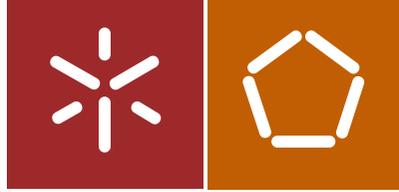




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Jonatan Francisco Fernandes Salgado

Avaliação de Sistemas de Paredes Interiores
Pré-fabricadas. Conceção e Análise de um
Caso de Estudo



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Jonatan Francisco Fernandes Salgado

Avaliação de Sistemas de Paredes Interiores
Pré-fabricadas. Conceção e Análise de um
Caso de Estudo

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

Trabalho efectuado sob a orientação da
Professora Doutora Maria Isabel Brito Valente

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



**Atribuição
CC BY**

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

O presente documento não ficaria completo sem um espaço dedicado a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram e me apoiaram no decorrer do meu percurso académico e, especialmente, na realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à professora Doutora Maria Isabel Brito Valente e ao Engenheiro Nuno Miguel Mota Pires por me terem orientado, pela disponibilidade constante, apoio, sugestões e conhecimentos transmitidos. Sem dúvida que este contributo foi fundamental para tornar possível a realização deste trabalho e processo de aprendizagem.

Agradeço ao grupo Casais Engenharia S.A. e aos seus colaboradores pelo apoio prestado, principalmente ao longo do meu percurso académico e conhecimentos adquiridos através dos múltiplos estágios que tive oportunidade de participar.

À minha família deixo um especial agradecimento, aos meus pais e irmão pela oportunidade dada, apoio e motivação constantes. Estes foram fundamentais no meu desenvolvimento e realização de objetivos. Um muito obrigado!

Aos meus amigos e companheiros nesta aventura académica Carlos Rodrigues e Rui Silva deixo o meu agradecimento pelos bons momentos e desafios superados. Deixo ainda os meus maiores votos de sucesso.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos pelos bons momentos de convívio e companheirismo. Momentos de descontração e trocas de ideias importantíssimos ao longo deste percurso. Aproveito para destacar os meus amigos José Silva, João Lopes, Rafael Leite e Pedro Machado pela especial e preciosa ajuda na revisão conjunta da ortografia, da sintaxe da dissertação e pelo constante apoio demonstrado no decorrer deste trabalho.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Avaliação de Sistemas de Paredes Interiores Pré-fabricadas. Conceção e Análise de um Caso de Estudo

RESUMO

O clima económico recente tem estimulado as empresas da construção civil a procurar métodos e soluções construtivas que garantam aumentos de produtividade e redução de custos. Estes fatores, aliados à redução de mão de obra disponível e conseqüente aumento do seu custo, têm motivado o estudo e desenvolvimento de elementos pré-fabricados e despertaram o interesse para o tema a ser desenvolvido no presente trabalho – paredes interiores pré-fabricadas – onde se verifica que há elevado potencial para a pré-fabricação e inovação.

Numa primeira fase do presente trabalho, foi realizado um enquadramento da pré-fabricação na construção e encontraram-se os benefícios que resultam da opção por estes sistemas construtivos. Assim, foi feito um levantamento dos diferentes domínios de pré-fabricação no setor da construção civil, enquadrando as várias tipologias de painéis de paredes interiores disponíveis no mercado e estudadas em âmbito industrial ou académico. Em complemento, iniciou-se também uma revisão bibliográfica das exigências e dos documentos normativos associados. Deste modo, estudaram-se diferentes tipologias e configurações de painel e avaliaram-se soluções de mercado representativas quanto à sua morfologia, materiais, ligações e outras características relevantes. Esta fase concluiu-se com a identificação das atuais tendências neste tipo de elemento construtivo.

Na fase seguinte, desenvolveu-se e avaliou-se uma potencial solução de painel de parede. Para cumprir este objetivo foram elencadas as condicionantes consideradas pertinentes ao desenvolvimento deste elemento. Estas condicionantes passam pelas exigências regulamentadas, pela arquitetura, pelo transporte/movimentação e pelas características dos materiais. Foi proposto e detalhado um painel de parede interior composto por elementos em LSF e placas de gesso. De seguida, analisou-se o desempenho da solução recorrendo aos métodos analíticos de Sharp e Meisser, vocacionados para a avaliação do desempenho acústico, e método do IBC para o desempenho ao fogo. O comportamento mecânico da solução foi avaliado através de análises computacionais, simulando situações de transporte, de colocação e de serviço (*in situ*).

Em conclusão, procedeu-se à modelação e parametrização de uma família BIM dos painéis de parede desenvolvidos recorrendo-se ao *software Revit*. De seguida, modelou-se um caso particular de um edifício destinado à hotelaria ao qual se aplicou a família de painéis substituindo as paredes iniciais e registando-se se uma taxa de aplicabilidade de 82%, que pode chegar a 91% com a otimização do projeto.

Palavras-Chave: Exigências de desempenho; Painel; Parede interior; Pré-fabricação.

Evaluation of prefabricated interior wall systems. Design and analysis of a study case

ABSTRACT

The present economic conjecture climate has encouraged construction companies to look for construction methods and solutions that ensure productivity increases and cost savings. These factors, allied to the reduction of available labor and consequent increase of its cost, have motivated the study and development of prefabricated elements and promoted the interest for the theme to be elaborated in the present work - prefabricated interior walls - where there is a high potential for pre-manufacturing and innovation.

In the first phase of the present work, a evaluation of the prefabrication in the construction was carried out and the benefits that result from the choice of these building systems were found. Thus, a survey of the different prefabrication domains in the civil construction sector was made, framing the various types of interior wall panels available in the market and studied within industrial or academic scope. Additionally, a bibliographic review of the requirements and associated normative documents was also initiated. Therefore, different typologies and panel configurations were studied and representative market solutions were evaluated for their morphology, materials, connections and other relevant characteristics. This phase was concluded with the identification of current trends in this type of constructive element.

In the next phase, a potential wall panel solution was developed and assessed. To fulfill this objective, the requirements considered pertinent to the development of this element were listed. These constraints consist in the regulated requirements, the architecture, the transportation / handling and the characteristics of the materials. An interior wall panel composed of LSF elements and plasterboard has been proposed and detailed. After that, the performance of the solution was analyzed using Sharp and Meisser analytical methods, destined at the evaluation of acoustic performance, and the IBC method for fire performance. The mechanical behavior of the solution was evaluated through computational analysis, simulating transport, placement and service situations (in situ).

In conclusion, a BIM family of the developed wall panels was created and parameterized using Revit software. Subsequently, a particular case of a hotel building was modeled to which the family of panels was applied, replacing the initial walls and registering an applicability rate of 82%, potentially reaching 91% with project optimization.

Keywords: Internal wall; Performance requirements; Panel; Prefabricated.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice de Figuras.....	xii
Índice de Tabelas.....	xv
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xviii
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e Motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da Dissertação.....	3
2. Estado da Arte.....	5
2.1 Industrialização e Pré-fabricação.....	5
2.1.1 Benefícios da Pré-fabricação.....	6
2.1.2 Domínios da Pré-fabricação.....	7
2.2 Paredes Pré-fabricadas.....	9
2.2.1 Exigências de Desempenho de uma Parede Interior.....	10
2.2.2 Critérios de desempenho e Normas aplicáveis.....	11
2.2.3 Materiais Isolantes.....	16
2.3 Soluções do Mercado.....	16
2.3.1 Paredes do tipo <i>Sandwich</i>	17
2.3.2 Painéis em <i>Cross Laminated Timber</i> (CLT).....	27
2.3.3 Paredes de Betão Pré-fabricadas.....	32
2.3.4 Painéis em <i>Light Steel Framing</i>	35
2.4 Tendências.....	40
3. Seleção de uma Solução Particular.....	42
3.1 Conceção de um Painel de Parede.....	42

4.1.5 Viabilidade da Solução	82
4.2 Avaliação do Desempenho ao Fogo.....	82
4.2.1 Cálculo de resistência ao fogo.....	83
4.3 Avaliação da Estabilidade.....	84
4.3.1 Pré-dimensionamento dos Painéis.....	85
4.3.2 Caracterização dos materiais.....	86
4.3.3 Modelação dos Painéis	88
4.3.4 Pré-avaliação da estabilidade <i>in situ</i>	89
4.3.5 Pré-avaliação do Desempenho em Situações de Transporte.....	95
5. Aplicação a um Caso Particular.....	98
5.1 Estudo do Projeto	98
5.1.1 Solução Proposta.....	99
5.1.2 Limitações.....	101
5.2 Aplicação de ferramentas BIM	102
5.2.1 Escolha de Software – <i>Revit</i>	102
5.2.2 Modelação de painéis	103
5.2.3 Implantação dos painéis no modelo	105
5.2.4 Quantificação dos painéis	109
5.2.5 Otimização do projeto	110
5.2.6 Elementos Adicionais.....	112
5.2.7 Detalhes da modelação.....	113
6. Considerações Finais	115
6.1 Conclusões.....	115
6.2 Limitações.....	118
6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros	119
Referências Bibliográficas	120

Anexo I – Resultados da Avaliação da Estabilidade	128
Anexo II – Planta CAD da Distribuição dos Painéis.....	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Repartição dos tempos e tarefas na construção (Couto e Couto, 2007a).....	5
Figura 2 – Benefícios da Pré-fabricação. Adaptado de (Pauchet, 2004).	7
Figura 3 – Ensaio de impacto (EOTA, 2003b).	12
Figura 4 – Classificação das diferentes soluções segundo a sua tipologia. Adaptado de (Lopes <i>et al.</i> , 2018).....	16
Figura 5 – Constituição de um painel <i>sandwich</i> (Marques, 2012).....	17
Figura 6 – Materiais e configurações do núcleo de um painel <i>sandwich</i> (Almeida, 2009).....	18
Figura 7 – Ligações entre painéis <i>sandwich</i> ; a) Ligações através de colagem; b) Ligações através de sistemas encaixe; c) Ligações através de adição de elementos. (Almeida, 2009).	18
Figura 8 – a) ligação de painéis de canto; b) ligação de painéis em “T” (Almeida, 2009).	19
Figura 9 – Acabamentos de topo de painéis (Almeida, 2009).	19
Figura 10 – Guia de ligação de um painel <i>sandwich</i> à estrutura (Faria, 1996).	20
Figura 11 – Painel <i>sandwich</i> com lâmina metálica e núcleo de poliisocianurato (Masterpanel, 2015). 21	
Figura 12 – Painel <i>sandwich</i> com lâmina metálica e núcleo de lã de rocha (Isopan, 2016).....	22
Figura 13 – a) Painel <i>sandwich</i> de madeira com núcleo de MDF. b) Painel <i>sandwich</i> de madeira com núcleo de cortiça (Simonin Wood, 2016).....	23
Figura 14 – Sistema de encaixe e dutos num painel <i>sandwich</i> de madeira (Simonin Wood, 2016).....	24
Figura 15 – a) Painel de <i>sandwich</i> de betão leve. (Modupanel, 2017); b) Assemblagem de painéis de <i>sandwich</i> de betão leve (Faria, 2014).	26
Figura 16 – Painel de CLT (Jorge, 2013).	27
Figura 17 – Setup de um painel CLT em função uso (Brandner <i>et al.</i> , 2016).....	28
Figura 18 – Furações e roços em painéis CLT para à aplicação de redes (Jorge, 2013).....	29
Figura 19 – Ligação parede CLT/base em betão (ligação metálica do tipo cantoneira) (Costa, 2013). 31	
Figura 20 – Ligação parede CLT/base em betão (ligação através parafusos roscados) (Costa, 2013). 31	
Figura 21 – Ligação entre painéis CLT (Costa, 2013).....	31
Figura 22 – Parede de cofragem integrada (CSTB, 2014).	32
Figura 23 – Roços e dutos em paredes de cofragem integrada (Alpha Beton, 2016).....	33
Figura 24 – Assentamento de paredes de cofragem integrada (Alpha Beton, 2016).....	34
Figura 25 – Ligações de painéis de parede de cofragem integrada (Alpha beton, 2016).....	35
Figura 26 – Ligação tipo entre perfis de LSF (Gerlich <i>et al.</i> , 1996).....	36
Figura 27 – Configuração tipo de painéis de parede em LSF. Adaptado de (NASFA, 2000).	37

Figura 28 – Redes no interior de uma parede de LSF (LSK, 2005).	39
Figura 29 – Ligação de painéis LSF à estrutura (LSK, 2005).	40
Figura 30 – Ligação entre painéis LSF: a) ligação em "L" b) Ligação em "T" c) Ligação contínua (NASFA, 2000).	40
Figura 31 – Capacidade máxima de carga de um multifunções (Manitou, 2019).	48
Figura 32 – Capacidade máxima de carga de uma grua (Brown <i>et al.</i> , 1997).	49
Figura 33 – Quarto de hotel com um pé-direito mínimo.	51
Figura 34 – Criação de divisões com base numa malha de 1,5 m por 1,5 m (Brandão e Sousa, 2013).	52
Figura 35 – Configuração básica de um painel (2800 × 1200 mm ²).	53
Figura 36 – Configuração básica de um painel (2800 × 600 mm ²).	53
Figura 37 – Possível arranjo dos painéis para serem transportados.	54
Figura 38 – Modos de transmissão possíveis entre duas salas adjacentes (Mateus, 2008).	56
Figura 39 – Parede dupla em aço leve (Way e Couchman, 2008).	59
Figura 40 – Influência das diferentes camadas no desempenho acústico (Way e Couchman, 2008). .	61
Figura 41 – Influencia do espaçamento das paredes no desempenho acústico (Gorgolewski e Couchman, 2003).	61
Figura 42 – Vista explodidas dos painéis finais.	62
Figura 43 – Corte Esquemático de um painel MADLEVE (Faria, 1996).	64
Figura 44 - Corte esquemático do painel (tipologia 1 e 2).	64
Figura 45 – Esquemáticação da ligação entre painel e teto/pavimento.	65
Figura 46 – Acessórios para instalação de tubagens (Pladur, 2018).	66
Figura 47 – Exemplo de kit sanitário (Geberit, 2019).	67
Figura 48 – Distribuição de tubagens em paredes de com estrutura em aço leve – distribuição convencional (Pires, 2013).	67
Figura 49 – Parede em placas de gesso após o tratamento de juntas (Gyptec, 2017).	68
Figura 50 – Reforço de juntas com impermeabilizante (Gyptec, 2017).	68
Figura 51 – Vista explodida: a) Painel tipo 1; b) Painel tipo 2.	70
Figura 52 – Representação gráfica do valor de isolamento em função do local de aplicação.	71
Figura 53 – Ajuste da curva referência à curva de isolamento (Mateus, 2004).	73
Figura 54 – Método de Sharp; 1 – Parede dupla ideal; 2 – Parede dupla. Adaptado de (Sousa, 2008).	73

Figura 55 – Conexão do tipo ponto (Sharp <i>et al.</i> , 1980).	76
Figura 56 – Representação gráfica dos resultados obtidos para o método de Sharp.....	77
Figura 57 – Representação gráfica dos resultados ajustados obtidos para o método de Sharp.	78
Figura 58 – Gráfico de Meisser (Costa, 2008).....	79
Figura 59 – Representação gráfica dos resultados obtidos para o método de Meissier.....	80
Figura 60 – Influência de aberturas no desempenho acústico (Almeida e Silva, s.d.).	81
Figura 61 – Comportamento a flexão de uma placa de gesso acartonado. Adaptado de (Bouterf, 2014).	87
Figura 62 – Comportamento de rotura a flexão de um conjunto placa de gesso e perfil metálico. Adaptado de (Benouis, 1995).....	89
Figura 63 – a) Modelo de Painel de Parede tipo 1; b) Modelo de Painel de Parede tipo 2.....	89
Figura 64 – Mapa de tensões do Painel tipo 1 para uma carga de 200 N/m ² segundo o eixo mais solicitado.....	91
Figura 65 – Mapa de Deslocamento do Painel tipo 2 para uma carga de 200 N/m ²	91
Figura 66 – Diagrama de tensões e deslocamento do Perfil do Painel tipo 1 para uma carga de 200 N/m ²	91
Figura 67 – Esquemática do carregamento vertical excêntrico pela ETAG 003 (Ferreira e Mendes, 2013).....	92
Figura 68 – Mapa de tensões resultante da aplicação de uma carga vertical excêntrica de 2×135 N. 93	
Figura 69 – Mapa de tensão dos pontos de fixação da carga excêntrica (considerando distribuição da carga).	94
Figura 70 – Mapa de tensões de um painel tipo 1 apoiado em 4 pontos.	96
Figura 71 – Modelo de avaliação do desempenho em movimentação mecânica.	97
Figura 72 – Plantas originais: a) Piso 0 e 1; b) Piso 2.	99
Figura 73 – Ensaio da aplicabilidade dos painéis ao projeto: a) Planta original; b) Configuração 1; c) Configuração 2; d) Configuração 3.....	101
Figura 74 – Modelos dos painéis: a) Painel 1 – Simples; b) Painel 1 – Simples com uma das faces hidrófuga; c) Painel 2 – Simples; d) Painel 2 – Simples com face hidrófuga; e) Painel 2 – Simples com face hidrófuga + Lavatório ; f) Painel 2 – Simples com face hidrófuga + Sanitário.	104
Figura 75 – Modelo base sem paredes interiores (<i>Revit</i>).....	105
Figura 76 – Modelo base com paredes interiores (<i>Revit</i>).....	106
Figura 77 – Propriedades atribuídas à função <i>Curtain Wall</i>	107

Figura 78 – Implantação de painéis no modelo.....	107
Figura 79 – Identificação e correção de elementos com dimensão incorreta.....	108
Figura 80 – Aplicação de um painel com sistema sanitário.	108
Figura 81 – Detalhe do modelo com sistemas sanitários aplicados.....	109
Figura 82 – Modelo global com painéis aplicados (<i>Revit</i>).....	109
Figura 83 – Representação do modelo otimizado: a) Planta; b) Modelo 3D; c) Detalhe das dimensões dos quartos.	111
Figura 84 – a) Fixação; b) Aplicação de fixações.	112
Figura 85 – Sequencia de montagem de ligações: a) ligação em L; b) Ligação em T.....	113
Figura 86 – Vistas: a) Painel 2 – Simples com face hidrófuga + Lavatório ; b) Painel 2 – Simples com face hidrófuga + Sanitário.	114
Figura 87 – Detalhe caixa de ar quarto de banho.....	114

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Domínios da Pré-fabricação. Adaptado de (Lopes <i>et al.</i> , 2018).....	8
Tabela 2 – Quadro de exigências de paredes interiores (Faria, 1996).....	10
Tabela 3 – Tabela síntese da legislação aplicável.	11
Tabela 4 – Características técnicas de um painel <i>sandwich</i> metálico (Masterpanel, 2015).....	21
Tabela 5 – Características técnicas de um painel <i>sandwich</i> metálico (Isopan, 2016).	21
Tabela 6 – Características técnicas de um painel <i>sandwich</i> de madeira (Simonin Wood, 2016).	24
Tabela 7 – Características técnicas de um painel <i>sandwich</i> de betão leve.....	25
Tabela 8 – Características técnicas de um painel CLT (KLH, 2019).....	29
Tabela 9 – Tipologias e características de uma parede interior em LSF. Adaptado de (LSK, 2005).....	38
Tabela 10 – Etapas/problemas na conceção do painel. Adaptado de (Faria, 1996).	43
Tabela 11 – Dimensões e momento de inércia de perfis metálicos (AENOR, 2013).	45
Tabela 12 – Tipos de Parafusos. Adaptado de (AENOR, 2013).	46
Tabela 13 – Relação entre número de parafuso e diâmetro nominal (LSK, 2005).	46
Tabela 14 – Medida e peso máximo a transportar, com e sem autorização (Santos e Silva, 2011).....	47
Tabela 15 – Características geométricas dos materiais do painel. Adaptado de (Knauf, 2019)(Pladur, 2018)(Gyptec, 2017)(Termolam, 2016).	50
Tabela 16 – Síntese de restrições geométricas.....	52
Tabela 17 – Limite mínimo regulamentar de isolamento acústico aplicável a uma divisória interior (de acordo com o decreto-lei 96/2008 de 9 de junho).	57
Tabela 18 – Desempenho mínimo de uma parede interior ao fogo (de acordo com Decreto-Lei n.º 1532/2008 de 29 de dezembro). Adaptado de (ANPC, 2013).	58
Tabela 19 – Propriedades mecânicas do aço ao fogo (Lawson e Way, 2012).....	60
Tabela 20 – Exemplos de espessuras mínimas de placas de gesso para EI 60 ou superior (Gyptec, 2017).	60
Tabela 21 – Tipologias propostas. Adaptado de (LSK, 2005).....	62
Tabela 22 – Variáveis de entrada para dos métodos de avaliação acústica.	72
Tabela 23 – Resultados do método de Sharp para as diferentes tipologias.	76
Tabela 24 – Resultados ajustado do método de Sharp para as diferentes tipologias.....	78
Tabela 25 – Valores do fator K – método de Meisser. Adaptado de (Costa, 2008) (Sousa, 2008).....	79
Tabela 26 – Resultados do método de Meisser para as diferentes tipologias.....	80
Tabela 27 – Tempo de resistência ao fogo de placas de gesso. Adaptado de (IBC, 2017).	83

Tabela 28 – Curva de referência pela norma ISO 834 (Oliveira, 2014).	84
Tabela 29 – Parâmetro <i>H0</i> – Altura referência (AENOR, 2013).....	85
Tabela 30 – Características mecânicas de uma placa de gesso cartonado (Benouis, 1995).....	86
Tabela 31 – Tabela Resultados Carga Excêntrica	93
Tabela 32 – Tabela de resultados da pré-avaliação de desempenho <i>in situ</i>	95
Tabela 33 – Tabela de resultados da pré-avaliação de desempenho em transporte manual.	96
Tabela 34 – Tabela de resultados da pré avaliação de desempenho ao transporte manual.	97
Tabela 35 – Mapa de quantidades de painéis aplicados.	110

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

Abreviaturas	Significado
AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
AISI	American Iron and Steel Institute
BIM	Building information modeling
CLT	Cross laminate timber
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
EPS	Poliestireno expandido moldado
ETAG	European technical approval guidelines
FEF	Grânulos leves ou fibras soltas e espuma elastomérica flexível
IBC	International building code
ICB	Aglomerado de cortiça expandida
LSF	Light steel framing
LSK	European Lightweight Steel-framed Construction
MEF	Método dos Elementos Finitos
NAHB	Nacional Association of Home Builders
PEF	Espuma polietileno expandido extrudido
PIR	Espuma rígida de poli-isocianurato
PUR	Espuma rígida de poliuretano
RGR	Regulamento geral de ruído
RRAE	Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios
RRAE	Regulamento dos requisitos acústicos de edifícios
RT-SCIE	Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios
XPS	Poliestireno expandido extrudido

Símbolo	Significado	Unidades
H_0	Altura referência	[m]
S	Área da parede	[m ²]
$\rho_{ar} =$	Densidade do ar	[kg/m ³]
d	Dimensão da caixa de ar	[m]

b	Distância entre montantes	[m]
e_n	Espessura do pano	[m]
ε_r	Extensão	[%]
ΔTM	Fator de correção relativo à influência da transmissão marginal	[dB]
η	Fator de perdas internas	[-]
f_{c1}	Frequência de coincidência dos panos constituintes da parede	[Hz]
f_0, f_r	Frequência de ressonância	[Hz]
f_n	Frequência de ressonância da caixa de ar	[Hz]
f_l	Frequência limite	[Hz]
$D_{nT,W}$	Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea	[dB]
R_w	Índice de redução sonora ponderada da parede	[dB]
R'_w	Índice de redução sonora ponderado aparente	[dB]
I_Δ	Inércia do perfil a instalar	[m ⁴]
I_0	Inércia referência	[m ⁴]
m_n	Massa superficial de cada pano	[kg]
E	Modulo de elasticidade	[MPa]
R	Tempo de resistência ao fogo da parede	[min]
R_n	Tempo de resistência de cada camada	[min]
T_0	Tempo de reverberação de referência	[s]
σ_r	Tensão de rotura	[MPa]
σ_e	Tensão elástica	[MPa]
c_L	Velocidade de propagação das ondas planas de flexão em placas finas e finitas	[m/s]
c	Velocidade de propagação do som no ar	[m/s]
V	Volume do compartimento recetor	[m ³]

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e Motivação

O mercado atual tem estimulado as empresas que operam no setor da construção civil a procurar métodos e soluções construtivas que garantam aumentos de produtividade e redução de custos. A diminuição das margens de lucro ocorridas nos últimos anos e o crescente aumento dos custos de construção são promotores deste desenvolvimento. Parte do problema passa pela significativa redução de mão de obra disponível e conseqüente aumento do seu custo. Estes fatores têm levado a uma mudança de paradigma na atividade da construção, fazendo com que a pré-fabricação ganhe cada vez mais relevância face à construção tradicional, recorrendo-se assim a um maior número de elementos produzidos em fábrica. Para além das razões económicas referidas, a mudança também é justificada pela procura de soluções de qualidade superior e pela exigência crescente de maior sustentabilidade (Couto e Couto, 2007a).

A pré-fabricação tem por base a transferência da atividade de trabalho do local de obra para uma unidade fabril, visando promover um aumento de capacidade de produção, minimizando desperdícios e necessidade de recursos humanos. A alteração do local permite ainda que a produção decorra em ambiente controlado, o que garante a padronização do processo de manufatura do elemento e um maior controlo da sua qualidade, contribuindo para uma otimização da capacidade dos materiais utilizados e beneficiando com o recurso a novos materiais/soluções.

Um exemplo é o recurso a paredes pré-fabricadas, em alternativa a soluções mais tradicionais como as paredes moldadas no local, tijolos convencionais ou paredes de alvenaria. Neste caso, procura-se aliar os benefícios da pré-fabricação à realização de um dos elementos mais abundantes numa construção. O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) estima que os trabalhos de alvenaria correspondem a cerca de 13% a 17% do valor total da construção, percentagem significativa que incentiva o desenvolvimento de novas soluções. A importância deste elemento construtivo decorre ainda da forma como pode influenciar o cronograma de trabalhos e condicionar o orçamento final de uma obra.

Atualmente, existe uma vasta gama de painéis pré-fabricados, sendo possível encontrar elementos executados com diferentes materiais e com as mais diversificadas exigências técnicas, tanto ao nível da capacidade estrutural, como do comportamento térmico e acústico.

Tendo em conta as mais valias que podem resultar deste tipo de produto, importa estudar e desenvolver potenciais soluções. Assim, com o presente trabalho, pretende-se realizar um estudo sobre os diversos painéis de parede interior disponíveis no mercado e identificar as principais tendências associadas à sua evolução. Com este ponto de partida, pretende-se desenvolver e aferir uma solução de painel de parede interior não resistente, tendo em consideração os requisitos técnicos que constam nas normas internacionais aplicáveis.

Assim, com esta dissertação, ambiciona-se realizar um estudo das exigências e documentos normativos que regem o desenvolvimento deste tipo de soluções e fazer o levantamento de múltiplas condicionantes geométricas e técnicas potencialmente relevantes a este desenvolvimento.

Posto isto, o objetivo final passou por apresentar um painel de parede interior e conjunto de variantes, assim como métodos para avaliar a viabilidade da solução para as principais exigências, situação de transporte e movimentação. Concluída a avaliação da solução proposta e verificada a sua viabilidade será desenvolvida uma família BIM dos painéis e realizada a sua aplicação a um caso particular aferindo a sua taxa de aplicabilidade e potenciais falhas/lacunas do painel.

1.2 Objetivos

Os principais objetivos da presente dissertação são:

- i.** Enquadrar a pré-fabricação na construção;
- ii.** Identificar e caracterizar diferentes soluções de paredes interiores pré-fabricadas já existentes no mercado, destinadas à utilização em edifícios, incluindo os processos de fabrico a elas associados;
- iii.** Aferir as tendências atuais ao nível do desenvolvimento de novos sistemas de parede pré-fabricada;
- iv.** Identificar requisitos estruturais e funcionais associados a elementos construtivos de parede e estabelecer qual a normalização aplicável à sua avaliação e caracterização;
- v.** Realizar o levantamento de múltiplas condicionantes à geometria e à tipologia de uma possível solução;
- vi.** Caracterizar uma solução de painel de parede, que inclui a ligação painel-painel e painel-pavimentos;
- vii.** Caracterizar o comportamento estrutural e funcional do painel proposto e da sua viabilidade de transporte;

- viii.** Com base numa conceção arquitetónica pré-existente, aferir a aplicabilidade da solução de painel proposto, através da modelação da mesma com o apoio de ferramentas BIM.

1.3 Estrutura da Dissertação

O presente documento encontra-se dividido em 6 capítulos, sendo o primeiro dedicado ao enquadramento do tema escolhido, assim como à exposição dos objetivos do trabalho desenvolvido e estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 desenvolve-se um estado do conhecimento relativo à pré-fabricação no sector da construção e mais particularmente às soluções de pré-fabricação vocacionadas para as paredes interiores de edifícios. Paralelamente, é identificado um conjunto de exigências normativas e funcionais relativas a este elemento. É ainda realizado um levantamento das soluções de mercado e das tendências atuais a elas associadas.

De seguida, o Capítulo 3 é dedicado à apresentação de uma proposta de painel de parede interior. Assim, procurou-se estudar todos os aspetos que potencialmente podem condicionar a geometria e a tipologia do painel. Nesse sentido, e com base nos pressupostos apresentados, descrevem-se os painéis propostos, detalham-se as respetivas ligações, e avalia-se a integração de equipamentos nos mesmos.

No Capítulo 4 procedeu-se à avaliação do desempenho do painel proposto face às principais exigências expostas, nomeadamente: desempenho acústico, desempenho ao fogo, desempenho e viabilidade, nas situações de transporte e de aplicação. Neste sentido, estudaram-se métodos analíticos, nomeadamente, os métodos de Sharp e Meisser para os requisitos acústicos, e do cálculo exposto pelo International Building Code (IBC) para o comportamento ao fogo. Relativamente ao comportamento mecânico é realizada uma análise computacional através do *software Autodesk Robot Structural Analysis*, aferindo o seu desempenho e viabilidade, nas situações de transporte, de aplicação e de vida útil no edifício.

Depois de aferida a viabilidade da solução, desenvolve-se no capítulo 5 o estudo da sua aplicabilidade. Analisaram-se as plantas de um projeto de uma unidade hoteleira e procurou-se aplicar a solução de parede desenvolvida a este projeto. De seguida, o mesmo edifício foi modelado numa ferramenta BIM, tendo sido utilizado o *software Autodesk Revit*. Esta modelação permitiu uma avaliação mais pormenorizada da solução e o estudo de potenciais alterações que a possam melhorar. A análise exposta beneficiou do desenvolvimento de uma família dos painéis propostos. Esta requereu a modelação de um painel tipo que posteriormente possibilitou a criação de variantes do mesmo, incorporando sistemas

sanitários e alterando o tipo de placa de gesso. Depois da família de painéis devidamente parametrizada foi possível a sua aplicação ao modelo geral, substituindo as paredes interiores. Neste processo foi possível determinar a taxa de aplicabilidade dos painéis e estudar a otimização do projeto para a maximização da mesma. A par disso, surgiu a necessidade de proceder à modelação de elementos de ligação dos painéis ao edifício e de elementos de remate para ligações não lineares.

Por último, o Capítulo 6 expõe as principais conclusões retiradas das várias análises efetuadas. Neste capítulo são ainda indicadas limitações e dificuldades registadas no desenvolvimento desta dissertação e são referidos aspetos que merecem aprofundamento, sendo por isso propostos para trabalhos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Industrialização e Pré-fabricação

O clima económico atual tem estimulado as empresas que operam no setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) a procurar métodos e soluções construtivas que promovam um aumento da produtividade e a consequente redução de custos associados. De salientar que, os elevados níveis de competitividade e o crescente nível de exigência dos clientes são condicionantes importantes nesta evolução (Couto e Couto, 2007b). Como tal, o desenvolvimento dos métodos e sistemas construtivos são uma consequência do processo de industrialização da construção.

Outros grandes estímulos para a industrialização da construção foram as modificações e avanços ocorridos nos anos 90 no setor tecnológico, estimulando o desenvolvimento de vários setores da economia. O progresso das telecomunicações, a globalização e a rapidez de troca de informação alteraram o mercado provocando um aumento da produção e da qualidade dos produtos finais, gerando um aumento da competitividade nas diversas áreas (Couto e Couto, 2007a).

Apesar de ainda se verificar alguma inércia, as empresas procuram implementar estas modificações no setor da construção. Contudo, estes conceitos já foram expostos na década de setenta por Heinz Ritter. Segundo o autor, designa-se “*por industrialização da construção o uso de métodos de construção que conduzam a uma redução importante no número de horas de trabalho, mantendo a mesma qualidade e o mesmo volume de produção. As suas principais características seriam a transferência do máximo de operações do estaleiro para instalações fixas e a racionalização sistemática das diferentes operações desde o projecto ao acabamento das construções.*” (ver Figura 1)(Trigo, 1976).

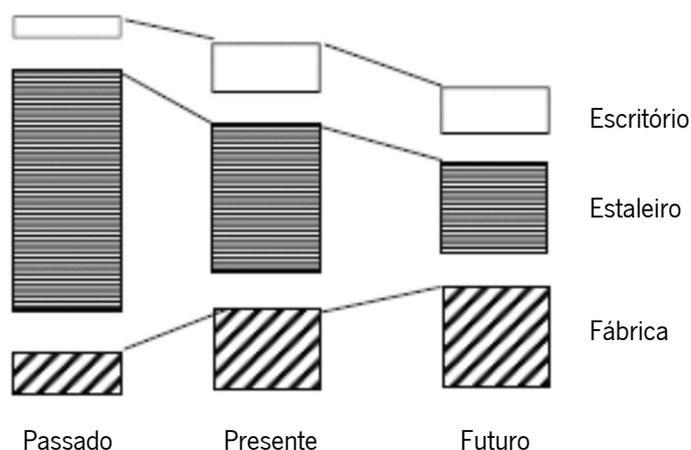


Figura 1 – Repartição dos tempos e tarefas na construção (Couto e Couto, 2007a).

Em suma, a industrialização deste setor, entre vários fatores, passa pela pré-fabricação, planeamento e eficiência no processo de produção dos diversos elementos que compõem a execução de um edifício, não apresentando incompatibilidades com as características visuais e técnicas pretendidas, face à construção tradicional (*in situ*) (Couto e Couto, 2007a).

2.1.1 Benefícios da Pré-fabricação

A pré-fabricação permite a obtenção de diversas vantagens ligadas à organização e métodos promovidos pela transferência da atividade de trabalho do local de obra para uma unidade de pré-fabricação.

Desta forma, as principais vantagens encontram-se sintetizadas no esquema apresentado na Figura 2 e podem ser destacadas por:

- Fabrico em instalações especializadas e direcionadas para a produção de determinado elemento, permitindo a mecanização de tarefas e o controlo de qualidade;
- A repetição de tarefas maximiza a produtividade e conseqüentemente diminui a necessidade de mão de obra;
- Redução de mão de obra especializada, dado que a produção é desenvolvida num ambiente especializado, com recurso à repetição e à padronização das ferramentas/equipamentos;
- Otimização e acréscimo da qualidade do material;
- Redução de tarefas em obra e conseqüente necessidade de equipamentos;
- Aumento da segurança, especificamente, através da redução das possíveis ocorrências de acidentes em obra;
- Diminuição dos desperdícios em obra;
- Aumento da durabilidade de ferramentas e equipamentos de auxílio à produção;
- Redução do tempo de construção, como consequência da rapidez de montagem e sistematização das tarefas em obra. Esta melhoria é conseguida através da capacidade de armazenamento dos produtos em fábrica e da alienação das condições meteorológicas no seu fabrico. (Couto e Couto, 2007b) (Pauchet, 2004).

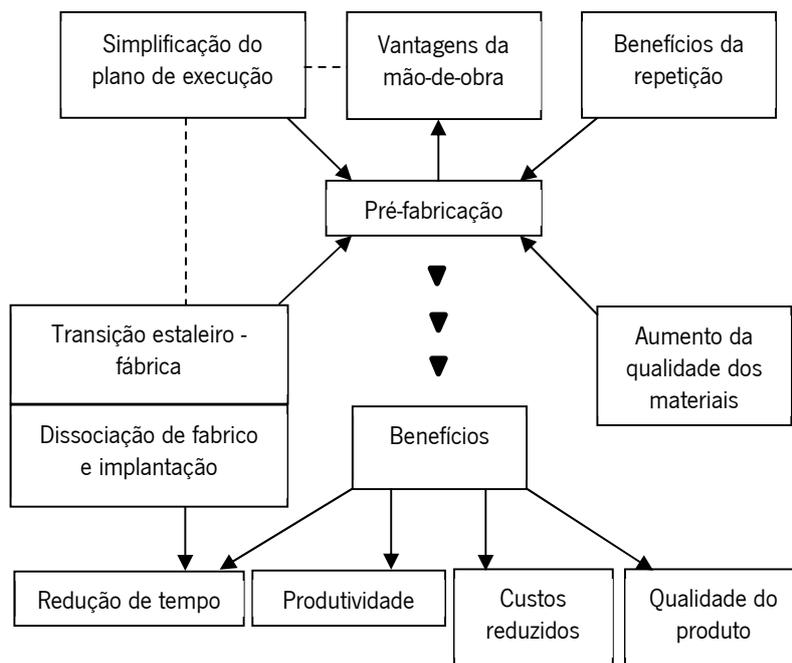


Figura 2 – Benefícios da Pré-fabricação. Adaptado de (Pauchet, 2004).

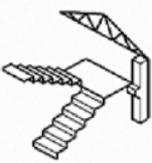
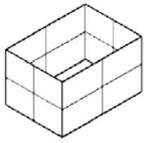
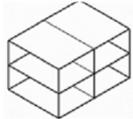
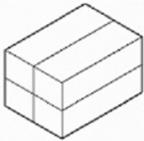
É importante ainda mencionar alguns entraves da pré-fabricação na construção, nomeadamente, o rigor nas dimensões e na montagem dos elementos, a viabilidade do transporte e armazenamento, e aplicabilidade em obra (Pauchet, 2004). Uma vez em obra, são apontadas como barreiras a necessidade de recurso a elementos de ligação adicionais, o rigor e controlo na conexão dos elementos e a maior exatidão no estudo do projeto e pormenores (Couto e Couto, 2007b).

Acima de tudo, o principal entrave reside na produção dos elementos pré-fabricados, porque ao contrário das outras indústrias, deve-se aguardar por uma encomenda, regra geral unitária e somente depois é equacionada a produção (Resendiz-Vazquez, 2010).

2.1.2 Domínios da Pré-fabricação

Atualmente, a pré-fabricação é aplicada em diversas áreas e componentes. No âmbito da construção de edifícios, os domínios da pré-fabricação podem ser divididos em função do grau de complexidade do sistema e conseqüente exigência de trabalho em obra. Numa primeira fase, os domínios da pré-fabricação podem dividir-se em sistemas volumétricos ou não volumétricos. Posto isto, na Tabela 1 encontram-se ilustrados os diferentes níveis de pré-fabricação existentes, bem como exemplos da sua aplicação (Lopes *et al.*, 2018).

Tabela 1 – Domínios da Pré-fabricação. Adaptado de (Lopes *et al.*, 2018).

Níveis e Categorias		Subcategorias	Definição	Exemplo	Esquema
Sistemas não volumétricos	1	Componentes e subelementos	Estes elementos embora associados predominantemente a métodos tradicionais são produzidos em fábrica, de forma a otimizar a sua aplicação em obra. Estes não permitem a construção total dos edifícios.	Portas, janelas e elementos de recheio	
		Subelementos para a construção do edifício		Elementos de betão pré-fabricado (fundações, escadas, pilares, vigas, etc.) e sistemas de treliça	
	2	Painéis de revestimento	Painéis produzidos em fábrica que podem ser pré-finalizados antes de serem transportados para o local, onde posteriormente são montados a uma estrutura pré-existente, criando/dividindo espaços utilizáveis ou simples revestimento.	Painéis de fachada (sistema de parede ventilada)	
		Painéis verticais		Paredes e paredes interiores pré-fabricadas	
		Painéis horizontais		Lajes e coberturas pré-fabricadas	
	3	Construção volumétrica completa (3D)	Construção volumétrica não estrutural	Unidades tridimensionais de pequena dimensão totalmente realizadas e acabadas em fábrica, incluindo redes de águas e de eletricidade. Estes módulos são diretamente instalados na laje do edifício.	Quartos de banho e cozinhas em módulos
Sistemas modulares			Unidades tridimensionais de grande dimensão, totalmente ajustadas antes de serem transportadas, de modo a que sejam montadas nas fundações ou noutros módulos, realizando assim a forma estrutural do edifício.	Esquemas altamente padronizados: hotéis, prisões, residências de média dimensão e dormitórios	

De referir que alguns autores consideram a existência de uma quarta categoria identificada na literatura como sistema construtivo híbrido, correspondente a uma construção semi-volumétrica. Esta solução traduz-se na ligação entre os sistemas volumétricos (modulares) e não volumétricos, representando a

possibilidade de utilização de diferentes soluções no mesmo projeto, incrementando a flexibilidade construtiva. A título exemplificativo, esta solução é passível de ser utilizada em módulos para cozinhas e quartos de banho, paralelamente com sistemas de painéis para os restantes elementos (Lopes *et al.*, 2018). No decorrer deste trabalho será desenvolvida a temática de sistemas não volumétricos, mais concretamente, painéis verticais.

2.2 Paredes Pré-fabricadas

As paredes pré-fabricadas são um caso particular da pré-fabricação, sendo uma forma de industrialização das paredes moldadas no local – tijolos convencionais ou paredes de alvenaria (Acker, 2002). Dentro da vasta gama de painéis pré-fabricados é possível encontrar elementos produzidos com diferentes materiais que respondem às mais diversificadas exigências como, por exemplo, estruturais, térmicas e acústicas.

Estes são essencialmente aplicados em edifícios industriais de grande dimensão, apesar de se verificar também a sua aplicabilidade em hospitais, edifícios de habitação, escritórios e praticamente todo o tipo de estruturas (Acker, 2002). A diversidade dos materiais que podem constituir um painel e a qualidade no seu processo de fabrico, aliada à rapidez de construção, representam características atrativas para o recurso a este tipo de elementos.

A utilização destes elementos pré-fabricados está principalmente condicionada pela viabilidade económica e condições de transporte. A construção com painéis pré-fabricados requer um projeto com elevado grau de repetição ou a possibilidade de recorrer a elementos standardizados pelos fabricantes, uma vez que a produção de elementos únicos e personalizados são um entrave à sua viabilidade económica. É importante referir que a viabilidade económica pode ser alavancada pela indisponibilidade de mão de obra e pelo planeamento da obra.

Outro aspeto fundamental é a possibilidade de transporte do local de produção para a obra, o peso, as dimensões dos elementos e a qualidade das vias de acesso, que podem também ser condicionantes imprescindíveis (Araújo, 2016).

Acresce que, as inúmeras vantagens subjacentes à pré-fabricação podem, por vezes, ser diminuídas pela existência de patologias na ligação entre painéis e pelo monolitismo da estrutura, requerendo um adequado dimensionamento das ligações com a estrutura e com outros painéis (Araújo, 2016).

2.2.1 Exigências de Desempenho de uma Parede Interior

Uma parede divisória ou interior, independentemente da solução escolhida ou método construtivo, deve apresentar um desempenho mínimo face às várias exigências identificadas na Tabela 2. Estas exigências são fruto de um requisito mínimo de qualidade, afim de garantir segurança, higiene e conforto ao utilizador (Faria, 1996).

Tabela 2 – Quadro de exigências de paredes interiores (Faria, 1996).

Exigências	Sub-exigências
Estabilidade	Resistência ao vento Resistência às deformações impostas Resistência aos choques Resistência aos batimentos das portas
Segurança contra risco de incêndio	Resistência ao fogo Reação ao fogo
Segurança na utilização	Contacto físico Circulação e movimento das pessoas
Estanquidade à água	Água proveniente de zonas húmidas Água proveniente de paramentos exteriores de fachada
Estanquidade ao ar	Permeabilidade ao vapor de água
Conforto térmico e poupança energética	Isolamento térmico Secura dos paramentos de parede
Pureza do ar	Não emissão de cheiros pelos materiais Não emissão de vapores, aerossóis, pó, sujidade ou radiação prejudiciais à saúde
Conforto acústico	Isolamento sonoro aos sons aéreos Absorção sonora
Higiene	Possibilidade de fixação de poeiras ou microrganismos Resistências as ações de limpeza
Conforto visual	Planeza da superfície Verticalidade Defeitos de superfície e largura das fissuras Homogeneidade de cor e brilho
Conforto ao toque	Aspereza dos paramentos
Adaptação à utilização normal	Aptidão à suspensão de cargas Aptidão para incorporar elementos de instalação Manutenção das características após choque de serviço
Durabilidade	

2.2.2 Critérios de desempenho e Normas aplicáveis

Nesta secção efetuou-se um levantamento das normas e diretivas existentes relativas às principais exigências que foram apresentadas na Tabela 2. Esta análise teve como diretriz os guias *European Technical Approval Guidelines* (ETAG) 003 e 016, assim como a exposição feita pelo autor José Faria (1996) em “Divisórias leves pré-fabricadas”. Face à multiplicidade dos critérios apresentados nos documentos referidos, apresenta-se a Tabela 3 que resume as principais normas e diretivas aplicáveis. Não obstante, compreende-se a existência de diversas fontes (grupos de especialistas, documentos normativos e legislativos e outros intervenientes na padronização) que produzem listas próprias de desempenho que não são homogêneas entre si (Lopes *et al.*, 2018).

Tabela 3 – Tabela síntese da legislação aplicável.

Exigência	Características	Avaliação	Avaliação CE
Estabilidade	ETAG 003	ISO 7892:1988 ISO/DIS 7893:1990 ISO/DIS 8413:1990 ISO/DIS 12055:2002	EOTA TR01
Segurança contra risco de incêndio	ETAG 003 EN13501	EN 1363-1 CE 96/603 ISO 11925-2 ISO 13784-1	EOTA TR35
Higiene e Saúde	ETAG 003	Diretiva 67/548/CEE CE 1272/2008	EOTA TR34
Permeabilidade à água	ETAG 003	ETAG 022	
Permeabilidade ao vapor de água	ETAG 003	EN/ISO 13788:2001 EN 12524:2001 EN/ISO 12572:2001	
Conforto acústico	ETAG 003 RRAE	EN 10140-2:2010 EN/ISO 354:2003	
Conforto térmico	ETAG 003	EN/ISO 8990:1997 EN 12667:2001 EN 12939:2000 EN 12664:2001 EN/ISO 6946 EN/ISO 10211:2007	

Estabilidade

Uma parede interior tem de conseguir resistir a cargas dinâmicas ou estáticas, provocadas por ações de pessoas ou objetos, sem que tal proporcione a ocorrência de colapso total ou parcial. Essa resistência

deve ser assegurada por todos os elementos constituintes da parede, exceto o acabamento. Entende-se por estabilidade a capacidade de resistir às seguintes ações (EOTA, 2012):

- Impactos resultantes da queda de uma pessoa;
- Ventos causadores de pressões e depressões;
- A um grande número de pessoas a pressionar a parede;
- Impactos resultantes do movimento de objetos não deformáveis pesados, tais como peças de mobiliário ou equipamento;
- Bater de portas.

As diretivas dividem os testes de avaliação de resistência de uma parede em quatro ensaios, sendo os dois primeiros relativos a ensaios de impacto. De referir, o embate de um corpo mole (um saco de 50 kg) e um corpo rígido (uma esfera de aço de 1 kg). As especificações dos respetivos ensaios vêm descritas nas normas ISO 7892:1988 e ISO/DIS 7893:1990. Os ensaios podem ser consultados complementarmente no EOTA – *Technical report 1 – Determination of impact resistance of panels and panel assemblies*. Na Figura 3 é possível ver uma esquematização da montagem e execução desses ensaios.

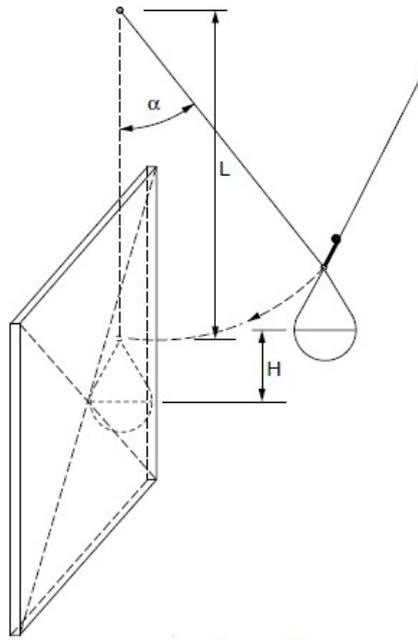


Figura 3 – Ensaio de impacto (EOTA, 2003b).

Nos dois ensaios restantes, as paredes devem ser expostas a ensaios de carga vertical excêntrica e de cargas lineares horizontais, em conformidade com as diretivas das normas ISO/DIS 8413:1990 e

ISO/DIS 12055:2002 As normas apresentadas permitem também avaliar a robustez e a rigidez dos painéis de parede, à exceção da ISO/DIS 12055:2002.

Segurança contra risco de incêndio

Apesar dos múltiplos cuidados e normas de segurança difundidas, o risco de ocorrência de incêndios continua presente, maioritariamente fruto de negligência durante atividades por parte dos ocupantes (APSEI, 2019). Perante a existência desse risco, as construções e, particularmente as paredes, devem apresentar características que permitam (EOTA, 2012):

- a estabilidade durante um período de tempo específico;
- a limitação da propagação do fogo e do fumo;
- aos ocupantes abandonar o edifício ou ser salvos por meios de socorro;
- a segurança de equipas de socorro;
- a limitação da propagação do fogo a construções vizinhas.

A reação e resistência ao fogo são avaliadas com a norma EN 13501:2009. A atribuição dessa classificação pode ser feita de duas formas. A primeira passa pela análise do decreto CE 96/603, no qual é apresentado uma lista de materiais não combustíveis e por isso classificados, segundo as Euroclasses de reação ao fogo, com desempenho A1. Ou seja, na eventualidade de todos os elementos constituintes da parede divisória estarem listados, não existe necessidade de recorrer a ensaios para proceder à atribuição dessa mesma classificação. A segunda abordagem passa pela realização de ensaios segundo as regras apresentadas na norma EN 1363-1. Os mesmos podem ser usados para a atribuição da marcação CE, desde que cumpram as regras presentes no relatório técnico 35 (EOTA, 2013).

Também, na abordagem dos testes de reação ao fogo a Organização Internacional para Padronização, apresenta as seguintes normas com relevância para uma parede divisória (RISE, 2017):

- ISO 11925-2, *Reaction to fire tests - Ignitability of building products subjected to direct impingement of flame - Part 2: Single-flame source test;*
- ISO 13784-1:2014 *-Reaction to fire test for sandwich panel building systems.*

Higiene e Saúde

De modo a prevenir riscos para saúde, as paredes devem ser sujeitas a uma avaliação das seguintes características:

- Emissão de gases tóxicos;
- Emissão de radiações perigosas;
- Risco de desenvolvimento de microrganismos e insetos.

A regulamentação europeia disponibiliza através do relatório técnico 34 (EOTA, 2015) uma lista das substâncias perigosas regulamentadas. Assim, a constituição de uma parede deve ser sujeita a uma análise da sua composição, de modo a aferir a presença de algumas destas substâncias. Na eventualidade de se registar alguma irregularidade, a composição do respetivo elemento deve ser sujeita à sua aprovação de acordo com a diretiva 67/548/CEE e o Regulamento (CE) n.º 1272/2008.

Permeabilidade ao Vapor de Água

As paredes devem permitir uma transferência normal de humidade entre os espaços, independentemente do sentido. Porém, estas trocas não devem ser causadoras de condensação no seu interior. A avaliação das características de uma parede à possível ocorrência deste fenómeno segundo é contemplada em três normas. A primeira passa pela determinação da resistência ao vapor de água e a condutividade térmica dos materiais, de acordo com a norma EN/ISO 13788:2001. A seguinte, consiste na determinação da resistência ao vapor de água das diferentes camadas que compõe a parede pela norma EN 12524:2001. Por último, a norma EN/ISO 12572:2001 descreve a realização de ensaios à resistência ao vapor de água.

Permeabilidade à Água

As exigências de desempenho relativamente à permeabilidade à água, na generalidade das paredes interiores, não é uma condicionante. No entanto, esta deve ser tida em consideração perante casos de contacto permanente, exemplo disso são os quartos de banho, cozinhas, lavandarias e/ou todos os locais em que as paredes tenham de ser lavadas e/ou sujeitas a projeções constantes de água.

Não existe uma norma apenas dedicada à impermeabilidade de paredes interiores, sendo esse aspeto contemplado nas normas relativas ao material utilizado para o revestimento/acabamento. Contudo, a ETAG 022 prevê a possibilidade de avaliar uma amostra da solução final pretendida.

Segurança na Utilização

As paredes divisórias devem ser projetadas considerando a segurança passiva dos ocupantes, devendo assim apresentar características que previnam a ocorrência de lesões, quer pelo contacto inadvertido, quer pela queda accidental contra a divisória. A ETAG 003 e as Diretivas dos produtos da construção listam algumas características que devem ser avaliadas, delegando essa avaliação para um perito, nomeadamente:

- A geometria da parede, juntas, cantos ou detalhes de acabamento com formas potencialmente causadoras de lesões;
- A textura da superfície e o seu grau de risco de abrasão ou corte;
- O risco de eletrocussão ou queimadura.

Conforto Acústico

As paredes interiores devem assegurar um isolamento aos sons aéreos, que simultaneamente cumpram os requisitos relativos ao tempo de reverberação, essenciais para que o nível de ruído captado pelos ocupantes não seja prejudicial à saúde e garanta condições de conforto. O desempenho imposto a cada parede é variável em função do tipo de utilização, sendo que, ao nível nacional os mínimos exigidos encontram-se no Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios (RRAE).

A avaliação do desempenho de cada solução de parede é feita com recurso aos ensaios descritos nas normas EN 10140-2:2010 e EN/ISO 354:2003, onde se avalia o isolamento sonoro e a absorção sonora.

Conforto Térmico

Atualmente, não existe legislação relativa às exigências térmicas de uma parede interior. No entanto, o conselho diretivo 89/106/CEE refere que a energia necessária ao aquecimento e ventilação de um edifício deve ser mínima. Assim, na eventualidade da parede interior dividir dois espaços com diferentes temperaturas deve possuir propriedades de isolamento térmico. A resistência térmica pode ser determinada recorrendo às seguintes normas: EN/ISO 8990:1997; EN 12667:2001; EN 12939:2001; EN 12664:2000; EN/ISO 6946; EN/ISO 10211:2007.

2.2.3 Materiais Isolantes

Nas paredes pré-fabricadas, de modo geral e como se pode entender ao longo deste documento, verifica-se a necessidade de uso recorrente de materiais isolantes, com o propósito de obter soluções com valores de isolamento térmico e acústico satisfatórios. Geralmente, estes materiais são aplicados nas paredes interiores de duas formas. A primeira consiste na aplicação do material isolante como elemento estrutural da solução, exemplo disso são os painéis do tipo *sandwich*. A segunda, é referente à inserção/fixação do material no interior dos painéis, sem qualquer função na estrutura do mesmo.

Em função do modo de aplicação e das características pretendidas, o mercado tem recorrido a diversos materiais, sendo os mais recorrentes: a lã mineral (lã de rocha e lã de vidro), o aglomerado de cortiça expandida (ICB), o aglomerado de cortiça natural, o poliestireno expandido moldado (EPS), o poliestireno expandido extrudido (XPS), a espuma rígida de poliuretano (PUR), a espuma rígida de poli-isocianurato (PIR), a espuma de polietileno expandido extrudido (PEF), os grânulos leves ou fibras soltas e a espuma elastomérica flexível (FEF) (Marques, 2012).

2.3 Soluções do Mercado

Atualmente, existe no mercado uma diversidade de soluções que podem ser agrupadas em função da dimensão dos painéis que perfazem a parede ou da tipologia de construção do painel, conforme ilustrado na Figura 4 (Lopes *et al.*, 2018).

Na impossibilidade de estudar todos os sistemas de paredes pré-fabricadas existentes no mercado, foi considerada a exposição das soluções representativas/comuns de cada grupo, segundo a sua tipologia.

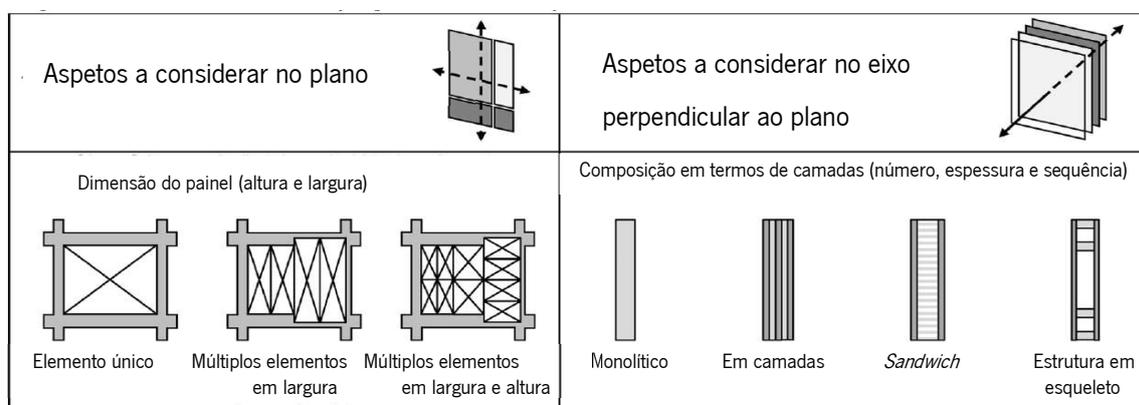


Figura 4 – Classificação das diferentes soluções segundo a sua tipologia. Adaptado de (Lopes *et al.*, 2018).

2.3.1 Paredes do tipo *Sandwich*

O painel *sandwich* é resultante da montagem/colagem de três camadas, duas lâminas exteriores de espessura reduzida, constituídas por um material denso e resistente, separadas por um material isolante (núcleo), com uma densidade e resistências inferiores, tal como se pode ver na Figura 5. Em função dos materiais selecionados para o núcleo, existe a necessidade de recorrer a um material adesivo para a união das diferentes camadas. O produto final resulta num material compósito que reúne as propriedades individuais de cada material, tirando assim partido das vantagens de cada um e colmatando as desvantagens. Este material compósito destaca-se pela leveza e versatilidade (Davies, 2001).

As combinações de materiais podem ser as mais variadas e encontram-se em constante evolução. Assim, a escolha de materiais, da tipologia do núcleo e a forma do painel influenciam as características do produto final. Esta seleção é condicionada pelo desempenho pretendido para o painel, essencialmente a nível térmico, acústico, estrutural e estético.

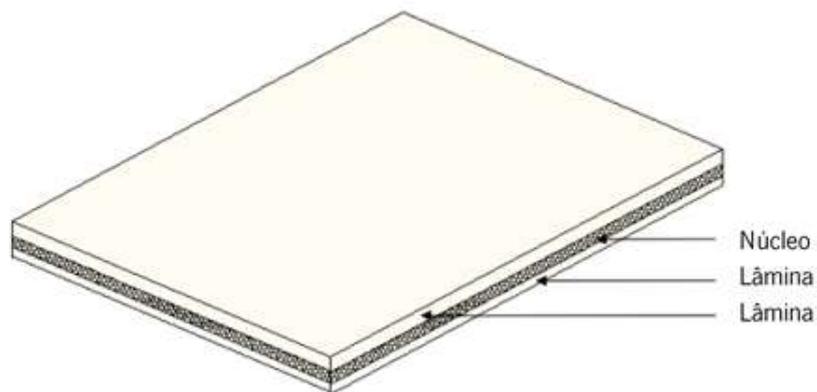


Figura 5 – Constituição de um painel *sandwich* (Marques, 2012).

Essencialmente, a produção de painéis *sandwich* recorre a lâminas metálicas e núcleos de espumas rígidas plásticas, lã mineral ou favos de mel metálicos. Porém, em busca de soluções inovadoras, algumas empresas apresentam produtos constituídos com lâminas de betão, compósitos reforçados com fibras, madeiras e derivados (Davies, 2001).

Nas diversas soluções e materiais adotados, o núcleo apresenta várias configurações, ilustradas na Figura 6. É importante referir que o material escolhido e respetiva configuração têm de apresentar resistência suficiente para transmitir esforços entre as duas lâminas.

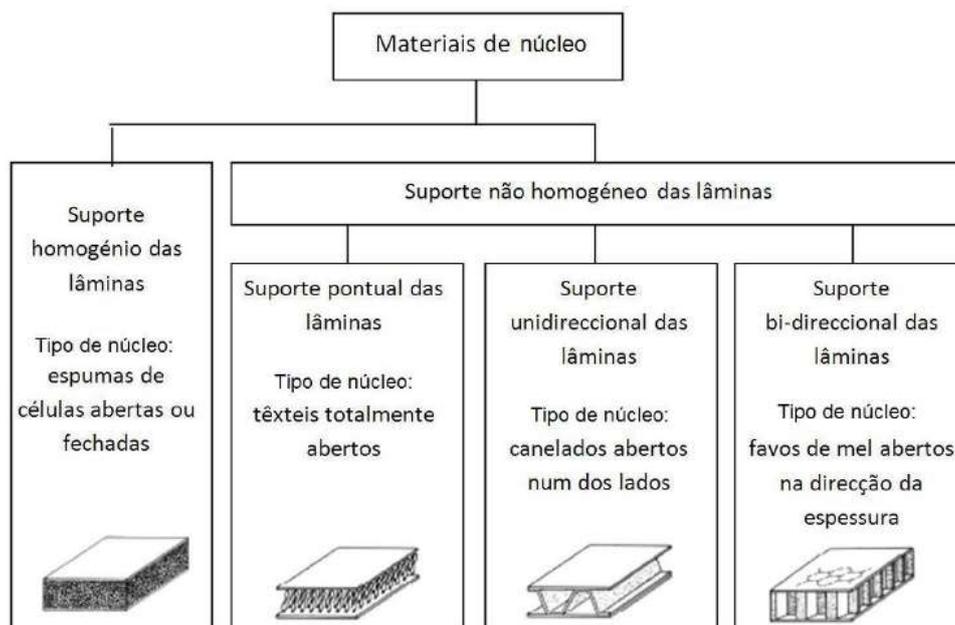


Figura 6 – Materiais e configurações do núcleo de um painel *sandwich* (Almeida, 2009).

Ligação entre Painéis

O painel *sandwich* é um elemento monobloco, geralmente acabados e prontos a aplicar em obra. A montagem destes elementos é de modo geral facilitada e previamente projetada pelos fabricantes. A solução mais corrente é a ligação entre os topos, através de um sistema de encaixe macho – fêmea. Outro modo de ligação, é através da adição de elemento (utilizando-se chapas lisas nas faces dos painéis) ou através de montantes perfilados. Por último, é possível recorrer à colagem dos elementos através do preenchimento das juntas. As diferentes técnicas estão esquematizadas na Figura 7.

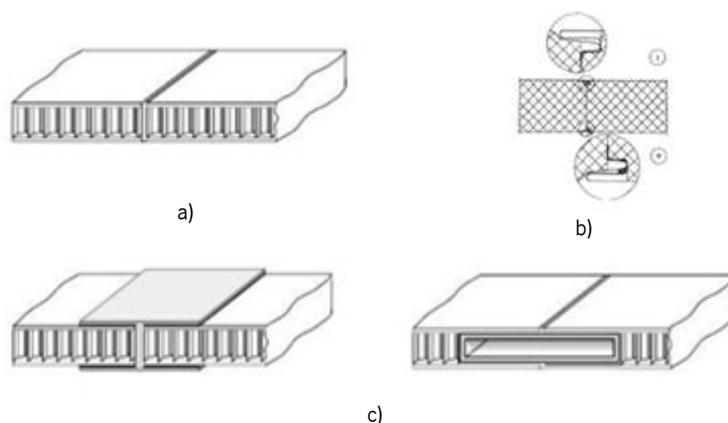


Figura 7 – Ligações entre painéis *sandwich*: a) Ligações através de colagem; b) Ligações através de sistemas encaixe; c) Ligações através de adição de elementos. (Almeida, 2009).

Um ponto sensível é a ligação dos elementos dispostos de forma não linear e o acabamento de um topo livre. Estes locais expõem as camadas internas do painel a possíveis impactos e a agentes externos (humidade), o que propicia a degradação. Na Figura 8 e Figura 9 são apresentadas algumas soluções para a execução deste tipo de ligação e acabamentos, que passam pela utilização de peças adicionais extrudidas em “L” e “C” (Almeida, 2009).



Figura 8 – a) ligação de painéis de canto; b) ligação de painéis em “T” (Almeida, 2009).

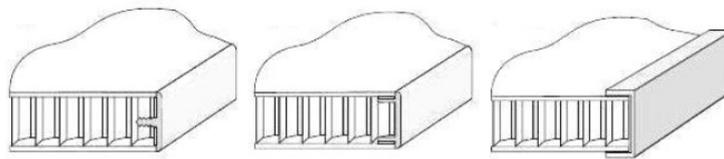


Figura 9 – Acabamentos de topo de painéis (Almeida, 2009).

Ligação à Estrutura

A ligação dos painéis *sandwich* à estrutura é assegurada nas suas extremidades superiores e inferiores através de peças de ligação concebidas para o efeito, à semelhança da Figura 10. Estas ligações são essenciais, dado que garantem a inexistência de movimentos, o que é fundamental para a segurança e estabilidade do painel. Este fator contribui ainda para a imagem de robustez e qualidade que uma parede divisória deve transmitir (Faria, 1996). Estas peças são constituídas por guias, fixadas ao chão e ao teto, que formam uma moldura onde assenta o painel. Posteriormente, e de modo a concluir a solidarização do painel são utilizados perfis de remate.

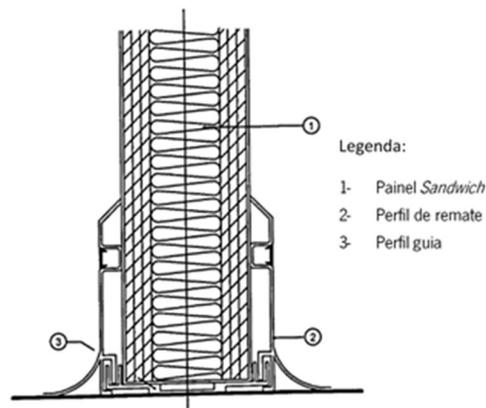


Figura 10 – Guia de ligação de um painel *sandwich* à estrutura (Faria, 1996).

Painéis *sandwich* com Lâminas Metálicas

Como referido anteriormente, os painéis *sandwich* com lâminas metálicas são a configuração mais recorrente, o que se deve em parte à diversidade de aplicações possíveis, para além das paredes divisórias e do processo construtivo facilitado. Entende-se por processo construtivo facilitado, o facto das lâminas metálicas serem fornecidas em rolos, permitindo uma continuidade de fabrico, ao contrário das lâminas de betão ou madeira (Almeida, 2009).

Os painéis de lâminas metálicas, geralmente apresentam dois tipos de núcleos: espuma plástica rígida ou material de fibra inorgânica. A seleção desse material é condicionante no método de produção, sendo que núcleos em espuma são resultado da expansão de uma mistura líquida entre as lâminas de metal, formando a sua própria ligação, contrariamente ao material de fibra orgânica. Este, por sua vez, deve ser produzido a montante sob a forma de placas. De seguida, estas placas são coladas às lâminas através de um material adesivo. Os diferentes processos de fabrico e diferentes densidades, juntamente com a ligação “núcleo—lâmina”, influenciam diretamente as propriedades dos painéis. Deste modo, é possível obter diferentes características em cada painel, normalmente divulgadas pelos fabricantes (Davies, 2001). De modo a enquadrar o presente estudo com o mercado, são apresentadas de seguida soluções (e características) de dois fabricantes de painéis para paredes.

A Masterpanel S.L. é uma empresa espanhola especializada no setor da construção metálica e dedicada à produção de painéis *sandwich* e chapas metálicas. No seu catálogo apresenta o painel Master-Modul, direcionado para a construção modular de paredes divisórias. Este produto apresenta um núcleo em espuma de poliisocianurato do tipo autoextinguível (aditivada com produtos de ignifugação) e lâminas metálicas com diferentes acabamentos na sua forma e cor, tal como se mostra na Figura 11 (Masterpanel, 2015). A sua comercialização está disponível em três espessuras: 35, 40 e 50 mm (todos

com uma largura de 1000 mm). Tratando-se de um produto realizado por um processo de pultrusão, o comprimento é variável até um máximo de 12 m. Na Tabela 4 apresentam-se algumas características técnicas.

Tabela 4 – Características técnicas de um painel *sandwich* metálico (Masterpanel, 2015).

Espessura (mm)	Peso (kg/m²)	Transferência Térmica (W/m² .k)	Isolamento Acústico	Resistência ao fogo
35	10,04	0,61	-	F
50	10,64	0,45	39 dB	B-s1, d0



Figura 11 – Painel *sandwich* com lâmina metálica e núcleo de poliisocianurato (Masterpanel, 2015).

À semelhança do produto anterior, a empresa multinacional Isopan apresenta um painel *sandwich* com lâminas metálicas, sendo o principal diferenciador do concorrente o seu núcleo em lâ de rocha, tal como se mostra na Figura 12. A Isopan disponibiliza, dentro das lâminas metálicas, aço inoxidável, liga de alumínio ou aço galvanizado ao qual é possível aplicar um número alargado de cores. As dimensões deste produto são sensivelmente idênticas às da solução anterior, variando nas espessuras disponibilizadas (Isopan, 2016). Na Tabela 5 apresentam-se algumas características técnicas.

Tabela 5 – Características técnicas de um painel *sandwich* metálico (Isopan, 2016).

Espessura (mm)	Peso (kg/m²) lâminas de 0,5 ou 0,6 mm	Transferência Térmica (W/m² .k)	Isolamento Acústico	Resistência ao fogo
50	11,8 / 13,5	0,75	34 dB	A2-s1, d0 – 30min
80	14,5 / 16,2	0,49	35 dB	A2-s1, d0 – 60min
100	16,3 / 18,0	0,39	35 dB	A2-s1, d0 – 120min

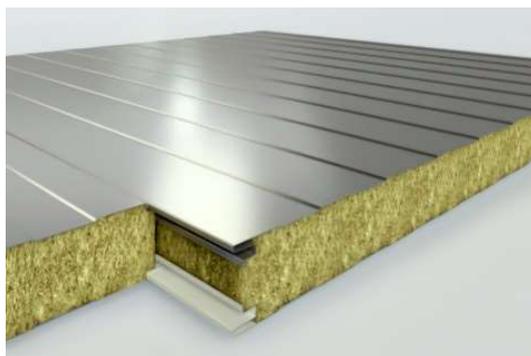


Figura 12 – Painel *sandwich* com lâmina metálica e núcleo de lã de rocha (Isopan, 2016).

Os painéis de lâmina metálica apresentam diversas vantagens e desvantagens na sua utilização. Como pontos positivos destacam-se:

- Baixo valor de massa volúmica;
- Elevada rigidez das lâminas;
- Facilidade de colocação em obra, dispensando o recurso a equipamento de elevação;
- Bom desempenho térmico;
- Boa capacidade de resistência ao choque;
- Não necessita de acabamento;
- Estanqueidade dos painéis à água, ao vapor e ao ar;
- Durabilidade (resistente a ambientes agressivos e em diferentes condições ambientais).

Apesar destas vantagens, os painéis de lâmina metálica apresentam alguns entraves à sua utilização por razões técnicas e visuais.

O acabamento final é várias vezes prejudicado pela necessidade de se recorrer a montantes para unir e conferir estabilidade aos painéis, bem como pela colocação de redes elétricas pelo exterior, face à impossibilidade de embutimento no seu interior.

As razões técnicas resumem-se à acústica e construção. O baixo peso associado a uma superfície metálica causa problemas de ressonância e reflexão do som, diminuindo o conforto acústico. Como solução podem-se utilizar materiais viscoelásticos nos pontos de ligação, mitigando esses efeitos. Outra solução passa pela presença de micro furos na superfície dos painéis que permitem ao núcleo em lã de rocha atenuar a reflexão do som (Davies, 2001). Ao nível construtivo, a montagem dos painéis pode ser problemática devido à necessidade de cuidados a ter nas ligações através de acessórios de canto, guias

e montantes, necessários para conferir estabilidade e resistência aos painéis. Por último, refere-se as reduzidas possibilidades de reciclagem no final do ciclo de vida.

Painéis *Sandwich* de Madeira

Existem diversas soluções de painéis *sandwich* com diferentes tipos de madeira e núcleos. Um exemplo é a Simonin Wood que apresenta um produto com base em lâminas de madeira de pinho ou carvalho, unidas a um núcleo de fibra de média densidade (MDF – *Medium-Density Fiberboard*) ou cortiça (Figura 13), diferenciando-se assim de outros produtos apresentados, pelo recurso a materiais naturais (Simonin Wood, 2016). Nos últimos anos, a cortiça, material natural e com excelente desempenho acústico (uma das principais exigências de uma parede interior), tem tido uma crescente procura.



Figura 13 – a) Painel *sandwich* de madeira com núcleo de MDF. b) Painel *sandwich* de madeira com núcleo de cortiça (Simonin Wood, 2016).

Para além das características acústicas, a cortiça apresenta um bom comportamento térmico e estrutural, o que a torna num excelente material para ser usado como núcleo de painéis leves. Relativamente ao desempenho, este é condicionado pela granulometria e processo de ligação, pelo que deve ser calibrado e testado para a obtenção do desempenho pretendido (Faria, 2014). Apesar desta combinação alternativa de materiais, a lógica produtiva (lâmina, núcleo e adesivo) mantém-se inalterada. As dimensões destes painéis variam bastante em função do tipo de madeira utilizada. No caso da Simonin Wood, que recorre a madeira maciça, os elementos são relativamente pequenos com uma largura de 205 mm e comprimentos variados (até um máximo de 3000 mm), apresentando-se as suas características na Tabela 6. No caso de lâminas de MDF, material resultante da aglutinação de fibras de madeira, outras empresas produzem painéis com dimensões superiores, por exemplo, a Gröwancork com um painel de 2750 por 900 mm (Gröwancrok, 2019).

Tabela 6 – Características técnicas de um painel *sandwich* de madeira (Simonin Wood, 2016).

Espessura (mm)	Peso (kg/m²)	Transferência Térmica (W/m² .k)	Isolamento Acústico mínimo registado	Resistência ao fogo
86	28,4	0,65	34 dB	Não especificado
136	39,0	0,39	34 dB	Não especificado

A aplicação desta solução é similar à dos painéis *sandwich* de lâminas metálicas. A ligação entre elementos é feita por encaixe macho – fêmea, como se pode ver na Figura 14, e as restantes ligações entre painéis e a ligação à estrutura são semelhantes às apresentadas anteriormente. Um detalhe importante é visível na Figura 14, a qual reflete a integração prévia de dutos para instalação de redes nestes painéis.

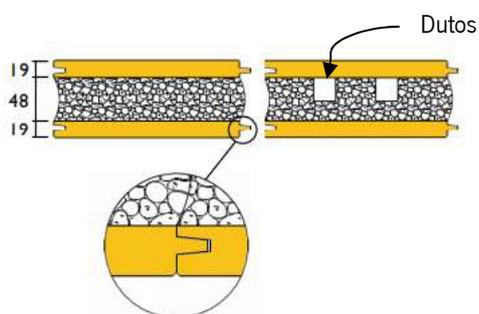


Figura 14 – Sistema de encaixe e dutos num painel *sandwich* de madeira (Simonin Wood, 2016).

Como já referido, e para além deste tipo de painéis ser 100% ecológico e reciclável, pode-se ainda referir as seguintes mais-valias (Gröwancrok, 2019):

- Não existe libertação de vapores na sua produção;
- Fácil aplicação, não necessitando de equipamento de elevação;
- Grande variedade no acabamento final;
- Incorporação fácil das instalações técnicas, rede de águas e rede elétrica;
- Eletricamente neutro;
- Possui capacidades estruturais;
- Adaptável às diferentes geometrias em obra.

Como desvantagens, podem-se referir a reduzida dimensão dos elementos face a outros sistemas de painéis pré-fabricados, levando, conseqüentemente, a um processo de montagem mais longo. Outra lacuna está associada à vulnerabilidade da madeira quando exposta a determinados ambientes.

Painéis de Betão Leve do Tipo *Sandwich*

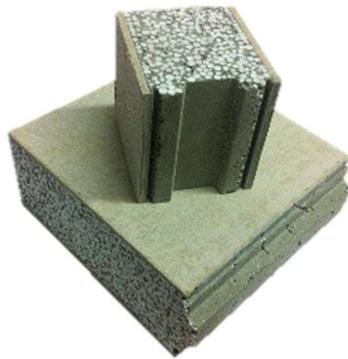
Os painéis de betão leve são uma variante de painel *sandwich* distinguindo-se pela sua composição (com base cimentícia) conferindo-lhe um aspeto visual semelhante ao da construção tradicional. A Modupainel é um exemplo de empresa produtora deste tipo de produto (Modupainel, 2017).

Os painéis de betão leve são compostos por duas faces de silicato de cálcio e um núcleo de betão leve com EPS. Analogamente aos painéis referidos anteriormente, o painel de betão dispõe de um sistema de encaixe macho – fêmea facilitando o processo de montagem, conforme a Figura 15 (Sousa, 2015). Em oposição, as ligações à estrutura não necessitam obrigatoriamente de recorrer a acessórios, sendo efetuadas com uma argamassa disponibilizada pelo fabricante. A transição de elementos ligados de modo não linear é igualmente simplificada, não sendo necessária uma especial atenção (sendo igualmente válido para elementos de topo livre). Estas diferenças devem-se à elevada resistência do núcleo e ao facto de a parede ser sujeita a um acabamento final, contrariamente aos painéis *sandwich* já referenciados. O fabrico destes painéis é desenvolvido ao longo de três etapas: a primeira consiste na produção das lâminas de silicato de cálcio através de uma calandra cilíndrica. Este processo consiste na mistura de cal, ácido silícico, sulfato de cálcio anidro, fibras de reforço, dolomita e wollastonite, ao qual se segue um processo de cura em autoclave (Nichias, 2004). A segunda etapa passa pela produção do núcleo, essencialmente composto por CEM II / A-L 42.5R, areia fina e granulado de EPS (Sousa, 2015). À semelhança das lâminas, o núcleo passa por um processo de cura em autoclave. A terceira e última etapa consiste na união das lâminas ao núcleo, recorrendo à aplicação de um adesivo e prensagem do conjunto (Faria, 2014).

As dimensões e propriedades técnicas são variáveis em função do fabricante. Por exemplo, a empresa Modupainel, apresenta um produto com uma largura fixa de 610 mm e comprimentos variáveis até 3000 mm (Modupainel, 2017). A espessura e outras especificidades técnicas são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Características técnicas de um painel *sandwich* de betão leve.

Espessura (mm)	Peso (kg/m²)	Transferência Térmica (W/m² .k)	Isolamento Acústico	Resistência ao fogo
60	35	0,95	37 dB	A2 – Superior à 60 min
90	45	0,65	39 dB	A2 – Superior à 60 min
150	75	0,35	43 dB	A2 – Superior à 60 min



a)



b)

Figura 15 – a) Painel de *sandwich* de betão leve. (Modupainel, 2017); b) Assemblagem de painéis de *sandwich* de betão leve (Faria, 2014).

Além das qualidades garantidas pela pré-fabricação e intrínsecas a todos os materiais apresentados, os painéis de betão leve exibem as seguintes vantagens:

- Elevada rigidez e resistência;
- Baixa massa volúmica (o recurso ao betão leve de EPS no núcleo permite formar painéis com um peso médio de 45 kg/m²);
- Durabilidade;
- Elevado isolamento acústico;
- Elevado isolamento térmico;
- Elevada resistência ao fogo;
- Resistência a pragas;
- Compatível com qualquer tipo de acabamento;
- Fácil incorporação das instalações técnicas (rede de águas e rede elétrica);
- Facilidade de corte em obra.

Em contrapartida, os painéis de betão leve apresentam algumas desvantagens. Neste contexto, podem-se referir: o elevado peso próprio, a necessidade de um acabamento final e as dificuldades na sua reutilização. O peso próprio, apesar de baixo, quando comparado com outras soluções, encontra-se no limite para serem aplicadas sem recurso a equipamento de elevação. Também o facto de se tratar de um produto com uma superfície em tosco, cria a necessidade de acabamentos finais. Por último, existem reduzidas possibilidades de reciclagem no seu fim de vida (Faria, 2014).

2.3.2 Painéis em *Cross Laminated Timber* (CLT)

Na Europa, a popularização do betão e do tijolo no século XX levou a uma depreciação da construção em madeira, sendo atualmente usada numa reduzida percentagem da construção, nomeadamente em construções leves de madeira, residências familiares, pavilhões desportivos e industriais. Uma outra razão que levou ao declínio da utilização da madeira deve-se à sua combustibilidade. No entanto, essa imagem tem-se vindo a desvanecer em prol de um material de construção natural e sustentável. Na corrente década tem-se verificado um crescente interesse na madeira e esta mudança deve-se em parte ao lançamento comercial da madeira laminada cruzada (*Cross Laminated Timber* – CLT) (Brandner *et al.*, 2016).

Os painéis de CLT resultam da colagem de lamelas de madeira maciça de origem resinosa, cuja espécie mais recorrente é o abeto da Noruega (sendo possível recorrer a outras espécies como o choupo, o eucalipto ou o pinho). As lamelas utilizadas passam previamente por um processo de seleção visual e mecânico, no qual são eliminadas possíveis anomalias da madeira. O processo de seleção e classificação de madeira estrutural de secção retangular é feito segundo as diretrizes da norma EN 14081-1. A espessura destes elementos está geralmente compreendida entre os 20 e os 40 mm e deve apresentar um teor de humidade próximo dos 12%, inibindo assim o ataque de fungos e insetos xilófagos. (Costa, 2013) (Jorge, 2013). Posteriormente, as lamelas são unidas formando placas, que são coladas ortogonalmente entre si, resultando num painel estratificado de grandes dimensões, como se pode observar na Figura 16). Uma particularidade é o facto de todas as lamelas de uma mesma placa terem a mesma orientação das suas fibras (Jorge, 2013).

A disposição das lamelas de forma ortogonal reflete uma série de benefícios tornando esta solução particularmente interessante ao nível estrutural. O cruzamento das fibras da madeira permite uma distribuição das cargas de forma bidirecional e confere estabilidade aos painéis quando estes são expostos às variações do teor de água (restrição dos movimentos higroscópicos da madeira).

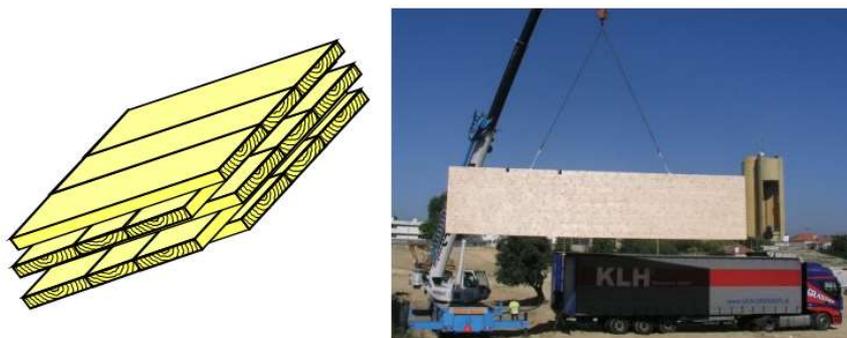


Figura 16 – Painel de CLT (Jorge, 2013).

A disposição em camadas é conseguida com um número ímpar de placas (variando de 3 a 11 camadas), permitindo atingir diferentes espessuras e níveis de resistência, conforme se apresenta na Figura 17. No entanto, é importante referir que a espessura do CLT deve ser sempre adaptada a cada caso e em conformidade com as prescrições do Eurocódigo 5 (Brandner *et al.*, 2016). A espessura de um painel e , conseqüentemente, o número de camadas pode variar em função de outras exigências, tais como: resistência ao fogo, isolamento térmico e acústico.

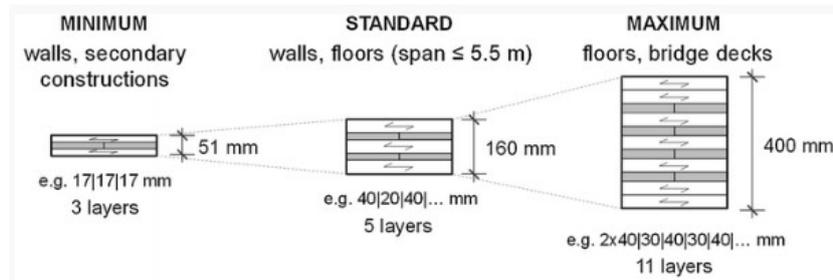


Figura 17 – Setup de um painel CLT em função uso (Brandner *et al.*, 2016).

A produção industrializada destes painéis de grande dimensão teve início no fim dos anos 90 no centro da Europa. Atualmente, o seu grau de desenvolvimento viabiliza a completa pré-fabricação de paredes, piso e coberturas, aliando as funções estruturais, de compartimentação e revestimento. O recurso a tecnologia de corte CNC permitiu a implementação de rigor nas dimensões dos elementos e na realização de aberturas para portas, janelas e outros vãos. A precisão de corte é de +/- 2 mm, garantindo o cumprimento das indicações de projeto. Esta tecnologia permite ainda a execução de furações e roços para a implementação de redes (água e elétrica), como se pode verificar na Figura 18. Tendo em consideração o elevado rigor na produção de CLT, a implementação destes painéis requer precisão e detalhe do projeto, pois só assim é possível garantir a sua correta montagem (Costa, 2013).

Este processo produtivo aparenta não ter limite no tipo de elemento que se deseja produzir. Na realidade, a limitação para a realização de painéis completos de parede é imposta pelas condicionantes do transporte. Os painéis de parede de CLT apresentam um comprimento e largura máximos de 13,50 m e 2,95 m respetivamente, sendo a sua espessura variável, tal como referido anteriormente (Jorge, 2013).



Figura 18 – Furações e roços em painéis CLT para à aplicação de redes (Jorge, 2013).

Em termos de produção, destaca-se a empresa austríaca KLH, líder de mercado. A KLH produz diversos elementos necessários à construção, desde habitações individuais, prédios, centros comerciais ou edifícios industriais. Estes são unicamente produzidos por encomenda, conseguindo-se total controlo e cumprimento das exigências e legislação em vigor (KLH, 2019).

No domínio das paredes, a empresa apresenta diferentes acabamentos e espessuras variáveis entre os 60 e os 180 mm. Tal como foi referido anteriormente, a altura e o comprimento têm total liberdade dentro dos limites máximos impostos pelo transporte. No que concerne ao acabamento, existem três níveis distintos que se caracterizam pela qualidade e homogeneidade da madeira à superfície, sendo eles: “habitação”, “industrial” e “não visível”. Este último destina-se a receber camadas adicionais de acabamento, ocultando a madeira. Esta escolha pode ter origem em razões estéticas e/ou técnicas (KLH, 2019).

Na impossibilidade de apresentar toda a gama de painéis, a Tabela 8 expõe as características correspondentes a três espessuras distintas.

Tabela 8 – Características técnicas de um painel CLT (KLH, 2019).

Espessura (mm)	Peso (kg/m²)	Transferência Térmica (W/m² .k)	Isolamento Acústico	Resistência ao fogo
70	35	1,30	32 dB	D-S2,d0 30min
130	65	0,80	37 dB	D-S2,d0 30min
160	80	0,67	41 dB	D-S2,d0 30min

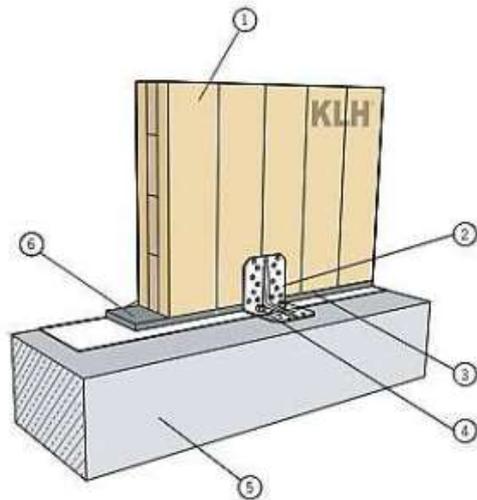
Em Portugal, o conhecimento na aplicação desta solução construtiva é ainda reduzido. No entanto, são-lhe reconhecidas vantagens (Costa, 2013):

- Peso próprio reduzido;
- Reversibilidade da intervenção;
- Pré-fabricação elevada e conseqüente rapidez de intervenção;
- Esbelteza das paredes, beneficiando as áreas úteis;
- Compatibilidade com outros materiais e métodos construtivos;
- Incorporação fácil de redes;
- Elevada sustentabilidade do material;
- Capacidade de desempenhar funções estruturais, incluindo funções de reforço sísmico (KHL, 2019) (Jorge, 2013).

Algumas das mais-valias, tais como a capacidade estrutural, peso próprio reduzido e reversibilidade da intervenção tornam os painéis CLT uma boa solução para a reabilitação de edifícios (Jorge, 2013). À semelhança de todos os materiais, o CLT também apresenta desvantagens. As grandes dimensões e peso dos painéis implicam a utilização de equipamentos de elevação e existe também a possível necessidade de colocação de revestimento para proteção da madeira ao ambiente, de modo a melhorar o seu isolamento e o desempenho ao fogo. Outras desvantagens do CLT referem-se às ligações.

As ligações representam a principal lacuna dos painéis em CLT. Um exemplo é o desempenho estrutural ser dependente do tipo de ligação, sendo, por isso, essencial um estudo adequado do tipo de ligação e da sua frequência por metro linear. O modo de ligação é fundamental no processo de dimensionamento, mais especificamente para ações horizontais causadas pelo vento, sismo ou impacto (Jorge, 2013). Na generalidade, as ligações são realizadas com recurso a elementos metálicos que reduzem a sua resistência e rigidez, quando sujeitos a aumentos de temperatura. As degradações destas características tornam-se uma problemática na eventualidade de ocorrência de um incêndio, pelo que é recomendado o embutimento das ligações ou recobrimento com materiais não combustíveis (Costa, 2013).

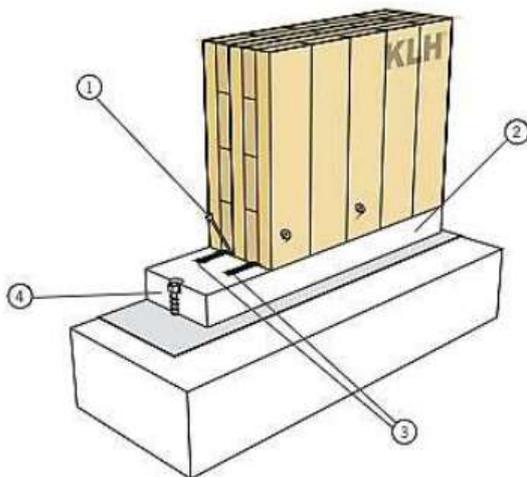
A escolha do tipo de ligação também deve ter em consideração questões estéticas (à vista ou não) ou tipos de material a ligar. Algumas dessas soluções são apresentadas na Figura 19, Figura 20 e Figura 21. No caso de ligações à base de betão, é essencial preconizar o recurso a técnicas e materiais isolantes que evitem a transmissão de humidades. Estes cuidados são fundamentais para a prevenção da degradação prematura da madeira, visto esta ser sensível a variações de humidade.



Legenda:

- 1 - Paineis parede de CLT;
- 2 - Cantoneira para ligação;
- 3 - Tela impermeabilizante;
- 4 - Parafuso roscado;
- 5 - Soleira de betão armado;
- 6 - Placa de material resiliente.

Figura 19 – Ligação parede CLT/base em betão (ligação metálica do tipo cantoneira) (Costa, 2013).



Legenda:

- 1 - Parafusos diagonais roscados para absorver maiores esforços horizontais;
- 2 - Soleira em betão simples;
- 3 - Fita impermeabilizante;
- 4 - Parafuso roscado ligação vertical.

Figura 20 – Ligação parede CLT/base em betão (ligação através parafusos roscados) (Costa, 2013).

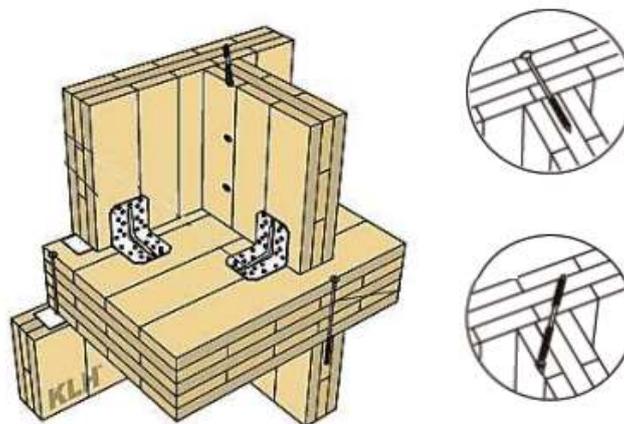
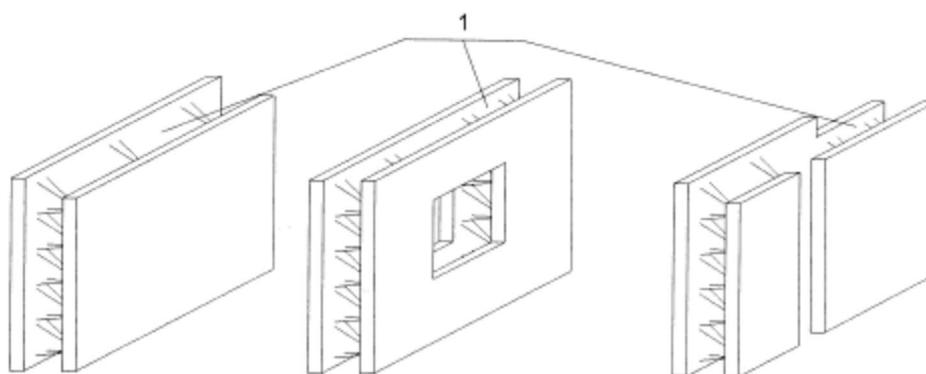


Figura 21 – Ligação entre painéis CLT (Costa, 2013).

2.3.3 Paredes de Betão Pré-fabricadas

A pré-fabricação de painéis de betão está presente no mercado de diversas formas: paredes de betão do tipo *sandwich* (abordadas anteriormente), painéis alveolares de betão leve e painéis de paredes de cofragem integrada (distintos pelo seu elevado desempenho estrutural). Este último consiste na industrialização das paredes tradicionais de betão armado, transferindo o processo de cofragem e de elaboração de armaduras para a unidade fabril.

Como se pode ver Figura 22, os painéis de parede de cofragem integrada, também conhecidos na literatura estrangeira como *prémurs*, são uma alternativa à cofragem e à elaboração de armaduras em obra. É no centro da Europa que se verifica um maior recurso a este sistema construtivo, bem como a existência de diversos fabricantes (CSTB, 2014). A título exemplificativo pode-se referenciar a Alpha Beton (sediada no norte de França) que é creditada por um parecer técnico emitido pelo Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), tal como acontece com outras empresas (Rector lesage, XEBEX, Spurgin, entre outras). Com a utilização de deste tipo de painéis, pretende-se reduzir o custo de produção das paredes de betão armado. Estes painéis consistem na pré-fabricação parcial de muros de betão armado, deixando para a obra apenas a realização da betonagem. Esta solução assenta na produção em fábrica de duas lâminas finas de betão armado, de 6 a 7 cm de espessura e com dimensões máximas de 12 m de comprimento e 3,70 m de altura (variáveis em função do fabricante). Estas duas são unidas através de armaduras, que por sua vez garantem o espaçamento entre as lâminas. No processo de produção é possível a colocação de armaduras adicionais em função das exigências estruturais do local de aplicação.



1 – Betonagem em obra

Figura 22 – Parede de cofragem integrada (CSTB, 2014).

Analogamente a muitas outras soluções pré-fabricadas, os *prémurs* necessitam de um planeamento prévio detalhado, que inclui a identificação das geometrias, o cumprimento das exigências

regulamentares e a compatibilização da posição em obra. Estas etapas são fundamentais porque a produção desta solução é realizada por encomenda, sendo definido para cada painel:

- A taxa de armadura;
- A espessura da parede (variando de 20 a 45 cm);
- As dimensões das lâminas (sendo estas totalmente independentes uma da outra, o que permite que uma face seja maior, facilitando ligações a lajes, de canto ou de paredes intermédias);
- A criação de diversas aberturas, tais como janelas, portas, passagem de vigas ou outros elementos não estruturais.

Depois de identificados os parâmetros de cada parede, a produção é realizada de forma similar a uma parede comum, alterando-se unicamente o processo de cofragem e betonagem, que passa a ser executado na horizontal. No processo de betonagem das lâminas existe a possibilidade de pré-colocar tubagens elétricas e respetivas caixas, bem como roços para redes sanitárias, conforme se visualiza na Figura 23 (Alpha Beton, 2016).

Depois de concluído o processo de fabrico, os painéis são devidamente encaminhados para obra, onde serão devidamente posicionados com o auxílio de uma grua (Figura 254), uma vez que os *prémurs* apresentam um peso médio de 250 kg/m² (Migliano, 2007). Previamente, em obra, deve ser garantida a execução de armaduras de arranque e o escoramento dos painéis para a realização da betonagem.



Figura 23 – Roços e dutos em paredes de cofragem integrada (Alpha Beton, 2016).

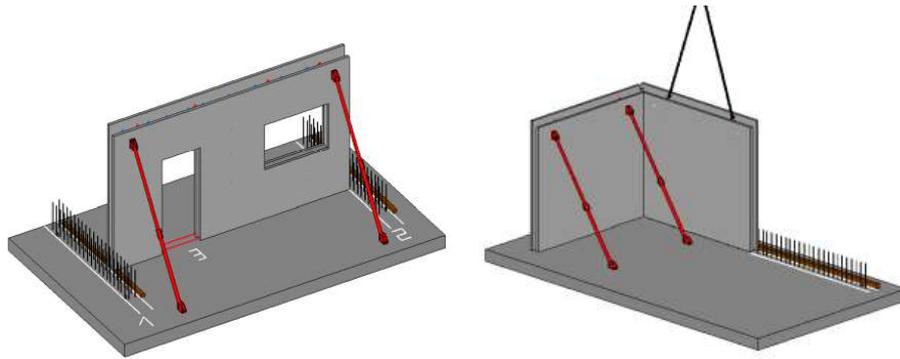


Figura 24 – Assentamento de paredes de cofragem integrada (Alpha Beton, 2016).

Após a betonagem e cura do betão, os *prémurs* resultam em elementos monolíticos e resistentes que respondem às mesmas exigências de um muro de betão armado convencional (Migliano, 2007). O próprio dimensionamento desta solução é feito do mesmo modo que é analisado um muro de betão armado convencional (segundo a norma EN 1992-1-1). Paralelamente, devem ser consultadas as diretivas da norma EN 14992, que faz referência à largura total do *prémurs* (CSTB, 2014).

Ao contrário de outras soluções tradicionais, as vantagens destes elementos estão essencialmente ligadas à pré-fabricação (Alpha Beton, 2016):

- Utilização de um material de elevado conhecimento generalizado;
- Recobrimento das armaduras assegurado;
- Incorporação fácil de redes;
- Acabamento da superfície de elevada qualidade fruto da cofragem metálica realizada em fábrica;
- Compatível com a generalidade dos acabamentos utilizados na construção;
- Desempenho estrutural idêntico ao de uma parede de betão armado.

Relativamente às desvantagens, pode-se mencionar o elevado peso próprio e diversas limitações em termos de transporte. Os *prémurs* podem ainda apresentar todas as patologias associadas a uma parede de betão.

As ligações entre painéis ou à estrutura envolvente resultam da implementação de armaduras suplementares no interior das lâminas de betão (lembrando que deve ser preconizada a selagem da união entre lâminas). As armaduras de ligação regem-se pela norma EN 1992-1-1 (CSTB, 2014). O documento técnico da Alpha Beton apresenta uma série de ligações padrão, adaptadas às diferentes situações possíveis, tal como se exemplifica na Figura 25.

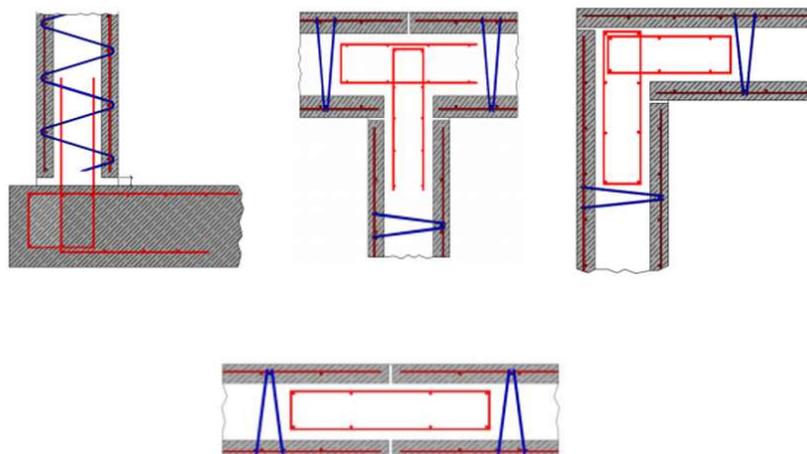


Figura 25 – Ligações de painéis de parede de cofragem integrada (Alpha beton, 2016).

2.3.4 Painéis em *Light Steel Framing*

O *Light Steel Framing* (LSF) é uma solução construtiva baseada na utilização de perfis de aço leve enformados a frio, em alternativa aos sistemas tradicionais de construção. Segundo Veljkovic e Johansson (2006), a construção em LSF não é mais do que uma evolução do sistema autoportante em madeira. O desenvolvimento da utilização das soluções em aço leve é consequência da baixa sustentabilidade do betão, causada pelas elevadas quantidades de resíduos e pelo seu baixo potencial de reciclagem (Mateus, 2004). Em oposição, 99% das estruturas de aço leve são tratadas no seu fim de ciclo de vida, onde uma esmagadora maioria é encaminhada para reciclagem (86%) e a restante é diretamente reutilizada (13%) (Lawson, 2009).

As estruturas em LSF permitem a realização de uma variada gama de obras, desde habitações familiares a edifícios, dispondo ainda de um excelente potencial para utilização em obras de reabilitação. No entanto, a construção em altura, recorrendo exclusivamente a aço leve, está geralmente limitada a 4/5 pisos devido à sismicidade do local. O desenvolvimento de soluções mistas, com recurso a caixas de escadas ou elevadores em betão, são um modo de superar essa limitação (Pires, 2013). A construção em aço leve é assim classificada como um sistema pré-fabricado de paredes/lajes e/ou módulos sustentável.

No âmbito das paredes divisórias interiores pré-fabricadas, este método construtivo assenta na produção em fábrica do esqueleto metálico, com base no uso de perfis de aço em U e em C, os quais são devidamente revestidos. Os perfis geralmente apresentam uma secção entre 80 e 150 mm e, uma

espessura da chapa compreendida entre os 0,8 e os 2 mm. A dimensão destes elementos varia em função das exigências/solicitações das paredes como, por exemplo, as possíveis cargas a que a mesma estará sujeita, e ainda a sua própria dimensão (Neves, 2011). De referir que, os valores expostos são referentes aos aços geralmente utilizados (S280GD e S320GD). No entanto, é possível a utilização de outros tipos de aço, recomendando-se que o mesmo seja de classe estrutural.

Os painéis de parede resultam da união desse elemento através de soldadura, abas de encaixe ou mais frequentemente, por aparafusamento dos diferentes perfis necessários à obtenção de um painel (algumas ligações podem ser vistas na Figura 26). O presente processo é denominado de “painelização” e é geralmente realizado numa bancada horizontal (Mateus, 2004). Tipicamente, os painéis apresentam na sua configuração mais simples uma viga em cada extremidade (superior e inferior), as quais se denominam de “canal”. Estas são ligadas a montantes com um espaçamento regular e constante entre 40 cm e os 60 cm. Na eventualidade da abertura de um vão, os montantes seccionados devem ser reforçados com a aplicação de vigas suplementares nas suas extremidades. Por último, nos casos em que os painéis assumem uma função estrutural, o projeto pode prever a adição de elementos, como perfis horizontais intermédios, dando maior estabilidade para cargas verticais. Outro método de reforço poderá passar pela adição de diagonais ou chapas de contraventamentos conferindo uma maior capacidade para dissipar a energia das ações sísmicas, como se pode analisar através da Figura 27. O dimensionamento de todos estes elementos deve estar em conformidade com o Eurocodigo 3. Todavia, a Associação Nacional de Construção Habitacional (NAHB – *Nacional Association of Home Builders*) em conjunto com o Instituto Norte-Americano do Ferro e do Aço (AISI – *American Iron and Steel Institute*) desenvolveram um “método prescritivo” com o intuito de facilitar a construção em aço leve (Pires, 2013). A painelização resulta assim numa estrutura metálica rígida, formando painéis de paredes com as dimensões mais variadas, as quais dependem essencialmente da unidade de produção, possibilidade de transporte e método construtivo (LSK, 2005).

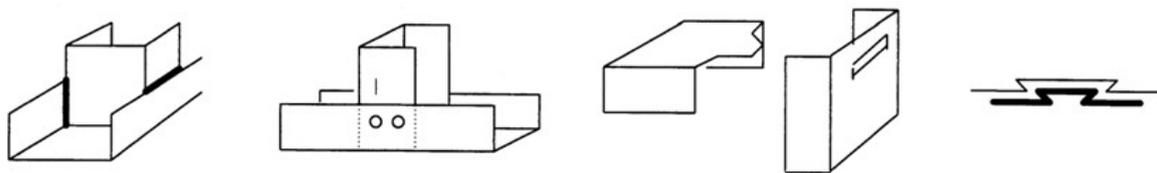


Figura 26 – Ligação tipo entre perfis de LSF (Gerlich *et al.*, 1996).

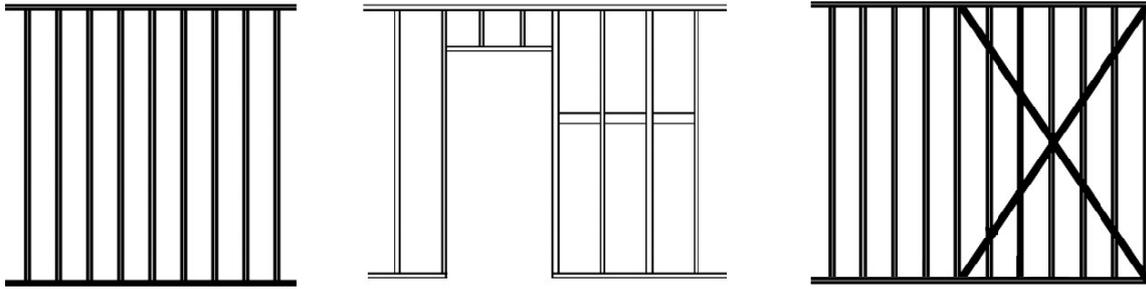


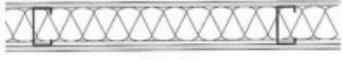
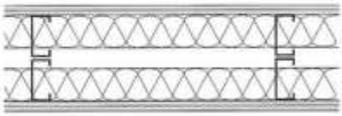
Figura 27 – Configuração tipo de painéis de parede em LSF. Adaptado de (NASFA, 2000).

Concluída a produção do esqueleto metálico, este é enviado para a obra segundo dois níveis de pré-fabricação: o esqueleto a “nu” ou o esqueleto com um revestimento parcial numa das faces. Em ambas as situações, os trabalhos de revestimento e acabamento ficam ao encargo da obra.

O revestimento pode ser feito com diversos materiais, os quais são escolhidos com base na exposição da parede e nas características técnicas e visuais pretendidas. Em paredes interiores, o material mais frequentemente utilizado são as placas de gesso cartonado, as quais são diretamente aparafusadas aos perfis (Moreira, 2012). Esse uso recorrente deve-se à sua estrutura contínua e baixa condutividade térmica, garantindo assim um ambiente confortável no interior da habitação. O gesso é ainda um material fácil de trabalhar e aplicar, sendo compatível com praticamente todo o tipo de acabamentos. Além do revestimento externo, os painéis de parede recebem um enchimento com mantas de lã de rocha no espaço entre os montantes e vigas, contribuindo para a melhoria do seu desempenho térmico e acústico (Pires, 2013).

A associação europeia de construção de estruturas de aço leve (LSK- *European Lightweight Steel-framed Construction*) identifica algumas tipologias e o seu respetivo desempenho acústico e ao fogo. A exposição de valores de referência para o desempenho térmico é feita apenas para elementos que formam a envolvente do edifício, ou seja, cobertura, paredes exteriores e lajes térreas (LSK, 2005), como se pode verificar na tabela 9.

Tabela 9 – Tipologias e características de uma parede interior em LSF. Adaptado de (LSK, 2005).

Tipologia	Espessura (mm)	Peso (kg/m²)	Isolamento Acústico	Resistência ao fogo*
Placa de Gesso – Lã de Rocha – Placa de Gesso 	75 - 125	35-45	40 - 54 dB	A1 – 30 min
2 Placas de Gesso – Lã de Rocha – 2 Placas de Gesso 	100 - 150	45-65	47 - 60 dB	A1 – 60 a 90 min
2 Placas de Gesso – Lã de Rocha – Caixa de Ar – Lã de Rocha – 2 Placas de Gesso 	175 - 275	65-80	59 - 65 dB	A1 – 90 a 120 min

(*) – A resistência ao fogo é variável em função do tipo de parede: estrutural ou não estrutural.

Como já foi referido, esta solução apresenta um grau de pré-fabricação inferior, delegando várias tarefas para serem realizadas em obra. Contrariamente a outras soluções totalmente acabadas, os painéis de paredes em LSF requerem a aplicação de isolamento e revestimento em obra e, consequentes trabalhos de acabamento. A pré-fabricação total destes painéis em fábrica é condicionada pelo modo de ligação entre painéis e a própria estrutura existente, implicando necessariamente o acesso direto aos perfis. Porém, este nível intermédio confere maior flexibilidade e facilidade no embutimento de todo o tipo de redes e outros dispositivos, tal como representado na Figura 28.

Em suma, a realização de paredes divisórias interiores com recurso a uma estrutura em aço leve e painéis de gesso é uma situação recorrente na construção e executada pela generalidade dos construtores. No entanto, a pré-fabricação deste sistema em painéis ou módulos restringe-se a um número reduzido de empresas (Moreira, 2012). Um exemplo de empresa produtora desta oferta é a Somundy-Portugal, multinacional americana especializada na tecnologia LSF e presente em todo o mundo (Somundy, 2019).

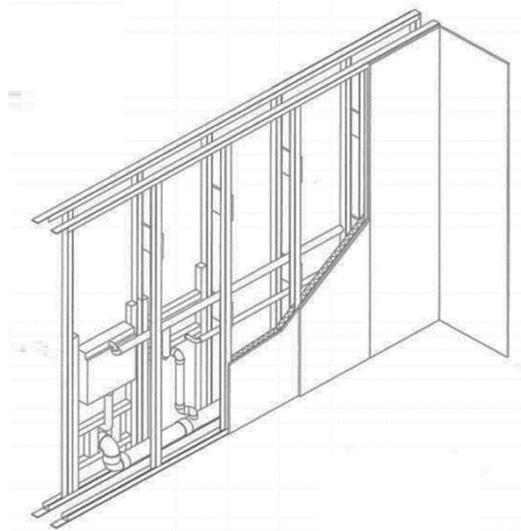


Figura 28 – Redes no interior de uma parede de LSF (LSK, 2005).

Apresentam-se algumas vantagens relevantes da utilização destes painéis como método construtivo de paredes divisórias, além das obtidas pela pré-fabricação intrínseca a todos os materiais apresentados (Mateus, 2004) (Pires, 2013).

- Peso próprio reduzido (favorável a construção em altura);
- Facilidade no transporte e elevação dos painéis (devido ao baixo peso);
- Elevado isolamento acústico e térmico;
- Construção de fácil desmantelamento, com potencial a ser reutilizado ou reciclado;
- Facilidade de adaptar a geometria presente em obra;
- Elevado potencial para reabilitação de edifícios.

Em contrapartida, os painéis LSF apresentam, como já foi referido, um menor grau de pré-fabricação comparativamente com outras soluções, uma fraca inércia térmica em climas de grande amplitude (Mateus, 2004).

As ligações nestes painéis são relativamente simples, recorrendo-se apenas ao aparafusamento dos perfis periféricos do painel à estrutura existente no local (como está representado na Figura 29). No caso da fixação dos painéis se realizar a paredes de adobe, taipa, tijolo ou alvenaria de pedra, a ligação deve ser feita com recurso a bucha química (TangentEscala, 2016). A ligação entre painéis é feita do mesmo modo que a ligação entre perfis apresentados na Figura 26, porém, a ligação mais generalizada é o aparafusamento com recurso a parafusos autoperfurantes (LSK, 2005). A North American Steel Framing Alliance (NASFA) apresenta detalhadamente a generalidade das ligações possíveis e a Figura 30 expõe algumas delas (NASFA, 2000). Contudo, em conformidade com outros elementos das estruturas em

LSF, essas devem ser devidamente dimensionadas de modo a garantir a estabilidade do painel e a correta transmissão de cargas e esforços, sendo que este processo deve ser feito em respeito pelas normas europeias.

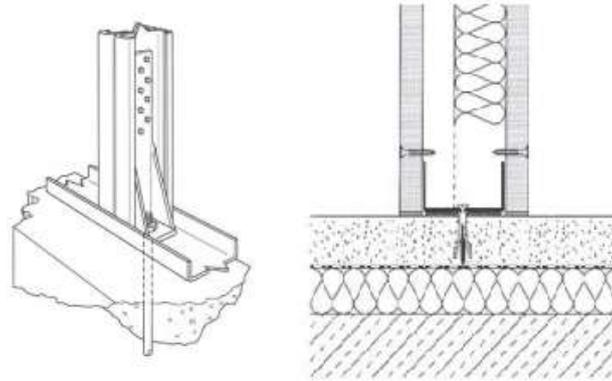


Figura 29 – Ligação de painéis LSF à estrutura (LSK, 2005).

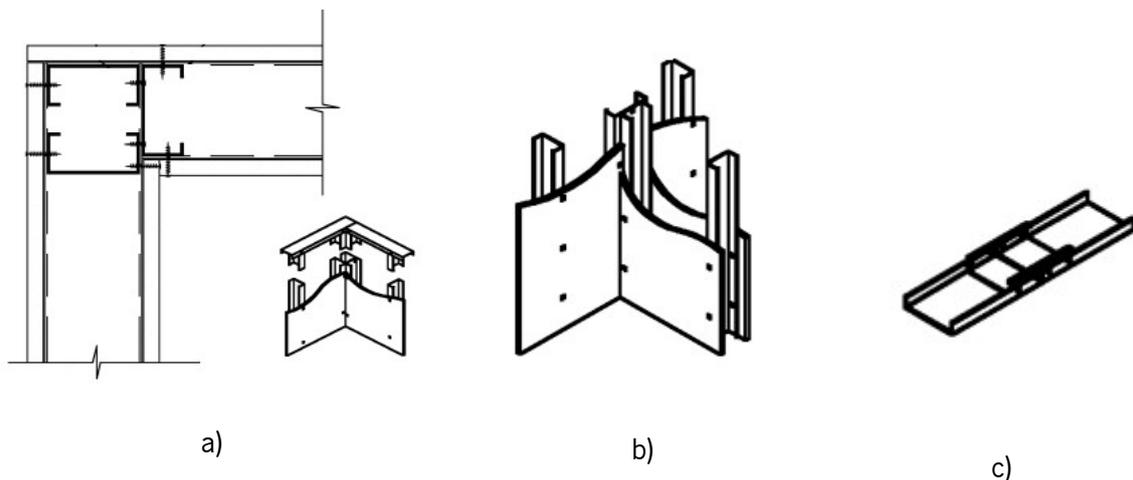


Figura 30 – Ligação entre painéis LSF: a) ligação em "L" b) Ligação em "T" c) Ligação contínua (NASFA, 2000).

2.4 Tendências

No setor da Arquitetura e Engenharia da Construção (AEC), à semelhança de outras indústrias, existe um crescente interesse numa maior consciência ambiental. Estes têm como objetivo a substituição de materiais estruturais e não estruturais menos favoráveis ao meio ambiente (Manalo, 2013). A importância do desenvolvimento de novas soluções assume maior relevância quando se regista que o setor da construção afeta largamente o meio ambiente e os seus recursos. Globalmente, estima-se que o consumo de cerca de 40% dos recursos naturais (pedra, areia, madeira e água) e 30% das emissões de dióxido de carbono sejam da responsabilidade do setor da construção (Mobili *et al.*, 2018). Posto isto,

estudos destacam que uma escolha adequada dos materiais usados na construção pode significar uma diminuição do custo energético de um edifício e consequente consciencialização ambiental (Mobili *et al.*, 2018). Autores como Thormark (2006) indicam que a escolha adequada de materiais e técnicas de construção pode significar uma redução de 17% deste custo energético. Assim, as vantagens da pré-fabricação, nomeadamente, a maior viabilidade de incorporar novos materiais tem impulsionando o estudo de novas soluções.

No âmbito da pré-fabricação de painéis de parede observam-se alguns estudos direcionados para o desenvolvimento de novos sistemas com recurso a fibra de vidro e/ou recurso a materiais naturais. Exemplo disso são o recurso a argila ou a incorporação de fibras de madeira (Noh *et al.*, 2016) (Destro *et al.*, 2015) (Astudillo *et al.*, 2018) (Wattick e Chen, 2017) (Manalo, 2013) (Mobili *et al.*, 2018). Os mesmos autores expõe a necessidade de desenvolver estudos que permitam aferir as capacidades estruturais desses novos materiais/painéis.

A avaliação estrutural é identificada como necessária para aferir as capacidades dos novos sistemas, assim como para reverter a imagem generalizada que as paredes pré-fabricadas estão aquém dos mínimos impostos pelos códigos ou de que não apresentam elevada durabilidade. Outro ponto reside na ausência de diretrizes de dimensionamento específicas, sendo dimensionadas do mesmo modo que soluções tradicionais (Manalo, 2013). Assim, verifica-se um número significativo de ensaios e divulgação de dados, afim de impor confiança aos engenheiros e fabricantes deste tipo de produtos.

Wattick e Chen (2017) destacam ainda o estudo de novos painéis de parede com capacidade estrutural com o objetivo de substituir as paredes realizadas em obra, visando ganhos no cronograma do projeto e redução dos custos associados aos trabalhos de cofragem (que podem ter um peso de 40% a 60% no custo de uma estrutura de betão).

3. SELEÇÃO DE UMA SOLUÇÃO PARTICULAR

Na sequência da abordagem aos múltiplos sistemas de paredes pré-fabricadas no Capítulo 2, foram definidos critérios para a seleção de um sistema de parede/material a ser analisado com mais detalhe neste capítulo, sendo eles:

- Utilização de materiais leves, prevendo-se a sua colocação manual e privilegiando uma redução dos custos de transporte;
- Capacidade de acomodar instalações elétricas e redes de abastecimento de água e saneamento;
- Compatibilidade com múltiplos acabamentos, de modo a não limitar a sua aplicação nos mais variados projetos;
- Bom desempenho acústico e ao fogo, viabilizando o seu uso na generalidade das edificações e localizações;
- Processo de pré-fabricação simples e com materiais de comercialmente acessíveis.

Posto isto, procedendo a uma análise das vantagens e desvantagens dos sistemas e materiais expostos, pode-se concluir que a idealização de um painel de parede com base em perfis de aço leve seria a mais viável, em virtude dos critérios referenciados. Como foi referido anteriormente, os painéis necessitam de ser revestidos, podendo esse revestimento ser realizado com diversos materiais. No presente trabalho, foi definido o uso de placas de gesso, sendo a escolha baseada no seu excelente desempenho ao fogo, boa trabalhabilidade e vastas possibilidades de revestimento ou acabamentos. Esta opção também é refletida pelo facto das paredes interiores em aço leve já registarem uma ampla aplicação em edifícios escolares, residenciais e outros tipos de edifícios públicos (Piloto *et al.*, 2017). A idealização de um painel com esses materiais contribui para uma tentativa de industrialização deste método construtivo.

3.1 Conceção de um Painel de Parede

O processo de desenvolvimento do painel proposto tem por base o conhecimento adquirido no Capítulo 2, que permitiu a elaboração de uma lista com os vários aspetos que devem ser abordados na sua conceção, dimensionamento, fabrico, transporte, colocação e utilização, de forma a obter um painel pré-fabricado que responda a um conjunto alargado de requisitos. A Tabela 0 apresenta uma sequência de etapas a considerar na conceção de um painel.

Tabela 10 – Etapas/problemas na concepção do painel. Adaptado de (Faria, 1996).

1.	Escolher os materiais
2.	Definir uma geometria no plano
3.	Definir uma tipologia com resposta as diferentes exigências (Acústica e Fogo)
4.	Apresentar uma solução para continuidade entre painéis
5.	Definir a ligação entre painel – pavimento e painel – teto
6.	Expor a integração de sistemas sanitários
7.	Definir a integração de instalações elétricas e água.
8.	Identificar limites ao grau de pré-fabricação
9.	Definir perfis montantes e respetivo dimensionamento
10.	Avaliar a necessidade de reforços transversais para esforços proporcionados pela movimentação, aplicação de sistemas e exigências a cargas excêntricas
11.	Pormenorizar situações de ligação em L, T e cruzadas

3.2 Materiais

O primeiro passo a dar na concepção do painel passa por efetuar um levantamento e uma breve descrição dos materiais a serem utilizados, permitindo assim identificar os seus diferentes derivados e respetivas aplicações recomendadas. Assim, os materiais a serem considerados são:

- Placas de gesso;
- Lã de rocha;
- Perfis metálicos;
- Parafusos.

3.2.1 Placas de Gesso

As placas de gesso, como já foi referido, são um produto cada vez mais recorrente na construção e particularmente no uso de divisórias interiores (Gyptec, 2017). O crescimento no interesse deste material pode ser justificado pela resposta à necessidade de construir rápido, com qualidade e com um custo controlado (Benouis, 1995).

O fabrico resulta da mistura de gesso com água e aditivos, formando uma pasta que através de um processo de laminação contínua é colocada entre duas folhas de cartão (este processo deve ser feito ao abrigo da norma EN 520+A1). A alteração da composição da mistura de gesso com diferentes aditivos permite obter diferentes tipos de placas, destacando-se três tipos principais:

- Placa tipo A (standard) – Usada em revestimentos internos e áreas secas;

- Placa tipo H (hidrófuga) – Possui elementos hidrofugantes na sua composição – ideal para zonas húmidas;
- Placa tipo F (antifogo) – Reforçada com fibras, melhorando o bom desempenho do gesso ao fogo, aplicada em interiores e indicada para locais que necessitam de um elevado desempenho ao fogo (saídas de emergência).

As dimensões comuns das diferentes placas serão detalhadas no ponto 3.3.3.

3.2.2 Lã de rocha

A lã de rocha é um material recorrente na construção, dado que melhora significativamente os seus desempenhos acústico, térmico e ao fogo. Estas características fazem com que este material seja utilizado em diferentes mercados (automóvel, industrial, entre outros), promovendo ganhos significativos de energia.

A produção da lã de rocha consiste na produção de fibras de escória de alto forno de basalto ou minério de ferro para fornecer maior densidade. Estes filamentos são misturados com resinas orgânicas e óleos impermeabilizantes, resultando numa massa semelhante à lã. Posteriormente, formam-se mantas ou painéis com diferentes níveis de compactação em função da rigidez pretendida. É importante referir que a lã de rocha é um material imputrescível, inodoro e não promove o desenvolvimento de organismos (Futureng, 2019).

3.2.3 Perfis metálicos

No desenvolvimento do painel pré-fabricado foi definido o uso de perfis metálicos de aço leve. Esta escolha deve-se ao facto de os mesmos aliarem ao elevado desempenho um peso reduzido (essencial para viabilidade do transporte manual do painel) e de se tratar de um material recorrente na construção de divisórias, levando à existência de múltiplas soluções para este tipo de estruturas de suporte.

Os perfis enformados resultam, na sua maioria, de um processo de enformação a frio, através de um conjunto de pares de rolos que comprimem e dobram uma secção de chapa com uma espessura que pode variar entre 0,3 mm e 6 mm. As secções mais utilizadas são em C e em U, conforme foi referido nos painéis em LSF.

A geometria e o tipo de aço usados têm de ser avaliados de modo a que sejam cumpridas todas as exigências de desempenho impostas ao painel. Relativamente ao tipo de aço, esse pode ser do tipo

estrutural ou DX51D, usado em divisórias não estruturais. Na Tabela 11 estão indicadas as dimensões e momento de inércia para montantes comuns de aço DX51D.

Tabela 11 – Dimensões e momento de inércia de perfis metálicos (AENOR, 2013).

Dimensões (Largura/Aba/Espessura) (mm)	Momento de inércia (cm⁴)
48/35/0,6	2,43
70/35/0,6	6,51
90/40/0,6	11,97
100/40/0,6	15,03
125/40/0,6	25,38
150/40/0,6	39,24

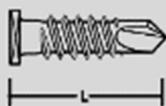
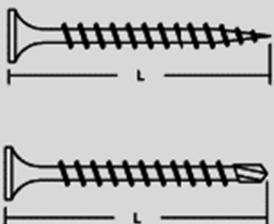
3.2.4 Parafusos

Para união dos diferentes elementos foi definido o uso de parafusos de aço galvanizado, autoperfurantes e autoroscantes, sendo este o método de fixação mais comum para estruturas de aço leve e placas de gesso (LSK, 2005). Este tipo de parafuso possui a vantagem de abrir o seu próprio orifício e não necessitar de porca.

Os parafusos podem ser divididos em função do tipo de ligação, ou seja, Perfil – Perfil ou Perfil - Placa de gesso, distinguindo-se pelo formato da cabeça e da espiga. Na Tabela 12

são expostos os parafusos mais comuns. O comprimento dos parafusos é variado – no entanto, tem de ser garantido que atravesse completamente todos os elementos a ligar com uma margem de alguns passos de rosca (Futureng, 2019).

Tabela 12 – Tipos de Parafusos. Adaptado de (AENOR, 2013).

Ligação Perfil – Perfil	
	<p>Os parafusos que permitem ligar perfis apresentam a ponta em broca e podem ser do tipo sextavada ou de cabeça rebaixada. Este último, é favorável quando a face será sujeita a revestimento. Os diâmetros destes parafusos devem ser determinados em função da espessura dos perfis a ligar e dos esforços a ser transmitidos.</p> <p>Os comprimentos (L) mais comuns são 9 mm, 9,5 mm, 13 mm, 16 mm e 25 mm.</p>
Ligação Perfil – Placa de gesso	
	<p>Destinados à ligação das placas de gesso a perfis, estes parafusos apresentam um revestimento em fosfato (visível pela sua cor preta) que reage quando está em contacto com a humidade do gesso, resultando numa fixação mais eficiente.</p> <p>O seu comprimento (L) é variável, oscilando entre os 25 mm e os 100 mm.</p>

O diâmetro dos parafusos varia entre o nº6 e nº14, sendo os diâmetros de nº6 a nº10 os mais frequentes. A Tabela13 indica a relação entre a designação numérica e o diâmetro nominal (LSK, 2005).

Tabela 13 – Relação entre número de parafuso e diâmetro nominal (LSK, 2005).

N.º de parafuso	6	7	8	10	12	14
Diâmetro nominal (mm)	3,50	3,84	4,16	4,83	5,49	6,35

3.3 Condicionantes à geometria de um painel

A escolha da geometria de um painel pré-fabricado é um ponto-chave no desenvolvimento e estudo de uma solução, uma vez que está diretamente ligada a viabilidade do mesmo, ou seja, é necessário identificar condicionantes que possam determinar dimensões mínimas e máximas.

Uma das restrições reside no processo de movimentação do local de fabrico até à posição final em obra. Esta pode assim ter origem segundo duas etapas, o transporte do painel de parede da unidade de produção até ao local da obra e, posteriormente, na sua descarga e colocação na sua posição final. O conhecimento das diferentes etapas é essencial, pois, a legislação associada ao transporte de mercadorias, bem como os meios de elevação disponíveis na obra, dão origem a limites máximos para as dimensões e peso da possível solução. A par disso, as características dos materiais usados para construção do painel (por questões como o desperdício) e/ou a compatibilização com a arquitetura do local de aplicação podem igualmente constituir condicionantes.

3.3.1 Transporte

O transporte da unidade de produção para o local de obra é tipicamente efetuado através do transporte rodoviário, que se caracteriza pela sua versatilidade e possibilidade de carregar/descarregar nos locais mais variados. No entanto, têm de ser tidas em conta possíveis limitações ao acesso à obra e a regulamentação imposta aos veículos de mercadorias (transversal a qualquer solução e obra).

O transporte rodoviário com recurso a veículos pesados encontra-se regulamentado, apresentando limites máximos para as dimensões dos elementos e peso a transportar, as quais se encontram sintetizadas na Tabela 14. A necessidade de requerer a licença especial está ao abrigo da Portaria 472/2007, sendo esta necessária quando são excedidas as dimensões da plataforma, salvo no caso de uma peça individual em que não sejam excedidas as seguintes dimensões (Santos e Silva, 2011):

- Comprimento – 1 m para a frente e/ou retaguarda, das extremidades do veículo;
- Largura – 0,30 m para cada lado da plataforma;
- Altura – 4 m do chão.

Tabela 14 – Medida e peso máximo a transportar, com e sem autorização (Santos e Silva, 2011).

Sem qualquer autorização		Máxima carga útil: 25 000 kg	
Medidas	Medidas exteriores da plataforma (mm)	Medidas máximas de peças soltas (mm)	Medidas máximas das peças individuais (mm)
Comprimento	13 600	13 600	15 600
Largura	2 500	2 500	3 100
Altura	1 500	2 500	2 500
Com autorização especial		Máxima carga útil (kg): 40 000	
Medidas	Medidas exteriores da plataforma (mm)	/	Medidas máximas das peças individuais (mm)
Comprimento	13 600		20 150
Largura	2 500		4 000
Altura	1 500		4 600

3.3.2 Movimentação

À semelhança do transporte, a movimentação dos painéis de parede em obra é uma etapa importante que deve ser tida em consideração no processo de desenvolvimento de uma solução. Os trabalhos de descarga, elevação para pisos superiores, bem como o posicionamento dos painéis na sua posição final, são diferentes tarefas que podem ser englobadas no processo de movimentação e consequente montagem dos painéis. Assim, estes podem ser mais ou menos condicionantes em função dos meios

disponíveis para a sua execução. Estas tarefas podem ser realizadas de duas formas, movimentação por meio de elevação mecânica ou manual, sendo que o fator determinante é o peso do painel.

Elevação Mecânica

Existem diferentes meios de elevação mecânica, devendo a sua escolha ser sujeita a uma avaliação criteriosa, pois, estes equipamentos estão inevitavelmente associados a custos proporcionais às suas capacidades. A seleção do(s) meio(s) deve ser assim a mais económica possível. Porém, deve ser acautelada suficiente capacidade de elevação e acessibilidade a toda a obra. Os meios de elevação mais recorrentes são os multifunções ou guas (Santos e Silva, 2011). Estes dois equipamentos são duas abordagens diferentes, pois, as suas capacidades de carga e alcance máximos são bastantes distintas, conforme se pode evidenciar na Figura 31 e na Figura 32, e pela mobilidade que o multifunções possui. Contudo, ambas as soluções impõem limites máximos na ordem das várias centenas de quilos, o que no caso de uma parede leve pré-fabricada apenas será limitador na elevação de um conjunto de paredes. É de notar que as características e capacidade de cada equipamento variam em função do modelo e fabricantes, ou seja, os valores indicados são meramente indicativos.

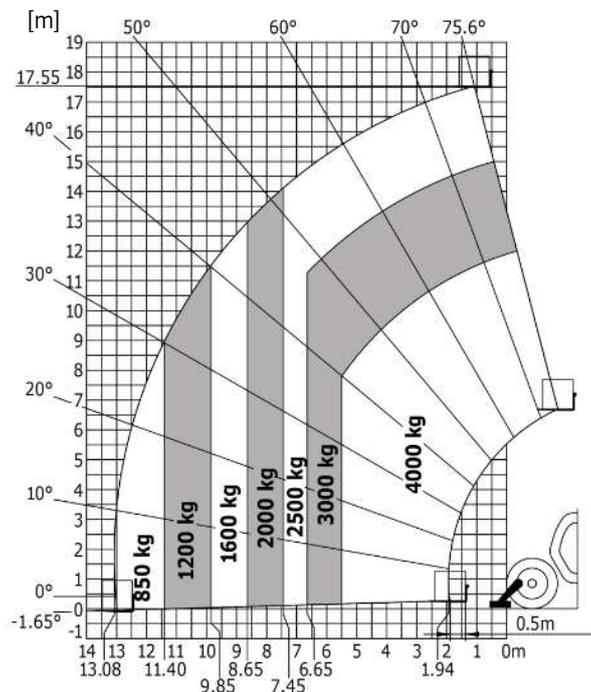


Figura 31 – Capacidade máxima de carga de um multifunções (Manitou, 2019).

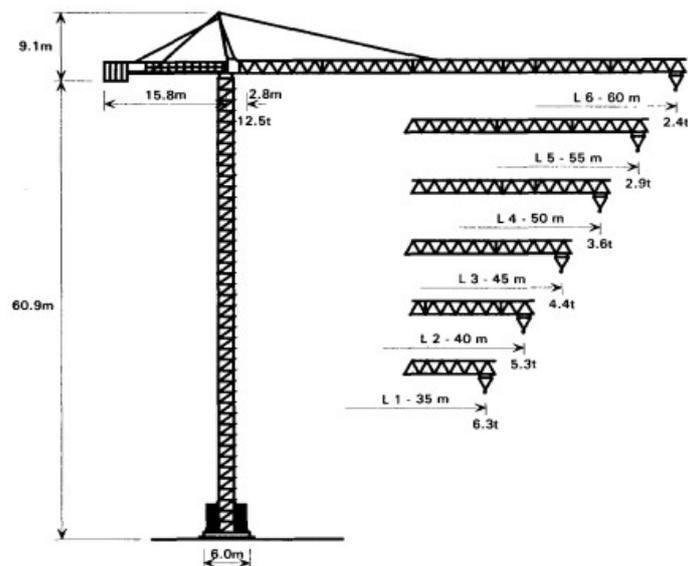


Figura 32 – Capacidade máxima de carga de uma grua (Brown *et al.*, 1997).

Elevação Manual

A elevação/movimentação manual de cargas é uma atividade regulamentada pela Diretiva 90/269/CEE de 29 de maio, onde se estipulam mínimos de segurança e de saúde, transportada ao nível nacional para Decreto-Lei n.º 330/93 de 25 de setembro. Este enquadramento legal surge em resposta ao risco e possíveis danos causadas por esta atividade. Assim, e de modo a que seja possível o posicionamento de um painel de parede por duas pessoas, é necessário determinar um peso máximo que permita precaver a ocorrência de lesões. Deste modo, é recomendado que uma pessoa não movimente cargas com peso superior a 25 kg – no entanto, trabalhadores devidamente treinados e em situações esporádicas esse limite passa a 40 kg. No âmbito da movimentação por duas pessoas, o elemento deve apresentar um peso máximo de dois terços do somatório da capacidade individual (40 + 40 kg) de cada trabalhador, ou seja, 53 kg (Fundación Confemetal, 2010).

3.3.3 Características dos materiais

Considerando o desenvolvimento de uma solução de painel em LSF, é essencial o conhecimento das geometrias dos principais constituintes. De outra forma, isso seria sinónimo de desperdícios e custos extraordinários, contraditório com os benefícios da pré-fabricação referidos anteriormente. Como já foi exposto, um painel em LSF resulta da assemblagem de diversos elementos que têm de ser adquiridos individualmente. Ou seja, um desperdício mínimo só é possível se forem respeitadas as dimensões do

mercado. Além das dimensões, é necessário fazer um levantamento da massa volúmica de cada componente para ser possível, posteriormente, uma estimativa do peso total do painel. No seguimento destas possíveis condicionantes, a Tabela15 apresenta um levantamento das características dos principais elementos, tendo por base empresas produtoras como a Knauf, Pladur, Gyptec e Termolam.

Tabela 15 – Características geométricas dos materiais do painel. Adaptado de (Knauf, 2019)(Pladur, 2018)(Gyptec, 2017)(Termolam, 2016).

Materiais	Características			
	Largura (mm)	Altura (mm)	Espessura (mm)	Peso (kg/m ²)
Placas de Gesso Normal (N)	1200	2500/2600/2700/2800/3000/3200	12,5	8,7
		2500/2600/2700/2800/3000	15	10,6
		2500/2600/2800/3000	18	13,8
Placas de Gesso Hidrófuga (H)	1200	2500/2600/2800/3000	12,5	8,6
			18	16,0
		2500/2600/2700/2800/3000	15	11,5
Placas de Gesso Antifogo (F)	1200	2500/2600/2800/3000	12,5	10,3
			15	12,4
Lã de Rocha	600 / 400	1200/1350	40 a 100	1,2 a 6

A Tabela15 não apresenta características relativamente aos perfis metálicos, pois, estes perfis são tipicamente vendidos com comprimentos variados até 12 m e apresentam uma ampla gama de secções, não impondo qualquer entrave a uma possível geometria. No entanto, o peso do conjunto de perfis constituintes de um painel é um fator a ter em conta, uma vez que, por exemplo, um perfil em C com uma secção de 48 mm por 36 mm e uma espessura de 0,6 mm tem um peso de aproximado de 0,56 kg/m, ou seja, um painel com 3 montantes espaçados de 600 mm e duas vigas afastadas de 2800 mm (estrutura mais simples), perfazem um peso total de 5 kg, sendo praticamente 10% da carga total a ser movida por duas pessoas.

3.3.4 Arquitetura

Em todo o processo criativo, a solução desenvolvida, bem como a geometria dos espaços, está dependente das escolhas da arquitetura. Atualmente, a evolução tecnológica permite o desenvolvimento de geometrias e volumes complexos, conferindo maior liberdade nas escolhas (Brandão e Sousa, 2013). Porém, o arquiteto deve ter em conta algumas limitações como questões económicas e, principalmente, legislativas presentes no Regulamento Geral das Edificações Urbanas, atualizado pelo decreto-lei nº 38382. O presente diploma impõe, por exemplo, que sejam respeitadas áreas mínimas para cozinhas

ou limites entre a relação comprimento e largura de determinados compartimentos. Uma característica relevante abordada neste diploma é questão do pé-direito, sendo de 2,80 m para edificações correntes (podendo ser reduzido para 2,60 m em edificações isoladas ou em pequenos grupos, com o máximo de três pisos habitáveis) e de 3 m para estabelecimentos comerciais ou industriais, de acordo com decreto – lei nº 38382. Na Figura 33 é possível verificar o cumprimento dessa altura mínima no projeto de uma unidade hoteleira. De referir, que outros projetos podem expor valores distintos.

A altura de um painel de parede pode assim, de algum modo, ser enquadrada pela legislação apresentada (alturas mínimas), o mesmo não acontece relativamente ao comprimento da parede. Pesquisas homólogas foram realizadas no projeto casa MIMA onde se identifica a mesma ausência de regras e sistematização “projetual” e construtiva. Neste contexto, a solução encontrada pelos autores do projeto para definir o comprimento do painel passou pelo desenvolvimento de uma malha de 1,5 m por 1,5 m, unidade base que justificam ser a mais eficaz na produção de espaços com dimensões coerentes, como se pode analisar na Figura 34 (Brandão e Sousa, 2013).

Em suma, uma maior adaptabilidade de uma solução de painel pré-fabricado passará sempre por um diálogo com a arquitetura, de modo a que o projeto respeite uma métrica compatível com a dos painéis.

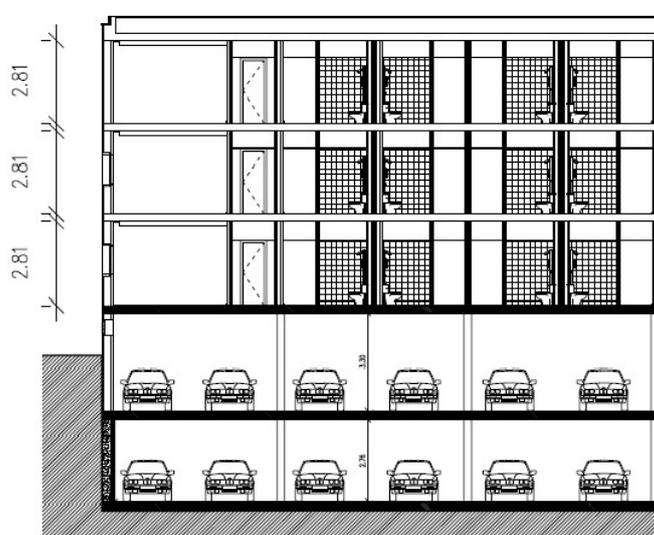


Figura 33 – Quarto de hotel com um pé-direito mínimo.

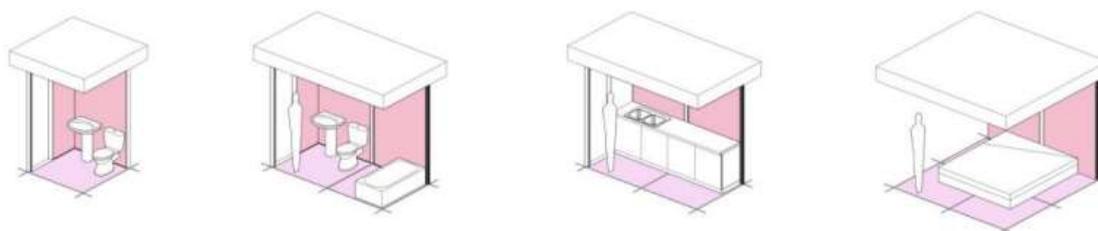


Figura 34 – Criação de divisões com base numa malha de 1,5 m por 1,5 m (Brandão e Sousa, 2013).

3.3.5 Síntese das condicionantes geométricas

Após uma análise das várias condicionantes expostas, o desafio passa pela sua conciliação. Assim, a Tabela 16 expõe os pontos-chave de cada uma destas condicionantes, e respetivo critério de escolha.

Tabela 16 – Síntese de restrições geométricas.

Condicionante	Restrição Geométrica	Critério
Transporte	Uma das dimensões (comprimento ou altura) do painel não deve ultrapassar 2,5 m.	O transporte não deve requer autorizações especiais, sendo assim mais económico e simplificado.
Movimentação	O peso do painel, preferencialmente, deve ser inferior a 53 kg (valor limite de carga para ser movimentado por duas pessoas), quando ultrapassado deve ser acautelado um auxílio mecânico.	Um sistema leve permite um posicionamento do painel facilitado.
Materiais	O painel deve ter um comprimento múltiplo de 1200 mm (dimensão padrão das placas de gesso) e um afastamento dos montantes da estrutura em LSF múltiplo de 600 mm (dimensão da lã de rocha).	Deve ser respeitada a métrica dos materiais afim de ser minimizados desperdícios.
Arquitetura	Uma altura mínima de 2800 mm e uma largura que permita uma sistematização “projetual”, à semelhança o valor exposto de 1,5 m.	O pé-direito deve ser vencido com uma única peça e ter uma largura próxima ou igual a projetos onde foi amplamente estudada uma unidade base que permita a repetição e adaptação a diferentes volumes.

Posto isto, a primeira abordagem seria o desenvolvimento de uma solução com dimensões de 2800 mm por 1200 mm. Desta forma, seria minimizado o desperdício de materiais e eliminados os trabalhos de recorte de placas de gesso, sendo a solução compatível com a largura de dois painéis de lã de rocha. Por analogia, estas dimensões seriam comparáveis ao valor referenciado de 1,5 m da casa MIMA, favorável à sistematização. Porém, apesar destes valores serem próximos não é possível afirmar que

partilham das mesmas vantagens e aplicabilidade. Assim, a Figura 35 expõe um modelo base deste conceito.

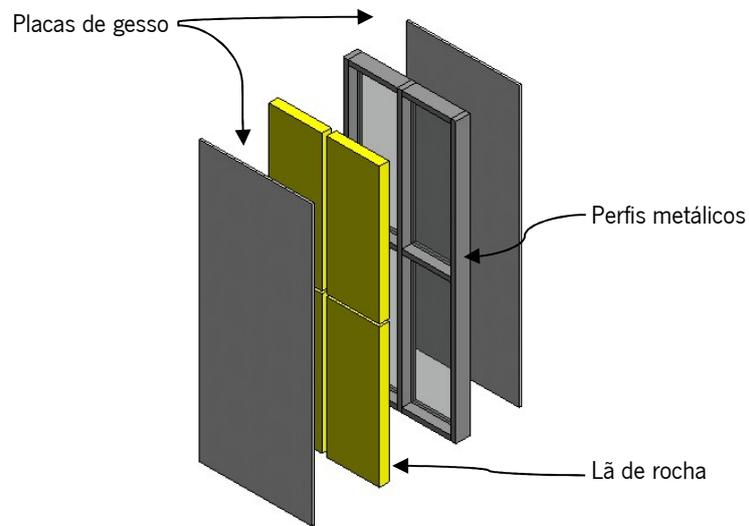


Figura 35 – Configuração básica de um painel (2800 × 1200 mm²).

Após a análise, verifica-se que uma geometria de 2800 por 1200 mm, numa configuração básica (conforme exposto na Figura 35) apresenta facilmente um peso superior a 70 Kg, ultrapassando o peso máximo de 53 kg imposto pela movimentação manual. As presentes dimensões limitariam a aplicabilidade em obra, o que levou à definição de um painel com 2800 × 600 mm², sendo este o melhor compromisso entre a globalidade das restrições. Na Figura 36 e na Figura 37, apresenta-se um modelo atualizado do painel e uma possível situação de transporte do mesmo, verificando-se assim viabilidade desse ponto. Com a atualização das dimensões do painel, este assume agora um peso estimado de 39 kg.

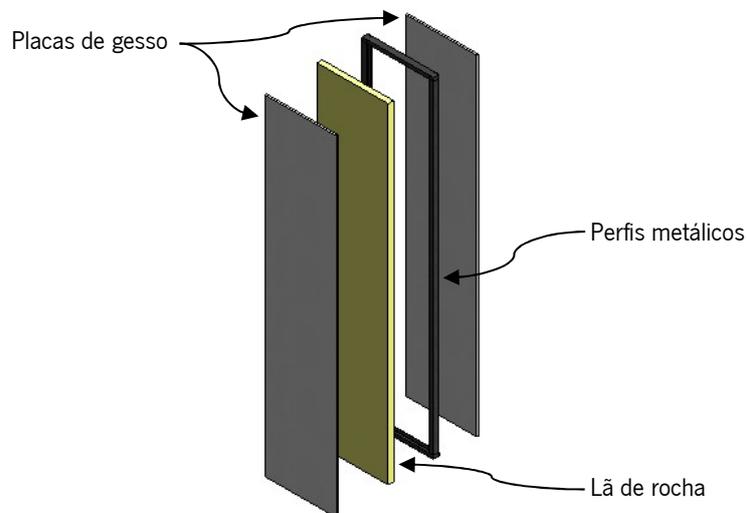


Figura 36 – Configuração básica de um painel (2800 × 600 mm²).

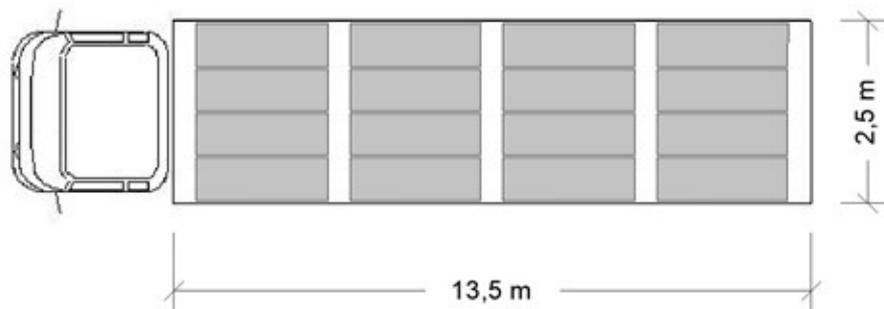


Figura 37 – Possível arranjo dos painéis para serem transportados.

3.3.6 Condicionantes à Composição/Tipologia do Painel

Uma parede interior é essencialmente um elemento arquitetónico usado para dividir espaços. No entanto, conforme foi exposto no Capítulo 2, esta deve garantir exigências mínimas (ver Tabela 2). Analisando este elemento, torna-se possível destacar duas exigências condicionantes à composição transversal da parede que têm influência na tipologia e na espessura da parede:

- O desempenho acústico;
- O desempenho ao fogo.

Esta escolha também teve por base o facto de serem sujeitas a mínimos regulamentares expostos na legislação nacional. A par disto, a literatura referente às soluções de paredes interiores expõe continuamente estas duas exigências.

3.3.7 Condicionantes Impostas pelo Desempenho Acústico

Os elementos interiores de edifícios devem contribuir para a absorção e redução dos níveis sonoros medidos. O desempenho exigido a determinado elemento varia em função do tipo de uso e de ocupação dos edifícios. Assim, os níveis sonoros aceitáveis são muito mais elevados em locais com uso comercial do que em habitações ou hospitais (Schulitz *et al.*, 2003).

Em Portugal, e por influência das diretivas e normas europeias, foram promulgados diplomas legais: o regulamento geral de ruído (RGR) e o regulamento dos requisitos acústicos de edifícios (RRAE). Estes documentos são direcionados para a prevenção e controlo do ruído e conforto acústico no interior de edifícios. No âmbito da presente dissertação, a atenção recai no RRAE, documento que regulamenta o

conforto acústico no âmbito da construção, com o intuito de melhorar a qualidade do ambiente acústico e bem-estar das pessoas.

O RREA é aplicado nas seguintes situações, apresentando mínimos adaptados a cada tipo de uso, de acordo com Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de junho:

- Edifícios habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras;
- Edifícios comerciais e de serviços;
- Edifícios escolares e similares, e de investigação;
- Edifícios hospitalares e similares;
- Recintos desportivos;
- Estações de transportes e similares;
- Auditórios e salas.

Em virtude da regulamentação existente, e de modo a que os limites decretados para determinado espaço sejam respeitados, é fundamental que as paredes apresentem um isolamento acústico. No entanto, é importante referir que avaliação do campo sonoro que se estabelece num espaço é um processo complexo. A geometria do local, a diversidade e heterogeneidade dos elementos que constitui o espaço e as características da fonte sonora são uma série de variáveis condicionantes nessa avaliação. Contudo, no âmbito das paredes interiores o foco de interesse incide na transmissão sonora entre dois espaços adjacentes (Mateus, 2008). A avaliação do isolamento entre dois espaços é igualmente complexa, consequência dos diferentes modos de transmissão, podendo ser esses de forma direta ou marginal, conforme indicado na Figura 38. A influência dos diferentes modos é controlada pela massa, isolamento e selagem das ligações dos elementos de separação.

A transmissão sonora direta está ligada às propriedades da parede, permitindo realizar uma estimativa do valor de isolamento da parede e do isolamento entre os compartimentos, sendo que na maioria dos casos este é o único modo de transmissão. Relativamente à transmissão sonora marginal, a sua estimativa é mais complexa, uma vez que está dependente do detalhe das junções entre os elementos do edifício e da qualidade de construção no local (Way e Couchman, 2008).

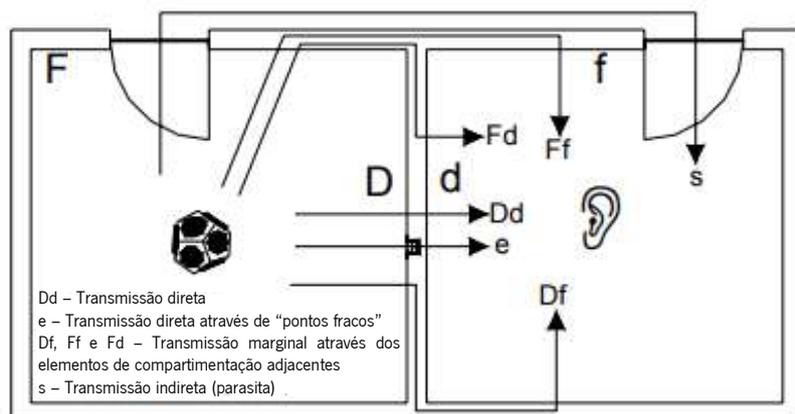


Figura 38 – Modos de transmissão possíveis entre duas salas adjacentes (Mateus, 2008).

Posto isto, a previsão do isolamento global entre dois compartimentos deve ser realizada com base nas normas expostas anteriormente como, a norma EN 12354, onde são expostas equações para esse fim ou em software que use processos análogos (Mateus, 2008). Estas estimativas, à semelhança dos valores expostos no Capítulo 2, resultam num índice de redução sonora ponderada da parede (R_w). No entanto, a legislação portuguesa para elementos de compartimentação interiores em edifícios apresenta como limite o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado ($D_{nT,W}$). A Tabela 17 indica alguns destes limites, sendo necessário relacionar o valor obtido em situação de projeto com os valores do índice utilizado na legislação. A primeira etapa passa pela determinação do índice de redução sonora ponderado aparente (R'_w), o qual permite contabilizar a influência das transmissões marginais, podendo este ser obtido pela equação (1) (Almeida e Silva, s.d.).

$$R'_w = R_w - \Delta TM \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

ΔTM – Fator de correção relativo à influência da transmissão marginal

O fator corretivo pode, de forma simplificada, assumir os seguintes valores, quando os elementos adjacentes apresentam soluções construtivas da mesma natureza (Almeida e Silva s.d.):

- $\Delta TM = 0$, se a massa superficial do elemento de separação é muito inferior à dos elementos adjacentes.
- $\Delta TM = 3$, se a massa superficial do elemento de separação é semelhante à dos elementos adjacentes.
- $\Delta TM = 3$ a 10, se massa superficial do elemento de separação é muito superior à dos elementos adjacentes.

Posto isto, através de equação (2) é possível relacionar redução sonora aparente e isolamento sonoro a sons de condução aérea:

$$D_{nT,W} = R'_W + 10 \log \left(\frac{0,16*V}{T_0*S} \right) \geq 50 \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

V – Volume do compartimento recetor (m^3)

T_0 – Tempo de reverberação de referência (s), que em edifícios residenciais e situações similares assume o valor de 0,5 s

S – Área da parede (m^2)

Tabela 17 – Limite mínimo regulamentar de isolamento acústico aplicável a uma divisória interior (de acordo com o decreto-lei 96/2008 de 9 de junho).

Edifícios habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras (cada quarto equivale a um fogo)		Limite (dB)
Locais emissores	Locais recetores	
Compartimentos de um fogo	Quartos ou zonas de estar de outro fogo	$D_{nT,W} \geq 50$
Circulação comum do edifício	Quartos ou zonas de estar dos fogos	$D_{nT,W} \geq 48$
Circulação vertical, quando o edifício seja servido por ascensores		$D_{nT,W} \geq 40$
Garagem de estacionamento automóvel		$D_{nT,W} \geq 50$
Locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão		$D_{nT,W} \geq 58$
Edifícios escolares e similares, e de investigação	Consultar Quadro II do Decreto-Lei 96/2008	
Edifícios hospitalares e similares	Consultar Quadro V do Decreto-Lei 96/2008	

3.3.8 Condicionantes Impostas pelo Comportamento ao Fogo

O comportamento ao fogo, à semelhança da acústica, é uma condicionante regulamentada. Desta forma, são exigidos mínimos de desempenho aos elementos constituintes de um edifício. Ao nível nacional, estes requisitos encontram-se no Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (RT - SCIE), sendo relevante para esta dissertação os artigos de 20 a 25. Estes artigos indicam tempos mínimos de resistência (R), estanquidade às chamas e gases quentes (E) e Isolamento térmico (I), que uma parede interior deve possuir. O Regulamento refere ainda uma classificação mínima para a reação ao fogo dos materiais usados. Estas diferentes exigências são variáveis e atribuídas em função do local

de risco e, conseqüentemente, o tipo de uso que estão organizados em 6 categorias de 'A' a 'F'. Assim, a Tabela 18 apresenta os principais requisitos mínimos em função do local de risco.

A classificação de todos locais é feita ao abrigo do Regime Jurídico de SCIE, estando indicados na Tabela 18 os respetivos critérios para essa atribuição. A Autoridade Nacional de Proteção Civil apresenta uma listagem dos locais para cada tipo de classificação, devendo ser consultada a nota técnica nº 5 (ANPC, 2013).

Tabela 18 – Desempenho mínimo de uma parede interior ao fogo (de acordo com Decreto-Lei n.º 1532/2008 de 29 de dezembro).
Adaptado de (ANPC, 2013).

Local de risco	Características do local	Resistência ao fogo	
		Parede Resistente	Parede Não Resistente
A	Verifica-se simultaneamente as seguintes condições: O efetivo total não exceda 100 pessoas; O efetivo de público não exceda 50 pessoas; Mais de 90% dos ocupantes não se encontrem limitados na mobilidade ou nas capacidades de perceção e reação a um alarme; As atividades nele exercido ou os produtos, materiais e equipamentos que contém não envolvam riscos agravados de incêndio.	/	/
B	Um efetivo total superior a 100 pessoas ou um efetivo de público superior a 50 pessoas, no qual se verifiquem simultaneamente as seguintes condições: Mais de 90% dos ocupantes não se encontrem limitados na mobilidade ou nas capacidades de perceção e reação a um alarme; As atividades nele exercido ou os produtos, materiais e equipamentos que contém não envolvam riscos agravados de incêndio.	REI 30	EI 30
C	Local que apresenta riscos agravados de eclosão e de desenvolvimento de incêndio.	REI 60	EI 60
C agravado		REI 90	EI 90
D	Local de um estabelecimento com permanência de pessoas acamadas ou destinado a receber crianças com idade não superior a seis anos ou pessoas limitadas.	REI 60	EI 60
E	Local de um estabelecimento destinado a dormida, em que as pessoas não apresentem as limitações indicadas nos locais de risco D.	REI 30	EI 30
F	Local que possua meios e sistemas essenciais à continuidade de atividades sociais relevantes.	REI 90	EI 90

3.3.9 Tipologia do Painel

Um painel em LSF é na sua configuração mais simples constituído por uma estrutura metálica revestida com uma placa de gesso de 12,5 mm por face. No entanto, esta tipologia revela-se insuficiente para cumprir as exigências expostas anteriormente para a generalidade dos casos, uma vez que segundo os autores Lawson e Way (2008) e Way e Couchman (2008) esta espessura de gesso apresenta um desempenho ao fogo de EI 30 e acústico de 33 dB. Posto isto, é necessário aferir as possíveis melhorias a esta tipologia inicial, de forma a que possa abarcar o maior número possível de usos. A Tabela 17 e a Tabela 18, evidenciam os diferentes mínimos de desempenho. Após a análise destes elementos, é possível referir que, salvo casos pontuais, os requisitos mínimos mais abrangentes são um desempenho ao fogo de EI 60 e um isolamento acústico de 50 dB (segundo o índice DnT,w).

O melhoramento do desempenho da parede passa essencialmente pela adição de camadas adicionais de material à configuração mais simples, ou seja, a incorporação de material isolante e/ou pelo aumento da espessura e/ou número das placas de gesso utilizadas. Uma outra solução passa pela duplicação das paredes criando uma caixa de ar no seu meio, à semelhança do esquema apresentado na Figura 39.

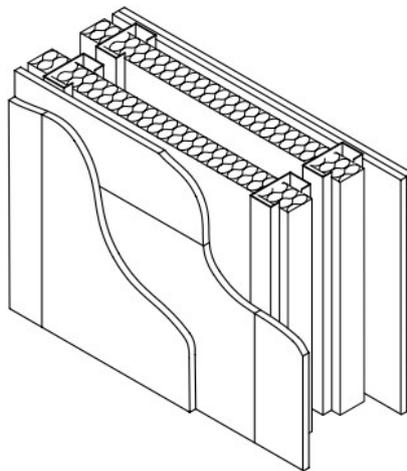


Figura 39 – Parede dupla em aço leve (Way e Couchman, 2008).

O fogo é um problema recorrente para elementos construtivos em aço, principalmente nos de aço leve, devido à baixa espessura da chapa utilizada. Apesar de o aço ser incombustível, as suas propriedades mecânicas degradam-se significativamente com a temperatura, como é possível observar na Tabela 19119 (Lawson e Way, 2012). Esta suscetibilidade do aço levou a que fossem realizados ensaios para determinar qual a influência do espaçamento dos montantes no desempenho global de uma parede. Os

autores Piloto *et al.*, (2017) concluíram que o desempenho ao fogo de uma parede não resistente é fundamentalmente condicionado pela espessura e número de placas de gesso utilizadas, sendo residual a influência do aço. À semelhança dos estudos para o aço, foram realizados outros ensaios para determinar qual a influência do uso de material isolante em paredes de aço leve, uma vez que é recorrente a necessidade de usar esse tipo material para cumprimento de desempenhos acústicos e/ou térmicos (Keerthan e Mahendran, 2012). Em paredes não resistentes, o uso de lã de rocha proporcionaria melhorias, podendo essas chegar a um aumento de 54% comparativamente às paredes sem isolamento (Keerthan e Mahendran, 2012).

A Tabela 20 expõe algumas espessuras e número de placas necessárias para que um painel de parede tenha um desempenho de EI 60 ou superior.

Tabela 191 – Propriedades mecânicas do aço ao fogo (Lawson e Way, 2012).

Temperatura (°C)	200	300	400	500	600	700
Fator de redução da tensão de cedência	0,89	0,78	0,65	0,53	0,30	0,13
Fator de redução do módulo de elasticidade	0,90	0,80	0,70	0,60	0,31	0,13

Tabela 20 – Exemplos de espessuras mínimas de placas de gesso para EI 60 ou superior (Gyptec, 2017).

Desempenho ao Fogo	Número de placas e espessura por face
EI 60	1 × 15 mm (com isolamento)
	2 × 12,5 mm
EI 90	2 × 15 mm
EI 120	2 × 12,5 mm (Antifogo e com isolamento)
	2 × 15 mm (Antifogo)

Tal como o fogo, o desempenho acústico de uma parede em aço leve é influenciado pelo número de camadas de material utilizadas. A alternância de materiais de diferentes densidades e elevado grau de amortecimento são ideais para a obtenção de elevados níveis de isolamento. Assim, o elevado desempenho de uma divisória em aço leve passa pelo respeito das seguintes recomendações (Gorgolewski e Couchman, 2003):

- Uso de várias placas de gesso, formando camadas e aumentando a massa da divisória;
- Uso de lã de rocha, conferindo benefícios devido ao elevado amortecimento acústico e diminuição do efeito de ressonâncias acústicas nas placas de gesso;

- Afastamento das diferentes camadas de material, criando caixas de ar;
- Dissociação da estrutura, recorrendo ao uso de barras resilientes, mantas resilientes ou através da duplicação das paredes (ver Figura 39).

Na Figura é possível verificar a influência das medidas expostas no isolamento acústico. De referir que a duplicação da massa por si só provoca um incremento de apenas 5 dB, pelo que para desempenhos superiores é recomendável a duplicação da parede (Way e Couchman, 2008). A realização de duas partes independentes permite minimizar a transferência de vibrações através da estrutura, duplicando os níveis de isolamento. No entanto, os espaçamentos devem ser controlados, sendo recomendado um afastamento de pelo menos 25 mm. A Figura 410 expõe a influência do afastamento no desempenho acústico da solução.

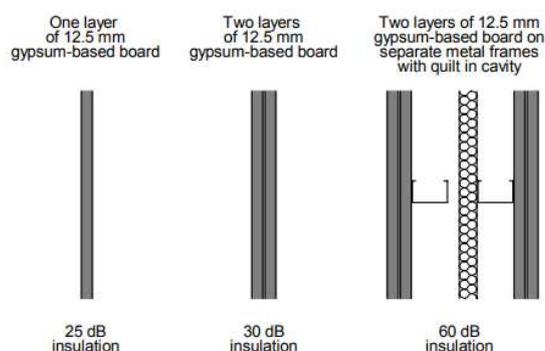


Figura 40 – Influência das diferentes camadas no desempenho acústico (Way e Couchman, 2008).

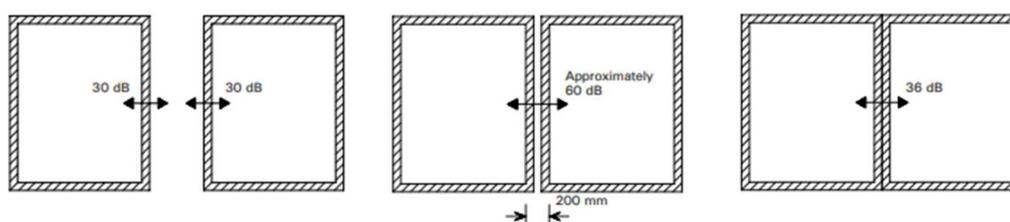


Figura 410 – Influencia do espaçamento das paredes no desempenho acústico (Gorgolewski e Couchman, 2003).

Apesar do estudo destas diferentes medidas e das previsões do índice de isolamento R_w para cada uma das diferentes tipologias, não é possível determinar um índice R_w que cumpra as imposições regulamentares sem o conhecimento do volume do espaço e da área da parede (ver equação 2). Posto isto, contrariamente ao fogo, em que existe uma tipologia única (painel com uma placa de gesso de 15 mm ou duas de 12,5 mm) que permite responder à generalidade das situações, o mesmo não é possível com o desempenho acústico (salvo situações de sobredimensionamento).

Na sequência das diferentes condicionantes expostas, quer ao nível da geometria, quer da tipologia, é possível concluir que o painel de parede a desenvolver poderá assumir 3 tipologias diferentes. A Tabela 21 demonstra as possíveis tipologias a implementar. Por sua vez, estas podem subdividir-se em função do tipo de placa ou da espessura de lã de rocha utilizada.

Tabela 21 – Tipologias propostas. Adaptado de (LSK, 2005).

Tipologia	
1	Placa de Gesso – Lã de Rocha – Placa de Gesso
2	2 Placa de Gesso – com ou sem Lã de Rocha – 2 Placa de Gesso
3	2 Placa de Gesso – Lã de Rocha – Caixa de Ar – Lã de Rocha – 2 Placa de Gesso

3.4 Descrição dos Painéis

No desenvolvimento dos pontos abordados anteriormente foram definidas dimensões e tipologias que o painel deveria adotar. No entanto, devido às restrições de peso para a tipologia 2 e à desconexão dos painéis na tipologia 3, estas duas configurações tiveram de ser simplificadas para um painel revestido apenas numa das faces, à semelhança de um dos painéis constituintes da tipologia 3. No caso da tipologia 2 uma das faces terá inevitavelmente de ser revestida em obra. Assim, resultam duas configurações de painel, expostas na Figura . Estas soluções visam permitir o desenvolvimento de parede variadas através do recurso a múltiplos painéis.

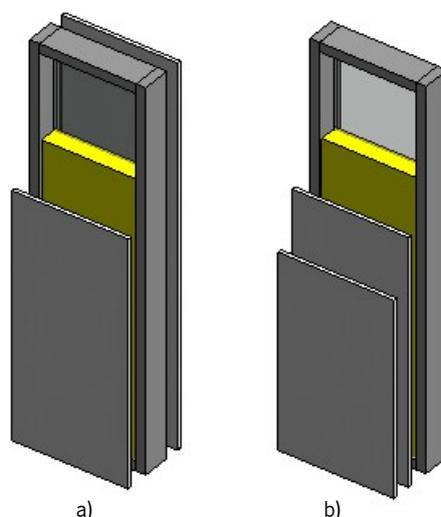


Figura 42 – Vista explodidas dos painéis finais: a) Tipo 1; Tipo 2.

Numa primeira fase, para a avaliação de desempenho das diferentes configurações, foram definidos os seguintes pontos:

- Uso de placas do tipo standard de 15 mm no painel esquerdo e de 12,5 mm no painel direito;
- Uso de perfis com uma espessura de 48 mm (valor mínimo existente no mercado);
- Uso de lã de rocha em ambos os painéis, com uma espessura de 50 mm e densidade de 30 kg/m³.

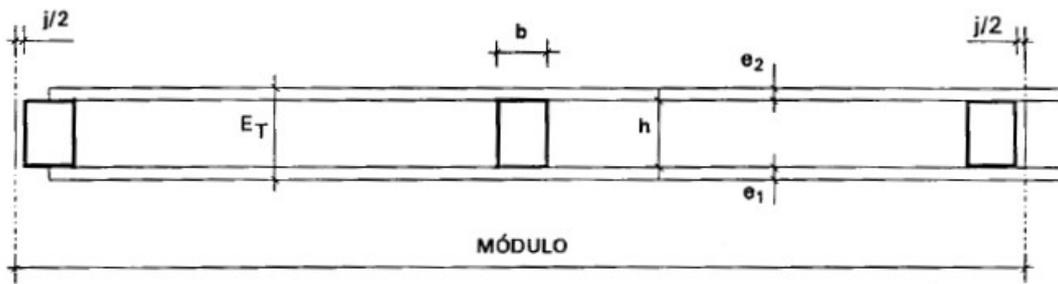
As dimensões indicadas e o tipo de placa podem ser alterados em função da avaliação de desempenho dos painéis.

3.5 Ligação entre Painéis

No seguimento das duas tipologias de painéis expostas e dado o facto do painel proposto ser revestido de placas de gesso, é necessário proceder ao levantamento de algumas regras e boas práticas no processo de montagem deste tipo de elementos. Estas podem ser encontradas em manuais de aplicações disponibilizados pelos próprios fabricantes (exemplo: Pladur ou Gyptec) ou na norma UNE 102043. Após análise retém-se os seguintes pontos:

- As juntas verticais entre placas deverão coincidir sempre com um perfil montante;
- As juntas das placas devem ficar desfasadas;
- O centro do parafuso deve estar afastado de pelo menos 10 mm da margem em ligações verticais e 15 mm para as horizontais.

A aplicação de todos estes pontos é incompatível com a ideia de um painel pré-fabricado, consequências da descontinuidade dos mesmos. Contudo, à semelhança de outras soluções pré-fabricadas, propõe-se que a continuidade das placas e dos painéis passe por uma aproximação a um sistema de encaixe macho – fêmea, ou, mais concretamente, de forma idêntica à exposta no sistema MADLEVE, como se pode ver na Figura . Não obstante, é de referir que se deve realizar um estudo detalhado desta proposta averiguando, por exemplo, a necessidade do uso de juntas resilientes entre montantes (conforme exposto no sistema MADLEVE).



Legenda:

b, h – Dimensões dos montantes de pinho

e_1 e e_2 – Espessura das placas de revestimento

j – Espessura da junta entre painéis

E_T – Espessura total do painel

Figura 43 – Corte Esquemático de um painel MADLEVE (Faria, 1996).

Adaptando a ideia exposta às tipologias obtidas e referenciadas na Figura , são propostas as soluções da Figura , representadas na forma de corte esquemático dos painéis.

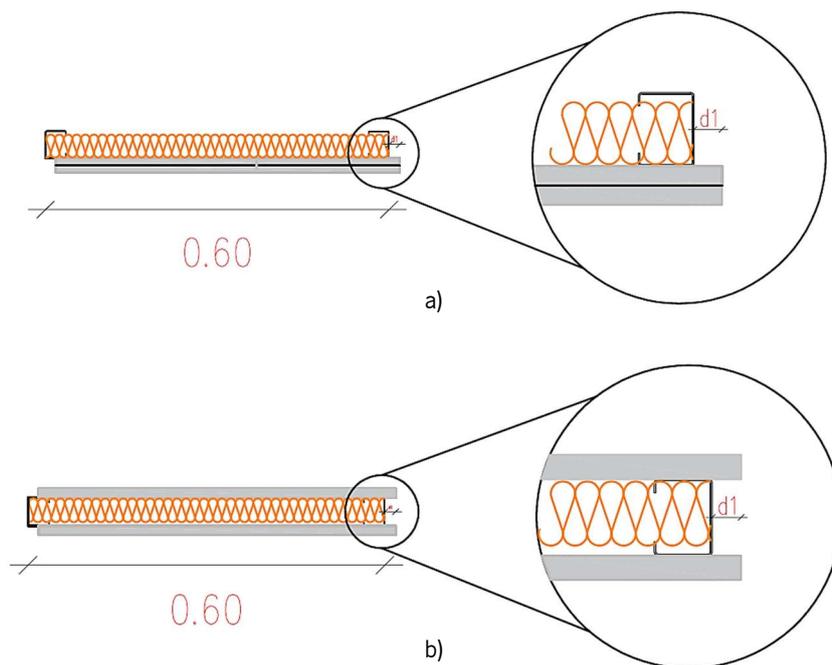


Figura 44 - Corte esquemático do painel: a) tipo 1; b) tipo 2.

O desfasamento $d1$ visível na Figura deve ser pelo menos 13 mm, distância mínima do parafuso à margem do painel (10 mm) a qual se adiciona o raio do parafuso. No entanto, um desfasamento de

18 mm aparenta ser um valor mais coerente, ou seja, metade da largura dos montantes (montantes de 48 por 36 mm).

3.6 Ligação entre Teto e Pavimento

A ligação ao teto e ao pavimento é um aspeto que requer devida atenção, uma vez que a tipologia de painéis proposta não permite a ligação dos perfis metálicos de forma convencional por impedimento das placas de gesso. Numa divisória comum em aço leve, os perfis canais (horizontais) são diretamente fixados na envolvente rígida. A solução passa pelo uso de ligações externas analogamente às expostas nos sistemas de painéis sandwich ou painéis de CLT.

Uma primeira abordagem a estas ligações passaria pelo uso de perfis do tipo cantoneira. Estes elementos seriam previamente ligados ao pavimento e ao teto. Posteriormente, o painel seria devidamente encostado e fixado à segunda aba da cantoneira. A Figura pretende expor todo o processo e o resultado final desta ligação.

Esta fixação terá de ser devidamente dimensionada e estando diretamente exposta ao fogo, será necessário avaliar o seu comportamento perante esta condicionante. A aplicação de revestimento de pavimento e de tetos falsos *a posteriori*, poderá minimizar esse efeito conferindo uma maior proteção à fixação, bem como colmatar o seu impacto visual.

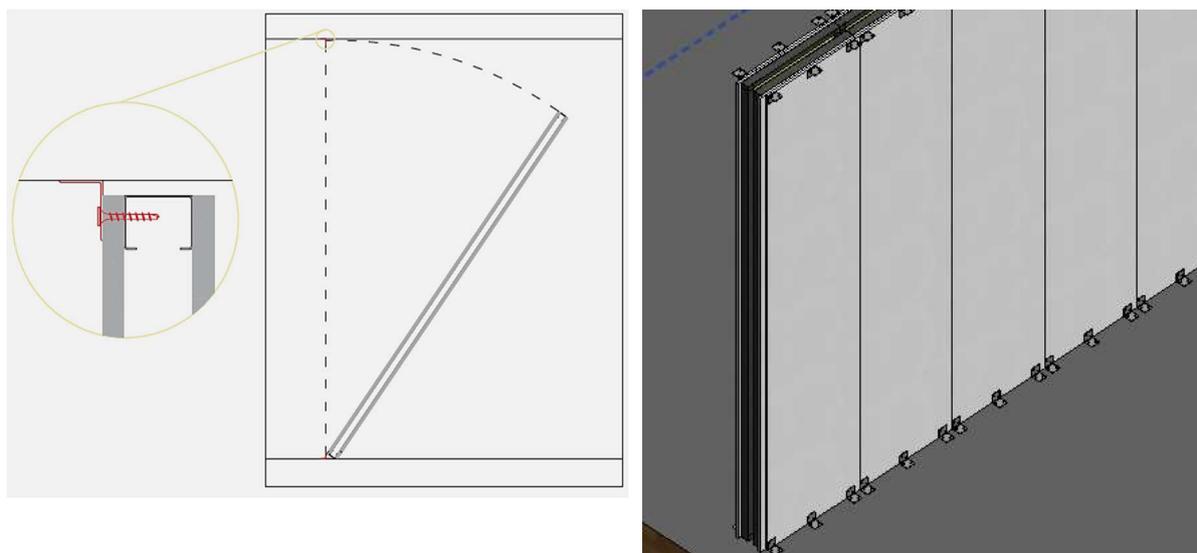


Figura 45 – Esquemática da ligação entre painel e teto/pavimento.

3.7 Integração de Instalações – Tubos, Cabos e Equipamentos

A integração de instalações nas paredes é uma prática recorrente na construção, dado que permite dissimular e proteger os múltiplos sistemas presentes num edifício, proporcionando superfícies planas. É necessário avaliar e pensar na integração destes sistemas para que a solução proposta não se apresente como uma limitação no que toca à aplicabilidade dessas instalações.

As instalações que se podem encontrar numa parede são vastas, contudo, estas podem ser sintetizadas (Faria, 1996):

- Tubos (água, esgoto, aquecimento, ventilação, gás);
- Tubos e Cabos (eletricidade, telefone, alarmes, TV, som);
- Equipamentos (tomadas, comandos, grelhas de ventilação, equipamento sanitário).

Atualmente, é possível encontrar soluções que permitam a integração facilitada destas instalações em paredes com uma estrutura em aço leve, com acessórios disponibilizados pelos próprios fabricantes (ver Figura) ou com kits prontos a aplicar (ver Figura), como é o caso dos equipamentos sanitários. Estes kits podem ser encontrados no mercado através de empresas como a Roca ou Geberit, por exemplo.

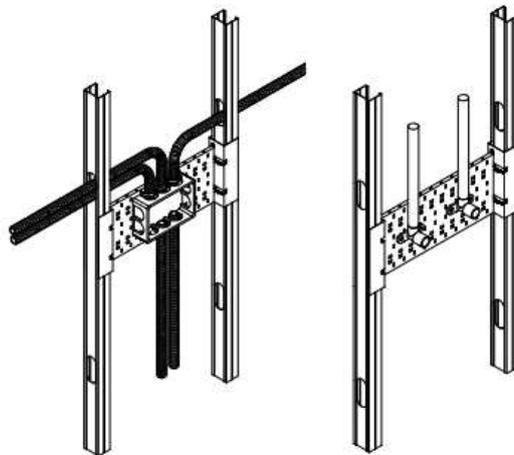


Figura 46 – Acessórios para instalação de tubagens (Pladur, 2018).



Figura 47 – Exemplo de kit sanitário (Geberit, 2019).

No entanto, na criação de um painel de parede pré-fabricado, o desafio não passa pela integração das instalações, mas pela sua ligação com a envolvente. Este problema surge porque o revestimento já se encontra aplicado, o que impede o processo normal de distribuição da tubagem ao longo da parede.

Na solução que se pretende desenvolver, o recurso a uma distribuição na horizontal (à semelhança da Figura) seria uma abordagem interessante, mas essa confronta com o problema de como realizar a ligação das tubagens hidráulicas. Esta ligação deve ser pensada de forma a garantir o alinhamento perfeito das tubagens, um declive mínimo das tubagens de esgoto e a existência de uma ligação plug-in play viável, permitindo a conexão das tubagens pressurizadas de forma estanque. Desta forma, sugere-se como resolução colocar os diversos tubos em espera nas extremidades superiores e inferiores do painel, realizando uma distribuição na vertical.



Figura 48 – Distribuição de tubagens em paredes de com estrutura em aço leve – distribuição convencional (Pires, 2013).

3.8 Limites ao grau de Pré-fabricação

O conceito inicial para a idealização deste painel passa por apresentar uma solução com o maior grau de pré-fabricação possível, minimizando os trabalhos em obra. Porém, é possível, indicar alguns limites.

Em pontos anteriores, já foram abordadas algumas condicionantes que balizaram as dimensões e a tipologia do painel, refletindo-se inevitavelmente em trabalhos adicionais em obra, quer por um maior

número de painéis a serem colocados, ou no caso de placas duplas, a necessidade de concluir uma face em obra. Neste subcapítulo pretende-se indicar limites relativos aos acabamentos e ao nível da integração de sistemas.

A escolha pela utilização de placas de gesso cartonado, bem como a intenção que a solução seja adaptável a diferentes ambientes, implicam a aplicação do acabamento final em obra. Tal situação deve-se essencialmente a duas razões – primeiramente, a necessidade de realizar o tratamento das juntas entre painéis, com a aplicação de gesso cola e bandas. No caso de placas com bordas arredondadas ou biseladas é possível o tratamento de juntas apenas com massa (na Figura é visível uma parede após o tratamento das juntas). Por outro lado, a adaptação a ambientes húmidos implica reforços para garantir a correta impermeabilização dos sistemas, visível na Figura (Gyptec, 2017).



Figura 49 – Parede em placas de gesso após o tratamento de juntas (Gyptec, 2017).

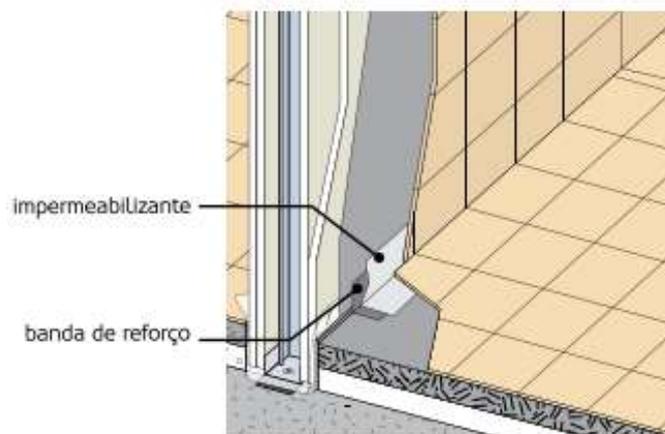


Figura 50 – Reforço de juntas com impermeabilizante (Gyptec, 2017).

A integração de sistemas por si só é algo complexo, mas deve-se limitar ao interior do painel, ou seja, as tubagens, cabos e sistemas sanitários devem ser acomodados interferindo com a superfície apenas como elementos em espera. Por outras palavras, a superfície deve ser lisa, expondo apenas os furos onde serão conectados/colocados tubagens, interruptores, tomadas e fixações de loiças sanitárias, entre

outros. Uma razão para esta limitação é que todos estes elementos devem ser colocados *a posteriori* do acabamento final da superfície, que por sua vez já é impedido pelo tratamento de juntas. Outro motivo deve-se ao facto da pré-aplicação dos elementos a cima referidos condicionar o transporte, quer pela fragilidade de algumas peças e/ou irregularidade geométrica que os painéis iriam apresentar.

Contudo, existe a possibilidade de ultrapassar grande parte das limitações impondo um maior nível de pré-fabricação, através da incorporação dos painéis em módulos, tal como foi exposto na Tabela 1.

4. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PAINEL

Este capítulo tem como objetivo apresentar métodos analíticos que permitem avaliar o desempenho do painel proposto no Capítulo 3, tendo em consideração alguns dos requisitos referidos. O trabalho foi desenvolvido de forma sistemática o que permitirá a aplicação dos mesmos métodos no caso de futuras melhorias ao painel ou na eventualidade da idealização de sistemas similares. É importante referir que esta abordagem tem por objetivo uma pré-análise da viabilidade do sistema em estudo, uma vez que, conforme foi apresentado no Capítulo 2, a avaliação da conformidade do desempenho de um painel às diversas exigências passa obrigatoriamente pela realização de ensaios (indicados nas normas expostas anteriormente).

Na impossibilidade de abordar a totalidade das exigências, foram definidas as seguintes: desempenho acústico, resistência ao fogo, desempenho estrutural e viabilidade de transporte. Na Figura 51 apresentam-se as duas tipologias analisadas e anteriormente detalhadas na secção 3.4. Lembra-se que a terceira tipologia consiste no uso de dois painéis do tipo 2.

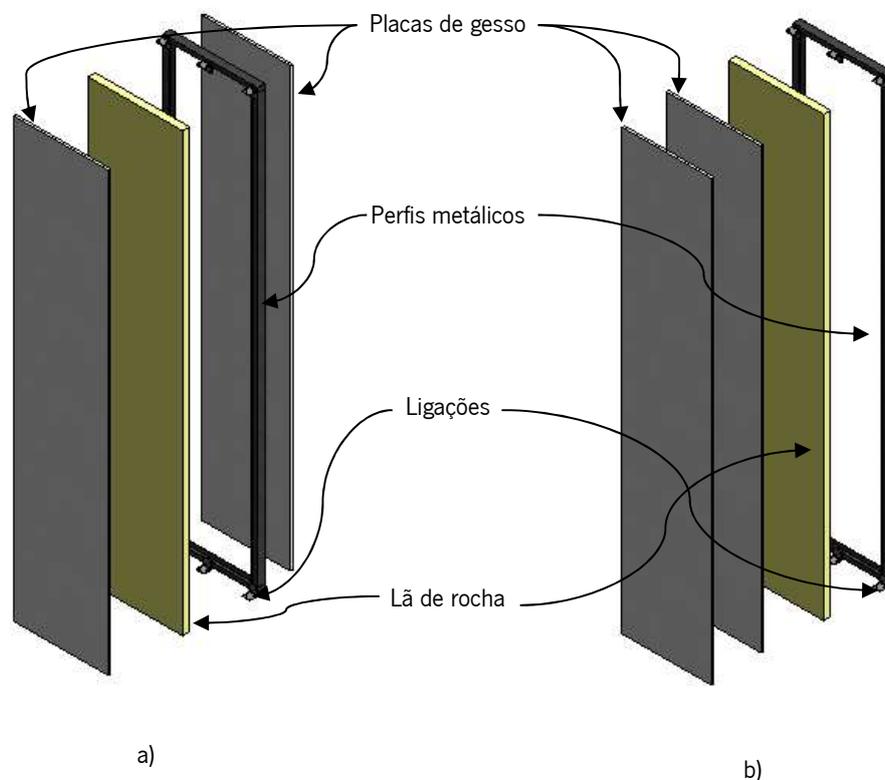


Figura 51 – Vista explodida: a) Painel tipo 1; b) Painel tipo 2.

4.1 Avaliação do Desempenho Acústico

A determinação do índice de isolamento sonoro (R_w) de um painel de parede é fundamental, quer pela qualidade que se deve garantir na execução de um projeto, quer pelas exigências regulamentares expostas anteriormente. No presente estudo recorreu-se a dois métodos analíticos – o método de *Sharp* e o método de *Meisser*, para calcular o índice de isolamento sonoro (R_w) dos painéis de parede em análise. Em virtude da configuração massa-ar-massa, as diferentes configurações de painel foram analisadas como paredes duplas. Nesta análise são visados valores de 40 dB para a tipologia 1 (valor satisfatório para divisórias sem restrições regulamentares (Almeida e Silva, s.d.) e um mínimo de 50 dB para as restantes tipologias. O valor de 50 dB é referente ao índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado ($D_{nT,W}$) refletindo-se num valor variável quando é transposto para o índice de isolamento sonoro (R_w), pois esse é dependente das características do local. Posto isto, procedeu-se à resolução da equação (3) em função do fator corretivo correspondente à transmissão marginal (ΔTM) e à relação entre o volume do local e área da parede em análise (variáveis expostas no ponto 3.3.7). Os resultados são expostos na Figura 52. É importante referir que o pé-direito foi fixado em 2,8 m.

$$D_{nT,W} = R_w - \Delta TM + 10 \log \left(\frac{0,16 \cdot V}{T_0 \cdot S} \right) \quad (3)$$

$$R_w = 50 + \Delta TM - 10 \log \left(\left(\frac{0,16}{0,5} \right) \times \left(\frac{V}{S} \right) \right) \text{ (dB)}$$

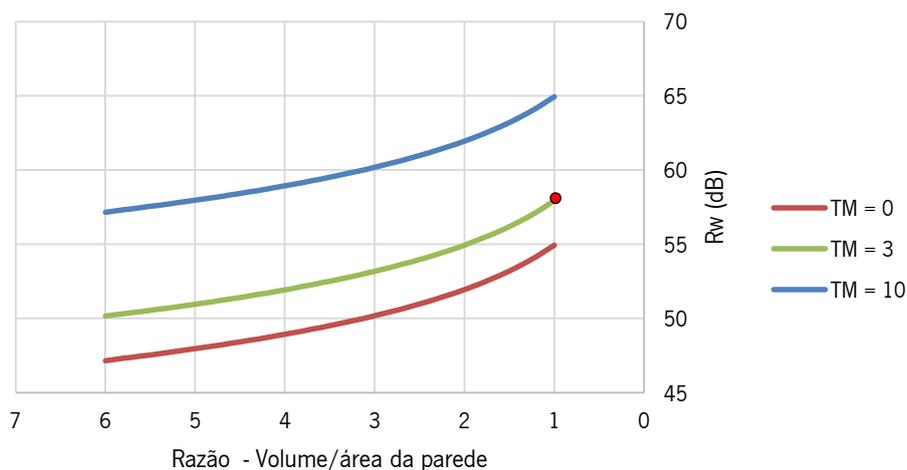


Figura 52 – Representação gráfica do valor de isolamento em função do local de aplicação.

Posto isto, foi arbitrada uma situação intermédia considerando que a massa superficial do elemento de separação é semelhante à dos elementos adjacentes, ou seja, um fator corretivo de 3. Esta por sua vez

resulta num valor objetivo de 57 dB conforme indicado através do ponto vermelho na Figura 52. A título exemplificativo, no capítulo 5 é apresentado um caso particular para o qual é requerido um valor de aproximadamente 54 dB.

Previamente, é necessário definir as variáveis de entrada para aplicação dos diferentes métodos, sendo essas apresentadas na Tabela 22 (Mateus, 2004).

Tabela 22 – Variáveis de entrada para dos métodos de avaliação acústica.

Variáveis	Tipologia 1	Tipologia 2	Tipologia 3
Massa superficial de cada pano* (m_n) (kg/m ²)	10,6	17,4	17,4
Espessura do pano (e_n) (m)	0,015	0,025	0,025
Dimensão da caixa de ar (d) (m)	0,048	0,048	0,15
Distância entre montantes (b) (m)	0,6	0,6	0,6
Velocidade de propagação das ondas planas de flexão em placas finas e finitas (C_L) (m/s)	1600		
Velocidade de propagação do som no ar (c) (m/s)	340		

* O termo pano refere-se aos painéis de gesso constituintes de uma face da parede

4.1.1 Determinação de Valor Único de Isolamento Acústico

O índice de isolamento sonoro de um determinado elemento construtivo é determinado através do ajuste da curva referência (estipulado na norma ISO 717-1), com a curva de resultado (R) podendo ser obtida pela via analítica ou experimental. A curva referência é definida por 16 pontos entre 100 e 3500 Hz em bandas de 1/3 de oitava.

O ajuste da curva é realizado através da soma ou subtração de um valor inteiro a todos os pontos. Considera-se que a curva se encontra ajustada quando o somatório das diferenças aritméticas for igual ou inferior a 32. Neste processo apenas são contabilizadas as diferenças desfavoráveis, ou seja, quando o valor da curva R é inferior à curva referência (ver Figura 53). Verificado o ajuste das curvas, o valor único do índice de isolamento (R_w) é correspondente ao valor lido na curva referência para a frequência de 500 Hz.

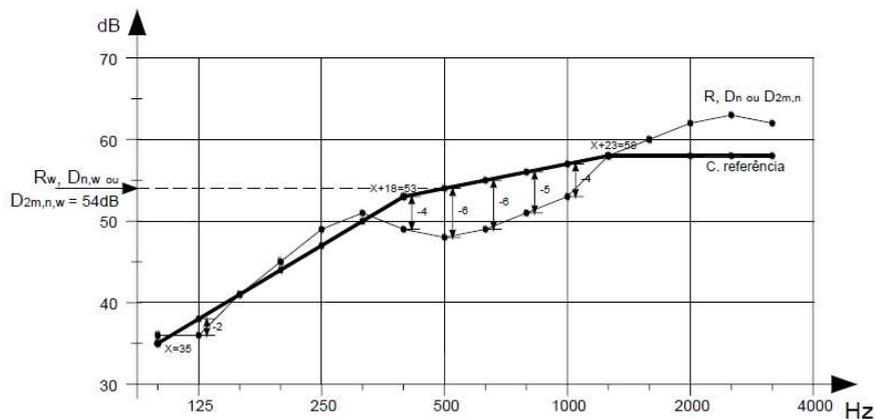


Figura 53 – Ajuste da curva referência à curva de isolamento (Mateus, 2004).

4.1.2 Método de Sharp

Este método foi especialmente desenvolvido para determinar a redução sonora de elementos leves, tais como paredes divisórias duplas, através de um método gráfico, fruto de múltiplas observações. O mesmo tem por base a massa superficial e espessura dos panos, velocidade do som no material, o espaçamento da caixa de ar e o preenchimento desta com material absorvente.

Sharp (1980) expõe a estimativa do desempenho de um elemento através do cálculo de pontos (A,B,C e D) que de seguida são devidamente ligados através de segmentos de retas, resultando num gráfico similar ao exposto na Figura 54 (Bies e Hansen, 2003) (Long, 2006).

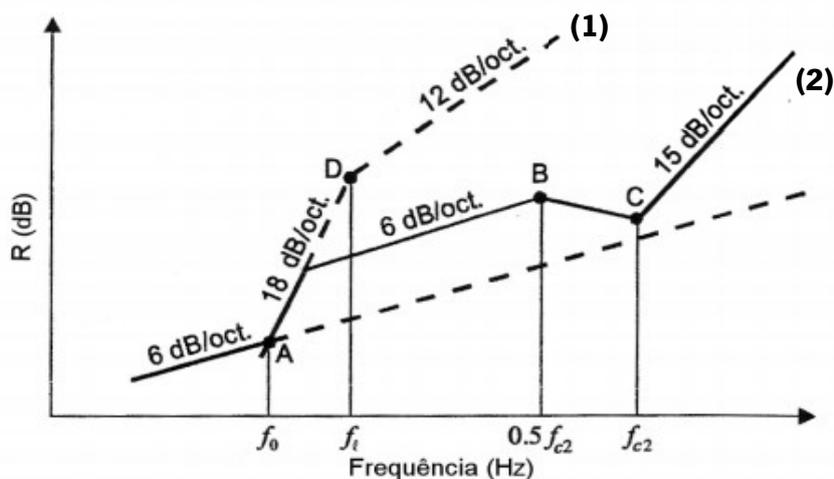


Figura 54 – Método de Sharp; 1 – Parede dupla ideal; 2 – Parede dupla. Adaptado de (Sousa, 2008).

Previamente, no traçado do gráfico é necessário realizar o cálculo de algumas frequências-chave, nomeadamente (Bies e Hansen, 2003):

- Frequência de ressonância (f_0) do conjunto massa-ar-massa;

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{1,8 * \rho c^2 * (m_1 + m_2)}{d m_1 m_2}} \quad (\text{Hz}) \quad (4)$$

ou, para $\rho_{ar} = 1,21 \text{ Kg/m}^3$;

$$f_0 = 80 * \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{d m_1 m_2}} \quad (\text{Hz}) \quad (5)$$

- Frequência limite (f_l) relacionada à largura da cavidade entre os painéis (d)

$$f_l = \frac{c}{2\pi} = \frac{55}{d} \quad (\text{Hz}) \quad (6)$$

- Frequência de coincidência dos panos constituintes da parede (f_{C1} e f_{C2})

$$f_{cn} = \frac{0,55 * c^2}{C_{Ln} * e_n} \quad (\text{Hz}) \quad (7)$$

De seguida, procedeu-se a criação de uma folha de cálculo *Excel*, a qual permitiu o cálculo do índice de redução para diferentes frequências e a apresentação do gráfico de resposta para cada tipologia. A presente folha tem por princípio uma série de testes lógicos para o traçado dos diversos segmentos de reta fundamentados no cálculo dos pontos A, B e C.

Ponto A:

Neste ponto é determinado o índice de redução sonora correspondente à frequência de ressonância.

$$R_A = 20 \log(m_1 + m_2) + 20 \log(f_0) - 48 \quad (\text{dB}) \quad (8)$$

Ponto B:

É determinado a partir da frequência de coincidência do segundo pano. A equação usada para essa frequência é variável em função da possível inclusão de material isolante na caixa de ar e do tipo de ligação existente entre os panos e os elementos de suporte dos mesmos.

- No caso de não se verificar a existência de material isolante;

$$R_B = R_A + 20 \log\left(\frac{f_{c1}}{f_{c2}}\right) - 6 \quad (\text{dB}) \quad (9)$$

Verificando-se a utilização de material isolante Sharp propõe diferentes expressões alusivas a dois tipos de ligação entre os montantes e os panos de parede. É sugerido que a ligação seja do tipo linha ou ponto, simulando a ligação entre panos e assim ter conta as pontes de transmissão de som. A conexão em linha é alusiva ao caso em que a placa toca continuamente o montante ao longo do seu comprimento. No caso do contacto ser feito por uma área reduzida (Figura 55), a ligação é considerada em ponto. A ligação em ponto é obtida através da utilização de elementos adicionais como barras resilientes.

Posto isto, é possível obter as seguintes situações para um painel de parede (2 faces combinadas):

- Ligação do tipo linha – linha, em que b representa o menor espaçamento entre montantes em metros;

$$R_B = 20 \log(m_1) + 10 \log(b) + 30 \log(f_{c2}) + 20 \log\left(1 + \frac{m_1 \sqrt{f_{c1}}}{m_2 \sqrt{f_{c2}}}\right) - 78 \quad (10)$$

(dB)

- Ligação do tipo linha – ponto, em que e representa o menor espaçamento entre linhas de apoio em metros;

$$R_B = 20 \log(m_1 * e) + 40 \log(f_{c2}) - 99 \quad (\text{dB}) \quad (11)$$

- Ligação do tipo ponto – ponto.

$$R_B = 20 \log(m_1 * e) + 40 \log(f_{c2}) + 20 \log\left(1 + \frac{m_1 f_{c1}}{m_2 f_{c2}}\right) - 105 \quad (\text{dB}) \quad (12)$$

Por último, é efetuado a cálculo do ponto C, e o ponto D é determinado graficamente:

$$R_C = \begin{cases} R_B + 6 + 10 \log(\eta_2) & \text{para } f_{c1} < f_{c2} \\ R_B + 6 + 10 \log(\eta_2) + 10 \log(\eta_1) & \text{para } f_{c1} = f_{c2} \end{cases} (\text{dB}) \quad (13)$$

O fator de perdas internas (η) das placas de gesso varia entre 0,006 e 0,03, no entanto, segundo o estudo de Diogo Mateus (2004), o valor de 0,1 é mais adequado para elementos duplos segundo o método de Sharp.

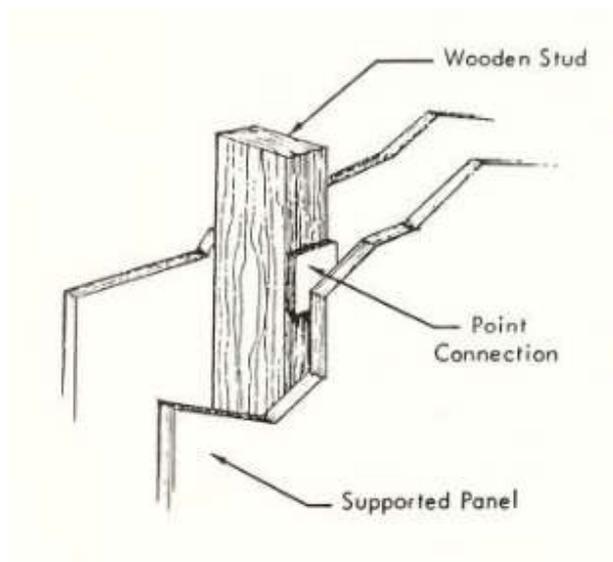


Figura 55 – Conexão do tipo ponto (Sharp *et al.*, 1980).

Assim, foi realizado, com recurso à ferramenta de *Excel* desenvolvida, o cálculo do índice de redução para as 3 tipologias expostas anteriormente, considerando a ligação das placas de gesso do tipo linha - linha. Obtiveram-se os resultados da Tabela 23 e da Figura 56.

Tabela 23 – Resultados do método de Sharp para as diferentes tipologias.

Parâmetro	Tipologia 1	Tipologia 2	Tipologia 3
f_0 (Hz)	159,0	124,9	63,6
f_{c2} (Hz)	2675,9	1605,5	1605,5
R_A (dB)	22,6	24,7	19,8
R_B (dB)	49,1	46,8	46,8
R_C (dB)	40,1	37,8	37,8
R_w (dB)	41	43	44
Dif. Sharp (<32dB) (dB)	24,4	26,9	31,9
Solução « <i>in situ</i> » Valor de Catálogo (Gyptec) (dB)	40	47	65

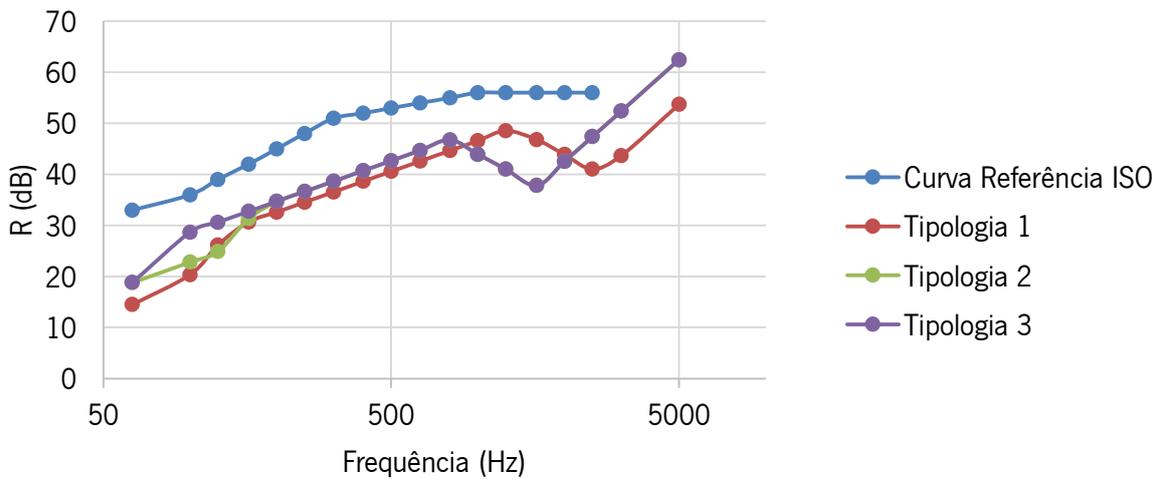


Figura 56 – Representação gráfica dos resultados obtidos para o método de Sharp.

É possível verificar que o método apresenta disparidades relativamente aos valores apresentados pelos catálogos, que por sua vez são próximos dos valores obtidos em ensaios (Mateus, 2004) (Sousa, 2008) (Ferreira e Mendes, 2013).

As diferenças registadas devem-se em parte à duplicação do número de placas (situação não prevista pelo método) e ao facto da formulação atual não considerar a desconexão total dos panos, no caso da tipologia 3. No caso da duplicação das placas, Sousa (2008) expõe o cálculo considerando a duplicação da massa e a espessura de uma única placa por face. A tipologia 3 possui a particularidade de não se verificar conexão entre os panos, o que de algum modo torna a determinação do Ponto B incoerente, sendo essa tipologia mais próxima de uma parede dupla ideal. É de referir ainda que o método não considera a espessura e densidade do material isolante, bem como o tipo de montantes utilizados. Na prática, o desempenho acústico do painel varia com o tipo de material e a secção do montante.

Aplicando as considerações expostas por Sousa (2008), nas tipologias 2 e 3, é possível obter os resultados da Tabela 24 e da Figura 57.

Tabela 24 – Resultados ajustado do método de Sharp para as diferentes tipologias.

Parâmetro	Tipologia 2	Tipologia 3
f_0 (Hz)	124,9	70,2
f_{c2} (Hz)	3211,1	
R_A (dB)	24,7	19,8
R_B (dB)	55,8	
R_C (dB)	46,8	
R_w (dB)	47	60
Dif. Sharp (<32dB) (dB)	24,4	30,1
Solução « <i>in situ</i> » Valor de Catálogo (Gyptec) (dB)	47	65

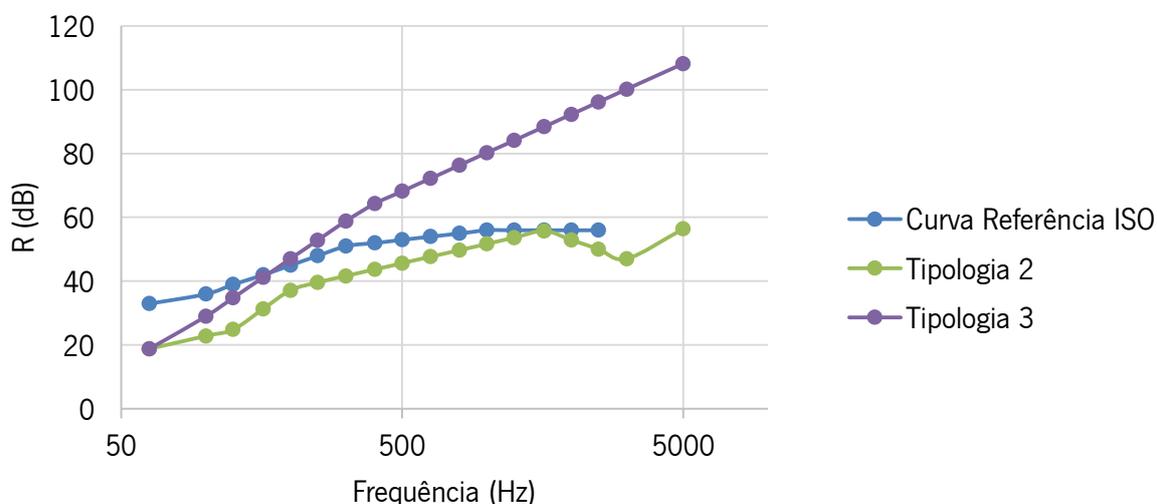


Figura 57 – Representação gráfica dos resultados ajustados obtidos para o método de Sharp.

4.1.3 Método de Meisser

O método de Meisser é recorrente na determinação de valores de R de divisórias duplas, sendo aplicável a praticamente todo o tipo de paredes. A sua utilização deste método permite ter outra abordagem ao problema e possibilita uma comparação com os valores já obtidos. Porém, o rigor deste método é superior com elementos de maior massa.

Semelhante ao método de Sharp, trata-se de um método gráfico apoiado na determinação de frequências e no cálculo dos respetivos índices de redução, com base na frequência de 500 Hz e na aplicação de um fator K . Os diferentes pontos obtidos são, por sua vez, representados e ligados com segmentos de reta com declives de 6 dB/oitava, 8 dB/oitava, 10 dB/oitava e -10 dB/oitava, resultando no gráfico representado na Figura 58 (Costa, 2008).

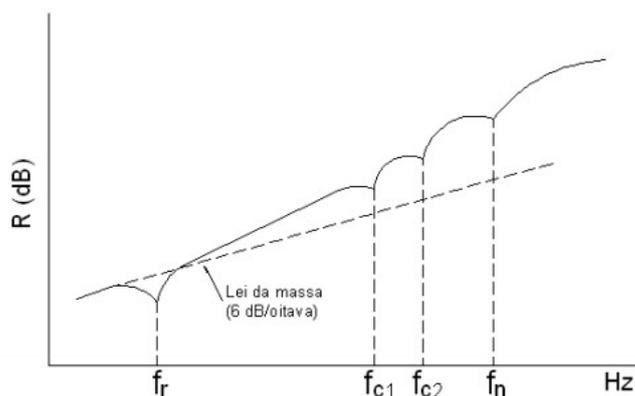


Figura 58 – Gráfico de Meisser (Costa, 2008).

Para o cálculo deste método, foi desenvolvida novamente uma ferramenta de cálculo com base em *Excel*, que considera as seguintes etapas (Sousa, 2008):

- Determinação da frequência de ressonância (f_r), frequências críticas de cada pano (equação 7) e frequência de ressonância da caixa de ar (f_n);

$$f_r = 84 * \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{dm_1 m_2}} \quad (\text{Hz}) \quad (14)$$

$$f_n = \frac{n * c}{2d} \quad (\text{Hz}) \quad (15)$$

- Cálculo de R para uma frequência de 500 Hz, referência de uma reta auxiliar com declive de 6dB/octava;

$$R_{500 \text{ Hz}} = 13,3 \log(m_1 + m_2) + K + 13,4 \quad (\text{dB}) \quad (16)$$

O fator K resulta da soma do parâmetro A e B apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Valores do fator K – método de Meisser. Adaptado de (Costa, 2008) (Sousa, 2008).

Características da caixa de ar (A)	
Menos de 1 cm	2 dB
2 a 4 cm	3 a 4 dB
Superior a 4 cm	5 dB
Características do material isolante (B)	
Menos de 1 cm	1 dB
2 a 4 cm	2 dB
Superior a 4 cm	3 a 4 dB

- O valor de R das frequências referidas no primeiro passo resulta dos seguintes cálculos: ao valor definido pela reta auxiliar traçada anteriormente deverá aplicar-se uma redução de 4 dB para (f_r); 5 dB para (f_c) ou 9 dB no caso dos dois panos serem iguais e de 1 dB para a frequência das caixas de ar.
- Por último são traçadas retas de 10 dB/oitava e -10 dB/oitava. Os “V” formados são ligados através de uma reta de 8 dB/oitava com origem no ponto formado entre a reta de 10 dB/oitava e reta auxiliar de 6 dB/oitava.
- A aplicação do presente método resultou os resultados da Tabela 26 e da Figura 59.

Tabela 26 – Resultados do método de Meisser para as diferentes tipologias.

Parâmetro	Tipologia 1	Tipologia 2	Tipologia 3
f_r (Hz)	166,5	130,0	73,5
$f_{c1} = f_{c2}$ (Hz)	2675,9	1605,5	1605,5
f_1 (Hz)	3541,7	3541,7	1133,3
f_2 (Hz)	7083,3	7083,3	2266,7
f_3 (Hz)			3400
R_w (dB)	41	44	46
Dif. Meisser (<32dB) (dB)	23,8	22,3	28,0
Solução « <i>in situ</i> » Valor de Catálogo (Gyptec) (dB)	40	47	65

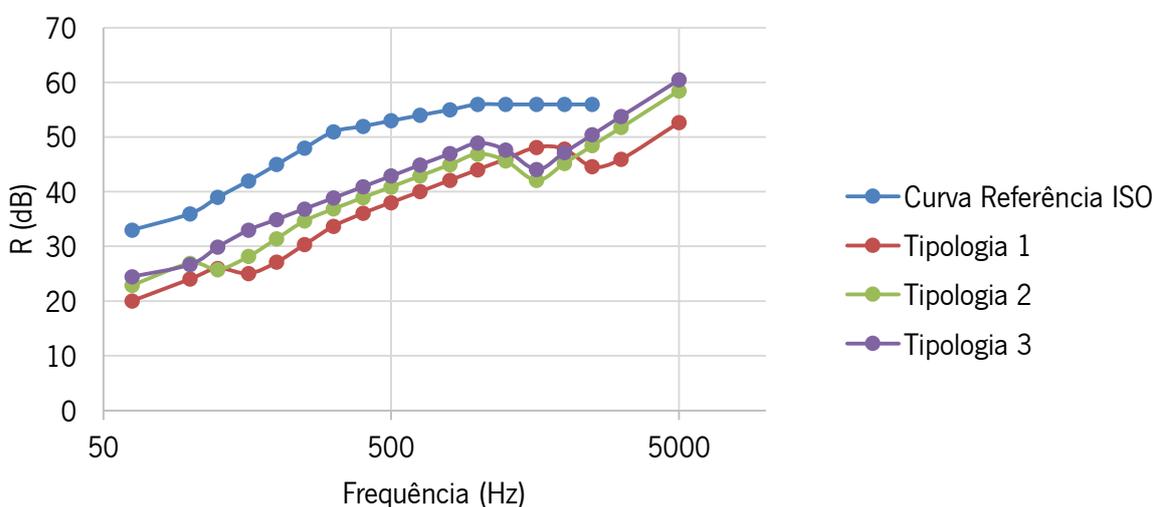


Figura 59 – Representação gráfica dos resultados obtidos para o método de Meissier.

Verifica-se que os resultados obtidos para os índices de redução sonora são bastantes próximos aos da primeira abordagem realizada através do método de Sharp, apresentando as mesmas divergências na

tipologia 1 e 2. Estas, devem-se em parte às limitações desta abordagem, pois, não são tidas em consideração as diferentes ligações possíveis entre os painos, o espaçamento entre apoios e as características do material isolante (apenas considera a sua espessura aproximada).

4.1.4 Limitações

Além das limitações intrínsecas a cada método, a previsão do desempenho acústico dos painéis pré-fabricados em estudo não contabiliza a influência das múltiplas juntas resultantes da assemblagem dos painéis, nem a rigidez/qualidade das ligações teto/pavimento – painel, influenciando diretamente as frequências críticas e, conseqüentemente, os valores de R . As juntas e ligações são pontos de especial importância, uma vez que a existência de falhas condiciona fortemente o desempenho acústico de uma solução. A título indicativo é possível evidenciar os números referentes à percentagem de abertura face à área total da parede, representado na Figura . Na mesma, é possível verificar que uma abertura de 0,1% pode levar a uma diminuição de 30 dB do isolamento. É por isso essencial prestar especial atenção a todas as juntas e recomenda-se a aplicação de um material resiliente (Faria, 1996)(Way e Couchman, 2008).

Outro motivo para diminuição do desempenho é a incorporação de sistemas no interior da parede, os quais, potenciam possíveis pontes de transmissão no caso de não serem devidamente reforçados. Os detalhes construtivos relativos a este tipo de situação podem ser consultados em AENOR (2013), Way e Couchman (2008) e LSK (2005).

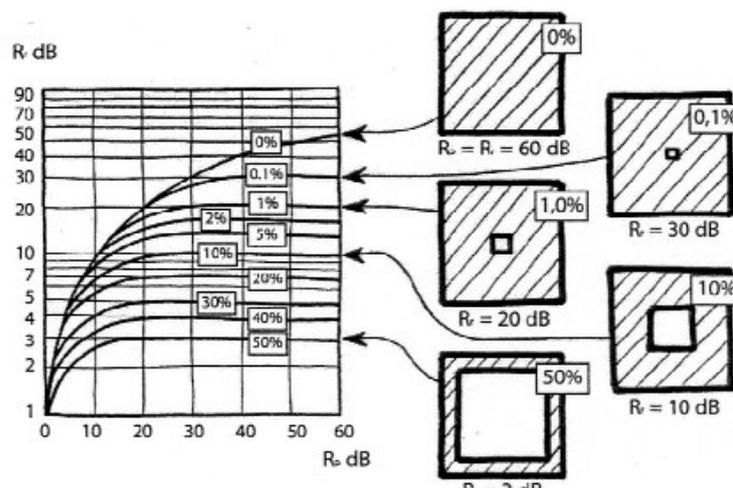


Figura 60 – Influência de aberturas no desempenho acústico (Almeida e Silva, s.d.).

4.1.5 Viabilidade da Solução

Em virtude dos resultados obtidos não foi possível verificar o valor visado no ponto 4.1 de pelo menos 57 dB, para as tipologias 2 e 3. A tipologia 1 apresentou valores satisfatórios próximos de 40 dB para divisórias sem restrições regulamentares.

Contudo, é expectável que a tipologia 3 possa superar o valor de 57 dB, conforme previsto na abordagem ajustada do método de Sharp e registado nos múltiplos ensaios realizados em Ferreira e Mendes (2013), Mateus (2004) e Sousa (2008), onde se verificaram valores próximos de 60 dB para configurações similares. Esta conclusão parte do princípio que se verifica a eficiência das recomendações para juntas e outros aspetos evidenciados no ponto anterior.

Posto isto, seria essencial a realização de ensaios para determinar o valor do índice de redução com maior exatidão e garantir que se verificam os valores desejados. É da maior importância referir que estas tipologias possuem potencial para serem melhoradas – por exemplo, com a aplicação de barras resilientes é possível a obtenção de valores superiores a 50 dB (método de Sharp com ligação ponto – ponto). As melhorias podem igualmente passar pela utilização de perfis metálicos com desempenho melhorado acusticamente (LSK, 2005).

4.2 Avaliação do Desempenho ao Fogo

No estudo das condicionantes relativas à tipologia do painel foi definido que deveria ser cumprido o índice de EI 60. A espessura do painel foi estabelecida com base na Tabela 20 e na literatura disponível onde foram realizados múltiplos ensaios. É de referir que a atribuição do índice a uma solução deve passar pela realização do ensaio descrito na norma EN 1363.

Contudo, foi considerado relevante apresentar um método de cálculo que permitisse estimar o desempenho para diferentes níveis, espessuras e tipos de placas. Este método foi desenvolvido pela International Building Code (IBC) de acordo com os ensaios estabelecidos pela norma ASTM E119 (*Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials*). O procedimento exposto encontra-se no capítulo 7 do documento desenvolvido pelo IBC, possuindo valor jurídico no Estados Unidos de América (IBC, 2017).

4.2.1 Cálculo de resistência ao fogo

O cálculo apresentado pelo IBC consiste no somatório dos tempos de resistência ao fogo das diferentes camadas constituintes da divisória, recorrendo à equação (17), na qual são apenas contabilizados os elementos do lado exposto ao fogo.

$$R = (R_1^{0,59} + R_2^{0,59} + R_3^{0,59} + \dots + R_n^{0,59})^{1,7} \text{ (min)} \quad (17)$$

R – Tempo de resistência ao fogo da parede (min)

R_n – Tempo de resistência de cada camada (min)

Conforme foi referido, este cálculo apoia-se na norma americana ASTM E119, que é equivalente à norma ISO 834. Em comparação com esta, demonstra ser mais restritiva até aos 90 minutos e com diferenças insignificantes após esse período (Harmathy *et al.*, 1987).

Posto isto, e com auxílio da abordagem do presente método feita por Oliveira (2014) é necessário proceder à determinação do tempo correspondente à resistência de cada material. No documento do IBC é possível encontrar o tempo correspondente a alguns materiais, nomeadamente, placas de gesso do tipo standard e antifogo, transcritos na Tabela27. A determinação dos restantes tempos passa pela leitura da temperatura crítica de cada material na curva referência de temperatura. Os valores correspondentes à curva referência que regem as condições de ensaio são estabelecidos pela ISO 834 e são indicados na Tabela28.

Tabela 27 – Tempo de resistência ao fogo de placas de gesso. Adaptado de (IBC, 2017).

Descrição	Tempo (min)
Placa de gesso normal:	
- 12,7 mm	15
- 15,9 mm	20
- 2 placas de 9,5 mm	25
- 1 placas de 9,5 mm e 1 placas de 12,7 mm	35
- 2 placas de 12,7 mm	40
Placa de gesso antifogo:	
- 12,7 mm	25
- 15,9 mm	40

Tabela 28 – Curva de referência pela norma ISO 834 (Oliveira, 2014).

Tempo (min)	Temperatura (°C) ISO 834
0	20
5	576
10	678
30	842
60	945
120	1049
240	1153
480	1257

A lâ de rocha apresenta uma temperatura crítica de 750°C, e os elementos metálicos constituintes do painel apresentam uma temperatura crítica de 350°C, o que corresponde a tempos de aproximadamente 19 minutos e 3 minutos, respetivamente. Como era expectável, o tempo de resistência dos elementos metálicos é residual e visto este ser o principal elemento de suporte, ao qual se deve garantir proteção para assegurar a estabilidade do painel, foi decidido não considerar o seu contributo.

Conhecidos os tempos para cada material é agora possível calcular o tempo de resistência de cada tipologia.

- Tipologia 1: $R = (20^{0,59} + 19^{0,59})^{1,7} = 64 \text{ min}$
- Tipologia 2 e 3: $R = (40^{0,59} + 19^{0,59})^{1,7} = 94 \text{ min}$

É possível concluir que se verifica o índice esperado de EI 60 para as tipologias apresentadas recorrendo a placas do tipo standard, cumprindo as exigências regulamentares.

4.3 Avaliação da Estabilidade

A estabilidade de paredes interiores não resistentes passa pelo cumprimento das diretivas da ETAG 003, baseando a sua avaliação no desempenho mecânico obtido em ensaios experimentais. Estas avaliações pretendem determinar a resistência de uma parede divisória avaliando a deformabilidade e resistência a impactos quando sujeito a ações mecânicas.

Os métodos de avaliação prescritos para simulação dessas ações são divididos segundo dois níveis, nomeadamente a falha funcional e a dano estrutural. A ETAG 003 apresenta assim os seguintes ensaios:

- Determinação da resistência ao impacto de corpo duro – esfera de aço de 0,5 kg (funcional);

- Determinação da resistência a cargas verticais excêntricas (funcional e estrutural);
- Determinação da resistência ao impacto de corpo mole – saco de 50 kg (funcional e estrutural);
- Determinação da resistência ao impacto de corpo duro – esfera de aço de 1 kg (estrutural).

No enquadramento de uma divisória em perfis de aço leve e placas de gesso, refere-se a norma UNE 102043, na qual é exposta uma equação que permite calcular a flecha (deformação) sofrida pela parede quando esta é sujeita a uma carga distribuída de 200 N/m². Relativamente aos pontos referidos anteriormente foi considerado o recurso ao método computacional de análise por elementos finitos (MEF–Método dos Elementos Finitos) para avaliar o desempenho mecânico dos painéis. Pretende-se ainda avaliar a resposta do painel em situação de transporte, pois, tratando-se de uma solução de pré-fabricação, é essencial garantir a viabilidade e o conhecimento dos limites de carregamento.

Utilizou-se o *software* de cálculo *Autodesk Robot Structural Analysis Professional*. A sua escolha deve-se facto de se tratar de uma ferramenta amplamente difundida no setor da engenharia civil e pela facilidade de acesso conferida pela *Autodesk* a estudantes. Outro ponto relevante é a interoperabilidade entre os múltiplos programas da *Autodesk*, facilitando a ponte entre o cálculo estrutural e ferramentas associadas ao *Building Information Modeling* (BIM), como o *Revit*.

4.3.1 Pré-dimensionamento dos Painéis

Um método para o dimensionamento dos painéis consiste na aplicação da norma UNE 102043. Esta prevê a aplicação de uma carga uniforme de 200 N/m², devendo essa resultar numa deformação inferior a 5 mm. A equação (18) presente na mesma, permite dimensionar um painel determinando a altura máxima (H) para o uso de um determinado perfil metálico e espessura de placa de gesso.

$$H = H_0 \sqrt[4]{\frac{I_{\Delta}}{I_0}} \quad (\text{m}) \quad (18)$$

H_0 – Altura referência (consultar Tabela29)

I_{Δ} – Inércia do perfil a instalar

I_0 – Inércia referência – 2,43 cm⁴

Tabela 29 – Parâmetro H_0 – Altura referência (AENOR, 2013).

Espessura total das placas por face (mm)	Altura referência (H_0) (m)
≥ 12,5 – < 18,0	2,50
≥ 18,0 – < 25,0	2,80
≥ 25,0 – < 30,5	3,00
≥ 30,5 – < 36,0	3,20
≥ 36,0	3,35

Aplicando a metodologia proposta aos painéis conceptualizados, em virtude da sua espessura (a mais reduzida), a tipologia 1 foi a selecionada para a aplicação do método. Esta apresenta um limite máximo para a sua altura de 2,95 m. Salientar que este resultado foi obtido recorrendo às correções previstas pela norma, onde é referido que o valor da inércia deve ser multiplicado por dois quando os perfis são dispostos em H (colocação de dois perfis alma com alma, duplicando o número de perfis por eixo vertical).

Posto isto, é expectável que se verifique a estabilidade e segurança dos painéis propostos, uma vez que a dimensão é inferior (2,80 m).

4.3.2 Caracterização dos materiais

Previamente à realização de qualquer modelo foi necessário recolher valores para os diferentes parâmetros que regem o comportamento mecânico de cada material.

Nos estudos realizados por Benouis (1995) e Bouterf (2014) foram realizados ensaios que permitem identificar as características mecânicas das placas de gesso cartonado do tipo normal. Estes estudos permitiram identificar uma ortotropia deste material, provocada pela anisotropia das lâminas de cartão presentes nas placas, sendo que as mesmas podem contribuir até 40% na resistência à flexão das placas. Tendo em consideração os resultados obtidos nos ensaios realizados por Benouis, os principais parâmetros foram sintetizados na Tabela30.

Tabela 30 – Características mecânicas de uma placa de gesso cartonado (Benouis, 1995).

Parâmetro		Orientação do provete	
		Longitudinal	Transversal
Tração	σ_r (Tensão de rotura) (MPa)	1,84	0,76
	σ_e (Tensão elástica) (MPa)	1,08	0,53
	E (Modulo de elasticidade) (MPa)	1007	2218
Compressão	σ_r (Tensão de rotura) (MPa)	5,28	4,47
	σ_e (Tensão elástica) (MPa)	3,81	3,54
	E (Modulo de elasticidade) (MPa)	997	924
	ε_r (Extensão de rotura) (%)	1,35	1,31
Flexão	F_r (Carga de rotura) (N)	827,5	300
	f_r (flecha de rotura) (mm)	12,24	4,22
	F_e (Carga de cedência) (N)	314,7	201,3
	E (Modulo de elasticidade) (MPa)	2851	2373

Em virtude destas dificuldades e de modo a que a modelação das placas seja simplificada, Bouterf realizou estudos experimentais nos quais calculou o comportamento elástico (módulo de elasticidade) das mesmas (assumindo um material homogéneo e perfeitamente simétrico) a $2,40 \pm 0,28$ GPa. No presente trabalho, e com base nos ensaios presentes na literatura, procedendo-se à respetiva modelação computacional, na qual foi considerado um valor de 2,12 GPa para o módulo de elasticidade. A adoção deste valor foi a que melhor aproximou o comportamento numérico do comportamento experimental das placas, conforme representado na Figura . Previamente, foi necessário estipular parâmetros adicionais, tais como o coeficiente de Poisson (ν) e módulo de rigidez (G). A literatura indica valores de 0,15 e 519 MPa para estas variáveis, respetivamente.

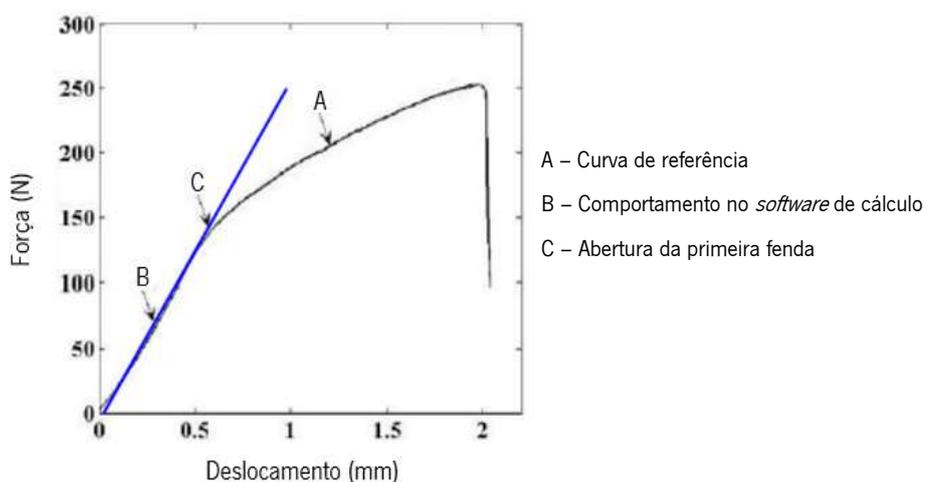


Figura 61 – Comportamento a flexão de uma placa de gesso acartonado. Adaptado de (Bouterf, 2014).

Outro elemento importante consiste na modelação dos perfis metálicos constituintes dos painéis. Esta etapa teve por base os critérios geométricos fornecidos pelo fabricante Perfisa S.A., devidamente certificado pelo CSTB e complementado com o valor do módulo de elasticidade apresentado por Benouis para perfis do mesmo tipo (194 MPa).

Por último, a literatura referenciada (Bouterf, 2014 e Benouis, 1995) permitiu também determinar o limite de tensão no regime elástico de uma placa de gesso, sendo esse de 3,5 MPa. O limite indicado foi determinado através da Figura no qual se encontra devidamente identificada a abertura da primeira fenda. Relativamente aos perfis metálicos, o valor de tensão elástico referenciado é de 244 MPa. Porém, optou-se por reduzir este valor para 140 MPa, valor indicado no Eurocódigo 3 para o aço DX51.

4.3.3 Modelação dos Painéis

Definidos os parâmetros dos diferentes materiais, procedeu-se à modelação dos dois painéis propostos (ver Figura). Os modelos desenvolvidos utilizaram elementos de barra e de casca.

A modelação dos elementos de barra representativos dos diferentes perfis, dois montantes de 2,80 m e dois de 0,60 m correspondentes às vigas das extremidades. Foi necessário considerar uma excentricidade dos perfis correspondente à distância entre o centro de gravidade dos perfis e a face externa da alma dos mesmos. Para além disso, foi ainda estipulado que a ligação entre os diferentes perfis permitisse a rotação em torno do eixo perpendicular ao plano formado pelas placas, consequência do uso de ligações aparafusadas. As placas de gesso são representadas por elementos de casca. Na sua modelação foi aplicada uma excentricidade correspondente à distância real entre os centros de gravidade dos perfis e das placas de gesso.

O último passo consiste na ligação entre os elementos de casca e os elementos de barra, que por sua vez foram definidos através de ligações rígidas pontuais (*rigid links*). Por uma questão de modelação, foi definido um afastamento ligeiramente mais denso que o indicado na norma UNE 102043, permitindo uma diminuição dos picos de tensão provocados por este tipo de ligação pontual. No entanto, o rigor no afastamento das ligações placa-perfil não é total, uma vez que as mesmas não representam o comportamento real deste tipo de fixação. Os estudos desenvolvidos por Benouis refletem a complexidade desta ligação. Ensaios realizados concluíram que a ligação entre perfis metálicos e placas de gesso apresentam comportamento não linear, fruto da ovalização da furação no gesso e de uma compactação do mesmo na envolvente da cabeça do parafuso (Benouis, 1995) (Bouterf, 2014).

Contudo, estas divergências aparentam ser pouco significativas uma vez que o conjunto perfis-placas de gesso demonstra um comportamento linear até a ocorrência da primeira rotura (conforme indicado na Figura), que por sua vez ocorre devido à falha dos montantes metálicos. Esta foi registada para uma tensão de 400 MPa. Salienta-se que os ensaios foram realizados com montantes de 48 mm e placas de gesso cartonado de 13 mm. Posto isto, e uma vez que as análises a realizar terão como limite a tensão elástica dos respetivos materiais, foi considerada válida a simplificação de que as fixações apresentam comportamento linear.

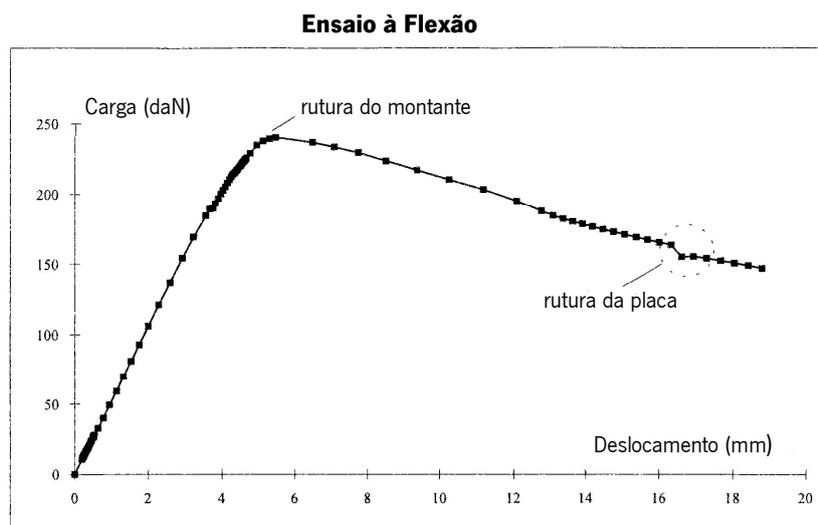


Figura 62 – Comportamento de ruptura a flexão de um conjunto placa de gesso e perfil metálico. Adaptado de (Benouis, 1995).

As considerações apresentadas levaram ao desenvolvimento dos seguintes modelos representados na Figura .

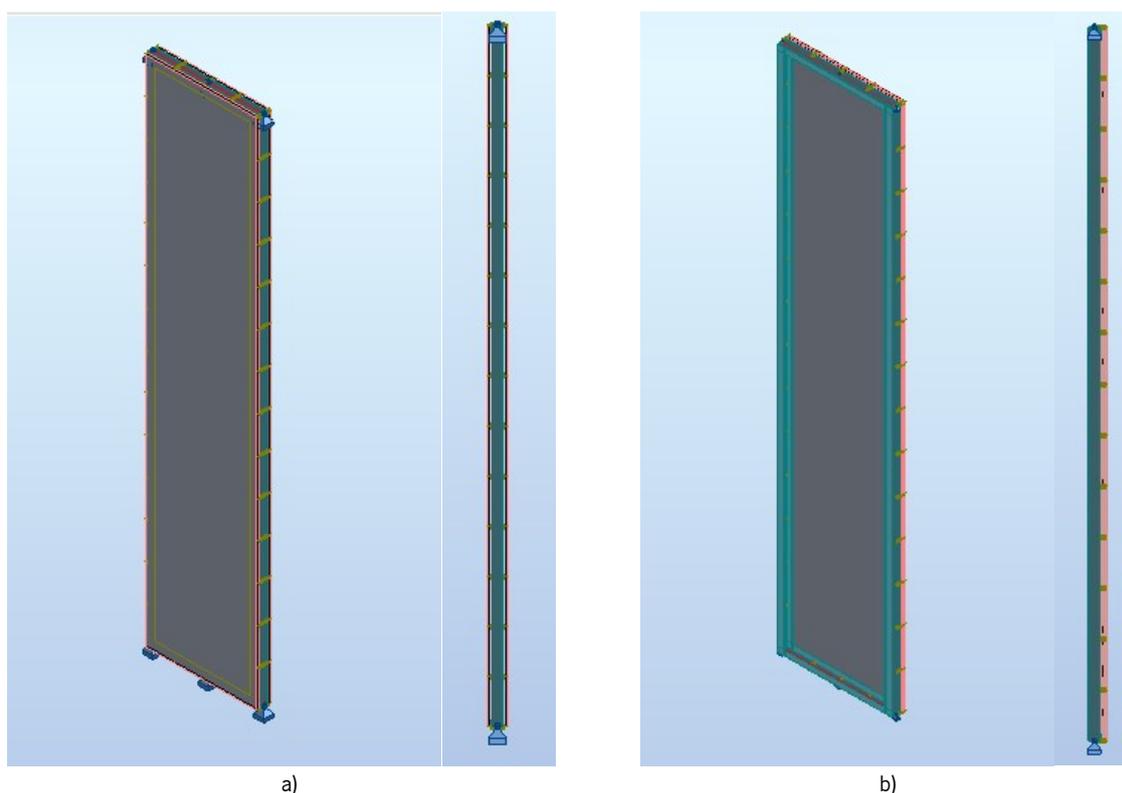


Figura 63 – a) Modelo de Painel de Parede tipo 1; b) Modelo de Painel de Parede tipo 2.

4.3.4 Pré-avaliação da estabilidade *in situ*

Na sequência dos critérios de avaliação referidos anteriormente, constata-se que, à exceção dos requisitos impostos pela norma UNE 102043 para o dimensionamento do painel, a avaliação dos

restantes critérios implica a realização de ensaios experimentais. No entanto, em virtude do enquadramento deste trabalho e do mesmo consistir numa abordagem à viabilidade de uma solução de painel de parede pré-fabricado, foi decidido que esta seria restringida a uma avaliação com base no método dos elementos finitos, em regime elástico. Estas limitações levaram a que a avaliação se cingisse a dois pontos, sendo eles a aplicação de uma carga distribuída e a simulação da imposição de cargas suspensas excêntrica.

Para a execução das presentes simulações foi considerado que os painéis são fixados em três pontos, em cada extremidade (base e topo), que por sua vez são representados através de apoios com restrição do movimento vertical e no plano. Outro ponto passou pela aplicação de uma malha com um espaçamento de 25 mm aos elementos de casca.

Resistência a uma Carga Uniforme

A primeira solicitação passa pela aplicação de um carregamento de 200 N/m² de modo a verificar e validar as previsões anteriormente efetuadas. Simulado este primeiro carregamento foi possível validar o pré-dimensionamento realizado. A seguir, foi determinada a solicitação máxima possível, lembrando que a deformada não deve ser superior a 5 mm e não pode ser ultrapassado o regime elástico dos materiais.

Na Figura , Figura e Figura são expostos alguns dos mapas e diagrama de resposta das diferentes solicitações. Na Figura é possível ver o mapa de tensão dos máximos absolutos em torno do eixo vertical (σ_{xx}) dos elementos de casca para um carregamento uniformemente distribuído de 200 N/m². Por sua vez, a Figura apresenta o mapa de deslocamento (u) máximo para a mesma situação. A Figura indica o deslocamento (u) e tensão (σ) máxima no perfil metálico (elemento de barra). A análise dos restantes eixos de solicitação (σ_{yy} - tensão máxima absoluta em torno do eixo horizontal) e carregamentos é feita do mesmo modo, estando a globalidade dos resultados sintetizada na Tabela 32. Nesta análise verificou-se a correspondência dos modelos com o pré-dimensionamento realizado anteriormente. Os resultados mostram que o limite de 5 mm apenas é atingido para cargas próximas de 400 N/m², não sendo ultrapassados os limites elásticos de cada material.

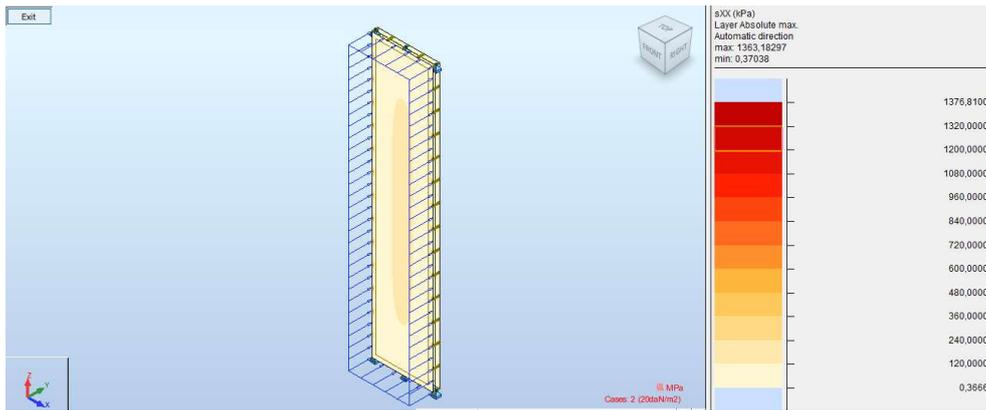


Figura 64 – Mapa de tensões do Painei tipo 1 para uma carga de 200 N/m² segundo o eixo mais solicitado.

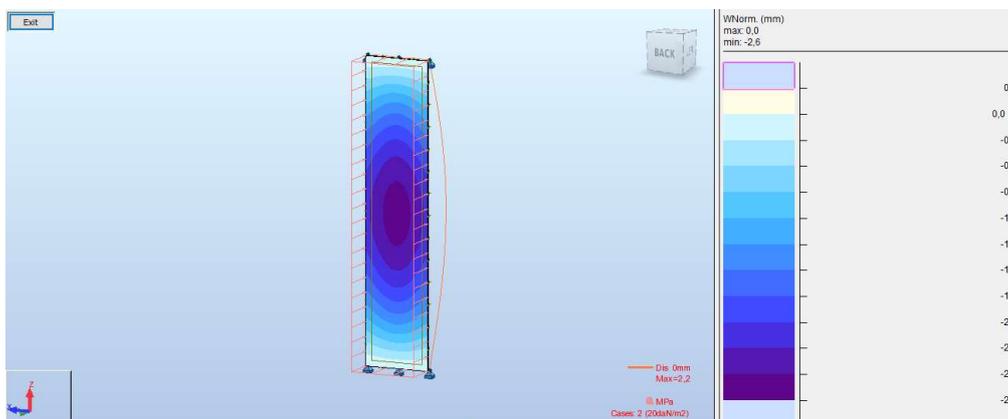


Figura 65 – Mapa de Deslocamento do Painei tipo 2 para uma carga de 200 N/m².

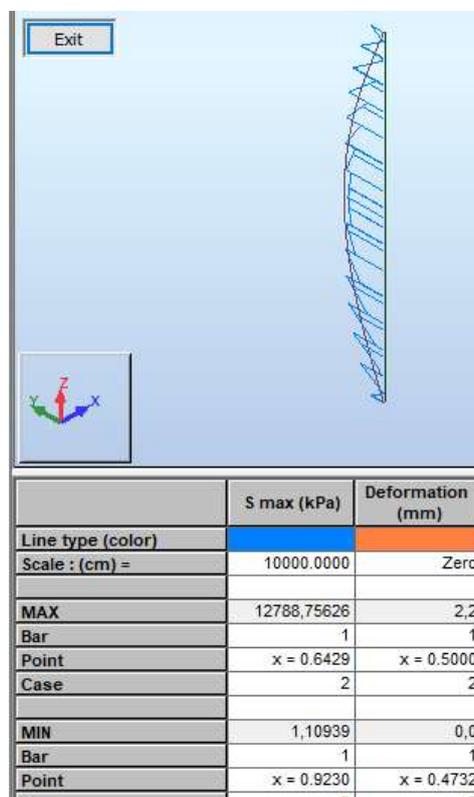


Figura 66 – Diagrama de tensões e deslocamento do Perfil do Painei tipo 1 para uma carga de 200 N/m².

Resistência a uma Carga Vertical Excêntrica

A aplicação de cargas excêntricas é um ponto relevante, visto ser comum a fixação das cargas mais diversas em paredes, de modo que a ETAG prevê a avaliação deste ponto com a aplicação de uma carga de duas vezes 250 N para a resistência funcional e de 500 N para o dano estrutural. Em ambos os casos são aplicados com uma excentricidade 300 mm e fixos em 4 pontos à semelhança do que é representado na Figura . Os carregamentos não devem provocar uma deformação superior a 5 mm ou colapso da parede, respetivamente.

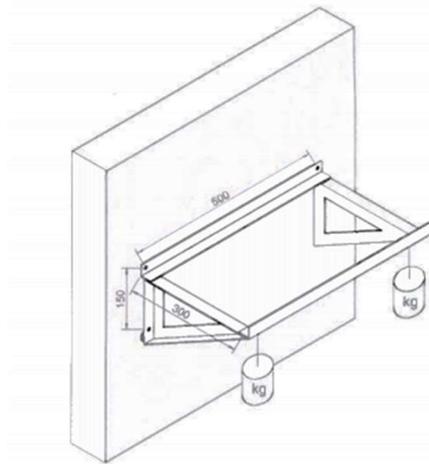


Figura 67 – Esquemática do carregamento vertical excêntrico pela ETAG 003 (Ferreira e Mendes, 2013).

O cumprimento destas exigências não é possível sem se prever o reforço do painel de parede na área onde será aplicado o carregamento. De outro modo, o carregamento é limitado a 135 N para a excentricidade referida (força de 270 N nos pontos de fixação), uma vez que é atingida a tensão máxima da placa de gesso, conforme vemos na Figura . Este resultado enquadra-se nos limites indicados para placas de gesso pela UNE 102043 e pelos ensaios realizados por Bouterf, que referem valores de 250 N e 350 N, respetivamente.

Posto isto, uma possível solução consiste na pré-aplicação de reforços horizontais no ponto de fixação de futuras cargas, cumprindo os requisitos impostos pela ETAG e viabilizado a suspensão de equipamentos pesados, tais como, por exemplo, loiças sanitárias.

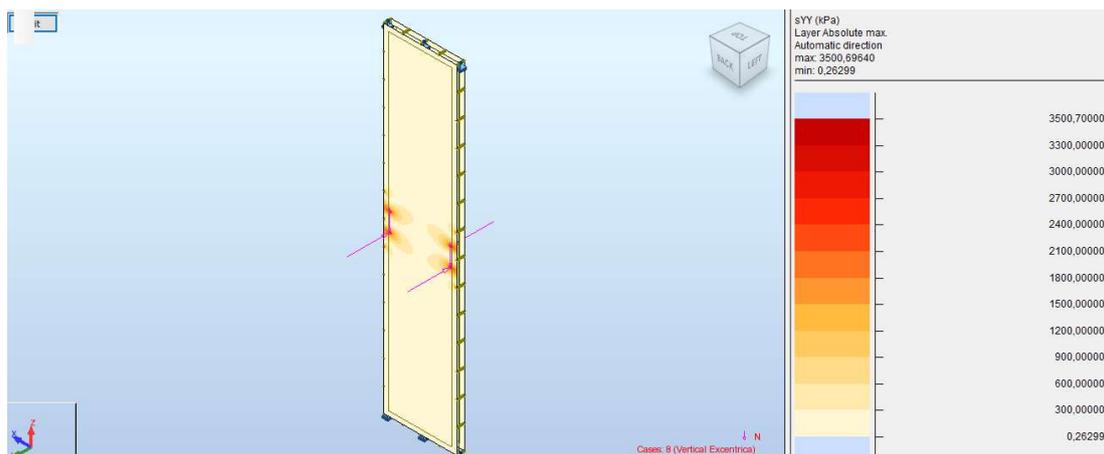


Figura 68 – Mapa de tensões resultante da aplicação de uma carga vertical excêntrica de 2×135 N.

Neste sentido procedeu-se ao reforço dos painéis com o uso de dois perfis horizontais adicionais no local de aplicação das cargas. A sua aplicação permitiu garantir o cumprimento dos limites impostos e manter os materiais com níveis de tensão relativamente baixos. O cumprimento da exigência funcional sem a aplicação de qualquer reforço passa pelo aumento da área de aplicação das cargas, situação mais realista, visto as fixações, na prática, não se restringirem à dimensão de um nó de uma malha de elementos finitos. Todavia, foi necessário considerar uma área de 2500 mm² para verificar uma tensão de 3,5 MPa (limite máximo), representada na Figura através do respetivo mapa de tensões.

A Tabela 31 sintetiza os resultados dos diferentes ensaios realizados.

Tabela 31 – Tabela Resultados Carga Excêntrica

Painel	Solicitação (N)	Placa				Perfil		Nota
		σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	σ_{xy} (MPa)	u (mm)	σ (MPa)	u (mm)	
1	135 + 135	2,59	3,50	1,65	0,4	12,68	0,2	Cargas aplicadas no nó
2	190 + 190	2,53	3,47	1,70	0,5	21,59	0,3	
1	250 + 250	1,83	3,50	2,89	0,7	23,36	0,3	Cargas aplicadas em 2500 mm ²
2		3,47	3,00	1,63	0,5	19,10	0,3	
1	500 + 500	0,92	1,48	0,97	0,6	52,65	0,6	Aplicação de perfis de reforço
2		1,91	2,36	0,98	0,8	54,24	0,8	

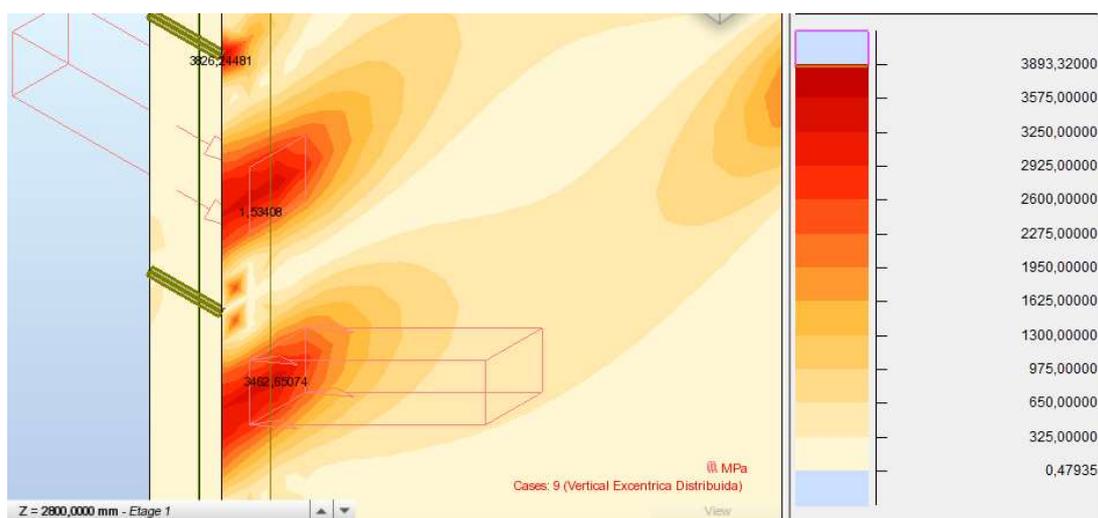


Figura 69 – Mapa de tensão dos pontos de fixação da carga excêntrica (considerando distribuição da carga).

Resistência a Cargas de Impacto

A avaliação da resistência a cargas de impacto é algo complexa, visto que a ETAG define como limites a deformada residual para o caso do saco de 50 kg e a degradação superficial do material para a situação da esfera de 1 kg. Estas simulações não foram realizadas, uma vez que entram no domínio plástico/dinâmico e o Robot não permite efetuar as mesmas. No entanto, é possível validar os painéis em estudo por analogia com ensaios realizados pela Universidade de Coimbra (Ferreira e Mendes, 2013), os quais foram realizados para uma divisória simples de gesso. Nesses ensaios não foi verificado qualquer dano ou anomalia na parede, a qual apresentava placas de gesso de espessura inferior e um pé direito superior, sendo *a priori* condições mais desfavoráveis do que as dos painéis analisados no presente estudo.

Síntese Pré-avaliação *in situ*

Posto isto, é expectável que os painéis em estudo sejam viáveis, pois conforme foi sintetizado na Tabela 32, os resultados obtidos não excedem os limites de tensão e deformação impostos.

Adicionalmente, foram determinados os limites máximos para possíveis situações como: deslocamento lateral dos apoios ou assentamento dos apoios superiores, sendo notória a baixa tolerância para esse tipo de movimento sem a ocorrência de pontos de plastificação nas placas. No Anexo 1 pode ser visualizada a totalidade dos resultados computacionais apresentados na Tabela 31 e na Tabela 32.

Tabela 32 – Tabela de resultados da pré-avaliação de desempenho *in situ*.

Painel	Solicitação	Placa				Perfil		Comentário
		σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	σ_{xy} (MPa)	u (mm)	σ (MPa)	u (mm)	
1	200 N/m ²	1,38	1,14	0,26	2,4	13,02	2,20	Cumpra a Norma
	410 N/m ²	2,79	2,391	0,57	5,0	26,45	4,50	Carga limite
	1080 N	0,93	3,49	1,40	2,9	103,36	2,91	Deslocamento Lateral
	9900 N	1,54	3,50	1,17	0,55	77,81	0,55	Deslocamento Vertical
2	200 N/m ²	1,05	0,89	0,29	2,6	21,13	2,23	Cumpra a Norma
	400 N/m ²	3,48	3,24	0,90	5,0	40,28	4,47	Carga limite
	900 N	3,50	2,92	1,35	2,8	109,86	2,80	Deslocamento Lateral
	564 N	0,97	3,50	1,01	0,20	16,70	0,20	Deslocamento Vertical

4.3.5 Pré-avaliação do Desempenho em Situações de Transporte

No âmbito deste trabalho o estudo do desempenho em situações de transporte é fundamental, pois, tratando-se de uma solução de pré-fabricação é essencial garantir a viabilidade da mesma e, paralelamente, identificar algumas limitações. Deste modo, foram definidos os seguintes cenários de avaliação.

Desempenho em Transporte Manual

Conforme foi evidenciado em capítulos anteriores, a movimentação dos painéis terá de ser executada (em parte) de forma manual por dois trabalhadores. Consequentemente, foram definidos modelos nos quais foram aplicados apoios pontuais simulando as mãos dos trabalhadores, sendo avaliada uma situação de 4 apoios (ver Figura 70) e 3 apoios (libertação esporádica de uma mão por parte de um trabalhador).

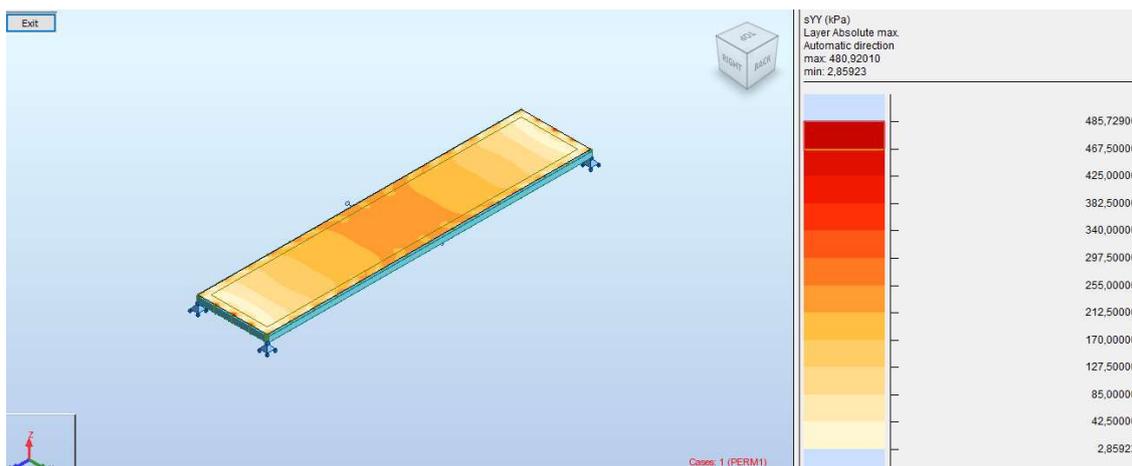


Figura 70 – Mapa de tensões de um painel tipo 1 apoiado em 4 pontos.

Os resultados obtidos não indicam a ocorrência de nenhum dano, sendo apenas atingido o limite elástico das placas para um carregamento de 6 painéis sobrepostos, no caso do painel tipo 1 e de 3 painéis para caso do painel tipo 2, o que fica muito além da capacidade de transporte garantida pelos trabalhadores. Os resultados podem ser consultados na Tabela 33.

Tabela 33 – Tabela de resultados da pré-avaliação de desempenho em transporte manual.

Painel	Solicitação	Placa				Perfil	
		σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	σ_{xy} (MPa)	u (mm)	σ (MPa)	u (mm)
1	1 Painel – 4 apoios	0,40	0,48	0,14	2,5	14,17	2,4
	1 Painel – 3 apoios	0,41	0,53	0,22	3,5	18,65	3,5
	6 Painéis – 3 apoios	2,44	3,16	1,34	21,0	111,88	20,8
2	1 Painel – 4 apoios	0,43	0,40	0,13	3,3	30,59	3,1
	1 Painel – 3 apoios	0,83	1,10	0,65	33,5	35,88	33,5
	3 Painéis – 3 apoios	2,48	3,30	1,94	100,6	107,63	100,8

Desempenho em Transporte Mecânico

Este tipo de movimentação visa o transporte de um conjunto de placas de modo a otimizar a carga/descarga e distribuição dos painéis em obra. Uma primeira abordagem seria a colocação dos painéis em paletes, mas essa análise foi descartada devido à reduzida área da paleta face às dimensões dos painéis, proporcionando desequilíbrios da carga e deslocamentos excessivos nas extremidades. A solução encontrada passa pela colocação de barrotes de apoio, que devidamente cintados permitam a elevação do conjunto de painéis.

De modo a otimizar o número máximo de painéis a serem movimentados, é essencial definir o espaçamento entre apoios, sendo este ótimo quando os momentos positivos e negativos gerados pelo peso dos painéis forem iguais ou relativamente próximos. O espaçamento entre apoios foi arredondado para os valores inteiros mais próximos, visando a facilidade e rigor na colocação dos apoios em fábrica. Assim, o espaçamento ótimo é de 1600 mm e encontra-se representado na Figura .

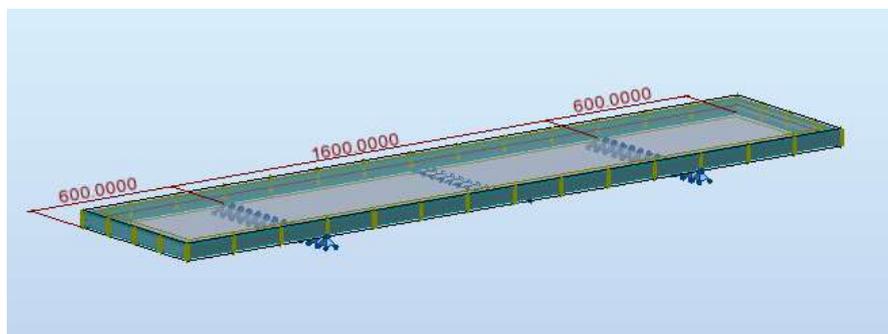


Figura 71 – Modelo de avaliação do desempenho em movimentação mecânica.

Com as presentes condições de apoio foi determinado que seria possível movimentar lotes de 19 painéis para o painel tipo 1 e lotes de 12 painéis para o tipo 2. Apesar da estrutura metálica ser idêntica o segundo tipo de painel apresenta uma capacidade inferior devido à assimetria das placas de gesso e à maior excentricidade. Na Tabela 34, são apresentados os resultados do primeiro painel de cada lote quando este é carregado pelos restantes.

Tabela 34 – Tabela de resultados da pré avaliação de desempenho ao transporte manual.

Painel	Solicitação	Peso Total (kg)	Placa				Perfil	
			σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	σ_{xy} (MPa)	u (mm)	σ (MPa)	u (mm)
1	19 Painéis	760	1,63	2,36	0,96	2,6	136,21	2,6
2	12 Painéis	445	3,50	1,03	0,61	2,0	80,06	2,0

Os lotes de painéis indicados apresentam um peso aceitável, enquadrando-se com a análise realizada no ponto 0. Os resultados obtidos são satisfatórios, uma vez que cada lote permite a realização de 11,4 m e 7,2 m lineares de parede para os lotes de painel tipo 1 e tipo 2, respetivamente.

5. APLICAÇÃO A UM CASO PARTICULAR

Neste capítulo pretende-se estudar a aplicabilidade da solução proposta, avaliando a sua viabilidade, bem como possíveis falhas/lacunas. Assim, uma vez definida a geometria dos painéis e analisado o cumprimento das principais exigências regulamentares, procedeu-se à sua aplicação num caso particular. O caso de estudo foi proposto pela Casais Engenharia S.A., empresa associada à presente dissertação, que identificou e disponibilizou um projeto com potencial interesse para este tipo de solução.

No seguimento dos pressupostos da pré-fabricação e das condições promotoras do seu uso, foi escolhido o projeto de uma unidade hoteleira. Neste tipo de edifício adequa-se a repetição de soluções, que é tanto mais vantajosa quanto maior for o nº de vezes em que o mesmo elemento tipo é utilizado.

5.1 Estudo do Projeto

Na sequência dos pontos evidenciados, o caso de estudo é uma unidade hoteleira constituída por 5 pisos, sendo o primeiro e parte do segundo piso dedicados ao estacionamento de veículos e os restantes à prática da atividade hoteleira. Visto o foco deste trabalho ser a pré-fabricação de paredes interiores, apenas foram tidos em consideração os pisos correspondentes à atividade hoteleira, constituídos fundamentalmente por quartos. Nestes, são evidentes as características de um projeto favorável à pré-fabricação tais como: repetição de elementos e elevado volume a ser produzido. Na Figura 72 são representadas as plantas originais do projeto, sendo visível um padrão geométrico que se repete entre os quartos, bem como uma repetição entre pisos.



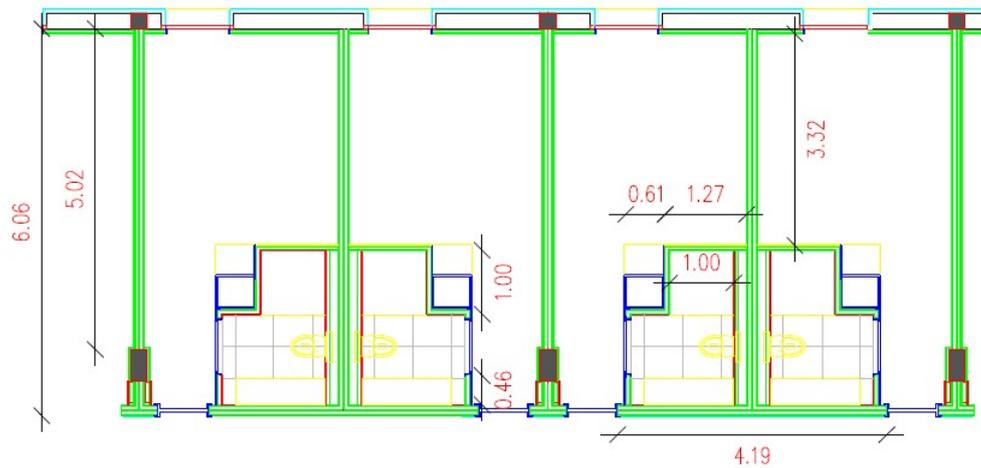
a)

73 encontram-se representadas a verde as paredes de gesso previstas originalmente, a preto os painéis criados e, por último, a laranja, pontos de remate a serem executados no local.

$$\text{Taxa de aplicabilidade} = \frac{L_{\text{Painéis}}}{L_{\text{Total}}} * 100 \quad (19)$$

$L_{\text{Painéis}}$ – Comprimento linear de parede realizado com painéis (m)

L_{Total} – Comprimento linear de parede total (m)



a)



b)

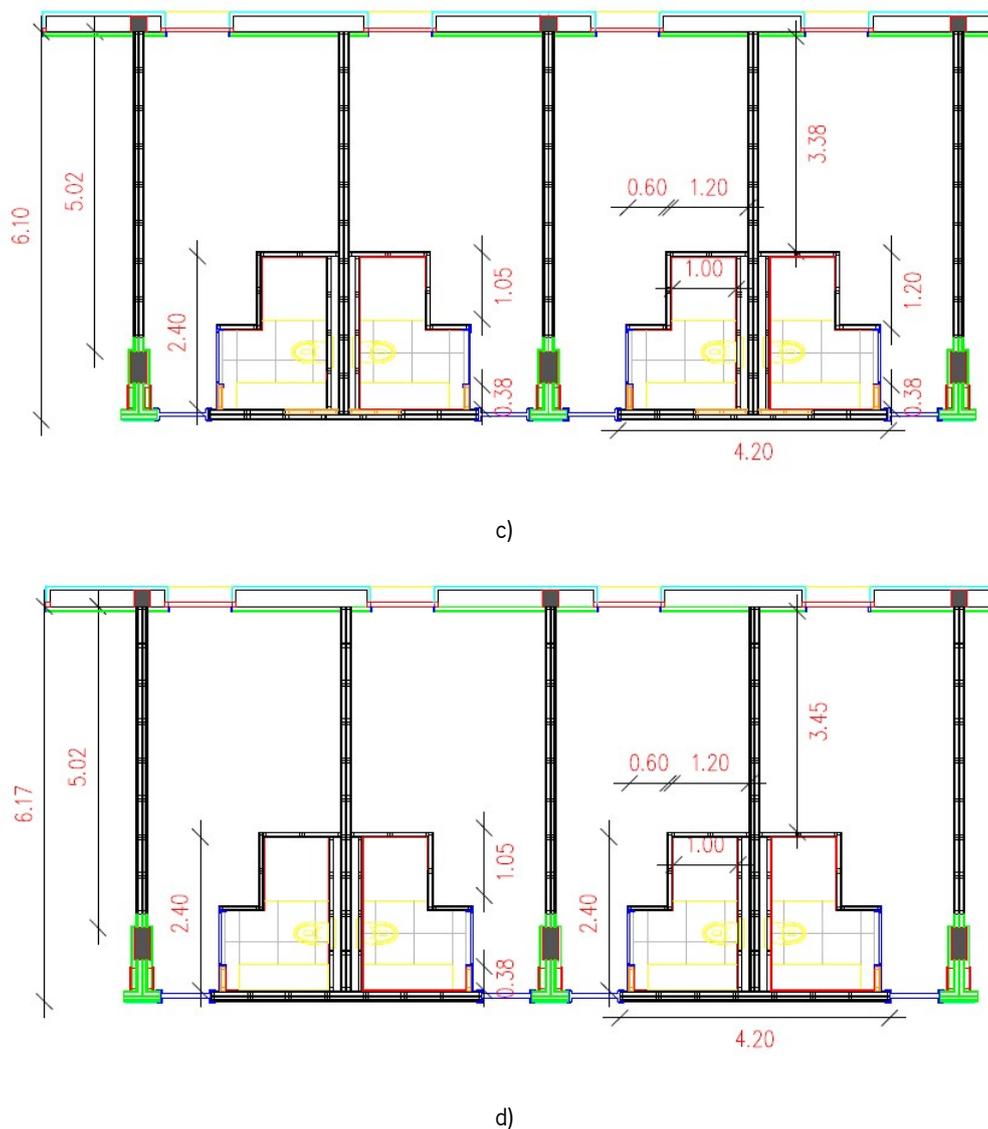


Figura 73 – Ensaio da aplicabilidade dos painéis ao projeto: a) Planta original; b) Configuração 1; c) Configuração 2; d) Configuração 3.

A solução encontrada passa por um aumento de 4 cm dos quartos e por uma leve alteração na proporção das paredes do quarto de banho. Esta solução foi replicada para a globalidade dos quartos, podendo ser consultada no Anexo 2 a planta completa de um piso.

5.1.2 Limitações

Neste ponto são essencialmente abordadas as limitações relativas ao estudo do projeto e aplicação desta solução. Relativamente à ferramenta de desenho bidimensional, esta é limitadora uma vez que gera múltiplas dificuldades:

- visualização da solução;
- elevado número de horas de desenvolvimento;

- necessidade de alteração do posicionamento das paredes, de forma a procurar um aproveitamento máximo;
- contabilização do número de elementos de cada tipo a serem produzidos.

Posto isto, e devido ao facto destas limitações se traduzirem num forte aumento do trabalho em escritório, foi considerado relevante o uso de uma ferramenta BIM.

5.2 Aplicação de ferramentas BIM

A pré-fabricação, conforme foi abordado ao longo do presente documento, é um processo de industrialização da construção, antecipando trabalho e transferindo o local de produção para uma unidade fabril. Porém, foi referido que esse processo envolve um trabalho prévio de planeamento. Assim, esta solução é mais uma das muitas variantes de um projeto, suscetível de discussão entre os múltiplos intervenientes (dono de obra, projetistas, construtores e empresas de manutenção dos edifícios).

À semelhança do ponto 5.1, esta gestão e integração de soluções passa pelo uso de *software* ou outras ferramentas de desenho tradicionais, sendo a comunicação entre diferentes partes baseada no conhecimento e experiências de interpretação dos intervenientes. O fator humano aliado à impossibilidade de gestão eficiente do elevado número de processos leva a uma ineficiência do setor da construção. Estas dificuldades levaram ao desenvolvimento de modelos que proporcionam a agregação de toda a informação, facilitando a partilha da mesma e a interoperabilidade entre os múltiplos intervenientes. O método em causa é denominado de *Building Information Modeling* (BIM).

Posto isto, é do maior interesse modelar a solução de painel pré-fabricado desenvolvido ao longo desta dissertação numa ferramenta BIM, permitindo uma melhor visualização do elemento, a sua adaptação aos espaços definidos e a integração de instalações no seu interior.

5.2.1 Escolha de Software – *Revit*

A aplicação de ferramentas BIM pressupõe a escolha de um *software*, onde seja possível desenvolver os modelos. Esta recaiu sobre o *software Revit 2018* da empresa Autodesk, que a analogamente a outros *software* desta empresa usados anteriormente, são de livre acesso para estudantes.

Esta ferramenta possibilita a representação tridimensional de um projeto, incluindo os mais diversos objetos/elementos, aos quais é possível a adicionar/atribuir informação e características. A adição e gestão de informação são o ponto diferenciador entre os *software CAD (Computer Aided Design)* e os *software BIM*.

O *Revit* caracteriza-se ainda por disponibilizar um grande número de objetos previamente parametrizados, viabilizando a modelação dos mais diversos projetos, bem como a possibilidade de os importar, complementando a biblioteca de objetos existente. No caso dos painéis em estudo, recorreu-se a uma outra funcionalidade do *Revit*, que consiste na criação de novos objetos. Esta última permite a criação de objetos únicos ou de um objeto base que, devidamente parametrizado, se altera em função dos *inputs* do utilizador – exemplos disso são variáveis como a altura, espessura, furacões, entre outras. A modelação no *Revit* é facilitada através dos múltiplos *templates* disponibilizados.

5.2.2 Modelação de painéis

Procedeu-se à modelação dos painéis de parede através da criação de um novo objeto que posteriormente possa ser introduzido em qualquer modelo. Deste modo, o primeiro passo consiste na escolha do *template* de trabalho que melhor se adapta às características do elemento em causa. A seleção deste plano de trabalho é importante, pois, permite predefinir características básicas que facilitam a identificação e a compatibilidade do elemento com as funções que deve possuir, uma vez introduzido num modelo. Assim, em virtude de se tratar de um elemento de parede, recorreu-se ao *template* “*Metric Curtain Wall Panel*”, no qual estão previamente definidos eixos principais que possibilitam a parametrização da altura e da largura.

Com base nos desenhos CAD anteriormente expostos e nas especificações técnicas dos diferentes elementos, executou-se a modelação dos diferentes painéis (tipologias identificadas no decorrer do documento). Concluída a modelação geométrica dos diferentes tipos de painéis foram atribuídos os respetivos materiais às diferentes peças e adicionados elementos como os sistemas de lavatório ou sanitários. Este último passo, apesar da ampla biblioteca do *Revit*, necessitou da criação de novos materiais tais como o aço DX51 e os diferentes derivados do gesso acartonado. De salientar que foi necessária a importação de famílias BIM dos sistemas sanitários, que no presente caso foram disponibilizados por fabricantes como a Geberit e a Roca.

Em função dos materiais definidos e da incorporação de sistemas, foram criadas variantes dos painéis base. Na Figura 74 são visíveis os painéis criados e identificados da seguinte forma:

- Painel 1 – Simples;
- Painel 1 – Simples com uma das faces hidrófuga;
- Painel 2 – Simples;

- Painel 2 – Simples com face hidrófuga;
- Painel 2 – Simples com face hidrófuga + Lavatório;
- Painel 2 – Simples com face hidrófuga + Sanitário.



a)



b)



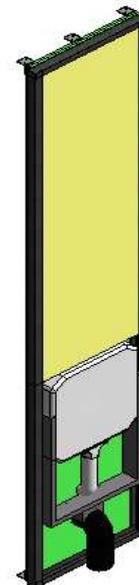
c)



d)



e)



f)

Figura 74 – Modelos dos painéis: a) Painel 1 – Simples; b) Painel 1 – Simples com uma das faces hidrófuga; c) Painel 2 – Simples; d) Painel 2 – Simples com face hidrófuga; e) Painel 2 – Simples com face hidrófuga + Lavatório ; f) Painel 2 – Simples com face hidrófuga + Sanitário.

Todos estes elementos foram guardados sobre o formato *.rfa* distinto do formato *.rvt* no qual são realizados os projetos. Este formato permite ainda que sejam feitas alterações futuras ou que o modelo sirva de base para o desenvolvimento de novos painéis.

5.2.3 Implantação dos painéis no modelo

Após a modelação dos painéis procedeu-se à implantação dos painéis no projeto escolhido na secção 5.1. Apesar do foco ser a implantação dos painéis, foi necessário colocar outros elementos, como a laje de piso, os pilares e as paredes exteriores e estruturais, conforme se mostra na Figura75.

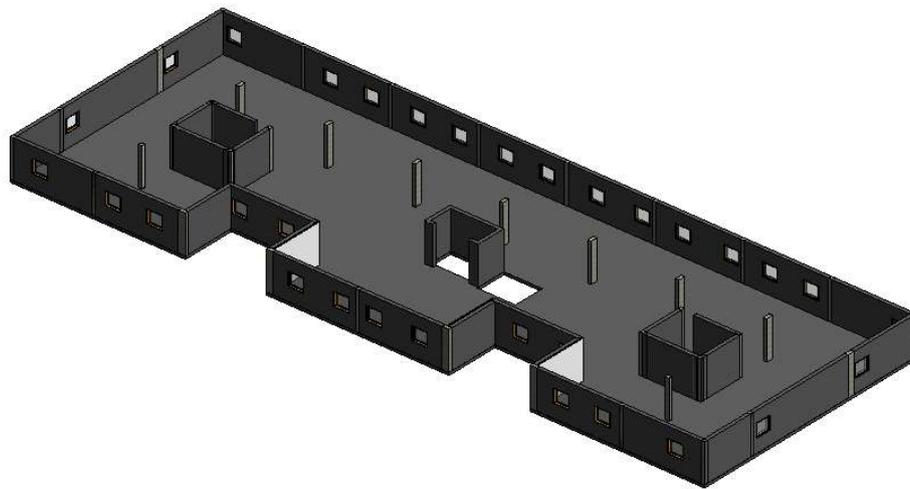


Figura 75 – Modelo base sem paredes interiores (*Revit*).

Definido o piso da unidade hoteleira realizou-se a modelação das diferentes paredes interiores. Esta operação foi executada através da ferramenta “*Wall: Architectural*”, na qual foram previamente criadas paredes com espessuras e camadas correspondentes aos painéis. A sequência de procedimentos usados permite que seja possível a identificação de espaços, bem como uma eventual implementação de elementos como portas ou outro tipo de aberturas. A Figura76 expõe o desenvolvimento do modelo até ao presente ponto.

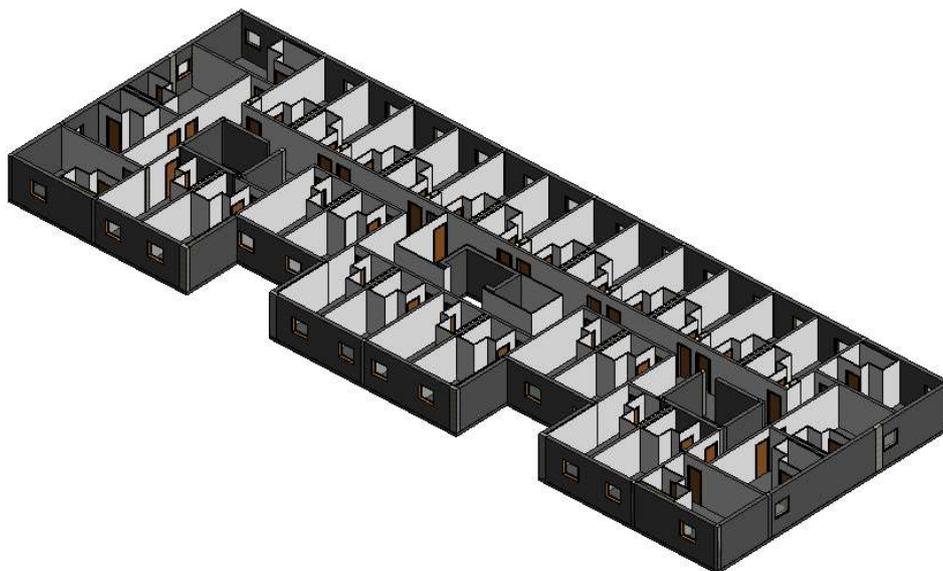


Figura 76 – Modelo base com paredes interiores (*Revit*).

Nesta fase, o modelo já se encontra preparado para a implementação dos painéis, a qual foi realizada segundo as seguintes etapas. A primeira passou por fazer o carregamento dos diferentes ficheiros rfa. criados anteriormente no modelo em desenvolvido. A seguir, criou-se uma malha sobre as paredes interior previamente modeladas, a qual permite a implementação dos painéis, sendo para isso usada a função “Curtain Wall”. No entanto, devem ser previamente criadas *Curtain Wall* personalizadas para cada tipo de painel, sendo em ambas essencial a definição do espaçamento da malha perante as dimensões dos painéis e a configuração de algumas definições permitindo a substituição da parede modelada pelo painel, as quais são expostas na Figura 77.

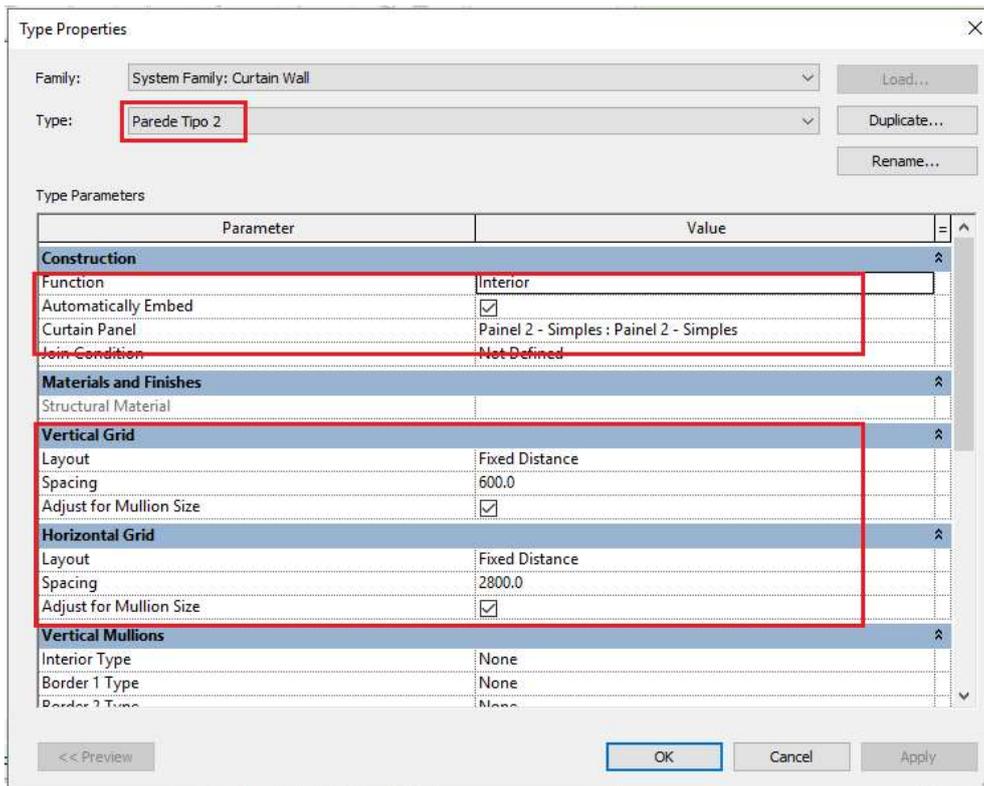


Figura 77 – Propriedades atribuídas à função *Curtain Wall*.

Uma vez definidos os diferentes tipos de parede, o último passo consistiu na aplicação das mesmas, sendo automaticamente substituídas no segmento selecionado, como se mostra na Figura78. É importante referir que as dimensões da parede devem ser verificadas e impostas manualmente (múltiplos de 600 mm) uma vez que o *Revit* realiza ajustes pontuais com a parede base, podendo levar à criação de elementos com uma dimensão distinta, como acontece no exemplo da Figura79.

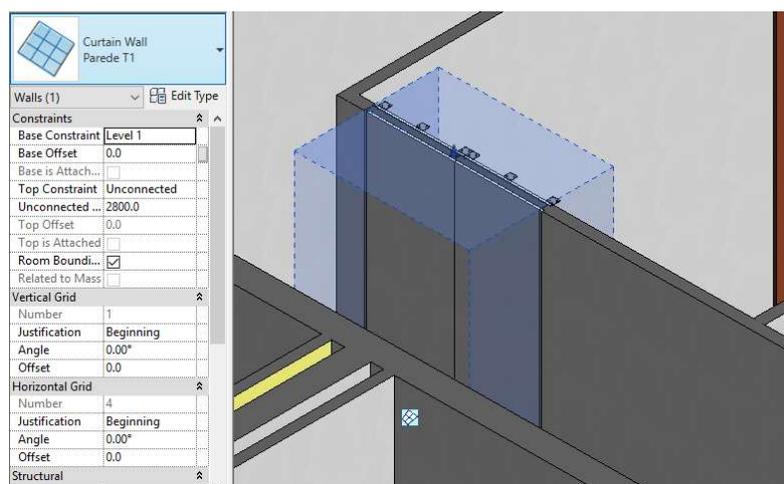


Figura 78 – Implantação de painéis no modelo.



Figura 81 – Detalhe do modelo com sistemas sanitários aplicados.

Finalizadas as várias substituições e ajustes, é possível expor através da Figura 82182 um modelo global com todos os painéis correspondentes às paredes interiores já aplicados.



Figura 821 – Modelo global com painéis aplicados (*Revit*).

5.2.4 Quantificação dos painéis

Neste subcapítulo foi explorada uma funcionalidade do *Revit* que permite determinar o número exato de painéis implantados no projeto e atualizá-lo sempre que necessário. A presente funcionalidade é uma das vantagens do *software*.

O piso em estudo é composto por 32 quartos e respetivos quartos de banho, totalizando uma área bruta de 857 m², tendo sido aplicados 1067 painéis, enumerados na Tabela35.

Foi possível verificar que, com os elementos propostos, a taxa de aplicabilidade é de 82%. A percentagem em falta deve-se a incorporação de portas e ao facto da estrutura de betão armado não possuir um espaçamento totalmente compatível, o que seria solucionável em projetos futuros e facilitado com recurso a ferramentas BIM, que proporcionam uma maior interoperabilidade e comunicação entre os vários intervenientes.

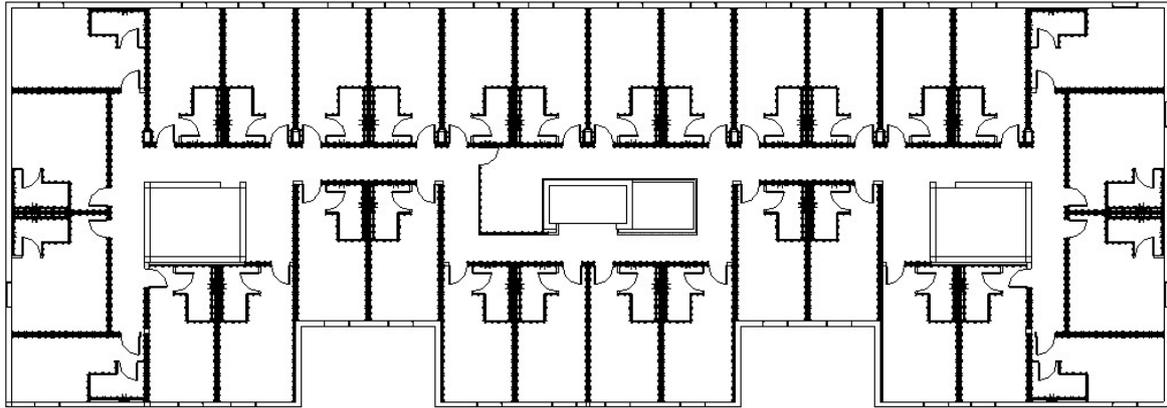
Tabela 35 – Mapa de quantidades de painéis aplicados.

Descrição	Quantidade
Painel 1 – Simples	12
Painel 1 – Simples com uma das faces hidrófuga	158
Painel 2 – Simples	672
Painel 2 – Simples com face hidrófuga	161
Painel 2 – Simples com face hidrófuga + Lavatório	32
Painel 2 – Simples com face hidrófuga + Sanitário	32

5.2.5 Otimização do projeto

O presente ponto pretende avaliar a aplicabilidade dos painéis partindo do pressuposto que o projeto se encontra numa fase inicial de desenvolvimento. Nesta fase é possível conceptualizar a realização de um projeto orientado e com o conhecimento prévio da aplicação deste tipo de elementos. Retomando o modelo anteriormente desenvolvido, procedeu-se a uma série de alterações, nomeadamente a posição dos pilares, as dimensões dos quartos e a dimensão geral do piso. Contudo, partiu-se do pressuposto que estas alterações resultariam de uma interoperabilidade entre os diversos intervenientes, não havendo lugar para alterações drásticas. Assim, foi mantido o mesmo número de quartos, pilares, caixa de escadas e elevadores, tendo sido levemente alterados os seus posicionamentos iniciais e aumentada a área bruta do piso de 857 m² para 876 m². Com isto, foi possível aplicar 1184 painéis, que resultam numa taxa de aplicabilidade de 91%. A presente solução é apresentada na Figura 83283.

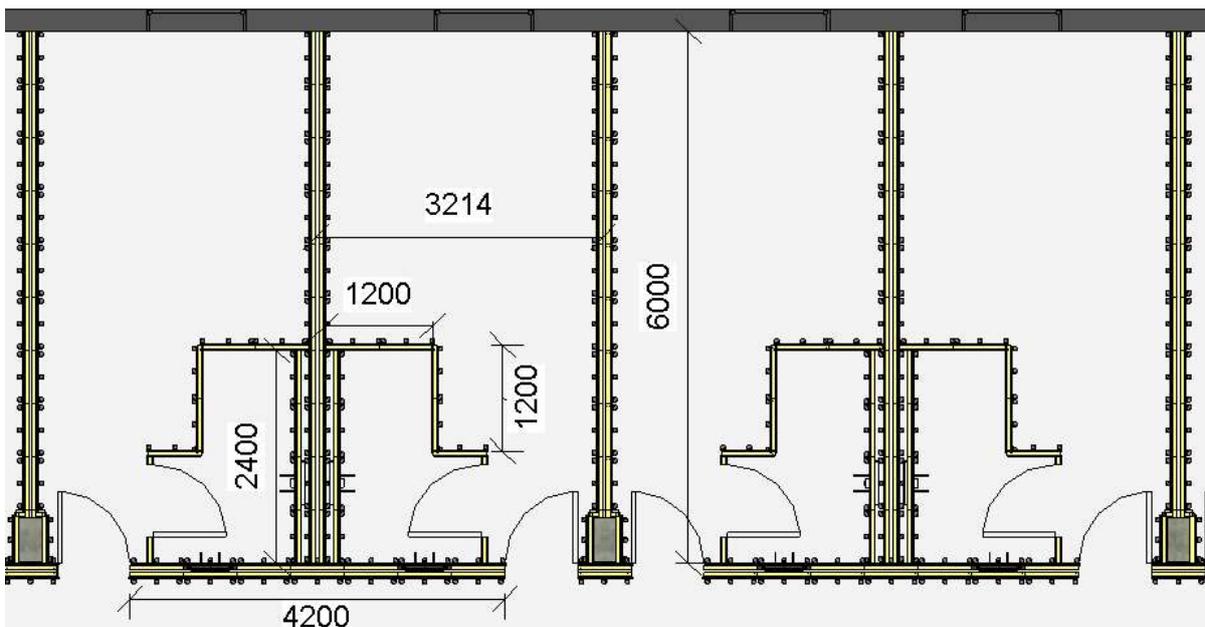
Este processo permitiu, com facilidade, obter uma taxa de aplicabilidade muito elevada. É de referir que no presente caso as portas representam 7,5% do comprimento linear de parede, ficando delegado para obra pouco mais de 1%.



a)



b)



c)

Figura 832 – Representação do modelo otimizado: a) Planta; b) Modelo 3D; c) Detalhe das dimensões dos quartos.

5.2.6 Elementos Adicionais

A modelação dos elementos e a sua aplicação num projeto permitiu identificar algumas lacunas e a necessidade de precaver a criação de elementos adicionais. Estes elementos adicionais são essencialmente de dois tipos: elementos de fixação e elementos de remate para ligação entre painéis.

Para o primeiro caso foi modelada uma fixação em “L” (ver Figura 843). Este passo permite expor o modo de fixação e constatar que as mesmas ficam à vista. Assim, é necessário considerar e avaliar a aplicação de elementos de revestimento (tipo rodapé, friso no teto e tetos falsos) que melhor se adaptem para “dissimular” estes elementos de fixação.

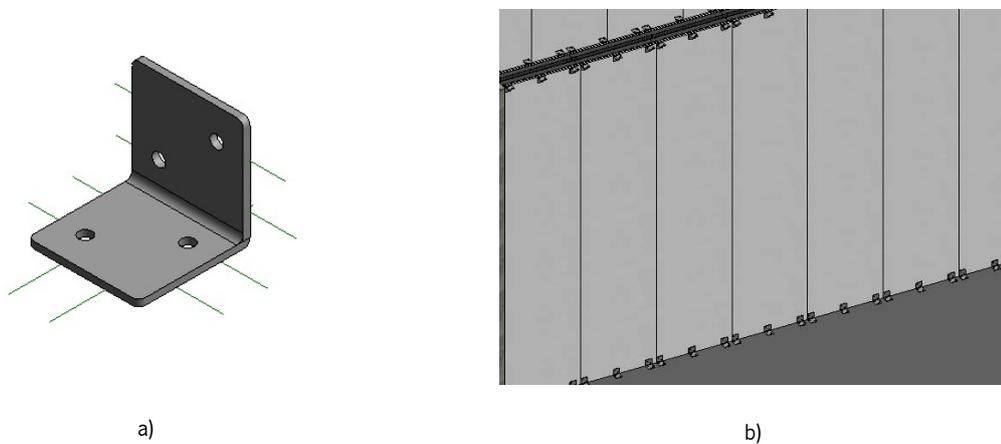
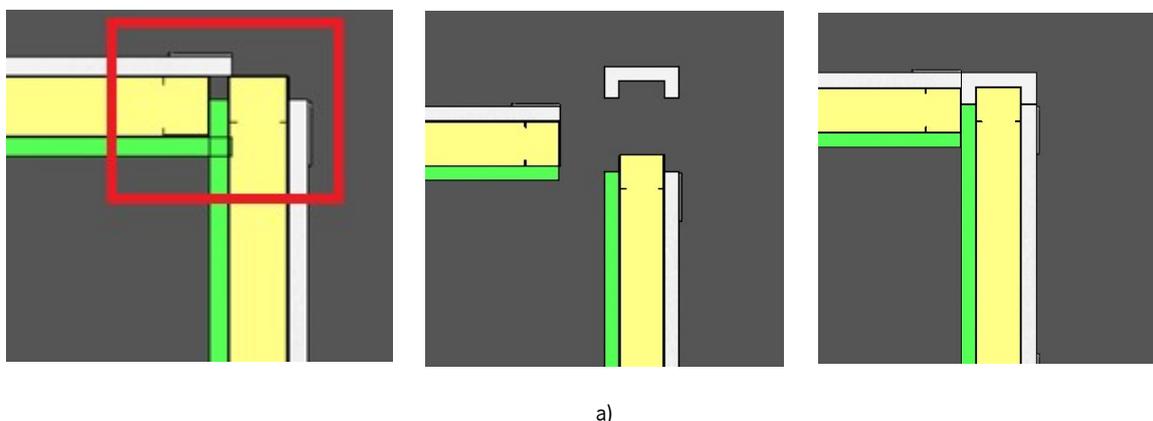


Figura 843 – a) Fixação; b) Aplicação de fixações.

No remate da ligação entre painéis, a ligação macho – fêmea apenas permite ligações lineares, referir que o recurso a este tipo de ligação permite uma descontinuidade entre as faces, de forma a promover o desempenho acústico. Propõe-se a adição de um perfil do tipo C na extremidade fêmea do painel e a execução de ajustes, cortando a(s) aba(s) do encaixe macho. Na Figura foram esquematizadas algumas ligações. Este elemento de remate pode ser também pré-fabricado e aplicado.



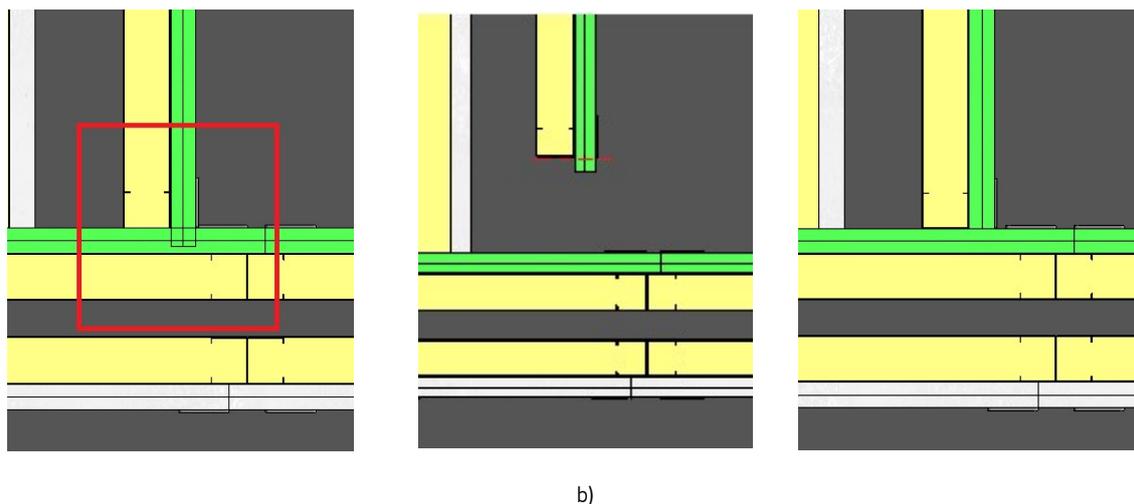


Figura 85 – Sequencia de montagem de ligações: a) ligação em L; b) Ligação em T.

5.2.7 Detalhes da modelação

Este subcapítulo é dedicado à exposição de alguns pormenores ao nível dos painéis modelados e de particularidades do projeto no qual foram aplicados. Relativamente aos painéis, os modelos permitem ter uma maior perceção da incorporação dos sistemas sanitários no painel e constatar que esta leva a que o painel perca parte do seu material isolante e apresente, pontualmente, uma espessura superior à dos perfis metálicos, conforme apresentado na Figura86.

No âmbito do projeto, o facto de se tratar de um prédio dedicado à atividade hoteleira leva a que seja necessário ter em atenção o desempenho das paredes que limitam os quartos, o que levou ao uso de painéis do tipo 2. Porém, nos quartos de banho, devido ao aumento de espessura causado pelo sistema sanitário no painel, a necessidade de acomodar tubagens de águas residuais, a perda de desempenho devido à ausência de isolamento e a emissão de ruído pelo autoclismo surgiu a necessidade de duplicar a parede que acomoda este equipamento. Na Figura 87 é visível esta duplicação de parede, a qual dá origem a uma caixa de ar de 90 mm.

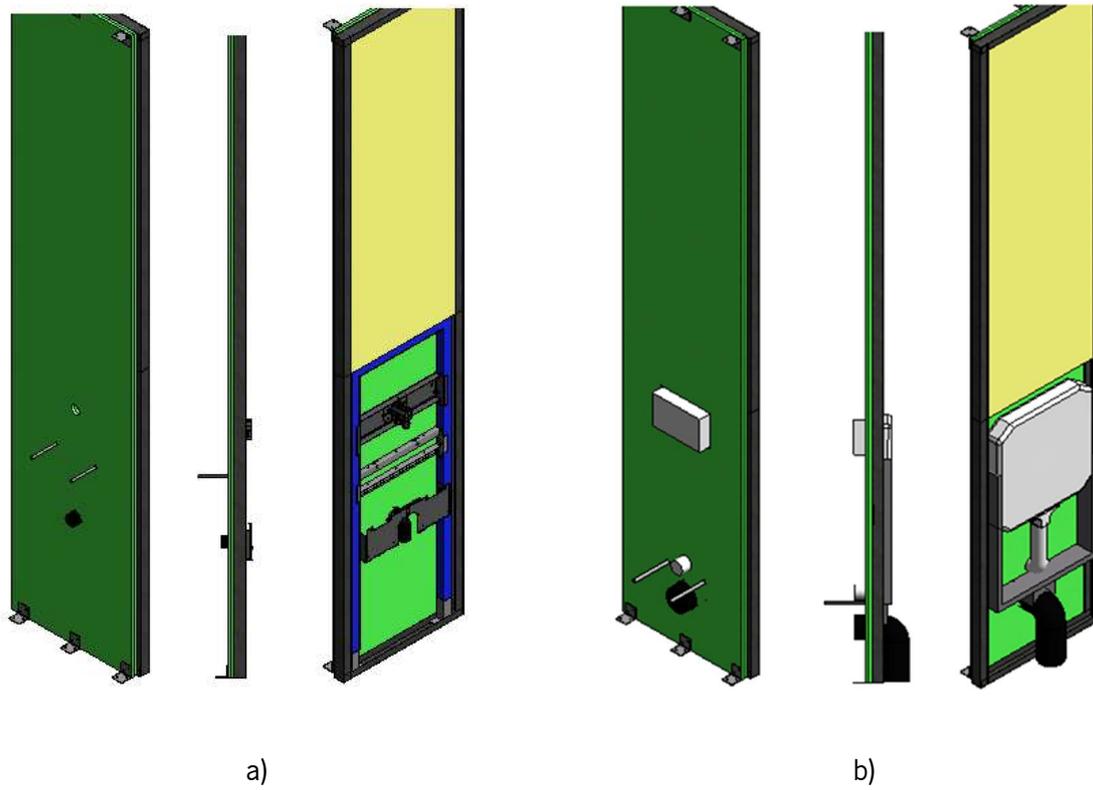


Figura 86 – Vistas: a) Painel 2 – Simples com face hidrófuga + Lavatório ; b) Painel 2 – Simples com face hidrófuga + Sanitário.

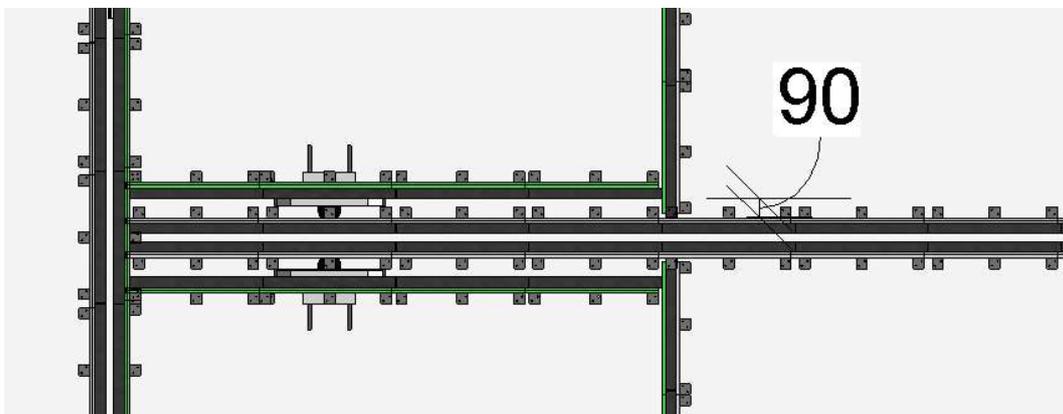


Figura 87 – Detalhe caixa de ar quarto de banho.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

A pré-fabricação associada à construção é uma temática estudada há diversas décadas e à qual o mercado tem vindo a prestar especial atenção. Nos últimos anos, em resultado dos custos crescentes associados à mão de obra, tem-se reforçado o interesse por estas soluções, pelo que se justifica plenamente o seu estudo e desenvolvimento.

Através da revisão bibliográfica desenvolvida ao longo do Capítulo 2, foi possível compreender vários conceitos importantes à pré-fabricação na construção, bem como identificar o potencial de desenvolvimento de soluções deste tipo. Verifica-se que este tipo de soluções demonstra ter um potencial claro para enfrentar os problemas de falta de mão-de-obra e eficiência da construção, uma vez que a transferência de atividade para uma unidade fabril viabiliza trabalhadores mais especializados, repetição de tarefas, controlo de qualidade, otimização na utilização de materiais, entre outras vantagens. Ainda no Capítulo 2, conclui-se que devido à sua abundância e potencial de repetibilidade, as paredes interiores são elementos especialmente favoráveis a este método construtivo. Como tal, efetuou-se um levantamento das várias exigências técnicas, métodos de avaliação e enquadramento normativo. Através deste levantamento verificou-se há um alargado número de parâmetros técnicos a serem cumpridos, e um leque alargado de documentos normativos aplicáveis. De igual modo, foi analisada e apresentada uma amostra de soluções existentes no mercado atual, o que permitiu identificar diferentes tipologias e materiais, bem como as respostas dadas às diferentes exigências técnicas e especificidades associadas aos materiais de base utilizados. A recolha bibliográfica incluída neste capítulo direcionou o trabalho desenvolvido nos seguintes capítulos.

O Capítulo 3 foi dedicado à conceção e desenvolvimento de uma solução de painel pré-fabricado, abordando a sua tipologia, constituição e dimensões. A presente abordagem requereu um estudo das múltiplas condicionantes, destacando-se condicionantes geométricas e condicionantes relacionadas com a tipologia do painel. Estas tiveram por base a consideração das diferentes etapas envolvidas no processo: conceção, fabrico, transporte e aplicação de painéis pré-fabricados. Concluiu-se que as dimensões do painel tipo são essencialmente restringidas pela sua aplicação manual e pelo enquadramento/compatibilização com a arquitetura. Esses parâmetros/condicionantes levaram a que o painel apresentasse uma geometria de $2800 \times 600 \text{ mm}^2$. Do mesmo modo, foram analisadas as restrições relativas à espessura e à tipologia do painel, aferindo-se mínimos de desempenho. Fez-se

ainda uma revisão bibliográfica voltada para o desempenho ao fogo e o desempenho acústico do painel. Após uma leitura dos diversos documentos, concluiu-se que um painel de parede interior que possa ser utilizado de forma abrangente em vários projetos, tem de apresentar resistência ao fogo mínima de 60 min e isolamento a sons de condução aérea padronizado de 50 dB. Contudo, visto o valor normalizado para a acústica ser um valor resultante de uma medição no local de aplicação e dependente do mesmo, não é possível determinar um valor único para o índice de redução sonora ponderada. Neste sentido, estudaram-se os diversos materiais e configurações e concluiu-se que não seria possível obter uma solução única e viável para as múltiplas situações de aplicação num edifício. Assim, ao contrário do que aconteceu com a geometria, para a qual foi possível obter um compromisso entre as várias restrições encontradas, a amplitude dos valores de isolamento acústico requeridos ditaram o desenvolvimento de dois painéis, que por sua vez proporcionam 3 tipologias.

Este capítulo permitiu balizar as dimensões e configurações que os painéis iriam assumir partindo do pressuposto que a solução seria constituída de perfis de aço leve e gesso cartonado. No entanto, em virtude do trabalho realizado, verifica-se que as condicionantes expostas são transversais ao desenvolvimento de múltiplas soluções de painel pré-fabricado, sendo mais ou menos restritivas em função dos materiais estipulados, exigências técnicas pretendidas e métodos de aplicação definidos (manuais ou mecânicos).

Na fase final deste capítulo, procedeu-se ao estudo da ligação entre painéis e a estrutura envolvente. A ligação entre painéis pré-fabricados é habitualmente do tipo macho – fêmea, verificando-se que esta é a ligação mais viável para este elemento. Esta conclusão advém do facto das placas de gesso requererem uma descontinuidade entre as faces, de forma a promover o desempenho acústico. Relativamente à ligação à estrutura foi determinada que essa deveria ser realizada através da adição de elementos. Isso deve-se ao facto de que a estrutura portante do painel está recoberta por placas de gesso, inviabilizando o acesso ao seu interior, sendo esta solução, por analogia a outros autores e outras soluções presentes no mercado, a forma mais eficiente e simples de garantir uma boa ligação do elemento à envolvente.

O Capítulo 4 foi dedicado ao estudo de viabilidade dos diferentes tipos de painel propostos no Capítulo 3. Efetuou-se uma exposição dos métodos de avaliação das principais exigências regulamentares, das quais se destacam: o desempenho acústico, o desempenho ao fogo, a estabilidade e o transporte. Relativamente ao desempenho acústico, a incerteza do local de aplicação e das especificidades dos elementos envolventes não permite garantir que um valor de 50 dB para o índice de redução sonora ponderada seja suficiente. Assim, após uma análise das presentes variáveis foi concluído que o valor de

57 dB seria mais coerente, permitindo abranger a globalidade dos espaços. Posto isto, foram estudados métodos analíticos que permitem pré-avaliar o desempenho dos painéis, dos quais se destacam o método de Sharp e o método de Meisser. Ambos deram como resultado valores relativamente próximos, sendo estes ligeiramente superiores quando se utiliza o método de Meisser. No entanto, para a tipologia 2 e 3 os valores obtidos são significativamente mais baixos do que os valores de referência (para soluções similares). Visto o método de Sharp ser mais adaptado à presente solução foi possível executar uma segunda avaliação com o método de Sharp, na qual foi considerada a duplicação da massa e a desconexão total dos painéis, resultando numa melhoria dos valores. É importante referir que ambos os métodos apresentam limitações relativas aos dados de entrada: não permitem a variação do tipo de material absorvente e não têm em conta a junta entre painéis. Porém, os resultados obtidos são satisfatórios e permitem validar a tipologia 3, que obteve um valor de 60 dB para índice de redução sonora ponderada. A tipologia 1, com um valor de 41 dB, continua a ser uma solução com especial interesse, visto ser a solução pré-fabricada mais completa e o seu desempenho ser satisfatório para divisórias sem enquadramento normativo.

Outro ponto avaliado foi o desempenho do painel ao fogo, através do recurso ao método exposto no International Building Code. Este, apesar da sua simplicidade, indicou um desempenho superior a 60 min para os painéis apresentados, podendo chegar a 90 min para as tipologias 2 e 3.

Numa segunda fase do Capítulo 4, abordou-se o comportamento mecânico dos painéis quando aplicados no local ou numa situação de transporte, através de análises computacionais. Nesse sentido, foi desenvolvido um modelo para cada painel no *software Robot Structural Analysis*. Este modelo exigiu a criação dos diferentes materiais estruturais do painel. Destacam-se as placas de gesso, que são um elemento composto e que apresenta anisotropia das lâminas de cartão. Por comparação com ensaios realizados por autores estudados, concluiu-se que o patamar elástico pode ser traduzido por um material homogêneo com módulo de elasticidade de 2,12 GPa. Depois de analisados e definidos os materiais procedeu-se às diferentes simulações. Os resultados das simulações apresentaram um valor satisfatório relativamente ao carregamento uniforme distribuído, expondo um deslocamento limite para valores de cargas que estão próximos do dobro do que é exigido. Numa análise adicional relativa a cargas verticais e horizontais verificou-se uma fragilidade clara da solução, em que as placas de gesso atingem o seu limite para deslocamentos muito baixos. Segundo a ETAG 003, a solução deve ser avaliada ao impacto lateral e a cargas verticais excêntricas. Visto estas avaliações serem do âmbito prático e dinâmico, recorreu-se a estudos similares para validar esses pontos. Foram simuladas cargas excêntricas alcançando valores satisfatórios para um modelo alterado (aplicação de um reforço) ou pela dissipação

da carga por uma área de contacto. A dissipação da carga numa área de contacto de 2500 mm² revelou-se suficiente para alcançar a viabilidade do painel, permitindo registar valores de tensão inferiores a 3,50 MPa. Por último, foram executadas análises de situações de transporte (mecânico e manual), nas quais se verificou que o painel apresenta um bom desempenho. Perante situações de transporte manual dos painéis propostos, os esforços são de apenas 15% da capacidade do elemento. Relativamente ao manuseamento realizado com recurso a equipamento mecânico os resultados são igualmente bons, dos quais se determinou a capacidade de empilhar 19 painéis do tipo 1 e 12 do tipo 2 permitindo formar lotes para serem transportados. Estes resultados mostram que um lote permite realizar 11,4 m de parede com painéis do tipo 1 e 7,2 m lineares de parede com painéis do tipo 2. Assim, um camião pode transportar entre 115 m a 182 m de parede.

Finalmente, o quinto capítulo foi dedicado ao estudo de uma possível aplicação dos elementos idealizados. O primeiro ponto passou por uma análise do projeto proposto, no qual se verificou um vasto potencial para a aplicação destas soluções. Porém, as dimensões encontradas no projeto mostraram que seria inevitável realizar pequenas alterações à arquitetura em prol de uma maior adaptabilidade. A seguir, foram desenvolvidos alguns ensaios de possíveis disposições dos painéis. Estes ensaios foram inicialmente realizados através de ferramentas CAD, nas quais foi possível prever uma possível disposição. No entanto, o processo moroso e as limitações destas ferramentas não permitiram a exposição de resultados claros. Nesse sentido, foi decidido avançar para o desenvolvimento de um modelo tridimensional. Este modelo incluiu a modelação individual e parametrizada de cada painel e a integração de sistemas. Após o desenvolvimento dos diferentes painéis, procedeu-se à sua aplicação no modelo, obtendo-se uma taxa de aplicabilidade de 82% nas paredes interiores. A aplicação desta ferramenta permitiu a quantificação automática dos diferentes painéis e a possibilidade de serem obtidas taxas de aplicabilidade ainda superiores (mais de 90%) quando o projeto é desenvolvido de raiz com recurso a elementos de painel pré-fabricados.

6.2 Limitações

No decorrer do presente trabalho foram sentidas algumas limitações, que resultaram do extenso trabalho de recolha bibliográfica, do conhecimento dos softwares e da abordagem aos métodos analíticos utilizados.

A primeira limitação sentida residiu no conjunto alargado de documentos normativos existentes e nas dificuldades ao seu acesso. Nesse sentido, foi prestada especial atenção às normas europeias. Contudo,

não foi possível garantir a obtenção da totalidade dos documentos normativos. No mesmo âmbito, o alargado número de soluções disponíveis no mercado não permitiu a sua análise integral, nem garantir a inexistência de soluções divergentes das tipologias expostas.

Outro ponto residiu no conhecimento de métodos de avaliação dos painéis. Nesse sentido, foram estudados diferentes métodos analíticos, registando-se limitações na incorporação das diferentes características dos materiais.

Por último, é de referir o tempo limitado dedicado ao dimensionamento do painel, que se refletiu numa falta de detalhe e ausências de dimensionamento das ligações, tanto ao nível da própria constituição do painel assim como da ligação do mesmo à sua envolvente.

6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Com o decorrer desta dissertação e com o intuito de complementar o trabalho realizado é possível identificar aspetos que merecem ser aprofundados e propor algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Estudo e dimensionamento das diferentes ligações existentes nos painéis e, caso se justifique, realização de protótipos para ensaios, a fim de aferir a sua convergência com os resultados estimados;
- Desenvolvimento da pré-fabricação dos painéis, através do estudo de métodos e planos de produção e aplicação, através dos quais seriam determinados rendimentos de mão de obra e rendimentos de materiais . Estes últimos permitiriam o estudo económico da viabilidade da solução;
- Complementação e melhoria dos elementos de painel propostos ou soluções análogas através do desenvolvimento de sistemas e ligações laterais que permitam a ligação *plug-in* de diferentes redes elétricas, de abastecimento de água e de saneamento;
- Realização de estudos detalhados sobre a influência das juntas entre painéis no seu desempenho e consequentes melhorias que possam ser aportadas;
- Estudo e exposição de métodos de que permitam pré-avaliar o desempenho de um painel de parede pré-fabricado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acker, A. (2002). *Manual de Sistemas Pré-Fabricados de Concreto*. Tradução: Marcelo Ferreira. The International Federation for Structural Concrete(FIB). Suíça
- AENOR. (2013). *UNE 102043: Montaje de los sistemas constructivos con placa de yeso laminado (PYL)*.
- Almeida, M e Silva, S. (s.d.). *Fisca das Construçoes – Apontamentos da disciplina*. Universidade do Minho
- Almeida, M. (2009). *Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico – Lisboa.
- ANPC. (2013). *Segurança Contra Incêndio em Edifícios – Nota técnica n.º 05 Locais de risco*. Autoridade Nacional de Protecção Civil
- Araújo, L. (2016). - *Caracterização de uma biblioteca de paredes na metodologia BIM*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico – Lisboa.
- Astudillo, J. García, M. Sacristan, J. e Uranga, N. (2018). *New Biocomposites for Innovative Construction Façades and Interior Partitions*. DOI: 10.7480/jfde.2018.2.2104
- Benouis, A. (1995). *Comportement mécanique des ouvrages en plaques de plâtre sur ossature métallique*. Dissertação de Doutoramento. École Nationale des Ponts et Chaussees
- Bies, D. e Hansen, C. (2003). *Engineering Noise Control – Theory and Practice*. University of Adelaide, Australia
- Bouterf, A. (2015). *Comportement mécanique de la plaque de plâtre étudié par tomographie et essais mécaniques in-situ*. Dissertação de Doutoramento. École Normale Supérieure de Cachan
- Brandão, M. e Sousa, M. (2013). *Arquitetura, conceito e preconceito*. Casa de Madeira 135 – 144. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa
- Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., e Thiel, A. (2016). *Cross laminated timber (CLT): overview and development*. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3), 331–351. doi:10.1007/s00107-015-0999-5
- Brown, D. Pope, R. e Purvey, P. (1997). *SCI publication 178 – Design for Construction*. The Steel Construction Institute

- Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). (2014). *Cahier des prescriptions techniques communes aux procédés de murs à coffrage intégré*. Cahier 3690_V2
- Costa, A. (2008). *Desenvolvimento e Caracterização do comportamento acústico de um novo bloco para paredes duplas.*
- Costa, A. (2013). *Construção de edifícios com cross laminated timber (CLT)*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Couto, J. & Couto, A. (2007a). *Vantagens Produtivas e Ambientais da Pré-fabricação*. Departamento de Engenharia Civil: Universidade do Minho.
- Couto, J. & Couto, A. (2007b). *Os benefícios ambientais e a racionalização do efeito de aprendizagem na indústria de pré-fabricação*. Departamento de Engenharia Civil: Universidade do Minho.
- Davies, J. (2001). *Lightweight Sandwich Construction, Osney Mead, Oxford OX2 0EL: Blackwell Science Lta,*
- Decreto-Lei n.º 330/93 de 25 de setembro. *Diário da República n.º 226/1993, Série I-A*. Ministério do Emprego e da Segurança Social. Lisboa
- Decreto-Lei n.º 1532/2008 de 29 de dezembro. *Diário da República n.º 250/2008 – Série I*. Ministério da Administração Interna. Lisboa
- Decreto-Lei n.º 220/2008 de 12 de novembro. *Diário da República n.º 250/2008 – Série I*. Ministério da Administração Interna. Lisboa
- Decreto-Lei n.º 224/2015 de 9 de outubro. *Diário da República n.º 198/2015 – Série I*. Ministério da Administração Interna. Lisboa
- Decreto-Lei n.º 38382 de 7 de Agosto. *Diário do Governo n.º 166/1951 – Série I*. Ministério das Obras Públicas. Lisboa
- Destro, R. Boscato, G. Mazzali, U. Russo, S. Peron, F. e Romagnoni, P. (2015). *Structural and Thermal Behaviour of a Timber-concrete Prefabricated Composite Wall System*. Energy Procedia, 78, 2730–2735. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.614
- EN 10140-2. (2010) *Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements*
- EN 12524. (2001). *Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design value*

- EN 12664 (2001). *Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Dry and moist products of medium and low thermal resistance*
- EN 12667 (2001). *Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Products of high and medium thermal resistance*
- EN 12939. (2000). *Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Thick products of high and medium thermal resistance*
- EN 13501. (2009). *Fire Classification Of Construction Products And Building Elements*
- EN 1363-1. (2012). *Fire resistance tests - Part 1*
- EOTA. (2003). ETAG 016-1: Self-supporting composite lightweight panels – part 1: General.
- EOTA. (2003b). *TR 001 - Determination of impact resistance of panels and panel assemblies.*
- EOTA. (2012). *ETAG 003: Internal partition kits for use as non-loadbearing walls*
- EOTA. (2013). *Technical report 35 - Rules for extended application of test results of fire resisting elements.*
- EOTA. (2015). *Tecnical Report 34 -General BWR3 Checklist for EADs/ETAs Dangerous substances*
- European light steel construction association (LSK), (2005). *European Lightweight Steel-framed Construction – Bélgica*
- Faria, J. (1996). *Divisórias Leves Prefabricadas*. Dissertação de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Departamento de Engenharia Civil.
- Faria, R. (2014). *Construção com Painéis Sanduíche de Silicato de Cálcio, Cimento e EPS*. Dissertação de Mestrado. Universidade da Madeira
- Ferreira, P. e Mendes, P. (2013). *Divisórias de Compartimentação Leves – Relatório de Investigação Aplicada*. Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção. Coimbra
- Fundación Confemetal (2010). *Manipulación manual de cargas: problemática y soluciones preventivas en el sector del metal (mmc-metal)*. Madrid – Espanha

- Gerlich, T., Collier, R., e Buchanan, H. (1996). *Design of Light Steel-framed Walls for Fire Resistance*. *Fire and Materials*, 20(2), 79–96. doi:10.1002/(sici)1099-1018(199603)20:2<79::aid-fam566>3.0.co;2-n
- Gorgolewski, M. e Couchman, G. (2003). *SCI publication 320 – Acoustic Performance of Light Steel Framed Systems*. The Steel Construction Institute
- Gyptec. (2017). *Manual Técnico – Instalação de Sistemas em Placas de Gesso*.
- Harmathy, T., Sultan M. e MacLaurin, J. (1987). *Comparison of Severity of Exposure in ASTM E 119 and ISO 834 Fire Resistance Tests*, *Journal of Testing and Evaluation* 15, no. 6 371-375. doi:10.1520/JTE11036J
- International Building Code (IBC). (2017). *International Code Council, Inc., Country Club Hills. IL – E.U.A*
- ISO. (1988). *ISO 7892:1988 – Vertical building elements – Impact resistance tests – Impact bodies and general test procedures*
- ISO. (1990). *ISO/DIS 8413:1990 – Forms design – Basic layout*
- ISO. (1997). *EN/ISO 8990:1997 – Thermal Insulation - Determination Of Steady-State Thermal Transmission Properties - Calibrated And Guarded Hot Box*
- ISO. (2001). *EN/ISO 13788:2001– Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods*
- ISO. (2001a). *EN/ISO 12572:2001 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties*
- ISO. (2001b). *EN/ISO 13788:2001 – Performance Standards in Building - Partitions made from Components – Impact Resistance Tests*
- ISO. (2002). *ISO/DIS 12055:2002 – Building Construction - Guardrail Systems And Rails For Buildings*
- ISO. (2003). *EN/ISO 354:2003 – Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room*
- ISO. (2007a). *ISO 10211:2007 – Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations*
- ISO. (2007b). *ISO 6946:2007– Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method*

- Jorge, L. (2013). *Edifícios construídos com painéis de madeira lamelada-colada cruzada (X-Lam)*. Universidade do Minho - Seminário Casas de Madeira p.49-62
- Keerthan, P. e Mahendran, M. (2012). *Numerical modelling of non-load-bearing light gauge cold-formed steel frame walls under fire conditions*. *Journal of Fire Sciences*, 30(5), 375–403. doi:10.1177/0734904112440688
- Lawson R. (2009). *Sustainability of Steel in Housing and Residential Buildings*, The Steel Construction Institute, SCI Publication P370
- Lawson, R. e Way, A. (2012). *Technical Information Sheet ED016 – Fire Safety of Light Steel Construction*. The Steel Construction Institute.
- Long, M. (2006). *Architectural acoustics*. Elsevier/Academic Press. Amsterdam
- Lopes, G., Vicente, R., Azenha, M. e Ferreira, T. M. (2018). *A systematic review of Prefabricated Enclosure Wall Panel Systems: Focus on technology driven for performance requirements*. *Sustainable Cities and Society*, 40, 688–703. doi:10.1016/j.scs.2017.12.027
- Manalo, A. (2013). *Structural behaviour of a prefabricated composite wall system made from rigid polyurethane foam and Magnesium Oxide board*. *Construction and Building Materials*, 41, 642–653. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.12.058
- Marques, N. (2012). *Painéis de fachada em betão pré-fabricado : Comportamento térmico e estrutural*.
- Mateus, D. (2008). *Acústica de edifícios e controlo de ruído*. Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra
- Mateus, R. (2004). *Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho – Braga
- Migliano, L. (2007). *Rapport technique Prémurs/Prédalles*. l'Ecole Technique de la Construction de Fribourg – Suíça
- Mobili, S., Galán-Marin, C. e Rivera-Gómez, C. (2018). *A New Affordable Masonry System Based on Unfired Clay Sandwich Panel*. DOI: 10.3390/proceedings2221378
- Moreira, M. (2012). *Utilização de perfis enformados a frio em obras de reabilitação*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico – Lisboa.

- Neves, S. (2011). *Estudo da aplicabilidade de sistemas construtivos no desempenho da sustentabilidade na Engenharia Civil*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico – Lisboa.
- Nichias, L. (2004). *Calcium silicate board and method of manufacturing* - Patente EP 1 142 848 B1, E.P. Office, Editor.
- Noh, M. S. M., Ahmad, Z., Ibrahim, A. e Walker, P. (2016). *Development of New Prefabricated Wall Constructed Using Wood-wool Cement Composite Panel*. *Procedia Environmental Sciences*, 34, 298–308. doi:10.1016/j.proenv.2016.04.027
- North American Steel Framing Alliance (NASFA). (2000). *Low-Rise Residential Construction – Details*. Publication NT6-00, Washington DC
- Oliveira, F. (2014). *Resistência ao fogo de alvenarias sem função estrutural*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto – Porto.
- Pauchet, W. (2004). *Techniques du bâtiment : Construire en béton armé*. <https://www.techniques-ingenieur.fr>
- Piloto, P., Khetata, M. e Gavilán, A. (2017). *Fire performance of non loadbearing light steel framing walls - numerical simulation*. Publ. INEGI/FEUP
- Pires, J. (2013). *O método prescritivo na construção de moradias em aço leve*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico – Lisboa.
- Resendiz-Vazquez, A. (2010). *L'industrialisation du bâtiment : le cas de la préfabrication dans la construction scolaire en France (1951-1973)* - Conservatoire national des arts et métiers (CNAM) - França
- Santos, F. e Silva, L. (2011). *Manual de execução de estruturas metálicas*. Associação Portuguesa de Construção Metálicas e Mistas (CMM) – Coimbra
- Schulitz, H., Sobek, W. e Habermann, K. (2003). *Construire en Acier*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Suíça
- Sharp, B., Kasper, P. e Montroll, M. (1980). *Sound transmission through building structures: review and recommendations for research*. Penn State University

- Sousa, J. (2008). *Caracterização e desenvolvimento do comportamento acústico de um Sistema de divisórias ligeiras a base de espumas de poliuretano*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Sousa, J. (2015). *Painéis Compósitos de Betão Leve Comportamento estrutural*. Dissertação de Mestrado. Universidade da Madeira
- Thormark, C. (2006). *The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building*. *Build. Environ.* doi: 41, 1019–1026, doi:10.1016/j.buildenv.2005.04.026.
- Trigo, J. (1976). *1as Jornadas EngCivil_Industrializacao da construção de edifícios*. Instituto superior de engenharia de lisboa - Lisboa
- Veljkovic, M. e Johansson, B. (2006). *Light steel framing for residential buildings*. *Thin-Walled Structures*, 44(12), 1272–1279. doi:10.1016/j.tws.2007.01.006
- Wattick, J. A. e Chen, A. (2017). *Development of a prototype fiber Reinforced Polymer – Concrete Filled wall panel*. *Engineering Structures*, 147, 297–308. doi:10.1016/j.engstruct.2017.05.053
- Way, A. e Couchman, G. (2008). *SCI publication 372 – Acoustic Detailing For Steel Construction*. The Steel Construction Institute.

Referências da Web

- Alpha Beton. (2016). *Documentation Technique Prémurs*. Obtido em: <https://www.alphabeton.eu/telechargements/>. (Acedido em 17-03-2019)
- APSEI. (2019). *Estatísticas – Incêndios Urbanos*. Obtido em: – <https://www.apsei.org.pt/recursos/estatisticas/>. (Acedido em 27-02-2019)
- Futureng. (2019). *Light Steel Framing – Materiais*. Obtido em: <http://www.futureng.pt/materiais>. (Acedido em 09-05-2019)
- Geberit. (2019). *Sistemas de Instalação Geberit*. Obtido em: <https://www.geberit.pt/produtos/sistemas-de-instalacao/>. (Acedido em 23-07-2019)
- Grōwancrok. (2019). *Painéis Sandwich*. Obtido em: <https://www.growancork.com/produto/paineis-sandwich-w1c-2/>. (Acedido em 13-02-2019)

Isopan. (2016). Manuel Technique – Isofire Wall. Obtido em: <https://www.isopan.fr/download/fiches-techniques>. (Acedido em 05-02-2019)

KLH. (2019). Dimensões e Vantagens CLT. Obtido em: <https://www.klh.at/fr/product/>. (Acedido em 01-03-2019)

Knauf. (2019). Placas de Gesso. Obtido em: <https://www.knauf.pt/solucoes/placas/gesso-laminado/>. (Acedido em 05-03-2019)

Manitou. (2019). Manipuladores Telescópicos. Obtido em: <https://www.manitou.com/pt/s/U89ybCYAACoAdl8Q>. (Acedido em 10-04-2019)

Masterpanel. (2015). Master-Modul Modular Construction Panels. Obtido em: <https://masterpanel.es/en/products/modular-construction-panels/master-modul-modular-construction-panels/>. (Acedido em 19-02-2019)

Modupainel. (2017). Painéis de Betão Leve. Obtido em: <http://www.modupainel.com/PT/produtos/89/painéis-de-betao-leve>. (Acedido em 28-02-2019)

Pladur. (2018). Manual Pladur – Normas, produtos e sistemas. Obtido em: <https://www.pladur.pt/pt-pt/descargas>. (Acedido em 26-04-2019)

Research Institutes of Sweden – RISE. (2017). Reaction to fire of construction products. Obtido em: https://www.sp.se/en/index/services/firetest_building/firetest_bu%C3%ADlding/SIS650082/Sidor/default.aspx. (Acedido 04-03-2019)

Simonin Wood. (2016). Sapisin: The self-standing panel, simple to install. Obtido em: <https://www.simonin.com/en/floor-partition/sapisin-panels/>. (Acedido em 12-02-2019)

Somundy. (2019). Construção Panelized - A Descrição. Obtido em: <http://somundy.com/panelization/>. (Acedido em 20-02-2019)

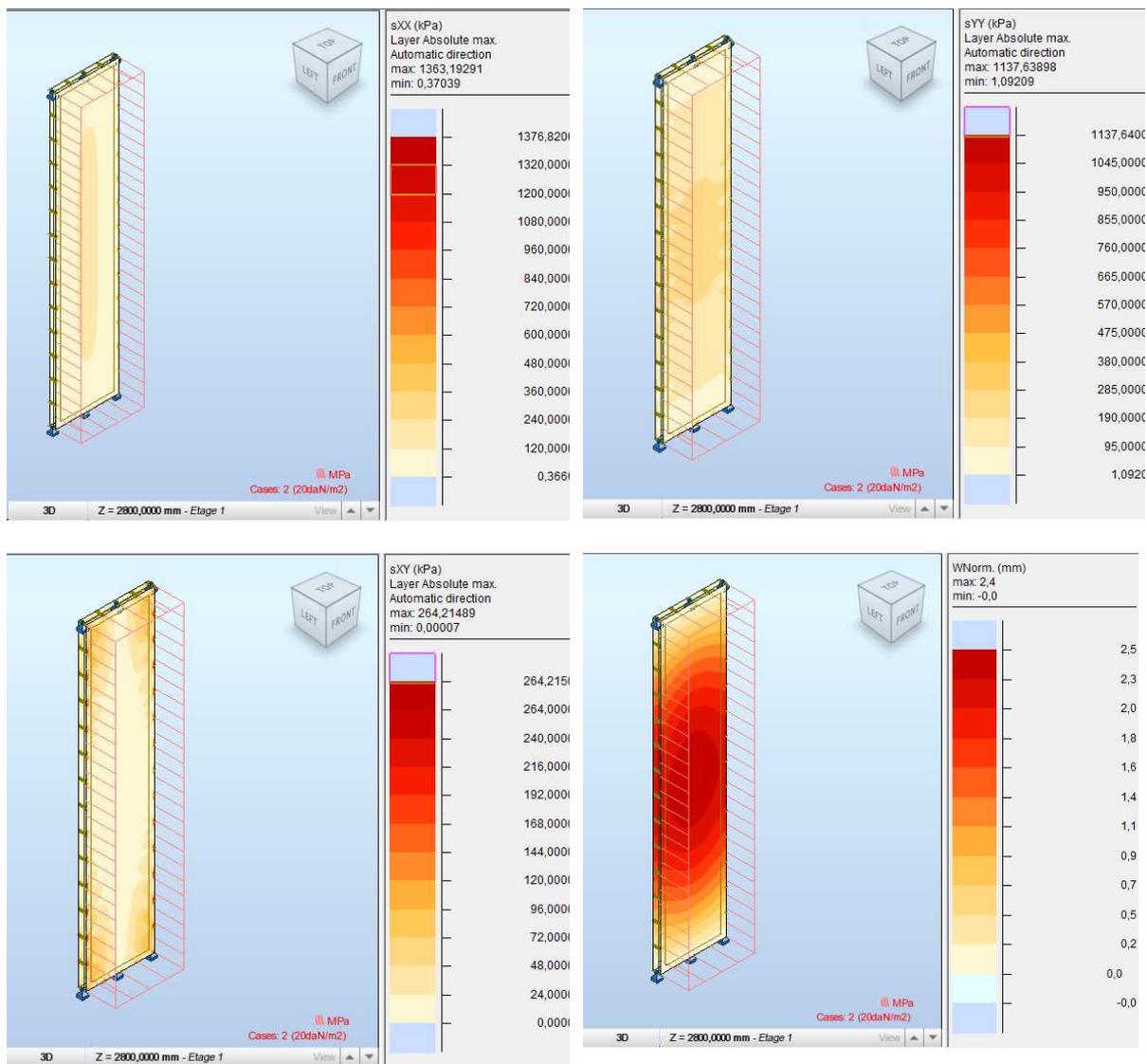
TangentEscala.(2016). Catalogo Light Steel Framing. Obtido em: <http://tangentescala.pt/sistema-lsf/sistema-construtivo-lsf/>. (Acedido em 01-03-2019)

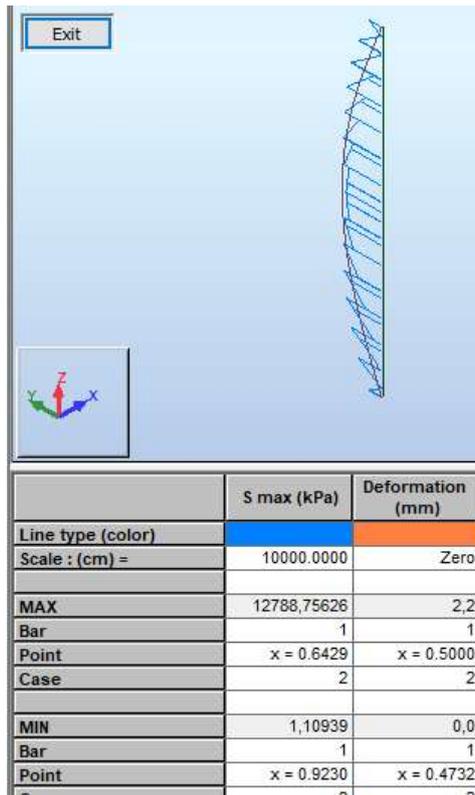
Termolam. (2016). Fichas técnicas – Produtos para Construção Residencial | Industrial | Comercial | Pública. Obtido em: <http://termolan.pt/produtos/fichas-tecnicas/> (Acedido em 05-03-2019)

ANEXO I – RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE

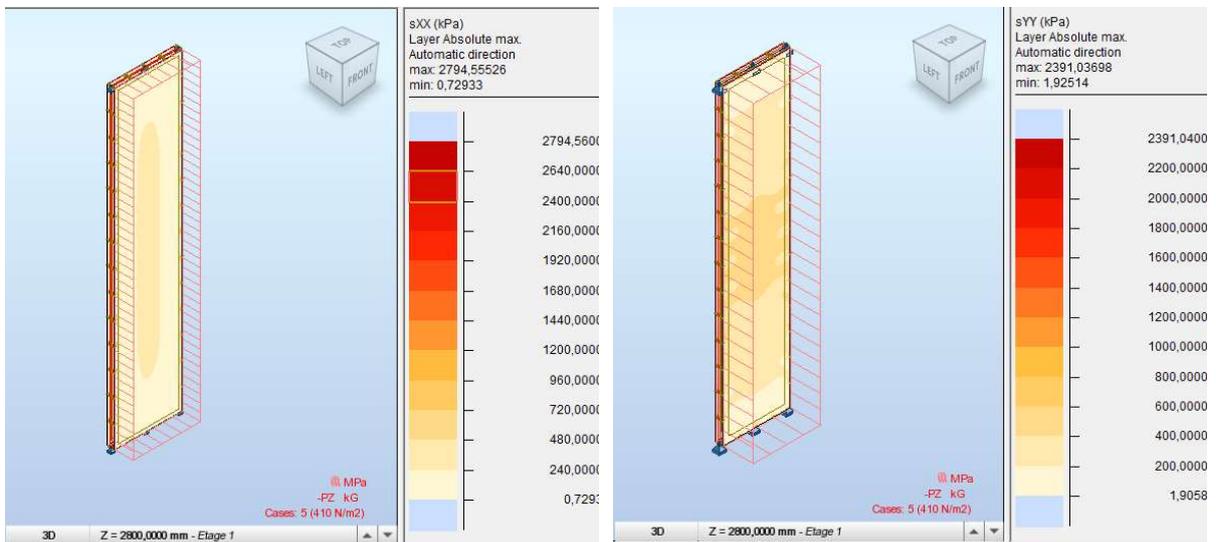
Painel 1

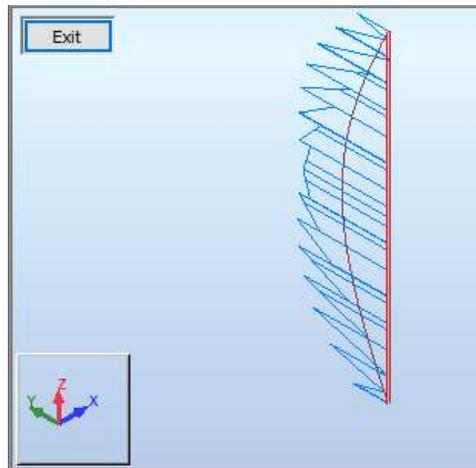
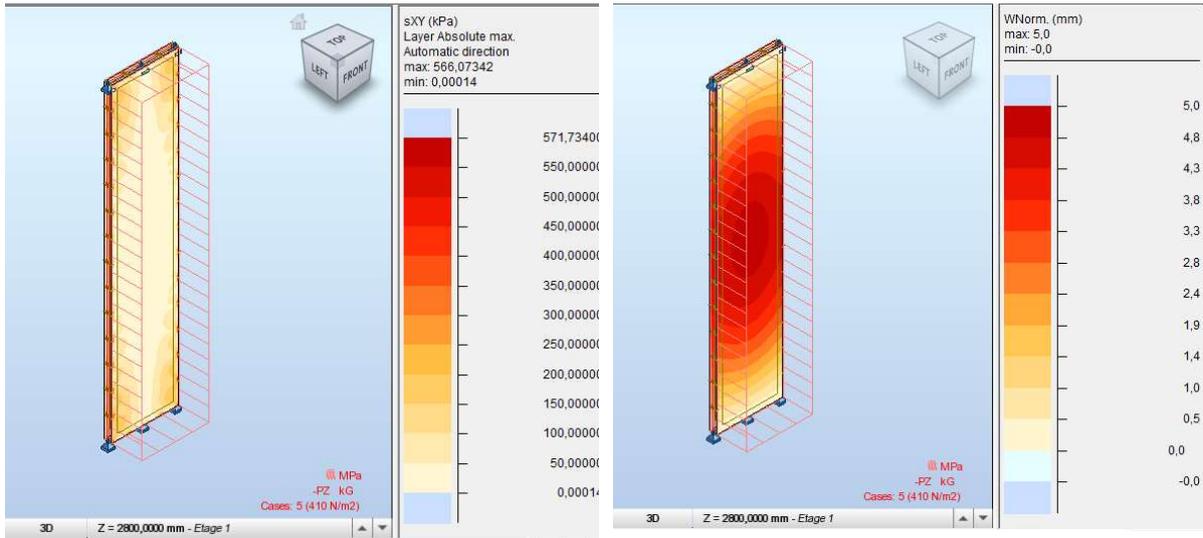
Carga: 200 N





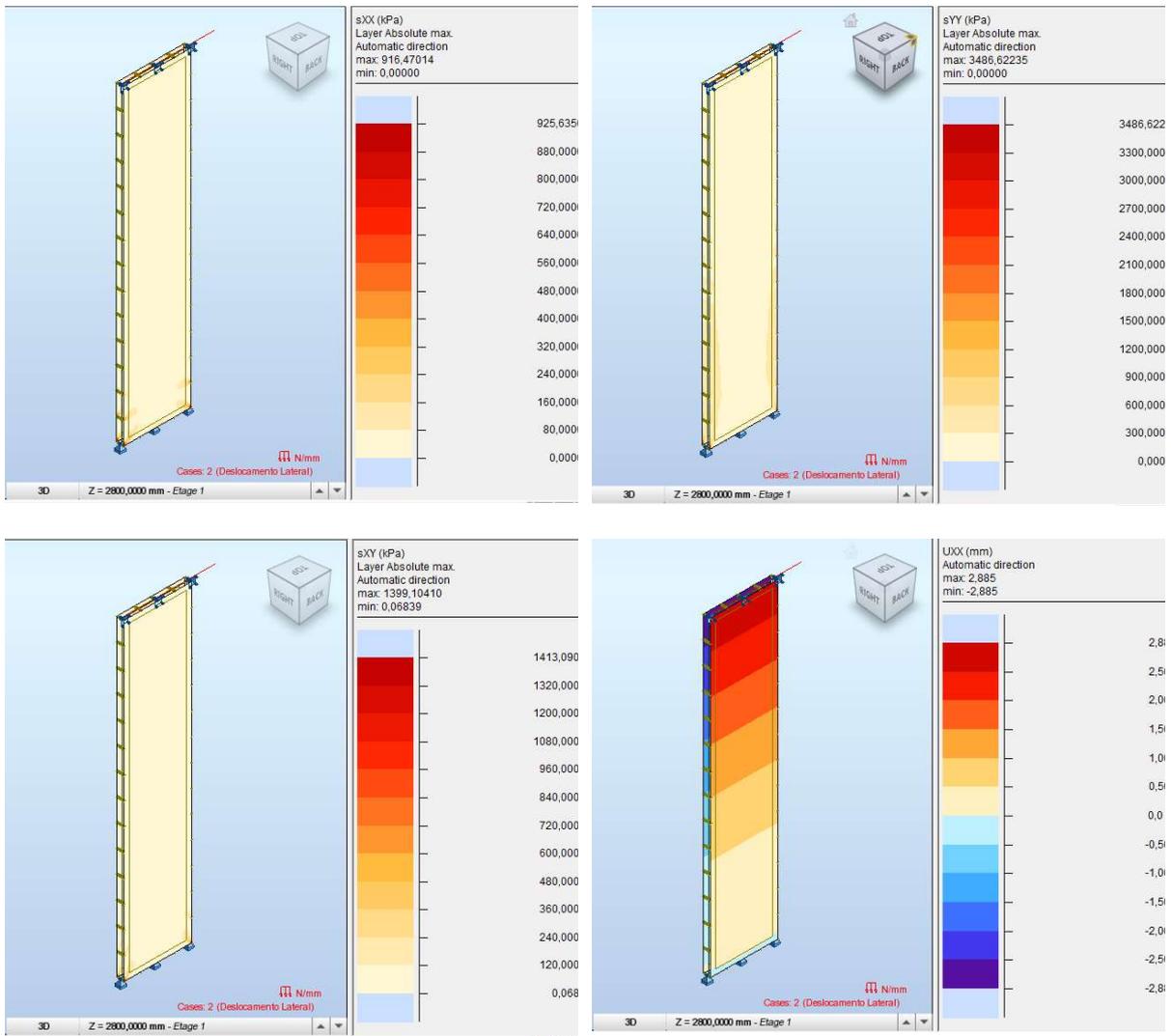
Carga: 410 N

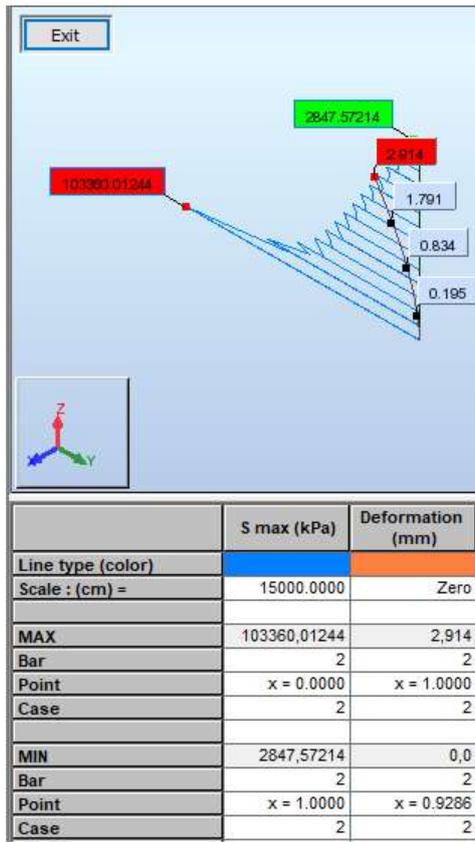




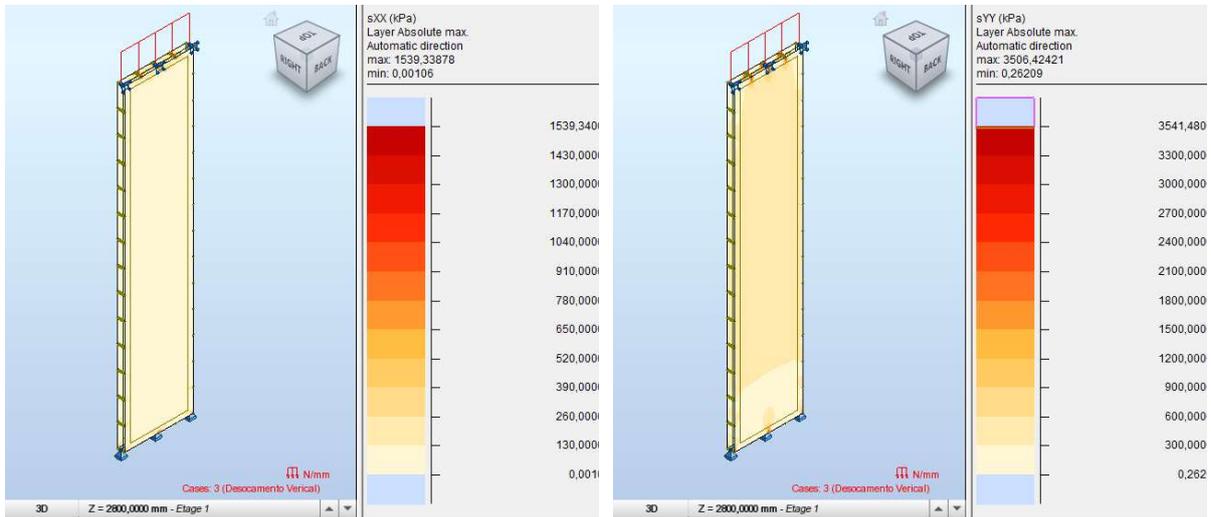
	S max (kPa)	Deformation (mm)
Line type (color)		
Scale : (cm) =	10000.0000	Zero
MAX	26450,45213	4,5
Bar	1	1
Point	x = 0.3571	x = 0.5000
Case	5	5
MIN	-344,68904	0,0
Bar	1	1
Point	x = 0.9230	x = 0.4732

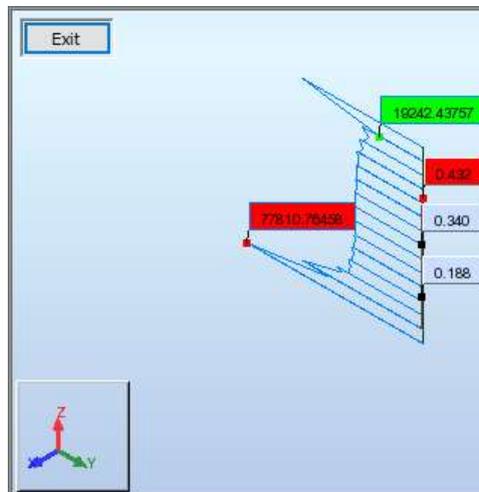
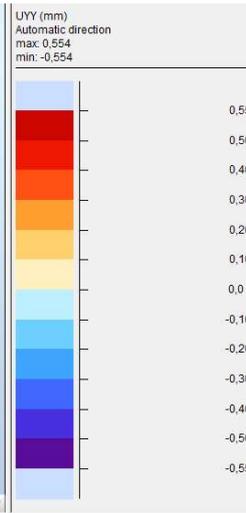
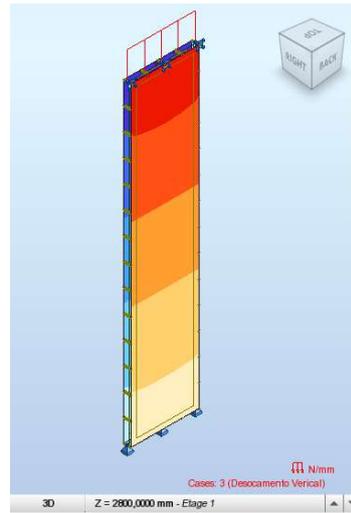
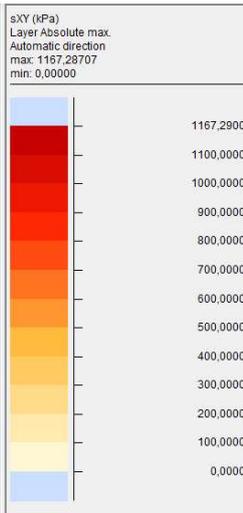
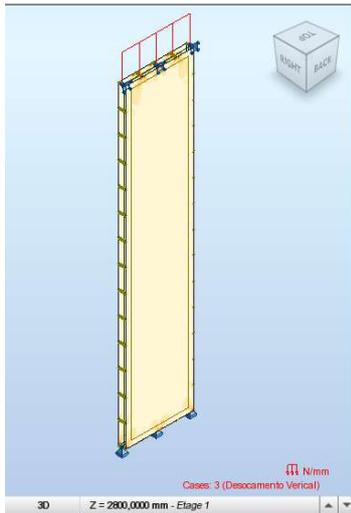
Carga Lateral – 1080 N





Carga Vertical – 9900 N

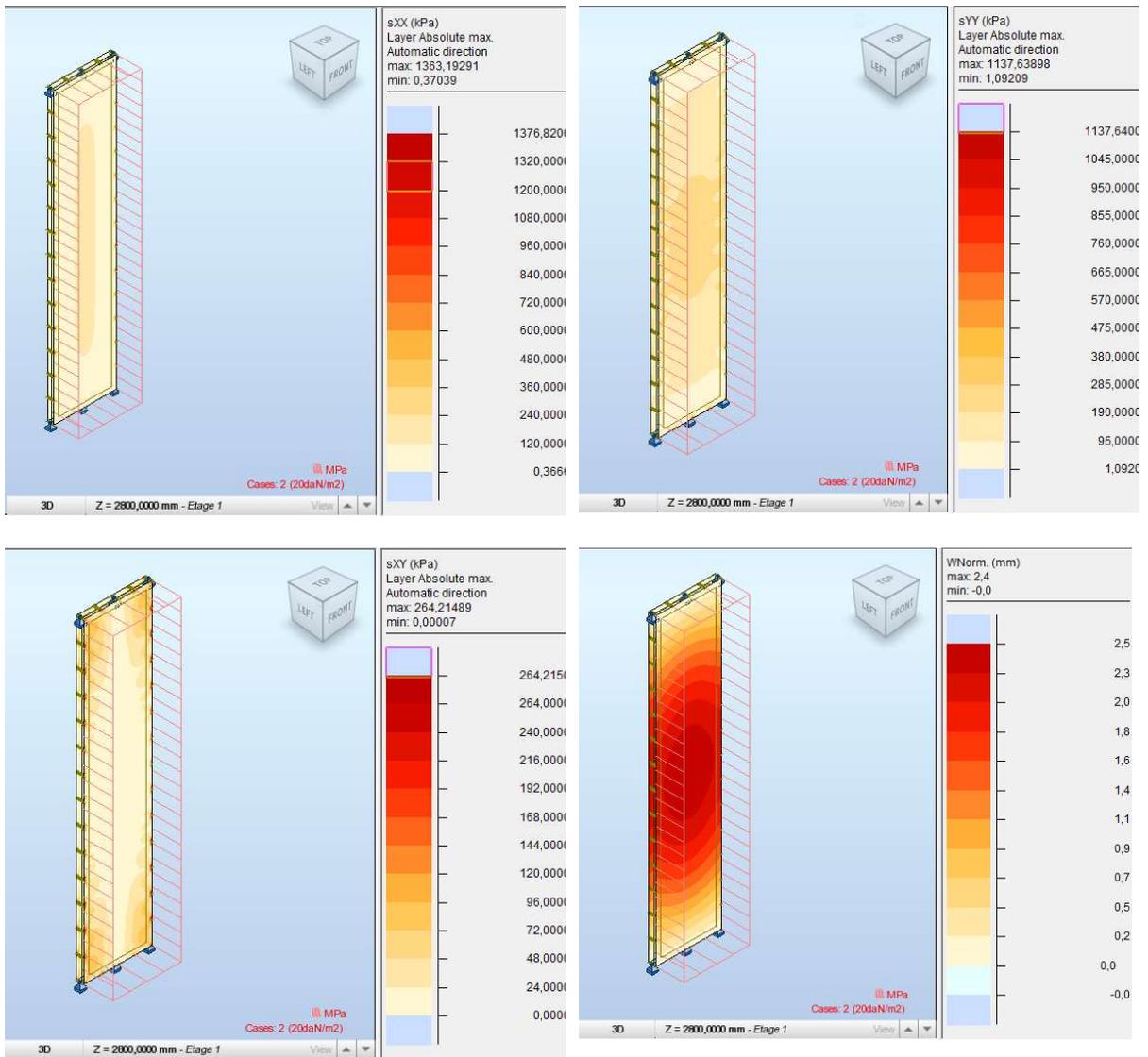


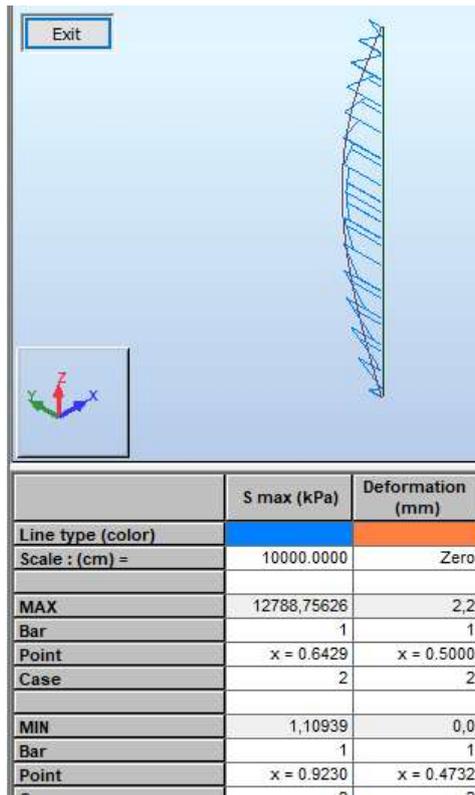


	S max (kPa)	Deformation (mm)
Line type (color)		
Scale : (cm) =	15000,0000	Zero
MAX	77810,76458	0,440
Bar	2	2
Point	x = 0,0000	x = 1,0000
Case	3	3
MIN	19242,43757	0,0
Bar	2	2
Point	x = 0,9300	x = 0,9286
Case	3	3

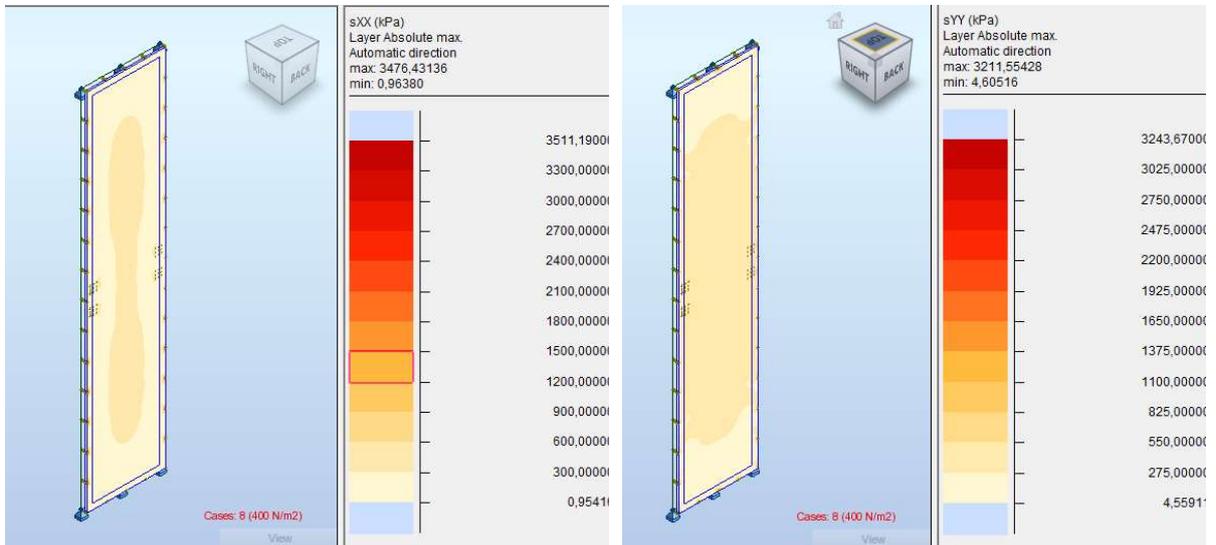
Painel 2

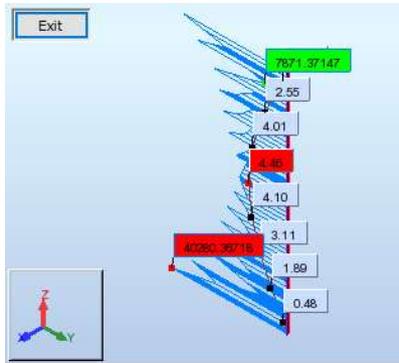
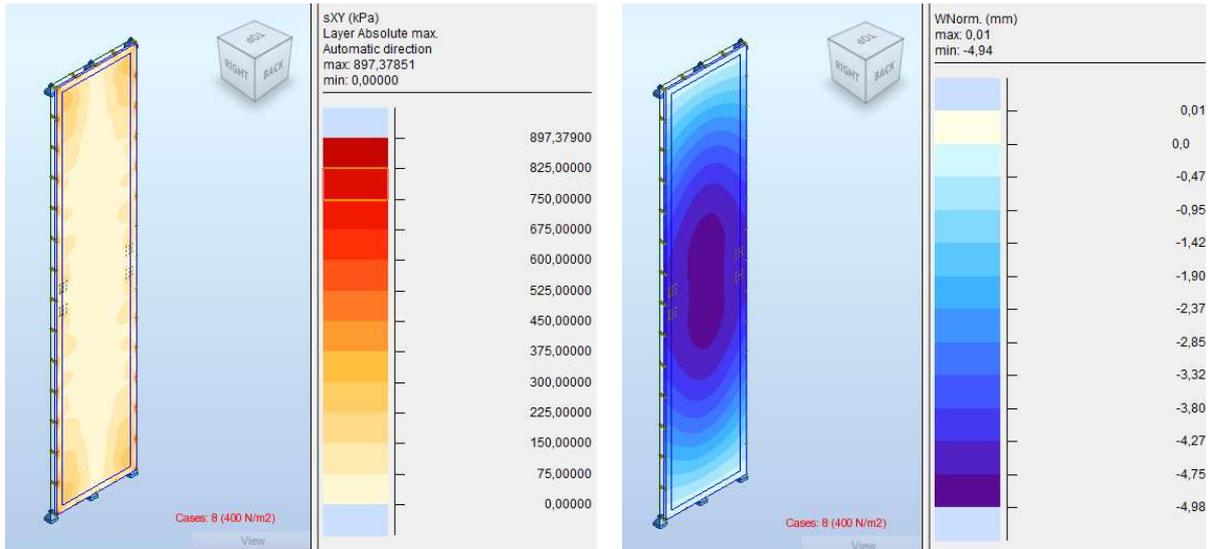
Carga: 200 N





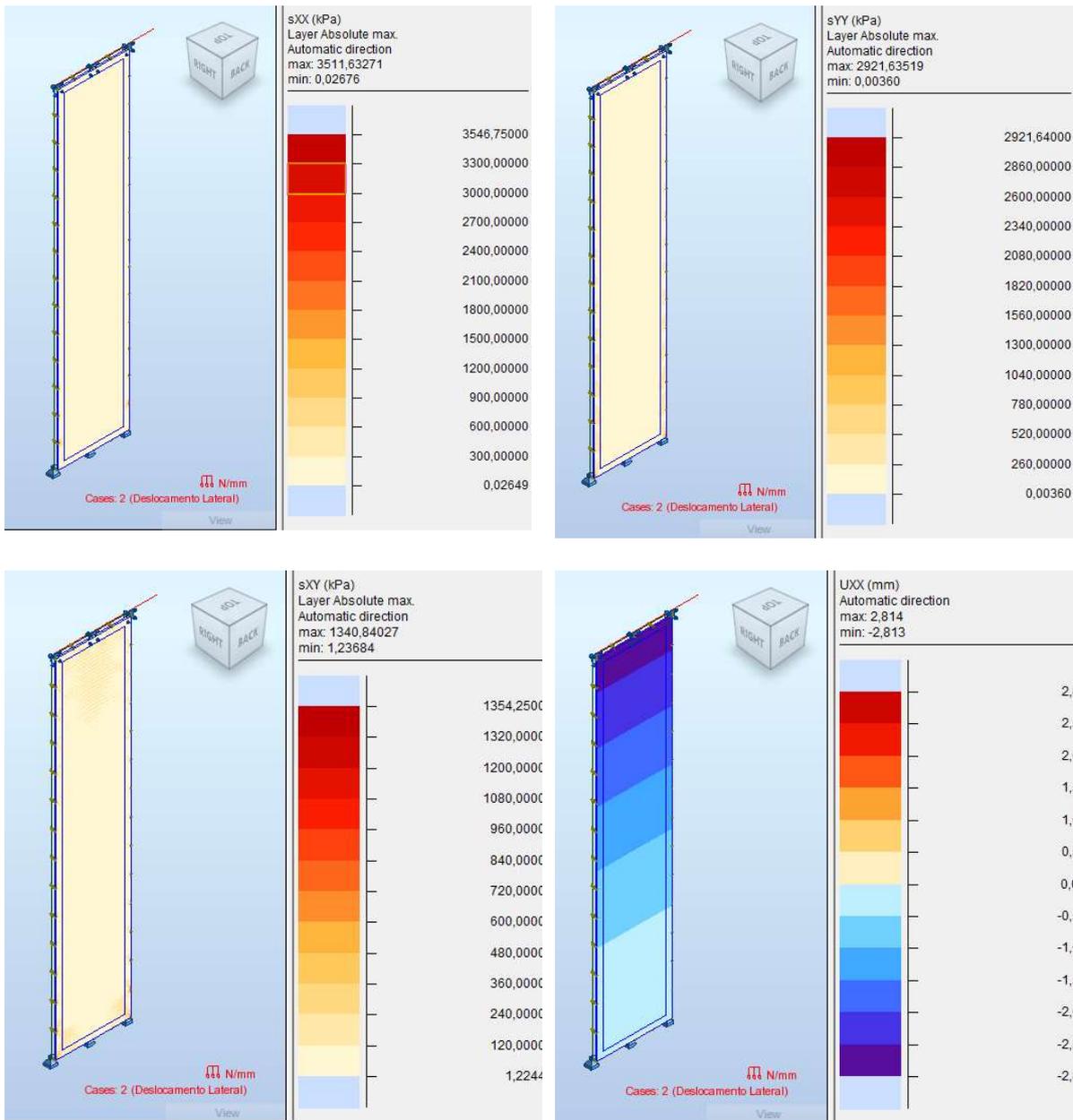
Carga: 400 N

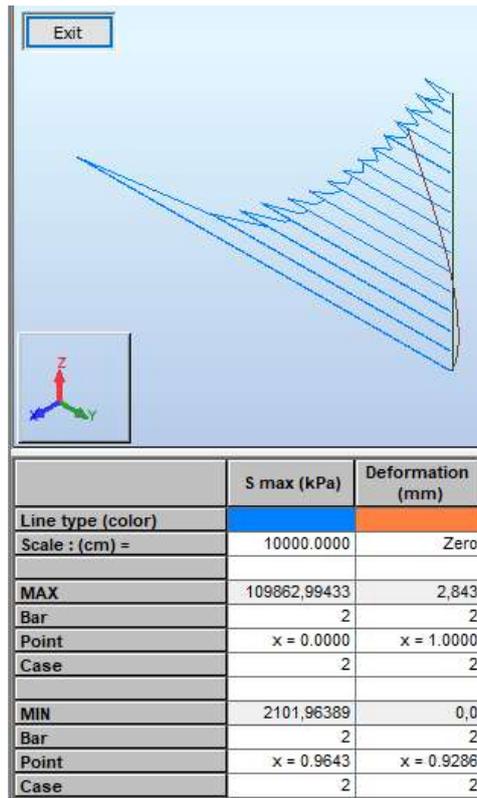




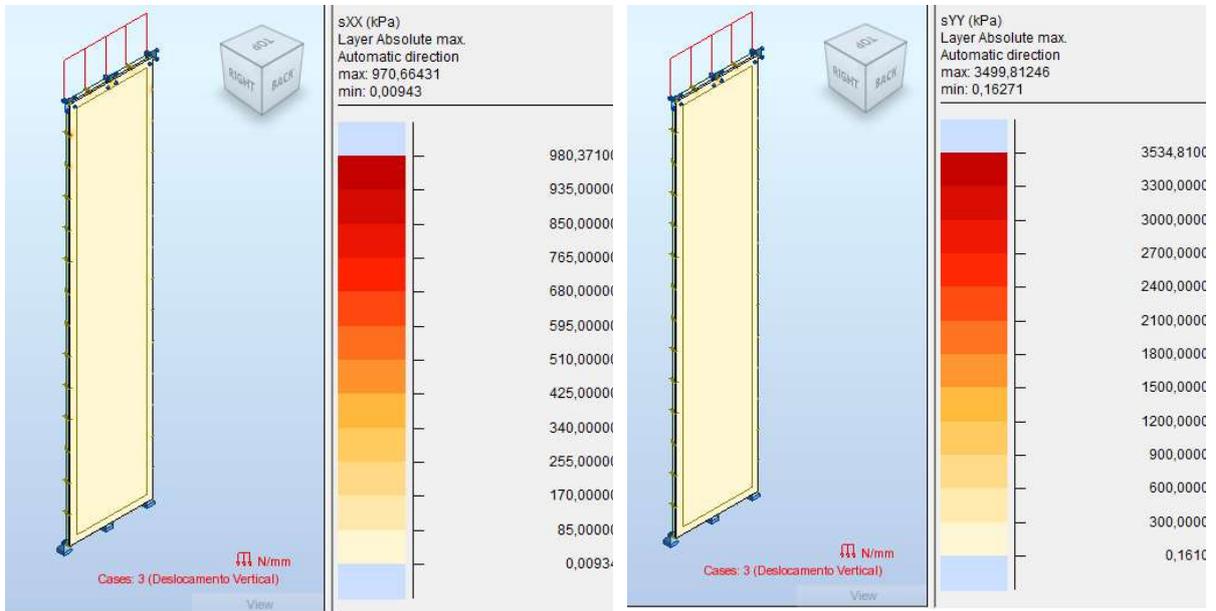
	S max (kPa)	Deformation (mm)
Line type (color)		
Scale : (cm) =	10000,0000	Zero
MAX	40280,36718	4,47
Bar	2	2
Point	x = 0,0000	x = 0,5018
Case	8	8
MIN	7871,37147	0,0
Bar	2	2
Point	x = 0,9130	x = 0,5000
Case	8	8

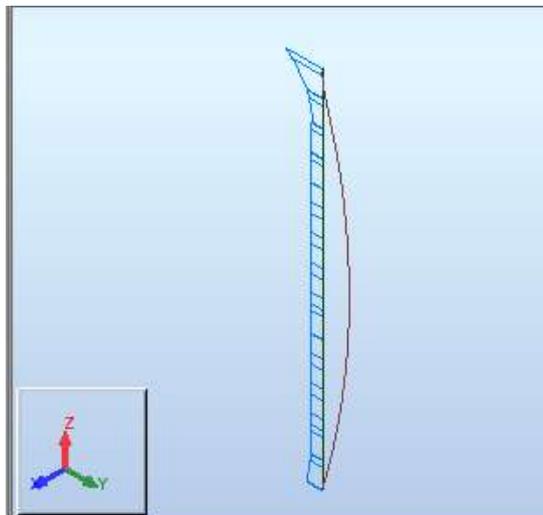
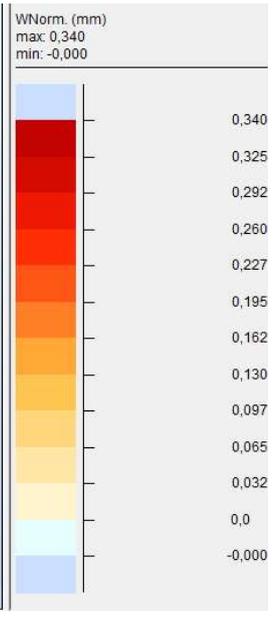
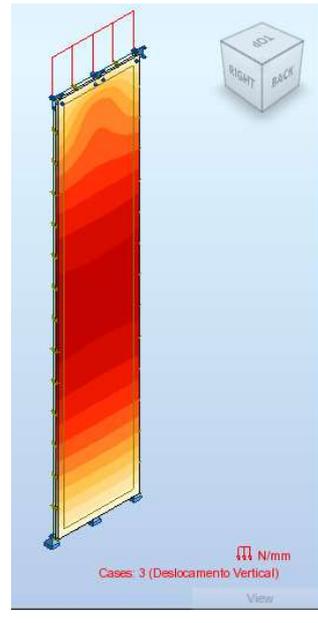
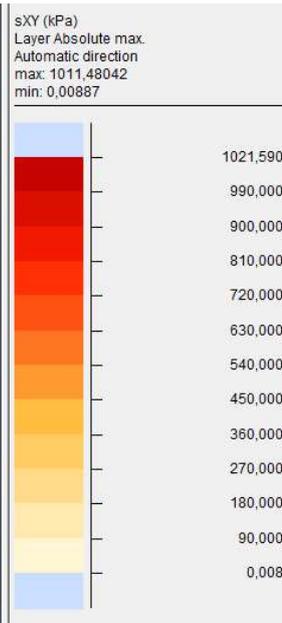
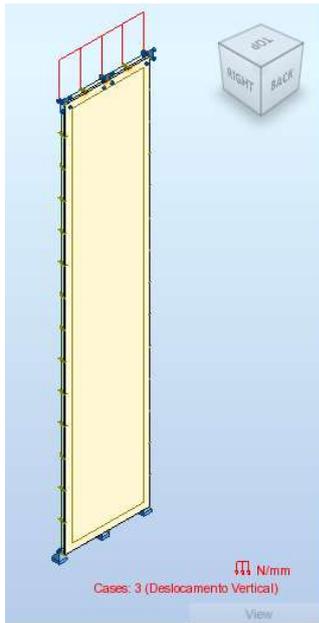
Carga Lateral – 900 N





Carga Vertical – 564 N





	S max (kPa)	Deformation (mm)
Line type (color)		
Scale : (cm) =	10000.0000	Zero
MAX	16704,89357	0,341
Bar	2	2
Point	x = 1.0000	x = 0.5000
Case	3	3
MIN	4294,29268	0,0
Bar	2	2
Point	x = 0.8725	x = 0.4286
Case	3	3

ANEXO II – PLANTA CAD DA DISTRIBUIÇÃO DOS PAINÉIS

