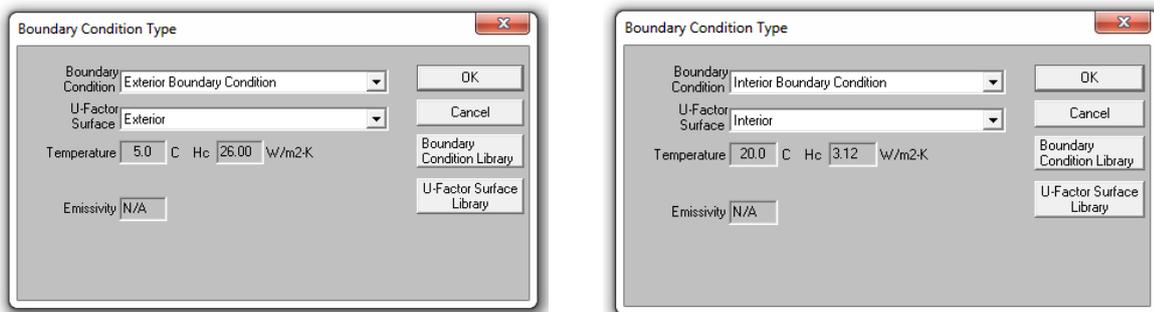


Figura 69 – Condições fronteira do programa Therm.

4. RESULTADOS

4.1. Comportamento Acústico

Na previsão do desempenho acústico dos elementos construtivos da habitação modular de custos controlados, a metodologia seguida foi o modelo misto proposto por Tadeus e Mateus (Tadeu & Mateus, 2001).

Tal como referido no ponto 3.1 do capítulo 3, a casa modular em estudo, é formado por painéis sandwich de Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço (BACRFA). Estes painéis são elementos constituídos por duas camadas externas BACRFA separadas por uma camada de material de isolamento e ligadas através de conectores de matriz polimérica reforçada com fibras contínuas (Fiber Reinforced Polymer – FRP).

4.1.1. Traçado da Curva de Estimativa de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea

4.1.1.1. Painel Sandwich

No caso dos painéis sandwich consideraram-se duas situações distintas. Admitindo que os conectores iriam criar condições para que os dois panos funcionem como um só, considerou-se o painel como um elemento simples. No entanto, os conectores podem não apresentar rigidez suficiente para que os dois panos do elemento funcionem como um só, neste caso considerou-se o painel como um elemento duplo.

Na Tabela 9 estão apresentadas algumas das características do painel sandwich. Embora se trate de betão reforçado com fibras de aço, em termos de massa as fibras não influenciam de maneira significativa, portanto adotou-se a massa volúmica do betão normal, ou seja, 2400kg/m^3 .

Tabela 9 – Características do painel sandwich de BACRFA

Material	Espessura (mm)	Massa volúmica (Kg/m ³)	Massa (Kg/m ²)
Painel BACRFA (ext.)	60	2400	144
Isolamento (EPS)	60	14	0,88
Painel BACRFA (int.)	60	2400	144
		Total	288,84

Admitindo que se trata de um elemento simples recorrendo à equação (5) que representa a lei experimental da massa a 500Hz, determina-se o índice de atenuação sonora. Assim para uma massa de 288,84kg/m² o índice de atenuação sonora, R₅₀₀, será igual a 46,29dB.

Para a situação de se considerar o painel como um elemento duplo, para o mesmo valor de massa, recorrendo à equação (7) admitindo que o valor de Dif igual a 4, o índice de atenuação sonora, R₅₀₀, será igual a 50,29dB.

A determinação das frequências críticas e respetivas quebras podem ser obtidas através dos valores proposto por Meisser apresentados na Tabela 34, dividindo a frequência critica pela espessura do elemento, equação (11).

Na Tabela 10 encontram-se listados os valores das frequências críticas e as respetivas quebras.

Tabela 10 – Frequências críticas do painel sandwich e respetivas quebras

Material	Frequência crítica para uma espessura de 1cm	f _c	Quebra de isolamento por efeito de coincidência
Painel BACRFA (ext.)	1800	300	8
Isolamento (EPS)	14000	2333	5
Painel BACRFA (int.)	1800	300	8

Considerando o painel como um elemento duplo, as quebras devidas modos próprios de vibração por flexão transversal do painel não foram considerados uma vez que o painel sandwich apresenta espessura considerável e as quebras se verificam em frequências fora da zona audível.

Conhecendo o valor das perdas internas, é então possível traçar a curva de estimativa de isolamento sonoro para o painel sandwich, para situação de se considerar um elemento simples (Figura 70) e para a situação de se considerar como um elemento duplo (Figura 71).

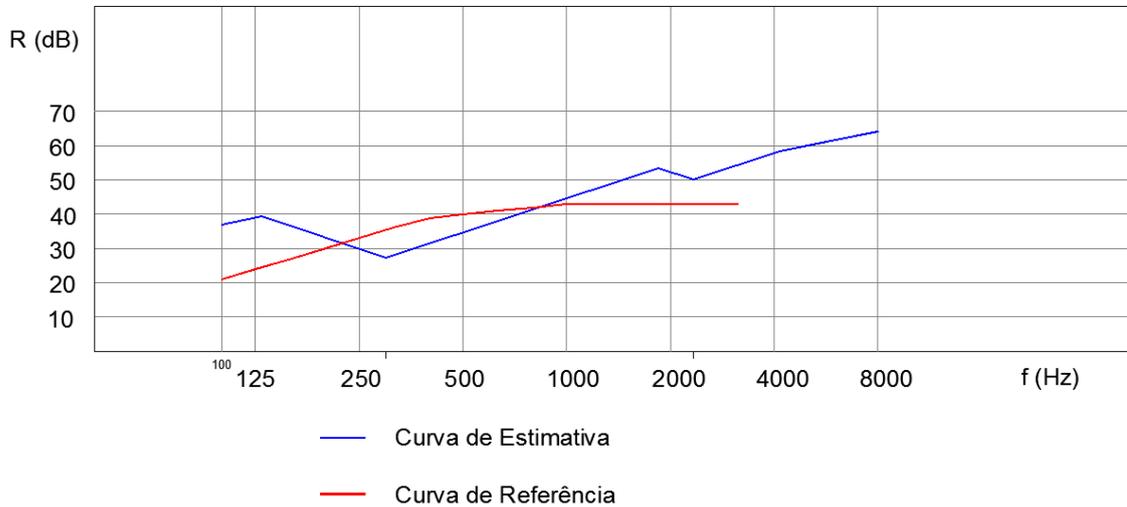


Figura 70 – Curva de estimativa de isolamento sonoro para o painel sandwich, considerando elemento simples.

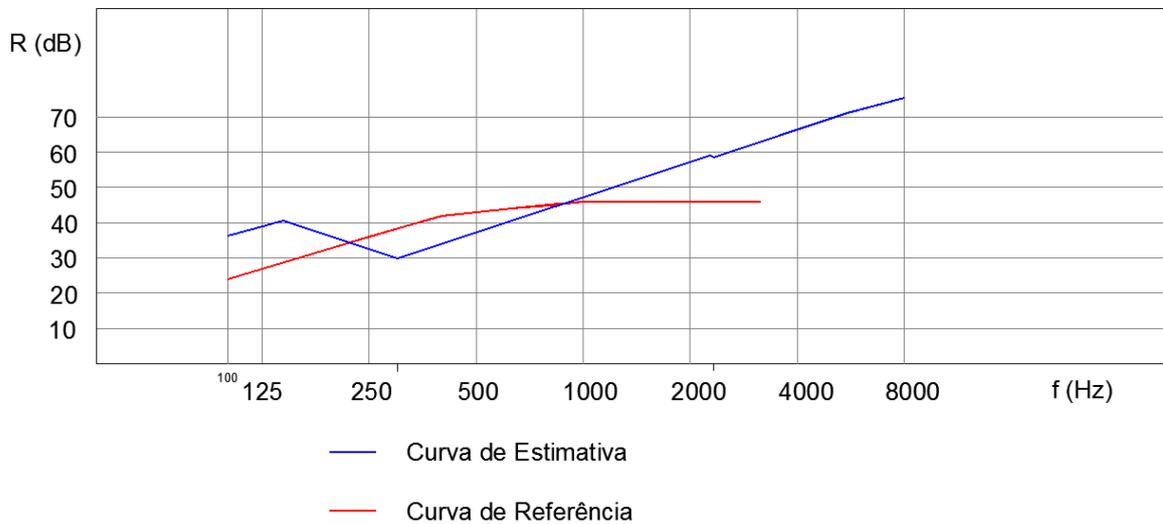


Figura 71 - Curva de estimativa de isolamento sonoro para o painel sandwich, considerando elemento duplo.

Sobrepondo a curva de referência, da norma EN ISO 717-1:1996 (CEN, 1996a), com a curva de valores estimados, uma vez ajustada a curva de referência, o índice de redução sonora ponderado, R_w , é dado pelo valor da ordenada da curva de referência para a frequência de 500Hz, assim na situação de se considerar o painel como um elemento simples o valor de R_w

será igual a 40dB e na situação de o considerar como um elemento duplo o valor de R_w será igual a 43dB (ver Anexo I).

4.1.1.2. Envidraçado

Admitindo um envidraçado duplo de tipologia 4 (10) 4 (mm), ou seja, com um pano de 4mm em ambas as faces e uma caixa-de-ar de 10 mm. Para efeitos de previsão sonora, considerou-se a situação mais desfavorável, ou seja, desprezou-se a contribuição da caixilharia considerando assim toda a superfície da janela envidraçada.

A Tabela 11 apresenta o valor das características dos diferentes elementos que constituem o envidraçado.

Tabela 11 – Características do envidraçado duplo – 4 (6) 4 (mm)

Material	Espessura (mm)	Massa volúmica (Kg/m^3)	Massa (Kg/m^2)
Vidro 4mm	4	2500	10
Caixa-de-ar	10	0	0
Vidro 4mm	4	2500	10
		Total	20

Como se trata de um elemento duplo, recorrendo à equação (6), para elementos com menos de 200kg/m^2 , que representa a lei experimental da massa a 500Hz, e admitindo um valor de Dif igual a 2, uma vez que trata-se de um elemento com caixa-de-ar, mas sem material absorvente no seu interior. Nestas condições o índice de atenuação sonora é igual a 32,70dB.

Por se tratar de um elemento de espessura reduzida, consideram-se os modos próprios de vibração por flexão transversal do painel. No caso da habitação modular em estudo, existem dois tipos de área de envidraçado diferente.

Recorrendo à expressão (9) para determinar as frequências relativas aos modos próprios de vibração por flexão transversal do painel e à expressão (10) para determinar a rigidez das placas, admitindo um módulo de elasticidade igual a 70GPa, um coeficiente de Poisson igual a 0,25 e, considerando apenas os primeiros modos de vibração o valor da rigidez dos painéis

será igual a 398,22N.m. Na Tabela 12 apresentam-se os valores das frequências próprias de vibração devidas à flexão transversal do painel.

Tabela 12 – Frequências próprias de vibração, relativas aos modos próprios de vibração por flexão transversal do painel

	a (m) (comprimento)	b (m) (largura)	$f_{1,1}$	$f_{1,2}$	$f_{2,1}$	$f_{2,2}$
Janela 1	1,2	1,19	13,88	20,88	20,77	27,77
Janela 2	0,9	1,19	19,24	26,24	31,48	38,47

Uma vez que as frequências próprias de vibração se encontram fora da zona audível, podem ser desprezadas.

A frequência de ressonância não foi considerada, uma vez que a área de envidraçado é inferior a 10m².

Tal como para o painel sandwich, o valor da frequência crítica pode ser obtida através de valores tabelados propostos por Meisser, dividindo a frequência crítica pela espessura do elemento.

Assim com base nos valores propostos por Meisser, na Tabela 13 encontram-se listados os valores das frequências críticas e as respetivas quebras.

Tabela 13 - Frequências críticas do envidraçado e respetivas quebras

Material	Frequência crítica para uma espessura de 1cm	f_c	Quebra de isolamento por efeito de coincidência
Vidro exterior - 4mm	1200	10	3000
Caixa-de-ar	0	0	0
Vidro interior - 4mm	1200	10	3000

Sabendo o valor das perdas internas, é então possível traçar a curva de estimativa de isolamento sonoro para o envidraçado (Figura 72).

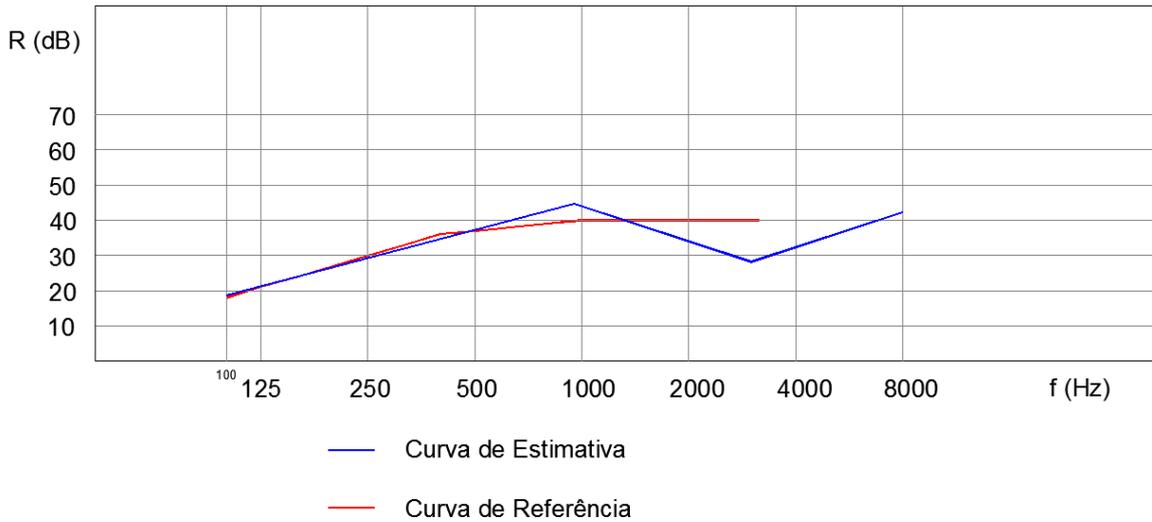


Figura 72 - Curva de estimativa de isolamento sonoro para o envidraçado.

Sobrepondo a curva de referência, da norma EN ISO 717-1:1996 (CEN, 1996a), com a curva de valores estimados, após o ajustamento, o índice de redução sonora ponderado, R_w , é obtido pelo valor da ordenada da curva de referência para a frequência de 500Hz, portanto R_w é igual a 37dB (ver Anexo I).

4.1.1.3. Portas

A Tabela 14 apresenta algumas das características genéricas de uma porta em contraplacado de madeira, admite-se que as duas portas exteriores presentes na casa modular são iguais, diferenciando apenas na sua área de superfície.

Tabela 14 – Características genéricas de uma porta em contraplacado

Material	Espessura (mm)	Massa Volúmica (Kg/m ³)	Massa (Kg/m ²)
Porta em contraplacado	35	600	21

Por se tratar de um elemento simples, recorrendo à equação (4), que representa a lei experimental da massa a 500Hz, obtém-se um índice de atenuação sonora igual a 30,99dB.

O valor da frequência crítica pode ser obtida através de valores tabelados propostos por Meisser, dividindo a frequência crítica pela espessura do elemento. Sendo assim, na Tabela 15 encontra-se o valor da frequência crítica e a respetiva quebra.

Tabela 15 – Frequência crítica e respetiva quebra do elemento porta

Material	Frequência crítica para uma espessura de 1cm	f_c	Quebra de isolamento por efeito de coincidência
Contraplacado 35mm	12000	3429	6

A curva de estimativa de isolamento sonoro para a porta em contraplacado é apresentada na Figura 73.

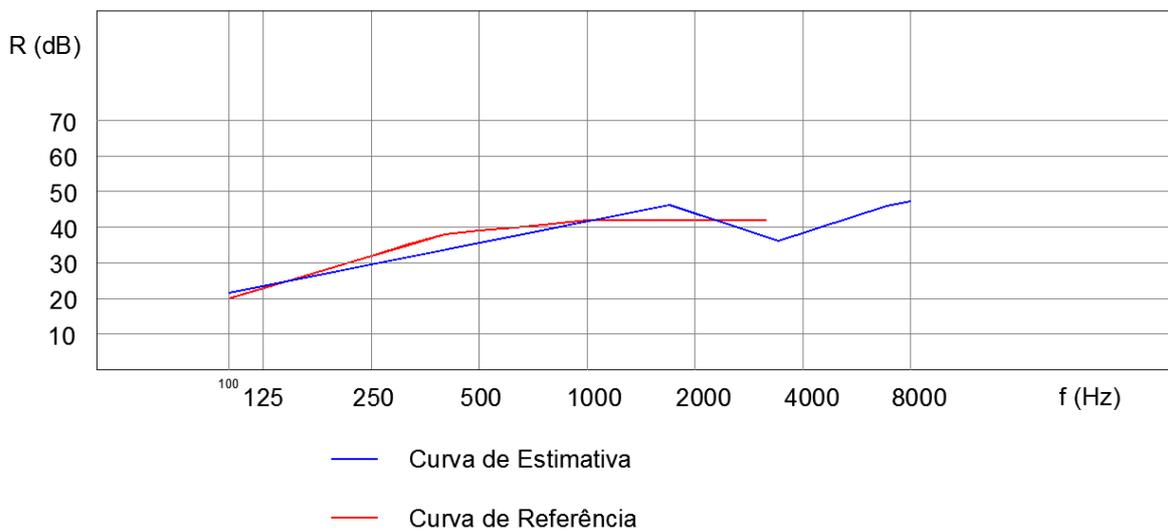


Figura 73 - Curva de estimativa de isolamento sonoro para porta em madeira (35mm)

Sobrepondo a curva de referência, da norma EN ISO 717-1:1996 (CEN, 1996a), com a curva de valores estimados e após o ajustamento, pode obter-se o índice de redução sonora ponderado, R_w , pelo valor da ordenada da curva de referência para a frequência de 500Hz sendo R_w igual a 39dB (ver Anexo I).

4.1.1.4. Elementos Heterogéneos

No caso de elementos heterogéneos, o índice de redução sonora é obtido recorrendo à equação (15). O valor do índice de redução sonora é obtido em função do índice de redução de cada componente (envidraçado, painel e porta) e da sua área de superfície. Os valores do índice de redução sonora para o painel são os obtidos para a situação em que se considera o painel como um elemento simples, uma vez tratar-se da situação mais desfavorável.

Na Tabela 16 apresentam-se os valores das diferentes áreas de superfície dos diversos painéis que constituem elementos heterogéneos.

Tabela 16 – Área de superfície dos diferentes componentes dos elementos heterogéneos

		Painel A	Painel C	Painel F	Painel G	Painel J
Área (m ²)	Painel Sandwich	12,73	13,62	5,56	3,21	14,69
	Envidraçado	1,43	2,14	1,07	-	1,07
	Porta	1,60	-	-	1,80	-

A Tabela 17 apresenta o valor do índice de redução sonora para os diferentes painéis heterogéneos.

Tabela 17 – Índice de redução sonora para elementos heterogéneos

Frequência	Painel A			Painel C			Painel F			Painel G			Painel J		
	R global	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis	R global	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis	R global	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis	R global	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis	R global	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis
100	27	20	0	27	20	0	26	20	0	26	21	0	30	21	0
125	29	23	0	30	23	0	29	23	0	28	24	0	32	24	0
160	31	26	0	31	26	0	31	26	0	30	27	0	33	27	0
200	31	29	0	32	29	0	31	29	0	30	30	0	32	30	0
250	30	32	2	30	32	2	30	32	2	30	33	3	30	33	3
315	29	35	6	28	35	7	28	35	7	29	36	7	28	36	8
400	32	38	6	32	38	6	32	38	6	32	39	7	32	39	7
500	35	39	4	35	39	4	35	39	4	35	40	5	35	40	5
630	38	40	2	38	40	2	38	40	2	38	41	3	38	41	3
800	41	41	0	42	41	0	42	41	0	41	42	1	42	42	0
1000	44	42	0	45	42	0	45	42	0	43	43	0	45	43	0
1250	45	42	0	45	42	0	45	42	0	44	43	0	46	43	0
1600	46	42	0	46	42	0	45	42	0	47	43	0	47	43	0
2000	44	42	0	42	42	0	42	42	0	47	43	0	45	43	0
2500	40	42	2	39	42	3	39	42	3	44	43	0	42	43	1
3150	39	42	3	38	42	4	37	42	5	42	43	1	40	43	3
	Σ Desvios Favoráveis		25	Σ Desvios Favoráveis		28	Σ Desvios Favoráveis		29	Σ Desvios Favoráveis		28	Σ Desvios Favoráveis		30

Após o ajustamento da curva de referência, o índice de redução sonora ponderado, R_w , é dado pelo valor da ordenada da curva de referência para a frequência de 500Hz. Assim sendo o índice de redução, R_w do Painel A, C e F será igual a 39dB e 40dB para o Painel G e J.

Perante os resultados obtidos verifica-se que nos painéis A, C e F há um decréscimo do índice de redução na ordem do 1dB. Um dos fatores responsáveis por esta diferença será a presença dos envidraçados. Estes apresentam um índice de redução inferior (37dB) ao índice de redução do painel (40dB).

No painel J não existe alteração do índice de redução do painel enquanto elemento homogéneo. Uma vez que a área de superfície do envidraçado é muito menor que a área de superfície de painel, o índice de redução não vai sofrer grandes alterações.

No painel G também não se verifica um decréscimo do valor de índice de isolamento, apesar de porta ocupar 25% da superfície do painel. Uma das razões será o elevado valor de índice de redução obtido para a porta (39dB). Uma vez que o modelo misto se baseia na lei da massa e frequência, devido à reduzida massa da porta, este valor de índice pode não ser o mais correto e estar sobredimensionado.

4.1.2. Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea Padronizado entre o Interior e o Exterior

No cálculo do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior e interior a área de superfície dos painéis que constituem os elementos heterogéneos de separação entre o interior e exterior, do compartimento em causa, vai ser diferente daquela considerada no cálculo do índice para o painel inteiro (ponto 4.1.1.4). Sendo assim, recorrendo à equação (16) é necessário um novo cálculo do índice de redução sonora.

Na Tabela 18 apresentam-se os valores das diferentes áreas de superfície dos diversos painéis que constituem os elementos de separação entre o exterior e o interior dos diferentes compartimentos da habitação modular.

Tabela 18 – Área de superfície dos diferentes painéis

		Sala/Cozinha	Quarto 1	Quarto 2	Quarto 3
Área (m ²)	Painel Sandwich	12,73	6,93	6,68	9,13
	Envidraçado	1,43	1,07	1,07	1,07
	Porta	1,60	-	-	-

Com base nos valores da tabela anterior a Tabela 19 apresenta o valor do índice de redução sonora para os diferentes painéis.

Tabela 19 – Índice de redução sonora dos diferentes painéis

																		
				Sala/Cozinha			Quarto 1			Quarto 2			Quarto 3					
Frequência	R painel	R envidraçado	R porta	R global	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis	R global	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis	R global	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis	R global	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis			
100	37	19	22	27	20	0	27	20	0	27	20	0	28	20	0			
125	39	21	24	29	23	0	30	23	0	30	23	0	31	23	0			
160	36	24	26	31	26	0	32	26	0	31	26	0	32	26	0			
200	33	27	28	31	29	0	32	29	0	32	29	0	32	29	0			
250	30	29	30	30	32	2	30	32	2	30	32	2	30	32	2			
315	28	32	32	29	35	6	28	35	7	28	35	7	28	35	7			
400	31	35	34	32	38	6	32	38	6	32	38	6	32	38	6			
500	35	37	36	35	39	4	35	39	4	35	39	4	35	39	4			
630	38	40	38	38	40	2	38	40	2	38	40	2	38	40	2			
800	41	43	40	41	41	0	42	41	0	42	41	0	42	41	0			
1000	45	44	42	44	42	0	45	42	0	45	42	0	45	42	0			
1250	46	43	42	45	42	0	45	42	0	45	42	0	45	42	0			
1600	49	39	44	46	42	0	46	42	0	46	42	0	46	42	0			
2000	52	34	44	44	42	0	42	42	0	42	42	0	43	42	0			
2500	51	31	41	40	42	2	39	42	3	39	42	3	40	42	2			
3150	55	29	37	39	42	3	38	42	4	37	42	5	39	42	3			
Σ Desvios Favoráveis						25	Σ Desvios Favoráveis			28	Σ Desvios Favoráveis			28	Σ Desvios Favoráveis			26

Na previsão do isolamento sonoro a sons de condução aérea, é necessário relacionar o resultado obtido, índice de redução sonora ponderado ou aparente, com o índice utilizado na legislação em vigor. No caso da legislação portuguesa, o parâmetro usado para avaliar o desempenho acústico de paredes de fachada é o índice de isolamento sonoro a sons de

condução aérea entre o exterior e o interior padronizado, $D_{2m,nT,w}$, que pode ser obtido através da equação (19).

Admitindo um fator de correção da transmissão marginal, ΔTM , igual a 2 dB e sabendo que o fator de correção devido à forma da fachada é nulo para certos painéis e não aplicável para outros, obtém-se o valor do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior e interior padronizado.

A Tabela 20 apresenta os valores da área e do volume dos diferentes compartimentos da casa modular.

Tabela 20 - Áreas e Volumes dos diferentes compartimentos

	Área Compartimento (m ²)	Volume Compartimento (m ³)
Sala/Cozinha	38,60	106,15
Quarto 1	11,38	31,30
Quarto 2	13,37	36,77
Quarto 3	10,42	28,66
WC	5,11	14,05

Na Tabela 21 resume-se assim todos os parâmetros necessários à obtenção do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado, entre o exterior e interior, para os diferentes compartimentos da habitação modular em estudo.

Tabela 21 - Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior e interior padronizado, $D_{2m,nT,w}$, para os diferentes compartimentos

	R_w (dB)	R'_w (dB)	S (m ²)	V (m ³)	ΔL_{fs}	$D_{2m,nT,w}$
Sala/Cozinha → Exterior	39	37	15,76	106,15	0	40
Quarto 1 → Exterior	39	37	8,00	31,30	0	38
Quarto 2 → Exterior	39	37	7,76	36,77	0	39
Quarto 3 → Exterior	39	37	10,20	28,66	0	37

Segundo a legislação portuguesa em vigor, RRAE (RRAE, 2008), para zonas sensíveis o valor exigido para o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o interior e o exterior, $D_{2m,nT,w}$, deve ser igual ou superior a 28dB para zonas sensíveis. No caso de zonas mistas o valor de $D_{2m,nT,w}$ deve ser igual ou superior a 33dB. Face aos resultados obtidos,

verifica-se que com o envidraçado e portas selecionados a habitação modular em estudo cumpre com a legislação portuguesa em vigor.

4.1.3. Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea Padronizado entre Espaços Interiores

Embora não exista na legislação portuguesa exigências acústicas entre espaços interiores de uma fração, neste subcapítulo será feita uma previsão deste índice entre alguns dos espaços interiores da habitação.

Na eventualidade desta tipologia de habitações seja construída em banda, efetuou-se um estudo do índice de isolamento sonoro entre os diferentes compartimentos de fogos que podem ter elementos de separação em conjunto. Foi adotada a situação mais desfavorável, isto é, o elemento de separação entre fogos adjacente é único e comum. Assim, na Figura 74 encontram-se representadas duas possíveis configurações de disposição em banda.



Figura 74 – Diferentes conjugações da habitação modular em banda

Para isso admitiu-se que os elementos de separação entre quartos e WC eram constituídos por paredes duplas de gesso cartonado com lã de rocha no seu interior. O valor do índice de redução sonora da parede dupla de gesso cartonado e da parede em betão revestido a fibras, que separa o WC e Quarto 1 da Sala/Cozinha, foi obtido com recurso à base de dados do software Acoubat, sendo para ambos os elementos igual a 46dB e 59dB, respetivamente.

Partindo da equação (18), e admitindo um fator de correção relativo à transmissão marginal igual a 3 na situação em que o elemento de separação é o painel sandwich ou a parede dupla de gesso cartonado e igual a 5 quando o elemento de separação é uma parede de betão revestido a fibras (Sala/Cozinha → Quarto 1), uma vez que a massa dos elementos adjacente é relativamente próxima à massa do elemento separador, é possível calcular o índice de

isolamento sonoro entre os diferentes espaços interiores e compartimentos de fogos adjacentes, o resultado encontra-se resumido na Tabela 22 e Tabela 23.

Tabela 22 - Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre espaços interiores

		Rw (dB)	Δ TM	R'w (dB)	S (m ²)	V (m ³)	D _{nT,w} (dB)
Entre Espaços Interiores	Sala/Coz. (emissor) Quarto1 (recetor)	59	5	54	5,25	31,30	57
	Quarto 2 (emissor) Quarto 1 (recetor)	46	3	43	10,59	31,40	43
	Quarto 1 (emissor) Quarto 2 (recetor)	46	3	43	10,59	36,77	43
	Quarto 3 (emissor) Quarto 2 (recetor)	46	3	43	9,32	36,77	44
	WC (emissor) Quarto 3 (recetor)	46	3	43	6,79	28,66	44

Tabela 23 - Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos de fogos adjacentes

		Rw (dB)	Δ TM	R'w (dB)	S (m ²)	V (m ³)	D _{nT,w} (dB)
Entre Compartimentos de fogos adjacentes	Quarto 2 Habit.1 (recetor) Sala/Coz. Habit.2 (emissor)	40	3	37	12,4	36,77	37
	Sala/Coz. Habitação 1 (recetor) Sala/Coz. Habitação 2 (emissor)	40	3	37	15,51	106,15	40
	Quarto 3 Habitação 1 (recetor) Sala/Coz. Habitação 2 (emissor)	40	3	37	8,61	28,66	37

Perante os resultados obtidos, na hipotética situação de dispor este tipo de habitação em banda, verificou-se que a habitação modular em estudo não cumpre com os requisitos definidos no RRAE (RRAE, 2008), uma vez que, o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos de fogos adjacentes, D_{nT,w}, deve ser igual ou superior a 50dB.

4.1.4. Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea Padronizado entre o Exterior e Interior, com recurso ao Acoubat Sound

Sabendo que o modelo misto tem por base a lei da massa e frequência, e que os envidraçados e portas apresentam massa reduzida, os resultados obtidos para estes elementos podem não ser

os mais corretos e estarem portanto sobredimensionados devido à sua reduzida massa. Recorrendo à base de dados do Acoubat que contém o comportamento acústico de diversas soluções construtivas, retiram-se os valores da curva de isolamento sonoro para diferentes tipos de envidraçados, permitindo assim uma análise mais rigorosa do comportamento acústico da habitação considerando o desempenho de diferentes tipos de caixilharias e envidraçados.

4.1.4.1. Envidraçado tipo 4 (12) 4 com caixilharia em PVC

Para um envidraçado com caixilharia em PVC e vidro duplo de 4+4mm com caixa-de-ar de 12mm e uma porta de núcleo denso (Figura 75), com base na curva obtida para o painel sandwich é então possível calcular o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea.

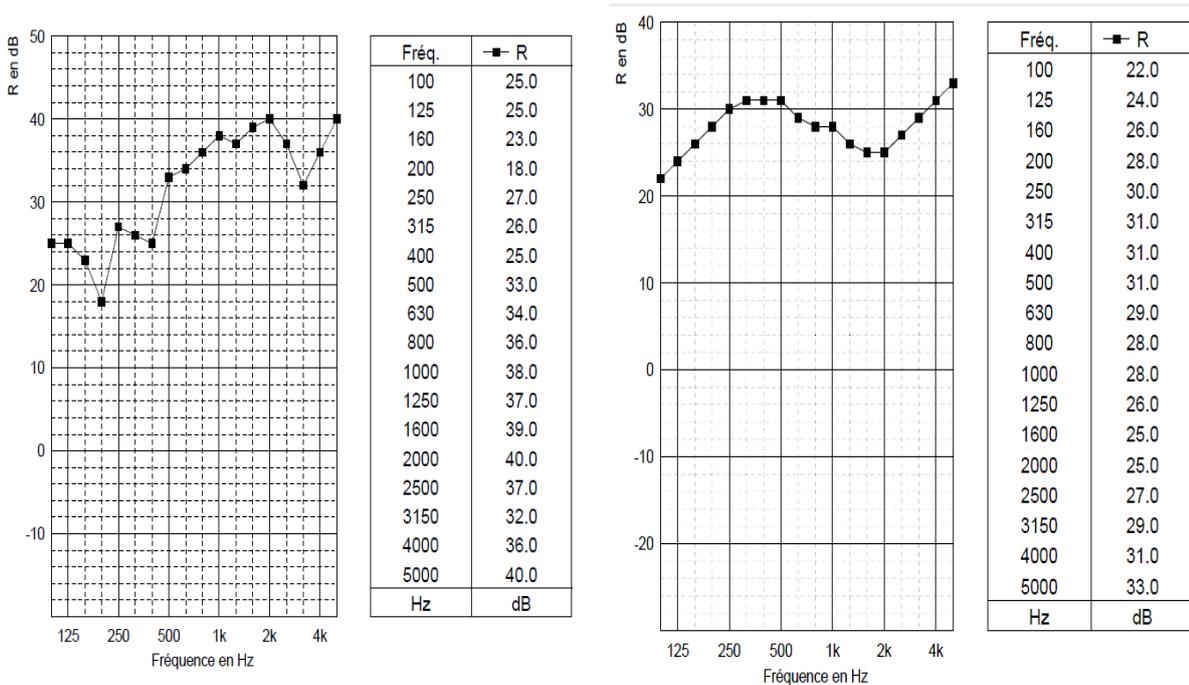


Figura 75 - Índice de atenuação sonora da janela, à esquerda e da porta, à direita

Assim para os elementos heterogéneos, o índice de redução sonora é obtido recorrendo à equação (16). O valor deste índice de redução sonora vai ser obtido em função do índice de redução de cada componente (envidraçado, painel e porta) e da sua área de superfície.

Na Tabela 24 encontram-se os índices de redução sonora para os diferentes painéis heterogéneos que constituem os elementos de separação entre o interior dos compartimentos e o exterior.

Tabela 24 - Índice de redução sonora para elementos heterogéneos

																											
				Sala/Cozinha			Quarto 1			Quarto 2			Quarto 3														
Frequência	R painel	R envidraçado	R porta	R global	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis	R global	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis	R global	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis	R global	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis												
100	37	25	22	30	16	0	32	20	0	27	20	0	33	20	0												
125	39	25	24	31	19	0	33	23	0	30	23	0	34	23	0												
160	36	23	26	30	22	0	31	26	0	31	26	0	31	26	0												
200	33	18	28	27	25	0	26	29	3	32	29	0	27	29	2												
250	30	27	30	30	28	0	29	32	3	30	32	2	30	32	2												
315	28	26	31	28	31	3	28	35	7	28	35	7	28	35	7												
400	31	25	31	30	34	4	30	38	8	32	38	6	30	38	8												
500	35	33	31	34	35	1	34	39	5	35	39	4	34	39	5												
630	38	34	29	35	36	1	37	40	3	38	40	2	37	40	3												
800	41	36	28	36	37	1	40	41	1	42	41	0	40	41	1												
1000	45	38	28	37	38	1	43	42	0	45	42	0	43	42	0												
1250	46	37	26	35	38	3	43	42	0	45	42	0	44	42	0												
1600	49	39	25	35	38	3	46	42	0	46	42	0	46	42	0												
2000	52	40	25	35	38	3	47	42	0	42	42	0	48	42	0												
2500	51	37	27	36	38	2	45	42	0	39	42	3	46	42	0												
3150	55	32	29	37	38	1	41	42	1	37	42	5	42	42	0												
Σ Desvios Favoráveis						22	Σ Desvios Favoráveis						31	Σ Desvios Favoráveis						31	Σ Desvios Favoráveis						28

Com base nos valores das áreas de superfície dos painéis e volume dos compartimentos, na Tabela 25, encontra-se os valores do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado, entre o exterior e interior, para todos os compartimentos da habitação modular em estudo.

Tabela 25 - Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior e interior padronizado, $D_{2m,nT,w}$, para os diferentes compartimentos com envidraçado 4 (12) 4

	R_w (dB)	R'_w (dB)	S (m ²)	V (m ³)	ΔL_{fs}	$D_{2m,nT,w}$
Sala/Cozinha → Exterior	35	33	15,76	106,15	0	36
Quarto 1 → Exterior	39	37	8,00	31,30	0	38
Quarto 2 → Exterior	39	37	7,76	36,77	0	39
Quarto 3 → Exterior	39	37	10,20	28,66	0	37

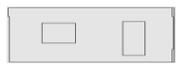
Tendo em conta os resultados obtidos verificou-se que a habitação cumpre os requisitos exigidos, uma vez que a legislação portuguesa em vigor exige um valor de índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o interior e o exterior, $D_{2m,nT,w}$, igual ou superior a 28dB em zonas sensíveis e no caso de zonas mistas igual ou superior a 33dB.

4.1.4.2. Envidraçado tipo 4 (14) 8 com caixilharia em PVC

Foi também efetuado o estudo do desempenho acústico dos painéis de fachada com um envidraçado com caixilharia em PVC e vidro duplo de 4mm (face exterior) e 8mm (face interior) com caixa-de-ar de 14mm e novamente uma porta de núcleo denso. Com base na curva obtida para o painel sandwich torna-se possível calcular então o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea das diferentes paredes de fachada.

Para os elementos heterogéneos, o índice de redução sonora, é obtido recorrendo à equação (16). Na Tabela 26 encontram-se listados os índices de redução sonora para os diferentes painéis que constituem os elementos de separação entre o interior e o exterior dos diversos compartimentos da habitação.

Tabela 26 - Índice de redução sonora para elementos heterogéneos

																				
				Sala/Cozinha			Quarto 1			Quarto 2			Quarto 3							
Frequência	R painel	R envidraçado	R porta	R global	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis	R global	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis	R global	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis	R global	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis					
100	37	27	22	30	17	0	34	21	0	34	21	0	34	21	0					
125	39	20	24	28	20	0	28	24	0	28	24	0	29	24	0					
160	36	26	26	32	23	0	33	27	0	33	27	0	33	27	0					
200	33	22	28	30	26	0	29	30	1	29	30	1	30	30	0					
250	30	31	30	30	29	0	30	33	3	30	33	3	30	33	3					
315	28	31	31	28	32	4	28	36	8	28	36	8	28	36	8					
400	31	34	31	32	35	3	32	39	7	32	39	7	32	39	7					
500	35	35	31	34	36	2	35	40	5	35	40	5	35	40	5					
630	38	38	29	36	37	1	38	41	3	38	41	3	38	41	3					
800	41	40	28	36	38	2	41	42	1	41	42	1	41	42	1					
1000	45	40	28	37	39	2	44	43	0	44	43	0	44	43	0					
1250	46	41	26	35	39	4	45	43	0	45	43	0	45	43	0					
1600	49	40	25	35	39	4	46	43	0	46	43	0	47	43	0					
2000	52	41	25	35	39	4	48	43	0	48	43	0	49	43	0					
2500	51	40	27	37	39	2	47	43	0	47	43	0	48	43	0					
3150	55	39	29	38	39	1	47	43	0	47	43	0	48	43	0					
Σ Desvios Favoráveis						28	Σ Desvios Favoráveis						28	Σ Desvios Favoráveis						28

Na Tabela 27 encontram-se os valores do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado entre o exterior e interior, bem como um resumo de todos os parâmetros necessários à obtenção deste mesmo índice.

Tabela 27 - Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior e interior padronizado, $D_{2m,nT,w}$, para os diferentes painéis com envidraçado 4 (14) 18

	R_w (dB)	R'_w (dB)	S (m ²)	V (m ³)	ΔL_{fs}	$D_{2m,nT,w}$
Sala/Cozinha	36	34	15,76	106,15	0	37
Quarto 1	40	38	8,00	31,30	0	39
Quarto 2	40	38	7,76	36,77	0	40
Quarto 3	40	38	10,20	28,66	0	38

Perante os resultados, a habitação cumpre os requisitos mínimos exigidos, uma vez que a legislação portuguesa em vigor exige um valor de índice de isolamento sonoro a sons de

condução aérea entre o interior e o exterior, $D_{2m,nT,w}$, igual ou superior a 28dB em zonas sensíveis e no caso de zonas mistas igual ou superior a 33dB.

4.1.5. Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea – Acoubat Sound

Com recurso ao programa de cálculo de isolamento sonoro, Acoubat Sound, e com recurso à curva de estimativa de isolamento sonoro obtida através do método misto para o painel sandwich, calculou-se o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado entre espaços interiores, $D_{nT,w}$, e o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado entre espaços interiores e exteriores, $D_{2m,nT,w}$.

Com este estudo pretendeu-se complementar os resultados anteriormente obtidos pelo modelo misto, uma vez que o Acoubat avalia o efeito da transmissão marginal de uma forma mais detalhada, permitindo assim uma melhor avaliação do desempenho acústico da habitação modular de custos controlados.

Foi também realizada uma comparação entre o desempenho acústico da habitação modular, com a solução de painel sandwich de BACRFA e para uma habitação equivalente em que são utilizadas as soluções construtivas convencionais a nível nacional – paredes de alvenaria.

No Anexo II são apresentados os resultados do estudo/previsão do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o interior e exterior, e entre espaços interiores com recurso ao programa Acoubat Sound e sua base de dados, indicando todas as opções e simplificações tomadas na conceção dos modelos a introduzir no programa.

Os elementos de construção usados fazem parte da base de dados contida no Acoubat. Assim, na solução em estudo, para elementos construtivos de separação de quartos e hall foram usadas paredes duplas de gesso cartonado com lã mineral no seu interior, perfazendo uma espessura total de 100mm (15mm /70mm /15mm), uma laje de betão com 15cm para a laje térrea, envidraçados duplos de 4+4mm com 12mm de caixa-de-ar, porta exteriores de madeira com núcleo denso e portas interiores com interior alveolar.

As exceções foram os painéis sandwich que constituem as paredes de fachada do edifício e a laje de cobertura, onde as características dos elementos foram determinadas com recurso às curvas de estimativa de isolamento sonoro determinadas pelo método misto.

As soluções convencionais adotadas foram: paredes de fachada duplas, compostas por tijolo furado de 11cm, 5cm de lã mineral, tijolo furado de 11cm e 1,5cm de reboco dos dois lados; paredes interiores em tijolo furado de 11cm e 1,5cm de reboco dos dois lados; laje de cobertura aligeirada unidirecional com abobadilha cerâmica 25+5 cm e 1,5cm de gesso; a solução de envidraçados, portas e laje térrea é igual à adotada para a solução de habitação modular em estudo.

Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução Aérea entre interior e exterior

Na Tabela 28 estão representados os valores do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre interior e exterior para a situação de habitação modular constituída por painéis sandwich e para a hipotética situação da habitação ser constituída por soluções construtivas convencionais.

Tabela 28 – Índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre interior e exterior com recurso ao Acoubat Sound

	Painéis Sandwich	Soluções Convencionais
	$D_{2m,nT,w}$ (dB)	
Sala/Cozinha → Exterior	38	40
Quarto 1 → Exterior	39	42
Quarto 2 → Exterior	40	43
Quarto 3 → Exterior	38	41

Comparando os valores obtidos para a solução de painéis sandwich e os valores obtidos para a situação de soluções convencionais estes variam na ordem dos 3dB. As possíveis causas destas diferenças serão abordadas posteriormente aquando da análise de resultados.

Segundo a legislação em vigor, o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o interior e o exterior, $D_{2m,nT,w}$, de ser igual ou superior a 28dB em zonas sensíveis e no caso de zonas mistas igual ou superior a 33dB, sendo assim as habitações cumprem com os requisitos exigidos.

Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução Aérea entre espaços interiores

Na Tabela 29 estão representados os valores de índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre espaços interiores, considerando também a hipótese de disposição destas habitações em banda, para a situação da habitação modular ser constituída por painéis sandwich e para a situação hipotética da habitação ser constituída por soluções construtivas convencionais.

Tabela 29 - Índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre espaços interiores com recurso ao Acoubat

	Painéis Sandwich	Soluções Convencionais
	D _{nT,w} (dB)	
Sala/Cozinha → Quarto 1	38	42
Quarto 1 → Quarto 2	40	39
Quarto 2 → Quarto 1	39	38
WC → Quarto 3	39	39
Sala/Cozinha (Hab.1) → Sala/Cozinha (Hab.2)	41	51

Comparando os valores obtidos para a solução de painéis sandwich e os valores obtidos para a situação de soluções convencionais estes variam ligeiramente, com exceção da situação em que as habitações se dispõem em banda, neste caso a solução convencional é consideravelmente melhor.

Perante os resultados obtidos, verificou-se que a habitação modular, em banda, não cumpre com os requisitos, uma vez que, segundo a legislação portuguesa em vigor, o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos de fogos adjacentes, D_{nT,w}, deve ser igual ou superior a 50dB.

4.2. Comportamento Térmico

4.2.1. Avaliação do Desempenho Térmico

Neste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos, através da simulação dinâmica do desempenho térmico usando o EnergyPlus. São apresentadas a temperatura ambiente interior do edifício ao longo do ano, e o consumo de energia despendida para manter as condições de conforto exigidas (20°C no inverno e 25°C no verão). São apresentados os resultados do

comportamento térmico da habitação para a solução em painel sandwich e para a hipótese de a habitação ser executada com soluções construtivas tradicionais. É também realizada a análise comparativa do desempenho da habitação modular com painéis sandwich e com soluções construtivas tradicionais.

A título de exemplo apenas se apresentam os resultados para a zona da sala/cozinha, para a zona referente ao Quarto 2 e para a zona do hall de acesso aos quartos. Sendo que os restantes resultados da evolução da temperatura interior e das necessidades energéticas da habitação se apresentam no Anexo II.

4.2.1.1. Temperatura Ambiente Interior

Na Figura 76 e na Figura 77 apresentam-se a evolução da temperatura ambiente interior da habitação na zona da sala/cozinha, ao longo de um ano, para a solução em painel sandwich e para a solução convencional em alvenaria, sem sistema de climatização.

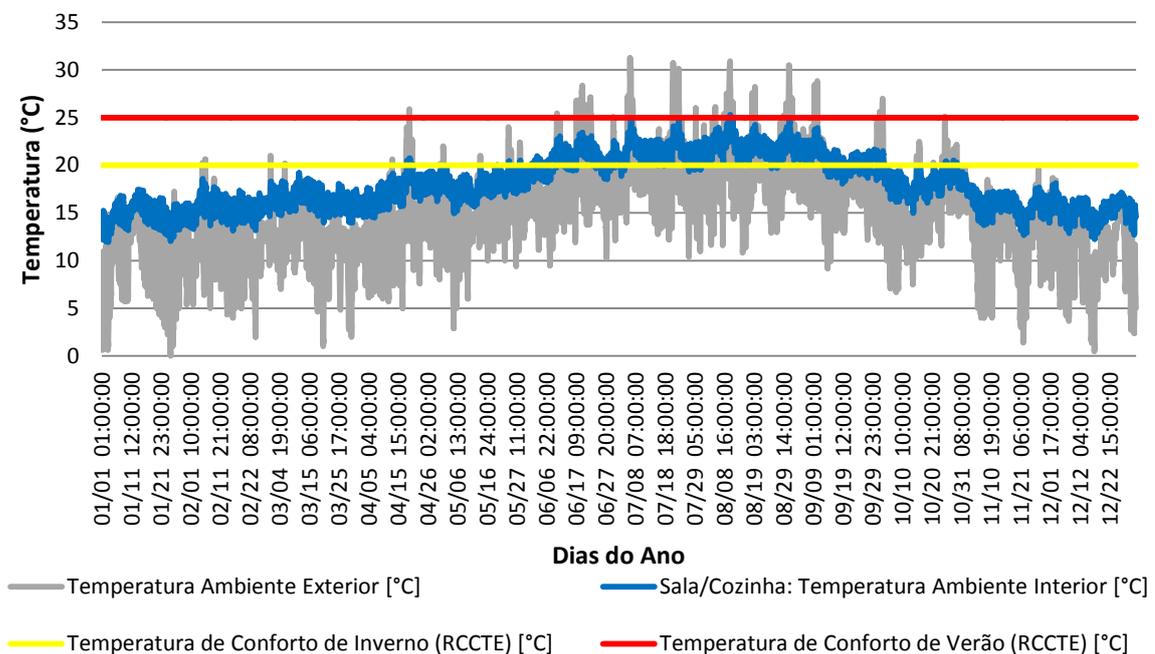


Figura 76 - Evolução da temperatura interior, na zona Sala/Cozinha, ao longo do ano – solução com painel sandwich

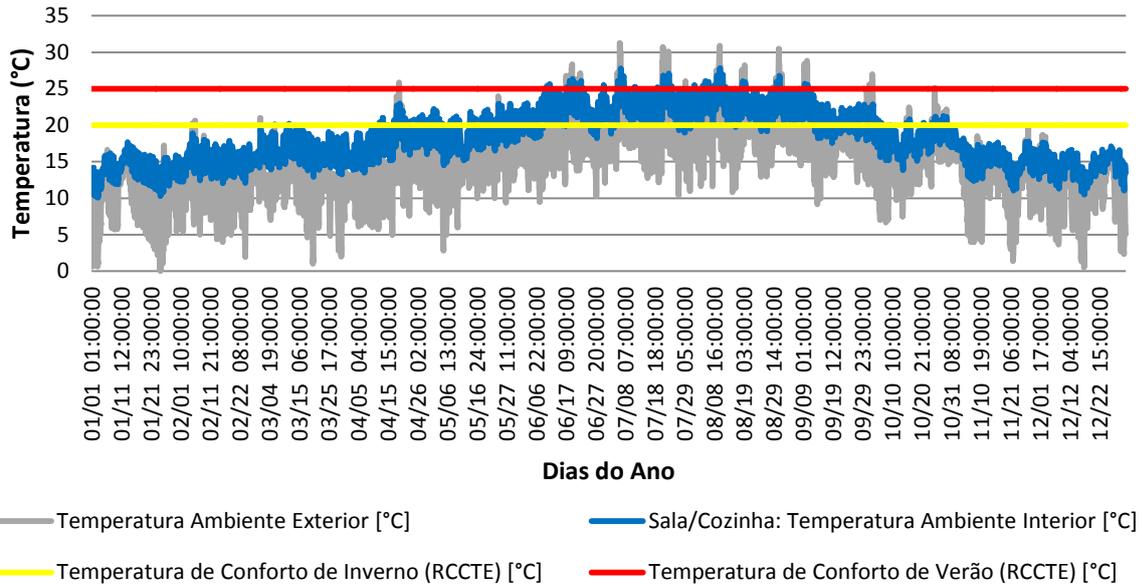


Figura 77 - Evolução da temperatura interior, na zona Sala/Cozinha, ao longo do ano - solução convencional

Da análise da Figura 76 e da Figura 77 verifica-se que a temperatura ambiente interior na estação de inverno é menor na solução convencional do que na solução em painel sandwich.

Na Figura 78 e Figura 79 apresentam-se os resultados da evolução da temperatura ao longo do ano, também para os dois tipos de solução, para a zona do Quarto 2, sem qualquer sistema AVAC.

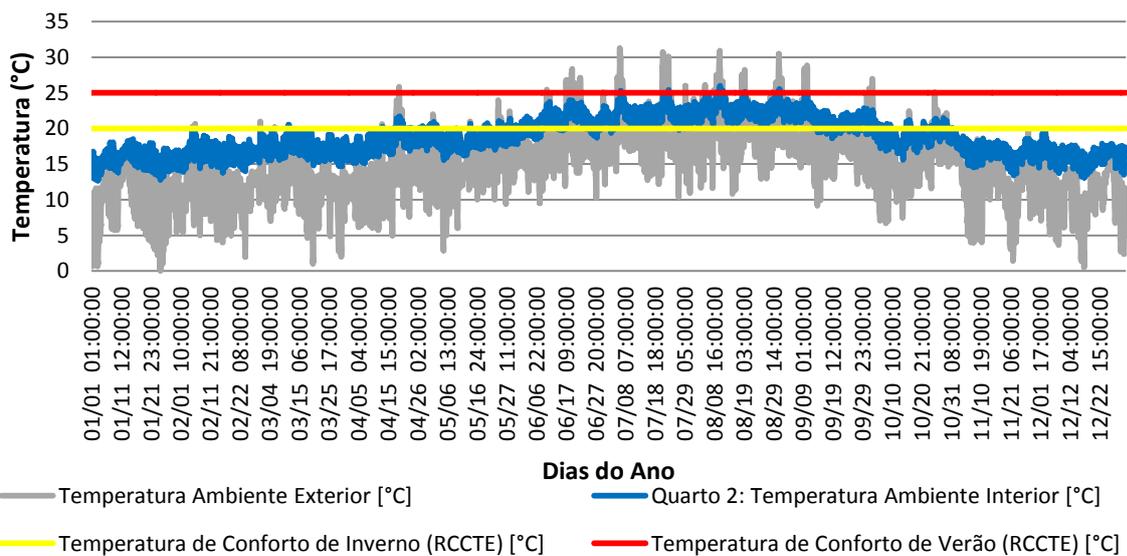


Figura 78 - Evolução da temperatura interior, na zona Quarto 2, ao longo do ano - solução com painel sandwich

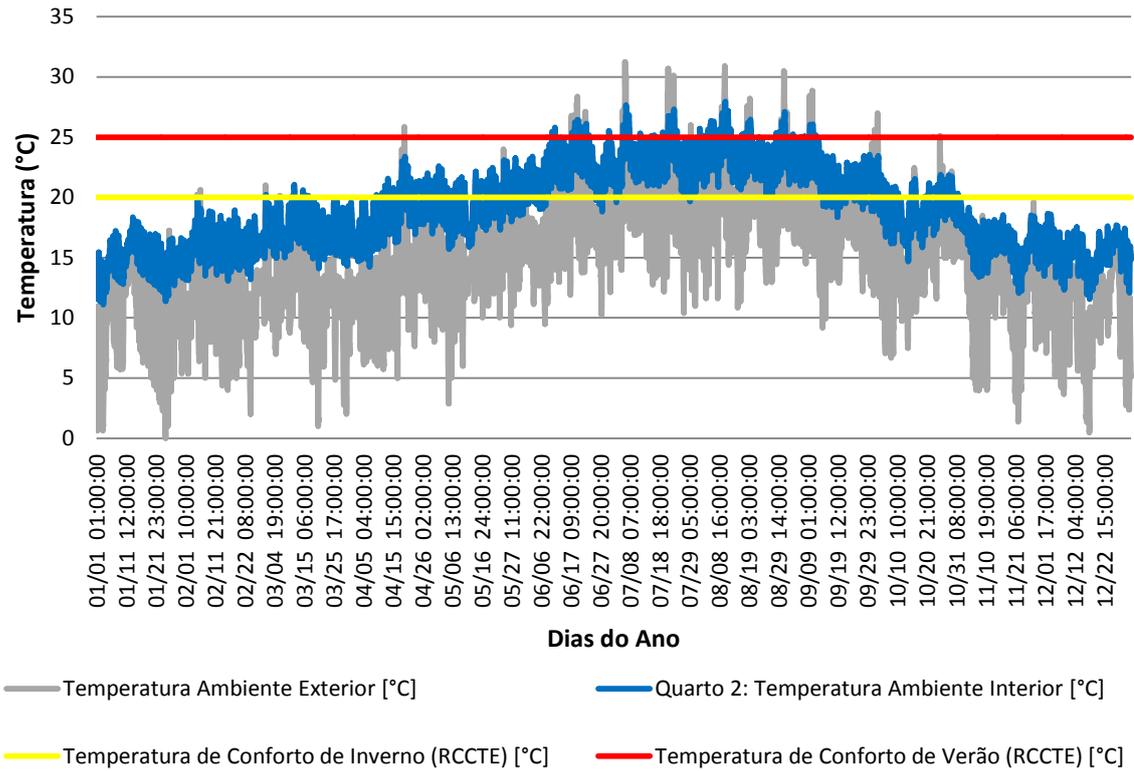


Figura 79 - Evolução da temperatura interior, na zona Quarto 2, ao longo do ano - solução convencional

Da análise da Figura 76 e da Figura 77 verifica-se que a temperatura de conforto de inverno é ultrapassada pontualmente na estação de inverno para as duas soluções.

Apesar de não ser uma zona de estar, na Figura 80 e na Figura 81 apresenta-se a evolução da temperatura interior da habitação na zona do hall de acesso aos quartos, ao longo de um ano, para a solução em painel sandwich e para a solução convencional em alvenaria, não se considerando qualquer equipamento que garanta as temperaturas de conforto.

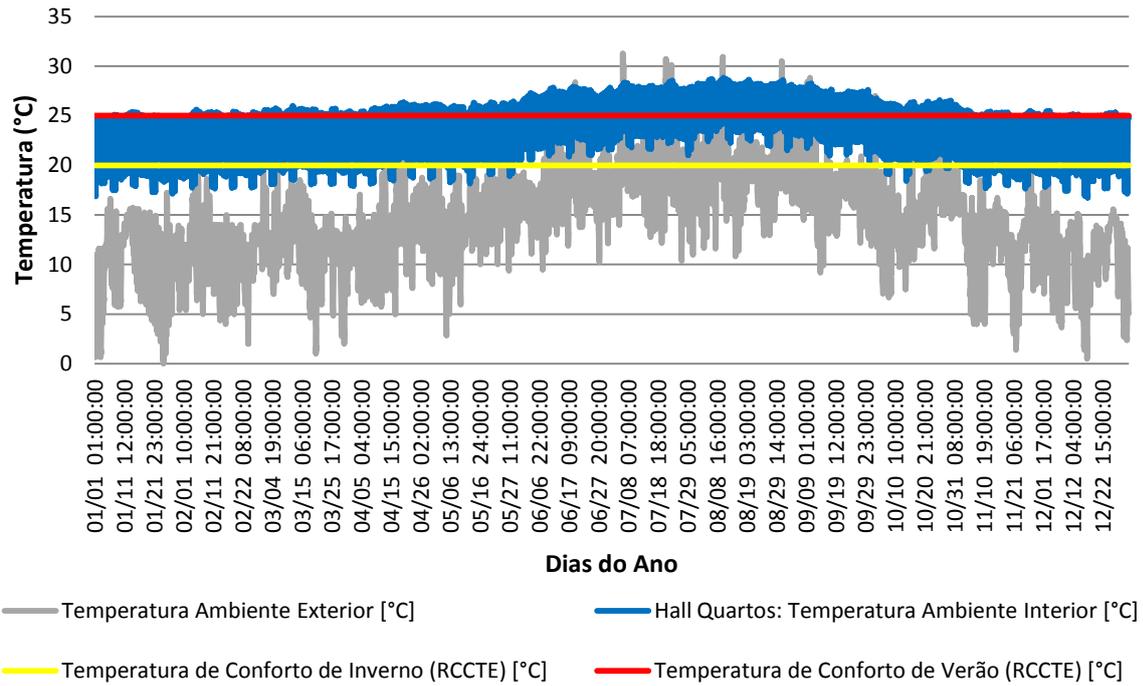


Figura 80 - Evolução da temperatura interior, na zona Hall Quartos, ao longo do ano - solução com painel sandwich

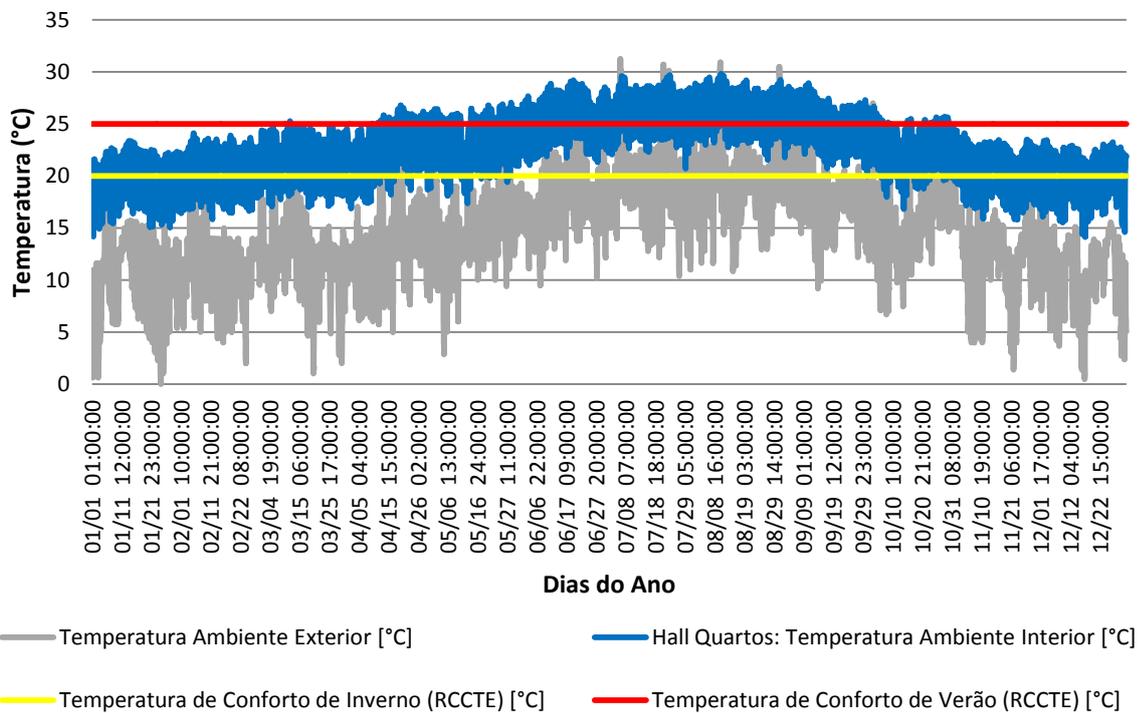


Figura 81 - Evolução da temperatura interior, na zona Hall Quartos, ao longo do ano - solução convencional

Analisando os resultados obtidos, verificou-se que durante o período de verão as temperaturas interiores da habitação, nas diferentes zonas, encontram-se essencialmente dentro da zona de temperaturas de conforto. Isto deve-se ao facto de no verão a temperatura exterior assumir valores próximos dos limites de referência para o conforto, contribuindo assim para que as temperaturas no interior da habitação se apresentem mais próximas dos limites de conforto, necessitando assim de menor consumo de energia para arrefecimento como se poderá ver no ponto 4.2.1.2. No entanto, de salientar que se os ganhos solares não forem controlados poderá existir sobreaquecimento, logo maiores necessidades energéticas.

Nos restantes períodos as temperaturas encontram-se todas abaixo da zona de conforto, ou seja, verificam-se temperaturas abaixo da temperatura de conforto de inverno (20°C). Sendo exceção, a zona do hall de acesso aos quartos. Aqui as temperaturas estão dentro da zona de conforto durante o período de inverno e ligeiramente acima do limite da zona de conforto no período de verão.

Comparando as diferentes soluções, verificou-se que na solução convencional (paredes de alvenaria) existe uma maior amplitude na variação das temperaturas interiores registadas ao longo do ano, verificando-se uma variação de aproximadamente 10°C para a solução convencional e uma variação de aproximadamente 5°C para a solução em painel sandwich.

4.2.1.2. Necessidades Energéticas

Na Figura 82 e na Figura 83 apresentam as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento, ao longo de um ano, para a zona da Sala/Cozinha da habitação, para os dois tipos de solução.

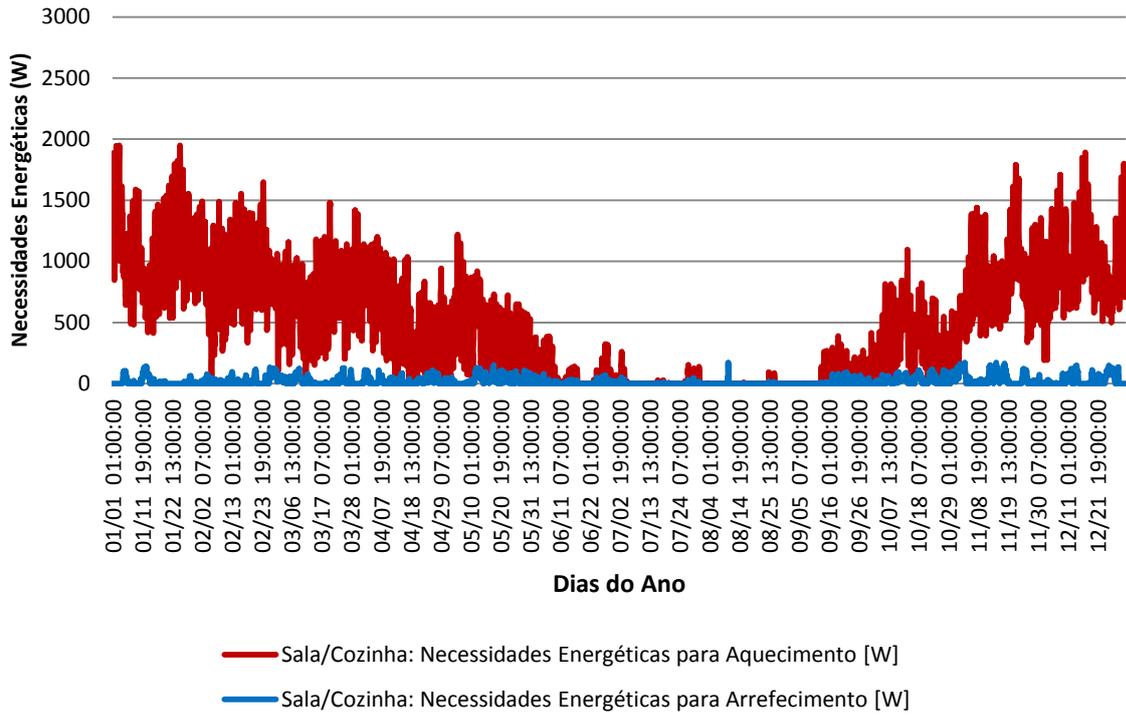


Figura 82 – Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Sala/Cozinha, ao longo do ano - solução painel sandwich

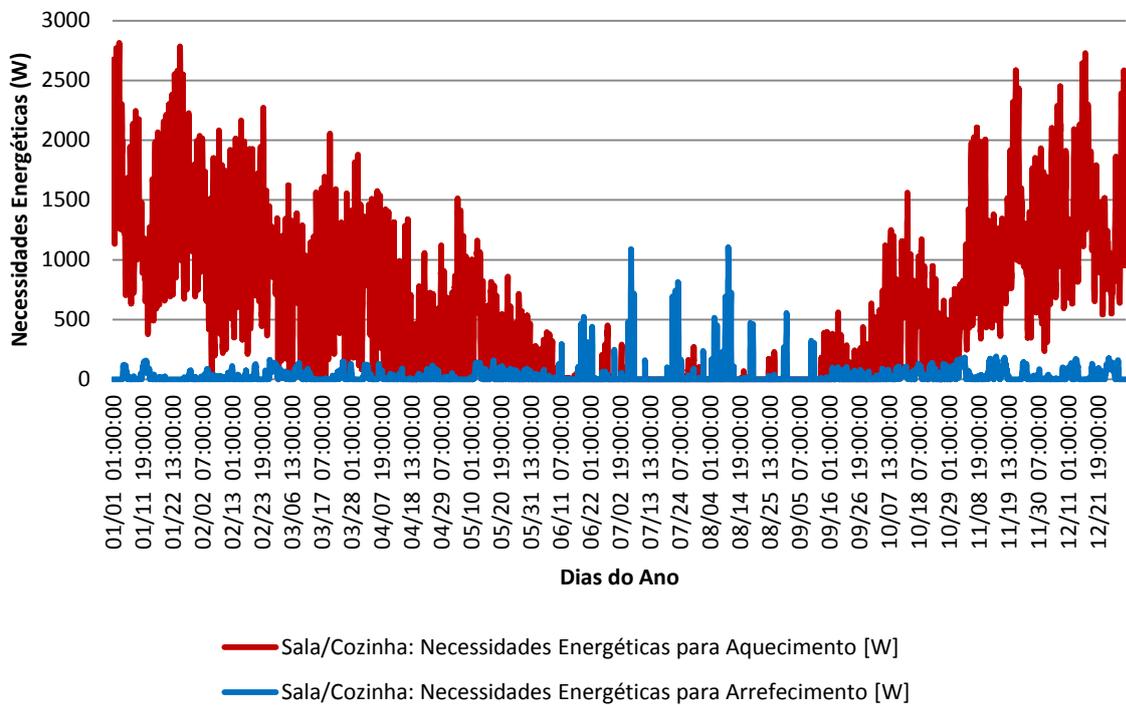


Figura 83 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Sala/Cozinha, ao longo do ano - solução convencional

Na Figura 84 e na Figura 85 apresentam-se as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento, ao longo de um ano, para a zona do Quarto 2 admitindo que o equipamento usado garante as temperaturas de conforto exigidas.

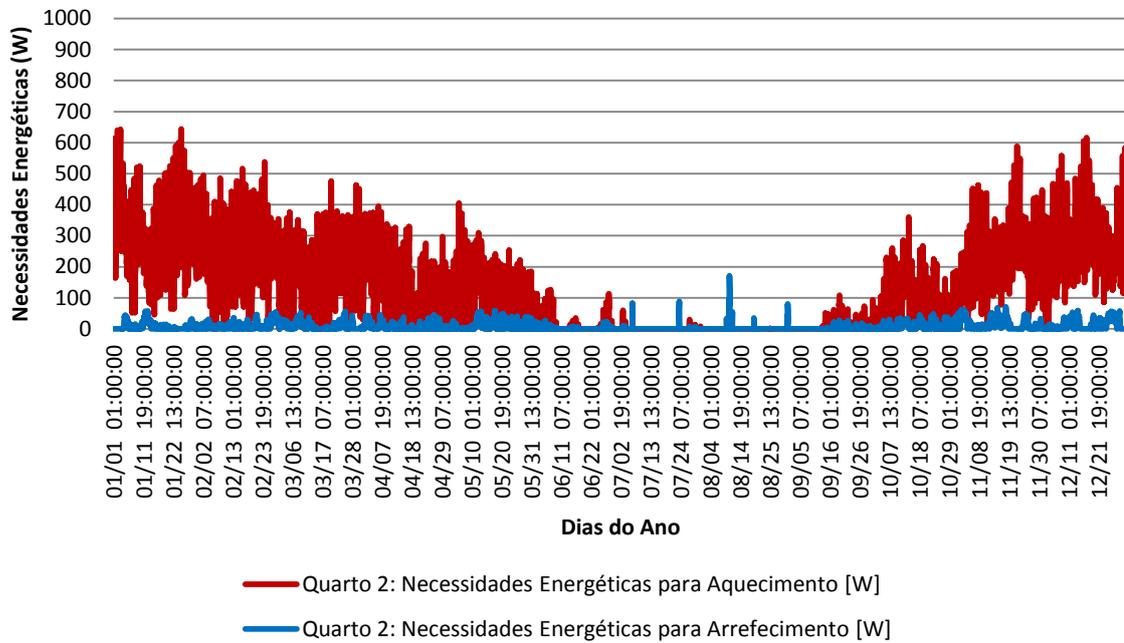


Figura 84 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Quarto 2, ao longo do Ano - solução painel sandwich

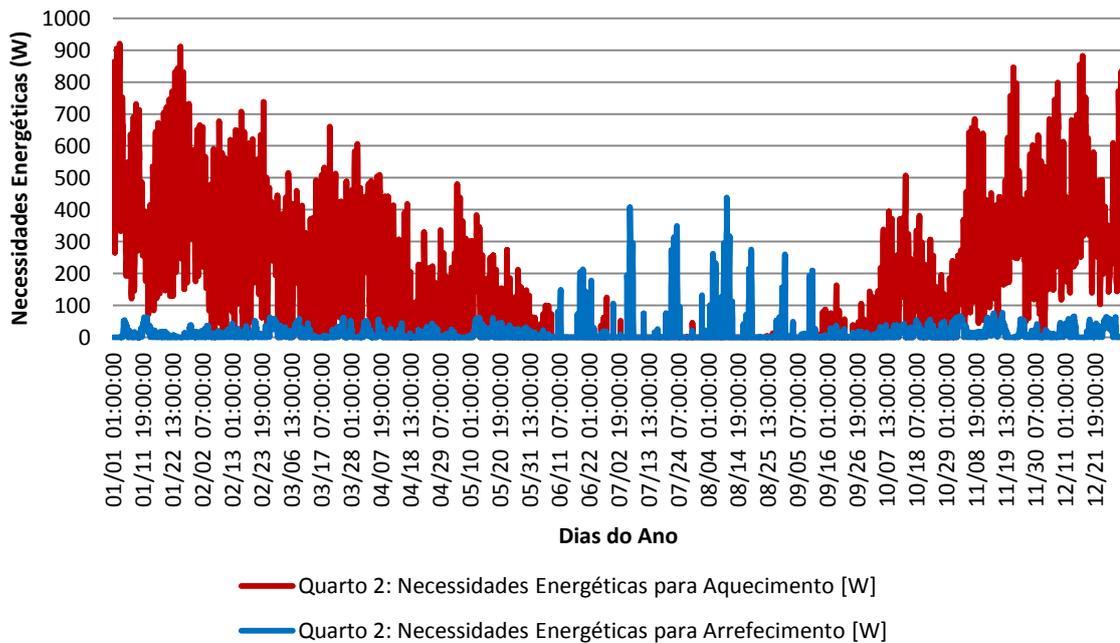


Figura 85 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Quarto 2, ao longo do Ano - solução convencional

Na Figura 86 e na Figura 87 apresentam-se as necessidades energéticas totais de aquecimento e arrefecimento, ao longo de um ano, admitindo um sistema AVAC que garanta as temperaturas de conforto exigidas.

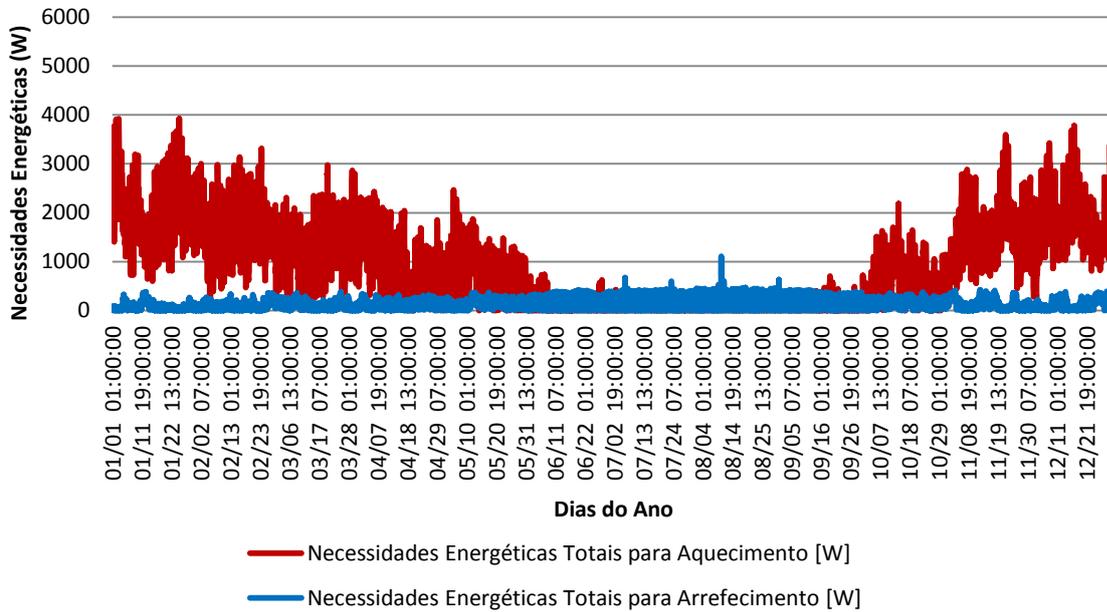


Figura 86 - Necessidades Energéticas Totais de Aquecimento e Arrefecimento, ao longo do Ano - solução painel sandwich

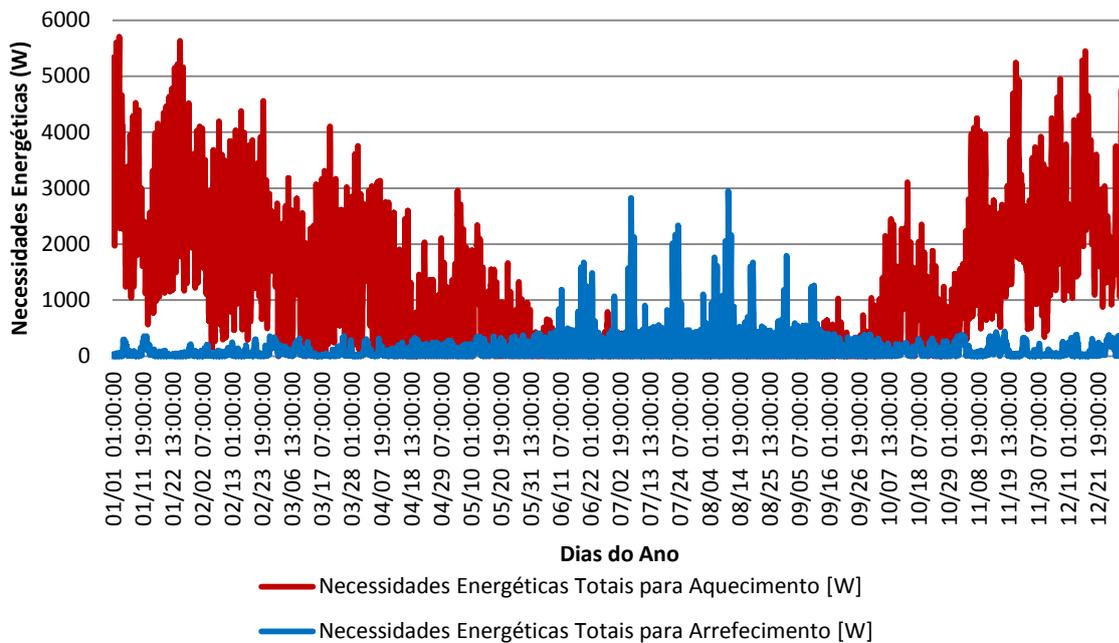


Figura 87 - Necessidades Energéticas Totais de Aquecimento e Arrefecimento, ao longo do Ano - solução convencional

De uma maneira geral, verificou-se que a maior necessidade de energia é para aquecimento. Esta necessidade faz-se sentir durante todo o ano, com exceção do período de verão. Quanto às necessidades de arrefecimento estas vão ser reduzidas durante o ano todo, sendo exceção o período de verão onde se regista alguns “picos”.

Tal como na análise das temperaturas interiores, também nas necessidades energéticas o hall de acesso aos quartos é exceção, neste compartimento as necessidades de aquecimento vão ser praticamente nulas, e as necessidades de arrefecimento vão ser constantes ao longo de todo o ano com um aumento significativo no período de verão.

Em termos de valores, a solução convencional apresenta maiores necessidades energéticas, tanto de aquecimento como de arrefecimento, em comparação com as necessidades da solução em painel sandwich.

4.2.2. Análise das Pontes Térmicas Lineares

Em seguida apresentam-se os resultados obtidos da análise das pontes térmicas, através do programa Therm (Therm, 2012). São apresentados resultados do fluxo de calor e da variação de temperatura das pontes térmicas lineares.

Na Figura 88 e na Figura 89 encontra-se representado o fluxo de calor e a variação das temperaturas para os diferentes pormenores de ligação em “L”, nomeadamente o pormenor n.º 1 e pormenor n.º 3 indicados na Figura 68.

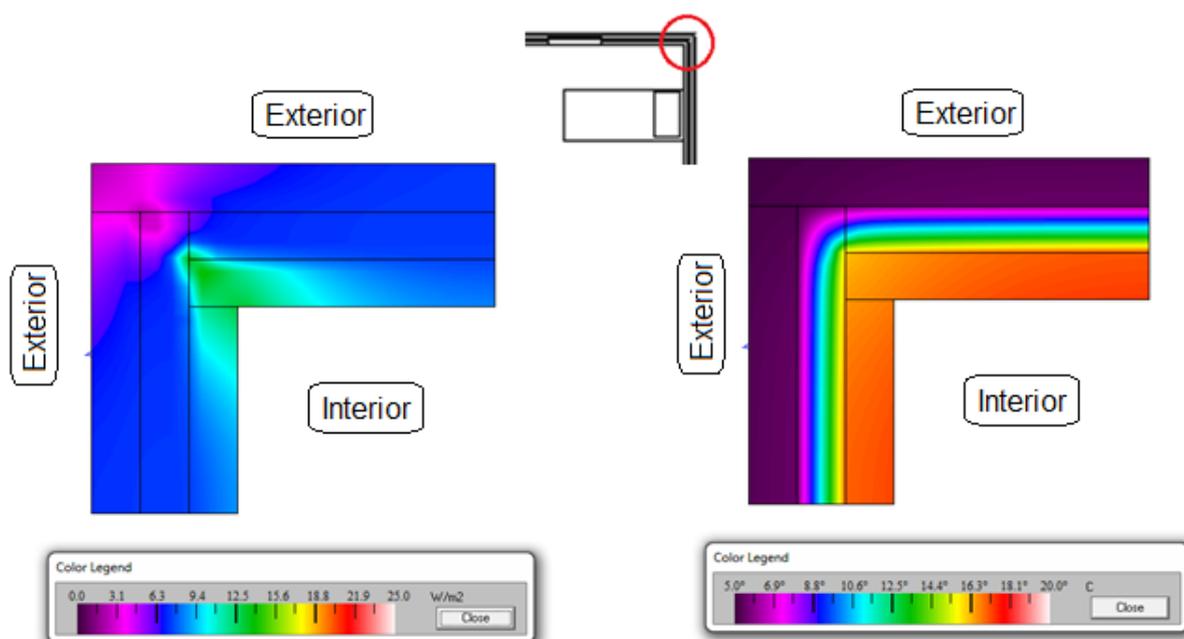


Figura 88 – Variação do fluxo de calor (esquerda) e variação da temperatura (direita) do pormenor de ligação n.º 1 em “L”

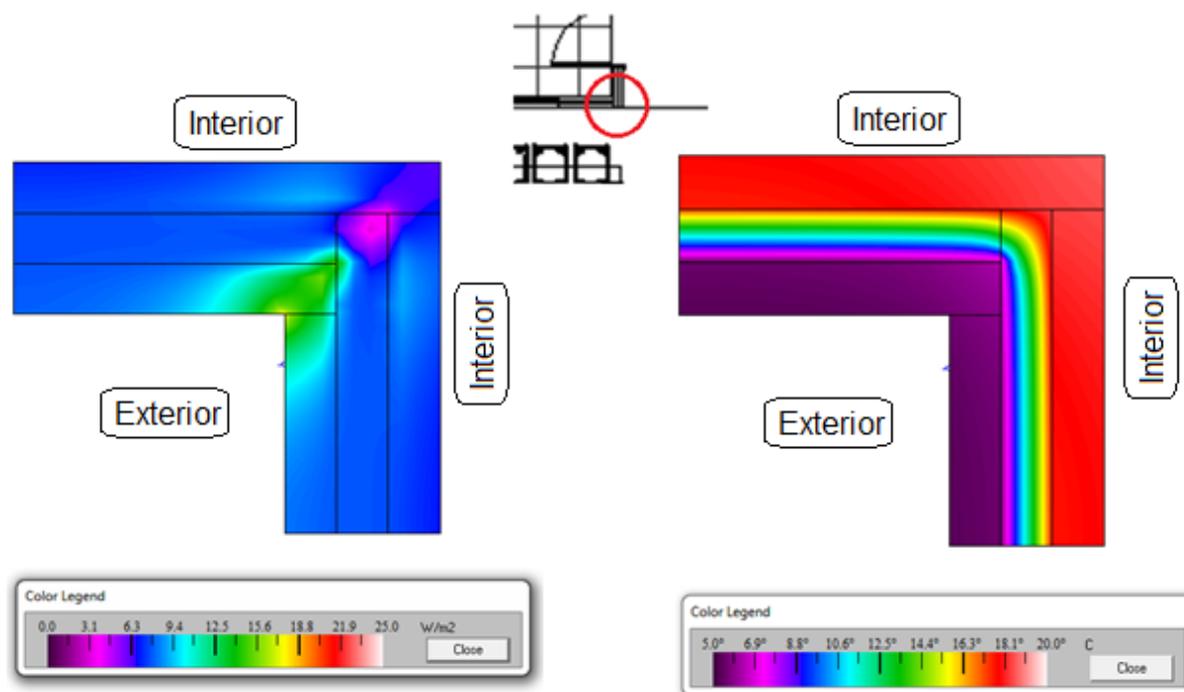


Figura 89 - Variação do fluxo de calor (esquerda) e variação da temperatura (direita) do pormenor de ligação n.º 3 em “L”

Analisando os resultados obtidos, verificou-se que a temperatura superficial da envolvente interior é maior no pormenor de ligação n.º 3 do que no pormenor de ligação n.º 1, sendo esta diferença na ordem de 1°C. Como esperado a maior variação de temperatura verifica-se ao nível do isolamento térmico.

No que diz respeito ao fluxo de calor, este é semelhante nas duas situações (pormenor de ligação n.º 1 e n.º 3), sendo que o maior fluxo verifica-se na zona de ligação (ponte térmica linear), sendo constante na zona corrente.

Na Figura 90 e na Figura 91 apresentam-se o fluxo de calor e a variação das temperaturas para os diferentes pormenores de ligação em “T”, ou seja, os pormenores n.º 2 e n.º 4 da Figura 68.

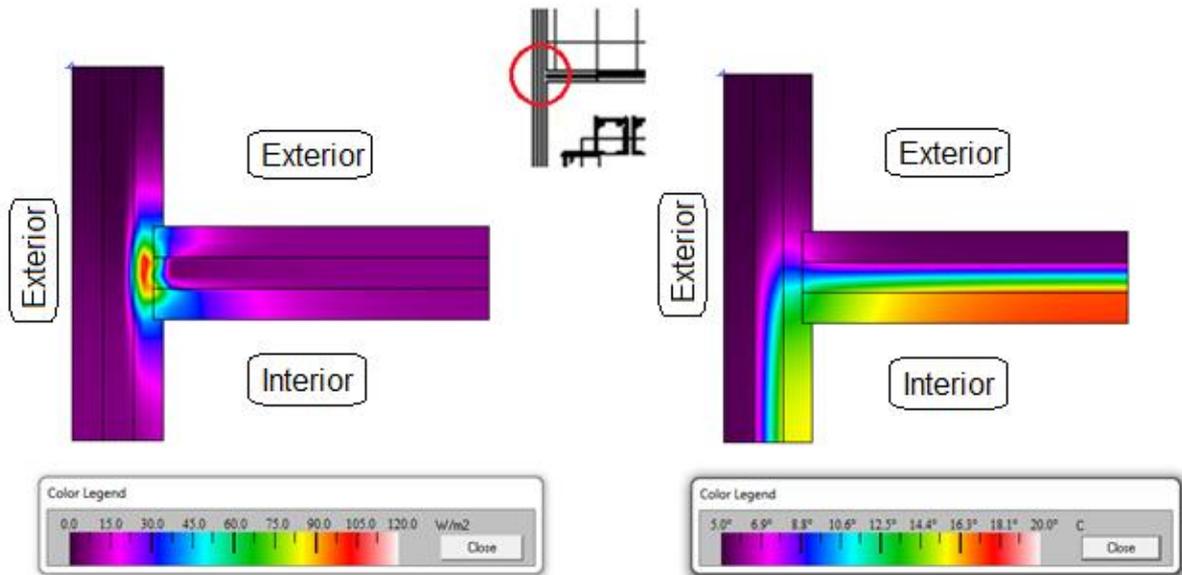


Figura 90 - Variação do fluxo de calor (esquerda) e variação da temperatura (direita) do pormenor de ligação n.º 2 em “T”

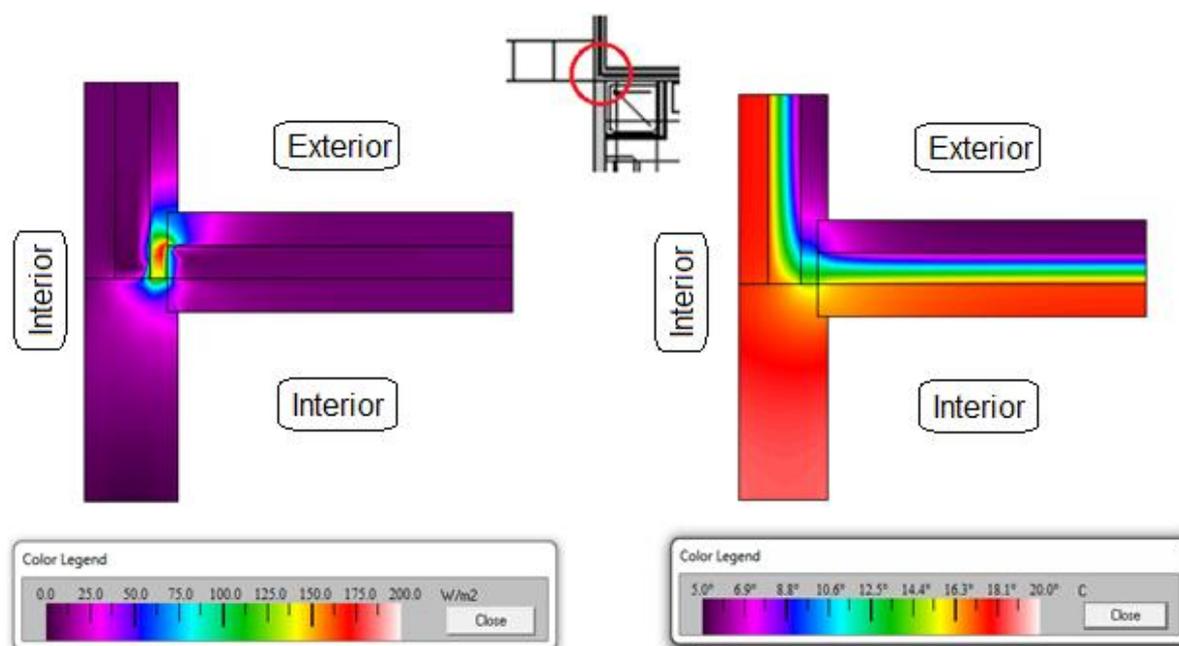


Figura 91 - Variação do fluxo de calor (esquerda) e variação da temperatura (direita) do pormenor de ligação n.º 4 em “T”

Analisando os resultados obtidos, verificou-se que na situação do pormenor de ligação n.º 4 a temperatura superficial da envolvente interior é maior que a que se verifica no pormenor de ligação n.º 2. Estas diferenças de temperatura andam na ordem dos 2°C.

Quanto ao fluxo de calor, este é maior na zona de ligação entre painéis, isto porque, o fluxo de calor procura o caminho em que a resistência térmica é menor, e como o BACRFA apresenta maior condutibilidade térmica o fluxo de calor percorre esta trajetória.

Em termos de valores no pormenor de ligação n.º 2 verifica-se um valor máximo de fluxo de 108 W/m² e no pormenor de ligação n.º 4 um valor de 179 W/m².

A Figura 92 e a Figura 93 mostram o fluxo de calor e a variação das temperaturas para os diferentes pormenores de ligação entre o painel sandwich e cobertura.

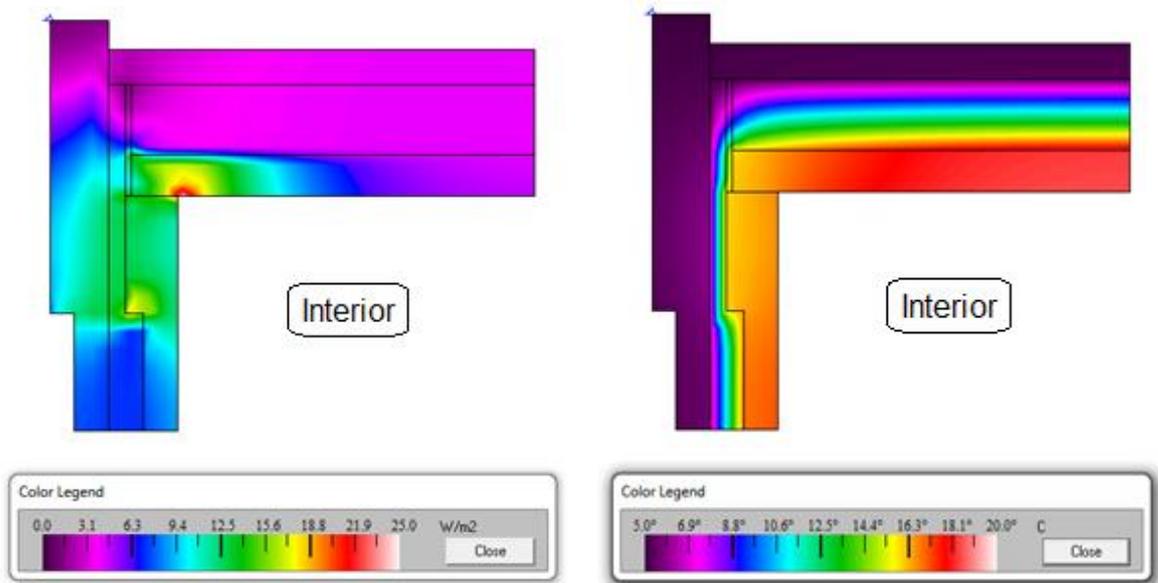


Figura 92 - Variação do fluxo de calor (esquerda) e variação da temperatura (direita) do pormenor de ligação da cobertura n.º 1

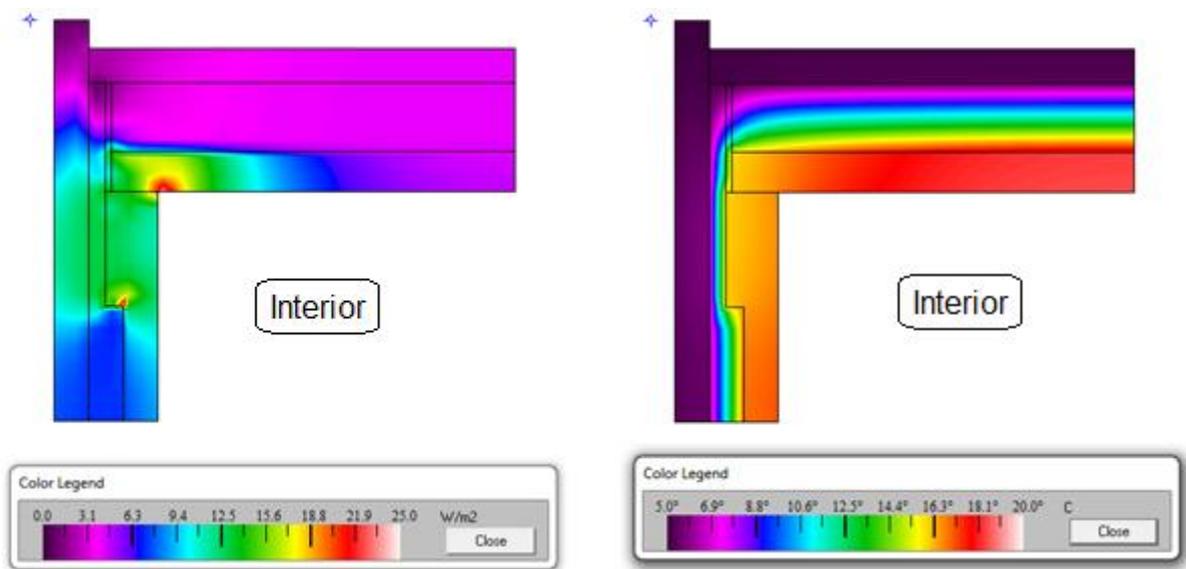


Figura 93 - Variação do fluxo de calor (esquerda) e variação da temperatura (direita) do pormenor de ligação da cobertura n.º 2

Por último, analisando os resultados para a situação de ligação do painel sandwich com a cobertura, verificou-se que a temperatura superficial da envolvente interior é semelhante nas duas situações (pormenor de ligação n.º 1 e n.º 2).

Em relação ao fluxo de calor, este é maior na zona de ponte térmica plana (zona de redução de isolamento para metade) e na zona de ponte térmica linear, sendo que neste último o fluxo é semelhante para os diferentes pormenores.

Na zona de ponte térmica plana o fluxo que se faz sentir no pormenor de ligação n.º 2 é maior que aquele que regista no pormenor n.º 1, sendo esta diferença na ordem dos 3 W/m^2 . Este resultado era de esperar uma vez que o fluxo de calor percorre o trajeto que oferece menor resistência. A diferença de fluxo de calor entre a zona corrente e a zona de ponte térmica anda na ordem dos 5 W/m^2 .

Apesar de o pormenor de ligação n.º 2 apresentar maior fluxo de calor na ponte térmica plana, não se pode considerar que esta geometria de painel seja uma má opção, perante a geometria do pormenor de ligação n.º 1, uma vez que as temperaturas superficiais que se fazem sentir na superfície interior desta zona são aproximadamente iguais para as duas situações.

4.3. Análise de Resultados

4.3.1. Comportamento Acústico

Na Tabela 30 encontram-se listados os valores do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre interior e exterior, $D_{2m,nT,w}$, segundo o modelo misto. São apresentados os resultados para duas situações, uma em que a curva de estimativa do envidraçado e porta foi obtida segundo o modelo misto (situação 1) e a outra em que a curva de estimativa do envidraçado e da porta foi obtida com recurso à base de dados do programa Acubat Sound – medidos em laboratório (situação 2). Nesta última situação foram analisados os desempenhos acústicos para dois tipos de envidraçados, sendo o primeiro, 4 (12) 4 mm, o mais próximo do usado na situação 1.

Tabela 30 – Índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre interior e exterior, segundo o modelo misto

	$D_{2m,nT,w}$ (dB)		
	Situação (1)	Situação (2)	
		4 (12) 4	4 (14) 8
Sala/Cozinha → Exterior	40	36	37
Quarto 1 → Exterior	38	38	39
Quarto 2 → Exterior	39	39	40
Quarto 3 → Exterior	37	37	38

Analisando os resultados obtidos, tendo em conta que o valor do índice de isolamento sonoro do painel é igual nas duas situações, no que diz respeito aos quartos, verifica-se que o que diferencia os resultados obtidos é a qualidade dos envidraçados. O que comprova que o envidraçado adotado da base de dados do Acoubat, 4 (12) 4 (mm), apresenta melhor desempenho que o envidraçado escolhido na situação (1).

Ainda na situação 2, verifica-se que uma melhoria do envidraçado resulta num aumento do desempenho acústico, andando a diferença de um envidraçado para o outro na ordem do 1dB.

Já na zona da sala/cozinha, o melhor resultado foi obtida para a situação 1. Estes valores resultam de um melhor desempenho acústico que a porta escolhida para a situação 1 apresenta em relação à porta escolhida para a situação 2.

Na Tabela 31 apresentam-se os valores do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre interior e exterior, $D_{2m,nT,w}$, para os resultados obtidos segundo o modelo misto, e segundo o Acoubat Sound para a situação da habitação ser construída em painel sandwich ou em soluções construtivas convencionais (alvenaria de tijolo).

Tabela 31 - Índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre interior e exterior

		$D_{2m,nT,w}$ (dB)		
		Modelo Misto	Painel Sandwich (Acoubat)	Solução Convencional (Acoubat)
Entre Interior e Exterior	Sala/Cozinha → Exterior	36	38	40
	Quarto 1 → Exterior	38	39	42
	Quarto 2 → Exterior	39	40	43
	Quarto 3 → Exterior	37	38	41

De referir que os valores provenientes do modelo misto foram os obtidos com recurso ao envidraçado, 4 (12) 4 da base de dados de Acoubat Sound (situação 2), sendo coerente com o envidraçado usado no estudo pelo Acoubat Sound.

Analisando os resultados obtidos verifica-se que os valores do índice de isolamento sonoro segundo o modelo misto são inferiores aos obtidos segundo o Acoubat. Uma das causas desta diferença resulta da maneira como foi considerado o efeito da transmissão marginal, enquanto que no modelo misto a transmissão é quantificada de uma forma mais simplificada e penalizadora, no Acoubat Sound o efeito da transmissão marginal é realizado de uma forma mais detalhada, resultando assim em valores mais próximos da realidade.

Comparando os resultados obtidos através do Acoubat Sound para as diferentes soluções, verifica-se que a solução construtiva tradicional apresenta melhor desempenho acústico comparativamente à solução construtiva em painel sandwich, sendo esta diferença na ordem dos 3dB.

Na Tabela 32 apresentam-se os valores do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos interiores, $D_{nT,w}$, previstos segundo o modelo misto, e segundo o Acoubat Sound para a solução em painel sandwich e solução convencional.

Tabela 32 – Índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre espaços interiores

		$D_{nT,w}$ (dB)	
		Painel Sandwich	Solução Convencional
		(Acoubat)	(Acoubat)
Entre Espaços Interiores	Quarto1 (recetor) Sala/Coz. (emissor)	38	42
	Quarto 1 (recetor) Quarto 2 (emissor)	39	38
	Quarto 3 (recetor) WC (emissor)	39	39

Verificando os resultados obtidos para a solução em painel sandwich em comparação com a solução convencional, os resultados obtidos são próximos, variando numa ou outra situação em 1dB. Com exceção do índice de isolamento sonoro entre a sala/cozinha e o quarto 1, neste

caso a solução em alvenaria de tijolo (solução convencional) apresenta melhor desempenho, sendo esta melhoria na ordem dos 3dB.

4.3.2. Comportamento Térmico

Analisando os resultados obtidos, para a cidade do Porto, verifica-se que a habitação modular apresenta um bom comportamento no período de Verão, uma vez que as temperaturas no interior da habitação se encontram entre os 20°C e 25°C (temperaturas de conforto), com exceção de um ou outro dia em que excede os 25°C, nos restantes períodos, a habitação apresenta temperaturas abaixo da zona de conforto, sendo assim necessário recorrer a um sistema de aquecimento.

Na Figura 94 apresentam-se os resultados das temperaturas interiores da zona da sala/cozinha, ao longo dos meses do ano.

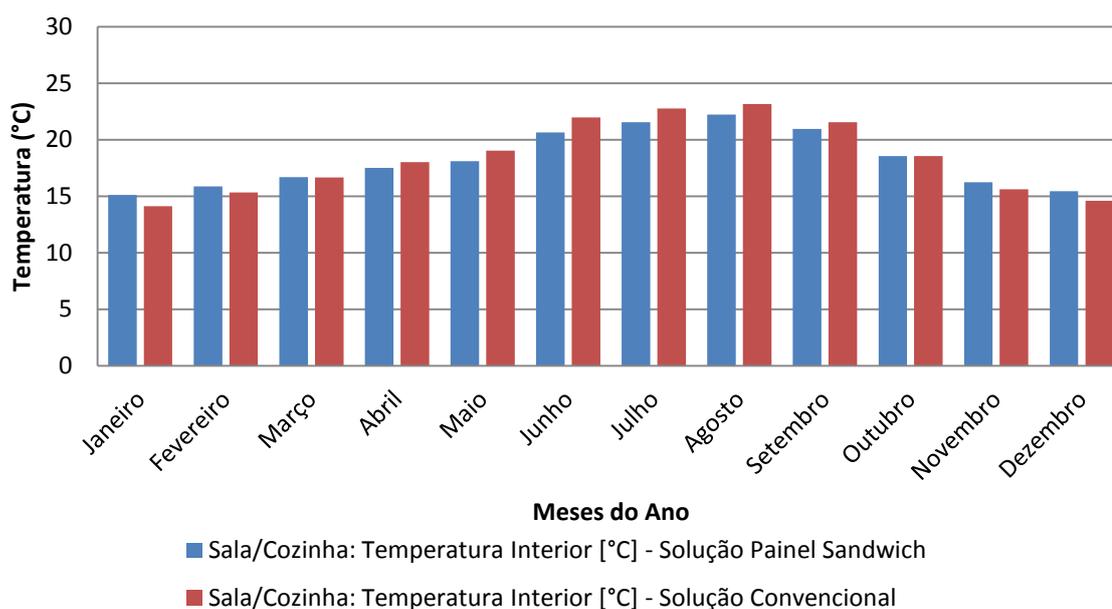


Figura 94 - Evolução da temperatura interior, na zona Sala/Cozinha, ao longo dos meses

Comparando os resultados obtidos para a solução em painél sandwich e para solução em alvenaria de tijolo (solução convencional), a primeira apresenta melhor desempenho térmico ao longo de todo o ano. Isto é, no período de verão a solução convencional apresenta temperaturas mais elevadas no interior da habitação e no inverno apresenta temperaturas mais baixo, comparativamente à solução em painél sandwich. Esta situação verifica-se não só para a zona da sala/cozinha (Figura 94) como para as restantes zonas da habitação.

A única exceção é para a zona do hall de acesso aos quartos, onde as temperaturas interiores são aproximadamente idênticas para as duas soluções.

Mediante as temperaturas interiores registadas irão existir maiores ou menores necessidades energéticas para aquecimento ou arrefecimento. Assim, com base nos resultados obtidos verifica-se que as maiores necessidades energéticas se vão fazer sentir no período de inverno, ou seja, as maiores necessidades energéticas serão destinadas ao aquecimento, como seria de esperar neste clima.

A Figura 95 apresenta as necessidades energéticas para a zona do Quarto 2, onde se pode comprovar que as necessidades energéticas da habitação serão essencialmente destinadas a aquecimento, comportamento que se faz sentir também nas outras zonas da habitação, variando apenas consoante a área útil do compartimento em causa.

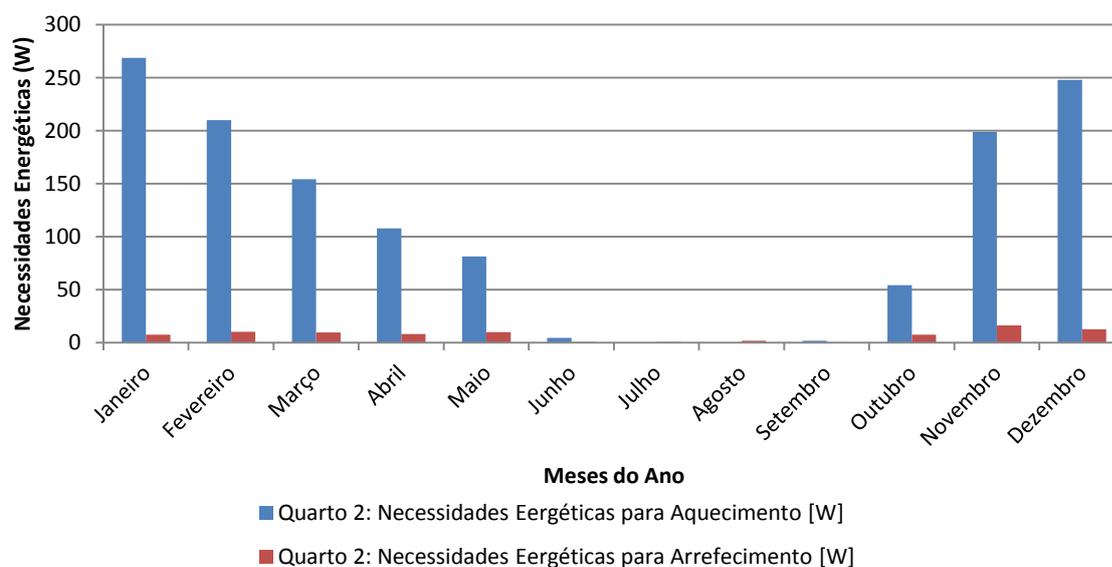


Figura 95 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Quarto 2, ao longo dos meses, solução com painel sandwich

Comparando os resultados obtidos para as diferentes soluções, verifica-se que a solução em painel sandwich na generalidade apresenta menores necessidades energéticas, sendo que nos meses mais frios, para a zona da sala/cozinha, esta diferença pode chegar próximo dos 400W (Figura 96).

Nos outros compartimentos da habitação esta diferença de necessidades energéticas de aquecimento não é tão grande (Figura 97), uma vez que a área útil desses compartimentos é relativamente mais pequena que a área da sala/cozinha.

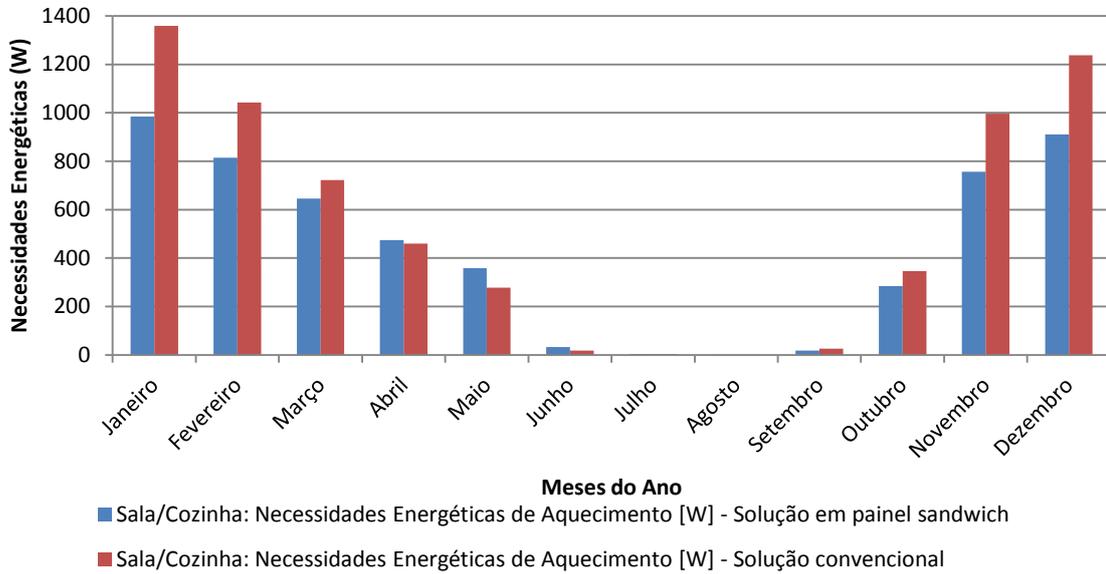


Figura 96 - Necessidades Energéticas de Aquecimento na zona da sala/cozinha, ao longo dos meses

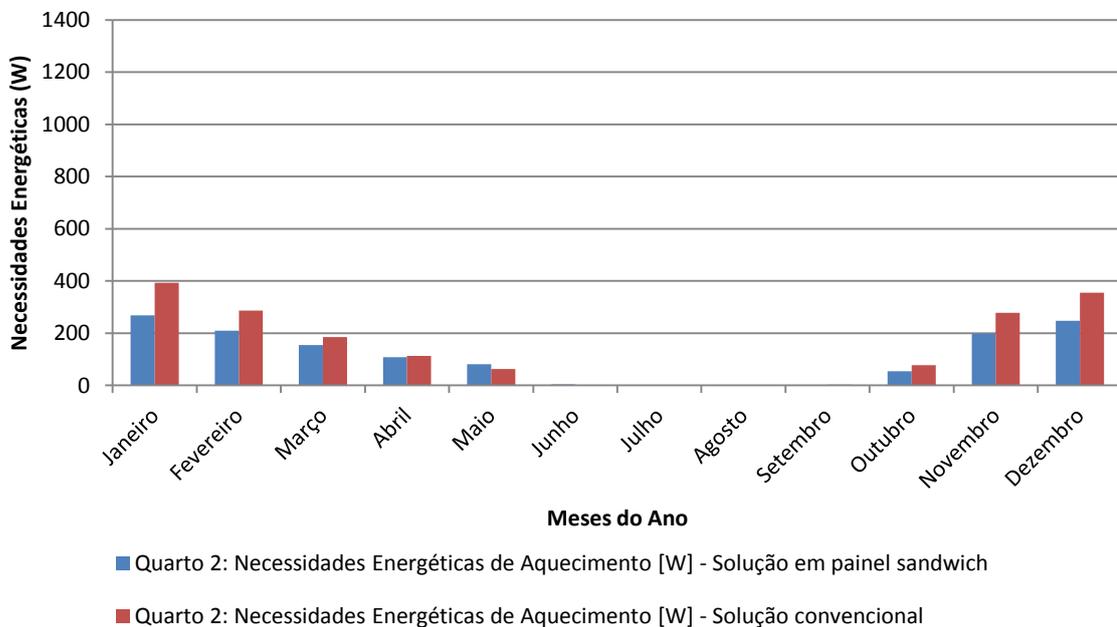


Figura 97 - Necessidades Energéticas de Aquecimento na zona Quarto 2, ao longo dos meses

No que diz respeito às necessidades energéticas para arrefecimento, novamente a solução em painel sandwich na generalidade apresenta menores necessidades energéticas, sendo que no período de verão essas necessidades são baixas (Figura 98 e Figura 99).

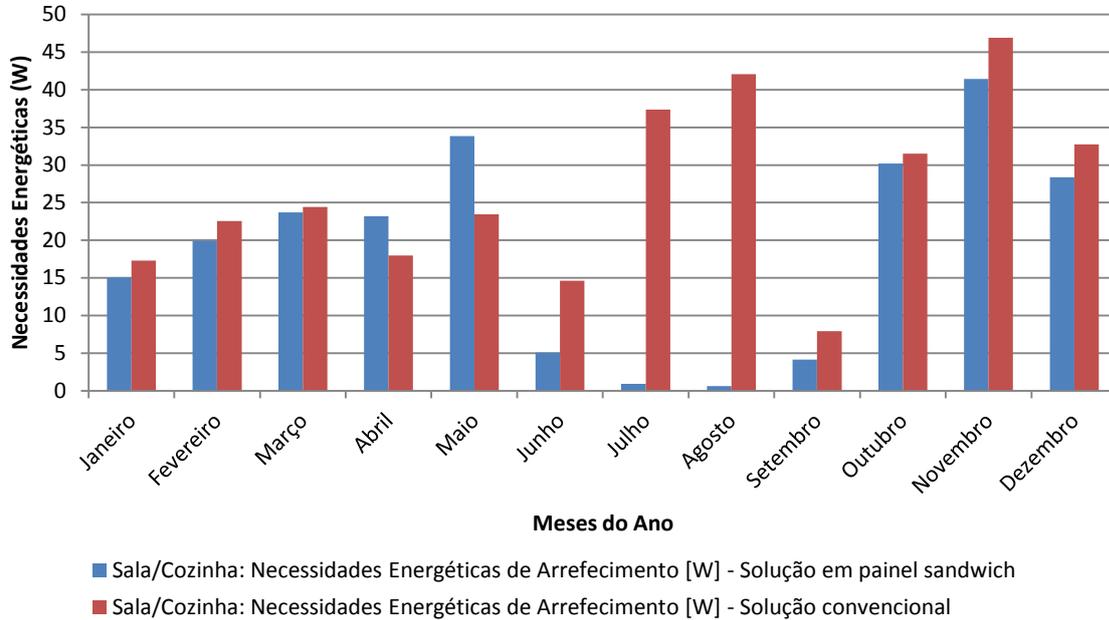


Figura 98 - Necessidades Energéticas de Arrefecimento na zona da sala/cozinha, ao longo dos meses

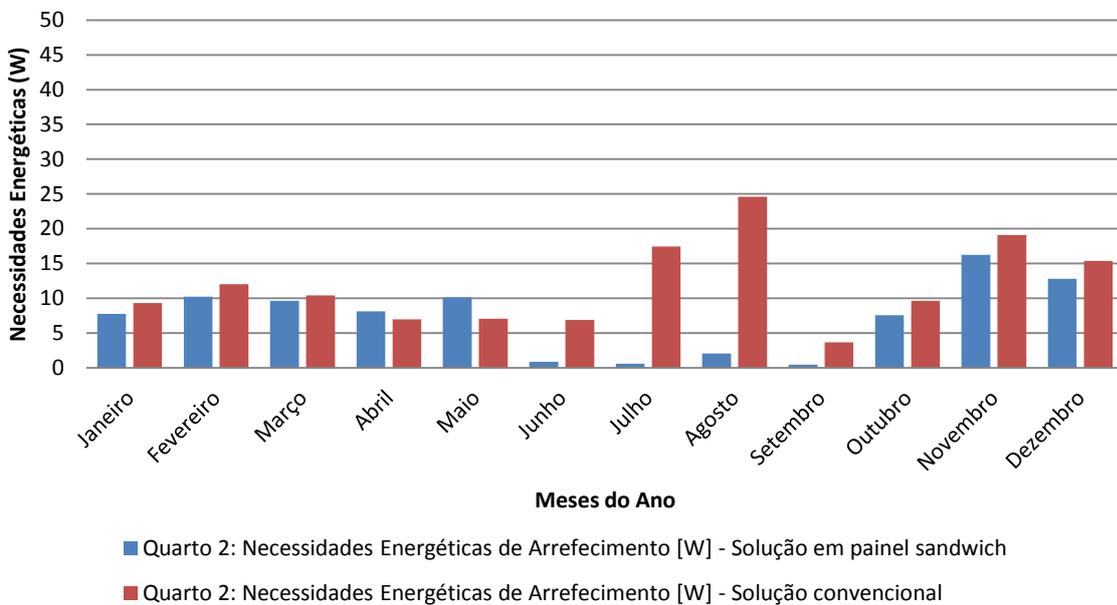


Figura 99 - Necessidades Energéticas de Arrefecimento na zona Quarto 2, ao longo dos meses

A exceção de necessidades energéticas verifica-se na zona do hall de acesso aos quartos, nesta zona as necessidades de aquecimento vão ser praticamente nulas durante todo o ano. Quanto

às necessidades de arrefecimento estão vão-se fazer sentir no período de verão, apresentando valores entre os 200 W/mês e 250 W/mês.

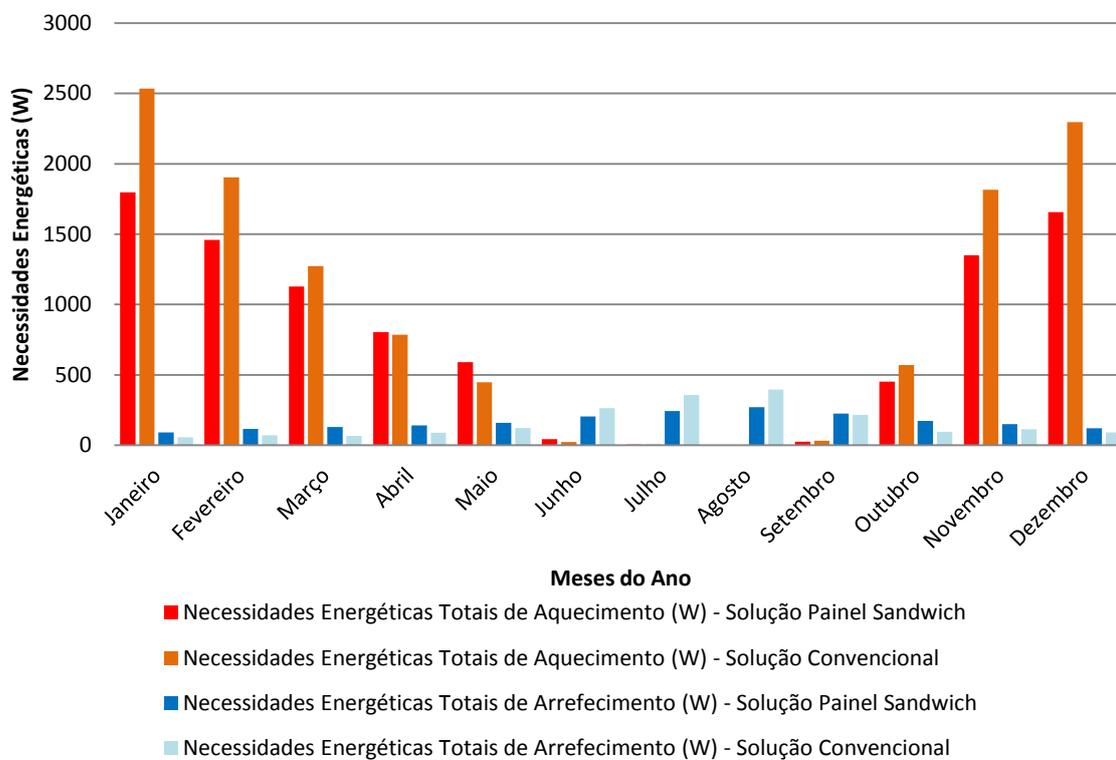


Figura 100 – Necessidades energéticas totais de aquecimento e arrefecimento, ao longo dos meses do ano

Da análise da Figura 100 e tal como se tinha analisado no ponto 4.2.1.2 verifica-se que a solução em painel sandwich apresenta claramente menores necessidades energéticas em comparação com a solução convencional. Esta diferença faz-se sentir mais ao nível das necessidades energéticas de aquecimento, apresentando nos meses mais frios diferenças que vão desde os 400 W/mês até aos 700 W/mês. Em termos de necessidades energéticas para arrefecimento, embora estas sejam baixas comparativamente com as necessidades de aquecimento, a solução em painel sandwich apresenta maiores necessidades no período de inverno e menores no período de verão, em comparação com os resultados obtidos para a solução convencional.

4.4. Síntese dos resultados obtidos

Na previsão do desempenho acústico verificou-se que os resultados obtidos, segundo o modelo misto, para o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o interior e

exterior, $D_{2m,nT,w}$, são menores que os valores obtidos pela análise com recurso ao Acoubat Sound. Esta diferença resulta da quantificação da transmissão marginal, isto é, no módulo misto a transmissão é quantificada de forma simplificada e penalizadora, enquanto pelo Acoubat Sound é contabilizada de uma forma mais detalhada. Verificou-se, também, uma melhoria do isolamento sonoro quando se aumentou a qualidade do envidraçado de 4 (12) 4 mm para 4 (14) 8 mm.

Apesar de, a solução em painel sandwich, cumprir com os requisitos exigidos pela legislação em vigor, a solução convencional apresenta melhor desempenho acústico.

Para a hipotética situação da habitação modular ser construída em banda, e admitindo a situação mais desfavorável, verificou-se que, a solução convencional apresenta melhores resultados comparativamente à solução em painel sandwich.

Analisando o valor do coeficiente de transmissão térmica, considerando a localização da habitação na cidade do Porto, verificou-se que os valores obtidos se aproximam dos valores de referência presentes no RCCTE.

Na análise das pontes térmicas, para os pormenores de ligação vertical entre os diferentes painéis, não se verificam grandes diferenças nas temperaturas superficiais interiores na zona da ponte térmica. A exceção será o pormenor de ligação em “T” (Figura 90). Nesta situação a temperatura superficial no interior é mais baixa (na ordem dos 2°C a 3°C), no entanto, tendo em conta que a temperatura interior considerada é igual a 20°C, não ocorrerão condensações superficiais.

Da análise dos pormenores de ligação entre o painel sandwich e a cobertura verificou-se, mais uma vez, um maior fluxo de calor nas zonas das pontes térmicas. Sendo que, no pormenor de ligação n.º2 (Figura 93), na zona de ponte térmica plana, o fluxo de calor é maior que o registado no pormenor de ligação n.º1 (Figura 92). Esta redução de espessura (ponte térmica plana), de 60mm de isolamento para 30mm, apesar de levar a um maior fluxo não vai influenciar de maneira significativa a temperatura superficial interior, salvaguardando o fenómeno de condensações superficiais.

Na previsão do desempenho térmico, da simulação dinâmica, verificou-se que a habitação modular apresenta um bom comportamento no período de verão, com a temperatura ambiente interior a situar-se na zona de conforto (20°C e os 25°C), resultando do facto de as temperaturas exteriores, registadas neste período, andarem muito próximas da temperatura de conforto. No período de inverno registam-se temperaturas interiores abaixo dos 20°C, logo será necessário recorrer a um sistema de aquecimento, sendo este período, aquele que regista maiores necessidades energéticas.

Por outro lado, as necessidades de arrefecimento são mais baixas e verificam-se, essencialmente, no período do verão. Perante o clima (cidade do Porto) em que a simulação foi feita não deveria ser necessário energia para arrefecimento. Contudo, uma vez que na simulação efetuada não foram considerados quaisquer elementos ou sistemas de sombreamento, ocorre um sobreaquecimento resultante dos ganhos solares, logo existem necessidades energéticas de arrefecimento.

Comparando os resultados obtidos, do desempenho térmico da solução convencional e da solução com painel sandwich, verificou-se que a solução em painel sandwich apresenta menores necessidades energéticas. Esta diferença sente-se mais ao nível das necessidades energéticas de aquecimento, registando-se diferenças, para os meses mais frios, na ordem dos 35% a 45%. As necessidades energéticas de arrefecimento, apesar de serem mais baixas do que as necessidades de aquecimento, fazem-se sentir mais no período de inverno e menos no período de verão, em comparação com os resultados obtidos para a solução convencional.

5. CONCLUSÃO

Terminado o estudo de previsão do comportamento acústico e térmico da habitação modular de custos controlados, importa agora referir as conclusões do trabalho realizado e as perspectivas de trabalhos futuros.

Em termos de comportamento acústico a habitação modular cumpre com os requisitos exigidos pela legislação portuguesa, isto é, cumpre com o valor exigido para o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o interior e o exterior. Verificou-se ainda que, alterando a qualidade do envidraçado o desempenho melhora significativamente.

Comparando o desempenho acústico da solução convencional (alvenaria de tijolo) com a solução em painel sandwich conclui-se que a solução convencional apresenta melhor desempenho comparativamente à solução em painel sandwich.

Os valores do coeficiente de transmissão térmica cumprem com as exigências regulamentares portuguesas (RCCTE), verificando-se valores obtidos próximos dos valores de referência.

Da análise das pontes térmicas, verificou-se que nas zonas de redução da espessura de material de isolamento e espessura de painel de BACRFA os fluxos de calor são mais elevados, no entanto, as temperaturas superficiais que se fazem sentir nessas zonas (pontes térmicas) não são muito diferentes das verificadas na zona corrente, portanto, à partida estão excluídos os fenómenos de condensação superficiais.

Da simulação dinâmica, verificou-se que a habitação modular apresenta melhor comportamento no período de verão do que no período de inverno, situação normal para o clima em que foi realizada a simulação. Assim, no período de verão, comparativamente às necessidades energéticas de arrefecimento no período de inverno, as necessidades energéticas de aquecimento são mais baixas. Uma vez que as temperaturas exteriores no período de verão encontram-se mais próximas da zona de conforto, logo menos necessidades energéticas.

Comparando o desempenho térmico da habitação modular com painel sandwich com os resultados obtidos para a situação hipotética da habitação ser construída com soluções convencionais, verifica-se que, a solução em painel sandwich apresenta melhores resultados. Com uma menor amplitude nas variações da temperatura interior, aliada a temperaturas interiores próximas da zona de conforto, a solução em painel sandwich apresenta menores necessidades energéticas. As maiores diferenças de necessidades energéticas ocorrem para os meses mais frios. A solução convencional necessita de 35% a 45% mais energia que a solução em painel sandwich, situando-se estas diferenças entre os 400 W/mês e os 700 W/mês.

5.1. Trabalhos Futuros

De forma a consolidar o trabalho iniciado e prosseguindo, assim, na continuação do estudo das características funcionais da habitação modular de custos controlados, sugerem-se os seguintes trabalhos:

Realização de ensaios de comportamento térmico e acústico realizados “in situ” ou em laboratório. Aqui, deve realizar-se a medição dos sons de condução aérea de elementos de construção segundo a norma NP EN 20140-3:1998 (ISO 140-3).

Para efetuar ensaios “in situ” será necessário a execução de um protótipo da habitação modular, permitindo assim a realização de ensaios acústicos e térmicos. Em termos de ensaios acústicos, deve ser realizada a medição do isolamento a sons de condução aérea de fachada, $D_{2m,nT,w}$ (NP EN ISO 140-5:2009) e a medição do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos, $D_{nT,w}$ (NP EN ISO 140-4:2009).

Em relação aos ensaios relativos ao comportamento térmico, devem ser realizadas “in situ” avaliações e monitorizações alargadas (período de 1 ano) da temperatura ambiente interior, das temperaturas superficiais, da humidade relativa no interior da habitação, temperaturas exteriores e os consumos de energia destinada a aquecimento ou arrefecimento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afonso, J., “Estudo do Comportamento Térmico de Edifícios Antigos”, Dissertação de Mestrado em Eng.^a Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009.

Almeida, M., “Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção”, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.

Almeida, M., Silva, S., “Acústica Ambiental e de Edifícios”, Apontamentos de Acústica Ambiental e de Edifícios, DEC - Universidade do Minho, Guimarães, 2011.

Barros, J., Pereira, E., Cunha, V., Ribeiro, A., Santos, S., Queirós, P., “PABERFIA – Painéis Sandwich Pré-fabricados de Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço”, Relatório, DEC - Universidade do Minho, Guimarães, 2005.

Barros, J., Pereira, E., Santos, S., Lourenço, L., “Possibilidades e desafios do betão auto-compactável reforçado com fibras – do laboratório à aplicação real”, DEC – Universidade do Minho, Guimarães, 2006.

Barros, J., Lourenço, L., Gonçalves, D., Durães, B., Alves, N., Nunes, Â., “Avaliação da heterogeneidade das propriedades mecânicas de um BACRFA em elementos estruturais”, DEC – Universidade do Minho, Guimarães, 2010.

Bragança, L., Silva, F., “Comparação entre modelos de previsão de isolamento sonoro a sons de condução aérea de elementos construtivos”, Artigo, Universidade do Minho, Guimarães, 2000.

Casasprefab, 2012, disponível em: <http://casasprefab.blogspot.pt/2008/04/construo.html>, acessado em: 15/07/2012.

CEN - European Committee for Standardization: EN ISO 717-1 “Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound.”, 1996a.

CEN - European Committee for Standardization: EN ISO 717-2 “Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation.”, 1996b.

CEN - European Committee for Standardization: EN 12354-1 “Building acoustics – Estimation of acoustic performance of building from the performance of elements – Part 1: Airborne Sound Insulation between Rooms”, 2000a.

CEN - European Committee for Standardization: EN 12354-2 “Building acoustics – Estimation of acoustic performance of building from the performance of elements – Part 2: Impact Sound Insulation between Rooms”, 2000b.

CEN - European Committee for Standardization: EN 12354-3 “Building acoustics – Estimation of acoustic performance of building from the performance of elements – Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound”, 2000c.

Comjeitoearte, 2012, disponível em: <http://comjeitoearte.blogspot.pt/2012/01/arquitectura-anos-40-csh-charles-eames.html>, acedido em: 15/07/2012.

Couto, J., Couto, A, “Vantagens Produtivas e Ambientais da Pré-fabricação”, Artigo, Universidade do Minho, Guimarães, 2007.

Crawley, D., Hand, J., Kummert, M., Griffith, B., “Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs”, Versão 1.0, Julho 2005.

Designaplause, 2012, disponível em: <http://designaplause.com/2011/pierre-koenig%E2%80%99s-last-built-house-listed/18198/>, acedido em 15/07/2012.

Dias, R., “Análise comparativa dos métodos normalizados de previsão da transmissão sonora por via aérea”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009.

Ebong, Ima. “Kit Homes Modern”, HaperCollins, Nova Iorque, 2005.

eHow, 2012, disponível em: http://www.ehow.com/about_5403865_history-prefab-homes.html acedido em 15/06/2012

Einea, A., Salmon, D.C., Tadros, M.K. & Culp, T., “A New Structurally and Thermally Efficient Precast Sandwich Panel System”, Precast/Prestressed Concrete Institute Journal, USA, 1994.

EnergyPlus, 2012, Getting Started with EnergyPlus: Basic Concepts Manual - Essential Information You Need about Running EnergyPlus (<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/gettingstarted.pdf>), acessido em 15/07/2012

EnergyPlus, 2012, Weather Data File (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=PR_T/cname=Portugal), acessido em 12/07/2012.

Gonçalves, D., Dias, J., Lourenço, L., Barros, J., Sampaio, C., “Painéis pré-fabricados em betão autocompactável reforçado com fibras de aço para fachadas de edifícios”, DEC – Universidade do Minho, Guimarães, 2008.

Housing, 2012, <http://www.housing.com/categories/homes/history-prefabricated-home/american-system-built-houses-frank-lloyd-wright-1911-1917.html> acessido em 15/06/2012

Illumin, 2012, disponível em: <http://illumin.usc.edu/85/modular-prefabricated-housing/>, acessido em: 15/07/2012.

IM, 2012, Normais Climatológicas - 1981-2010 - Porto, Serra do Pilar (<https://www.meteo.pt/pt/oclima/normais.clima/1981-2010/014/>), acessido em 20/09/2012.

Incropera F., DeWitt, D., Bergman, T. & Lavine, A., “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, 6ª Edição, Wiley, 2007

IPQ - Instituto Português da Qualidade: NP EN ISO 140-4 “Acústica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 4: Medição in situ do isolamento sonoro a sons aéreos entre compartimentos.”, 2009.

IPQ - Instituto Português da Qualidade: NP EN ISO 140-5 “Acústica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 5: Medição, in situ, do isolamento sonoro a sons aéreos de fachadas e de elementos de fachada.”, 2009.

Irontown Homes, 2012, www.ironthownhomes.com, em 12/01/2012.

ISO - International Organization for Standardization: ISO 140-3 “Acoustics. Measurement of sound insulation in buildings and a building elements. Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements.”, 1995.

ISO - International Organization for Standardization: ISO 7730 “Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria”, 2005.

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

Kwan, C., “Modular Prefabricated Housing”, Volume 9: Issue i. Southern California University, 2007.

Lameiras, R., Santos, T. Valente, I., Barros J., Azenha M., “Comportamento das ligações entre conectores de compósito de polímero reforçado com fibras de vidro e betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACFRA)”, Relatório, DEC - Universidade do Minho, Guimarães, 2010.

Leite, M. “Estudo experimental, analítico e numérico de vigas em construção sandwich reforçada com aplicação ao transporte refrigerado de bens perecíveis”, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2004.

Mateus, D., “Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído”, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2008

Meisser, M., "Acustica de los edificios", Editores Técnicos Asociados, S.A., Barcelona, 1973

Meisser, M., “La pratique de l’acoustique dans le bâtiment”, Eyrolles, Paris, 1978

Mendonça, P., “Habitar Sob Uma Segunda Pele - Estratégias para a Redução do Impacto Ambiental de Construções Solares Passivas em Climas Temperados”, Tese de Doutoramento, DEC - Universidade do Minho, Guimarães, 2005

Modular System, 2012, www.modular-system.com, acedido em 15/08/2012

Módulo Técnico, 2012, www.modulotecnico.com, acedido em 15/08/2012

MOOD, 2012, <http://www.casasmood.com/pdfs/catalogo.pdf>, acedido em 15/08/2012.

Okamura, H. & Ouchi, M., “Self-Compacting Concrete. Development, Present use and Future”, Proc. 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Stockholm, Sweden), A. Skarendhal and O.Pstersson (editors), RILEM Publications S.A.R.L, 1999.

Patrício, J., “Isolamento a Sons Aéreos e de Percussão – Metodologias de Caracterização”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1999

Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE): Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de abril.

Regulamento Geral do Ruído (RGR): Decreto-Lei nº 9/2007 de 17 de janeiro.

Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE): Decreto-Lei nº 96 / 2008 de 9 de junho.

Santos, T., “Avaliação das Vantagens Económicas e Tecnológicas da Utilização do Conceito de Sistema Modular para Edifícios”, Dissertação de Mestrado Integrado em Eng.^a Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 2010.

Silva, P., “Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE”, Tese de Mestrado em Eng.^a Civil, DEC - Universidade do Minho, Guimarães, 2006.

Silva, S., “A Sustentabilidade e o Conforto das Construções”, Tese de Doutoramento em Eng.^a Civil, DEC - Universidade do Minho, Guimarães, 2009.

Silva, P., “Aplicação do Programa EnergyPlus como Ferramenta do Projecto de Comportamento Térmico de Edifícios de Habitação”, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, 2010.

SIT, 2012, <http://www.siturbandesign.com/modular/>, acedido em 15/08/2012

Smith, E., Gössel, P., Shulman, J., “Case Study Houses”, Taschen, 2009.

Tadeu, A., Mateus, D., “Sound Transmission Through Single, Double and Triple Glazing. Experimental Evaluation”, Applied Acoustics, Vol. 62(3), 2001, 307-325.

Therm, 2012, <http://windows.lbl.gov/software/therm/therm.html>, acessido em 02/08/2012

Torres, J., “Sistemas Construtivos Modernos em Madeira”, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, 2010.

TreeHouse, 2012, www.treehouse.pt, acessido em 15/08/2012

Value of a Dollar 1860 - 1999. Grey House Publishing, 1999.

Vidromax, 2012, [http://www.vidromax.pt/certificacoes/SGG%20CLIMALIT%204%20\(10%20ar\)%204%20mm.pdf](http://www.vidromax.pt/certificacoes/SGG%20CLIMALIT%204%20(10%20ar)%204%20mm.pdf), acessido em 17/08/2012.

VIROC, 2012a, http://www.viroc.pt/viroc/index.php?option=com_content&view=article&id=57&Itemid=119&lang=pt, acessido em 15/08/2012.

VIROC, 2012b, http://www.viroc.pt/viroc/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=2%3Acatalogos&download=9%3Aviroc_catalogo_estruturas_modulares&Itemid=122&lang=pt, acessido em 15/08/2012

Anexo I – Acústica

I.1. Comportamento Acústico – Tabelas & Ábacos

Neste Anexo são apresentadas, algumas das Tabelas ou Ábacos necessários ao cálculo do comportamento acústico da habitação modular.

Na Tabela 33 apresentam-se os valores do acréscimo de isolamento sonoro, devido há existência de caixas-de-ar.

Tabela 33 – Valor da diferença (Dif), para diferente conjugação de casos (adaptado de: Mendonça, 2005)

Panos desligados não muito diferentes		
Características da caixa-de-ar		A - Sub-total (acrécimo devido à existência da caixa-de-ar)
Caixa-de-ar de 1 cm e panos de massas dif	2 dB	
Caixa-de-ar de 2 a 4 cm	3 a 4 dB	
Caixa-de-ar de ar de 5 a 10 cm	5 dB	
Material absorvente na caixa-de-ar		
1 cm de material absorvente		B - Sub-total (acrécimo devido à existência de material absorvente na caixa-de-ar)
2 a 4 cm de material absorvente		
5 a 10 cm de material absorvente		
Correção pelo facto dos panos serem muito diferentes (paredes mistas, tijolo + placas de gesso cartonado, ou pavimentos com teto falso)		C - Sub-total (devido ao facto dos panos serem muito diferentes)
A + B = 1 a 4		
A + B = 5 a 6		
A + B = 7 a 9		
Dif = (A + B - C)		

Na Tabela 34 apresentam-se os valores das frequências críticas para elementos de 1cm de espessura, assim como a quebra de isolamento para cada um dos respectivos materiais.

Tabela 34 - Frequências críticas e quebra de isolamento por efeito de coincidência de diversos materiais para paredes de 1cm de espessura (adaptado de: Meisser, 1975)

Material	Massa volúmica (kg/m³)	Quebra de isolamento por efeito de coincidência (dB)	Frequência crítica (Hz) para uma espessura de 1 cm
Aço	7800	10	1000
Aglomerado de fibras de madeira/cimento	1350	8	6000
Alumínio	2700	10	1300
Betão de inertes correntes	2300	8	1800
Betão de escórias	1400	8	2000
Blocos de betão magro	1000	8	2100
Betão de argila expandida	1500	5 - 6	1900
Borracha	1000	4	85000
Gesso	1000	7	4000
Chumbo	10600	5	8000
Cortiça	250	4	18000
Madeira	600	6	6000 a 18000
Poliestireno expandido	14	5	14000
Tijolo furado	1427	9	2000
Tijolo maciço	2000 a 2500	9	2500 a 5000
Vidro	2500	10	12000

Na Tabela 35 encontram-se os valores da curva de referência para isolamento a sons de condução aérea, tanto para bandas de frequência de 1/3 de oitava como para bandas de frequência de 1/1 oitava.

Tabela 35 - Descrição paramétrica da curva de referência para isolamento a sons de condução aérea, em bandas de frequência de 1/3 de oitava e 1/1 oitava (CEN, 1996a)

Frequência [Hz]	Valores de Referência [dB]			
	1/3 de oitava de banda		1/1 Oitava de banda	
100	33	R		
125	36	R + 3	36	R
160	39	R + 6		
200	42	R + 9		
250	45	R + 12	45	R + 9
315	48	R + 15		
400	51	R + 18		
500	52	R + 19	52	R + 16
630	53	R + 20		
800	54	R + 21		
1000	55	R + 22	55	R + 19
1250	56	R + 23		
1600	56	R + 23		
2000	56	R + 23	56	R + 20
2500	56	R + 23		
3150	56	R + 23		

Na Tabela 36 encontram-se tabelados os valores, de acordo com o definido na EN 12354-3:2000 (CEN, 2000), do fator de correção devido à forma da fachada, este fator é dado em função da absorção média da superfície de reflexão exterior, e da altura da linha visível entre a fonte de ruído e o espaço interior em estudo (Almeida & Silva, 2011).

Tabela 36 - Exemplos de fatores de correção, ΔL_{fs} (CEN, 2000c)

ΔL_{fs} (dB)	Diagrama 1			Diagrama 2			Diagrama 3			Diagrama 4			Diagrama 5		
	Não se aplica			$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$
Altura <1,5 m	0	-1	-1	0	-1	-1	0	0	0	1	Não se aplica				
Altura (1,5-2,5) m	0	Não se aplica			-1	0	2	0	1	2					
Altura >2,5 m	0	Não se aplica			1	1	2	2	2	3					

I.2. Traçado da Curva de Estimativa de Isolamento Sonoro

Neste Anexo são apresentados, de forma resumida, os procedimentos para o traçado da curva de estimativa de isolamento sonoro para os diferentes tipos de elementos, simples e duplos.

A representação das diferentes curvas deve respeitar as seguintes regras de escala. No eixo das abcissas é representada a frequência, em bandas de 1/3 de oitava, sendo a escala logarítmica, correspondendo a distância entre duas bandas de frequência sucessivas a 5mm. No eixo das ordenadas representa-se o índice de redução sonora (R) em escala linear, em que 10dB correspondem a 20mm.

Elementos Simples

A determinação do índice de redução sonora de um elemento simples (paredes, lajes ou envidraçados) é realizada do traçado da curva (f - frequência, R - atenuação sonora) tendo em conta a massa da parede, a sua rigidez e as perdas internas:

1. Sabendo a massa do elemento, recorrendo às equações (4) ou (5) que representam a lei experimental da massa a 500Hz, determina-se o índice de atenuação sonora e marca-se no gráfico;
2. Traça-se a reta com declive de 4dB por oitava correspondente à lei da frequência;
3. Determinam-se e representam-se as perdas internas na respetiva frequência. A marcação das quebras é sempre realizada a partir da curva da lei experimental da frequência (inclinação de 4dB por oitava);
4. Representam-se o ponto correspondente à frequência crítica. A partir desse ponto traça-se a curva de isolamento com uma inclinação de 10dB por oitava. A partir do cruzamento desta com a curva da lei experimental da frequência traça-se uma nova reta com inclinação de 6dB por oitava;
5. A partir dos 100Hz, ou ligeiramente acima das primeiras frequências de ressonância (caso se localizem próximo ou acima dos 100Hz), traça-se uma reta com inclinação de 6dB por oitava.

Na Figura 101 encontram-se representadas as quebras e as inclinações presentes na curva de redução sonora de elementos simples.

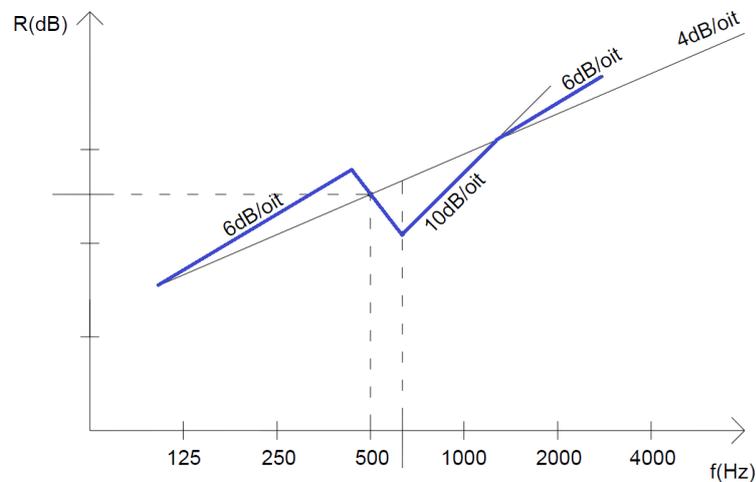


Figura 101 - Marcação do índice de redução sonora dado pela lei experimental da massa em elementos simples (adaptado de: Mendonça, 2005)

Elementos Duplos

O traçado da curva de estimativa do índice de redução sonora de um elemento duplo é realizado do seguinte modo:

1. Sabendo a massa do elemento, recorrendo às equações (6) ou (7) que representam a lei experimental da massa a 500 Hz , considerando um eventual acréscimo de isolamento referente à diferença de isolamento para um elemento simples com a mesma massa (Dif), determina-se o índice de atenuação sonora e marca-se no gráfico;
2. Traça-se a reta de declive de 6dB por oitava correspondente à lei teórica da frequência;
3. Considera-se os modos próprios de vibração por flexão transversal do painel, no caso de os elementos apresentarem espessura reduzida e se encontrarem simplesmente apoiados nos quatro lados;
4. Determina-se a frequência de ressonância do conjunto massa/caixa-de-ar e marca-se a respetiva perda, se esta se encontrar dentro da gama de frequências audíveis. Nas soluções construtivas pesadas esta frequência situa-se normalmente abaixo dos 100 Hz , pelo que poderá ser desprezada. Pelo contrário em envidraçados duplos corrente, esta

- frequência situa-se acima dos 100Hz provocando quebras entre 6dB e 8dB, no entanto só podem ser considerados se o envidraçado apresentar área superior a 10m²;
5. Determinam-se e representam-se as frequências críticas dos panos de parede, laje ou envidraçado considerando as respetivas perdas de isolamento características para cada material;
 6. Determinar e representar as frequências de ressonância da caixa-de-ar, considerando as perdas de isolamento respetivas;
 7. Traça-se a curva do índice de redução sonora. A partir dos pontos correspondentes às quebras de isolamento na frequência crítica, na frequência de ressonância do conjunto massa caixa-de-ar e nas frequências de ressonância da caixa-de-ar (realizadas sempre a partir da curva da lei da frequência), é traçada a curva de isolamento de 10dB por oitava até encontrar a curva da lei experimental da frequência. A partir dos pontos de cruzamento é traçado um novo troço de 8dB de inclinação.
 8. A partir dos 100Hz, ou ligeiramente acima das primeiras frequências de ressonância (caso se localizem próximo ou acima dos 100Hz), traça-se uma reta com inclinação de 8dB por oitava.

Na Figura 102 encontram-se representadas as quebras e as inclinações presentes na curva de redução sonora de elementos duplos. De notar que as quebras nas frequências de ressonância da caixa-de-ar se encontram fora da zona audível, portanto à partida são desprezadas.

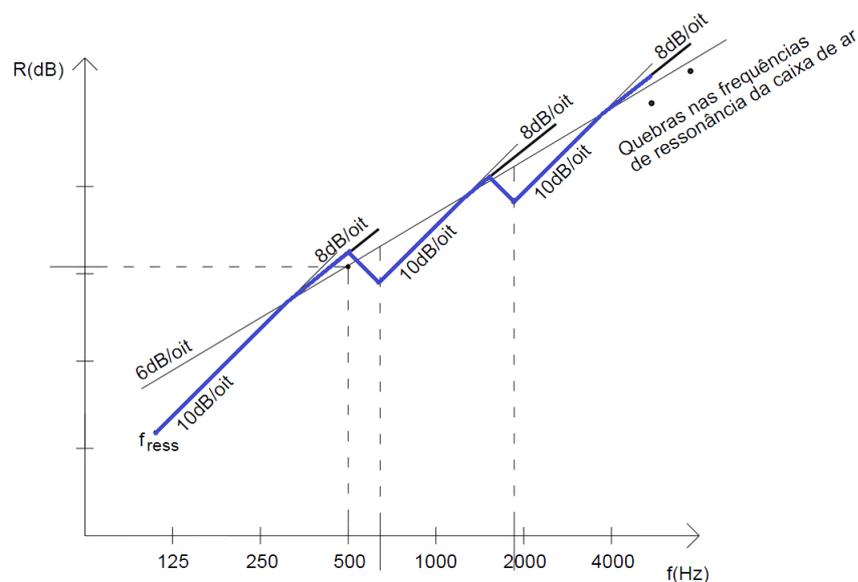


Figura 102 - Marcação do índice de redução sonora dado pela lei experimental da massa em elementos duplos (adaptado de: Mendonça, 2005)

I.3. Ajustamento da curva de valores estimados à curva de referência

Neste anexo são apresentadas as tabelas resultantes do cálculo do ajustamento da curva de estimativa de isolamento sonora à curva de referência indicada na norma EN ISO 717-1:1996 (CEN, 1996a).

Nas Tabela 37, Tabela 38 e Tabela 39 apresentam-se os valores da curva de estimativa de isolamento sonoro e o respetivo ajustamento à curva de referência.

Tabela 37 – Ajustamento da curva de valores estimados, para o painel sandwich, à curva de referência

Frequência	Elemento simples			Elemento duplo		
	R painel sandwich	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis	R painel sandwich	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis
100	37	21	0	36	24	0
125	39	24	0	39	27	0
160	36	27	0	39	30	0
200	33	30	0	36	33	0
250	30	33	3	32	36	4
315	28	36	8	31	39	8
400	31	39	8	34	42	8
500	35	40	5	37	43	6
630	38	41	3	41	44	3
800	41	42	1	44	45	1
1000	45	43	0	47	46	0
1250	48	43	0	50	46	0
1600	51	43	0	54	46	0
2000	52	43	0	57	46	0
2500	51	43	0	60	46	0
3150	55	43	0	63	46	0
		Σ Desvios =	27		Σ Desvios =	30

Tabela 38 - Ajustamento da curva de valores estimados, do envidraçado, à curva de referência

Frequência	R envidraçado	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis
100	19	18	0
125	21	21	0
160	24	24	0
200	27	27	0
250	29	30	1
315	32	33	1
400	35	36	1
500	37	37	0
630	40	38	0
800	43	39	0
1000	44	40	0
1250	43	40	0
1600	39	40	1
2000	34	40	6
2500	31	40	9
3150	29	40	11
Σ Desvios =			30

Tabela 39 – Ajustamento da curva de valores estimados, da porta, à curva de referência

Frequência	R porta	Curva Referência	Desvios Desfavoráveis
100	22	20	0
125	24	23	0
160	26	26	0
200	28	29	1
250	30	32	2
315	32	35	3
400	34	38	4
500	36	39	3
630	38	40	2
800	40	41	1
1000	42	42	0
1250	42	42	0
1600	44	42	0
2000	44	42	0
2500	41	42	1
3150	37	42	5
Σ Desvios =			25

I.4. Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea - Acoubat Sound

Neste Anexo são apresentados os resultados do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o interior e exterior, e entre espaços interiores com recurso ao programa Acoubat e sua base de dados. São ainda indicadas todas as opções e simplificações tomadas na conceção dos modelos a introduzir no programa.

Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução Aérea entre interior e exterior

Nas Figura 103 a Figura 106 encontram-se representados os modelos e os valores do cálculo do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o interior do compartimento Sala/Cozinha e Quarto 1, respetivamente, tanto para a solução construtiva em estudo, painel sandwich, como para a alternativa em soluções construtivas tradicionais.

Devido às limitações impostas pelo programa, foram efetuadas algumas simplificações na conceção do modelo dos compartimentos. Assim o compartimento da Sala/cozinha foi considerado retangular, admitindo uma área equivalente.

Para elemento de separação entre Sala/Cozinha e Quarto 1, como é impossível definir dois tipos de soluções construtivas no mesmo segmento, no caso da habitação modular admitiu-se o painel sandwich em todo o segmento e no caso da solução convencional admite-se a parede simples de tijolo, isto por se tratarem das soluções que apresentam resultados mais desfavoráveis.

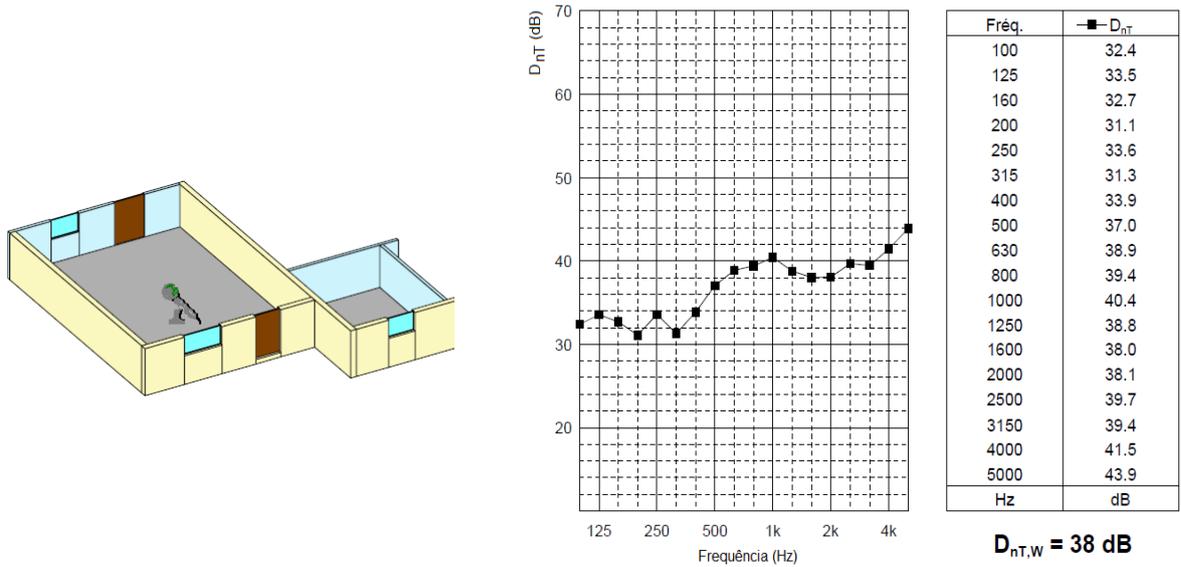


Figura 103 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Sala/Cozinha) e exterior – solução em painel sandwich

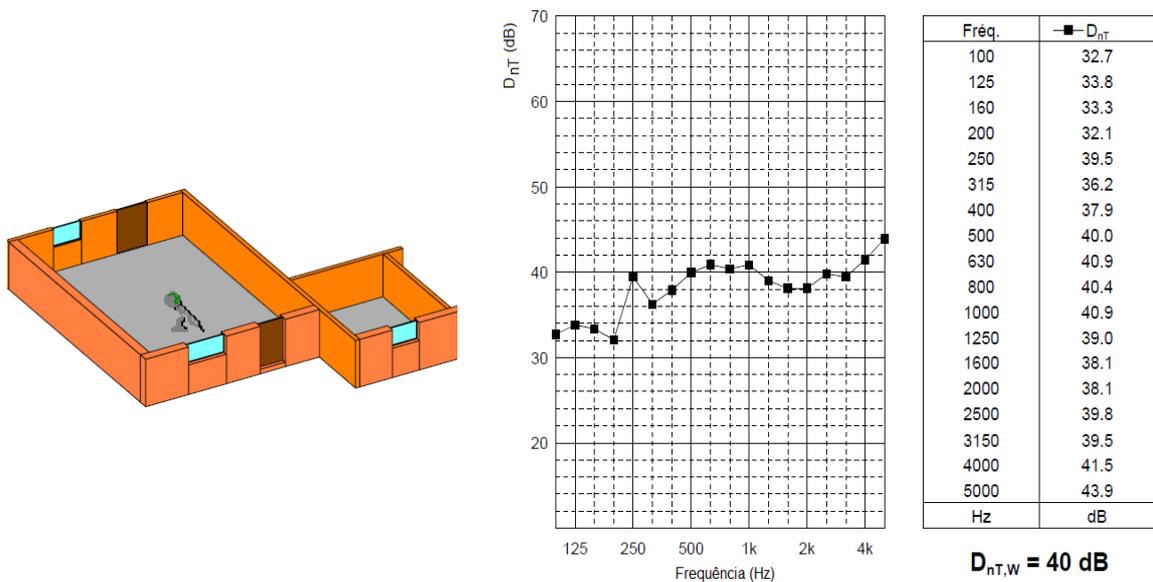


Figura 104 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Sala/Cozinha) e exterior – solução convencional

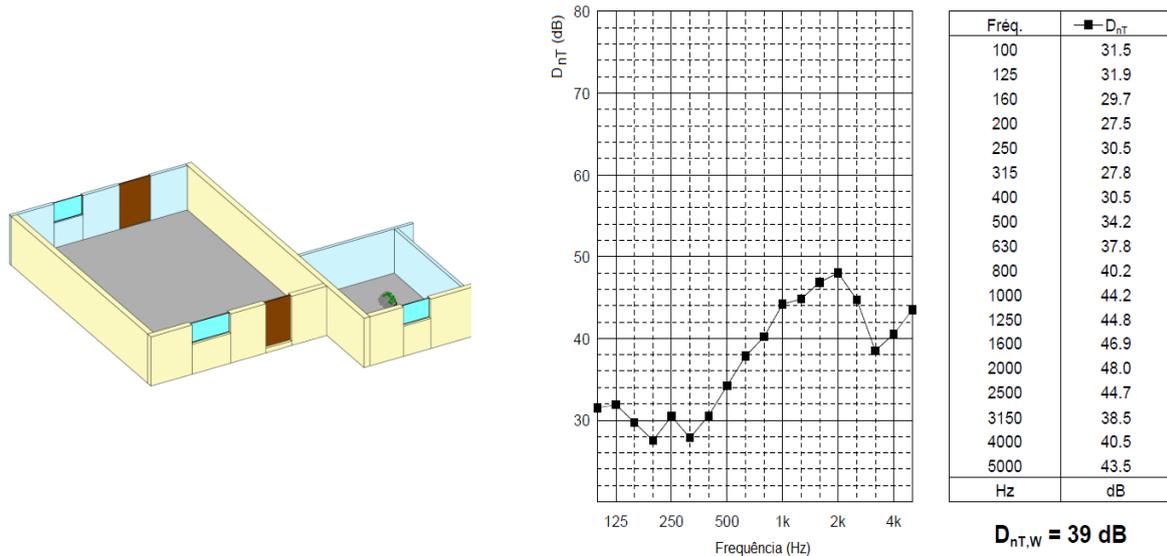


Figura 105 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Quarto 1) e exterior – solução em painel sandwich

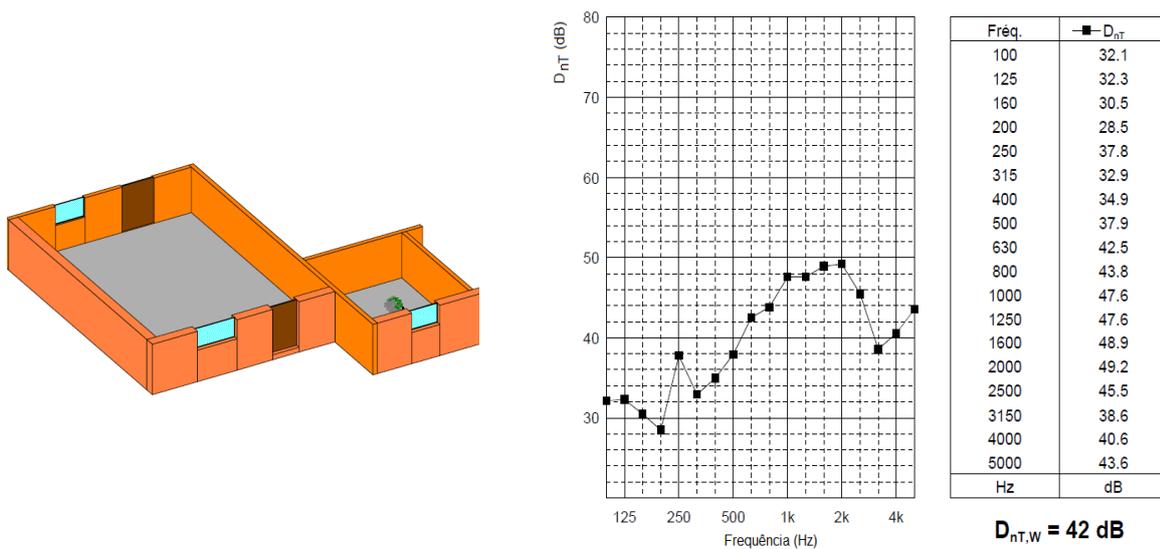


Figura 106 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Quarto 1) e exterior – solução convencional

Nas Figura 107 a Figura 112 apresentam-se os modelos e os valores do cálculo do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o interior dos diferentes quartos da habitação e o exterior, tanto para a solução construtiva em estudo, painel sandwich, como para a alternativa em soluções construtivas tradicionais.

Na execução da geometria dos compartimentos foram feitas algumas simplificações, nomeadamente na geometria do Quarto 2 e Quarto 3, onde se considerou que a área de superfície do armário embutido do Quarto 3 fazia parte da área de superfície do Quarto 2.

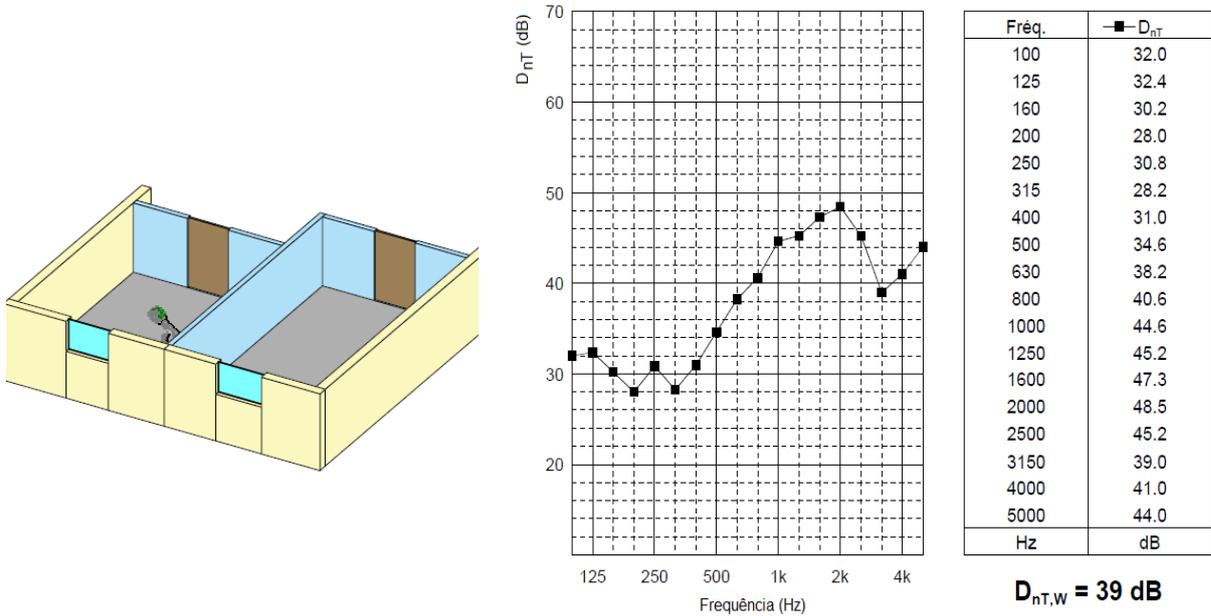


Figura 107 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Quarto 1) e exterior – solução em painel sandwich

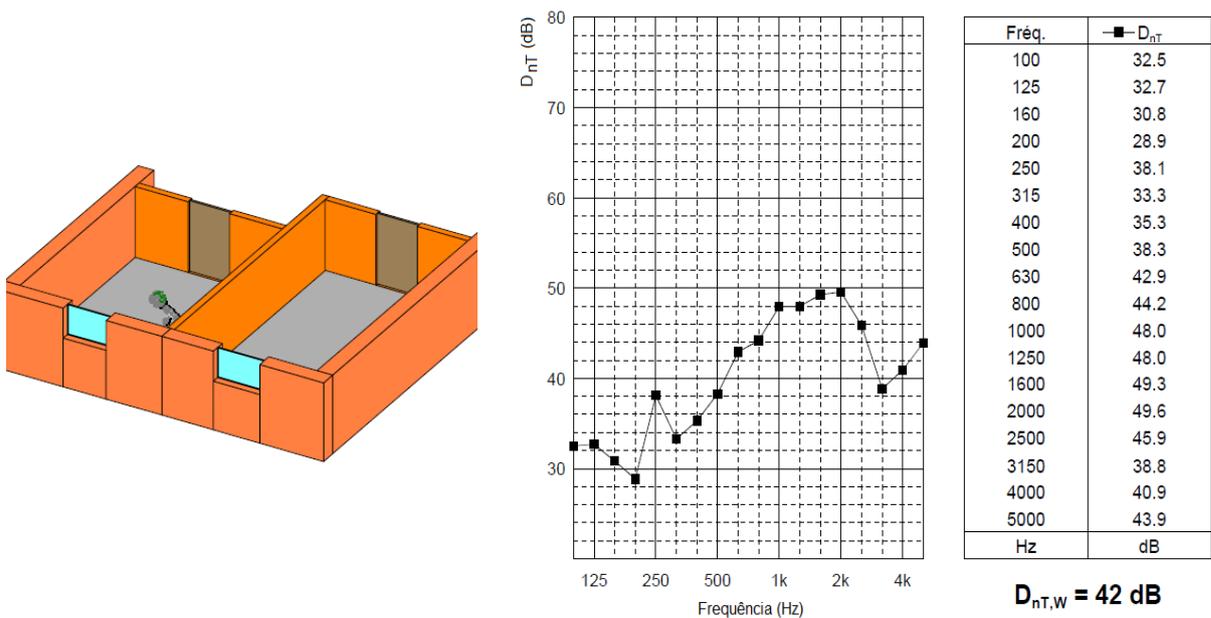


Figura 108 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Quarto 1) e exterior – solução convencional

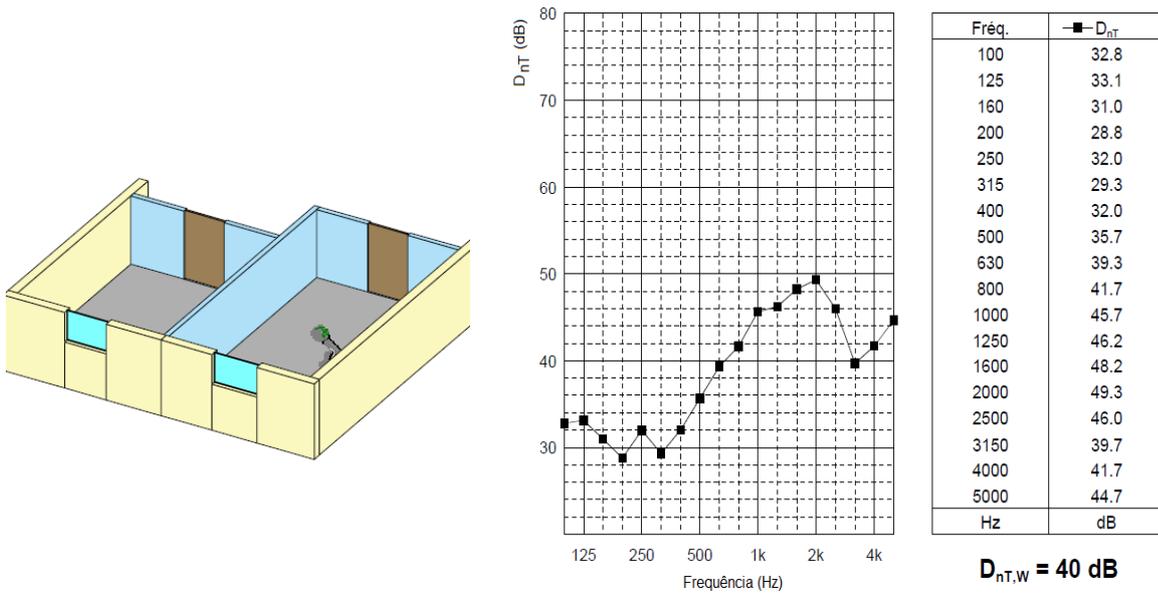


Figura 109 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Quarto 2) e exterior – solução em painel sandwich

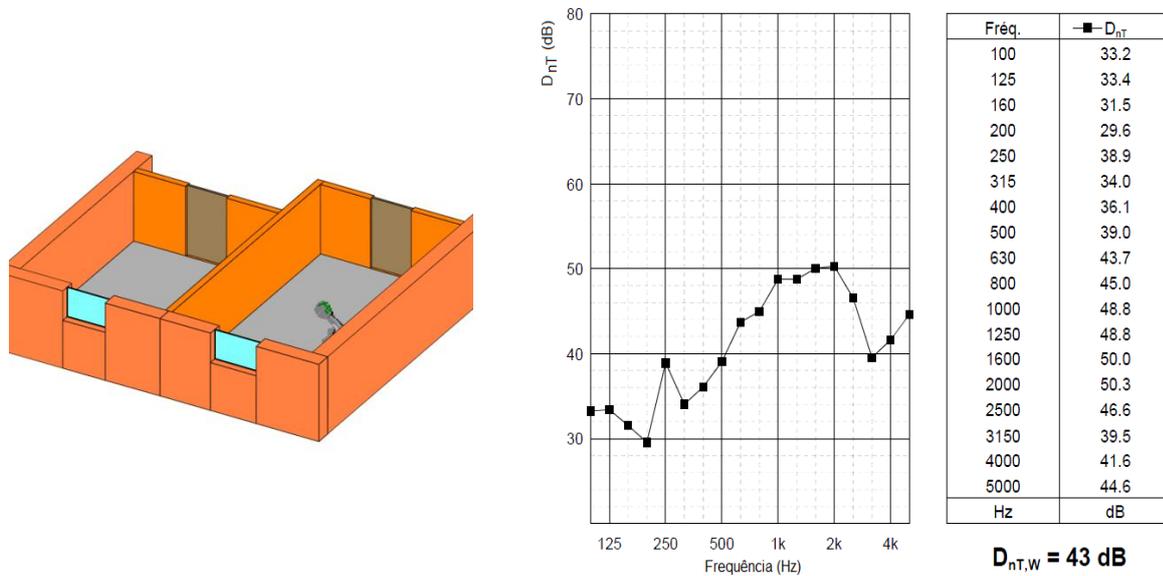


Figura 110 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Quarto 2) e exterior – solução convencional.

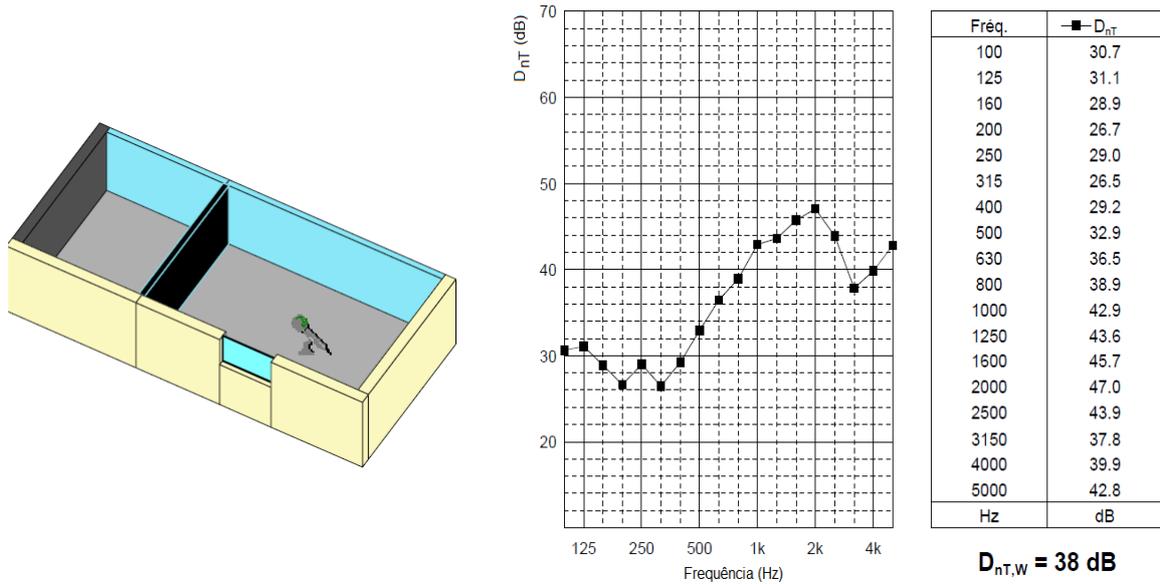


Figura 111 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Quarto 3) e exterior – solução em painel sandwich

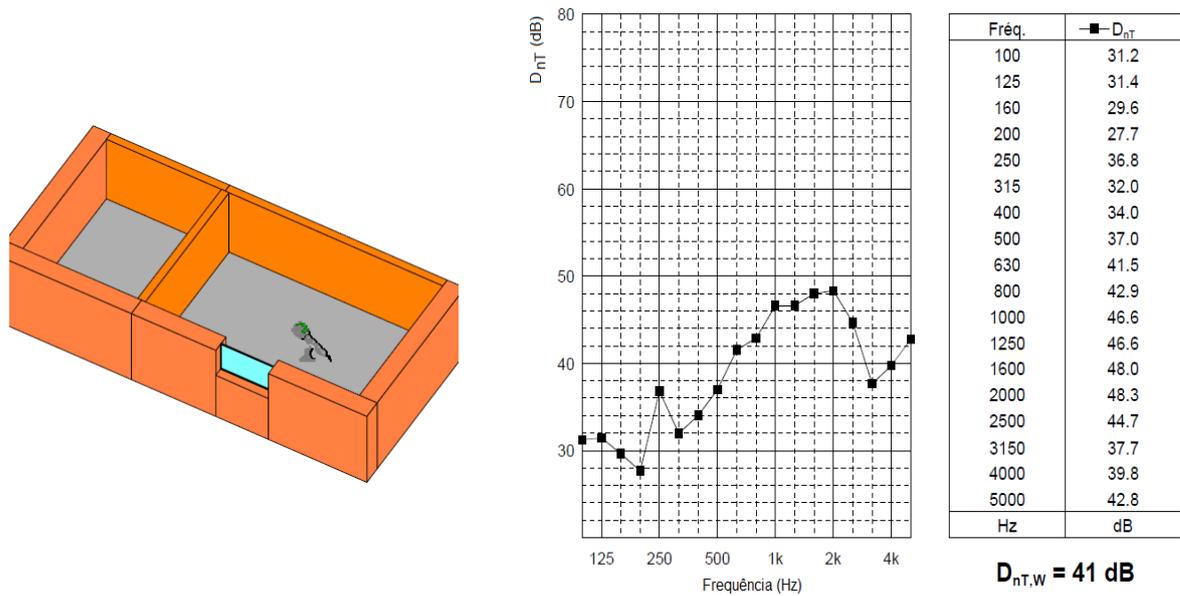


Figura 112 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre o interior (Quarto 3) e exterior – solução convencional

Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução Aérea entre espaços interiores

Nas Figura 113 a Figura 120 encontram-se representados os modelos e os valores do cálculo do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos interiores.

Tal como para o cálculo do índice de isolamento entre o exterior e interior, neste caso também foram feitas algumas simplificações/considerações na conceção do modelo dos compartimentos.

Devido ao impedimento de selecionar dois tipos de materiais diferentes por segmento de parede, para elemento de separação entre a Sala/Cozinha e o Quarto 1 adotou-se o painel sandwich ($R_w=40\text{dB}$), uma vez que é mais desfavorável que uma parede de betão com 18cm de espessura ($R_w=59\text{dB}$). Na hipótese do uso de soluções construtivas tradicionais, adotou-se a parede simples de tijolo, uma vez ser mais desfavorável que a parede dupla de tijolo.

O compartimento da Sala/cozinha foi também considera retangular, considerando como área de compartimento a zona exterior que dá acesso à porta de entrada da cozinha.

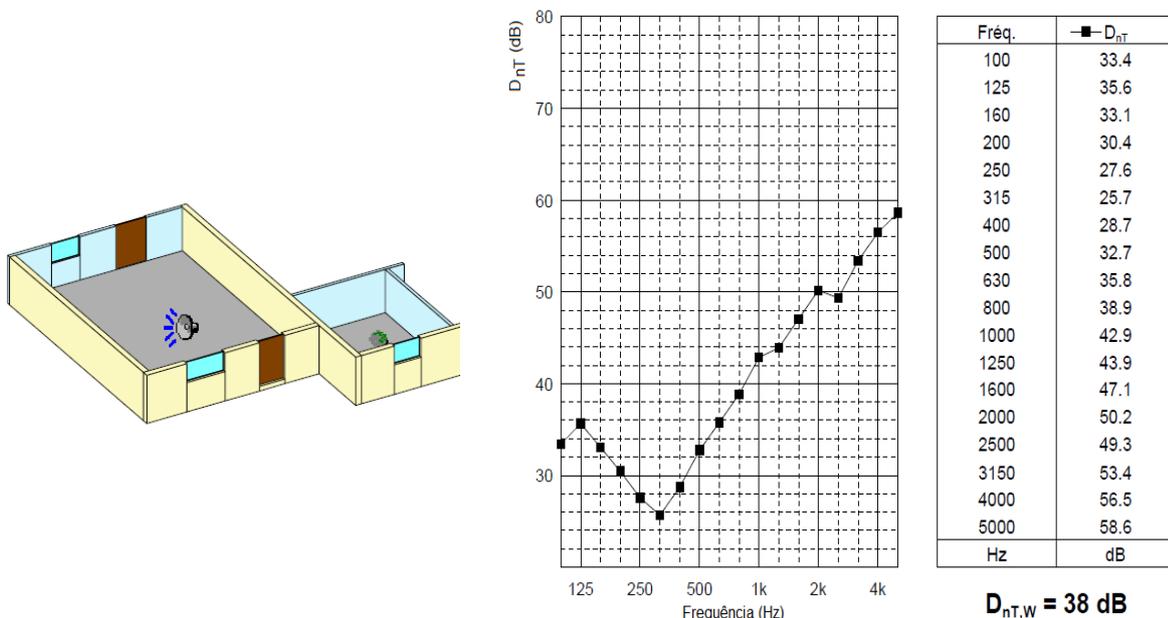


Figura 113 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos interiores (Sala/Cozinha → Quarto 1) – solução em painel sandwich

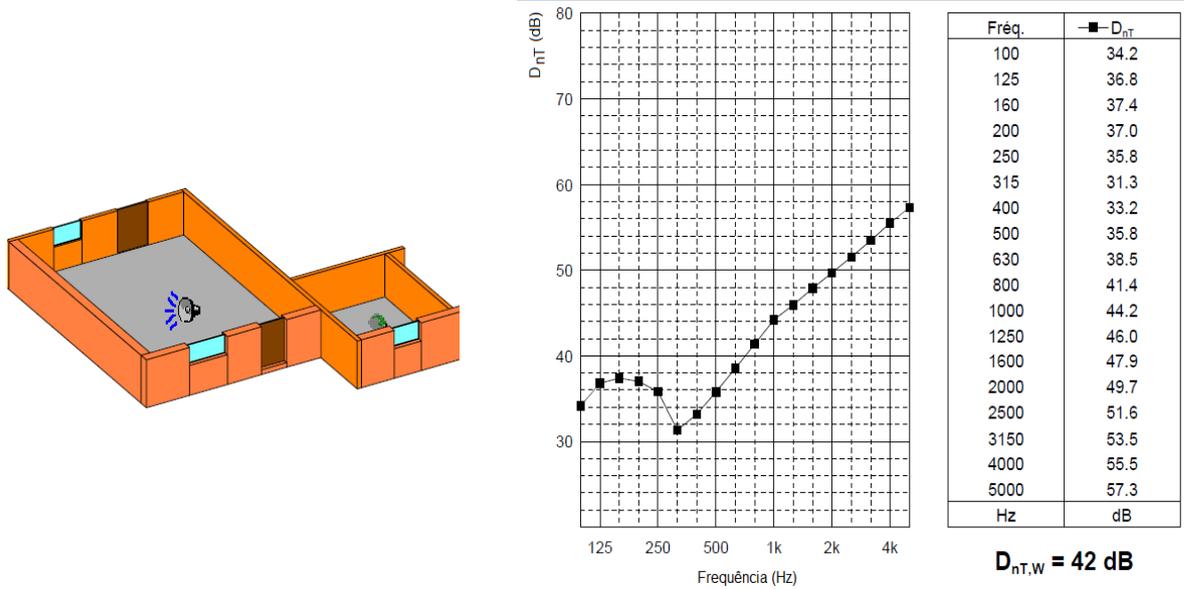


Figura 114 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos interiores (Sala/Cozinha → Quarto 1) – solução convencional

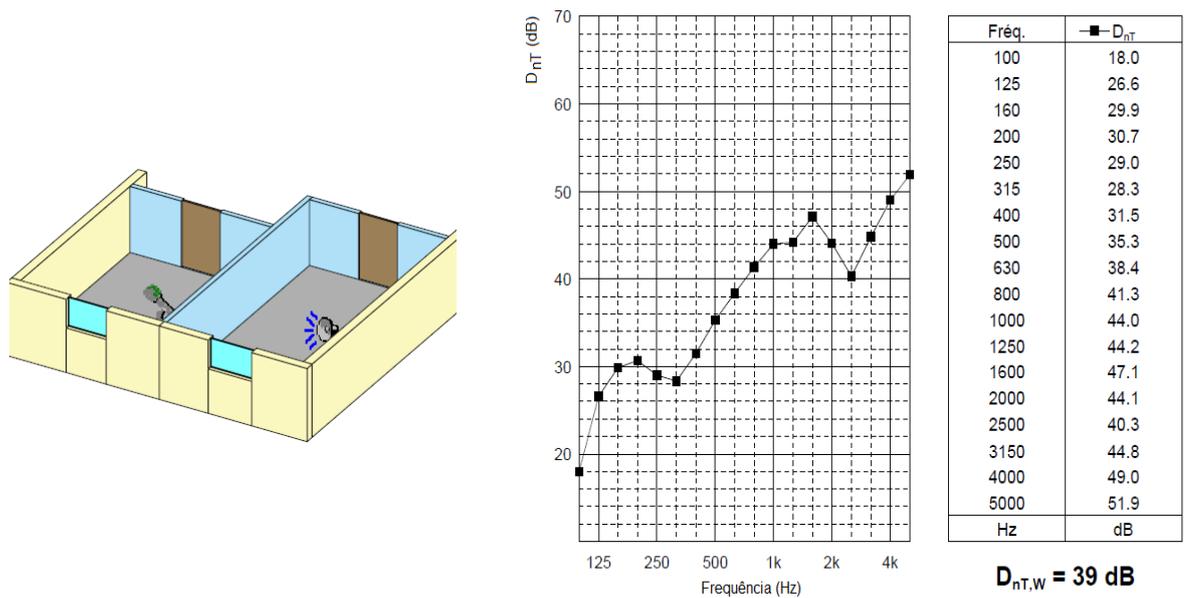


Figura 115 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos interiores (Quarto 2 → Quarto 1) – solução em painel sandwich

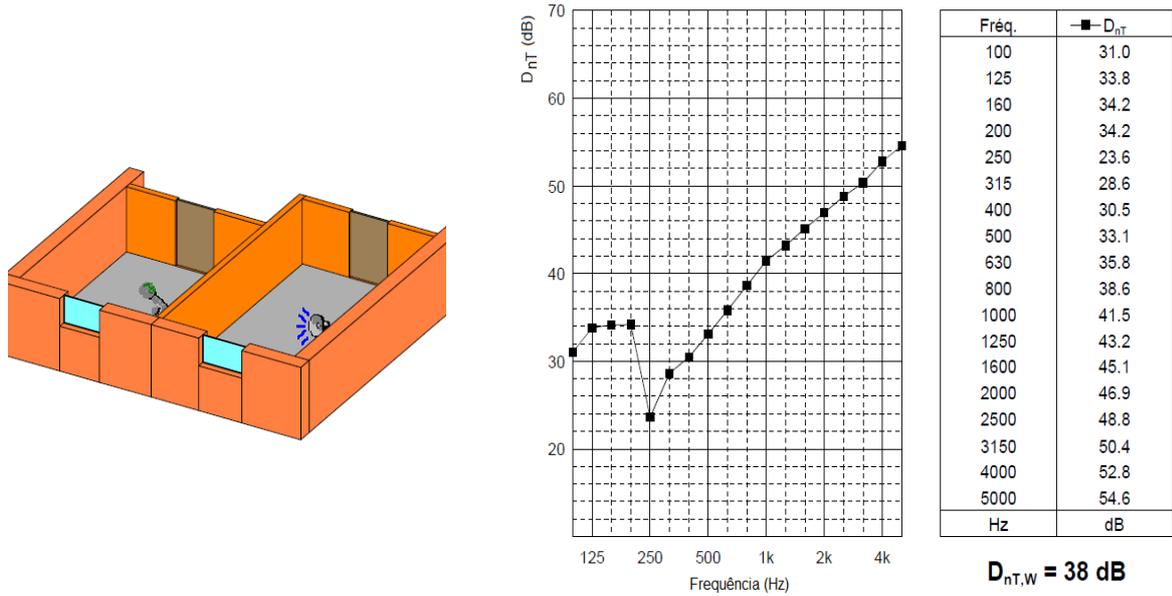


Figura 116 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos interiores (Quarto 2 → Quarto 1) – solução convencional

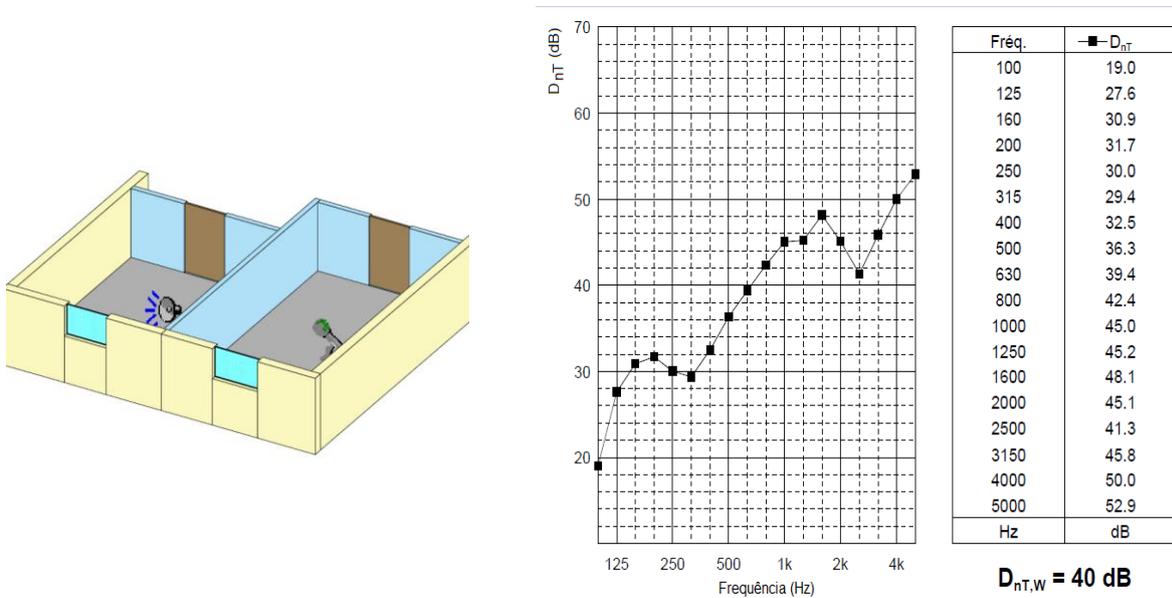


Figura 117 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos interiores (Quarto 1 → Quarto 2) – solução em painel sandwich

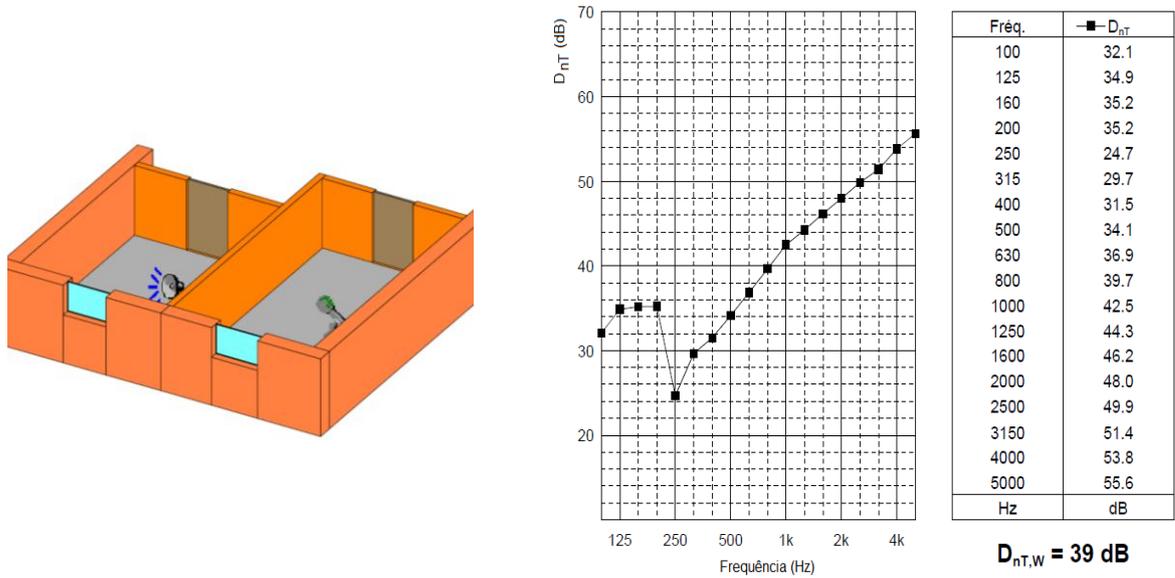


Figura 118 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos interiores (Quarto 1 → Quarto 2) – solução convencional

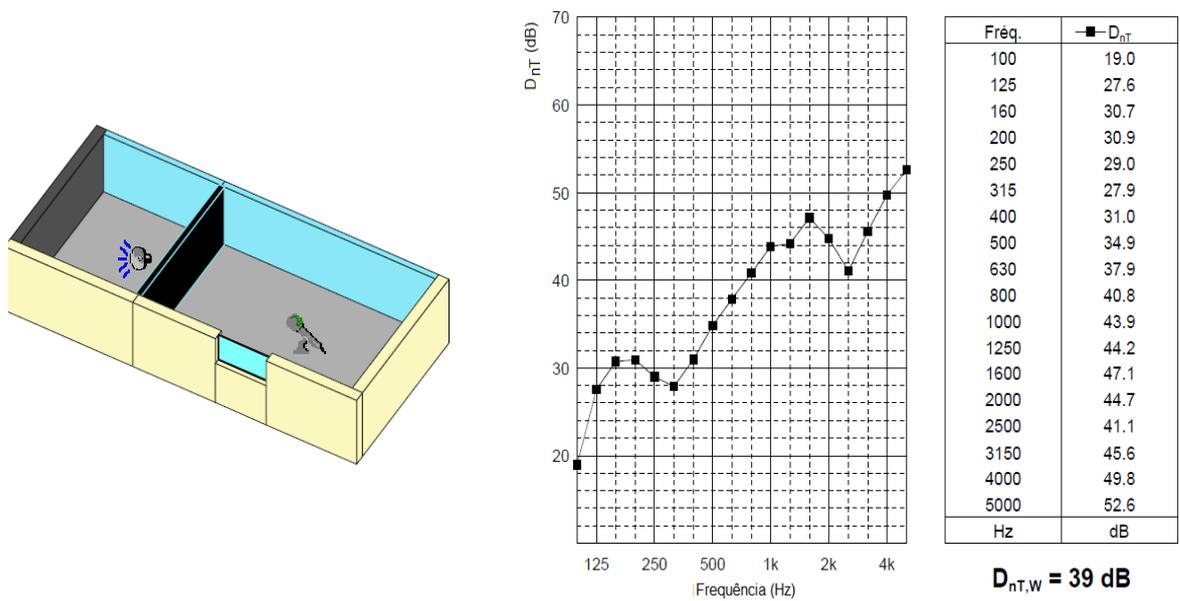


Figura 119 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos interiores (WC → Quarto 3) – solução em painel sandwich

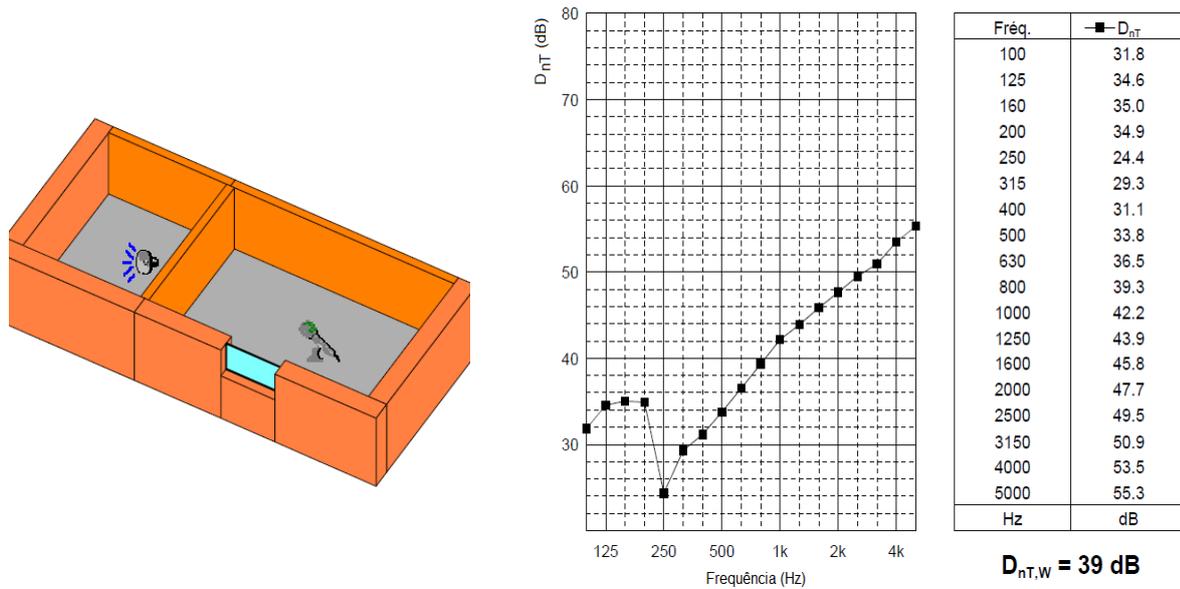


Figura 120 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos interiores (WC → Quarto 3) – solução convencional

A Figura 121 e a Figura 122 apresentam o modelo e o valor do cálculo do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos de fogos adjacentes, nomeadamente entre as Zonas de Sala/Cozinha das habitações dispostas em banda.

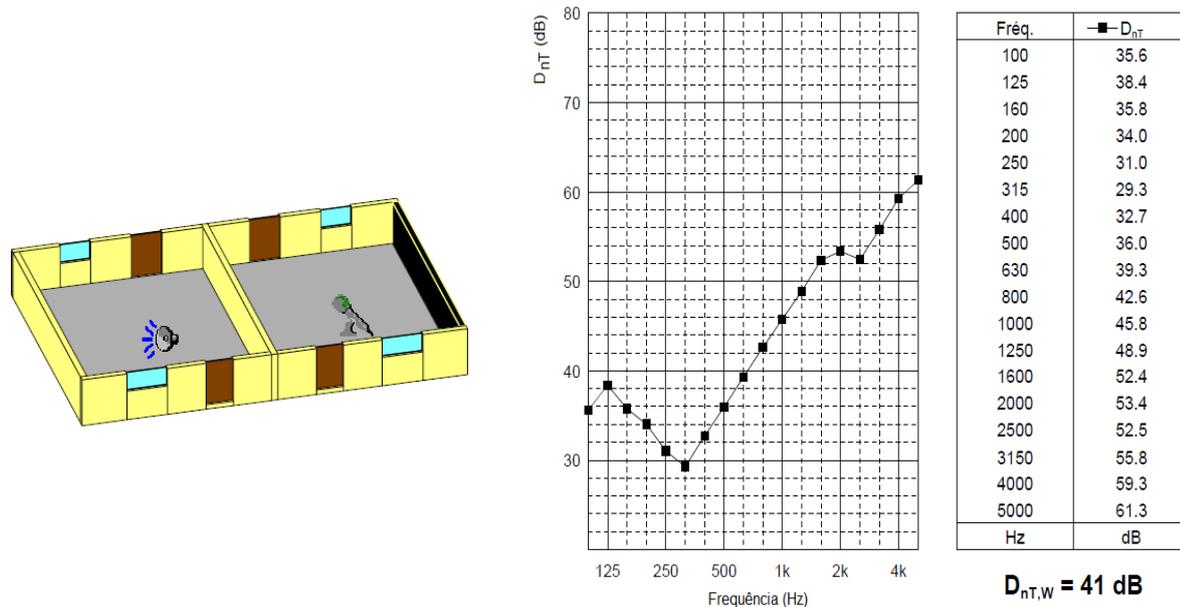


Figura 121 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos de fogos adjacentes (Sala/Cozinha → Sala/Cozinha) – solução em painel sandwich

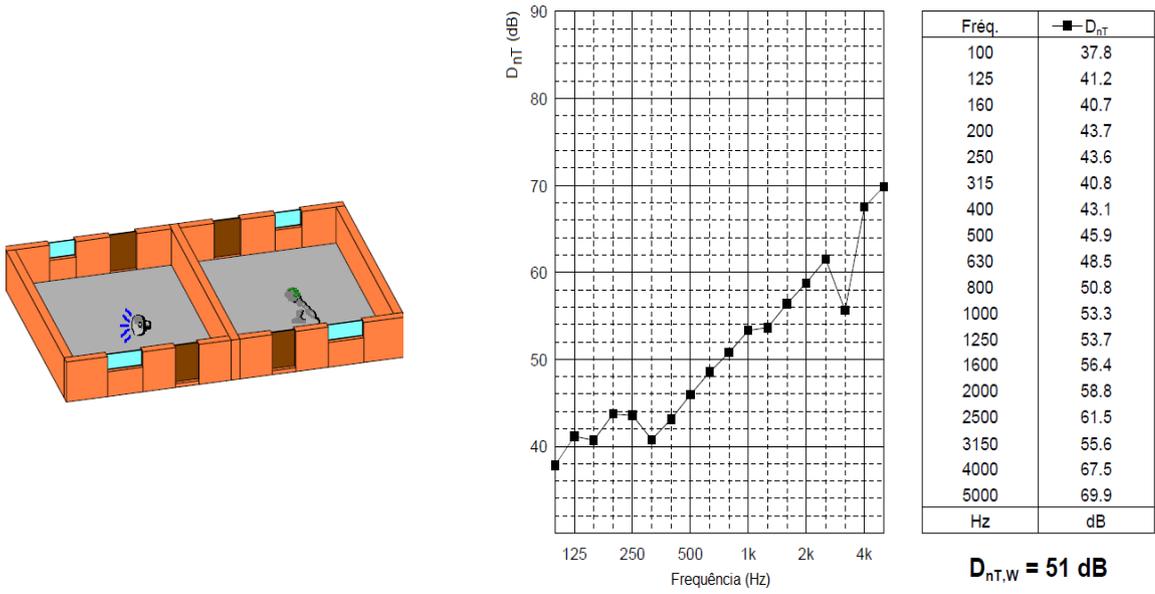
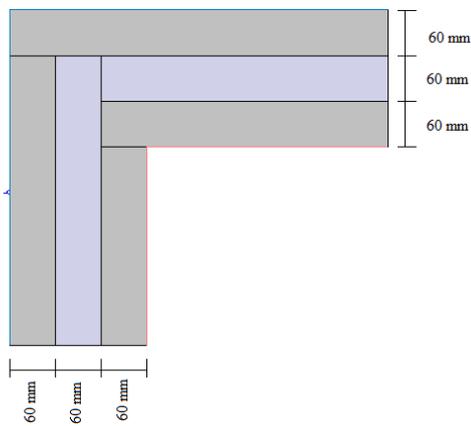


Figura 122 - Índice de Isolamento Sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos de fogos adjacentes (Sala/Cozinha → Sala/Cozinha) – solução convencional

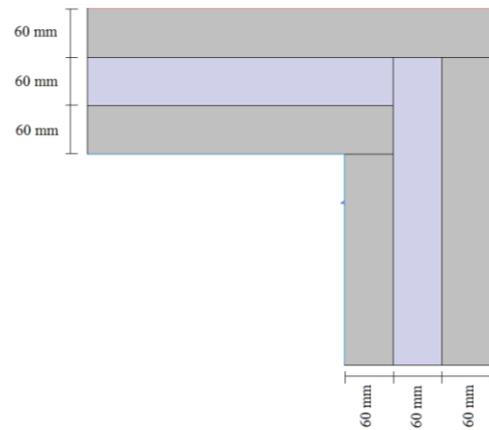
Anexo II – Térmica

II.1. Pormenores de Ligação – Therm

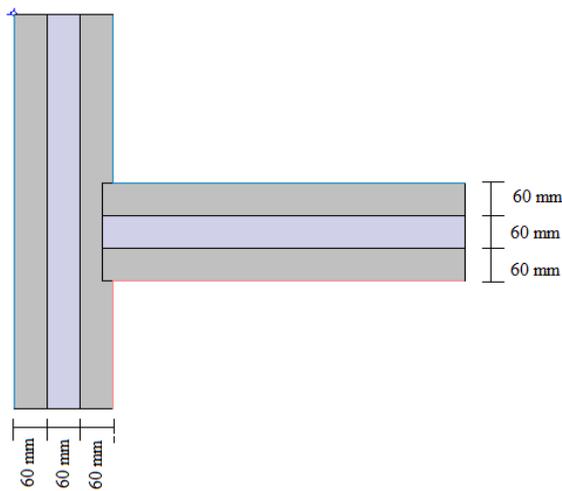
Neste anexo são apresentados os diferentes pormenores de ligação cotados necessários à análise das pontes térmicas lineares com recurso ao Therm.



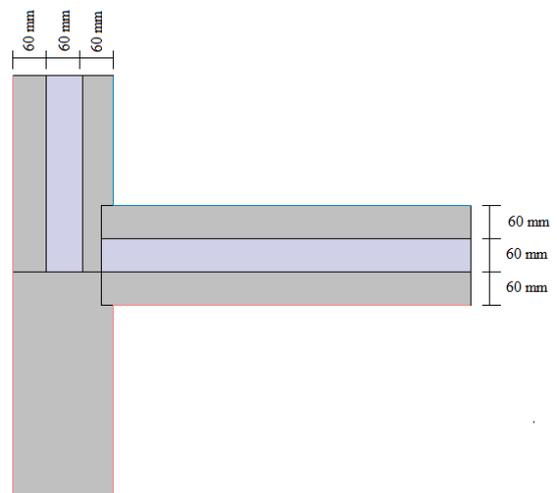
a) Pormenor de Ligação n.º 1



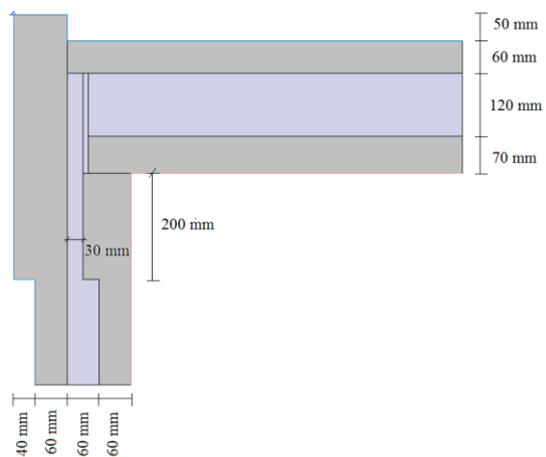
b) Pormenor de Ligação n.º 3



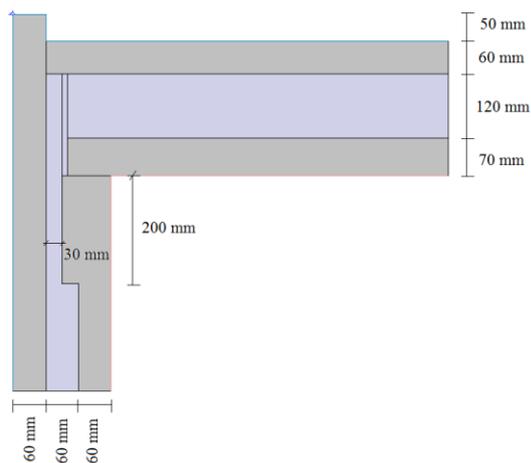
c) Pormenor de Ligação n.º 2



d) Pormenor de Ligação n.º 4



e) Pormenor de Ligação da Cobertura
n.º 1



f) Pormenor de Ligação da Cobertura
n.º 2

II.2. Comportamento Térmico – EnergyPlus

Neste anexo são apresentados os resultados da temperatura interior e das necessidades energéticas das restantes zonas da habitação, obtidos com recurso ao EnergyPlus.

II.2.1. Temperatura Interior

Na Figura 123, na Figura 124 e na Figura 125 encontram-se representados os resultados das temperaturas ambiente no interior da habitação, para a solução em painel sandwich, nomeadamente nas zonas Quarto 1, Quarto 3 e WC.

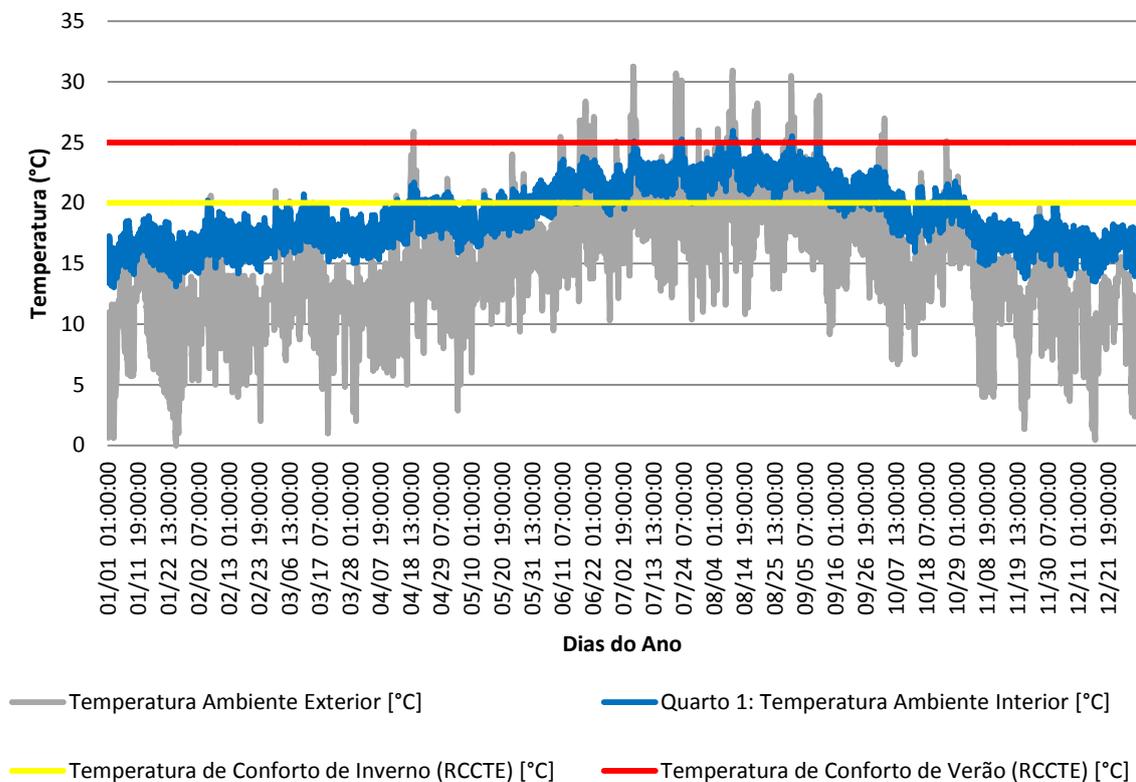


Figura 123 - Evolução da temperatura interior, na zona Quarto 1, ao longo do ano - solução painel sandwich

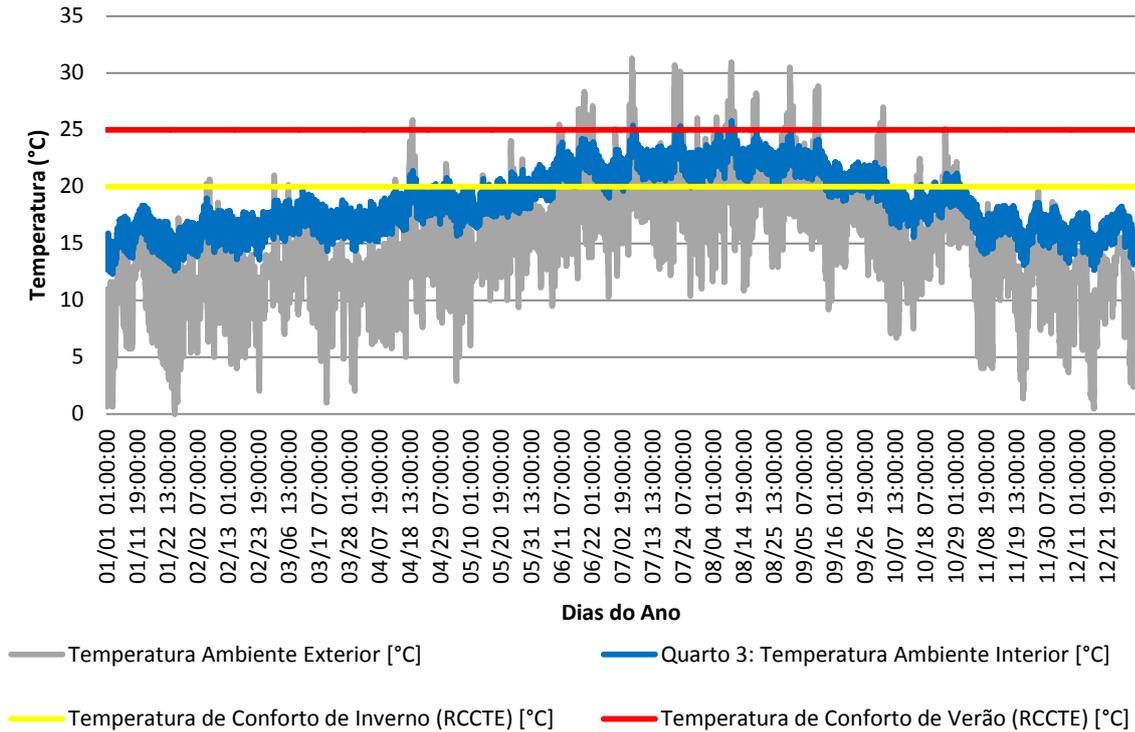


Figura 124 - Evolução da temperatura interior, na zona Quarto 3, ao longo do ano - solução com painel sandwich

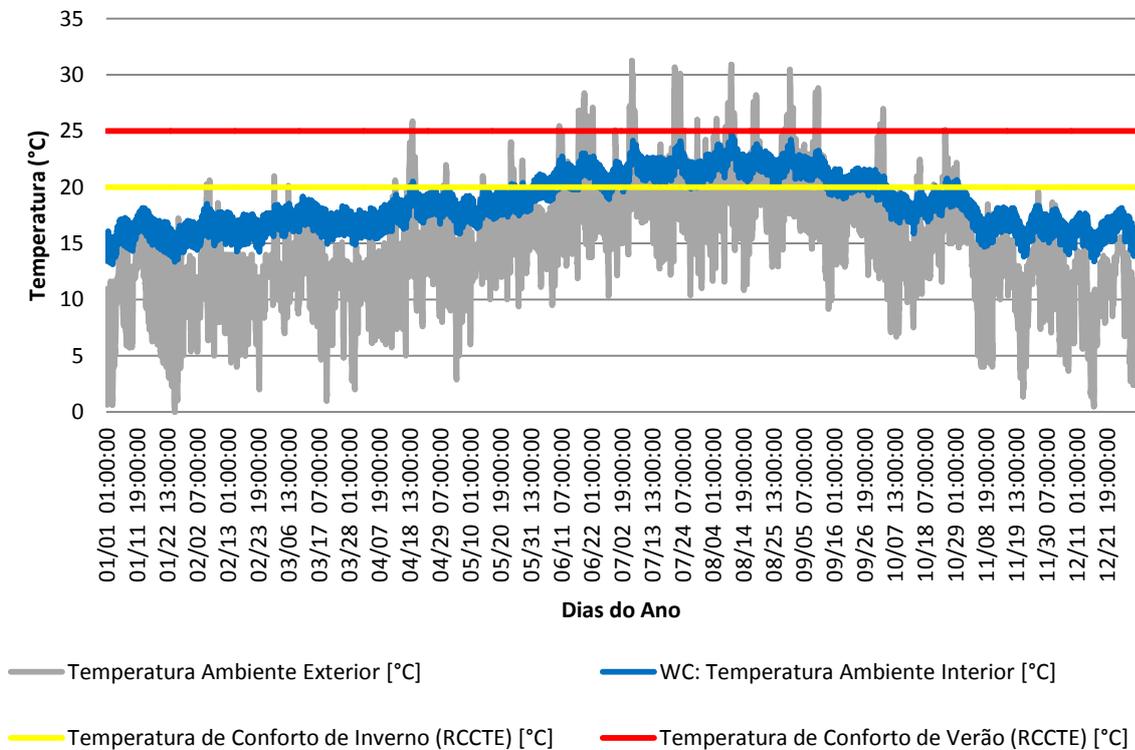


Figura 125 - Evolução da temperatura ambiente interior, na zona do WC, ao longo do ano - solução com painel sandwich

Na Figura 126, na Figura 127 e na Figura 128 encontram-se representados os resultados das temperaturas no interior da habitação, para a solução convencional (paredes de alvenaria), nomeadamente nas zonas Quarto 1, Quarto 3 e WC.

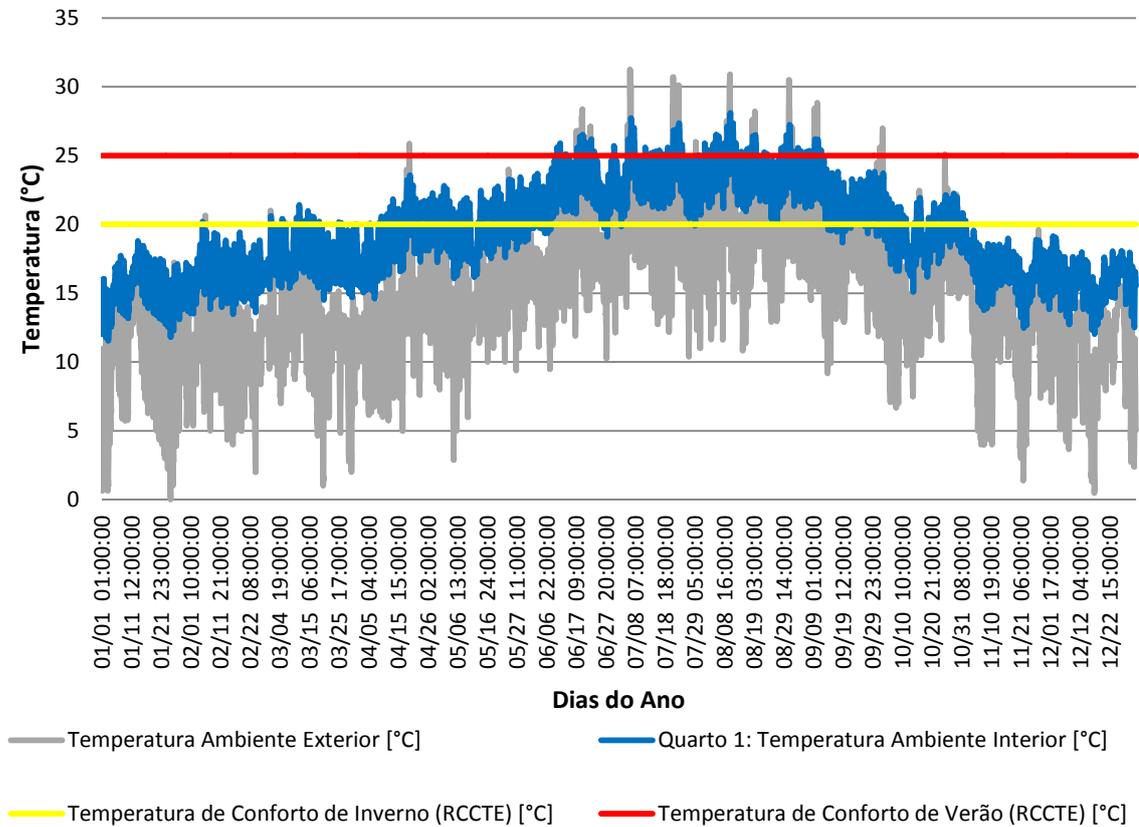


Figura 126 - Evolução da temperatura interior, na zona Quarto 1, ao longo do ano - solução convencional

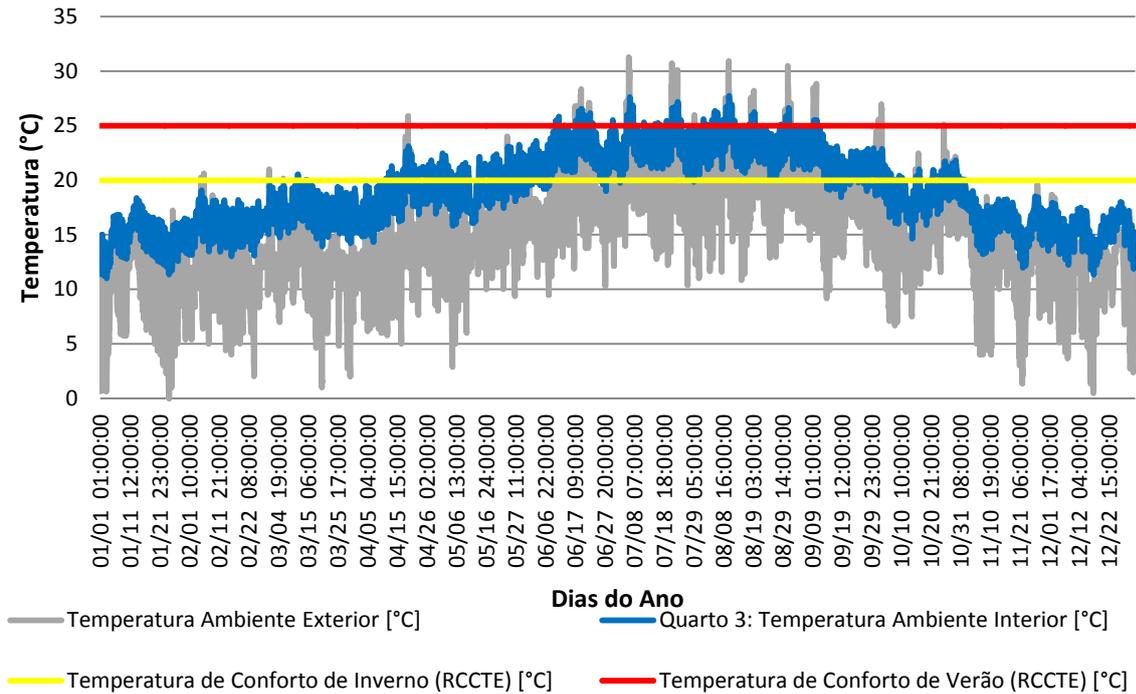


Figura 127 - Evolução da temperatura interior, na zona Quarto 3, ao longo do ano - solução convencional

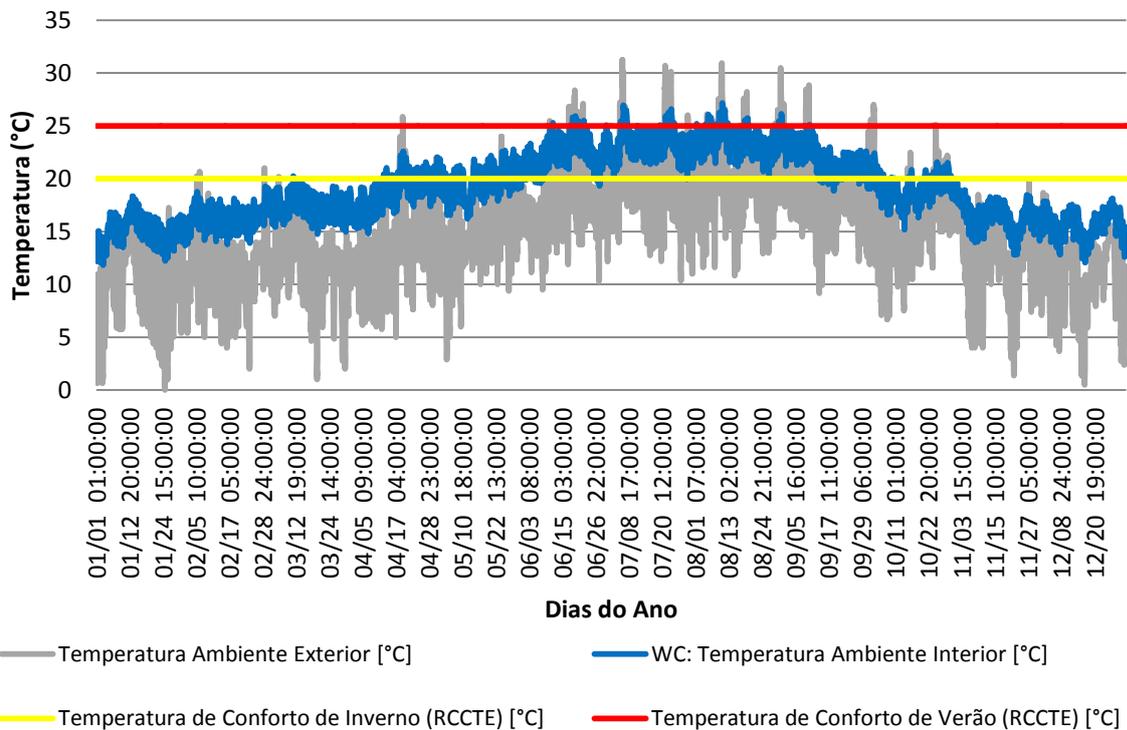


Figura 128 - Evolução da temperatura interior, na zona do WC, ao longo do ano - solução convencional

II.2.2. Necessidades Energéticas

Na Figura 129 a Figura 130 encontram-se representadas as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento, para a solução em painel sandwich, nomeadamente nas zonas Quarto 1, Quarto 3, WC e Hall de acesso aos quartos.

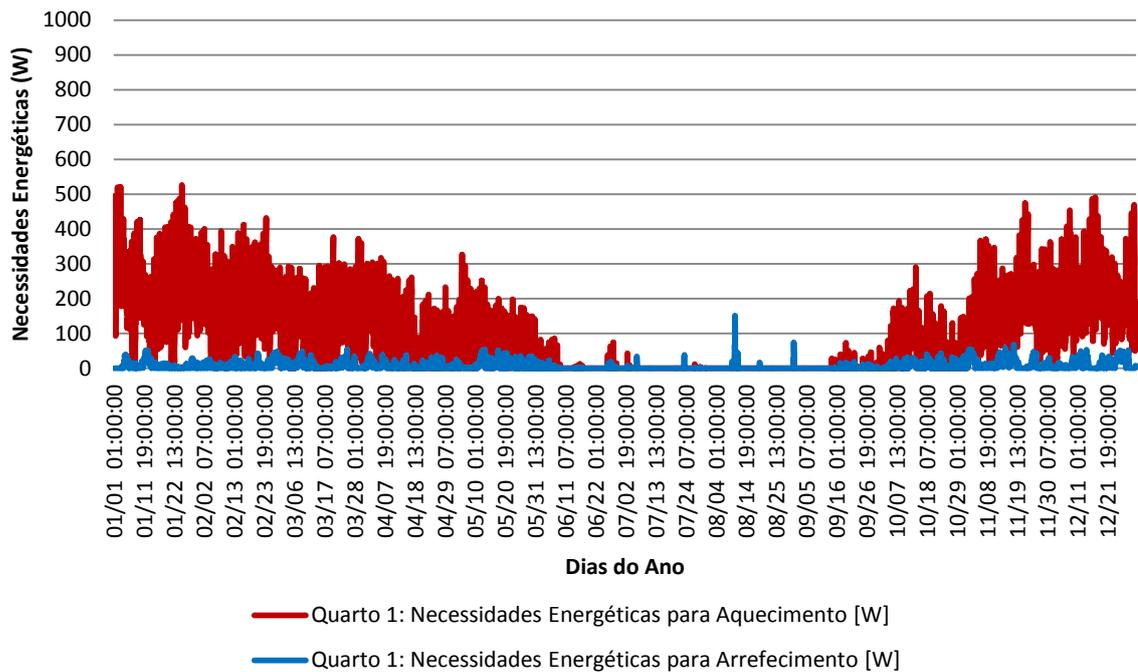


Figura 129 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Quarto 1, ao longo do ano – solução com painel sandwich

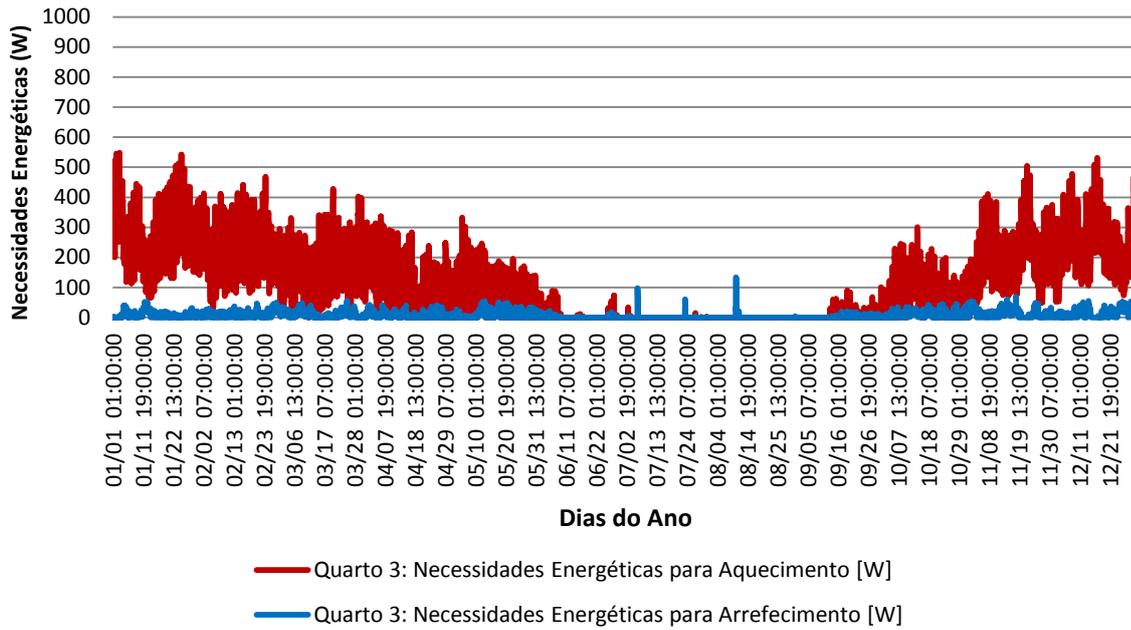


Figura 130 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Quarto 3, ao longo do ano - solução com painel sandwich

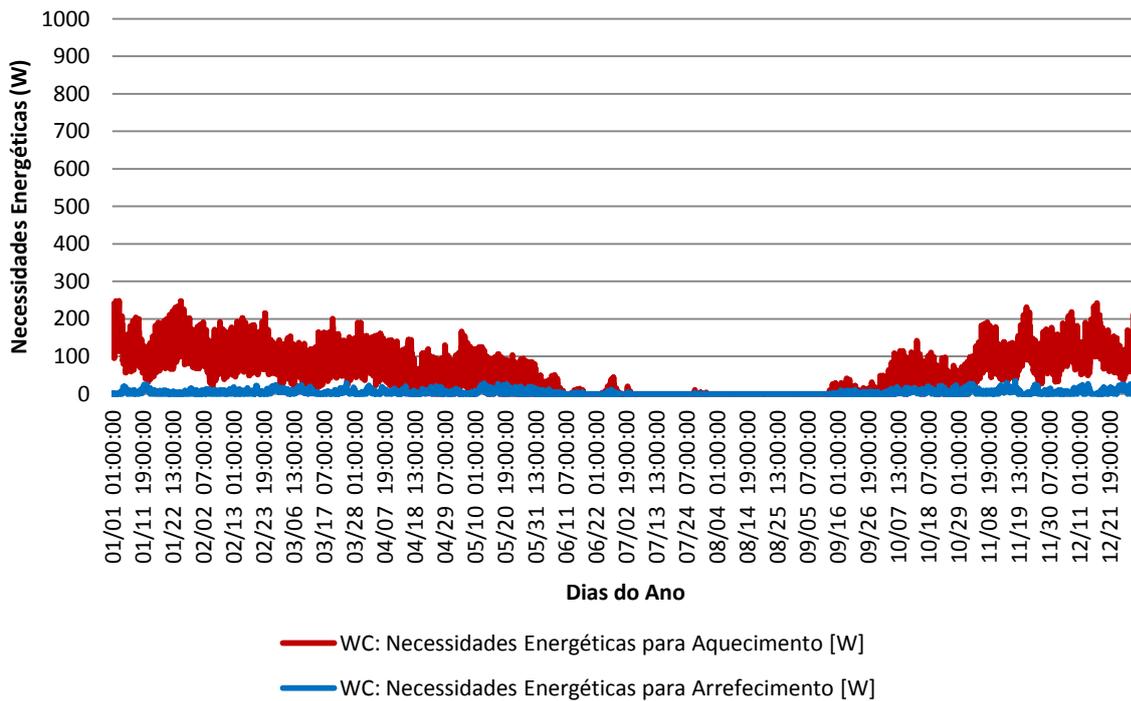


Figura 131 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona do WC, ao longo do ano - solução com painel sandwich

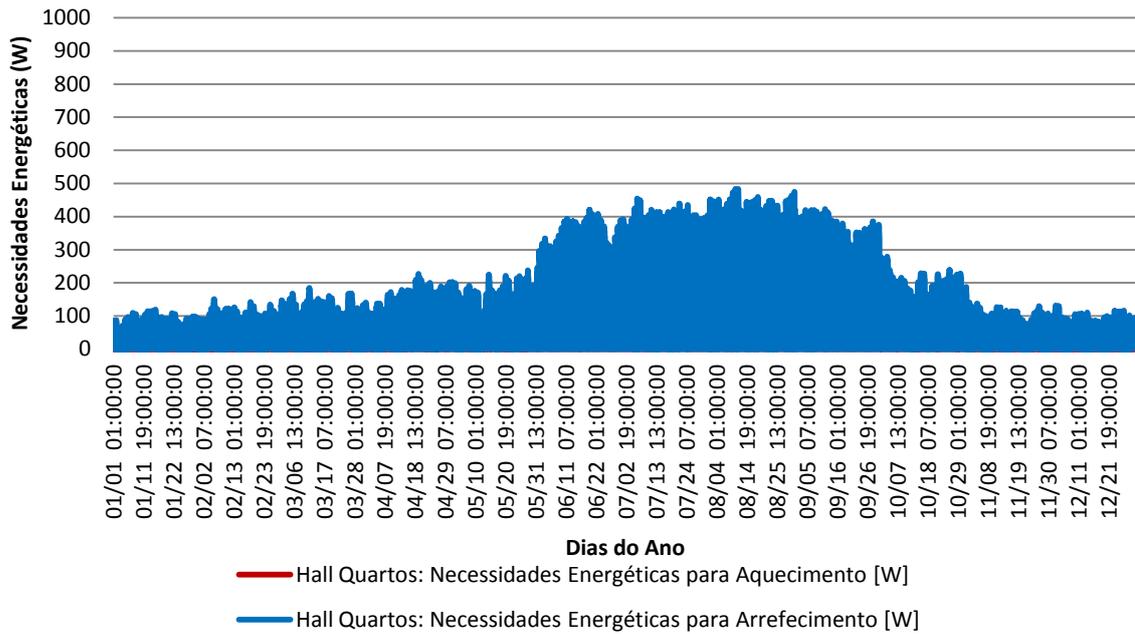


Figura 132 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Hall Quartos, ao longo do ano - solução com painel sandwich

Na Figura 133 e na Figura 134 encontram-se representadas as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento, para a solução convencional, nomeadamente nas zonas Quarto 1, Quarto 3, WC e Hall de acesso aos quartos.

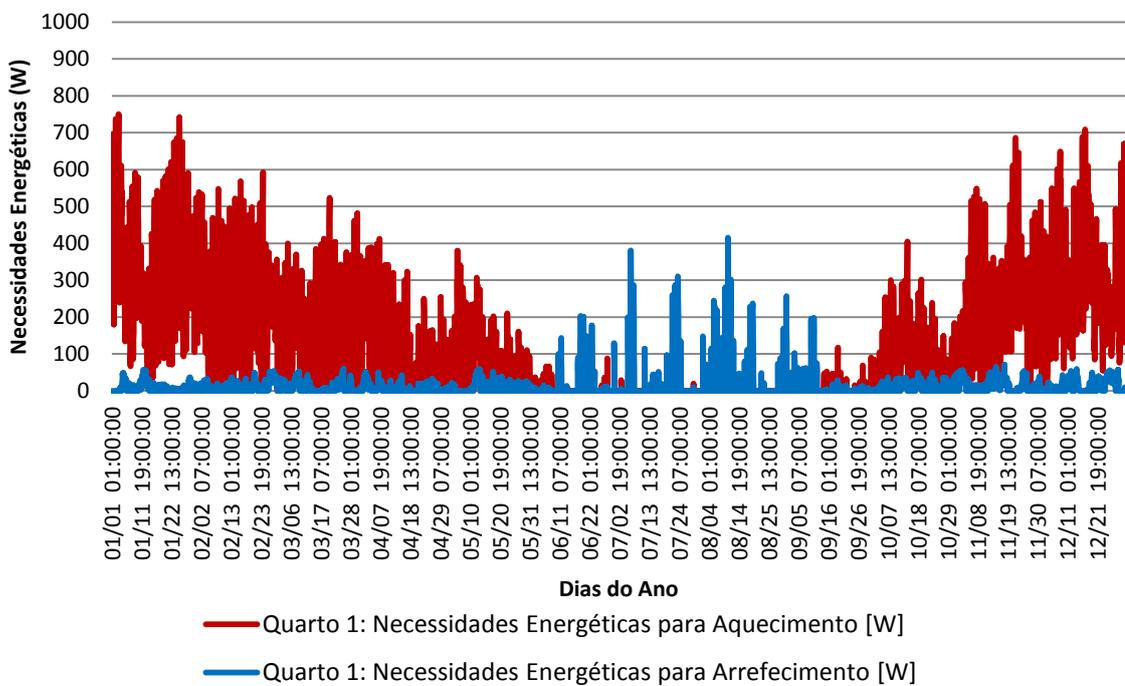


Figura 133 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Quarto 1, ao longo do ano - solução convencional

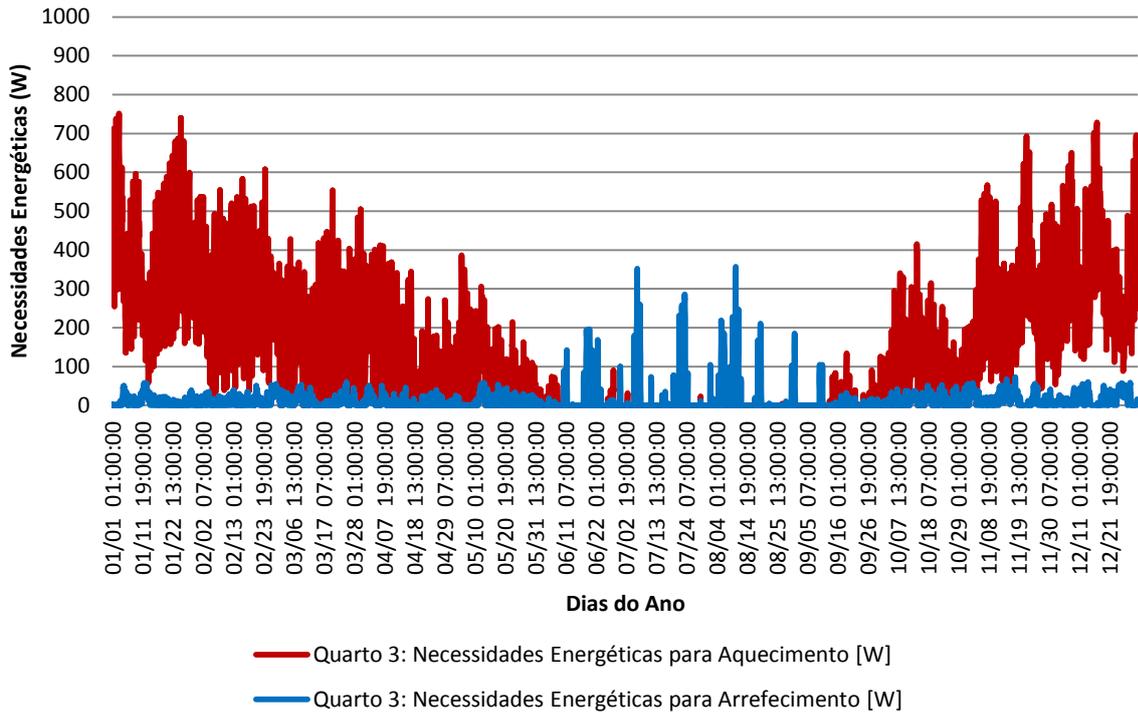


Figura 134 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Quarto 3, ao longo do ano - solução convencional

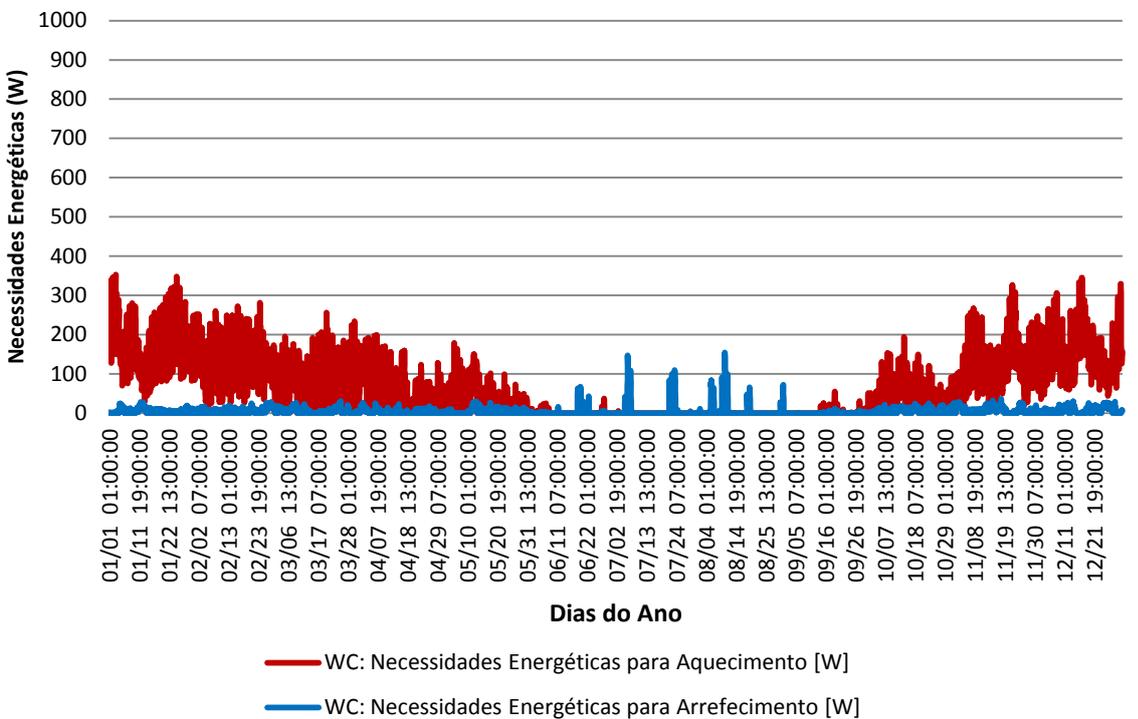


Figura 135 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona do WC, ao longo do ano - solução convencional

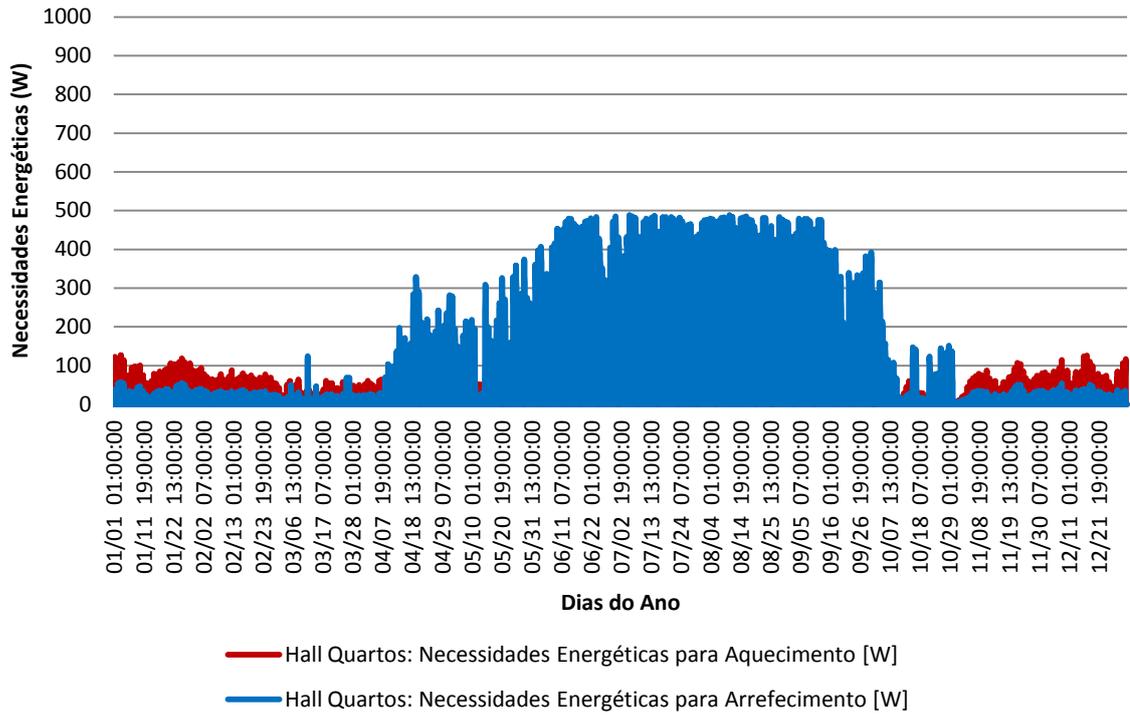


Figura 136 - Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento, na zona Hall Quartos, ao longo do ano - solução convencional