

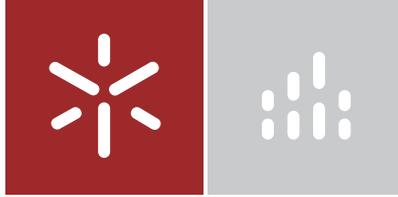


Universidade do Minho
Escola de Arquitectura

Tânia Sofia Barbosa Silva Explorar a Potencialidade de um Edifício Construído com Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) Da organização espacial interior à relação interior - exterior

Tânia Sofia Barbosa Silva

Explorar a Potencialidade de um Edifício
Construído com Madeira Lamelada Colada
Cruzada (MLCC)
Da organização espacial interior à relação
interior - exterior



Universidade do Minho
Escola de Arquitectura

Tânia Sofia Barbosa Silva

Explorar a Potencialidade de um Edifício
Construído com Madeira Lamelada Colada
Cruzada (MLCC)
Da organização espacial interior à relação
interior - exterior

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Arquitectura
Área de Construção e Tecnologia

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Jorge Manuel Gonçalves Branco
Arquiteto Nuno Miguel Lima Cruz

DECLARAÇÃO

NOME: Tânia Sofia Barbosa Silva

ENDEREÇO ELETRÓNICO: tania.sofia22@gmail.com Telefone: 96 9727234

NÚMERO DO BILHETE DE IDENTIDADE: 13815176

TÍTULO DISSERTAÇÃO DE MESTRADO:

Explorar a Potencialidade de um Edifício Construído em Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC):
da organização espacial interior à relação interior e exterior

ORIENTADORES:

Professor Doutor Jorge Manuel Gonçalves Branco

Arquiteto Nuno Miguel Lima Cruz

ANO DE CONCLUSÃO: 2014

DESIGNAÇÃO DO MESTRADO OU DO RAMO DE CONHECIMENTO DO DOUTORAMENTO:

Mestrado em Construção e Tecnologia

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho,

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

No que respeita à concretização e resolução deste trabalho, quero agradecer ao Professor Jorge Branco pelo desafio lançado e pela dedicação, persistência e disponibilidade que sempre demonstrou ao longo de todo o processo de desenvolvimento do mesmo. Quero agradecer também ao Arquiteto Nuno Cruz, que esteve sempre presente e disponível para me ajudar ao longo deste percurso, quer para me apresentar ideias e soluções motivadoras quer questionando as várias opções tomadas ao longo do trabalho, o que me ajudou e incentivou no sentido de obter um bom resultado final. Aos dois o meu especial agradecimento pelos conhecimentos transmitidos que em muito contribuíram para levar a cabo esta investigação.

Um grande agradecimento também à Catarina, pela simpatia e pela recetividade com que me recebeu na sua investigação e pela motivação e encorajamento que me foi dando ao longo destes meses que em muito contribuiu para a elaboração desta dissertação. Agradeço também ao Hélder por todas as opiniões e sugestões dadas durante este período de trabalho.

À Denise pela amizade, por toda a paciência, por estar sempre pronta a me ouvir e a dar-me a sua opinião, não só ao longo destes meses mas ao longo deste percurso académico, muito obrigada. Obrigada por competires comigo de forma saudável, obrigando-me a terminar tudo antes do tempo, e acima de tudo por estares sempre presente. À Cristiana pela amizade, por todas as conversas e opiniões e por me acompanhar todos estes anos, muito obrigada. A todos os meus amigos que me acompanharam e fizeram parte desta minha caminhada, muito obrigada.

Às minhas amigas do coração, Rita, Joana e Inês pela paciência que tiveram sempre que lhes dizia que não tinha tempo para sair, e por estarem sempre comigo, dando-me apoio em todos os momentos, muito obrigada.

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo apoio incondicional, pela paciência, pela dedicação que tiveram comigo ao longo destes anos de faculdade e por tornarem este percurso possível. Um especial agradecimento a eles. Dedico igualmente à minha afilhada, Maria, que apesar de ainda ser muito pequena, me ajudou a seguir em frente e a concluir este meu percurso. Obrigada Princesa.

A todos, muito obrigada.

RESUMO

A busca por soluções construtivas alternativas e mais ecológicas tem vindo a crescer nos últimos anos, principalmente no que diz respeito ao uso da madeira em edifícios em altura, devido à sua ligação à sustentabilidade. A madeira lamelada colada cruzada (MLCC) tem sido considerada um dos melhores materiais à base de madeira para tornar realidade a ambição de construir em altura com madeira. Mais recentemente têm vindo a ser desenvolvidos projetos para edifícios multifamiliares em altura que usam a MLCC como elemento principal no seu sistema construtivo. Algumas propostas recorrem apenas à MLCC como material estrutural, outras, com uma abordagem mais flexível, procuram combinar a MLCC com outros materiais com o objetivo de maximizar a capacidade estrutural, tentando atingir cêrceas mais elevadas.

Apesar de já existirem diferentes abordagens à utilização da MLCC na construção em altura, é possível apontar-se alguns pontos fracos nos edifícios construídos. O que mais capta a atenção é a excessiva compartimentação na organização espacial interior, em resultado do número de paredes resistentes exigidas pelo sistema estrutural.

No âmbito de um projeto de investigação a decorrer na Escola de Engenharia da Universidade do Minho (EEUM), esta dissertação sugere a descrição das potencialidades de um edifício construído em MLCC. Para tal é feita uma análise a projetos já desenvolvidos em outros países com o mesmo fundamento teórico. A somar à referida revisão da problemática, é ainda feito um breve estudo aos sistemas estruturais tradicionalmente utilizados para a construção de edifícios em altura, como o aço e o betão armado.

No seguimento da revisão bibliográfica, é apresentada uma solução tipo para um edifício em altura recorrendo a um novo sistema estrutural desenvolvido na EEUM, o *Urban Timber System*, com a qual se pretende evidenciar as potencialidades e as novas soluções no que à problemática diz respeito. Para além da experimentação do sistema estrutural propriamente dito, procura-se demonstrar o seu potencial arquitetónico, quer no âmbito da organização espacial interior, quer no interface interior-exterior.

Palavras-chave: Construção em Altura, MLCC, Arquitetura, Relação Interior e Exterior.

ABSTRACT

The search for alternative and greener building solutions has been growing in recent years, particularly with regard to the use of wood in tall buildings, due to its sustainable profile. The cross laminated timber (CLT) has been considered one of the best wood-based materials to make possible the drive to build in height with wood. More recently height multifamily housing projects have been developed using CLT as the main element of the constructive system. Some proposals have used only the CLT as a structural material, others, with a more flexible approach, have sought to combine the CLT with other materials in order to maximize the structural capacity, trying to reach higher.

Although there are different approaches to the use of CLT in tall buildings, it is possible to point out some weaknesses in buildings using this material. In particular, the excessive compartmentalization in indoor spatial organization as a result of the number of shear walls required by the structural system.

This thesis, developed within an ongoing research project of the School of Engineering, University of Minho (EEUM), presents the potential of a building built with cross laminated timber (CLT). For this purpose, an analysis of some projects based in the same theoretical framework already developed in other countries, is undertaken. Moreover, a brief study of traditional structural systems of building, such as steel and concrete, used in height construction, has been ensured.

Following the literature review, a solution for a tall building using a new structural system developed in EEUM, the *Urban Timber System*, which aims to highlight the potential and new solutions, is discussed in this dissertation. Beyond the trial of the structural system itself, the aim is to demonstrate its architectural potential, regarding the inside space organization as well as inside-outside interface.

Keywords: Tall Building, CLT, Architecture, Inside-Outside Interface.

ÍNDICE

CAPÍTULO I – CONHECER

Introdução

1.1	Contextualização e Motivação	1
1.2	Limitações do Sistema Construtivo - Problemática	2
1.3	Objetivos da Investigação	3
1.4	Porquê Madeira em Edifícios Altos?	3
1.5	Esboço da Investigação	7

CAPÍTULO II – EXPLORAR

Estado do Conhecimento

2.1	MLCC e as suas propriedades	9
2.2	MLCC na construção em altura	10
2.3	Vantagens e desvantagens do material	11
2.4	Sistemas construtivos utilizados	12
2.5	A organização espacial em edifícios de MLCC	15
2.5.1	Edifícios Construídos	16
2.5.2	Edifícios em Fase de Desenvolvimento	18
2.5.3	Edifícios Protótipo Concursos e Competições	21
2.5.4	Quadro Resumo – Características Principais	22
2.6	Soluções Estruturais em Edifícios Altos – Aço e Betão Armado	24
2.7	Sistemas Construtivos Utilizados com MLCC	28
2.7.1	Construção Celular	28
2.7.2	Sistemas Inovadores	30
2.7.3	<i>Urban Timber System</i>	32

CAPÍTULO III - EXPERIMENTAR

A Proposta

3.1	Os Objetivos do Novo Sistema Construtivo – o que se pretende?	35
3.2	Desconstrução do Sistema Construtivo – ‘Guia’	36
3.3	O Conceito do Projeto	39
3.4	Barreiras Impostas pelo <i>Urban Timber System</i>	40

3.5	Descrição do Sistema Construtivo	42
3.5.1	Geometria	42
3.5.2	Estrutura	43
3.5.3	Localização do Núcleo de Distribuição Vertical	58
3.5.4	Compatibilização do Sistema com as Infraestruturas Básicas	61
3.5.5	Resistência ao Fogo	67
3.5.6	Comportamento Acústico.....	70
3.5.7	Comportamento aos Sismos	76
3.6	Construção e Montagem.....	78
3.7	Descrição do Sistema Arquitetónico	80
3.7.1	Desconstrução do Perímetro de Torre	81
3.7.2	Interação Interior - Exterior.....	85
3.7.3	Implantação	87
3.7.4	Sistema de Desenho da Fachada	89
3.7.5	Revestimento e Acabamento Exterior	102
3.7.6	Compartimentação do Espaço Interior.....	106
	Considerações Finais	115
	Referências Bibliográficas	119
	Anexos	123

ÍNDICE DE IMAGENS

Imagem 1 – <i>Sakyamuni Wooden Pagoda</i> , China	4
Imagem 2 – Comparação entre elementos naturais e estruturas concebidas pelo homem	5
Imagem 3 – Esquema da Organização da Dissertação	7
Imagem 4 - Edifícios Construídos e em Desenvolvimento com Sistema Construtivo em MLCC ...	11
Imagem 5 - Stadhaus, Londres	13
Imagem 6 - Wagramer Straße, Viena	13
Imagem 7 – Barents House, Noruega (à esquerda); FFTT System, Canadá (à direita)	14
Imagem 8 - Sistema Estrutural do Barents House	14
Imagem 9 – Pormenores do Sistema Construtivo FFTT	15
Imagem 10 – Classificação dos Sistemas Estruturais para Edifícios Altos por Fazlur Khan (imagem de cima: aço, imagem de baixo: betão armado)	25
Imagem 11 – Sistema de Estrutura Interior	26
Imagem 12 – Sistema de Estrutura pela Exterior	27
Imagem 13 - Comparação entre o Sistema de Painéis Contínuos de MLCC (à esquerda) e a Solução Tradicional em Betão Armado (à direita)	29
Imagem 14 – Montagem dos Painéis de MLCC no Edifício Stadthaus	29
Imagem 15 – Sistema Construtivo Proposto com o Barents House	30
Imagem 16 – Sistema Construtivo Proposto com o FFTT System	31
Imagem 17 – Planta do Sistema Estrutural Proposto com o <i>UT System</i>	32
Imagem 18 – Alçados e Cortes de Edifício Construído com o Sistema <i>UT System</i>	33
Imagem 19 – Modelo 3D da Proposta de Edifício com o Sistema <i>UT System</i>	34
Imagem 20 – Jogo de Madeira Tradicional <i>Jenga</i>	39
Imagem 21 – Esquema de Disposição dos Pilares em MLCC	41
Imagem 22 - Localização dos Elementos constituintes do Sistema Estrutural num Piso-tipo	43
Imagem 23 – Diferentes Tipos de Pisos Propostos	44
Imagem 24 – Planta de Piso-tipo com Elementos Estruturais do Tipo MLCC 200 mm L5s	45
Imagem 25 – Planta de Piso-tipo com Elementos Estruturais do Tipo MLCC 320 mm L8s-2	47
Imagem 26 – Planta de Piso-tipo com Elementos Estruturais do Tipo MLCC 1000 mm	49
Imagem 27 – Espaço Interior de Edifício Construído com a Recurso a Pilares de MLCC 990 mm	50
Imagem 28 - Planta de Piso-tipo com Elementos Estruturais do Tipo MLCC 2 x 240 mm L7s-2 ..	52

Imagem 29 – Planta de Piso-tipo com Elementos Estruturais do Tipo MLC 250 mm	55
Imagem 30 – Esquema de Organização do Núcleo Central de Distribuição Vertical.....	57
Imagem 31 – Localização do Núcleo de Distribuição Vertical.....	59
Imagem 32 – Núcleo e Distribuição Vertical – Dimensões Regulamentares	61
Imagem 33 – Esquema de Localização das Áreas Húmidas (azul) e dos Espaços Destinados à Passagem de Infraestruturas (amarelo)	62
Imagem 34 – Danos na Estrutura de MLCC causados pela Infiltração de Água	63
Imagem 35 – Pormenor da Cobertura Proposta por <i>Ringhofer</i> e <i>Schickhofer</i>	63
Imagem 36 – Solução Apresentada para o Abastecimento de Água nos Diferentes Pisos	64
Imagem 37 – Pormenor Construtivo da Cobertura Adotada para o Edifício Proposto (Esc. 1/20)	65
Imagem 38 – Pormenor Construtivo da Parede Exterior para o Edifício Proposto (Esc. 1/20).....	66
Imagem 39 – Pormenor Construtivo das Vigas Perimetrais (Esc. 1/20)	66
Imagem 40 – Peças de madeira submetidas a efeitos de incêndio	68
Imagem 41 – Variação da temperatura no interior de uma peça de madeira quando sujeita aos efeitos de um incêndio	68
Imagem 42 – Teste à capacidade de resistir ao fogo dos painéis de MLCC	69
Imagem 43 – Suportes Metálicos com Características Elásticas para Fixação do Gesso Cartonado	73
Imagem 44 – Colocação de Membrana Acústica entre os Painéis de MLCC	75
Imagem 45 – Edifícios utilizados durante o Ensaio: Edifício de 3 andares (à esquerda) e Edifício de 7 andares (à direita)	76
Imagem 46 – Preparação para a montagem do edifício em MLCC	78
Imagem 47 – Corte do Edifício Proposto	82
Imagem 48 – Representação Tridimensional do Edifício Proposto	83
Imagem 49 – Esquema de Movimento dos Diferentes Tipos de Planta Possíveis.....	84
Imagem 50 – Comparação da Torre Paralelepípedica com o Resultado da Movimentação dos Pisos	85
Imagem 51 – Representação de um Espaço Exterior em Varanda com Pé-direito Duplo.....	86
Imagem 52 – Terrenos da antiga fábrica da <i>Sidul</i> , Alcântara – Lisboa	87
Imagem 53 – Torres de Alcântara, Arq. Álvaro Siza (imagens do projeto)	88
Imagem 54 – Colocação da Viga de MLCC a Eixo da Laje Estrutural.....	89
Imagem 55 – Esquema Métrico da Organização dos Pisos.....	90
Imagem 56 – Colocação da Viga de MLCC acima da Laje Estrutural	91
Imagem 57 – Colocação da Viga de MLCC abaixo da Laje Estrutural	91

Imagem 58 – Proposta 1: Desenho do Alçado Frente (esq.) e do Alçado Lateral (dir.)	94
Imagem 59 – Proposta 2: Desenho do Alçado Frente (esq.) e Alçado Lateral (dir.)	96
Imagem 60 – Proposta 3: Desenho do Alçado Frente (esq.) e Alçado Lateral (dir.)	98
Imagem 61 - Esquema de Localização das Vigas Perimetrais no Alçado	99
Imagem 62 – Proposta 4: Desenho do Alçado Frente (esq.) e Alçado Lateral (dir.)	101
Imagem 63 – Aspeto da Madeira Termo Tratada e Caso de Prático de Aplicação	104
Imagem 64 – Esquema de Montagem da Madeira Tratada em Sistema de Fachada Ventilada	104
Imagem 65 – Planta de um Piso-Tipo do Edifício Proposto	106
Imagem 66 – Planta de Piso do <i>Forté</i> , Melbourne – Austrália (2012)	107
Imagem 67 – <i>FFTT System</i> : Proposta 1 e 2 para um Edifício de 20 Andares	107
Imagem 68 – Representação das Paredes Divisórias.....	109
Imagem 69 – Planta Tipo para Utilização Residencial.....	110
Imagem 70 – Planta de Piso do Stadthaus, Londres	111
Imagem 71 – Planta Tipo para Utilização do Tipo Escritórios.....	112
Imagem 72 – Representação do Espaço Interior destinado à Habitação	113
Imagem 73 – Representação do Espaço Interior destinado a Escritórios	113
Imagem 74 – Representação Tridimensional de Apartamento Tipo	114

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Características Técnicas da MLCC	9
Tabela 2 – Planta e Alçado dos Edifícios Construídos com MLCC	16
Tabela 3 – Características Principais dos Edifícios em Desenvolvimento	19
Tabela 4 – Características Principais dos Edifícios Protótipo	21
Tabela 5 – Comparação das Características-chave dos Edifícios Analisados.....	23
Tabela 6 – Desconstrução dos Elementos que compõem o Edifício	37
Tabela 7 – Exemplos de combinações possíveis dos diferentes elementos.....	38
Tabela 8 – Organização dos Tipos de Piso no Edifício para a Solução 1.....	47
Tabela 9 – Secção de Material Necessária em Função do Número do Piso.....	50
Tabela 10 – Organização dos Tipos de Piso no Edifício para a Solução 2.....	52
Tabela 11 – Secção do Material Necessária em Função do Número do Piso.....	53
Tabela 12 – Organização dos Tipos de Piso no Edifício para a Solução 2.....	55
Tabela 13 – Secção do Material Necessária em Função do Número do Piso.....	56
Tabela 14 – Detalhes e resultados dos testes aos painéis de MLCC	70
Tabela 15 – Comportamento Acústico de Diferentes Soluções para Pavimento / Teto	72
Tabela 16 – Resultados Obtidos para uma Solução Tipo de Laje de Pavimento	73
Tabela 17 – Resultados Obtidos para Diferentes Soluções de Paredes	74
Tabela 18 – Características dos Materiais de Revestimento Exterior	103
Tabela 19 – Características Técnicas dos Materiais de Isolamento Térmico	105

“If the nineteenth century was the century of steel, and the twentieth the century of concrete, then the twenty-first century is about engineered timber.”

Alex de Rijke, Director e Fundador da dRMM Architects, Londres

Introdução

1.1 Contextualização e Motivação

A madeira é um material que desde sempre captou a atenção dos arquitetos dadas as suas potencialidades visuais e tácteis. No entanto, até ao momento não foi completamente explorada a sua capacidade estrutural. Assim, a escolha deste tema prende-se essencialmente com a conceção arquitetónica de edifícios em madeira lamelada colada cruzada (MLCC). O tema e a problemática escolhida para a realização desta investigação devem-se à vontade de conhecer novas formas e conceitos de construir.

A busca por soluções construtivas alternativas e mais ecológicas tem vindo a crescer nos últimos anos, principalmente no que diz respeito ao uso da madeira em edifícios em altura, devido ao seu perfil sustentável. A madeira lamelada colada cruzada (MLCC), pelas suas melhoradas propriedades, tem sido vista como capaz de tornar realidade a ambição de construir em altura com madeira.

O aumento da densidade urbana é uma forma de resposta sustentável à necessidade de crescimento das cidades. A construção em altura em MLCC surge como resposta a esta necessidade, apostando no perfil sustentável deste material como fator chave para reduzir o impacto ambiental negativo associado ao sector da construção.

Na tentativa de validar este novo conceito, nos últimos anos foram construídos vários edifícios que têm como base este sistema estrutural. No entanto, e apesar de já existirem diferentes abordagens à utilização da MLCC na construção em altura é possível apontar-se alguns pontos fracos nos edifícios construídos. O que mais capta a atenção é a excessiva compartimentação do espaço interior, em resultado do número de paredes resistentes do sistema estrutural. É de salientar, contudo, que estes edifícios possuem ainda um carácter experimental e, como tal, é natural que não exibam soluções arquitetonicamente arrojadas e que apresentem pormenores construtivos repetitivos e pouco explorados.

Em função do atual estado de desenvolvimento do tema, a problemática centra-se nas eventuais limitações impostas por este sistema construtivo ao processo de conceção arquitetónico. Estas limitações estão diretamente relacionadas com a função do arquiteto, quer no que diz respeito à expressão formal externa quer na definição do espaço interior.

Acreditando que a MLCC é um dos materiais do século XXI, a motivação deste trabalho está diretamente relacionada com a vontade de contribuir para o desenvolvimento de um sistema construtivo promissor e amigo do ambiente.

Inserida num projeto de investigação a decorrer na Escola de Engenharia da Universidade do Minho (EEUM), esta proposta descreve as potencialidades de um edifício em altura construído em MLCC.

1.2 Limitações do Sistema Construtivo - Problemática

No seguimento da necessidade de se construir de forma sustentável e com recurso a materiais ecológicos e reutilizáveis, recentemente têm vindo a ser desenvolvidos projetos para edifícios multifamiliares em altura que usam a MLCC como elemento principal no seu sistema construtivo. Existem propostas com abordagens muito distintas: as mais radicais elegem a MLCC como único material estrutural; as mais abrangentes procuram combinar a MLCC com outros materiais no sentido de maximizar a capacidade estrutural, tentando atingir cérceas mais elevadas.

Da revisão da bibliografia realizada é possível perceber que apesar de existirem atualmente diferentes abordagens aos sistemas construtivos, podem ainda apontar-se algumas questões-chave à utilização da MLCC no projeto de edifícios multifamiliares. Entre elas, podem salientar-se a excessiva compartimentação do espaço interior, o reduzido número de aberturas deste para o exterior e a volumetria de torre formalmente muito rígida resultando num edifício com pouca relação com o espaço envolvente. Estes aspetos vão sendo referenciados ao longo de toda a análise conduzida aos edifícios em MLCC que se encontram em fase de projeto, independentemente do sistema construtivo que é adotado.

Na verdade, um dos maiores entraves da utilização da MLCC na construção é a limitação criativa imposta aos arquitetos. A liberdade criativa só será possível com um melhor conhecimento deste sistema construtivo. Apesar desta limitação, é evidente a vontade dos projetistas em contornar estes problemas, inovando nos materiais e nas soluções construtivas.

São estas questões e pontos fracos identificados nos projetos analisados, e apresentados mais à frente, que dão origem à questão e ao problema de investigação do ensaio agora apresentado, e ao mesmo tempo dão motivação para levar a cabo este trabalho.

Identificadas as mais-valias e os aspetos negativos inerentes ao sistema construtivo e ao material, pretende-se, com o desenvolvimento desta investigação, perceber quais são as potencialidades do espaço interior de um edifício construído em MLCC, assim como da sua abertura para o exterior. Isto é, será que a MLCC pode suportar soluções arquitetónicas mais versáteis na construção em altura? À partida, e de acordo com o nível de conhecimento atual, sim, mas não com o sistema construtivo em prática atualmente.

Com a identificação da principal questão de investigação podem enumerar-se outras que ajudam a formular o pensamento crítico sobre esta problemática. Assim sendo, apresentam-se de seguida algumas questões que podem ser tidas em conta ao longo da investigação.

- Quais as alternativas à tecnologia atual de construção em altura com MLCC?

- Deverá apostar-se em soluções híbridas integrando mais que um material estrutural? Que mais-valias oferecem? O que trazem de novo ao conhecimento atual?
- Qual a solução que permite o desenho de um espaço mais amplo e com menos constrangimentos?
- Como é possível obter aberturas maiores e mais amplas nas fachadas dos edifícios em MLCC?
- Até que ponto é que o sistema construtivo influencia a expressão final do edifício?

Estas são algumas das questões às quais se pretende dar resposta com o desenrolar desta investigação, procurando acima de tudo encontrar uma solução adaptável e acima de tudo que possa vir a ser aplicada na construção em altura em MLCC.

1.3 Objetivos da Investigação

Com a presente proposta de investigação, pretende-se compreender quais as potencialidades de um sistema construtivo à base de MLCC na organização espacial interna e no tratamento da relação interior-exterior. Para além de dar resposta à questão principal de investigação, os objetivos desta proposta podem ser enunciados de forma muito direta:

- Promover a MLCC como material de construção inovador, eficiente e sustentável;
- Promover a construção em contexto urbano com recurso à MLCC;
- Analisar soluções existentes, identificando os respetivos pontos fortes e fracos;
- Contribuir para o desenvolvimento de uma solução construtiva mais versátil, que permita uma maior liberdade quer na organização espacial quer no tratamento da relação interior-exterior;
- Reunir as possibilidades possíveis e as oportunidades da relação com o exterior que um edifício construído em MLCC é capaz de oferecer;
- Perceber quais as limitações da utilização da madeira à vista e explorar as potencialidades visuais da mesma.

Em suma, através dos pontos identificados acima, procura-se dar um pequeno contributo prático para o desenvolvimento de uma solução construtiva emergente à qual se reconhece grande potencial.

1.4 Porquê Madeira em Edifícios Altos?

Desde o início da civilização que a madeira tem sido escolhida como material de construção dada a sua abundância natural, os seus altos índices de rigidez e resistência relativamente ao seu reduzido peso e grande facilidade em cortá-lo na forma pretendida. Utilizada em diversos tipos de edifícios, são de salientar os *Pagodas* na Ásia e as *Fábricas da Guerra Civil Pré-Americana* da Nova Inglaterra. Os últimos, capazes de atingir os 9 andares de altura e totalmente equipados com máquinas fabris pesadas e que produzem vibrações constantemente, provam que é possível construir edifícios de altura média com fins não residenciais em madeira.

A título de exemplo, pode referir-se o *Sakyamuni Pagoda* na China (imagem 1), construído em 1056 atinge a altura máxima de 67,13 metros e apesar de se localizar num país propício à ocorrência de sismos tem mantido a sua integridade ao longo dos anos, superando diversos episódios sísmicos.

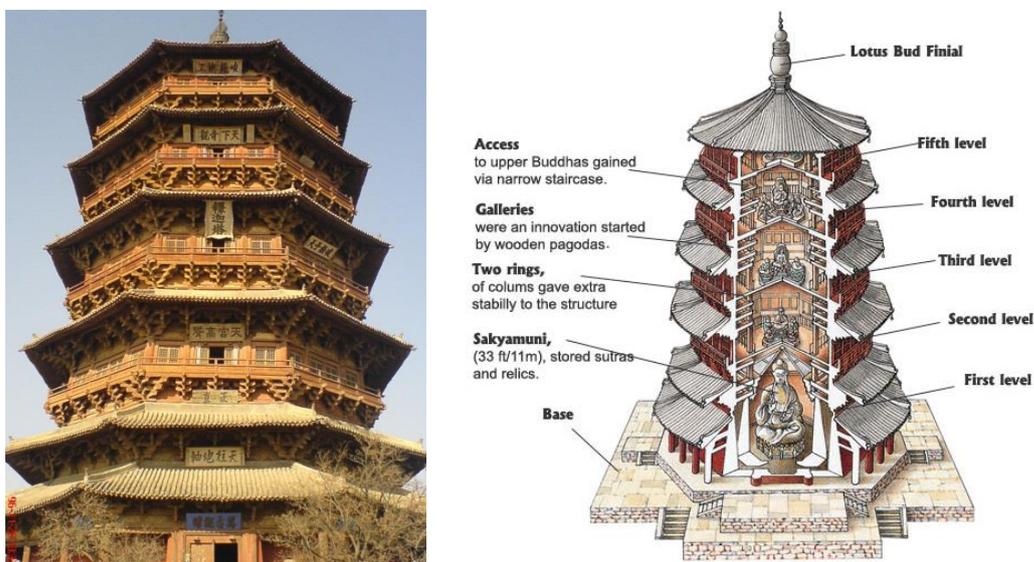


Imagem 1 – *Sakyamuni Wooden Pagoda, China* ¹

Apesar de a madeira ter dado provas da sua resistência e adaptabilidade, com o aparecimento do ferro fundido a sua utilização teve um decréscimo evidente, mas tal facto não é justificado com questões estruturais mas antes com questões relacionadas com a industrialização e a durabilidade do material.

A invenção do ferro fundido levou a um claro declínio da utilização da madeira na construção, apesar de esta já ter dado mostras de eficácia em edifícios médios-altos. Hoje em dia já é bastante comum construir-se edifícios em madeira, recorrendo aos sistemas de construção leve, com uma altura média de 20 metros, o que corresponde a aproximadamente 6 andares. Contudo, quando na presente investigação é feita referência a edifícios altos pretende-se alcançar alturas além dos 10 pisos até um limite de 20 andares. Quando se pensa em construir edifícios em altura, de tal dimensão, não se associa a uma estrutura natural de madeira, sendo mais comum relacionar este tipo de construção com aço ou com betão armado. Assim fica a questão que muitos arquitetos e engenheiros podem colocar.

Por que é que alguém deve acreditar que é possível construir edifícios contemporâneos em altura a partir da Madeira?

A justificação é simples e intuitiva. A natureza concebeu a madeira para que esta funcione em estruturas altas e as árvores existentes estão aptas e são capazes de atingir grandes dimensões, dependendo contudo da espécie em questão.

¹ Fonte Esquerda: www.toocle.com/image/travel/adv_pic/681/1255136961.jpg (acedido a 26/6/14);
Fonte Direita: www.chinaspree.com/china-travel-guide/images/shaanxi/10.jpg (acedido a 26/6/14)

As sequoias (*Sequoia sempervirens*), por exemplo, são consideradas as árvores mais altas do mundo e o ser vivo mais antigo presente na Terra. Estas crescem de forma continuada ao longo da sua existência, e podem alcançar os 3000 anos de idade continuando a manter-se intactas e a resistir às solicitações do ambiente exterior. São as maiores árvores existentes, chegando a atingir os 90 metros de altura, o equivalente a um edifício de 30 andares. O maior exemplar desta espécie é a Sequoia Gigante (*Sequoiadendron gigantea*) que cresce apenas nas encostas ocidentais da Serra Nevada, na Califórnia, Estados Unidos da América, a altitudes de 1500 a 2400 metros. O exemplar mais alto conhecido é a 'Hyperion', com aproximadamente 115 metros de altura e pode ser encontrado no Parque Nacional Redwood, a norte de São Francisco, EUA. [2]

De acordo com o *Guinness Book of World Records* a maior árvore descoberta tinha mais de 150 metros de altura. A árvore em causa era um eucalipto australiano (*Eucalyptus amygdalina*) e foi descoberto em *Watts River*, Victoria na Austrália e foi considerada pelo livro em questão como sendo a maior árvore alguma vez vista pelo homem. [3]

Considerando a informação apresentada acima sobre as diferentes espécies de árvores e a altura máxima que estas podem atingir, é possível fazer-se uma comparação simples entre a altura máxima destas e de alguns edifícios construídos pelo homem, a fim de perceber a relação existente entre estes dois elementos no que diz respeito ao uso da madeira na construção (imagem 2).

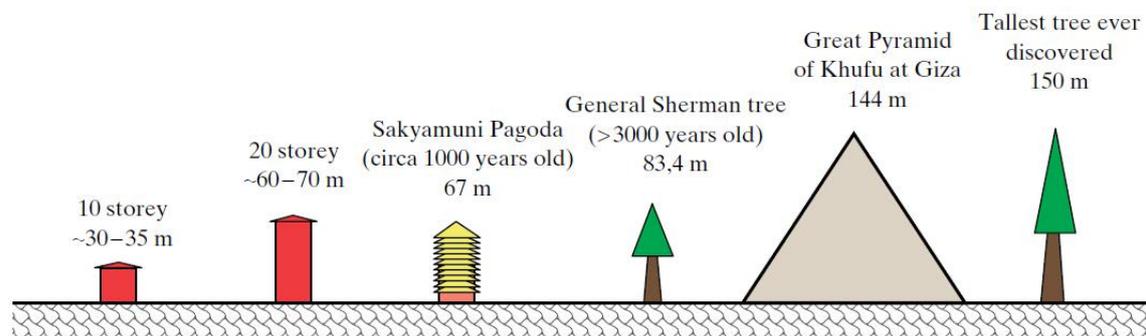


Imagem 2 – Comparação entre elementos naturais e estruturas concebidas pelo homem 4

O esquema apresentado acima procura, de forma muito simples, mostrar a relação existente entre as estruturas criadas pela mão do homem e as estruturas criadas pela natureza a fim de se compreender as potencialidades deste material. Portanto é viável pensar em construir em altura com recurso à madeira. Cada vez mais é necessário construir nas cidades, aumentar pisos a edifícios existentes e criar outros, novos, mas que tenham em consideração o meio ambiente e o impacto que a sua construção vai ter sobre este. Tal como já foi referido anteriormente, as árvores estão criadas de forma a se aguentarem em pé apesar das possíveis intempéries que possam surgir, e atingem alturas impressionantes sem, contudo perderem as características que as distinguem.

² Fonte: <http://algarve-saibamais.blogspot.pt/2011/09/sequoias-as-superarvores.html> (acedido a 19/10/14).

³ Fonte: SMITH, Ian; FRANGI, Andrea, *Overview of design Issues for Tall Timber Buildings*, Structural Engineering International, Fevereiro 2008.

⁴ Fonte: SMITH, Ian; FRANGI, Andrea, *Overview of design Issues for Tall Timber Buildings*, Structural Engineering International, Fevereiro 2008.

Se as árvores apresentam tais características e se o que se pretende é construir mais alto e de forma mais ecológica e sustentável, porque não tentar combinar estas duas premissas, procurando incorporar a madeira no sistema estrutural dos edifícios em altura. É certo, que a madeira por si só não é capaz de sustentar um edifício de 20 andares, mas também é certo que hoje em dia nenhum edifício é construído com recurso a um único material, há sempre uma combinação estratégica de dois ou mais em busca da perfeição. Acredita-se que se forem conhecidas as características e as capacidades reais da madeira e se esta for combinada com o material certo, podem alcançar-se resultados muito satisfatórios, respondendo às questões da sustentabilidade e da necessidade de se construir de forma rápida nas cidades atuais. O que se pretende portanto é maximizar esse mesmo potencial da madeira, utilizando-o de forma sensata e considerando as características demonstradas pelas estruturas que a natureza ‘concebeu’.

1.5 Esboço da Investigação

A investigação agora apresentada é marcada por uma aproximação dedutiva ao tema. Isto é, procura-se responder a várias questões-chave partindo do estudo e da análise de diversos casos reais com o objetivo de compreender a viabilidade da utilização da MLCC na construção de edifícios em altura. O esquema apresentado na imagem 3 ilustra as diferentes etapas que vão ser desenvolvidas ao longo da presente dissertação.

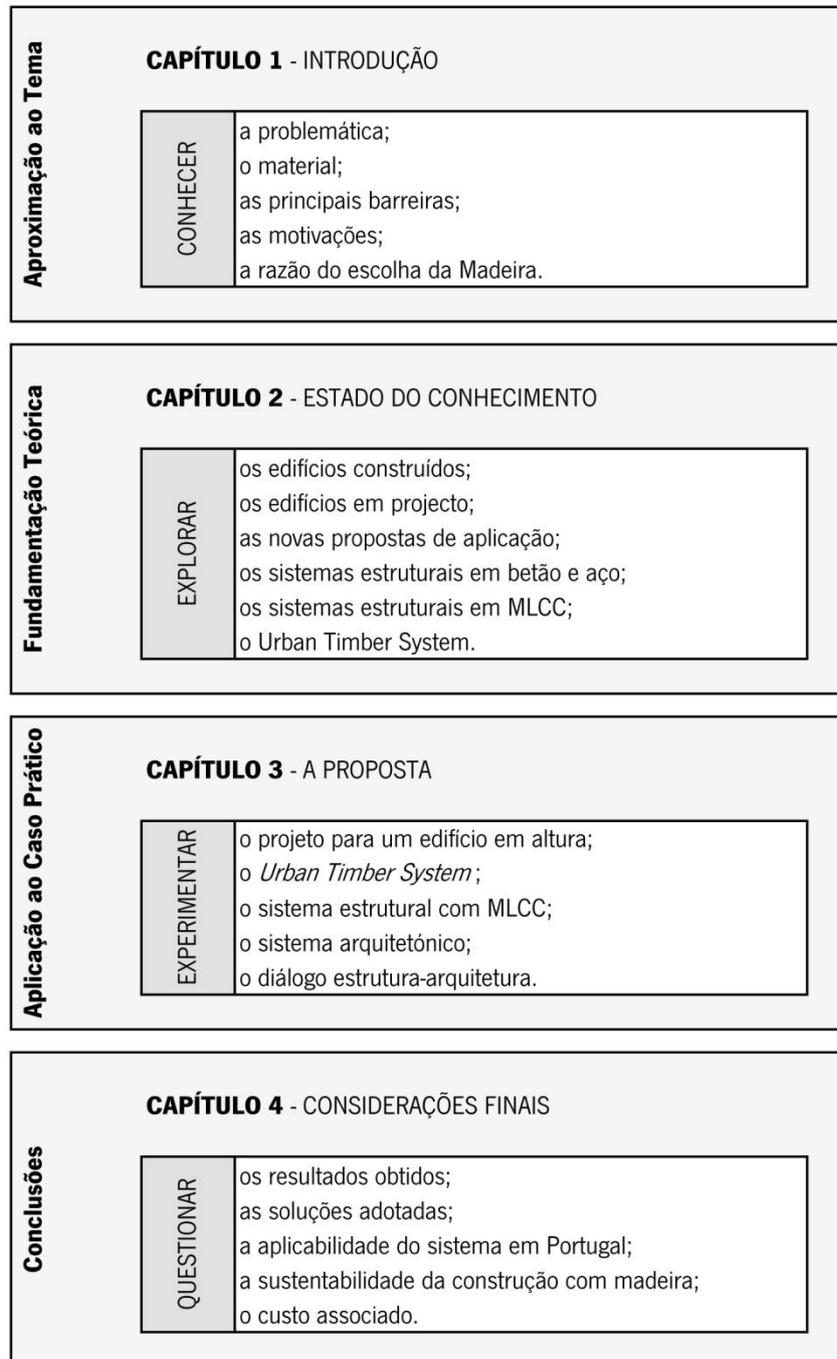


Imagem 3 – Esquema da Organização da Dissertação

De acordo com o esquema anterior, no primeiro capítulo, *Conhecer*, pretende-se mostrar a problemática em estudo e as questões inerentes à mesma e ao próprio material, desde as principais barreiras de utilização, como a razão pela qual se deve ou não utilizar madeira na construção de edifícios com vários pisos.

No segundo capítulo, *Explorar*, é apresentado o material, a madeira lamelada colada cruzada (MLCC) e a aplicação deste ao sistema estrutural de diversos edifícios já construídos, nomeadamente as diversas abordagens que têm vindo a ser adotadas por engenheiros e arquitetos, que pretendem dar a conhecer esta nova forma de construir. É feita uma análise comparativa às diferentes soluções apresentadas, assim como são abordadas, de forma sucinta, as soluções habitualmente utilizadas na construção de arranha-céus que têm como material principal o betão armado e aço.

No capítulo 3, *Experimentar*, toda a informação recolhida durante a revisão bibliográfica é aplicada ao projeto de um edifício de vinte andares construído integralmente em madeira, utilizando de forma combinada a MLCC e a MLC (madeira lamelada colada). Ao longo desta parte da dissertação são experimentadas várias soluções quer para o sistema construtivo quer para a solução arquitetónica adotada, sendo através deste trabalho de experimentação que se consegue propor e definir um edifício eficiente, capaz de ser construído em Portugal. Para além de se fazer uma análise extensiva quer ao sistema estrutural, quer ao sistema arquitetónico, são analisadas questões importantes relativas à regulamentação exigida para edifícios deste tipo.

No último capítulo, Considerações Finais, apresentam-se e questionam-se os resultados obtidos com a investigação desenvolvida. Com o objetivo de lançar temas para trabalhos futuros, são levantadas algumas questões que a utilização da madeira na construção em altura implica, nomeadamente, a sua viabilidade de aplicação em Portugal, a questão do preconceito de construir com madeira e as medidas necessárias para alterar os ideais pré-concebidos da sociedade portuguesa.

Estado do Conhecimento

2.1 MLCC e as suas propriedades

A madeira lamelada colada cruzada (MLCC) ou *Cross Laminated Timber* (CLT) é um derivado da madeira de elevada capacidade de carga e de reduzido peso próprio. Nascido na Suíça em 1990, tem vindo a ser desenvolvido na Áustria através de cooperação entre a indústria e as universidades. Este material utiliza o mesmo conceito de fabrico dos lamelados colados, através da colagem de camadas sucessivas de tábuas de madeira, mas no caso da MLCC, são coladas camadas sucessivas de madeira com tábuas dispostas ortogonalmente.

A Madeira Lamelada Colada Cruzada é um material homologado, verificado e submetido a exigentes controlos durante a sua produção. Por isso, construir com madeira oferece todas as garantias de segurança e qualidade que as pessoas procuram, e que até hoje em dia se questionam. Se o edifício construído em madeira for projetado e construído de forma correta, e tendo em consideração a proteção necessária contra a humidade e os agentes meteorológicos, pode durar séculos [5].

Entre outras coisas, os painéis de madeira lamelada colada cruzada são caracterizados pelas suas grandes dimensões (ver tabela 1). Todos os elementos para as paredes, pavimentos e cobertura são produzidos e entregues em obra de acordo com as indicações e dimensões de projeto, permitindo uma maximização do material, reduzindo custos e desperdícios e facilitando a montagem em obra.

Tabela 1 – Características Técnicas da MLCC

Características Técnicas da MLCC	
Dimensões Máximas dos Painéis	16,50 m em comprimento 2,95 m em largura
Espessura dos Painéis	Variável entre 3 a 8 camadas, isto é, entre os 57 e 500 mm
Comprimento Mínimo de Produção	8,25 m com incrementos de 5 cm até ao comprimento máximo
Larguras de Cálculo	2,40; 2,50; 2,73 e 2,95 m
Peso dos Painéis	480-500 kg/m ³ , ou 45 a 50 kg/m ² para uma parede típica de 94 mm de espessura

⁵ Fonte: <http://www.clt.info/en/produkt/bauen-mit-massivholz/vorteile-2/> (acedido a 10/2/14)

As dimensões máximas de fornecimento referidas na tabela anterior estão condicionadas pelas dimensões dos camiões que fazem o transporte entre o local de fabrico e o local da obra.

2.2 MLCC na construção em altura

Uma das principais inovações no uso da Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) na construção assenta na produção de painéis, ao contrário dos tradicionais elementos lineares, pilares e vigas, o que permite que possam ser utilizados tanto como parede como laje. A somar a estas características surgem capacidades de resistência e rigidez mais elevadas conferidas pela disposição cruzada das lamelas de madeira. Estas propriedades resistentes estão diretamente relacionadas com a composição interna maciça, composta pelas referidas lamelas cruzadas coladas permitindo a distribuição de cargas de forma bidirecional.

Em termos estruturais, no que respeita a pavimentos, a MLCC tem um funcionamento semelhante ao das estruturas em betão armado, e no que respeita a paredes, apresenta um funcionamento semelhante ao da alvenaria resistente, recorrendo ao uso de uma grande quantidade de paredes resistentes. Contudo, e mais recentemente, têm sido exploradas outras possibilidades da MLCC procurando combinar as suas características estruturais a outros materiais como o betão armado, o aço, ou até mesmo materiais derivados da madeira. O objetivo destas combinações é criar um sistema construtivo capaz de atingir cérceas mais altas e diminuir o número de paredes resistentes, em busca de espaços interiores mais amplos, aberturas maiores na fachada e de formas mais arrojadadas para o edifício.

O estudo e o conhecimento deste material de forma mais aprofundada têm possibilitado a construção de edifícios em altura com níveis de qualidade e funcionalidades muito satisfatórios. O edifício *Stadhaus*, em Londres, é um dos exemplos construídos que permite demonstrar o nível de qualidade a que este material e este sistema construtivo inovador podem chegar.

Para além desta referência, é possível enumerar um conjunto de outros edifícios que, nos últimos dez anos, procuram promover o uso da MLCC como sistema construtivo e explorar as suas potencialidades (ver imagem 4). Alguns estão já construídos e outros encontram-se ainda em fase de estudo e desenvolvimento. No entanto, todos eles utilizam a MLCC no seu sistema estrutural quer de forma isolada quer combinada com outro material, como o betão ou o aço, na tentativa de conseguir atingir cérceas mais elevadas.

Edifício	nº Andares	País	Estado Desenvolvimento	
FFTT System	30	Canadá	Em Estudo	
LifeCycle Tower	20 - 30	Áustria	Em Estudo	 
Barents House	20	Noruega	Em Estudo	
Forté	10	Austália	Concluído (2012)	
Delta Building		Austália	Em Estudo	
Stadthaus	9	Reino Unido	Concluído (2009)	
Via Cenni		Itália	Concluído (2013)	 
Bridport	8	Reino Unido	Concluído (2011)	 
Esmarchstrasse	7	Alemanha	Concluído (2008)	
Wagramer-strasse	7	Áustria	Concluído (2013)	
Svartlamoen	5 - 6	Noruega	Concluído (2005)	
Steinhausen, CH	6	Suíça	Concluído (2006)	
Muhlweg Project	3 - 4	Áustria	Concluído (2006)	

Imagem 4 - Edifícios Construídos e em Desenvolvimento com Sistema Construtivo em MLCC ⁶

2.3 Vantagens e desvantagens do material

À semelhança dos restantes materiais, é possível apontar vantagens e desvantagens à utilização da madeira lamelada colada cruzada (MLCC). No entanto, este material reúne várias

⁶ Fonte: COSTA, Ana Alexandra P. da, *Construção de Edifícios com Cross Laminated Timber (CLT)*, FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho de 2013 (Adaptada aos dados atuais).

vantagens relacionadas quer com o processo de construção do edifício quer com a própria conceção do projeto.

O aspeto mais apelativo da MLCC prende-se com a facilidade de montagem e com a redução no tempo de construção dos edifícios, decorrentes da rigorosa produção dos elementos em fábrica e com a pré-fabricação de todas as peças. Associada a esta particularidade, podem enumerar-se outras vantagens como o aumento da segurança em obra, a substancial redução dos custos de construção, e a diminuição dos resíduos e desperdícios. Um dos aspetos mais atrativos deste material prende-se com a facilidade de construção, implicando, no limite, apenas uma grua, um plano de montagem e mão-de-obra especializada em carpintaria para se construir um edifício.

Por se tratar de um material natural, a MLCC apresenta vantagens muito atraentes, como o seu perfil sustentável e a possibilidade de se reutilizar os painéis de madeira. Para além destas questões relacionadas com o meio ambiente e com a sustentabilidade, este material permite ao arquiteto grande versatilidade na conceção do projeto uma vez que se adapta facilmente às diferentes formas dos edifícios, quer quando é utilizado de forma independente quer de forma combinada com outros materiais como o aço ou o betão armado.

Apesar de existir um grande grupo de aspetos positivos que motivam e incentivam a utilização da madeira como material estrutural, existem ainda algumas barreiras importantes a ultrapassar, nomeadamente a desconfiança por parte da sociedade em relação à eficiência da madeira enquanto material de construção, principalmente no que diz respeito à resistência ao fogo.

Para além deste preconceito muito vincado na sociedade portuguesa, existem de facto alguns pontos negativos na utilização da MLCC na construção, que importa conhecer. Um dos principais problemas da utilização da MLCC prende-se com sua relação com a água, já que, tal como qualquer madeira ou derivado deste material, não pode estar em contacto direto com água, para assim se garantir a estabilidade, qualidade e função do material.

No que diz respeito ao sistema construtivo em MLCC em uso, a maior barreira prende-se com o facto de ser um sistema maciço e poder estar associado ao colapso progressivo de toda a estrutura. Contudo, têm vindo a ser desenvolvidos estudos no sentido de contornar esta questão. No entanto, e em função da análise dos edifícios já construídos em MLCC, é possível identificar-se outra questão desfavorável: por se tratar de um sistema construtivo com recurso a um elevado número de paredes resistentes, o espaço interior resultante é excessivamente compartimentado, não sendo conseguida relação com o espaço exterior nem permite grande liberdade ou flexibilidade ao arquiteto na organização interior do edifício.

2.4 Sistemas construtivos utilizados

A utilização da MLCC tem vindo a crescer nos últimos anos, existindo um grupo de edifícios em altura que já estão concluídos e ainda outros que se encontram em fase de estudo. Contudo, neste ponto importa perceber qual o nível do conhecimento atual, bem como fazer um resumo geral e sucinto daquilo que são as soluções existentes e utilizadas até ao momento.

A utilização da MLCC na construção em altura pode-se dividir em três diferentes abordagens, e como forma de explicar cada uma delas é apresentado um exemplo representativo.

- SISTEMA INTEGRAL DE MLCC

O *Stadhaus*, imagem 5, o primeiro edifício em altura construído com MLCC em Inglaterra, com nove pisos e aproximadamente 30 metros de altura, localiza-se em Hackney, no leste de Londres. É um paralelepípedo com uma implantação de 17 por 17 metros, e ocupa uma área de 289 m² sendo constituído por 29 apartamentos.

Concluído em 2009, o *Stadhaus* é destinado para habitação, sendo apenas o rés-do-chão projetado para acolher a atividade comercial. Alberga 29 apartamentos, dos quais onze são de tipologia T1, dez T2, cinco T3 e três T4. Foi integralmente construído com painéis de MLCC, incluindo as caixas de elevador e de escadas, no entanto o rés-do-chão foi construído em betão armado, dada a suscetibilidade da madeira à humidade.



Imagem 5 - Stadhaus, Londres ⁷

- SISTEMA HÍBRIDO MLCC - BETÃO

Com a intenção de se atingir cêrceas mais elevadas, surgem as soluções híbridas, que combinam a MLCC com materiais como betão armado ou o aço. Este tipo de abordagem recorre ao betão armado para a conceção dos núcleos de distribuição vertical do edifício e do rés-do-chão, na tentativa de ganhar resistência e dar mais estabilidade às solicitações laterais da construção. Para se poder explicar sucintamente esta abordagem à utilização da MLCC na construção em altura, é apresentado um exemplo, construído na Áustria, o primeiro edifício residencial de sete andares em MLCC concluído neste país, no ano 2013.

O *Wagramer Straße*, (ver imagem 6) em termos estruturais, apresenta os seis últimos pisos construídos em painéis sólidos de MLCC e o rés-do-chão em betão armado, para assim cumprir os regulamentos da construção de Viena (Wiener Bauordnung) para edifícios com mais de quatro andares. Este distingue-se do *Stadhaus*, apresentado anteriormente, por apresentar os três núcleos de distribuição vertical também em betão armado, com a finalidade de obter um reforço geral do edifício e também para uma melhor distribuição das cargas.



Imagem 6 - Wagramer Straße, Viena ⁸

⁷ Fonte: <http://www.e-architect.co.uk/london/stadthaus-murray-grove> (acedido em 9/10/14)

⁸ Fonte: http://www.architecture.at/index.php?article_id=39&clang=0 (acedido a 9/10/14)

▪ RECENTES DESENVOLVIMENTOS: FFTT SYSTEM E BARENTS HOUSE

Com o objetivo de explorar os aspetos positivos inerentes à construção de madeira em altura, existem alguns conceitos inovadores em desenvolvimento. São projetos que procuraram tirar o máximo partido das capacidades da MLCC e que, através de soluções híbridas, procuram conceber edifícios com cêrceas mais elevadas e com espaços interiores mais amplos. Na imagem 7 apresentam-se dois exemplos desta nova abordagem: o *Barents House* em Kirkenes, Noruega e o *FFTT System – Find the forests through the trees*.



Imagem 7 – Barents House, Noruega (à esquerda); FFTT System, Canadá (à direita) ⁹

O *Barents House* foi projetado para atingir uma altura de 17 pisos, e apresenta um sistema construtivo estrutural que combina pilares de madeira lamelada colada (MLC), pavimentos e paredes em MLCC e um núcleo central em betão armado (imagem 8). A utilização dos elementos lineares de MLC prende-se com a vontade de obter espaços mais amplos e de conseguir aberturas maiores para o exterior e o recurso ao betão armado justifica-se com o aumento da rigidez do edifício e com a reposta aos requisitos relacionados com a resistência ao fogo.

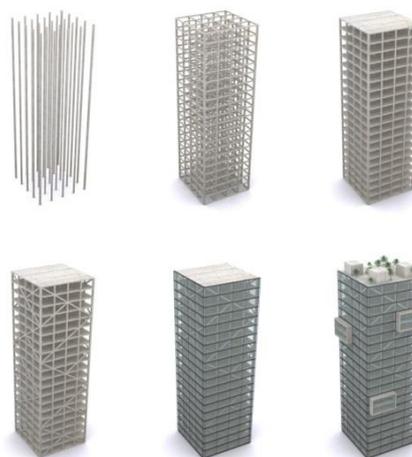


Imagem 8 - Sistema Estrutural do Barents House ¹⁰

⁹ Fonte Imagem Esquerda: <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=886016> (acedido a 9/10/14)

Fonte Imagem Direita: <http://www.archdaily.com/220779/michael-green-presents-the-case-for-tall-wood-buildings/> (acedido a 9/10/14)

¹⁰ Fonte: <http://www.designbuild-network.com/features/feature108971/feature108971-2.html> (acedido a 9/10/14)

Por outro lado, o sistema *FFTT* propõe suportar um edifício de 30 andares com recurso a uma solução construtiva que combina pilares e vigas de MLC, paredes, pavimentos e núcleo central em MLCC, e vigas de aço ancoradas no núcleo central. Nesta combinação de materiais, utilizam-se os elementos de madeira para resistir a forças gravíticas, enquanto os elementos de aço resistem às forças laterais assegurando uma maior rigidez do edifício (imagem 9).

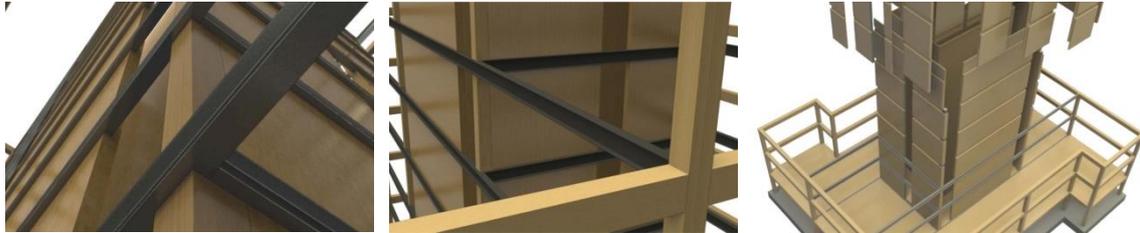


Imagem 9 – Pormenores do Sistema Construtivo FFTT ¹¹

Ao nível estrutural, ambas as soluções exploram os pontos fortes de cada material empregue, contudo o *FFTT System*, ao recorrer a elementos em aço, consegue uma maior flexibilidade e amplitude espacial. Outra questão inovadora explorada por ambas as soluções é a exposição dos elementos estruturais em MLCC e MLC, conseguida através de fachadas de vidro, que ao exporem estes elementos asseguram a sua proteção do ambiente exterior.

As abordagens à utilização em MLCC apresentadas acima são diferentes entre si e todas elas procuram maximizar as suas capacidades. Contudo, e apesar de as novas possibilidades serem cada vez mais ambiciosas, é fácil continuar a apontar os pontos fracos de cada uma das soluções. Assim sendo, a problemática do uso da MLCC prende-se com o facto de o sistema construtivo impor limitações ao arquiteto, estando ele preso a um sistema de paredes resistentes que dá origem a uma grande quantidade de planos verticais e como tal à excessiva compartimentação do espaço interior. A motivação deste trabalho levanta-se exatamente com esta problemática, e procura encontrar soluções que permitam contornar os pontos fracos acima referidos.

2.5 A organização espacial em edifícios de MLCC

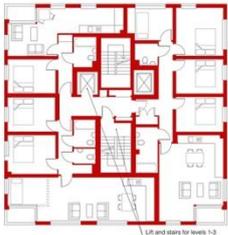
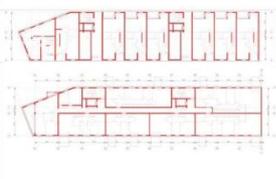
A questão da organização do espaço interior nos edifícios construídos com MLCC é a grande motivação desta pesquisa. É com base na análise de alguns projetos de edifícios construídos e de outros em fase de desenvolvimento, que se procura compreender os pontos fracos e os pontos fortes da utilização da MLCC neste tipo de construção. De seguida são apresentados os diferentes projetos analisados, dando especial atenção ao ano de construção, ao país e à empresa distribuidora de madeira com o objetivo de perceber a evolução do conhecimento, assim como de saber o que se procura e se pretende com este sistema construtivo.

¹¹ Fonte: <http://www.archdaily.com/220779/michael-green-presents-the-case-for-tall-wood-buildings/> (acedido a 9/10/14)

2.5.1 EDIFÍCIOS CONSTRUÍDOS

De acordo com os dados obtidos sobre cada um dos projetos identificados, e em função daquilo que é o objetivo principal deste trabalho, é feita uma análise gráfica do desenho do edifício em planta e como tal da sua organização interior (ver tabela 2). Ora, para além de perceber qual é o resultado de cada caso de estudo, é feita ainda uma abordagem à empresa distribuidora da madeira e ao país de localização, com o objetivo de perceber se existe ou não uma relação direta entre estes três intervenientes na construção com MLCC.

Tabela 2 – Planta e Alçado dos Edifícios Construídos com MLCC ¹²

Stadthaus, Londres		2009	K L H
Planta	Alçado		
		2010	K L H
Bridport House, Londres			
Planta	Alçado	2011	S t o r a E n s o
			
Forté, Melbourne		2012	K L H
Planta	Alçado		
		2013	S t o r a E n s o
Via Cenni, Milão			
Planta	Alçado	2013	S t o r a E n s o
			

¹² **KLH** – produtor e distribuidor de painéis de grandes dimensões de MLCC. A sede de produção foi inaugurada na Áustria em 1999 e desde então tem vindo a crescer. Atualmente produz anualmente aproximadamente 650 000 m² de painéis de MLCC.

Stora Enso – fabricante finlandês de produtos de papel, madeira e biomateriais, procura dar aos clientes produtos inovadores a partir dos produtos renováveis. Fundada em 1998 em Helsínquia, está atualmente localizada em mais de 40 países.

Organizados de forma cronológica, os edifícios apresentados na tabela 2, apresentam organizações espaciais distintas, em resultado daquilo que é o objetivo do cliente, da empresa responsável e do local de implantação.

De acordo com o referido anteriormente, é de notar a planta do primeiro edifício construído, o *Stadthaus* em Londres. Trata-se de uma planta quadrada, de reduzidas dimensões e na qual é possível identificar um elevado número de paredes resistentes, que resultam num espaço excessivamente compartimentado e com reduzidas aberturas para o exterior. Se a análise agora focar o *Bridport House*, é fácil apontar algumas diferenças entre este e o primeiro edifício construído em Londres. Este último, concluído em 2011 também em Londres, apresenta uma organização interior em planta mais ampla e uma redução significativa do número de paredes estruturais. Apesar da empresa fornecedora de MLCC não ser a mesma, tais diferenças podem ser justificadas com o facto de já haver alguma experiência na construção em altura em madeira neste país. Isto é, quando se está a construir pela primeira vez um edifício com recurso a um sistema construtivo inovador, o receio de que algo possa correr mal é superior, e como tal são tomadas medidas de segurança maiores, não correndo tantos riscos. Ou seja, como não há uma base sobre a qual trabalhar, opta-se por uma solução arquitetónica menos arrojada mas que respeita o mais possível aquilo que se sabe acerca do sistema estrutural utilizado. Aquando da construção do *Bridport House*, como já existia um edifício construído em MLCC na mesma cidade, havia já um conhecimento prévio daquilo que se pode ou não fazer, e como tal sabia-se onde melhorar em termos de projeto de arquitetura, não ficando o resultado final tão vinculado a questões de dimensionamento estrutural, por exemplo.

Esta é uma das questões a salientar em função da análise efetuada, ficando visível que o conhecimento prévio e a experimentação são muito importantes quando se pretende inovar e construir algo diferente do convencional.

Relativamente aos dois outros edifícios também apresentados e analisados, é possível perceber que se vai procurando contornar os pontos fracos que facilmente são apontados ao *Stadthaus* e que foram sendo referidos.

O *Forté*, em Melbourne, por exemplo, procura contornar a volumetria de torre em paralelepípedo jogando com os planos de fachada na tentativa de alcançar uma forma menos rígida. À semelhança deste, o *Via Cenni* em Milão, introduz um espaço exterior ao edifício, criando varandas associadas a cada um dos apartamentos, na tentativa de melhorar o problema da falta de relação com o meio envolvente e das reduzidas aberturas para o exterior.

Como já foi referido acima, a questão da localização do edifício, e se é o primeiro ou não a ser construído naquele país com MLCC, é muito importante na conceção do mesmo uma vez que existe alguma experiência, e dá aos construtores mais ‘à-vontade’, mais conhecimento e mais segurança em arriscar novas formas e novas organizações. Contudo, também é verdade que as empresas distribuidoras de derivados de madeira podem ter grande influência no desenho de projeto do edifício, já que são elas as responsáveis e ‘entendidas’ no material. Assim sendo, o primeiro edifício a ser construído vai ser sempre o mais difícil, e como tal o menos ambicioso em termos arquitetónicos. No esquema apresentado (tabela 2) é referida a empresa responsável em cada um dos casos de estudo e pretende-se, com esta análise, perceber se há evolução ou não na forma de construir.

No caso da KLH, responsável pelo *Stadthaus* e pelo *Forté*, há claramente uma tentativa de contornar a forma rígida da torre, buscando uma forma mais trabalhada para o edifício. Contudo,

no caso da *Stora Enso*, essa evolução não é tão notável, mantendo uma organização interior bastante semelhante nos dois projetos em estudo. Tal semelhança pode dever-se ao facto de o primeiro edifício construído pela *Stora Enso* ter sido o segundo a ser feito em Londres, e como tal não foram cometidos os ‘erros de principiante’ que a KLH cometeu no *Stadthaus* e corrigiu nos casos seguintes.

2.5.2 EDIFÍCIOS EM FASE DE DESENVOLVIMENTO

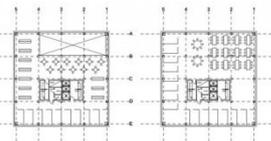
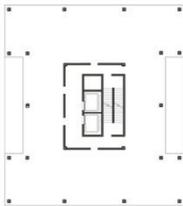
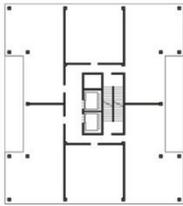
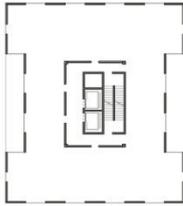
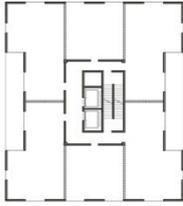
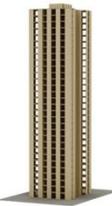
Para além dos edifícios já construídos e que foram analisados no ponto anterior, existem novos projetos que têm vindo a ser desenvolvidos nos últimos anos. Estes, com um conceito mais inovador e arrojado, procuram tirar o máximo partido das capacidades da MLCC e, através do recurso a soluções estruturais híbridas, procuram conceber edifícios mais altos e com uma organização espacial interior mais ampla, conseguindo uma maior abertura para o exterior.

A fim de conhecer aquilo que tem vindo a ser trabalhado noutros países, é feita agora uma análise muito sumária a dois desses novos projetos mais ambiciosos: o *Barents House*, na Noruega e o *FFTT System*, no Canadá. Pretende-se com esta abordagem perceber os métodos construtivos utilizados para *a posteriori* comparar com os edifícios construídos.

Estes dois exemplos são aqui analisados por apresentarem uma nova abordagem à utilização da MLCC na construção em altura, em busca das respostas aos problemas identificados nos edifícios existentes.

O primeiro caso de estudo apresentado na tabela 3, o *Barents House*, localizado na Noruega, foi projetado para atingir os 80 metros de altura, albergando um total de 20 pisos. Este propõe um sistema construtivo inovador ao utilizar de forma combinada pilares de madeira lamelada colada (MLC), reforçados com elementos na diagonal para maior estabilidade, pavimentos e paredes em MLCC e um núcleo central de betão armado. A utilização destes materiais prende-se com a vontade de alcançar espaços mais amplos e de conseguir maiores aberturas para o exterior, e tal é conseguido ao recorrer aos elementos lineares de MLC. Contudo, e apesar de conseguir contornar dois dos problemas identificados, continua sem haver evolução na volumetria da torre. Isto é, mantém-se uma imagem de paralelepípedo, rígida e pouco trabalhada ou experimentada, e esta é outra das questões-chave apontada como ponto negativo da utilização da MLCC na construção em altura.

Tabela 3 – Características Principais dos Edifícios em Desenvolvimento

Edifício		Nº de Pisos	Localização	Ano	Planta	Alçado
Barents House		20	Kirkenes, Noruega	2009		
Edifícios Em Desenvolvimento	FFTT System	Opção 1	Vancouver, Canadá	2012		
		Opção 2				
		Opção 3				
		Opção 4				

No caso do *FFTT System – Find the forests through the trees*, são apresentadas quatro opções de disposição interior, em função daquilo que é a cêrcea máxima do edifício (ver tabela 3). Neste projeto é adotado um sistema construtivo híbrido, isto é, combina os painéis de MLCC com vigas de aço e com pilares e vigas de madeira lamelada colada. A utilização combinada destes materiais permite tirar o máximo partido de cada um deles, maximizando as suas potencialidades e conseguindo melhores resultados em termos estruturais.

As quatro soluções apresentadas no *FFTT System* diferem entre si pelo número de pisos que o edifício consegue alcançar e, através da tabela 3 é fácil perceber que existe uma relação direta entre esta característica e a organização em planta e o desenho da fachada do edifício. Isto é, à medida que se vai crescendo em altura, o desenho do espaço interior vai ficando cada vez mais compartimentado e a fachada mais fechada.

O arquiteto responsável por este projeto, Michael Green, propõe quatro hipóteses de organização, sendo que as opções 2 e 3 assumem a mesma altura máxima, diferindo apenas na organização interior. Ora na opção 2, é conseguida a liberdade da fachada, uma vez que não existem elementos estruturais no invólucro, contudo para que tal se consiga, perde-se a liberdade na organização interior, uma vez que são inseridas paredes divisórias estruturais em MLCC. Analisando a opção 3, percebe-se que a organização interior é outra vez flexível, uma vez que as cargas são agora distribuídas pelos painéis estruturais da fachada.

Considerando a sociedade portuguesa e as suas necessidades, a proposta mais facilmente aceite cá seria a 3, já que é preferível um edifício onde seja possível organizar o interior em função das necessidades e da finalidade do espaço, não estando preso ao desenho da estrutura, apresentado contudo uma fachada menos aberta, do que a situação inversa, como é exemplo a opção 2.

Apesar de se continuar a poder apontar aspetos negativos, com este sistema é dado um grande passo na construção em altura, uma vez que se for feita uma comparação entre a opção 1 do *FFTT System*, que atinge os 12 pisos, e o *Stadthaus* em Londres, com 9 pisos, há uma clara diferença no desenho de projeto de arquitetura. Isto é, através da utilização de outros materiais de forma combinada com a MLCC é conseguida uma planta de organização totalmente livre e uma fachada que permite ao arquiteto total flexibilidade no seu desenho. Contudo, e mesmo dando resposta a uma das principais questões da construção em altura que é a liberdade e flexibilidade da organização do espaço interior, à semelhança do *Barents House*, não é dada qualquer importância ao desenho da forma do edifício. Isto é, continua a manter-se a forma paralelepípedica de torre, não procurando formas mais ambiciosas, mais arrojadas no desenho tridimensional da torre.

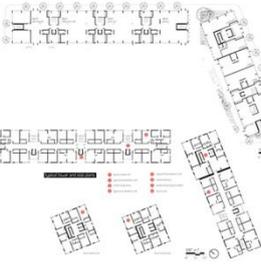
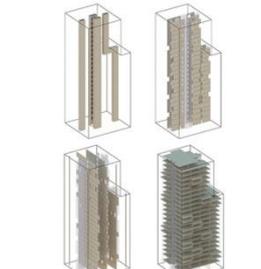
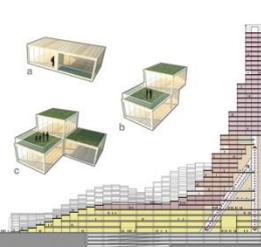
Este último tema, relacionado com a volumetria do edifício, é muito importante e não tem vindo a ser explorado nos diferentes projetos em estudo. Na maioria dos casos de estudo analisados, a forma tridimensional do edifício continua muito rígida, em forma de paralelepípedo, resultado da falta de experimentação e investigação sobre o assunto. Para além de se conseguir formas mais arrojadas para a torre, consegue-se também uma outra relação com o meio envolvente, um outro diálogo com os restantes edifícios.

Em resultado daquilo que foi a análise destes casos de estudo – edifícios construídos e edifícios em desenvolvimento – pode afirmar-se que a investigação até agora tem decorrido no sentido de alcançar o maior número de pisos, procurando sempre construir mais alto. Esta investigação tem tentado contornar as questões mais problemáticas da utilização da MLCC, na tentativa de inovar na forma de construir, recorrendo a sistemas construtivos com menos paredes resistentes e assim conseguir maior flexibilidade do projeto em planta e na fachada. A questão da volumetria e da forma exterior do edifício tem sido deixada de parte. Este assunto deve agora ser considerado, e é fundamental que este se combine com o que tem vindo a ser desenvolvido e estudado de forma a obter respostas mais rápidas e ser coerente com o alcançado em planta e na fachada.

2.5.3 EDIFÍCIOS PROTÓTIPO | CONCURSOS E COMPETIÇÕES

Para além de se conhecerem os edifícios já construídos e aqueles que estão em fase de estudo, é importante conhecer o que tem vindo a ser apresentado em concursos e competições da construção em altura em madeira. Para tal são apresentados de seguida quatro projetos, propostas vencedoras de três competições distintas ocorridas no ano de 2013, *Timber in the City Competition 2013*, *2013 eVolo Skyscraper Competition* e *HSB Stockholm's Architectural Competition 2013*, na tabela 4.

Tabela 4 – Características Principais dos Edifícios Protótipo

	Edifício	Nº de Pisos	Localização	Ano	Planta	Alçado
Edifícios Protótipo_ Concursos e Competições	Timber in the city competition Grow your own City - 1st Place	-	Red Hook Brooklyn, N.Y., EUA	2013		
	Timber in the city competition Cultivating Timber - 2nd Place	-	Red Hook Brooklyn, N.Y., EUA	2013		
	2013 eVolo Skyscraper Competition Big Wood	+ de 40	Chigado, Illinois, EUA	2013		
	HSB Stockholm's Architectural Competition 2013 Berg	34	Estocolmo, Suécia	2013		

Contrariamente áquilo que foi dito no ponto anterior, nestes projetos a questão que mais salta à vista é a da volumetria da torre, nomeadamente nos três últimos. Nestes, o jogo de planos

na fachada é levado ao exagero e são conseguidas formas mais arrojadas e diferentes daquelas que foram analisadas até agora. Contudo, em termos construtivos não se consegue obter muita informação sobre estas propostas, até porque são isso mesmo, propostas, e como tal há muita ambição por detrás destes projetos, que procuram ser diferentes e inovar em todos os sentidos.

Relativamente ao desenho em planta, é fácil perceber que o primeiro projeto não é muito ambicioso, estando perante um desenho bastante rígido e com um grande número de paredes resistentes, e como tal excessivamente compartimentado. Contudo, no caso do *Berg* a organização em planta é bem mais fluída, com reduzido número de paredes divisórias. Tal é conseguido com recurso a pilares de madeira maciça que fazem o suporte das cargas de forma combinada com o núcleo estrutural de betão armado.

Em termos de desenho da fachada, o primeiro projeto é bastante simples, estando muito próximo daquilo que tem sido feito, no entanto, a segunda proposta, e devido ao sistema construtivo adotado, consegue grande flexibilidade no desenho da pele do edifício. Ao funcionar num sistema de caixas presas a um núcleo central, todas as paredes exteriores estão libertas de cargas e como tal é fácil abrir na totalidade um pano de parede, ou de fechar completamente outro. Este sistema de caixas permite ainda uma maior versatilidade no desenho da torre, já que se podem deixar espaços vazios entre estas peças, conferindo diversidade de espaços, e variedade no desenho da fachada.

Big Wood é definitivamente a proposta mais irreverente dos casos de estudo analisados, levando mesmo a questionar a sua viabilidade de construção. Apesar de não serem conhecidos muitos pormenores do sistema construtivo adotado, fica difícil de acreditar que é possível construir um edifício com uma forma tão distinta e que atinge os 40 pisos de altura. Contudo, são estas propostas mais ambiciosas que ajudam a desenvolver um tema tão pouco explorado como é o caso da construção em altura em MLCC, e este é um bom exemplo de como contornar a forma de torre rígida, que tem vindo a ser apontada em praticamente todos os edifícios analisados.

2.5.4 QUADRO RESUMO – CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

No seguimento da análise dos diferentes projetos construídos ou em fase de desenvolvimento apresentada nos pontos anteriores, segue-se agora um quadro resumo onde se expõem as características principais de cada uma das propostas, a fim de se perceber quais os pontos-chave que se devem melhorar e incorporar no sistema construtivo a propor *a posteriori* (ver tabela 5). Esta comparação deixa perceber o que se tem vindo a fazer em termos de construção em altura, nomeadamente os sistemas construtivos que têm sido adotados, numa relação direta com o número de pisos alcançados e a própria localização do edifício.

Tabela 5 – Comparação das Características-chave dos Edifícios Analisados

	Edifício	Localização	Ano	Nº de Pisos	Distribuidor de Madeira	Área (m ²)	Altura Máxima (m)	Função	Sistema Construtivo	Quantidade de Madeira
	Stadthaus	Londres, U.K.	2009	1+8	KLH	289	30	Residencial	Construção celular em MLCC; Construção maciça em madeira; Fundações e primeiro piso em betão armado.	901 m ³
	Bridport House	Londres, U.K.	2011	8	Stora Enso	4154	-	Residencial	Construção celular em MLCC.	1576 m ³
	Forté	Melbourne, Austrália	2012	1+9	KLH	-	32,17	Residencial	Construção celular em MLCC; Construção maciça em madeira; Fundações e primeiro piso em betão armado.	485 ton 1373 m ³
	Via Cenni	Milão, Itália	2013	9	Stora Enso	257	27	Residencial	Construção celular em MLCC; Construção maciça em madeira; Fundações e primeiro piso em betão armado.	6100 m ³
	FFTT System	Vancouver, Canadá	2012	até 30	CST Innovations	532	-	Residencial	Núcleo de distribuição central em MLCC; Painéis de MLCC; Pilares e vigas de madeira lamelada colada (MLC); Vigas de aço.	-
	Barents House	Kirkenes, Noruega	2009	20	-	576	80	Cultural	Painéis de MLCC; Núcleo central em betão armado; Elementos lineares em madeira lamelada colada (MLC).	-
	Timber in the city - 1st place	Nova Iorque, EUA	2013	-	-	-	-	Residencial	Painéis de MLCC que funcionam em simultâneo como suporte de cargas e como paredes de corte.	-
	Timber in the city - 2nd place	Nova Iorque, EUA	2013	-	-	-	-	Residencial	Painéis de MLCC; Pilares e vigas de MLCC; Paredes de corte ao centro que garantem rigidez; Paredes divisorias proporcionam a estabilidade da torre.	-
	Big Wood	Chicago, EUA	2013	+ de 40	-	-	-	Campus universitário	Construção de madeira maciça.	-
	Berg	Estocolmo, Suécia	2013	34	-	-	-	Residencial	Pilares e vigas de madeira maciça; Núcleo central de betão armado.	-

Consegue-se perceber a evolução que a aplicação deste material tem tido ao longo de um curto período de tempo, assim como a ambição de construir cada vez mais alto já que os edifícios assumem cada vez mais andares, programas mais ambiciosos e formas mais arrojadas. Compreende-se portanto a atualidade da MLCC na construção em altura. À medida que se vai descendo na tabela, pode afirmar-se que há uma busca no sentido de inovar e construir mais, melhor e mais alto, procurando responder aos aspetos negativos identificados nos primeiros edifícios construídos.

É com base nesta informação recolhida e no estudo da mesma que se pretende dar continuidade à presente proposta de investigação. Assim, e de acordo com o que foi referido nos pontos anteriores, existem várias e novas abordagens à utilização da MLCC na construção em altura, mas existem também pontos importantes que não têm sido devidamente explorados.

No seguimento dos resultados obtidos após a análise, apresentam-se algumas das questões/características-chave que se pretendem trabalhar no decorrer da investigação. Ora assim sendo, é objetivo que o sistema construtivo proposto dê resposta aos seguintes pontos:

- flexibilidade no desenho do espaço interior em planta;
- flexibilidade no desenho do invólucro do edifício (desenho da fachada);
- possibilidade de abrir vãos maiores e em maior número na fachada, conseguindo uma maior relação com o meio envolvente;
- possibilidade de assumir diferentes usos e funções, além do residencial;
- contornar o desenho rígido de 'torre', procurando formas mais ambiciosas conseguidas através do trabalho com os panos de fachada e da própria forma em planta;
- apostar num sistema construtivo híbrido, que seja capaz de possibilitar construir mais alto e com menos elementos estruturais. Combinar a MLCC com elementos lineares de madeira lamelada colada; combinar os painéis de MLCC com um núcleo estrutural em betão armado ou com elementos metálicos;
- diferentes possibilidades de localização do núcleo de distribuição vertical.

2.6 Soluções Estruturais em Edifícios Altos – Aço e Betão Armado

No seguimento da análise efetuada aos edifícios construídos e recentes propostas para a aplicação da MLCC na construção de edifícios em altura, pretende-se agora analisar algumas das soluções estruturais existentes. Sendo um dos objetivos desta investigação propor uma solução construtiva que seja capaz de contornar os problemas e os aspetos negativos das soluções analisadas, é feito agora um breve estudo daquilo que são os sistemas possíveis de serem adotados com soluções metálicas e em betão armado.

Fazlur Khan, engenheiro de estruturas, publicou em 1969 um guia onde é feita a classificação de diversas soluções construtivas, relacionando a altura dos edifícios com as capacidades de cada solução apresentada [13]. Com esta publicação surgem dois esquemas, onde se percebe graficamente as diferentes soluções estruturais utilizando o aço ou o betão armado. Isto marcou o início de uma nova era na construção de edifícios altos em termos de múltiplos sistemas estruturais. Os esquemas apresentados na imagem 10 foram concebidos tanto para estruturas em betão como estruturas em aço.

¹³ Publicação referida: 'Heights for Structural Systems' Diagrams, Fazlur Khan, 1969. In ALI, Mir M; MOON, Kyong Sun, *Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects*, Architectural Science Review - Volume 50.3, pp. 205-223, 2007.

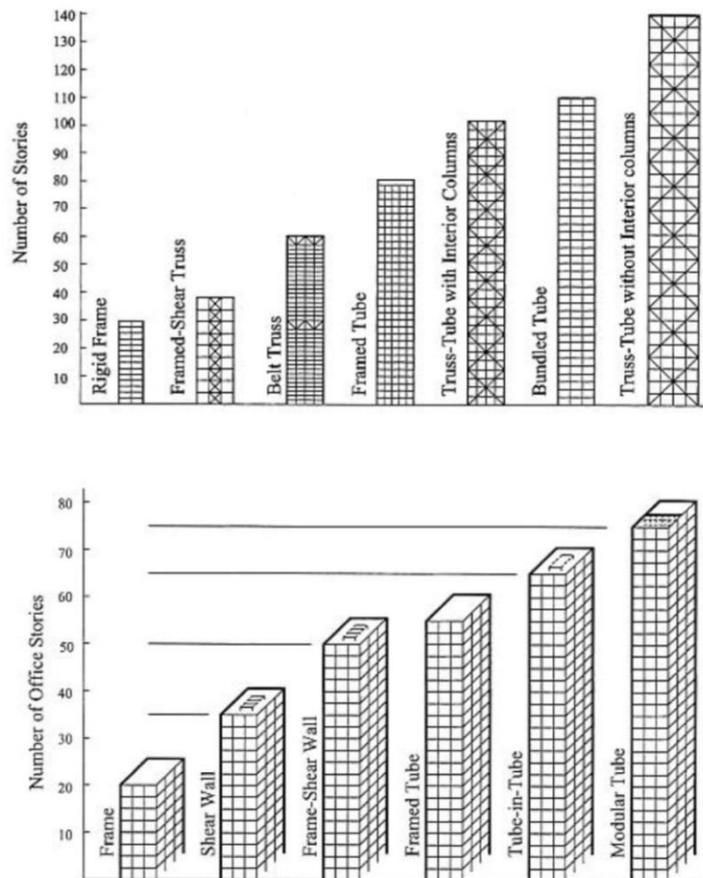


Imagem 10 – Classificação dos Sistemas Estruturais para Edifícios Altos por Fazlur Khan (imagem de cima: aço, imagem de baixo: betão armado)¹⁴

De acordo com este autor [15], a estrutura rígida que tinha vindo a dominar os projetos da construção em altura não é o único sistema apropriado para o efeito. Tendo como base um maior conhecimento da mecânica dos materiais e do seu comportamento, Khan fundamenta que a estrutura pode ser tratada de forma holística, isto é, o edifício em estudo pode ser analisado a três dimensões, com o auxílio de simulações em computador, ao invés de ser estudado como uma série de sistemas planos em cada uma das direções principais. Assim sendo, para Fazlur Khan, os sistemas viáveis de serem utilizados na construção de edifícios altos são as armações rígidas (*rigid frames*), as paredes de corte (*shear walls*), as combinações interativas armação–parede de corte (*frame–shear wall*), as treliças (*belt trusses*) e as várias opções tubulares (*tubular systems*), tal como é visível nos diagramas apresentados na imagem 10 para cada os dois materiais mais utilizados.

Para além da questão da análise do edifício em três dimensões, *Khan*, afirma que os sistemas estruturais dos edifícios altos podem ser divididos em duas categorias: as estruturas

¹⁴ Fonte: ALI, Mir M; MOON, Kyong Sun, *Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects*, Architectural Science Review - Volume 50.3, pp. 205-223, 2007.

¹⁵ In ALI, Mir M; MOON, Kyong Sun, *Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects*, Architectural Science Review - Volume 50.3, pp. 205-223, 2007.

interiores e as estruturas exteriores. Esta classificação é feita com base na distribuição dos elementos resistentes no edifício. Assim, diz-se que uma estrutura é interior quando a maioria dos elementos resistentes se encontram no interior do edifício, e diz-se que é uma estrutura exterior quando os elementos resistentes se localizam maioritariamente no perímetro do edifício. Apesar de haver esta classificação por categorias, deve salientar-se que qualquer um dos sistemas pode integrar componentes de menores dimensões quer no interior, quando se trata de uma estrutura exterior, quer no perímetro do edifício, quando se recorre a um sistema de estrutura pelo interior. Esta classificação é feita com o objetivo de ser uma orientação, um guia, e por isso mesmo deve ser tratada como tal.

Na imagem 11, são apresentados os sistemas de estruturas pelo interior que Khan propõe na sua publicação. No entanto, nem todos os sistemas são adequados a todo o tipo de edifícios altos, é necessário ter em atenção, entre outras coisas, o tamanho e a função de edifício que se pretende. Por exemplo, a solução de armações rígidas (*rigid frames*) não é eficiente para edifícios com mais de 30 andares uma vez que a flexão das colunas e vigas quando sujeitas a esforços provocam um excessivo balanço do edifício. Por outro lado, as treliças de corte em aço (*steel shear trusses*) ou as paredes de corte em betão (*shear walls*), por si só podem ser capazes de oferecer resistência para edifícios de até 10 ou 35 pisos, respetivamente, em função da proporção altura-largura do sistema.

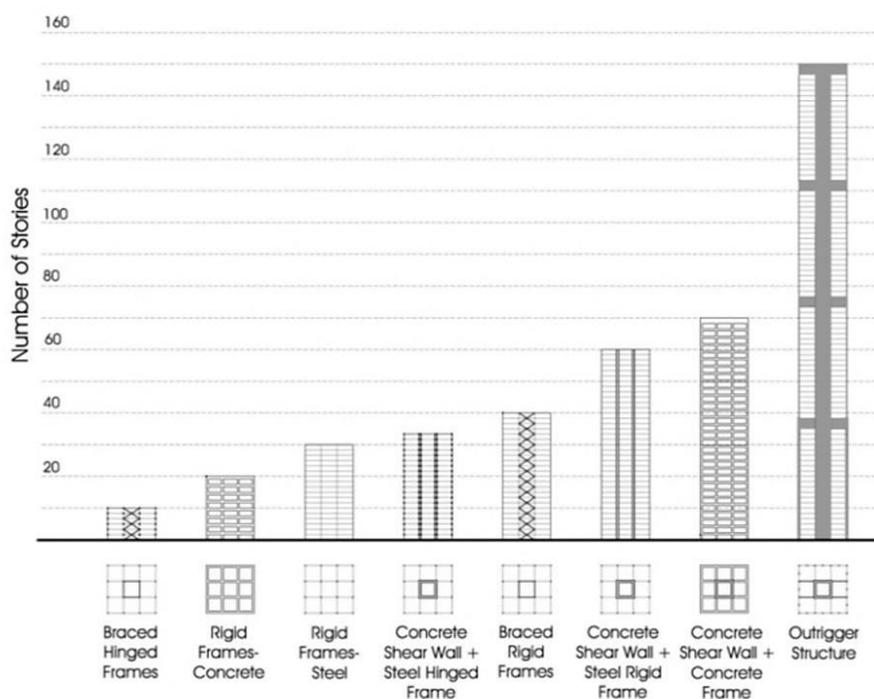


Imagem 11 – Sistema de Estrutura Interior¹⁶

No que respeita às estruturas pelo interior, imagem 11, os dois sistemas básicos capazes de resistir às cargas laterais são as armações momento-resistente (*moment-resisting frames*) e as

¹⁶ Fonte: ALI, Mir M; MOON, Kyong Sun, *Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects*, Architectural Science Review - Volume 50.3, pp. 205-223, 2007.

treliças de corte/paredes de corte (*shear trusses/shear walls*). Estes dois sistemas são normalmente dispostos em montagens planares nas duas direções principais mas podem ser utilizados em conjunto, funcionando como um sistema combinado no qual interagem. Outro sistema muito importante nesta categoria é o núcleo central estrutural ou núcleo de suporte (*core-supported outrigger*). Este é muito utilizado na construção de edifícios altos, por ser um sistema que se assemelha ao funcionamento dos mastros dos barcos à vela. Isto é, há já muitos anos que na indústria naval se recorre ao ‘sistema de núcleo central resistente’ como método capaz de resistir à força do vento a que as velas estão sujeitas, fazendo com que os mastros altos e delgados sejam estáveis e fortes. De acordo com Fazlur Khan, pode utilizar-se o mesmo conceito estrutural para a construção de edifícios em altura.

Relativamente às estruturas pelo exterior, representadas na imagem 12, um dos sistemas mais utilizados é o sistema de tubo (*tube*), o qual pode ser definido como uma estrutura tridimensional que recorre ao perímetro do edifício, na sua totalidade, para resistir às cargas laterais a que o edifício está sujeito. A primeira aplicação deste conceito está atribuída a Fazlur Khan, que concebeu o sistema em 1961 e projetou um edifício de 43 pisos em Chicago, o *DeWitt-Chestnut Apartment Building* concluído em 1965, que é considerado o primeiro edifício construído com o sistema de estrutura pelo exterior de tubo. Ao longo dos anos foram construídos vários edifícios, alguns dos mais altos do mundo, com recurso ao conceito de estrutura tubular. São exemplo dessa aplicação a *Sears Tower* (110 pisos), o *John Hancock Center* (100 pisos), os dois em Chicago e ainda as conhecidas torres do *World Trade Center* em Nova Iorque, com 110 andares, destruídas em 2001. Atualmente é bastante comum optar-se pelo conceito de estrutura tubular ou por uma variação deste sistema para projetos de edifícios com mais de 50 andares. A introdução deste tipo de sistema estrutural foi revolucionária, na medida em que, pela primeira vez, foi explorada a resposta tridimensional do edifício, o que permitiu o afastamento do sistema convencional de estrutura rígida de grelha viga-pilar ligados de forma rígida.

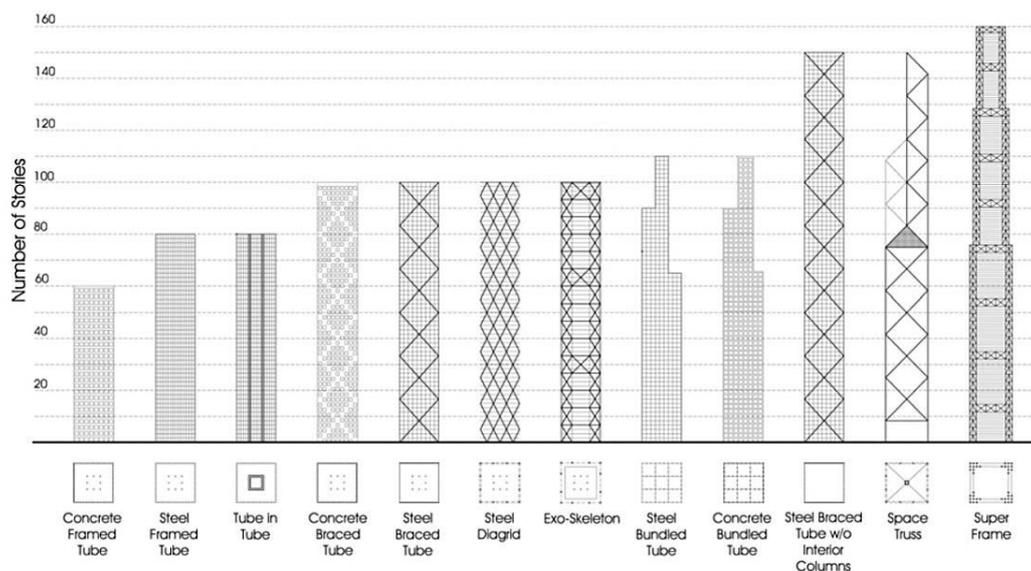


Imagem 12 – Sistema de Estrutura pela Exterior ¹⁷

¹⁷ Fonte: ALI, Mir M; MOON, Kyong Sun, *Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects*, Architectural Science Review - Volume 50.3, pp. 205-223, 2007.

Os critérios de escolha da solução construtiva adequada na construção de um edifício em altura abrangem aspetos como as dimensões do seu volume, a determinação das cargas a que estará sujeito, o conhecimento das condições específicas do local de implantação, as exigências do programa funcional a instalar, o conceito arquitetónico ou a expressão formal pretendida. A opção técnica resultante poderá enquadrar-se num dos tipos clássicos anteriormente apresentados ou na sua combinação, podendo também ser introduzidas novas soluções

A compreensão destas diferentes abordagens ao sistema construtivo recorrendo aos materiais mais utilizados na construção de edifícios altos serve de suporte à presente investigação para a proposta de novos conceitos, novos materiais e novas formas de construir.

2.7 Sistemas Construtivos Utilizados com MLCC

2.7.1 CONSTRUÇÃO CELULAR

Nos últimos anos a madeira lamelada colada cruzada (MLCC) tem sido utilizada na construção de vários edifícios em altura, com dimensões compreendidas entre os 8 e 10 andares. Estes foram construídos a fim de demonstrar as capacidades e as vantagens da utilização deste material no sistema estrutural dos edifícios.

Os edifícios mais conhecidos que adotam este material para o sistema construtivo são o *Stadthaus* e o *Bridport* em Londres na Inglaterra e o *Forté* em Melbourne na Austrália. Todos eles são baseados no sistema de construção celular, no qual a MLCC molda todas as paredes e pavimentos. No que respeita à estabilidade estrutural, esta é conseguida através de paredes viga e de núcleos de distribuição vertical construídos com elementos mais espessos de MLCC ou com recurso à duplicação de painéis.

O tipo de construção utilizada nestes edifícios, com paredes e pisos ortogonais formam um sistema tridimensional de painéis de travamento, com o objetivo de maximizar a robustez da estrutura (imagem 13). Esta grande estabilidade é conseguida ao transformar todos os elementos verticais em paredes resistentes, conseguindo assim maior estabilidade do edifício quando sujeito a ações verticais, mas também quando sujeito a solicitações horizontais, como a ação do vento. As solicitações a que o edifício está sujeito, são recebidas pela pele do edifício, transferidas às paredes exteriores, posteriormente transmitidas para os painéis do pavimento que, por sua vez, passam os esforços resultantes para as paredes internas e externas e são por fim transmitidos à base inferior do edifício em betão armado.

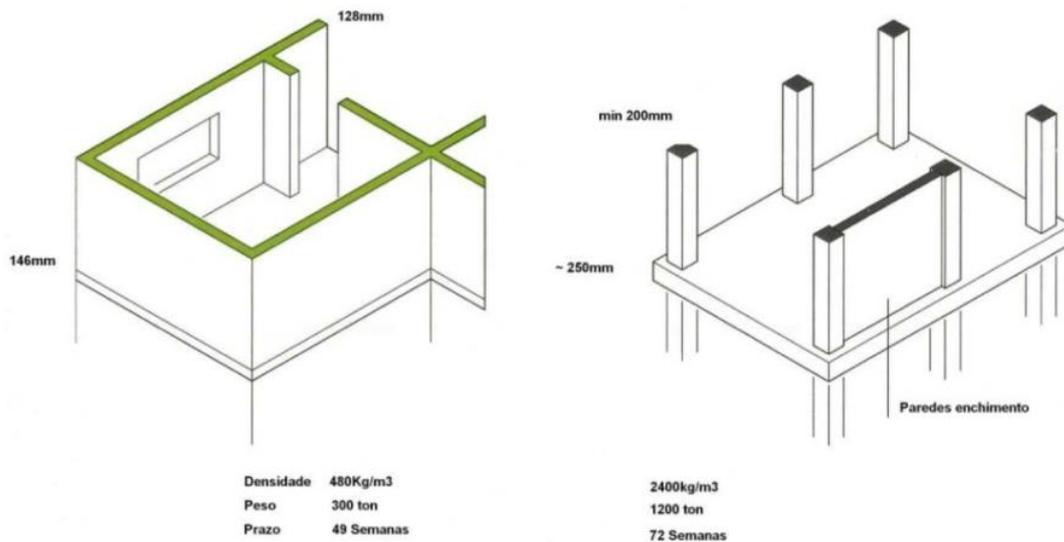


Imagem 13 - Comparação entre o Sistema de Painéis Contínuos de MLCC (à esquerda) e a Solução Tradicional em Betão Armado (à direita) ¹⁸

Este sistema construtivo implica desvantagens na sua utilização, algumas das quais foram já apresentadas aquando da análise dos edifícios construídos. No entanto, um dos pontos negativos mais limitativos ao trabalho do arquiteto passa pela necessidade de existência de caminhos de carga contínuos em todo o edifício, isto é, é necessário que haja continuidade de todos elementos verticais desde a base até ao topo, de forma a garantir a estabilidade e funcionamento geral do edifício (montagem exemplo apresentada na imagem 14).



Imagem 14 – Montagem dos Painéis de MLCC no Edifício Stadthaus ¹⁹

¹⁸ Fonte: COSTA, Ana Alexandra P. da, *Construção de Edifícios com Cross Laminated Timber (CLT)*, FEUP-Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho de 2013.

¹⁹ Fonte: TRADA Technology, Stadthaus, *24 Murray Grove, London - Eight stories of apartments featuring cross-laminated timber panels*, 2009. Disponível em: http://eoinc.weebly.com/uploads/3/0/5/1/3051016/murray_grove_case_study.pdf (acedido a 23/10/14).

2.7.2 SISTEMAS INOVADORES

Em função daquilo que são os problemas da utilização da MLCC com base numa construção celular, têm surgido conceitos inovadores. Com o objetivo de alcançar cêrceas mais elevadas e de contornar as questões-chave da construção utilizada até então, estas propostas apostam em sistemas híbridos e mais leves, onde combinam a MLCC com outros materiais como o aço ou o betão armado. É através do uso destes materiais diferentes de forma combinada que procuram maximizar as propriedades de cada um deles, obtendo assim um sistema construtivo capaz de dar resposta aos diferentes problemas identificados até então e de alcançar resultados mais ambiciosos.

O *Barents House* projetado pelos Reiulf Ramstad Architects e o *FFTT System* desenvolvido pelo Michael Green e Eric Karsh são dois exemplos de soluções híbridas que pretendem ser capazes de oferecer edifícios com maior amplitude espacial interior e de assumir funções para além da residencial, atingindo também cêrceas mais elevadas.

O primeiro exemplo (imagem 15), situado na Noruega, em Kirkenes, é o projeto para um edifício que pretende atingir os 80 metros de altura, cerca de 16-17 andares, recorrendo à madeira como material estrutural. Em termos construtivos, este projeto propõe um sistema de vigas e pilares em madeira lamelada colada (MLC), com elementos colocados na diagonal para dar estabilidade. A MLCC surge aplicada nos pisos que são montados em obra. Como acabamento exterior do edifício é proposto um sistema de fachada de vidro, estando este último ligado à estrutura principal.

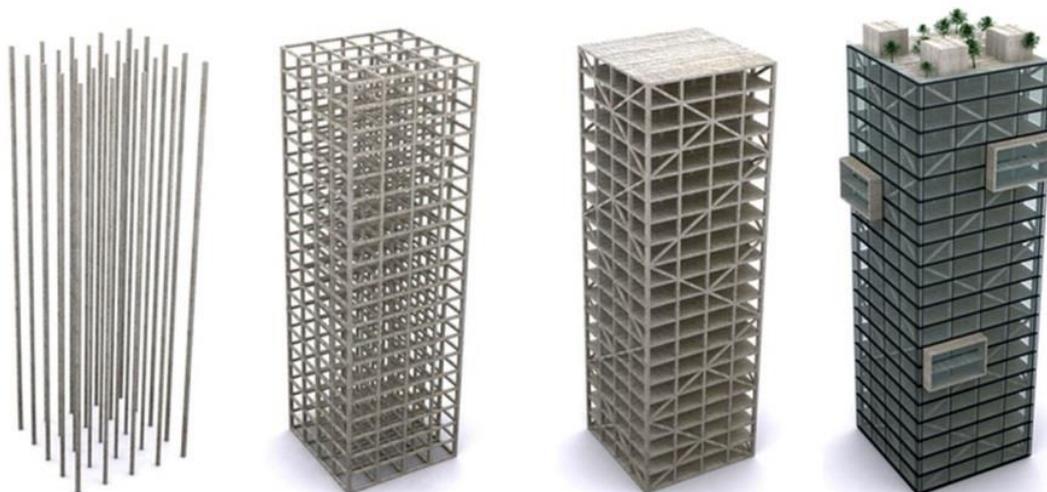


Imagem 15 – Sistema Construtivo Proposto com o Barents House ²⁰

No que diz respeito à implantação, o *Barents House*, apresenta uma planta quadrada de 24x24 metros, com um sistema de 25 pilares contínuos e estruturais em MLC. Dada a localização do edifício, e dadas as solicitações a que este vai estar sujeito, nomeadamente por causa dos ventos fortes que se fazem sentir no norte da Noruega, os elementos construtivos são montados com uma placa de articulação em aço especial.

²⁰ Fonte: <http://www.nzwood.co.nz/case-studies/barentshus-tower/> (acedido a 30/6/14)

Com o projeto do *Barents House*, o objetivo dos Reiulf Ramstad Architects passava por criar um edifício único construído em madeira. O resultado é uma das estruturas mais altas em madeira do mundo (em 2009), uma estrutura multifuncional, com uma arquitetura inovadora e que constitui um projeto-piloto sobre a utilização da madeira nas construções de amanhã.

O caso do *FFTT System* (ver imagem 16) consiste numa proposta para um edifício capaz de alcançar os 30 pisos de altura e de assumir diferentes usos, como residencial ou escritórios, e apresenta um sistema estrutural combinado de paredes e pisos em MLCC e vigas de aço.

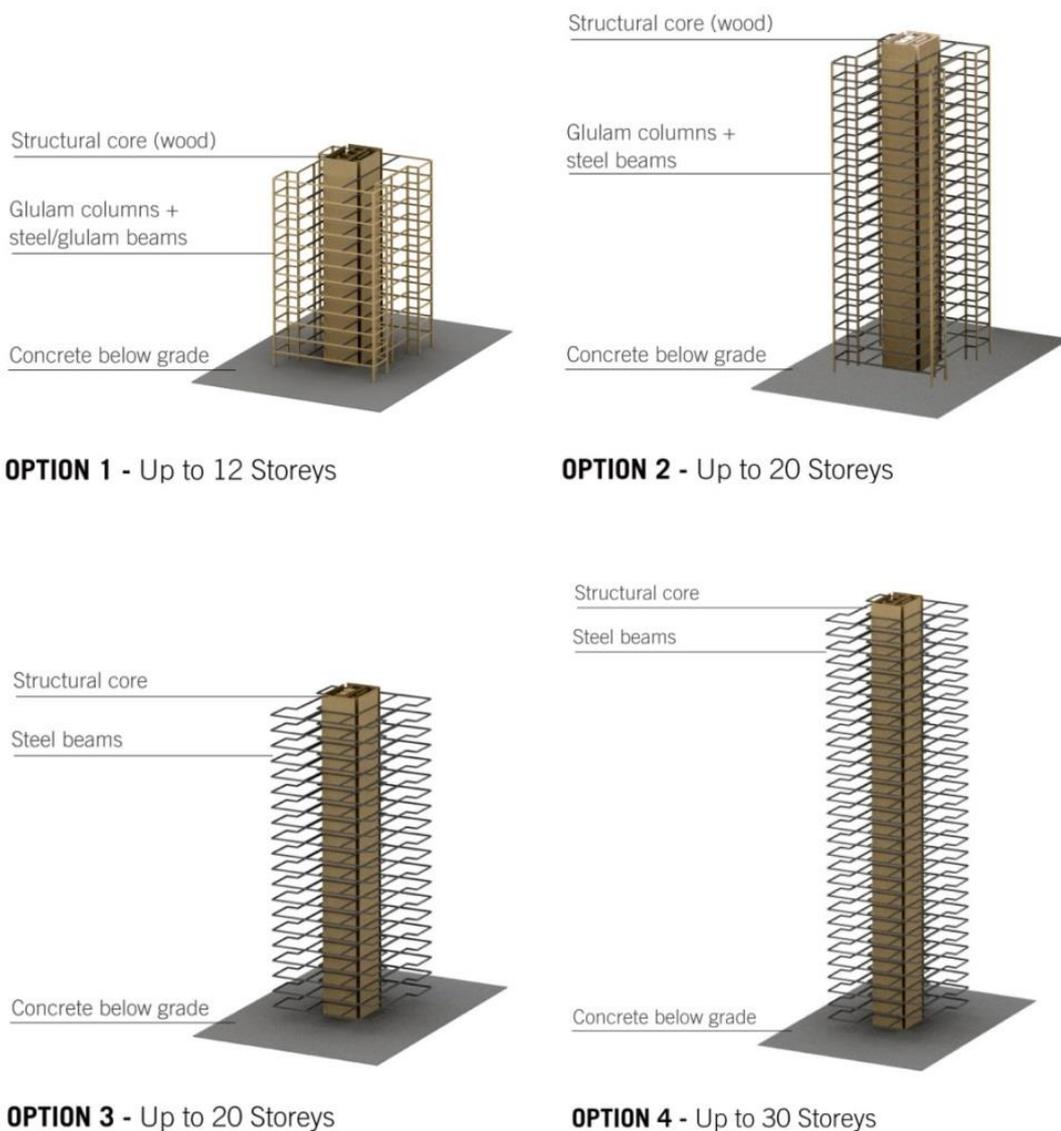


Imagem 16 – Sistema Construtivo Proposto com o FFTT System ²¹

²¹ Fonte: GREEN, Michael; KARSH, J. Eric, *Tall Wood - The case of Tall Wood Buildings: How Mass Timber offers a safe, economical, and environmentally friendly alternative for Tall Building Structures*, British Columbia, 2012.

Os painéis de MLCC são utilizados para a construção de pavimentos, paredes e para o núcleo estrutural do edifício combinados com pilares de madeira lamelada colada (MLC), na opção 1 – até 12 pisos, e com vigas de aço e frechais de madeira, para as restantes opções – 12 andares e mais. A introdução do aço surge aqui como elemento muito importante na definição do projeto pois possibilita a solução viga fraca e permite maior flexibilidade em termos de cêrcea a um edifício com uma solução estrutural maioritariamente concebida em madeira.

Em ambas as soluções apresentadas como sistemas alternativos à utilização da MLCC na construção em altura, a redução da quantidade de elementos de madeira e conseqüente redução do número de paredes divisórias, visíveis na construção celular, é conseguida e possível graças à estabilidade e rigidez conferida ao edifício pelos elementos de betão e de aço utilizados de forma combinada.

2.7.3 URBAN TIMBER SYSTEM

Com o objetivo de dar resposta aos problemas identificados nas soluções e propostas já conhecidas, e no seguimento da investigação sobre a construção em altura com MLCC a decorrer na Escola de Engenharia da Universidade do Minho (EEUM), surge o *Urban Timber System (UT System)*.

O *UT System* é a proposta inicial para um sistema construtivo híbrido capaz de responder às necessidades da sociedade atual, ao mesmo tempo que respeita os princípios da sustentabilidade. É um sistema que pode ser classificado como um sistema híbrido de madeira, já que propõe um sistema composto inteiramente por madeira evitando assim o uso de outros materiais como o betão armado ou o aço. Contudo, contraria o conceito de construir tudo com MLCC, como acontece com o sistema da construção celular. Esta solução propõe um sistema estrutural que combina dois tipos distintos de derivados de madeira, a madeira lamelada colada cruzada (MLCC) e a madeira lamelada colada (MLC), resultando num sistema mais leve capaz de conceber edifícios mais económicos e mais ambiciosos também (ver imagem 17 e 18).

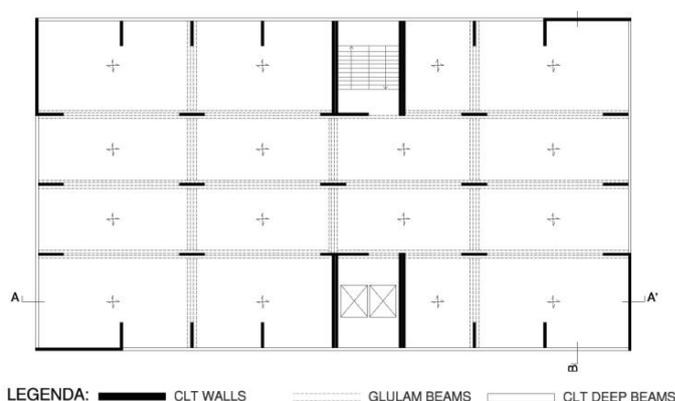


Imagem 17 – Planta do Sistema Estrutural Proposto com o *UT System*²²

²² Fonte: SILVA, C; BRANCO, J.M; LOURENÇO, P.B, *A project contribution to the development of sustainable multistory timber buildings*, 2012.

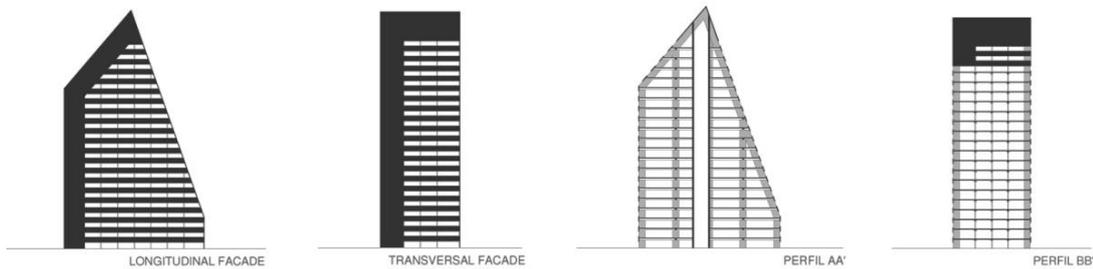


Imagem 18 – Alçados e Cortes de Edifício Construído com o Sistema *UT System*²³

Estruturalmente o *UT System* é baseado no conceito de *'bundled tubes'*. Isto é, o sistema estrutural funciona como um grupo de vários tubos individuais que ao serem ligados entre si acabam por funcionar como um só, uma unidade. A vantagem na utilização de um conceito como este prende-se com a resposta tridimensional do edifício, resultado da resistência e rigidez conseguida através das armações transversais.

O sistema proposto prevê o uso combinado de MLCC e de MLC, em que a primeira molda todos os pavimentos, paredes e vigas perimetrais e a madeira lamelada colada surge apenas nas vigas. Os materiais utilizados são distribuídos desta forma pelos elementos estruturais de forma a conseguir uma melhor resposta dos dois em conjunto. As paredes são de MLCC e resistem às cargas gravíticas com caminho vertical ou oblíquo. Os pavimentos em MLCC trabalham de forma conjunta com as vigas de MLC para a distribuição das cargas para as paredes. Este tipo de distribuição confere ao edifício maior rigidez e evita o efeito de colapso progressivo, existente na solução da construção celular. A madeira lamelada colada cruzada (MLCC) surge ainda aplicada nas vigas em profundidade que configuram toda a moldura que une os diferentes tubos individuais por que é composto o edifício.

Para responder à vulnerabilidade que os edifícios altos têm às forças laterais, como por exemplo a força provocada pela ação do vento, o *UT System* propõe um sistema estrutural em que grande parte da resistência a cargas laterais está localizada no perímetro do edifício.

Para além dos assuntos apontados acima, o *UT System* procura dar resposta a outra questão igualmente importante e já identificada durante a revisão bibliográfica. A questão da volumetria da torre, já que até então tem vindo a ser tratada como um paralelepípedo simples e não trabalhado tridimensionalmente.

Ora, com o recurso a este sistema procura-se oferecer maior liberdade ao arquiteto no ato criativo. Esta liberdade está relacionada com a forma que o edifício pode adquirir. Com o sistema de *Bundled Tubes* adotado pelo sistema estrutural analisado, e considerando o desenho de edifício em planta, os diferentes tubos que o constituem podem assumir diferentes formas, como retangular, triangular ou hexagonal. No entanto, a diversidade de formas em planta já não é novidade na construção com madeira em altura, uma vez que a construção celular dispõe das mesmas possibilidades, como se viu com a análise aos edifícios construídos. A inovação surge na forma como é feita a passagem deste desenho em planta para o desenho tridimensional. Se nos

²³ Fonte: SILVA, C; BRANCO, J.M; LOURENÇO, P.B; *A project contribution to the development of sustainable multistory timber buildings*, 2012.

edifícios construídos apenas em MLCC a volumetria final resulta apenas da explosão do desenho bidimensional, com o *UT System* é oferecida a liberdade volumétrica, possibilitando a existência de ângulos entre o plano do chão e o plano da fachada (imagem 19).

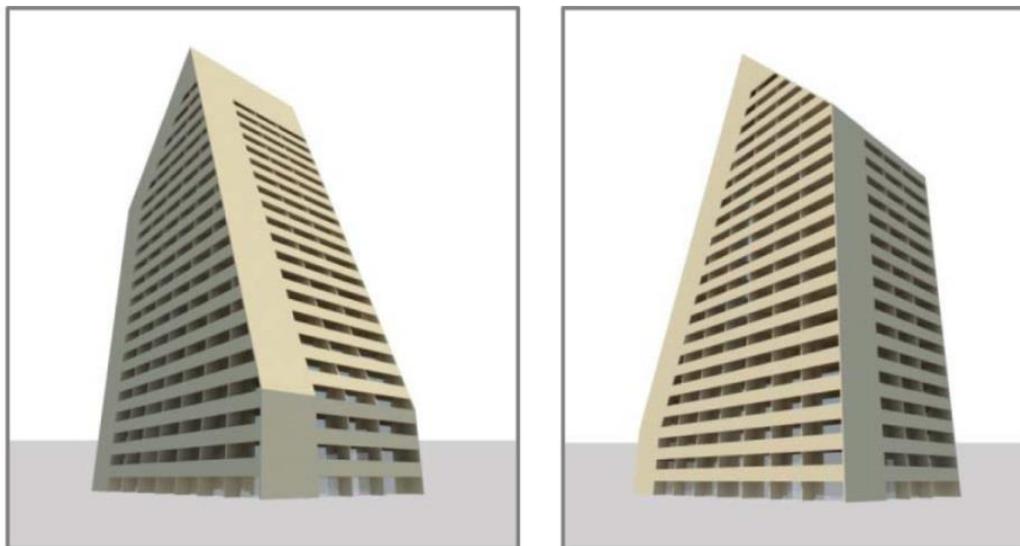


Imagem 19 – Modelo 3D da Proposta de Edifício com o Sistema *UT System* ²⁴

²⁴ Fonte: SILVA, C; BRANCO, J.M; LOURENÇO, P.B, *A project contribution to the development of sustainable multistory timber buildings*, 2012.

CAPÍTULO III - *EXPERIMENTAR*

A Proposta

Os vários sistemas construtivos apresentados de forma sucinta no capítulo anterior representam aquilo que se tem vindo a fazer nos últimos tempos relativamente à construção em altura com madeira lamelada colada cruzada (MLCC). Todos eles vão surgindo com o objetivo de melhorar determinadas características do sistema anterior, contornando os pontos negativos destes e explorando soluções construtivas mais arrojadas e ambiciosas na tentativa de que as novas propostas sejam capazes de dar resposta a estas questões mas também às necessidades reais da sociedade atual.

3.1 Os Objetivos do Novo Sistema Construtivo – o que se pretende?

Depois de ter sido feita a análise aos edifícios já construídos e que utilizam a madeira lamelada colada cruzada no seu sistema estrutural, e de terem sido levantados prós e contras de cada tipo de abordagem utilizado, pretende-se agora dar resposta a alguns dos problemas identificados. Para tal importa perceber aquilo que se pretende alcançar e onde se pretende chegar com esta nova proposta.

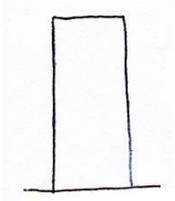
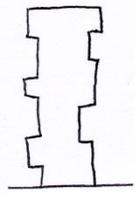
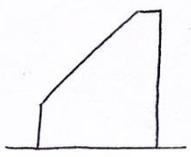
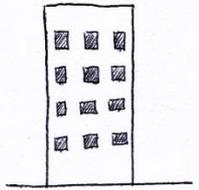
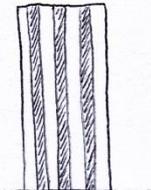
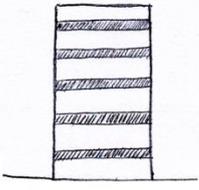
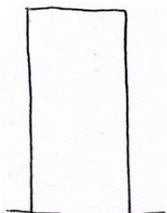
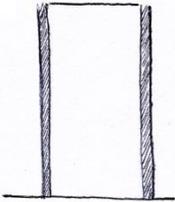
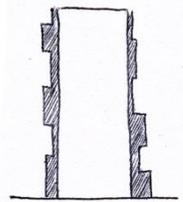
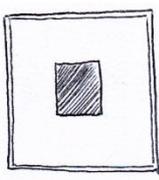
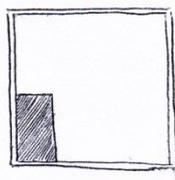
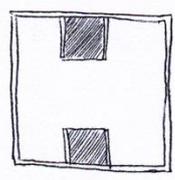
Um dos principais objetivos desta nova proposta de utilização da MLCC prende-se com as possibilidades que esta pode oferecer ao arquiteto no ato criativo, não o limitando em termos da conceção da forma tridimensional do edifício nem na organização e disposição em planta do espaço interior. Ao estar integrada numa investigação a decorrer na Escola de Engenharia da Universidade do Minho (EEUM) a proposta aqui trabalhada vai centrar-se no desenvolvimento de uma evolução do *Urban Timber System*, a partir das premissas apresentadas acima.

3.2 Desconstrução do Sistema Construtivo – ‘Guia’

Antes de se começar a desenhar e a propor um edifício construído com o sistema desenvolvido na EEUM, o *Urban Timber System*, é importante conhecer as diversas possibilidades que este mesmo sistema oferece, sendo portanto necessário proceder à desconstrução dos elementos que compõem o edifício. Esta desconstrução, para além de ser uma ajuda para o arquiteto na conceção da ideia inicial do projeto, lança também premissas que podem vir a ser utilizadas posteriormente, acabando por funcionar como uma espécie de ‘guia base’ no desenvolvimento de projetos de edifícios altos em madeira (ver tabela 6).

Através da referida análise são lançadas as linhas iniciais passíveis de gerarem vários projetos através da combinação de cada um dos elementos. Para se conseguir dar forma a este ‘guia’ muito primário, é necessário selecionar os diferentes elementos que vão ser submetidos a análise e que vão funcionar como orientadores na definição do projeto do edifício de construção em altura. Assim, são agora analisados de forma esquemática os seguintes elementos: o contorno do edifício, as aberturas na fachada, a pele do edifício e os núcleos de distribuição vertical. Estes são os elementos analisados e apresentados na tabela 6, uma vez que é através da sua combinação e conjugação que se consegue dar resposta aos problemas e aspetos negativos identificados nas obras anteriormente estudadas.

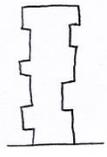
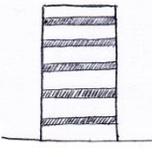
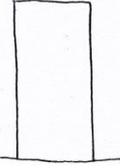
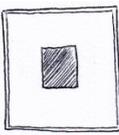
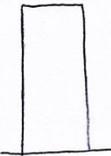
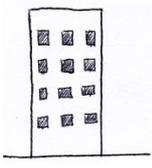
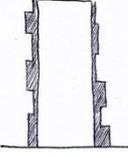
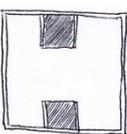
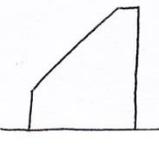
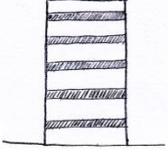
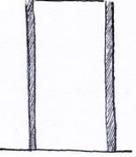
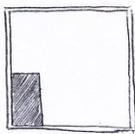
Tabela 6 – Desconstrução dos Elementos que compõem o Edifício

CONTORNO [o que define a forma tridimensional do edifício]		
 <p>Regular; Paralelepípedo</p>	 <p>Saliências e Reentrâncias</p>	 <p>Irregular</p>
ABERTURAS [quantidade de espaços vazios transparentes na fachada; aberturas para o exterior]		
 <p>Fragmentação Rácio Cheio-Vazio: 80-20%</p>	 <p>Verticalidade Rácio Cheio-Vazio: 57-43%</p>	 <p>Horizontalidade Rácio Cheio-Vazio: 60-40%</p>
PELE [o que envolve o edifício e lhe dá o aspecto exterior final]		
 <p>Colada ao edifício</p>	 <p>Afastada e sem volume</p>	 <p>Descolada e com volumes diversos</p>
NÚCLEOS [elementos de distribuição vertical interior]		
 <p>Único e Central</p>	 <p>Único e junto à fachada</p>	 <p>Duplo e junto à fachada</p>

É através das várias possibilidades de junção dos elementos apresentados na tabela anterior que se consegue perceber a versatilidade do sistema construtivo em estudo. Isto é, a tabela 6 mostra as diversas vertentes por onde se pode iniciar o pensamento criativo, quer se parta de um conceito de fachada ou de organização espacial interior, demonstrando que as barreiras inerentes à utilização da madeira na construção em altura são mais reduzidas, possibilitando ao arquiteto maior liberdade no ato de projetar.

De forma a exemplificar o que foi dito, apresentam-se de seguida três soluções (tabela 7). Estas são apenas três das várias opções possíveis, contudo este ‘guia’ procura ser uma base inicial para trabalhos e projetos futuros, dando assim a conhecer as diferentes hipóteses do sistema construtivo *Urban Timber System* e maximizando a sua aplicação à construção de edifícios em altura.

Tabela 7 – Exemplos de combinações possíveis dos diferentes elementos

	Contorno	Aberturas	Pele	Núcleos
SOLUÇÃO 1				
SOLUÇÃO 2				
SOLUÇÃO 3				

O presente trabalho, e tal como já foi referido, ao estar integrado num projeto de investigação da Escola de Engenharia da Universidade do Minho (EEUM), tem por objetivo experimentar o sistema construtivo proposto. Assim, será apresentada uma solução única, semelhante à solução 1, apresentada na tabela 8. Com a proposta para o edifício pretende-se dar resposta aos problemas identificados nos edifícios construídos analisados anteriormente, mas ao mesmo tempo, pretende-se mostrar que as barreiras são cada vez menores e que há cada vez maior liberdade na conceção de um projeto que utiliza a madeira como material estrutural.

3.3 O Conceito do Projeto

O conceito é um dos pontos mais importantes na concepção de um projeto. O caso da proposta que se pretende desenvolver não é exceção. Assim, e considerando todos os aspetos negativos e positivos retirados da revisão bibliográfica efetuada, propõe-se agora conceber um edifício com vinte andares que seja capaz de responder às várias questões levantadas nos demais edifícios altos construídos com MLCC.

A questão da volumetria de torre muito rígida e com uma forma pouco apelativa é um dos aspetos mais apontados pelos críticos e investigadores da área da construção em madeira. Ora, se o projeto agora levado a cabo procura contornar esses problemas, o conceito do edifício prende-se exatamente com a volumetria e forma tridimensional da torre. O objetivo é, portanto, desconstruir a forma rígida de torre que se tem vindo a utilizar, conseguindo espaços interiores mais dinâmicos na sua relação com o exterior e toda uma nova afinidade do edifício com o meio exterior envolvente.

Tendo em consideração tudo o que foi dito anteriormente, a ideia base do projeto, o fio condutor para a forma do edifício, surge no jogo infantil de peças de madeira, *Jenga* (ver imagem 20). Este jogo de habilidade física e mental foi criado por Leslie Scott, e tem por objetivo construir a estrutura mais alta e instável possível, sem no entanto que esta se derrube. Partindo de uma torre completamente estável, com todas as peças colocadas formando um paralelepípedo fechado, é ao longo das várias jogadas que vão sendo retiradas peças de forma a alcançar uma estrutura cada vez mais alta e mais ‘desconstruída’.



Imagem 20 – Jogo de Madeira Tradicional *Jenga* ²⁵

Na imagem 20 é fácil ver-se a diferença entre a torre completamente compacta e fechada e a última, já com saliências e reentrâncias, com cheios e vazios, capazes de introduzir no edifício diversidade e variabilidade de formas e de espaços interiores. Para além de se conseguir uma relação completamente diferente do espaço interior com o exterior também se consegue uma

²⁵ Fonte: http://image.ssw.com/catimages/SWWA-SWWZ/SWW7400-7999/SWW7489R13.jpg_0111.fpx?wid=365&cvt=jpeg (acedido a 9/10/14)

nova interação do próprio edifício com o local em que está implantado, permitindo ainda em projeto tirar partido das características exteriores e da abertura deste para o meio envolvente.

Ao contrário daquilo que tem vindo a ser feito nos projetos construídos analisados anteriormente, em que a forma tridimensional exterior é o resultado de uma extrusão de um desenho em planta, conseguido de acordo com as regras do sistema estrutural, a presente proposta de projeto vai fazer exatamente o inverso. Isto é, partindo da desconstrução do paralelepípedo da torre, vai compatibilizar a forma exterior do edifício com o desenho do espaço interior. Assim, e partindo do conceito de '*torre desmontada*', procura-se alcançar um desenho paralelepipedico 'desconstruído' de torre, ou seja, um desenho tridimensional menos compacto e menos denso, que permita uma maior diversidade na configuração do espaço interior, tirando partido daquilo que são as aberturas para exterior mas também dos próprios espaços exteriores criados e associados a cada um dos pisos.

Importa, no entanto, referir que o conceito aqui apresentado tem que ser compatibilizado com o sistema construtivo adotado para a construção do edifício, nomeadamente com os elementos verticais resistentes. Assim sendo, e apesar de ser um objetivo a alcançar, serão feitos alguns ensaios com o objetivo de perceber a funcionalidade do sistema construtivo associado à forma tridimensional mais arrojada do edifício.

3.4 Barreiras Impostas pelo *Urban Timber System*

Por norma, a maioria dos sistemas construtivos, quando se encontram numa fase inicial, apresentam algumas barreiras à sua aplicação. O *Urban Timber System* não é exceção. Este por estar ainda a dar os primeiros passos está associado a algumas barreiras em termos construtivos, o que implica que se tenham em consideração essas mesmas questões no momento da aplicação do sistema estrutural. Contudo, ao realizar este trabalho de experimentação, procura-se maximizar a potencialidade do sistema construtivo, propondo novas formas e apresentando novos desafios e metas a alcançar.

O *UT System* caracteriza-se pela utilização combinada de madeira lamelada colada cruzada (MLCC), nos pilares e nas vigas perimetrais, e de madeira lamelada colada (MLC) em vigas, distinguindo-se dos restantes sistemas já analisados por recorrer apenas ao uso da madeira como elemento estrutural resistente.

À semelhança dos demais sistemas construtivos em que a madeira é o material principal, a maior barreira à utilização do *UT System* na construção de edifícios em altura prende-se com a necessidade de haver total continuidade dos elementos estruturais. Isto é, é necessário que todos os pisos se organizem em função da métrica criada pelos pilares de MLCC e das vigas de MLC, sendo que estes dois têm que ser absolutamente regulares, não podendo portanto ser interrompidos, de forma a garantir a estabilidade do edifício.

Para além da indispensável continuidade dos elementos verticais o vão máximo permitido é também um aspeto a ter em consideração, uma vez que este não deve exceder os 6 metros. Assim sendo, e a somar aos elementos resistentes que conformam o núcleo de distribuição

vertical, devem existir elementos verticais contínuos de suporte, em MLCC, com uma dimensão mínima de 1,20 metros de comprimento, distados entre si no máximo 6,0 metros (imagem 21).

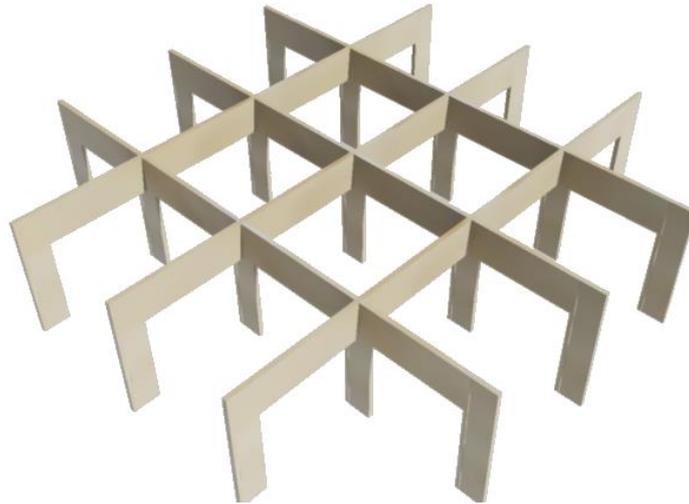


Imagem 21 – Esquema de Disposição dos Pilares em MLCC

Para além dos elementos referidos acima, o sistema que agora se experimenta prevê ainda a existência de vigas em MLCC colocadas no perímetro da torre em cada um dos pisos, com 1,50 metros de altura. Estas vigas perimetrais funcionam como ‘cintas’ de cada um dos pisos e têm como objetivo garantir que o edifício funciona como uma unidade. Ao ser um elemento tão importante na constituição do sistema construtivo, estas vigas perimetrais têm que existir com as referidas dimensões em todos os pisos.

Em termos de expressão exterior, as maiores barreiras da utilização do *Urban Timber System* prende-se com a existência das referidas vigas perimetrais que acabam por criar um esquema muito horizontal no desenho da torre e com a presença de quatro pilares de MLCC em duas fachadas opostas. Para além destas questões, a utilização da madeira na fachada é ainda um grande problema já que esta não deve estar em contacto com a água ou agentes exteriores a bem da sua estabilidade. Assim sendo, há a necessidade de proteger todos os elementos em madeira que estejam expostos ao ambiente exterior de forma a conseguir garantir a sua qualidade por um período de tempo mais longo possível.

3.5 Descrição do Sistema Construtivo

Conhecidas as potencialidades do material, o conceito do projeto e as barreiras que este impõe à construção em altura, pretende-se agora dar a conhecer o sistema construtivo propriamente dito. A conceção do projeto de um edifício em altura visa experimentar e testar esse mesmo sistema construtivo inovador que recorre apenas à madeira como elemento estrutural. Assim sendo, de seguida são apresentados os vários parâmetros segundo os quais o sistema *Urban Timber System* foi analisado e respetivos resultados e conclusões.

3.5.1 Geometria

A construção de edifícios altos está muito marcada pela geometria da torre e pelo aspeto exterior que transmite. Isto é, atualmente é muito comum verem-se arranha-céus com formas cada vez mais ambiciosas, que buscam diferenciar-se daquilo que se tem vindo a fazer. Ora quando se pensa em construir este tipo de edifícios com recurso à madeira, imagina-se que os referidos parâmetros sejam difíceis de alcançar. De facto, a construção em madeira ainda está a dar os primeiros passos e como tal ainda se mantém um desenho cauteloso na definição da geometria de torre.

Da revisão bibliográfica feita anteriormente, é fácil perceber que o aspeto exterior da torre e a sua forma tridimensional não têm sido devidamente trabalhados. Até então, tem sido dada primazia às questões de segurança e da funcionalidade do edifício e os problemas como resistência ao fogo e aos sismos têm sido tidos em conta, no entanto, as questões da volumetria e de desenho da fachada não têm sido exploradas, resultando quase sempre num edifício do tipo paralelepédico, resultado da extrusão da planta.

Tendo em consideração o que foi referido nos parágrafos anteriores, ao experimentar este novo sistema construtivo, o *Urban Timber System*, procura-se explorar estas questões da volumetria de torre e do aspeto exterior do edifício de forma combinada com o desenho do espaço interior. Assim sendo, em termos de geometria da torre, o edifício apresenta uma forma retangular muito semelhante ao que tem vindo a ser feito, mas com a particularidade de conseguir desfasar os pisos, permitindo criar plantas distintas em função do tamanho e do tipo de piso em causa. Ou seja, através deste desfasamento dos diferentes tipos de piso consegue-se uma imagem quase que desconstruída da torre, deixando de lado a forma rígida de paralelepípedo utilizada até então.

Este aspeto exterior mais versátil é conseguido através do sistema estrutural que é utilizado. Este permite libertar todas as paredes do perímetro e como tal deslocar em qualquer sentido o limite do edifício, criando maior variabilidade e diversidade no desenho da forma da torre.

3.5.2 Estrutura

Tem vindo a ser referido ao longo do trabalho, que o sistema estrutural agora apresentado está numa fase inicial de desenvolvimento, e como tal está ainda a dar os primeiros passos. Com este trabalho de investigação pretende-se contribuir com a experimentação do *UT System* aplicado a um caso prático e apurar a sua qualidade e funcionalidade em termos estruturais no que à construção em altura diz respeito. Tal como referido anteriormente, este sistema é constituído na sua totalidade por madeira, sendo composto por três elementos distintos: pilares e paredes contínuas em MLCC, vigas de MLC e vigas perimetrais de MLCC (ver imagem 22). São estes três elementos e estes dois tipos de derivados de madeira que funcionando em conjunto, maximizam as propriedades individuais, e que permitem a utilização do sistema na construção de edifícios altos.

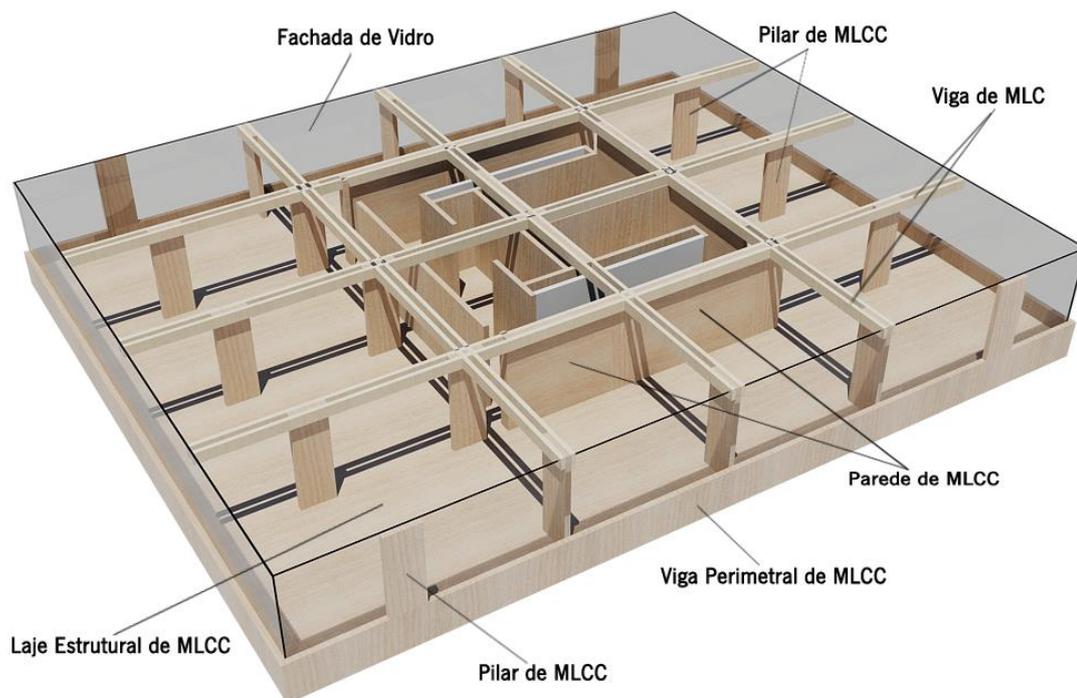


Imagem 22 - Localização dos Elementos constituintes do Sistema Estrutural num Piso-tipo

Para começar, importa salientar que o tipo de edifício que se pretende obter apresenta uma variabilidade considerável no que ao desenho dos pisos diz respeito. Isto é, de acordo com o conceito do projeto, é proposto um edifício de volumetria recortada, composto por uma variedade considerável de pisos. No total existem seis tipos de pisos distintos, que são obtidos através da deslocação da laje sobre a malha do sistema estrutural, variando na dimensão e área de espaço útil interior e de espaço exterior (ver imagem 23). Esta particularidade no desenho da torre introduz esforços adicionais a determinados elementos estruturais, nomeadamente aos que suportam as lajes em balanço.

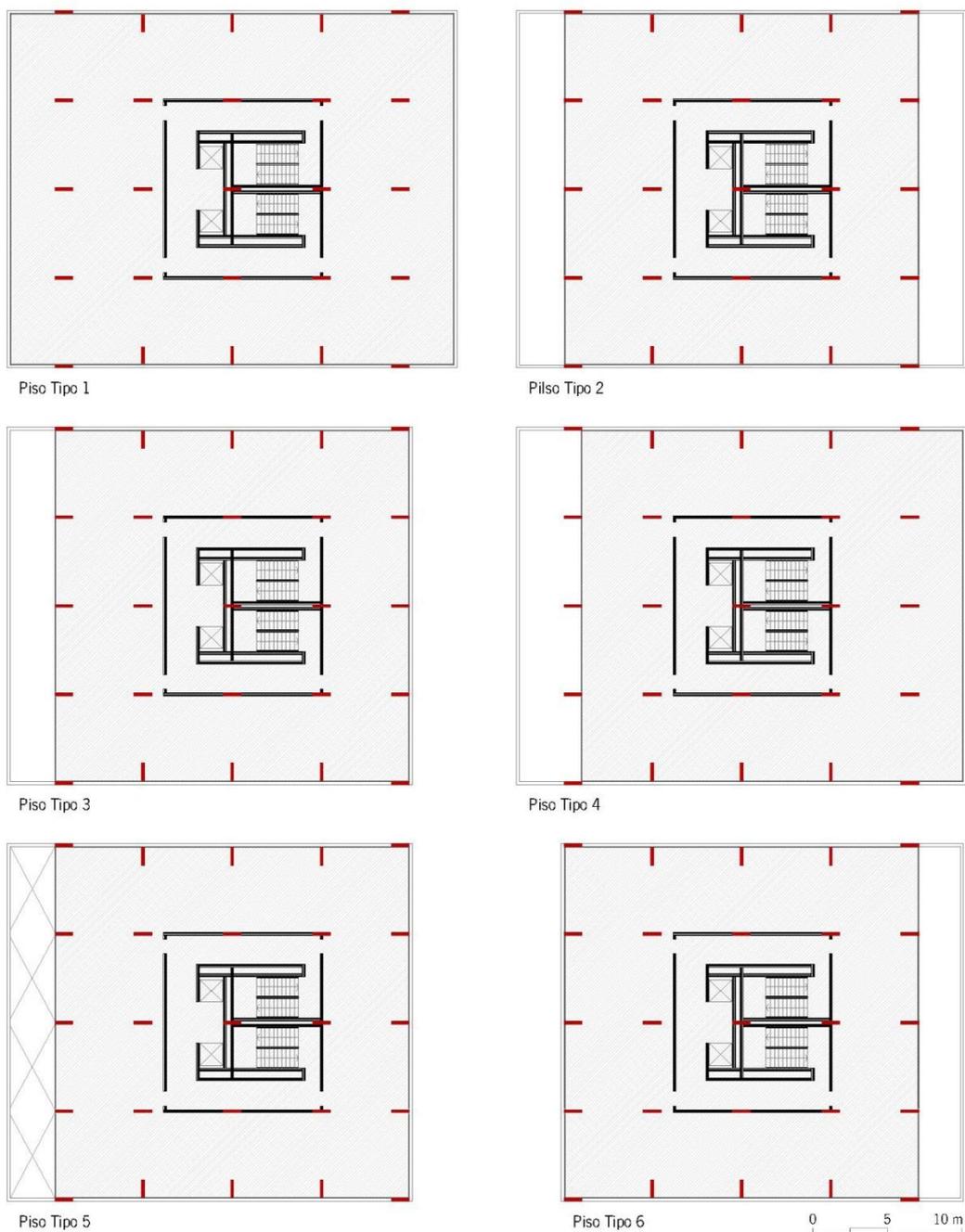


Imagem 23 – Diferentes Tipos de Pisos Propostos

Ao estar inserida numa investigação a decorrer na Escola de Engenharia da Universidade do Minho (EEUM) e por se estar a trabalhar em parceria com alguns alunos da mesma escola, há a possibilidade de testar e pré-dimensionar o sistema estrutural proposto, ficando a conhecer as suas verdadeiras potencialidades. Assim todos os dados recolhidos e apresentados neste ponto foram obtidos pelos alunos de engenharia que estão a avaliar o edifício, através da utilização de *softwares* adequados considerando todas as opções tomadas para o projeto. Assim, de seguida apresentam-se os resultados obtidos.

Por se encontrar ainda numa fase inicial e por se tratar do primeiro teste ao sistema estrutural propriamente dito, para os elementos estruturais são consideradas secções base na tentativa de perceber qual o caminho a seguir. Assim numa primeira abordagem utilizam-se pilares e paredes de MLCC com 200 mm de secção (200mm L5s) (ver imagem 24). Contudo, e logo após os primeiros testes percebe-se que tal secção não permite alcançar os desejados 20 pisos de altura. Tal sucede porque, e apesar de a MLCC ser um material muito resistente, não é capaz de resistir aos esforços à compressão provenientes dos pesos próprios das lajes, das cargas variáveis de ocupação e do próprio peso das paredes que constituem o sistema. Com a referida espessura de pilares de MLCC é apenas possível obter um edifício com um máximo de 3 andares, ficando bastante próximo de alcançar os 4 mas não o permite, considerando que este assume os balanços sobre o espaço exterior. Caso se opta-se por excluir as consolas com três metros obtendo uma torre paralelepípedica, é possível alcançar um edifício de até 6 pisos, no máximo.

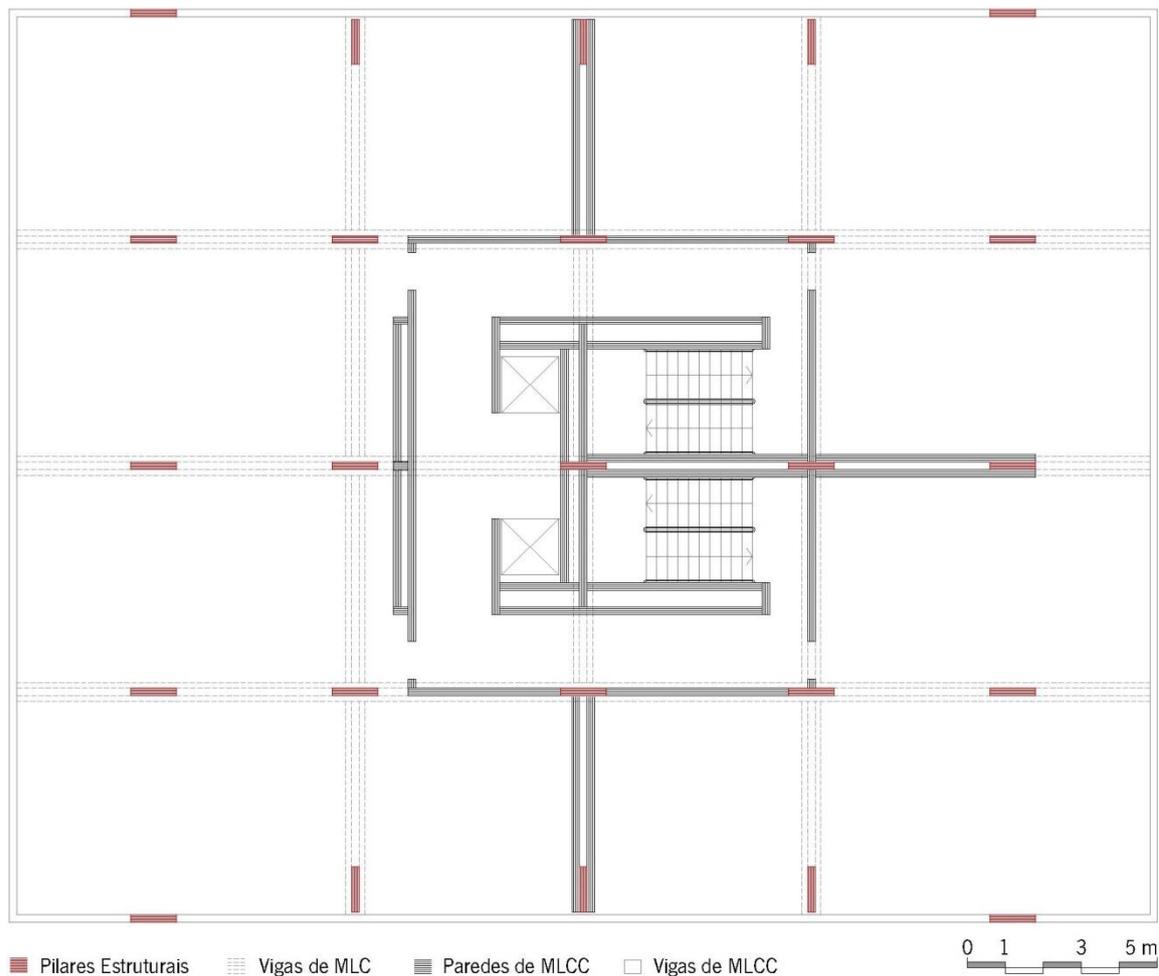


Imagem 24 – Planta de Piso-tipo com Elementos Estruturais do Tipo MLCC 200 mm L5s

Em função dos resultados obtidos com a primeira abordagem à utilização do *UT System*, e tendo por objetivo conhecer as verdadeiras potencialidades do sistema, foram feitas três outras análises com diferentes secções do material. Aqui procura-se perceber se é ou não possível construir uma torre com as particularidades pretendidas e alcançar em simultâneo os 20 pisos apenas com recurso à madeira. De seguida apresentam-se as referidas soluções para o sistema estrutural assim como os resultados obtidos para o pré-dimensionamento das mesmas e respetivas conclusões.

- SOLUÇÃO 1 | PILARES DE MLCC 320 MM L8s-2

Considerando o que foi referido anteriormente, a primeira opção para tentar verificar o sistema estrutural relativamente aos esforços verticais passa por aumentar a secção dos pilares resistentes. Assim, ao invés de se utilizar uma secção do tipo 200 mm L5s opta-se agora por uma secção consideravelmente superior, do tipo MLCC 320 mm L8s-2. Ao aumentar a espessura dos pilares pretende-se aumentar a resistência destes elementos à compressão, procurando perceber se esta alteração é ou não suficiente para que o edifício seja viável. Na imagem 25 representa-se o sistema estrutural com as respetivas alterações, contudo e por se tratar de uma diferença de apenas 120 mm da secção anterior, as diferenças em planta e na definição do espaço interior não são muito expressivas.

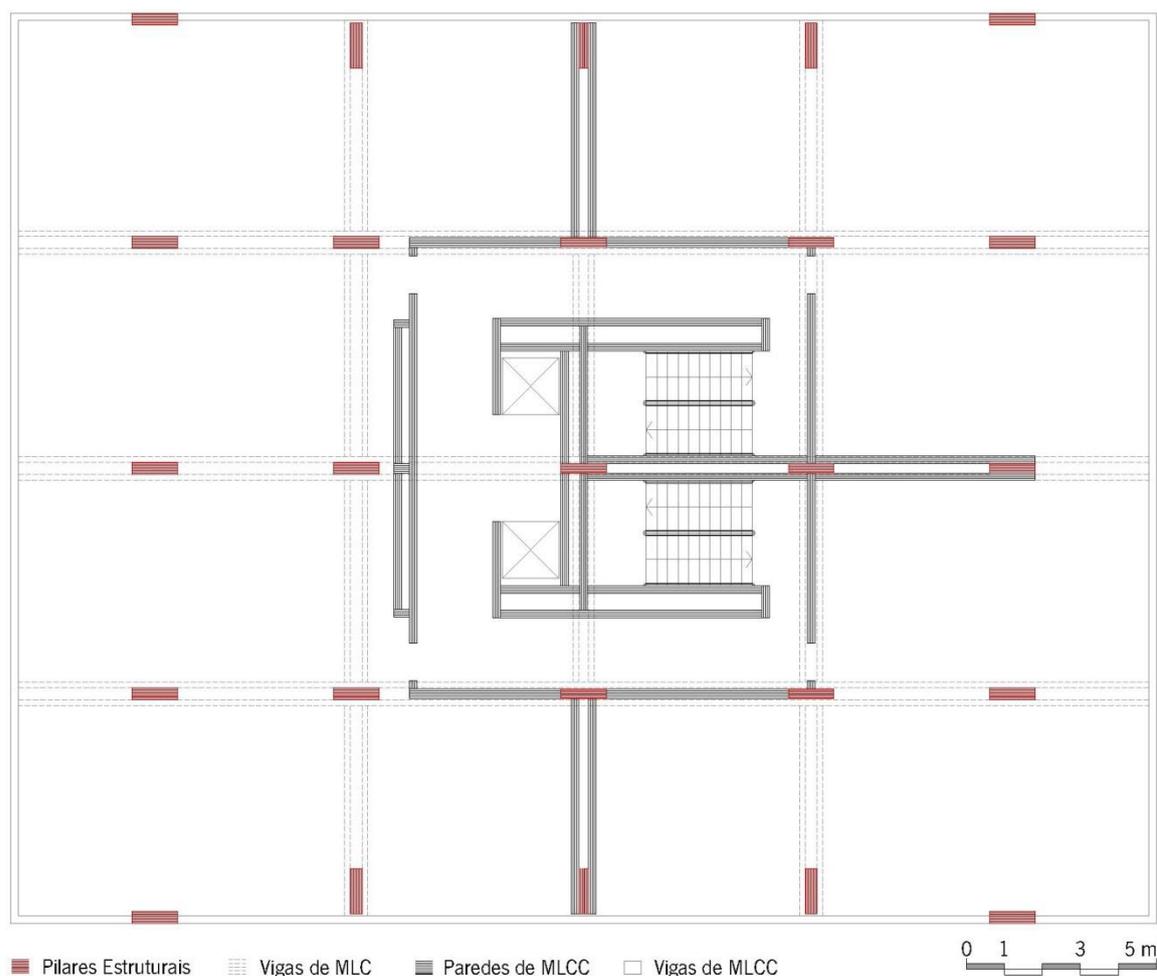


Imagem 25 – Planta de Piso-tipo com Elementos Estruturais do Tipo MLCC 320 mm L8s-2 ²⁶

Tal como apresentado na imagem anterior, todos os pilares contínuos foram alterados para os 320 mm de MLCC. Contudo, e após se efetuar o pré-dimensionamento do edifício com a alteração prevista percebe-se que a presente secção também não é viável para os 20 pisos. Com a solução agora analisada, apenas é possível subir até um máximo de 9 andares, considerando a seguinte organização por tipo de pisos (ver tabela 8).

Tabela 8 – Organização dos Tipos de Piso no Edifício para a Solução 1

Solução	Nº pisos Tipo 1	Nº pisos Tipo 2	Nº pisos Tipo 3	Nº pisos Tipo 4	Nº pisos Tipo 5	Nº pisos Tipo 6	Nº de pisos Total
Pilares MLCC 320 mm	1	1	1	1	2	3	9

²⁶ Em anexo apresentam-se as plantas do sistema estrutural com a secção de MLCC 320 mm L8s-2 para os restantes tipos de piso.

De acordo com o referido anteriormente, os pisos do tipo 1, 2, 3 e 4 são os que provocam maior esforço de compressão na estrutura devido aos balanços de três metros, enquanto os pisos do tipo 5 e 6 são bem menos gravosos, já que não possuem esses avanços sobre o espaço exterior. Apesar de na solução descrita se optar por utilizar em maior número pisos do tipo 5 e 6, reduzindo portanto as solicitações a que o edifício está sujeito, não é ainda possível alcançar os 20 andares pretendidos inicialmente.

Para que o edifício com a dimensão desejada seja viável, e recorrendo apenas ao uso da MLCC, é necessário que a secção dos pilares nos pisos inferiores até perfazer os 20 seja consideravelmente superior. Isto é, para os primeiros pisos é necessário que exista uma espessura efetiva de 760 mm de pilar na direção 0°, faltando ainda acrescentar as camadas cruzadas do material. Para tal, e fazendo uma proporção relativa às espessuras existentes para um painel de 320 mm, uma secção possível de ser adotada é $250-120-250-120-250 = 990$ mm.

Na imagem 26 vê-se a aplicação desta secção ao sistema estrutural analisado e percebe-se o impacto que a sua utilização tem no desenho do espaço interior. A alteração da secção dos elementos resistentes foi feita apenas nos pilares que não fazem parte do núcleo central de distribuição uma vez que estes últimos são os menos solicitados, podendo portanto manter a secção 250 mm de MLCC.

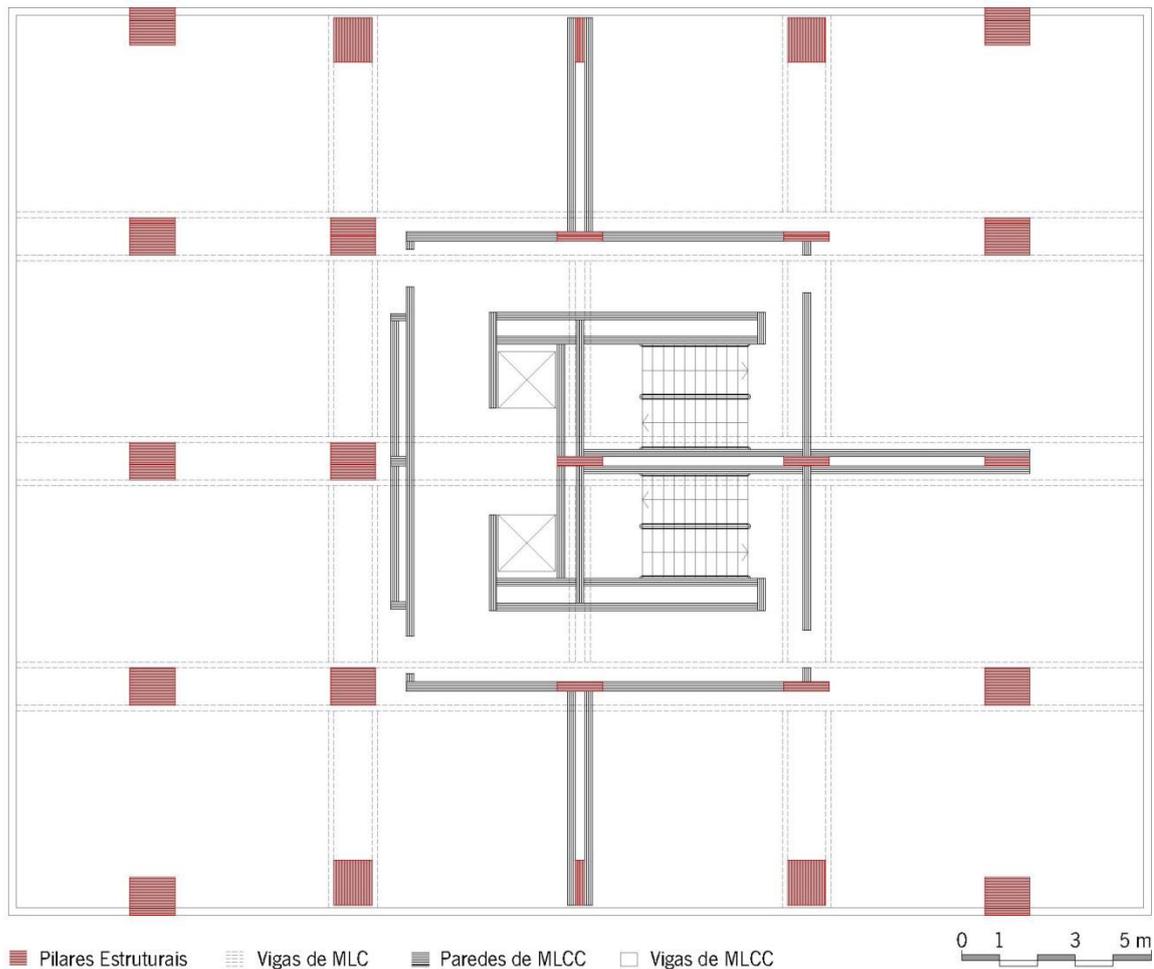


Imagem 26 – Planta de Piso-tipo com Elementos Estruturais do Tipo MLCC 1000 mm ²⁷

Com esta solução percebe-se que se consegue construir os 20 pisos apenas utilizando a MLCC como prevê o sistema estrutural *Urban Timber System*. Ora, é certo que a distribuição dos esforços não é feita de igual forma em todos os andares, e portanto dividir o edifício em duas partes, primeiros 11 pisos com secção de 1000mm e restantes 9 com secção de 320mm, não é correto. Com o objetivo de otimizar o sistema estrutural e a utilização do próprio material, sabe-se que as suas espessuras são variáveis ao longo dos 20 pisos. Na tabela 9 apresentam-se as dimensões dos pilares de MLCC em função dos pisos em que estes se encontram.

²⁷ Em anexo apresentam-se as plantas do sistema estrutural com a secção de MLCC 990 mm para os restantes tipos de piso.

Tabela 9 – Secção de Material Necessária em Função do Número do Piso

Pisos	Espessura MLCC
1 a 3	1000 mm (<i>beff</i> =760mm e <i>cross layers</i> = 4 x 60mm)
4 a 6	880 mm (<i>beff</i> =640 mm e <i>cross layers</i> = 4 x 60mm)
7 a 9	2x 320L7s-2 = 640mm
10 a 12	2x 240L7s-2 = 480mm
13 a 15	320 L8s-2 = 320 mm
16 a 17	220 L7s-2 = 220 mm
18 a 20	140 L5s = 140 mm

Apesar de ser possível alcançar os 20 pisos, a secção de pilar que o permite é bastante grande, o que implica um maior custo em termos de material. A somar à questão monetária, o espaço interior criado é menos amplo e mais restritivo no que diz respeito à compartimentação interior. A imagem 27 apresentada a seguir mostra uma representação de um espaço interior concebido com a solução estrutural agora analisada.



Imagem 27 – Espaço Interior de Edifício Construído com a Recurso a Pilares de MLCC 990 mm ²⁸

²⁸ Fonte: Imagem cedida pela Arquiteta Catarina Vilaça Silva.

Pela observação da imagem apresentada acima, compreende-se o impacto que pilares de tal dimensão têm no desenho de um espaço interior, acabando por funcionar como elementos importantes e diferenciadores na conceção do compartimento. Em termos arquitetónicos, a secção não funciona como um impedimento ao desenho do espaço, apenas o influencia. É uma questão relacionada com a vontade do arquiteto que pode querer enquadrar estes elementos no projeto, dando-lhes destaque ou por contrário querer dissimulá-los.

▪ **SOLUÇÃO 2 | PILARES DE MLCC DUPLOS 2 X 240 MM L7-S-2**

Na solução 2, e considerando que o aumento da secção do pilar não é suficiente, procura-se testar uma nova abordagem à utilização da MLCC. Aqui, ao invés de se recorrer a um pilar estrutural de maior espessura, vai utilizar-se um pilar menor mas em duplicado. Isto é, são utilizados dois painéis de MLCC para cada um dos pilares estruturais previstos pelo sistema, à exceção dos que fazem parte do núcleo central, aplicados em conjunto. Estes, ao funcionarem como um só, conferem maior capacidade resistente ao sistema estrutural, e assim prevê-se que seja possível alcançar um maior número de pisos. Na imagem 28 apresenta-se a aplicação da solução do pilar duplo de MLCC ao piso-tipo do edifício proposto.

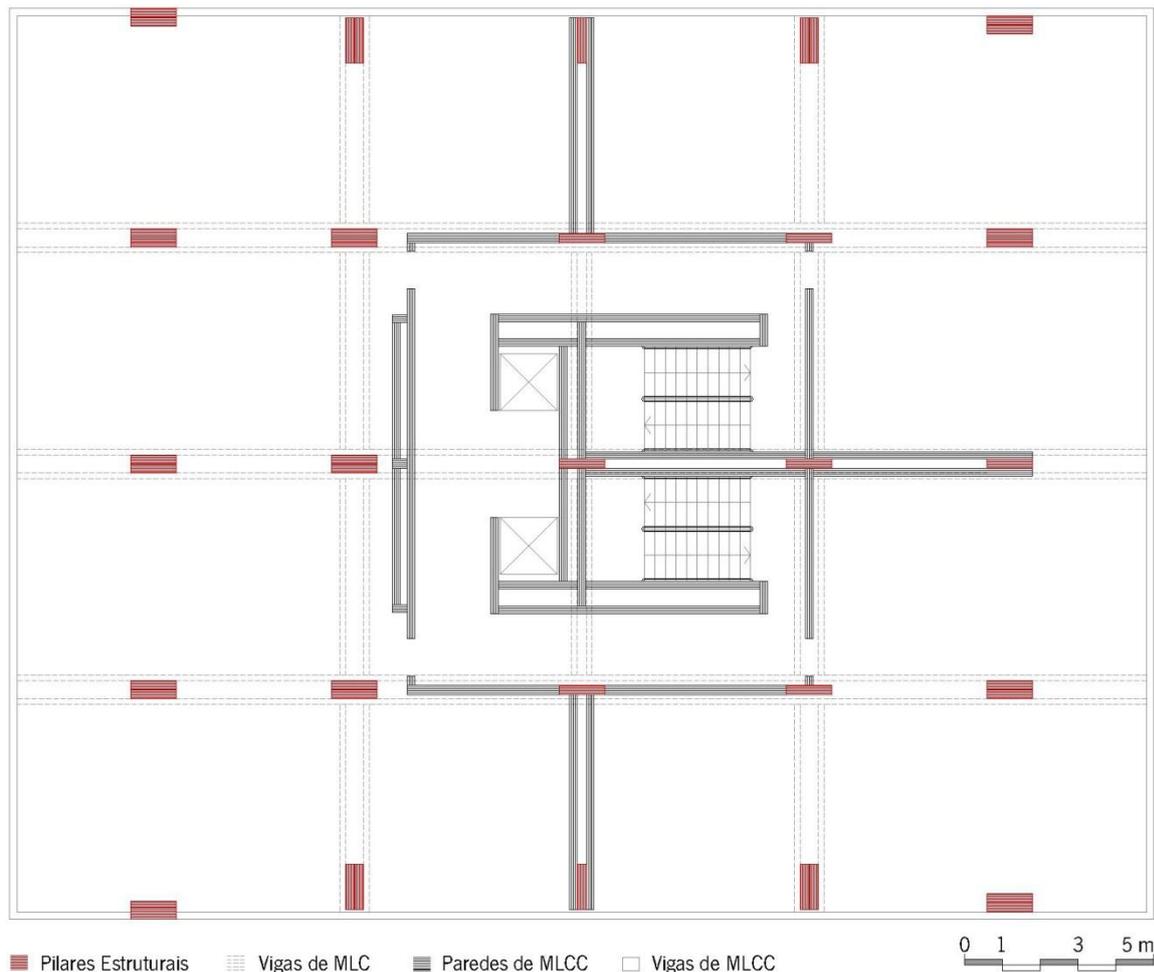


Imagem 28 - Planta de Piso-tipo com Elementos Estruturais do Tipo MLCC 2 x 240 mm L7s-2 ²⁹

Tal como acontece na solução 1, também para esta proposta de sistema estrutural é feito o pré-dimensionamento do edifício, a fim de conhecer a sua capacidade e resistência à ação das forças verticais. Ora, em resultado desse estudo, conclui-se que a utilização de painéis duplos nos pilares estruturais também não é suficiente para conceber um edifício com 20 pisos. Com esta solução é apenas possível subir até aos 14 andares, no máximo, considerando a seguinte organização de tipos de pisos (tabela 10).

Tabela 10 – Organização dos Tipos de Piso no Edifício para a Solução 2

Solução	Nº pisos Tipo 1	Nº pisos Tipo 2	Nº pisos Tipo 3	Nº pisos Tipo 4	Nº pisos Tipo 5	Nº pisos Tipo 6	Nº de pisos Total
Pilares Duplos MLCC (240mm x 2)	2	2	2	1	3	4	14

²⁹ Em anexo apresentam-se as plantas do sistema estrutural com a secção de MLCC 2 x 240 mm L7s-2 para os restantes tipos de piso.

Apesar de não se conseguir chegar ao número de pisos desejado, esta solução é bastante eficiente no que à relação número de pisos – secção do material diz respeito. Isto é, se se fizer uma comparação entre a planta de edifícios analisados durante a revisão bibliográfica e a planta do sistema estrutural agora apresentada são visíveis as diferenças. Para os primeiros edifícios construídos são utilizadas em grande número as paredes resistentes e mesmo assim apenas conseguem os 9 – 10 pisos de altura. Com recurso aos pilares duplos de MLCC, consegue-se construir um edifício com 14 andares (aproximadamente 56 metros de altura) com uma secção relativamente reduzida de material estrutural – 480 mm. Assim esta solução é facilmente aplicável à construção de edifícios altos, já que continua a dar resposta a grande parte dos problemas identificados anteriormente.

No seguimento dos estudos feitos para o pré-dimensionamento, conclui-se que a secção de 2 x 240 mm de MLCC apresentada na imagem 28 não tem que ser utilizada na totalidade dos pisos. Isto é, à medida que se aproximam da cobertura, os esforços a que as paredes/pilares resistentes estão sujeitos vão sendo cada vez menores. Como tal, a secção dos elementos estruturais podem ir também reduzindo. Assim, para o edifício proposto e considerando a organização dos pisos da tabela 10, pode optar-se por uma solução do tipo da apresentada na tabela 11 sem comprometer a capacidade de resistência do edifício.

Tabela 11 – Secção do Material Necessária em Função do Número do Piso

Pisos	Espessura MLCC
1 a 5	2x 240L7s-2 = 480mm
6 a 8	320 L8s-2 = 320 mm
9 a 11	220 L7s-2 = 220 mm
12 a 14	120 L5s = 120 mm

Percebe-se, pela análise da tabela anterior, que os cinco primeiros pisos são os mais solicitados e os que suportam maiores esforços verticais, sendo portanto os que têm que apresentar uma maior área de material resistente. Contudo, essa área é reduzida à medida que se sobe nos pisos, podendo alcançar apenas 120 mm nos três últimos. Esta possibilidade de reduzir o tamanho da secção do material ao longo do desenvolvimento do edifício não só permite uma redução significativa do custo final de obra, já que se utiliza apenas o material necessário à sua sustentação, como permite também um aumento gradual da área útil do espaço interior à medida que os pisos são mais altos.

▪ SOLUÇÃO 3 | PILARES DE MLC 250 MM

Apesar de a solução anterior permitir alcançar 14 pisos de altura com uma secção de material estrutural relativamente reduzida, é objetivo da investigação perceber se é ou não possível chegar aos 20 pisos recorrendo apenas à madeira. Assim sendo, e uma vez que se se utilizar apenas MLCC para os pilares, só é possível obter os 20 andares com uma secção estrutural maior, propõe-se agora utilizar um outro derivado de madeira, a madeira lamelada colada – MLC. Este material não é uma nova introdução ao sistema já que as vigas utilizadas junto aos pilares também são de MLC. Ora, com a presente solução, propõe-se a utilização da MLC nos pilares estruturais localizados fora do núcleo de distribuição vertical (estes últimos continuam a utilizar a MLCC) na tentativa de compreender se com a alteração do material é ou não possível construir um edifício com 20 pisos – 80 metros, aproximadamente. Antes de apresentar os resultados obtidos com o pré-dimensionamento importa perceber em que é a MLC é diferente da MLCC, de forma a justificar a alteração do sistema estrutural.

Tal como a madeira lamelada colada cruzada (MLCC), também a madeira lamelada colada (MLC) é um produto derivado de madeira. Esta última distingue-se da primeira na forma como as lamelas (camadas de madeira) são coladas entre si. Enquanto no caso da MLCC estas lamelas são coladas de forma cruzada em relação à orientação do grão da madeira, o que lhe confere resistência nas duas direções, no caso da MLC todas as lâminas de madeira são coladas na mesma orientação, paralelamente ao comprimento do elemento. Esta diferença faz com que a MLC adquira resistência numa só direção o que lhe confere maior capacidade à compressão e aos esforços verticais, quando comparada com a MLCC.

Conhecidas as propriedades da MLC, a solução 3 propõe agora um desenho do sistema estrutural com pilares e vigas de MLC e núcleo central e vigas perimetrais em MLCC. À semelhança das demais soluções, também para esta se mantém o mesmo desenho de núcleo central de distribuição vertical, assumindo os mesmos materiais e as mesmas dimensões. Na imagem 29 apresenta-se a aplicação da nova solução ao desenho de um piso-tipo do edifício proposto.

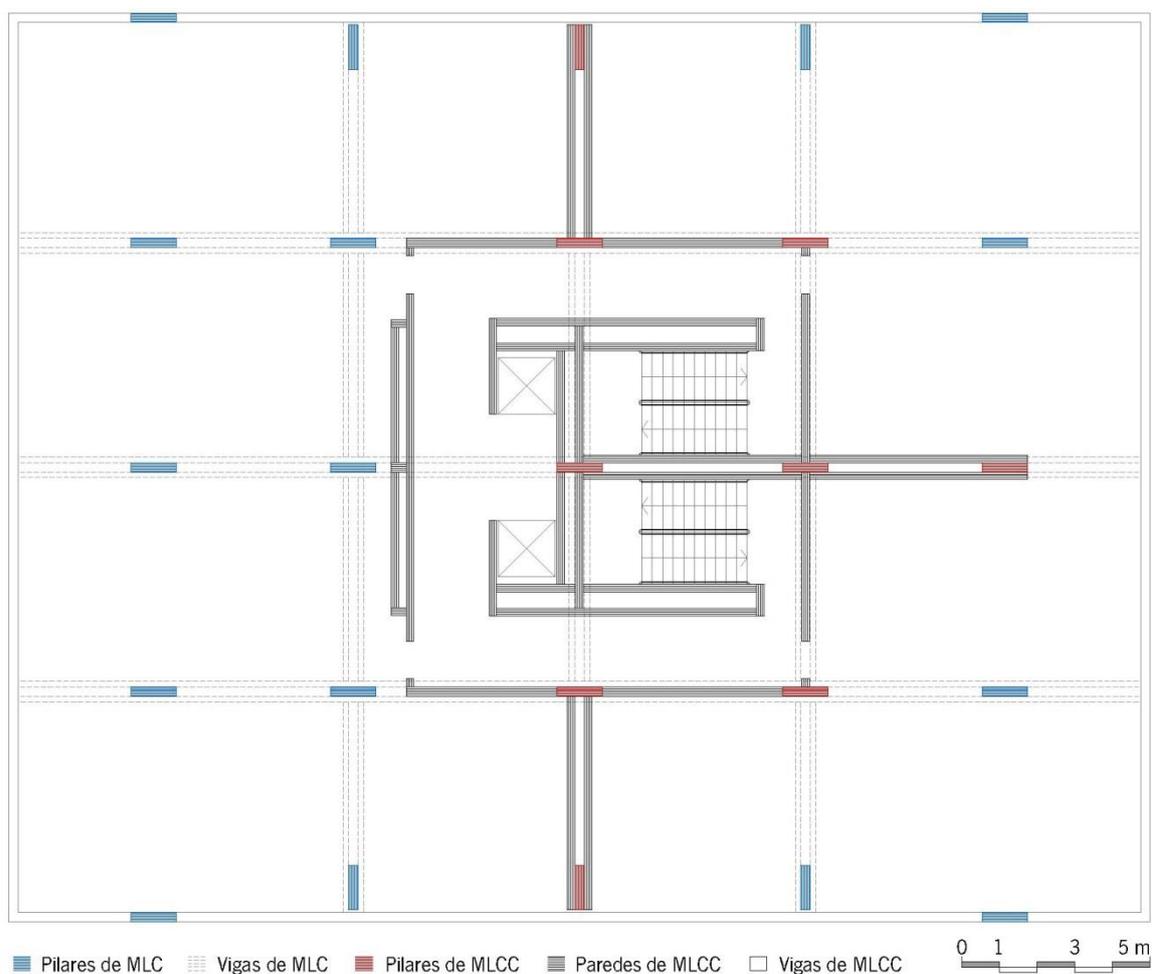


Imagem 29 – Planta de Piso-tipo com Elementos Estruturais do Tipo MLC 250 mm ³⁰

À semelhança do que foi feito para as outras soluções, também para a solução 3 foi feito o pré-dimensionamento da estrutura a fim de saber se é ou não capaz de conceber um edifício com 20 andares. De acordo com os resultados obtidos, de facto esta é a opção que melhor consegue dar resposta ao problema analisado. Segundo os cálculos, e considerando uma secção de 250 mm de MLC para os pilares estruturais, a solução 3 permite construir um edifício com 20 andares, assumindo pisos de todos os tipos organizados como mostra a tabela seguinte.

Tabela 12 – Organização dos Tipos de Piso no Edifício para a Solução 2

Solução	Nº pisos Tipo 1	Nº pisos Tipo 2	Nº pisos Tipo 3	Nº pisos Tipo 4	Nº pisos Tipo 5	Nº pisos Tipo 6	Nº de pisos Total
Pilares MLC 250 mm	6	5	2	4	2	1	20

³⁰ Em anexo apresentam-se as plantas do sistema estrutural com a secção de MLC 250 mm para os restantes tipos de piso.

Tal como nas outras soluções apresentadas, a utilização da mesma espessura de pilar na totalidade do edifício não é realista. Na planta da estrutura (imagem 29) representa-se a secção máxima necessária à viabilidade do sistema, os 250 mm. Contudo este valor pode ser reduzido à medida que se sobe no edifício, já que a quantidade de esforços a que cada elemento está sujeito é menor quanto mais perto o piso estiver da cobertura. Assim, para a solução 3, os pilares de MLC podem apresentar as seguintes espessuras (ver tabela 13) sem contudo comprometer a estabilidade estrutural do edifício.

Tabela 13 – Secção do Material Necessária em Função do Número do Piso

Pisos	Espessura Pilares de MLC
1 a 3	250 mm
4 a 6	220 mm
7 a 9	200 mm
10 a 12	160 mm
13 a 15	140 mm
16 a 17	120 mm
18 a 20	100 mm

É de salientar que ao longo desta análise ao sistema estrutural, a solução para o núcleo central de distribuição vertical e a zona de passagem de infraestruturas (coretes) foi mantida, uma vez que a solução adotada inicialmente, com paredes em MLCC de 200 mm e pilares em MLCC de 250 mm, é capaz de resistir às forças a que o edifício vai estar sujeito. No entanto, e por uma questão de coerência e de continuidade no desenho do referido núcleo, nem todas as paredes de MLCC apresentam a mesma espessura. Tal acontece pois os pilares de MLCC integrantes do núcleo apresentam uma secção de 250 mm e por essa razão essas paredes adotam também essa mesma espessura. As restantes mantêm os 200 mm de espessura. Esta solução, tal como referido, é igual em todos os pisos-tipo para todas as soluções analisadas (imagem 30).

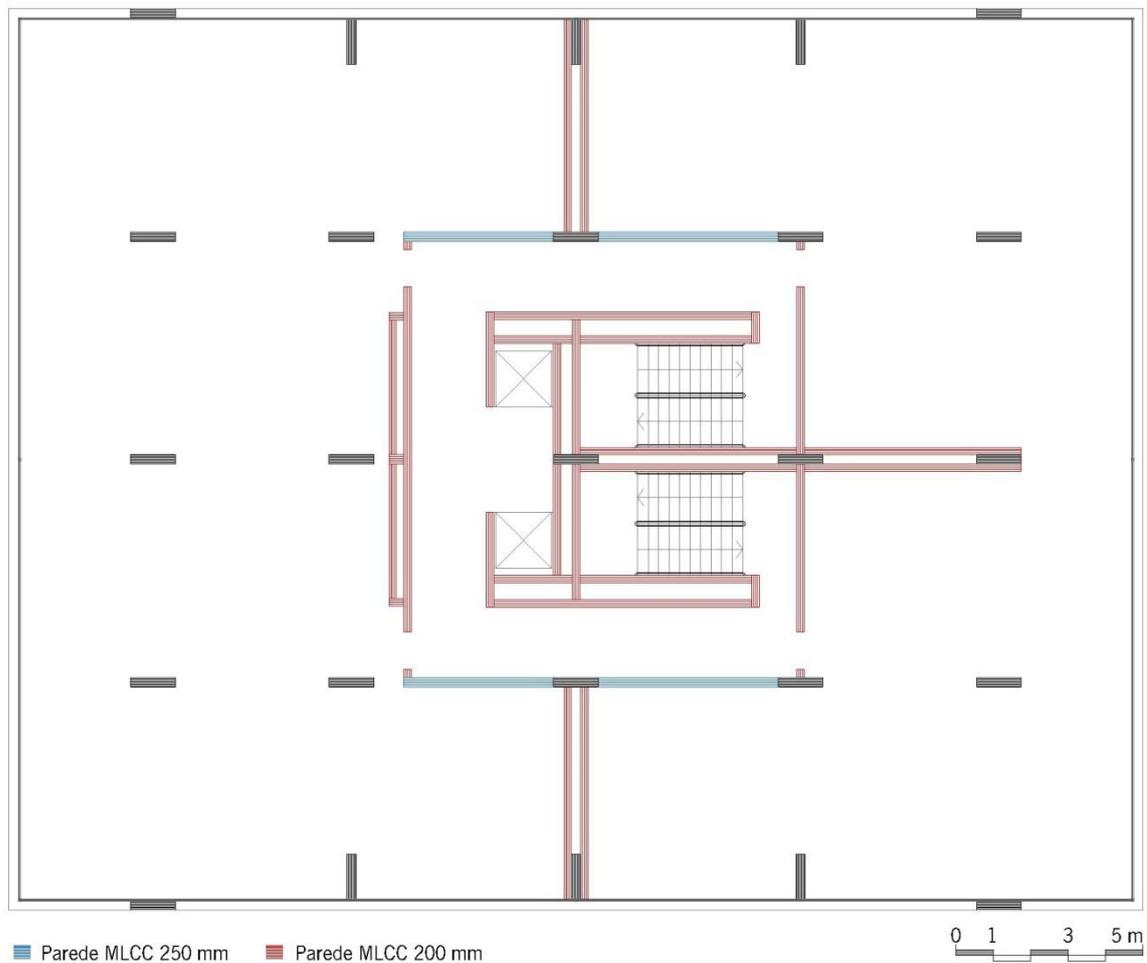


Imagem 30 – Esquema de Organização do Núcleo Central de Distribuição Vertical

▪ CONCLUSÕES

Depois de efetuados os pré-dimensionamentos e de analisados os resultados pode concluir-se que é possível construir um edifício com 20 andares utilizando apenas madeira. É apenas necessário ter em consideração a secção necessária em função do material que se pretende utilizar, que acaba por estar diretamente relacionado com a vontade do arquiteto e com o conceito do projeto. Pode, portanto afirmar-se que o *Urban Timber System* aqui experimentado pode ser utilizado na construção em altura já que verifica as questões estruturais necessárias. Para além de permitir conceber edifícios mais altos do que os atualmente construídos, são notáveis as diferenças no desenho do espaço interior. Tal como apontado no capítulo anterior, um dos grandes problemas relacionados com a utilização da MLCC prende-se exatamente com o número de paredes resistentes necessárias à sustentação do edifício. Ora, com o *UT System* esta questão é claramente resolvida, já que para todas as soluções apresentadas acima, o espaço interior concebido é amplo, o que permite e facilita a adaptação a qualquer tipo de uso.

Para dar continuidade à presente investigação, e uma vez que foram apresentadas diferentes soluções para o mesmo sistema estrutural, é feita a escolha por uma das soluções analisadas. Esta escolha baseia-se nos objetivos da investigação e na solução que melhor responde às ambições do projeto do edifício. Assim, a partir deste ponto, a solução estrutural que vai ser analisada em relação a todas as outras questões é a solução 3, na qual se recorre à MLC de 250 mm de espessura para os pilares resistentes. Justifica-se esta escolha, com a reduzida secção de material necessária e da relação que esta estabelece com o número de pisos alcançado, dando portanto uma resposta positiva às ambições e objetivos da investigação.

Tal como referido durante a análise à solução 3, a espessura dos pilares de MLC é variável em função da localização do piso no edifício, no entanto, as plantas apresentadas ao longo da dissertação assumem sempre a secção máxima necessária à viabilidade do sistema no edifício.

3.5.3 Localização do Núcleo de Distribuição Vertical

O núcleo de distribuição vertical é um dos elementos fundamentais no projeto de um edifício em altura, tanto no que diz respeito às questões estruturais como de organização espacial e de circulação interior. Tendo em conta a sua importância, a localização do núcleo torna-se num dos temas mais problemáticos no momento da conceção do edifício. Tal como mostrado na tabela 6 o núcleo de distribuição vertical pode assumir diferentes posições em planta mas também diferentes formas de organização. É em função desta opção que o restante projeto se desenvolve, já que é através deste núcleo que se vai fazer a distribuição dos utilizadores ao longo dos pisos.

Na proposta de edifício apresentada, opta-se por uma solução de núcleo central, no entanto este pode assumir outras configurações, podendo localizar-se junto à fachada num único ponto, junto à fachada mas dividido, localizado apenas num extremo do edifício, entre muitas outras (imagem 31). Contudo, e apesar de existirem diversas possibilidades, em termos estruturais, a escolha da posição do núcleo de distribuição vertical influencia a estabilidade estrutural do edifício.

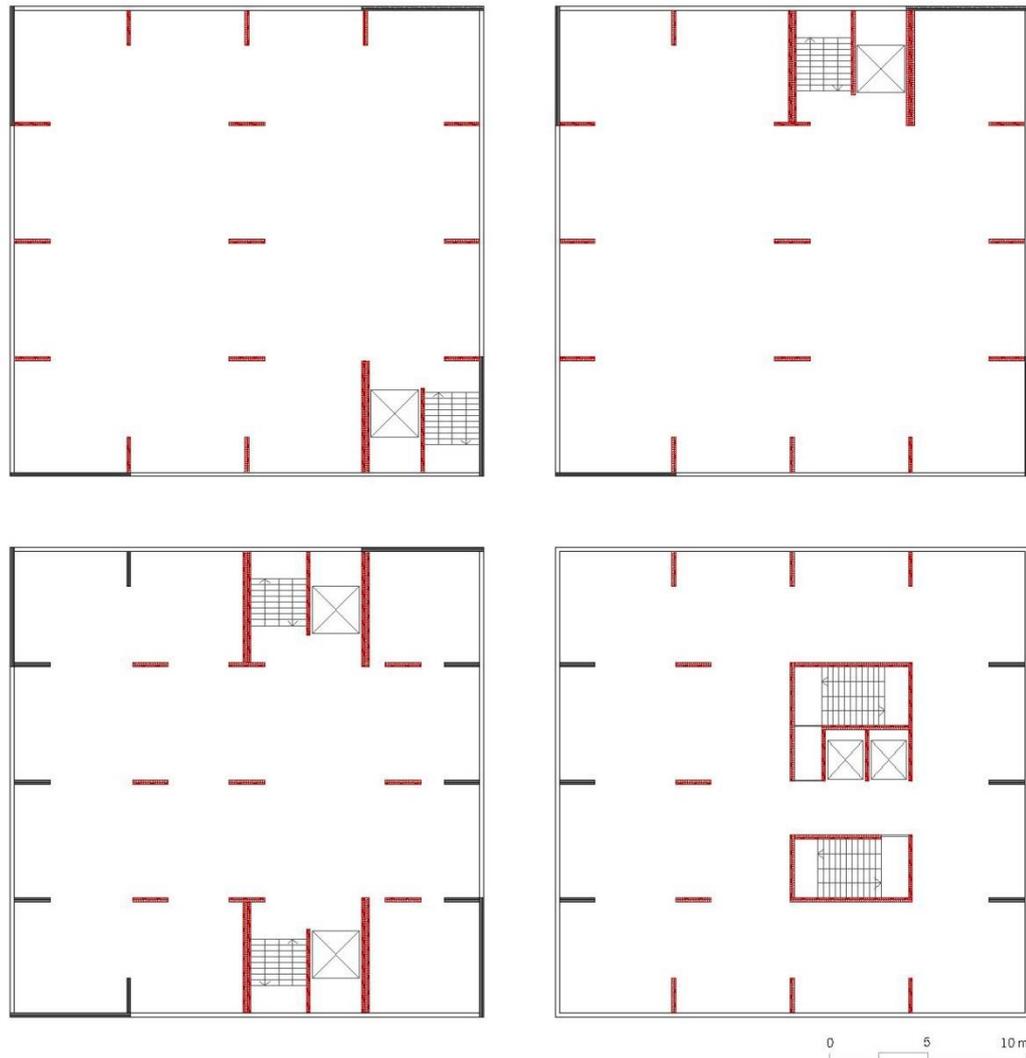


Imagem 31 – Localização do Núcleo de Distribuição Vertical

Para além de questões de circulação e de compartimentação do espaço interior, o desenho do núcleo de distribuição vertical está limitado por questões regulamentares e de segurança contra incêndios. No edifício proposto, a opção de localização do núcleo ao centro com esta configuração surge em resposta às necessidades funcionais de casa piso, mas também às inúmeras regras de vários regulamentos que têm que ser cumpridas, a fim do funcionamento em segurança do edifício. Assim enumeram-se de seguida algumas das normas do Decreto-lei nº 220/2008 de 12 de Novembro, Portaria nº 1532/2008 de 29 de Dezembro ^[31], que foram analisadas e levadas em consideração:

- ARTIGO 17^º - Resistência ao fogo dos elementos estruturais: R120 (altura > 50m – 4^a categoria);
- ARTIGO 28^º - Elevadores podem comunicar com vias horizontais de circulação comum.

³¹ Portaria nº 15325/2008 de 29 de Dezembro, Diário da República nº 250 – 1^a série, Ministério da Administração Interna, Lisboa. Disponibilizado em: http://www.proteccaocivil.pt/SCIE/Documents/Portaria_n.1532_2008_RT_SCIE.pdf (acedido a 28/10/14).

- ARTIGO 56º - Largura das saídas e caminhos de evacuação horizontal – Espaços com efetivo superior a 50 pessoas em pisos acima do plano de referência em edifícios com altura superior a 28 m, a largura mínima é de 2 UP (=1,40m).
- ARTIGO 64º - Vias verticais de evacuação – Edifícios com altura > 28 m – são necessárias duas vias verticais de evacuação. O vão de acesso às escadas devem estar a uma distância mínima de 10 metros, ligados por comunicação horizontal comum. A largura em qualquer ponto das vias verticais de evacuação não deve ser inferior à correspondente a 1 UP (0,90m) por cada 70 utilizadores, com um mínimo de 2 UP (1,40m) para edifícios cuja altura seja superior a 28 metros.
- ARTIGO 65º - Características das Escadas – Número de degraus por lanço compreendido entre 3 e 25.

De acordo com os artigos analisados e considerando o projeto para um edifício com mais de 28,0 metros de altura, apenas as duas últimas soluções apresentadas na imagem 31 são possíveis de serem utilizadas. No entanto, e apesar de cumprirem os requisitos regulamentares, a forma como estas se localizam no espaço tende a dificultar a compartimentação do mesmo, nomeadamente no que diz respeito à marcação das áreas de circulação comuns. Na situação em que as duas caixas independentes se localizam junto à fachada, por exemplo, e sabendo que estas têm que comunicar para permitir a evacuação dos utilizadores, há a necessidade de criar uma grande área comum de circulação, o que no desenho do espaço interior vai criar uma rutura e vai dificultar a posterior divisão da área interior.

Assim sendo, com base no regulamento em vigor e considerando as ambições para o desenho do espaço interior, para o edifício proposto é concebido um núcleo de distribuição vertical que para além de respeitar as normas enumeradas acima, se enquadra na métrica formada pelos elementos estruturais contínuos (imagem 32) e permite uma adequada adaptação do piso a diferentes funções.



Imagem 32 – Núcleo e Distribuição Vertical – Dimensões Regulamentares

3.5.4 Compatibilização do Sistema com as Infraestruturas Básicas

Ao trabalhar com um sistema pré-fabricado é importante perceber logo desde uma fase inicial do projeto, como vão ser feitas as ligações às infraestruturas básicas como o abastecimento de água, luz e gás assim como a drenagem das águas produzidas no edifício, de forma a minimizar os desperdícios e problemas em obra. Quando se constrói com madeira esta preparação é ainda mais importante, já que para além de se pensar nos locais onde vão passar as tubagens têm que se prever também os chamados *pontos de vigia*, para se poder aceder às infraestruturas e corrigir pequenos problemas atempadamente, caso necessário.

Para o projeto do edifício proposto, foram tidas em consideração algumas destas questões, nomeadamente a localização das chamadas áreas húmidas – compartimentos que necessitam da instalação de água como cozinhas e instalações sanitárias. Ao permitir a existência de pisos com diferentes áreas e diferentes tipos de função, opta-se por colocar todas estas áreas problemáticas em redor do núcleo de distribuição vertical (imagem 33 – área marcada a azul). Com este tipo de

disposição permite-se não só libertar as fachadas exteriores para os demais compartimentos, como limita a passagem de todas as tubagens por todos os pisos. Ora, de forma a facilitar essa passagem das infraestruturas estão previstas no projeto áreas destinadas a esse fim, as chamadas coretes (imagem 33 – área marcada a amarelo).



Imagem 33 – Esquema de Localização das Áreas Húmidas (azul) e dos Espaços Destinados à Passagem de Infraestruturas (amarelo)

A devida instalação das infraestruturas é uma das maiores preocupações já que o problema da infiltração de água é bem mais significativo em edifícios em altura construídos em madeira. Tal como referido, a MLCC não deve estar em contacto com a água a bem da sua conservação. Ora isso faz das cozinhas, das instalações sanitárias, das zonas exteriores, do piso térreo, da cobertura e da própria fachada, pontos críticos no que há humidade e infiltração diz respeito. A imagem 34 mostra exatamente uma situação de infiltração de água numa instalação sanitária e respetivas consequências. Dado o elevado custo da reparação, estes problemas têm que ser evitados em edifícios em altura construídos com MLCC. No pior dos cenários, quatro pisos podem vir a ser afetados em consequência de um único problema.



Imagem 34 – Danos na Estrutura de MLCC causados pela Infiltração de Água ³²

Andreas Ringhofer e *Gerhard Schickhofer*, a propósito da *WCTE 2014 – World Conference on Timber Engineering*, apontam alguns problemas relacionados com a presença de água em edifícios construídos em MLCC e apresentam algumas soluções para os mesmos. Segundo estes, os pontos críticos devem ser concebidos em resultado de um pensamento e trabalho interdisciplinar de forma a garantir a durabilidade do edifício.

A cobertura é um ponto crítico da construção em madeira, principalmente quando se trata de uma cobertura plana. É fundamental garantir a total estanquidade à água e para tal é necessário elaborar um desenho eficaz deste elemento de remate. De acordo com os autores, é importante que o sistema de cobertura deste tipo de edifícios seja distinto do utilizado em edifícios de betão armado. Para tal, propõem um sistema de cobertura capaz de minimizar ao máximo ao risco de entrada de água. Este recorre a uma zona de ventilação intermédia que, devido à mudança de ar permanente não só proporciona uma proteção contra o sobreaquecimento no Verão, como serve como segunda camada de proteção, caso haja uma entrada de água inesperada, onde a estrutura pode secar. Referem ainda que faz sentido que esta zona de ventilação seja inclinada dados os seus benefícios. (imagem 35)



Imagem 35 – Pormenor da Cobertura Proposta por *Ringhofer* e *Schickhofer* ³³

³² Fonte: RINGHOFER, Andreas; SCHICKHOFER, Gerhard, *MULTI-STOREY RESIDENTIAL BUILDINGS IN CLT – INTERDISCIPLINARY PRINCIPLES OF DESIGN AND CONSTRUCTION*, WCTE 2014 – World Conference on Timber Engineering, Quebec City – Canadá, Agosto 2014.

³³ Fonte: RINGHOFER, Andreas; SCHICKHOFER, Gerhard, *Timber in Town – Current examples for residential buildings in CLT and tasks for the future*, Graz University of Technology, Austria, 2013.

Para além de se garantir uma envolvente do edifício durável, é necessário analisar em pormenor certas situações interiores. É o caso das divisões que precisam de abastecimento de água. Aqui, os autores sugerem que a melhor opção para evitar problemas graves passa por construir estas divisões junto do núcleo de distribuição vertical, que por sua vez deve ser concebido em betão armado. Para os demais compartimentos que necessitem deste abastecimento, as tubagens devem ser encaminhadas suspensas no teto. Estas soluções permitem, caso seja necessário, reparar o problema sem que este se expanda a outros elementos estruturais (imagem 36).

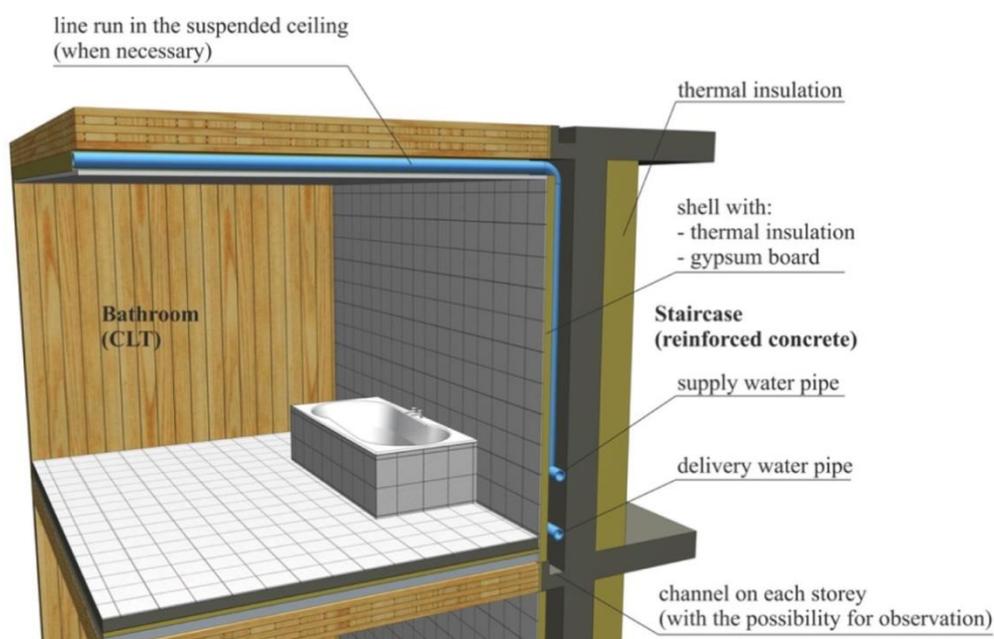


Imagem 36 – Solução Apresentada para o Abastecimento de Água nos Diferentes Pisos ³⁴

Considerando as informações fornecidas pelo trabalho analisado anteriormente, as soluções adotadas para o edifício proposto procuram também contornar este problema da entrada de água da melhor forma. Assim sendo, a cobertura assume uma solução semelhante à apresentada pelos autores, distinguindo-se apenas no revestimento final, opta-se pela chapa de zinco ao invés da cobertura verde (ver pormenor na imagem 37).

Para além de ser necessário dotar a cobertura de elementos que impeçam a entrada de água, é também importante perceber como é que feita a drenagem das águas pluviais. Sobre esse assunto, foi feita uma análise muito breve e optou-se por fazer o escoamento de água através de quatro caleiras interiores dissimuladas nos quatro pilares de MLC junto à fachada que recebem a água recolhida pelos algerozes periféricos localizados na cobertura.

³⁴ Fonte: RINGHOFER, Andreas; SCHICKHOFER, Gerhard, *Timber in Town – Current examples for residential buildings in CLT and tasks for the future*, Graz University of Technology, Austria, 2013.

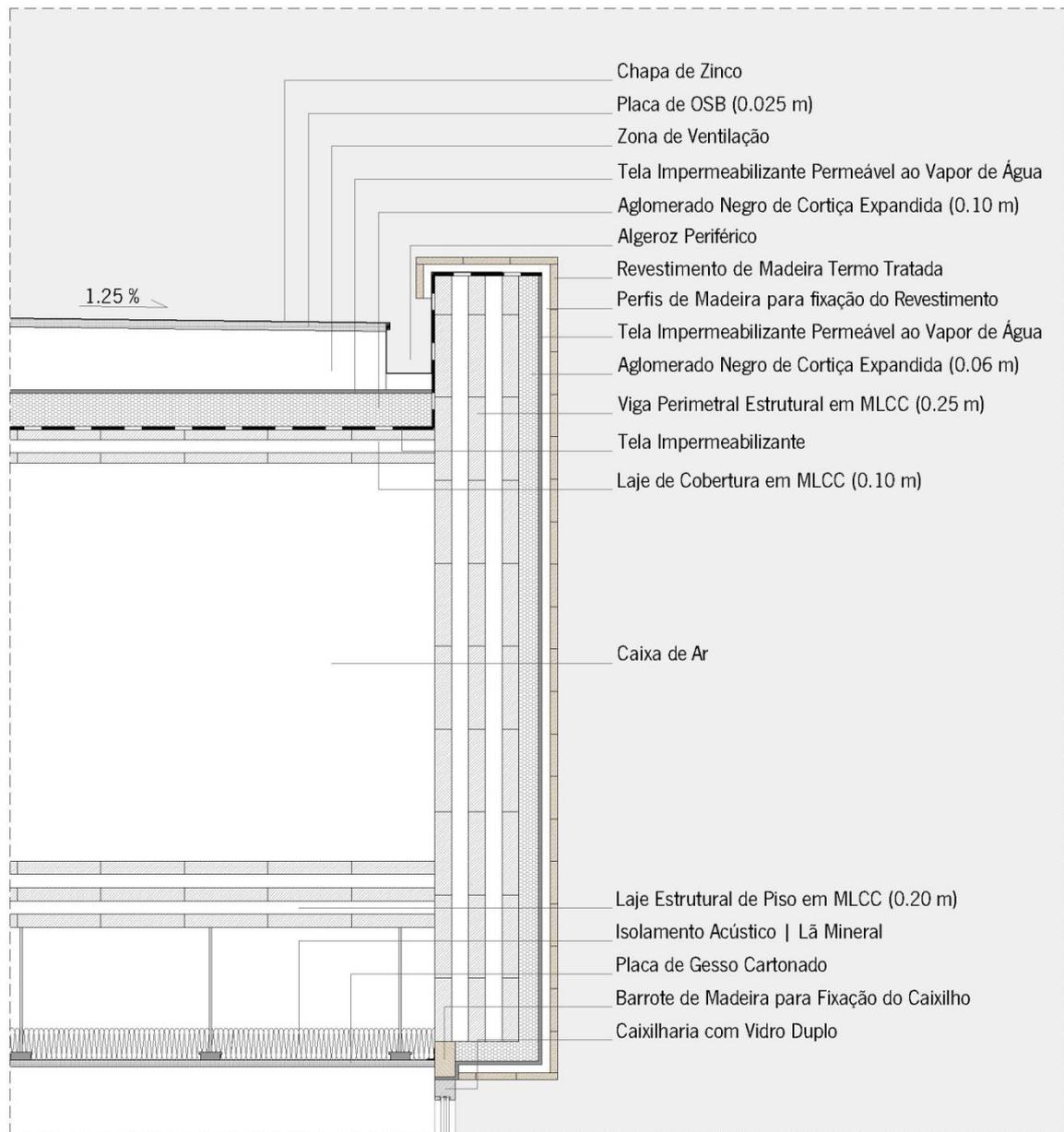


Imagem 37 – Pormenor Construtivo da Cobertura Adotada para o Edifício Proposto (Esc. 1/20)

Para a fachada opta-se por uma solução em fachada ventilada com acabamento em madeira termo tratada. Para esta o pormenor construtivo é em tudo semelhante ao adotado para a proteção das vigas perimetrais de MLCC, como se pode ver nas imagens 38 e 39, uma vez que ambas necessitam da mesma proteção à entrada de água.

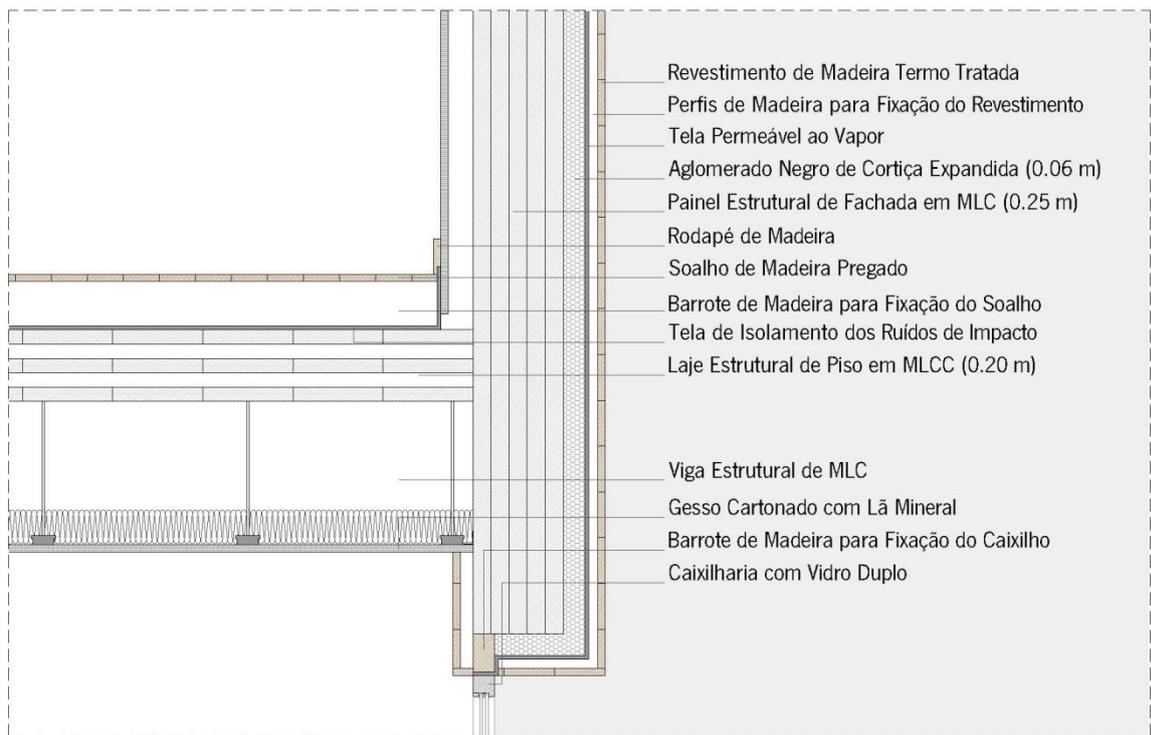


Imagem 38 – Pormenor Construtivo da Parede Exterior para o Edifício Proposto (Esc. 1/20)

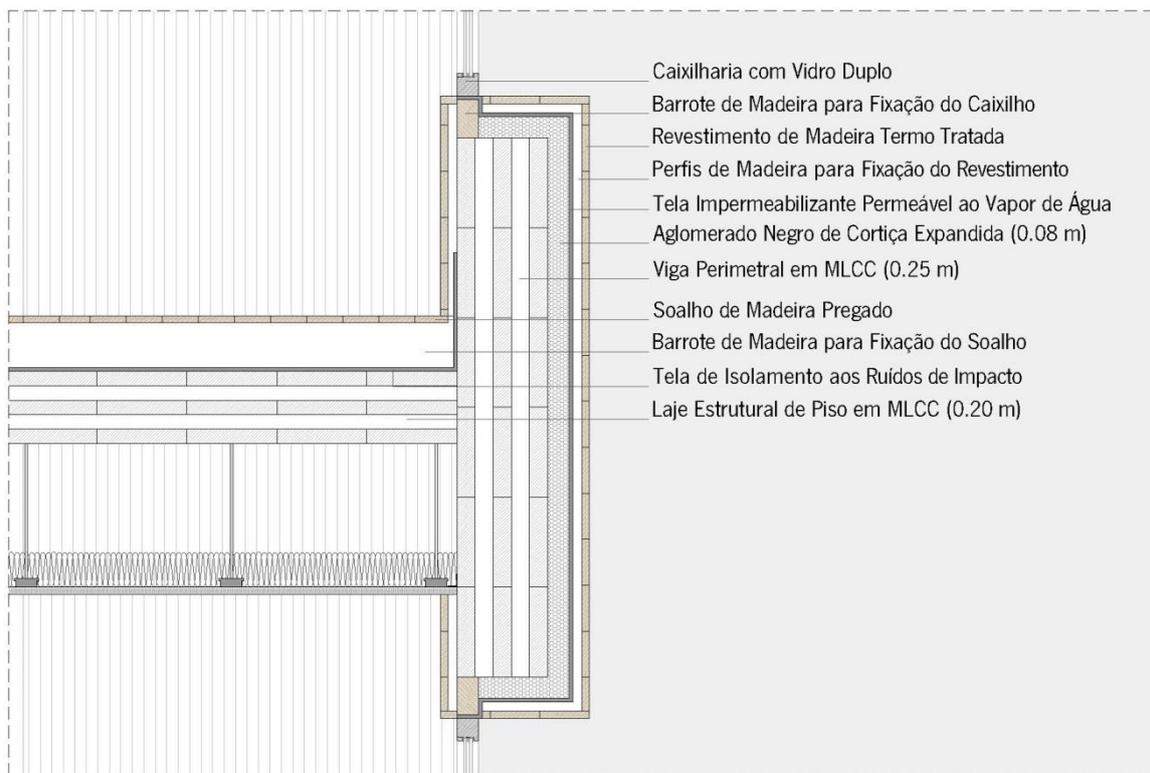


Imagem 39 – Pormenor Construtivo das Vigas Perimetrais (Esc. 1/20)

Relativamente às ‘áreas húmidas’, a solução, tal como já referido, passa exatamente por colocá-las junto do núcleo de distribuição vertical. Contudo este é também concebido em MLCC. Por isso mesmo, todos espaços para passagem de tubagens estão protegidos e dispõem de zonas de verificação em vários pontos do edifício. Um outro aspeto que importa aqui referir, é o facto de a parede que conforma esta zona de serviço de infraestruturas poder ser construída com um material do tipo gesso cartonado, o que facilita qualquer tipo de manutenção ou reparação dos sistemas.

3.5.5 Resistência ao Fogo

Uma das maiores barreiras à utilização da madeira na construção em altura está relacionada com a desconfiança da sociedade civil no que diz respeito à eficiência da madeira enquanto material estrutural utilizado na construção. Em particular, é preciso combater o preconceito erradamente estabelecido de que as estruturas de madeira têm uma resistência ao fogo inferior comparativamente com a resistência das estruturas de aço ou betão armado, presentes na maioria dos edifícios altos. Este preconceito existe devido à falta de cultura e de conhecimento de como construir em madeira, principalmente nos países da Europa do Sul.

Apesar de este preconceito existir, e que importa reverter, a madeira lamelada colada cruzada (MLCC) apresenta uma inerente resistência ao fogo. O que é certo, por exemplo, é que durante um incêndio, enquanto o aço derrete e se deforma, a viga de madeira embora perca dimensão, mantém no seu interior todas as suas propriedades. Falando em valores, a madeira arde a 0,7 milímetros por segundo, conseguindo-se portanto 30, 60 e 90 minutos durante a qual resiste aos efeitos do fogo [35]. Para além desta propriedade, a massa total de um elemento de madeira é composta por 15% de água, que numa situação de incêndio, vai evaporar e impedir que a madeira queime efetivamente, funcionando como um elemento retardador.

Para o caso dos produtos estruturais e derivados de madeira como a MLCC, e tal como referido acima, estes possuem uma resistência inerente ao fogo dada a sua secção transversal ‘maciça’. Isto é, a madeira queima de forma lenta e a camada de carvão (ver imagem 40) que é criada na superfície à medida que esta arde, ajuda a proteger e a isolar das altas temperaturas a madeira não queimada abaixo dela. Esta parte interior não queimada retém cerca de 85-90% da sua força original (ver imagem 41).

³⁵ Informações retiradas da Reportagem de Nuno Passos, *Sociedade “é desconfiada” da Construção em Madeira*, Universidade do Minho, Julho de 2013. Disponível em http://www.uminho.pt/Newsletters/HTMLExt/45/website/conteudo_985.html (acedido em 20/10/14).



Imagem 40 – Peças de madeira submetidas a efeitos de incêndio ³⁶

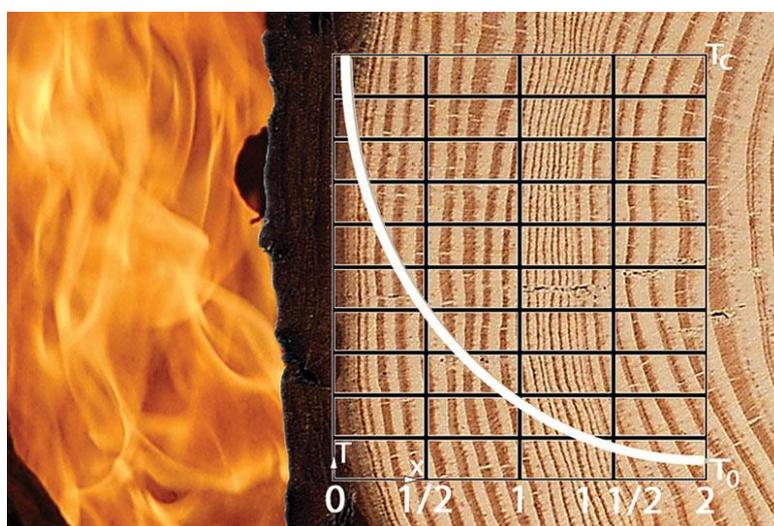


Imagem 41 – Variação da temperatura no interior de uma peça de madeira quando sujeita aos efeitos de um incêndio ³⁷

Apesar de possuir as propriedades referidas acima, existem estratégias para aumentar a proteção do fogo que variam em função do tipo de madeira utilizado e dos requisitos exigidos pela legislação em vigor. Entre outros, pode optar-se por ‘sobre-dimensionar’ os elementos resistentes de madeira para que, a secção ao ser superior permita a criação da referida camada de carvão protetora sem comprometer a estrutura do edifício. Além desta solução estrutural, existem opções que podem ser adotadas nas quais os elementos de madeira são totalmente revestidos por painéis de gesso cartonado ou, nas situações em que se pretenda manter a madeira exposta, pode aplicar-se uma camada de tinta intumescente sobre a mesma.

A capacidade de resistência ao fogo é definida como sendo o período de tempo que um elemento de construção, componente ou sistema é capaz de manter as suas capacidades físicas

³⁶ Fonte Imagem da Esquerda: <http://www.rethinkwood.com/masstimber/mass-timber-and-fire-performance> (acedido a 7/10/14); Imagem da Direita: <http://www.structuremag.org/?p=1129> (acedido a 7/10/14).

³⁷ Fonte: <http://www.greenspec.co.uk/building-design/crosslam-timber-fire-resistance-and-rating/> (acedido a 7/10/14).

para desempenhar a sua função de separação (confinando o fogo, prevenindo ou retardando a passagem do calor, dos gases quentes e das chamas) ao mesmo tempo que é capaz de continuar a desempenhar a sua função específica como suporte de cargas, por exemplo [38]. Ao projetar edifícios com MLCC, é necessário determinar a capacidade de resistência ao fogo fornecida pelo sistema utilizado, de forma a garantir que este é capaz de satisfazer os requisitos de desempenho de segurança contra incêndios definido no regulamento.

Em Portugal, o regulamento de segurança contra incêndios é bastante exigente, nomeadamente quando se trata de edifícios em altura. Contudo, e por não haver cultura de se construir em madeira, não existe regulamentação que proíba ou limite a construção em Portugal de edifícios altos utilizando a MLCC. Apesar de não estar especificamente regulamentado é importante ter em atenção os aspetos definidos no dito regulamento.

De forma a perceber a capacidade resistente da MLCC em edifícios construídos foram já efetuados alguns testes práticos. Investigadores do *NRC (National Research Council Canada)* levaram a cabo oito desses testes à escala real a elementos de MLCC [39], na tentativa de compreender e avaliar a resistência destes painéis em caso de incêndio (imagem 42).



Imagem 42 – Teste à capacidade de resistir ao fogo dos painéis de MLCC ⁴⁰

Os conjuntos testados consistem em três testes a elementos de parede e cinco testes de pavimento, todos eles realizados em fornos próprios disponíveis nas instalações do *NRC*. Alguns dos painéis de MLCC testados estão totalmente expostos ao fogo (sem qualquer tipo de proteção), enquanto outros estão protegidos com placas de gesso cartonado. Os detalhes dos testes, assim como os resultados apresentam-se na tabela seguinte (ver tabela 14).

³⁸ Fonte: DAGENAIS, Christian; WHITE, Robert H; SUMATHIPALA, Kuma, *CLT Handbook – USA Edition, Chapter 8 – Fire performance of cross-laminated assemblies*, pp. 285, FPIInnovations, 2013.

³⁹ Fonte: National Research Council Canada, *Full-scale Fire Resistance Tests on Cross-laminated Timber*, Volume 17, Number 4, NRC Publications, Dezembro de 2012. Disponível em <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/ci-ic/article/v17n4-4> (acedido a 20/10/14).

⁴⁰ Fonte: OSBORNE, Lindsay; DAGENAIS, Christian; BÉNICHOU, Nouredine, *Preliminary CLT Fire Resistance Testing Report*, National Research Council of Canada – Fire Research Resource Centre, Julho de 2012.

Tabela 14 – Detalhes e resultados dos testes aos painéis de MLCC ⁴¹

# of Plies	Thickness (mm)	Gypsum Board Protection	Load (kN/m)	Charring from Data (mm/min)	Failure Mode	Fire Resistance (min)
3	114	2 x 12.7 mm	333	0.41	Structural	106
5	175	Unprotected	333	0.65	Structural	113
5	105	Unprotected	72	0.80	Structural	57
3	114	2 x 12.7 mm	2.7	-	No failure	77
5	175	Unprotected	11.8	0.64	Integrity	96
3	105	1 x 15.9 mm	2.4	0.60	Integrity	86
5	175	1 x 15.9 mm	8.1	0.75	Integrity	124
7	245	Unprotected	14.6	0.65	Structural	178

Os testes demonstram que os conjuntos de MLCC podem atingir uma significativa resistência ao fogo, que pode chegar perto das três horas em alguns casos para painéis desprotegidos e em condições de carga plena.

O teste e respetivos resultados apresentados na tabela 14 são apenas um dos muitos ensaios que têm vindo a ser feitos na tentativa de compreender o material e a sua resistência no que ao fogo diz respeito, procurando desfazer o preconceito pré-estabelecido na sociedade atual. No entanto, de uma maneira geral fica claro que a madeira lamelada colada cruzada se comporta da mesma forma que a madeira maciça em condições de incêndio, apresentando taxas de carbonização previsíveis e possibilitando secções transversais reduzidas, permitindo tal como se verifica nos dados apresentados, obter valores próximos dos 120 minutos de resistência ao fogo, tal como é exigido pelo regulamento de segurança contra incêndios para edifícios de grande altura.

3.5.6 Comportamento Acústico

Uma das principais preocupações inerentes à utilização de um sistema construtivo novo é a questão da qualidade acústica que o espaço interior proporciona. A utilização da MLCC não é exceção a este assunto. Antes de se propor a utilização de um novo material é importante perceber se este é ou não capaz de cumprir os regulamentos impostos no que diz respeito a esta matéria.

A qualidade acústica do espaço interior é uma questão muito importante e a ter em consideração, mesmo ainda em fase de projeto, nomeadamente quando se fala em construção em altura. Para este tipo de edifícios, nos quais convivem em simultâneo um grande número de pessoas, o som produzido num determinado piso ou compartimento não deve ser ouvido em

⁴¹ Fonte: <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/ci-ic/article/v17n4-4> (acedido a 7/10/14).

outro vizinho. O som produzido é proveniente das mais variadas atividades desenvolvidas pelas pessoas no dia-a-dia, como caminhar, ver televisão, ouvir música, conversar ... e o correto isolamento dos elementos construtivos do edifício permite que este não seja transmitido para os restantes compartimentos ou pisos. O referido isolamento acústico é conseguido, não pela criação de uma barreira, mas antes pela colocação de obstáculos que dificultam a propagação do som, diminuindo a intensidade das vibrações. Para este efeito é necessário recorrer a materiais de densidades distintas, nomeadamente espumas, lãs e borrachas com o objetivo de anular a vibração.

No geral, a madeira maciça apresenta um desempenho pouco adequado em relação ao isolamento acústico uma vez que apresenta frequências acústicas muito próximas da voz e uma baixa densidade, no entanto, apresenta bons comportamentos relativamente à absorção sonora. Apesar disso, e em relação à MLCC, há ainda muitas questões que precisam de ser esclarecidas.

Ao contrário da madeira tradicional, e por apresentar uma secção transversal maciça, a MLCC é capaz de alcançar desempenhos acústicos bastante satisfatórios, tanto para tetos como para paredes, equivalentes aos obtidos para os sistemas construtivos convencionais. Tal como os demais métodos construtivos, a MLCC não é totalmente dependente do material base para proporcionar o desempenho acústico exigido. No entanto, e tal como acontece em outras soluções, o som transmitido através dos elementos estruturais é ainda um problema. Para solucionar esta questão é importante que sejam tidas em consideração, no desenho de pormenor do projeto, soluções capazes de precaver esta transmissão.

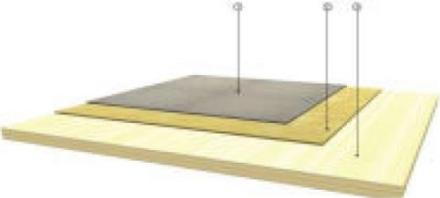
De acordo com o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) [42], o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos de um fogo, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar de outro, como locais recetores, deve ser superior a 50 dB. Assim como, entre locais de circulação comum do edifício, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais recetores o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea deve ser superior a 48 dB, ou superior ou igual a 40 dB, se o local emissor for um caminho de circulação vertical, quando o edifício é servido por ascensores. Relativamente aos sons de percussão ou de impacto, o mesmo regulamento estipula o valor de 60 dB, para quartos ou zonas de estar dos fogos como locais recetores sujeitos a sons provenientes de uma percussão normalizada sobre pavimentos de outros fogos ou de locais de circulação comum do edifício, como locais emissores.

Para verificar o comportamento acústico da MLCC foram levados a cabo alguns testes, nomeadamente pela *FPIInnovations* [43]. Estes analisaram diferentes soluções construtivas tanto para pavimentos / tetos como para paredes, a fim de perceber qual a melhor solução a adotar na construção com MLCC. Apesar de os testes terem sido realizados para o Canadá, os valores exigidos nesse país são muito semelhantes aos valores regulamentados em Portugal. Portanto, apresentam-se de seguida alguns dos testes executados e respetivos resultados (ver tabela 15).

⁴² Portaria nº 96/2008 de 9 de Junho, Diário da República nº 110 – 1ª série, Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, Lisboa. Disponibilizado em: http://www.aiccopn.pt/upload/DL_962008.PDF (acedido a 27/10/14).

⁴³ Hu, Lin; Adams, David L, *CLT Handbook – USA Edition, Chapter 9 – Sound Insulation of Cross-laminated Timber Assemblies*, FPIInnovations, 2013.

Tabela 15 – Comportamento Acústico de Diferentes Soluções para Pavimento / Teto ⁴⁴

Solução de Pavimento / Teto	Isolamento aos Sons de Condução Aérea (dB)	Isolamento aos Sons de Impacto (dB)
 <p>1 - Painel de MLCC - 5 camadas (146mm)</p>	39	24
 <p>1 - Painel do tipo Fermacell (25mm) 2 - Isolamento Acústico do Tipo Isover EP3 (20mm) 3 - Painel de MLCC - 5 camadas (135mm)</p>	≤ 53	≤ 49
 <p>1 - Painel de MLCC - 5 camadas (146 mm) 2 - Suportes de fixação do gesso cartonado do tipo elásticos (100 mm) 3 - Isolamento acústico (100 mm) 4 - Placa de gesso cartonado (13 mm) 5 - Placa de gesso cartonado (13 mm)</p>	64	59
 <p>1 - Painel de MLCC - 5 camadas (146 mm) 2 - Suportes de fixação do gesso cartonado do tipo elásticos (200 mm) 3 - Isolamento acústico - Fibra de Vidro 4 - Placa de gesso cartonado (15 mm) 5 - Placa de gesso cartonado (15 mm)</p>	63	62

De acordo com os dados apresentados na tabela acima, percebe-se que é possível cumprir os valores regulamentados no que ao conforto acústico diz respeito. No entanto é necessário ter em atenção o tipo de materiais utilizados na composição do piso, de forma a garantir a existência de vários tipos de materiais e com densidades diferentes. Nos testes efetuados é utilizado um novo sistema de fixação do gesso cartonado, recorrendo a suportes resilientes (ver imagem 43).

⁴⁴ Fonte: GAGNON, Sylvian, *CLT – acoustic performance*, FPIInnovations, Vancouver, Fevereiro de 2011. (Adaptado para Português). Disponível em: <http://wecbc.smallboxcms.com/database/rte/files/CLT-Acoustic%20Performance.pdf> (acedido a 26/10/14).

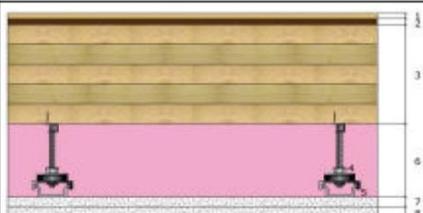
Estes, ao apresentarem esta característica elástica impedem que o som se transmita a outro compartimento através deles.



Imagem 43 – Suportes Metálicos com Características Elásticas para Fixação do Gesso Cartonado ⁴⁵

Para as duas últimas soluções apresentadas na tabela 15, os valores obtidos estão dentro dos valores estipulados pelo regulamento, sendo de salientar o facto de apenas se recorrer ao acabamento da parte inferior da laje estrutural. Se se fizer uma comparação entre estas duas, percebe-se que com o aumento da espessura do isolamento acústico de 100 para 200 mm e do gesso cartonado de 13 para 15 mm, se consegue aumentar em 3 dB o isolamento aos ruídos de impacto. Considerando o projeto para o edifício proposto, e aplicando revestimento também na face superior da laje de MLCC, apresentam-se de seguida os resultados obtidos ao teste de uma solução semelhante à adotada (ver tabela 16).

Tabela 16 – Resultados Obtidos para uma Solução Tipo de Laje de Pavimento ⁴⁶

Solução de Pavimento / Teto	Isolamento aos Sons de Condução Aérea (dB)	Isolamento aos Sons de Impacto (dB)
 <p>1 - Soalho do Tipo Flutuante (6,4 mm) 2 - Painel de Fibras de Madeira de Baixa Densidade (5 mm) 3 - Painel de MLCC - 5 camadas (146 mm) 4 - Suportes para Fixação do Gesso Cartonado Elásticos - com isolamento acústico (100 mm) 5 - Remate do Suporte em Metal com Espaçamento Mínimo de 400 mm 6 - Isolamento acústico - Fibra de Vidro (100 mm) 7 - Placa de gesso cartonado (13 mm) 8 - Placa de gesso cartonado (13 mm)</p>	62	63

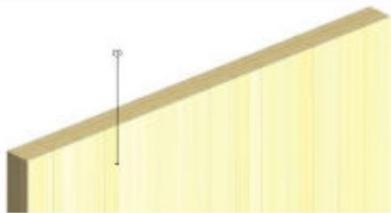
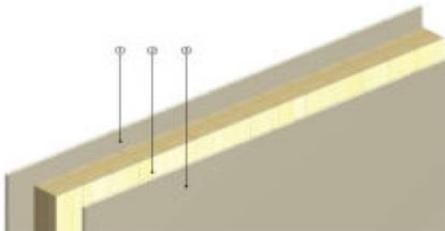
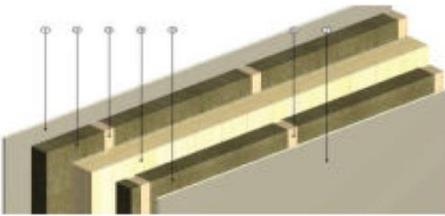
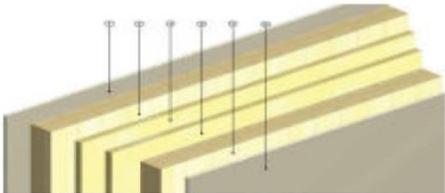
De acordo com a tabela 16, pode afirmar-se que é possível obter e até ultrapassar os valores regulamentados em termos de isolamento acústico. É apenas necessário garantir a escolha e a utilização correta dos diferentes materiais.

⁴⁵ Fonte Imagem Esquerda: Hu, Lin; Adams, David L, *CLT Handbook – USA Edition, Chapter 9 – Sound Insulation of Cross-laminated Timber Assemblies*, pp. 31, FPIInnovations, 2013. Imagem Direita: <http://www.totalvibrationsolutions.com/images/isomax01.jpg> (acedido a 26/10/14).

⁴⁶ Fonte: Hu, Lin; Adams, David L, *CLT Handbook – USA Edition, Chapter 9 – Sound Insulation of Cross-laminated Timber Assemblies*, pp. 31, FPIInnovations, 2013. (Adaptado para Português).

Tal como referido anteriormente, os testes executados aos painéis de MLCC pela *FPIInnovations* abrangem também as soluções adotadas para paredes. Assim, na tabela seguinte (tabela 17) apresentam-se os resultados por eles obtidos.

Tabela 17 – Resultados Obtidos para Diferentes Soluções de Paredes ⁴⁷

Solução de Parede	Isolamento aos sons de condução aérea (dB)
 <p>1 - Painel de MLCC - 3 camadas (95 a 115 mm)</p>	<p>≤ 32 - 34</p>
 <p>1 - Placa de gesso cartonado (15 mm) 2 - Painel de MLCC - 3 camadas (95 a 115 mm) 3 - Placa de gesso cartonado (15 mm)</p>	<p>≤ 36 - 38</p>
 <p>1 - Placa de gesso cartonado (15 mm) 2 - Lã Mineral (60 mm) 3 - Prumos de madeira (38 x 63 mm) 4 - Painel de MLCC - 3 camadas (95 a 115 mm) 5 - Lã Mineral (60 mm) 6 - Prumos de madeira (38 x 63 mm) 7 - Placa de gesso cartonado (15 mm)</p>	<p>≤ 58</p>
 <p>1 - Placa de gesso cartonado (15 mm) 2 - Painel de MLCC - 3 camadas (95 a 115 mm) 3 - isolamento Acústico - Lã de Rocha (30 mm) 4 - isolamento Acústico - Lã de Rocha (30 mm) 5 - Painel de MLCC - 3 camadas (95 a 115 mm) 6 - Placa de gesso cartonado (15 mm)</p>	<p>≤ 60</p>

⁴⁷ Fonte: GAGNON, Sylvian, *CLT – acoustic performance*, FPIInnovations, Vancouver, Fevereiro de 2011. (Adaptado para Português). Disponível em: <http://wecbc.smallboxcms.com/database/rte/files/CLT-Acoustic%20Performance.pdf> (acedido a 26/10/14).

De acordo com os dados recolhidos, percebe-se que o material por si só não é capaz de dar resposta ao regulamento em vigor. No entanto, e à semelhança do que acontece para as soluções do pavimento, com a correta escolha dos materiais de isolamento e de revestimento é possível garantir o conforto acústico dentro das divisões construídas com MLCC. A somar a estes testes, onde se procura perceber o comportamento isolante do material aos sons de condução aérea e aos sons de impacto, existem medidas que devem ser tomadas a fim de melhorar estas características e garantir a qualidade do espaço interior. Selar todas as aberturas, separar todas as superfícies, como paredes e pavimentos através da utilização de membranas ou outro material (ver imagem 44), e descontinuar os elementos estruturais, garantindo sempre a segurança estrutural, são algumas das estratégias que podem ser adotadas. No entanto, importa referir que todas as estratégias referidas são compatíveis com todos os sistemas construtivos, independentemente do material estrutural utilizado.



Imagem 44 – Colocação de Membrana Acústica entre os Painéis de MLCC ⁴⁸

Em suma, e depois de analisados os vários testes, percebe-se que grande parte da tarefa de alcançar o isolamento acústico adequado em edifícios construídos em madeira passa por dar a devida atenção aos pormenores ainda em fase de projeto. Estes detalhes passam por prever a adoção das estratégias enunciadas acima, como a utilização de membranas entre os vários elementos construtivos a fim de evitar o seu contacto direto e como tal a transferência da vibração. Se estas considerações forem tidas em conta, e tal como é evidenciado pelos testes de laboratório e de campo executados até à data, pode afirmar-se que os edifícios construídos com

⁴⁸ Fonte: GAGNON, Sylvian, *CLT – acoustic performance*, FPIInnovations, Vancouver, Fevereiro de 2011. Disponível em: <http://webc.smallboxcms.com/database/rte/files/CLT-Acoustic%20Performance.pdf> (acedido a 26/10/14).

MLCC são capazes de proporcionar um isolamento acústico satisfatório, desde que a instalação dos elementos previstos em projeto seja bem executada.

Embora tenham sido realizados vários ensaios utilizando a MLCC, que provam a sua eficácia nesta matéria, existem ainda sistemas construtivos que recorrem à MLCC que ainda não foram testados. A maioria dos testes efetuados corresponde à construção celular, no entanto o sistema *UT System* agora proposto não foi ainda submetido a este tipo de testes. No entanto, e por se optar por soluções construtivas muito semelhantes às analisadas nos ensaios apresentados anteriormente, considera-se ser igualmente possível cumprir os valores estipulados no regulamento.

3.5.7 Comportamento aos Sismos

O comportamento sísmico de edifícios construídos com MLCC tem vindo a ser testado e até à data tem dado mostras de funcionalidade e de resistência. Com o objetivo de analisar dados reais no que a esta matéria diz respeito, apresentam-se de seguida dois testes realizados pela *CNR – IVALLSA, Trees and Timber Institute – Italian National Research Council*.

Este projeto, denominado *Progetto SOFIE*, põe à prova um edifício de três andares (7 x 7 x 10 metros), e outro de 7 pisos (13,5 x 7,5 x 23,5 metros), construídos com painéis de MLCC, à escala real (ver imagem 45). Com recurso a um simulador de grandes dimensões, os edifícios são sujeitos a abalos e a forças semelhantes às ocorridas durante um sismo, com o objetivo de perceber de que forma é que a estrutura se comporta. Para tal, todos os elementos estruturais são devidamente monitorizados a fim de perceber quais as consequências sofridas pela estrutura.

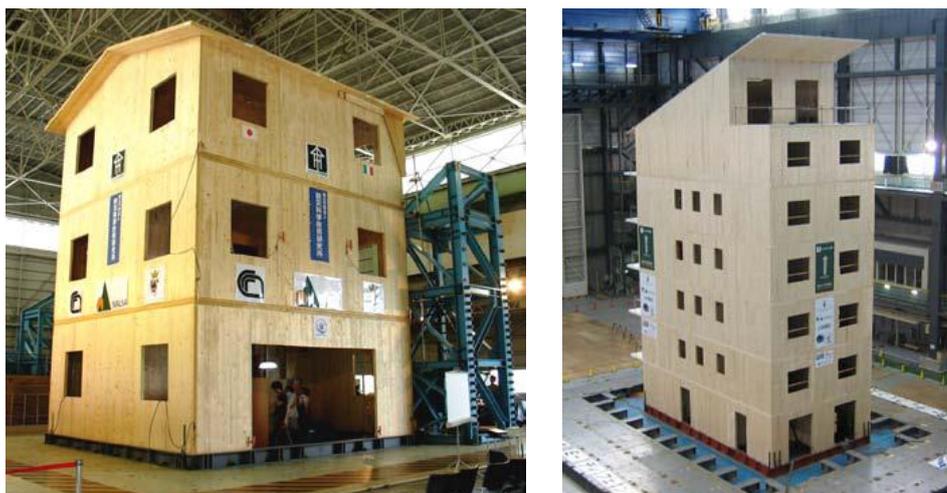


Imagem 45 – Edifícios utilizados durante o Ensaio: Edifício de 3 andares (à esquerda) e Edifício de 7 andares (à direita) ⁴⁹

⁴⁹ Fonte: CECCOTTI, Ario, SANDHAAS, Carmen e YASUMURA, Motoi, *Seismic Behaviour of Multistory Cross-laminated Timber Buildings*, Proceedings of the International Convention of Society of Wood Science and Technology and United Nations Economic Commission for Europe – Timber Committee, Genebra – Suíça, Outubro de 2010.

De acordo com os dados recolhidos por este ensaio, conclui-se que os resultados obtidos são bastante satisfatórios, evidenciando que os edifícios construídos em MLCC respondem de forma notável à ação sísmica intensa e repetida (aproximadamente 15 abalos sísmicos destrutivos), expressando um comportamento dúctil e uma boa dissipação de energia através das ligações mecânicas utilizadas. *Ceccotti* conclui que o comportamento da parede está relacionado e é controlado pelas ligações e não pelos painéis de MLCC. Diversos trabalhos publicados salientam a integridade da estrutura face aos diversos abalos sísmicos de grande intensidade. Após a realização de vários ensaios destrutivos, a estrutura não apresenta danos significativos, e mesmo quando sujeita a um sismo de nível quase colapso, este não é capaz de deformar permanentemente o edifício [50].

No entanto, importa salientar que este bom comportamento é influenciado pelo tipo de ligações utilizadas para unir os diferentes elementos estruturais. É através das ligações mecânicas projetadas especificamente para este fim, designadas de ligações dissipativas ou críticas que a maior parte da energia é dissipada. Para os sistemas com painéis de madeira este comportamento é conseguido apenas nas ligações entre painéis, nomeadamente na ligação à fundação [51].

Apesar de terem sido efetuados os referidos ensaios a este tipo de estruturas, e de o material em estudo ter dado provas de funcionalidade e resistência às ações horizontais, todos os resultados obtidos correspondem a sistemas estruturais semelhantes à construção celular, no qual se recorre a um grande número de paredes resistentes. Para o sistema agora experimentado, o *Urban Timber System*, não existem ainda dados que permitam esclarecer o seu comportamento e resistência às ações horizontais provocadas tanto pelos abalos sísmicos como pela ação do vento a que o edifício vai estar sujeito.

⁵⁰ Fonte: DEBARATHY, Luke, *Review of Seismic Performance of Cross Laminated Timber (CLT) as a new Archetype per FEMA p625*. Em: [http://public.wsu.edu/~ldebarathy/Review%20of%20Cross%20Laminated%20Timber%20\(CLT\)%20as%20a%20New%20Archetype%20per%20FEMA%20p695.pdf](http://public.wsu.edu/~ldebarathy/Review%20of%20Cross%20Laminated%20Timber%20(CLT)%20as%20a%20New%20Archetype%20per%20FEMA%20p695.pdf) (acedido a 26/10/14).

⁵¹ Fonte: JORGE, Luís, *Edifícios construídos com painéis de madeira lamelada colada-cruzada (X-Lam)*, Seminário Casas de Madeira, Castelo Branco, 2013.

3.6 Construção e Montagem

A facilidade, a rapidez e a eficácia da montagem da estrutura são características que estão associadas à construção com painéis pré-fabricados de MLCC. Tal acontece porque todos os painéis são devidamente cortados em fábrica, através do sistema de corte numérico computadorizado (CNC), com as dimensões exatas presentes no projeto e são entregues diretamente em obra, possibilitando a imediata montagem da estrutura do edifício. Para o edifício proposto com o presente trabalho acontece exatamente o mesmo no que à montagem diz respeito. O que o distingue dos demais edifícios construídos é o tipo de elementos estruturais a que recorre, vigas e pilares, ao invés de utilizar painéis contínuos. Na imagem 46 percebe-se como evolui este sistema construtivo pré-fabricado até ao momento de chegada em obra do material.

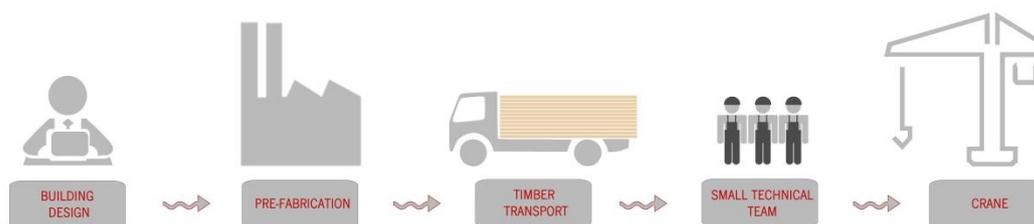
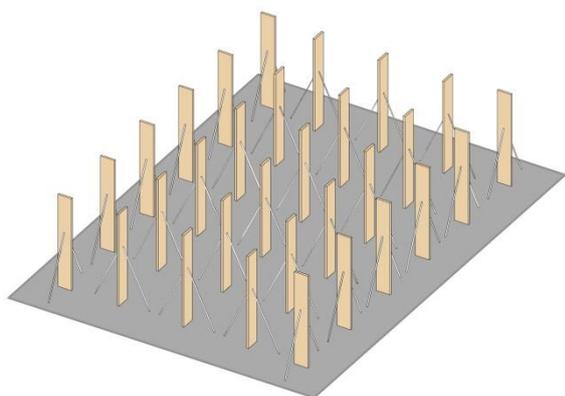


Imagem 46 – Preparação para a montagem do edifício em MLCC ⁵²

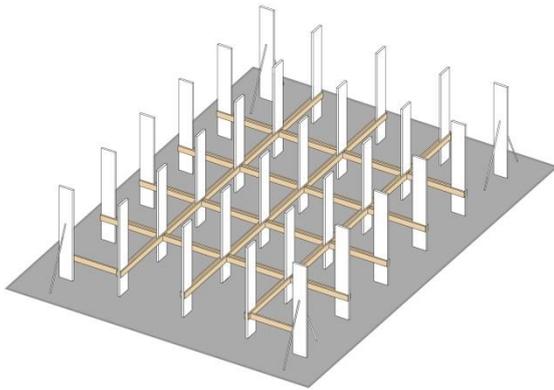
Para se proceder à montagem do edifício, é necessário que exista um projeto rigoroso onde se percebam todas as dimensões e opções tomadas, para que, no momento da pré-fabricação, do material todos os elementos respeitem as medidas necessárias. Tal como já foi referido no capítulo anterior, o transporte é feito por camiões para o local da obra, onde com a ajuda de uma reduzida equipa especializada de carpinteiros devidamente preparada e com o recurso a uma grua se procede à construção do edifício.

No que à montagem propriamente dita diz respeito, o *Urban Timber System* distingue-se da construção celular até agora utilizada dado o tipo de elementos resistentes que utiliza, mas o princípio base é praticamente o mesmo. Para o sistema analisado a montagem da torre é feita em módulos de 3 pisos, já que 12,0 m é a medida aconselhada para o transporte dos pilares de MLCC. Assim sendo, a sequência de montagem de cada módulo de três pisos apresenta-se de seguida.

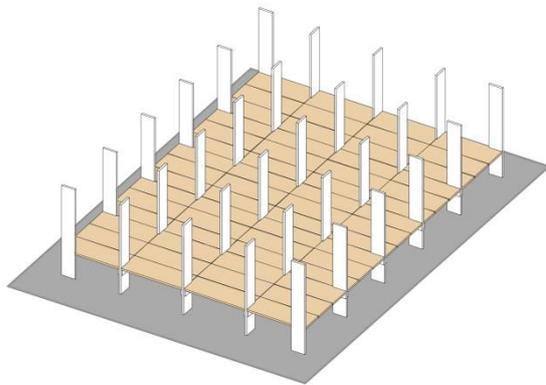


FASE 1 – colocação dos pilares de MLCC e MLC, com a devida ancoragem, sobre a laje de piso térreo em betão armado;

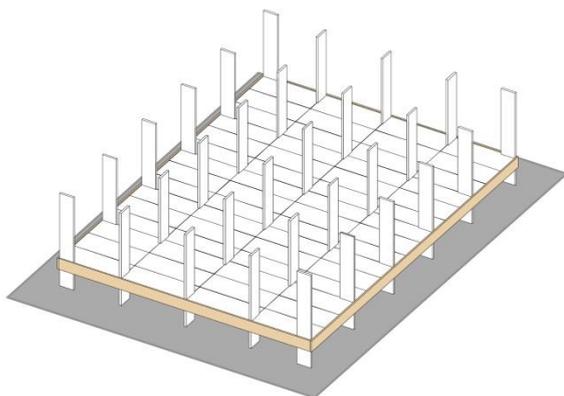
⁵² As imagens apresentadas no ponto 3.6 Construção e Montagem foram gentilmente cedidas pela Arquiteta Catarina Vilaça Silva.



FASE 2 – fixação das vigas de MLC aos pilares de MLCC e MLC previamente colocados e retirada da ancoragem. A colocação das vigas de MLC permite a estabilidade da estrutura, sem haver a necessidade dos elementos de suporte, contudo os quatro pilares existentes nas duas fachadas opostas continuam a necessitar dos apoios até à colocação da laje de piso.



FASE 3 – montagem dos painéis das lajes de piso sobre as vigas de MLC;



FASE 4 – fixação das vigas perimetrais de MLCC aos demais elementos construtivos.

Tal como referido acima, esta sequência de fases possibilita a montagem de três pisos de cada vez. Por isso mesmo, estas fases para os três pisos devem ser repetidas de forma sucessiva até alcançar o número de pisos final, terminando com a laje de cobertura.

Conhecida a sequência de montagem, é possível afirmar-se que o tempo de execução de obra é relativamente curto, quando comparado com a construção tradicional em betão armado. Tendo por base o tempo de montagem dos edifícios já construídos, pode apontar-se com um valor

temporal para o edifício agora apresentado. Assim considera-se plausível que a estrutura da torre seja construída em apenas 10 dias e seja executada por uma reduzida equipa de carpinteiros auxiliados por uma grua.

Paralelamente, e por se tratar de um sistema estrutural ‘seco’, é possível antecipar a entrada em obra das restantes especialidades, como as instalações técnicas e a aplicação de revestimentos, já que toda a estrutura prevê em projeto a colocação e passagem destes elementos. Por exemplo, os rasgos necessários para a colocação das tubagens são feitos facilmente pela equipa de carpinteiros com recurso a pequenas ferramentas de cortes. Todas estas condições proporcionam uma grande economia de tempo e de custos associados, desde que devidamente planeadas e preparadas desde uma fase inicial de projeto.

De acordo com o que foi sendo referido ao longo da revisão bibliográfica, o sistema de montagem e a facilidade em obra que este implica, torna-se numa das maiores vantagens da utilização deste novo conceito estrutural. Se se considerar o crescimento e a vida nas grandes cidades europeias, a rapidez de montagem e a facilidade de execução da obra são fatores importantes no momento da execução do projeto. Quanto menor for o tempo de obra, menor será o impacto na vivência diária da cidade. A somar a esta questão, e considerando que este tipo de construção não implica a existência de um estaleiro como os que são utilizados para a construção dita tradicional, a solução com painéis pré-fabricados de madeira possibilita também uma significativa redução na área destinada à obra propriamente dita, permitindo portanto a construção em áreas urbanas mais densas.

3.7 Descrição do Sistema Arquitetónico

Tal como acontece no ponto anterior, no qual é descrito o sistema construtivo utilizado na conceção do edifício, aqui pretende-se dar a conhecer as opções tomadas em termos de desenho de arquitetura. Isto é, para além de se compreender e experimentar a utilização de um determinado material na construção de edifícios altos, procura-se também perceber quais as implicações que este tem com o desenho arquitetónico do mesmo.

Por se tratar de uma experimentação e de exercício demonstrativo, considera-se importante descrever o tema da arquitetura de forma sistematizada também, demonstrando as possibilidades e limitações que o sistema impõe e funcionando quase como um manual de instruções para futuros trabalhos. Aqui são apresentadas as normas base para um bom resultado final assim como diversas possibilidades e alternativas de desenho que demonstram e dão a conhecer o edifício e o sistema estrutural aqui analisado.

3.7.1 Desconstrução do Perímetro de Torre

Com base no que foi referido no ponto 3.5.1 relativo à geometria da torre, sabe-se que a construção de edifícios em altura implica quase sempre uma imagem tridimensional muito marcada e muito forte, já que por norma se recorre à verticalidade para impor o edifício sobre o local de implantação, dando-lhe destaque visual exterior. No caso da construção em altura com a Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), essa imagem está ainda muito ‘crua’ em termos volumétricos. Isto é, comparando a volumetria da torre dos vários edifícios construídos analisados no Capítulo II do presente trabalho, percebe-se que esta resulta de uma extrusão de um desenho em planta, tendo quase sempre a mesma solução para todos os pisos e uma fraca relação com o meio exterior que o rodeia. Ora, se com a construção celular não há grande possibilidade de jogar com os panos de fachada, nas novas propostas, que estão ainda em fase de desenvolvimento ou as que resultam de competições percebe-se que há em todas elas uma tentativa por modificar este perímetro de torre rígido, procurando soluções mais arrojadas e mais ousadas.

Esta questão da volumetria e da desconstrução do próprio perímetro da torre é um dos pontos a analisar durante a experimentação do novo sistema estrutural. Com o *Urban Timber System* é possível desconstruir esta imagem volumétrica e alcançar um desenho mais flexível que possibilita maior relação com o meio envolvente (imagem 47 e 48).

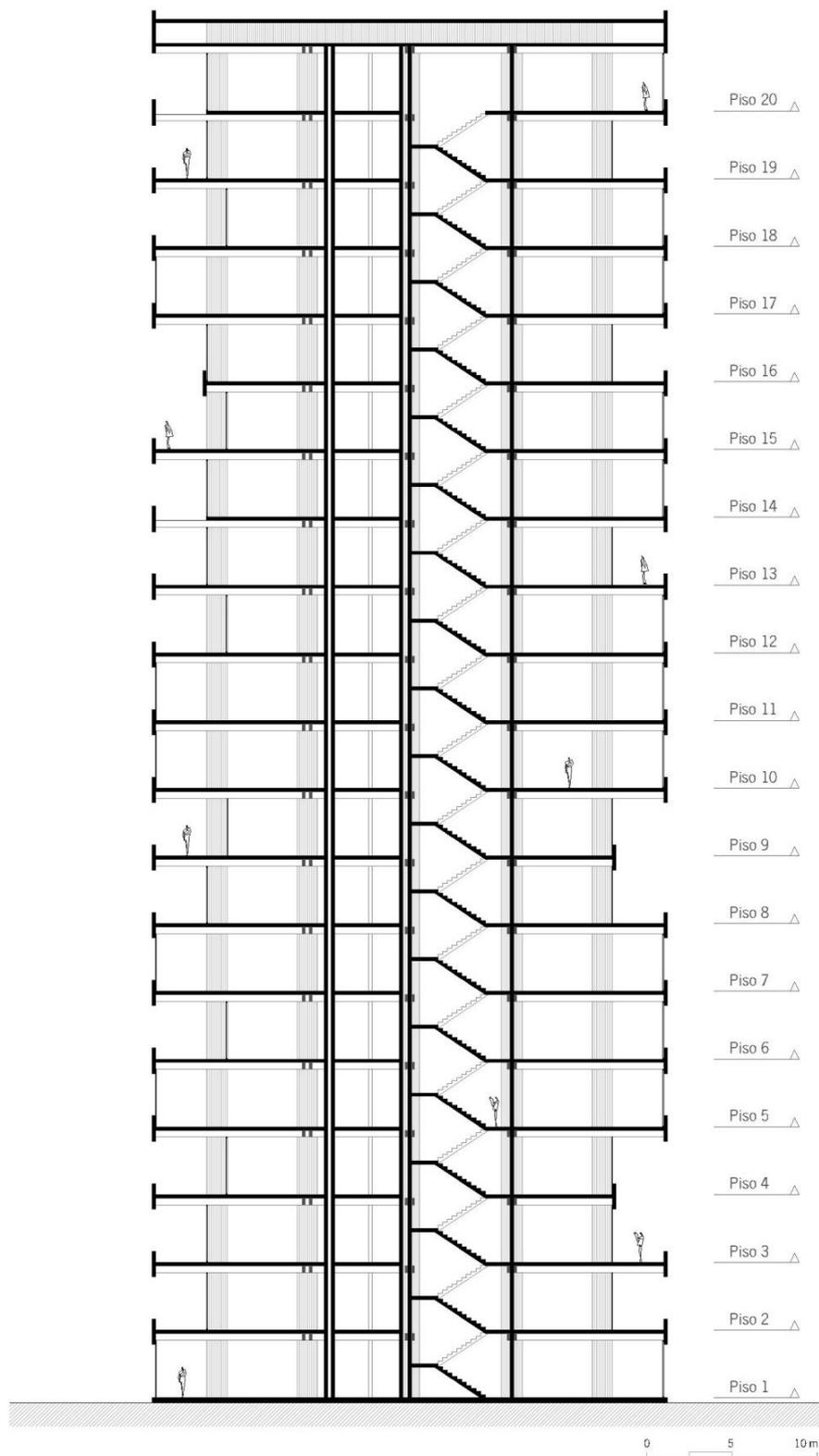


Imagem 47 – Corte do Edifício Proposto



Imagem 48 – Representação Tridimensional do Edifício Proposto

A referida desconstrução do perímetro da torre é conseguida através do desfaseamento dos diferentes andares, uma vez que o sistema estrutural permite a existência de pisos com dimensões distintas que podem ser deslocados ao longo da malha do sistema estrutural. Isto é, o núcleo de distribuição vertical e os pilares de MLCC mantêm-se contínuos ao longo de todo o edifício e estão sempre presentes, no entanto a laje de piso vai sendo deslocada, aumentando ou diminuindo de tamanho em função daquilo que se pretende para o desenho do perímetro da torre, criando assim seis tipos de pisos distintos que podem ser combinados de acordo com a vontade do arquiteto (imagem 49).

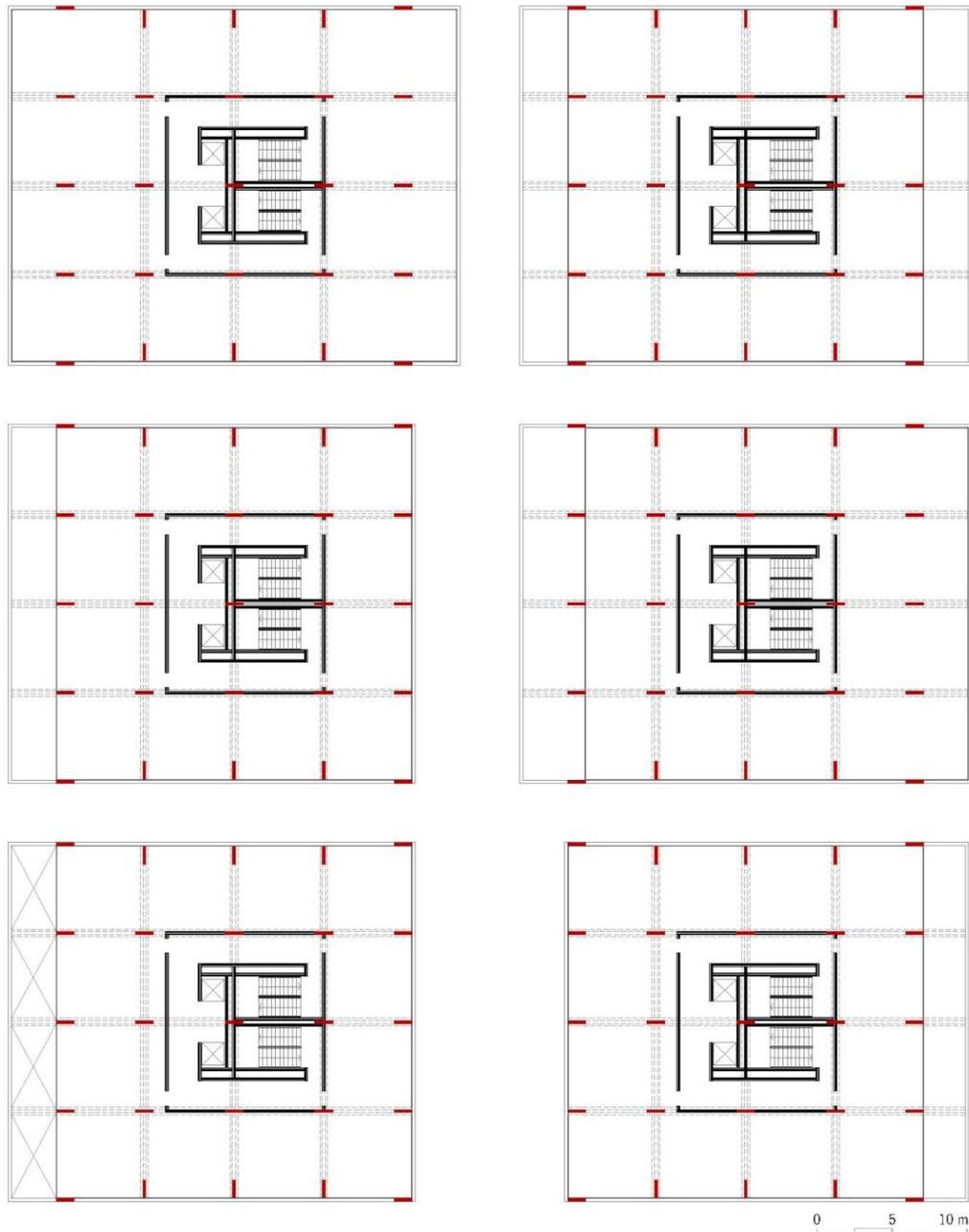


Imagem 49 – Esquema de Movimento dos Diferentes Tipos de Planta Possíveis

Este pormenor de se poder mover os pisos em função daquilo que se pretende oferece ao arquiteto uma grande liberdade no momento da conceção do edifício, já que pode optar e escolher os tipos de pisos que pretende de acordo com o seu objetivo e conceito de projeto. Importa salientar ainda que no projeto do edifício proposto a movimentação da laje de piso foi feita no sentido longitudinal (esquerda-direita) mas o mesmo pode ser feito em sentido oposto, transversalmente à planta ou mesmo nos dois sentidos, obtendo-se como resultado final um volume totalmente recortado onde o perímetro do paralelepípedo está bem dissimulado (imagem 50).

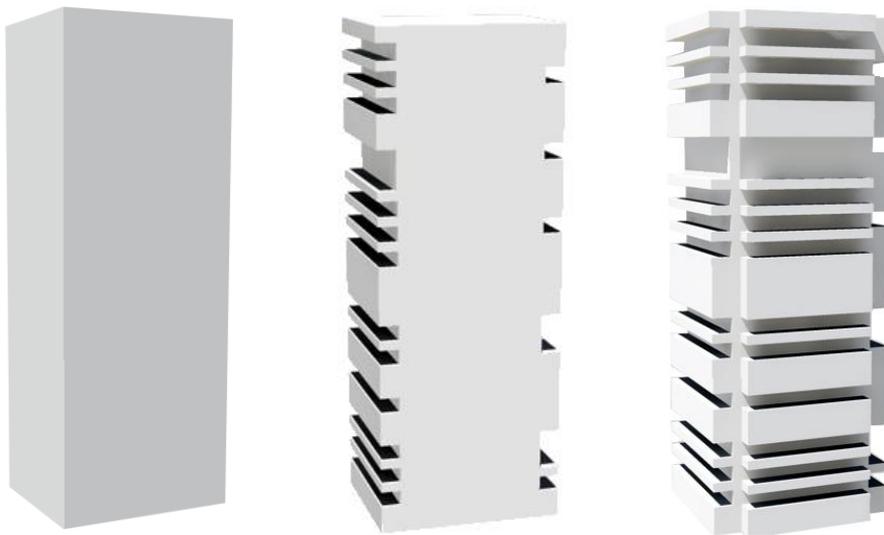


Imagem 50 – Comparação da Torre Paralelepédica com o Resultado da Movimentação dos Pisos

Em suma, no que diz respeito à desconstrução da torre como volume paralelepipedico, o *UT System* dá mostras de avanços quando comparado com as demais soluções analisadas. Ora, se o sistema permite estas mudanças ao longo dos pisos, o desenho tridimensional do edifício está mais perto de ter formas mais arrojadadas e mais ambiciosas, à semelhança do que se tem vindo a fazer com outros sistemas construtivos. É de salientar no entanto, que apesar de serem possíveis os avanços de varandas referidos, estes nunca devem exceder os 3,0 metros de largura em balanço, já que de acordo com os testes efetuados se concluiu que este é o valor máximo que o sistema estrutural analisado suporta para consolas.

3.7.2 Interação Interior - Exterior

Quando se projeta um edifício em altura, poder dotá-lo de espaços exteriores privados é sempre uma mais-valia quer em termos imobiliários quer em termos de condições de conforto e habitabilidade. Isto é, é diferente morar num 15º andar, por exemplo, apenas com janelas pontuais, e sem varandas, do que morar num edifício que permite aos utilizadores a possibilidade de usufruírem de um espaço exterior privado e com uma vista privilegiada sobre a cidade em que se encontram. Este elemento confere ao edifício valor comercial mas também qualidade de utilização, para além de que potencia a relação interior - exterior.

Da análise aos edifícios construídos com sistema estrutural em MLCC percebe-se que existe em quase todos uma tentativa de dotar o edifício de espaços exteriores. No entanto, e dado o sistema estrutural a que recorrem, as soluções adotadas são sempre muito pobres, criando por norma espaços pequenos. Ora, se com os sistemas estruturais utilizados até então não se têm obtido grandes resultados, com o *UT System* o panorama muda significativamente.

Em função do referido no ponto anterior, relativo à desconstrução do perímetro da torre, percebe-se que o novo sistema estrutural consegue dar novas respostas a esta questão. Os

avanços e recuos dos diferentes pisos permitem criar espaços exteriores com maior qualidade espacial e com maior dimensão em comparação com o que se tem projetado até agora. Na proposta apresentada, para além de se atribuir à maioria dos pisos uma varanda, o desenho de cada uma delas é diferente e variável em cada piso, criando soluções peculiares como a de ter uma varanda com um pé direito duplo, por exemplo (ver imagem 51). É de notar que, no edifício proposto, apenas são desenhadas varandas em duas fachadas opostas. No entanto, e dada a versatilidade do sistema analisado, estas podem acontecer em qualquer uma das quatro faces da torre, sem ser necessário acontecer em simultâneo. Podem existir diferentes soluções num mesmo edifício. A única restrição é a da continuidade da malha de pilares estruturais de MLCC que devem ser contínuos em todos os pisos.



Imagem 51 – Representação de um Espaço Exterior em Varanda com Pé-direito Duplo

3.7.3 Implantação

Apesar de se tratar de um exercício de experimentação que procura conhecer e validar um sistema construtivo, o lugar onde o edifício se localiza continua a ser um aspeto muito importante. As questões que foram levantadas durante a análise dos edifícios construídos estavam diretamente relacionadas com a relação que a ‘torre’ estabelece com o meio envolvente, com o espaço exterior circundante.

Apresenta-se de seguida uma possível implantação para o edifício proposto. Na imagem 52 está representado a vermelho o terreno no qual se considera que poderá ser implantado o edifício. Este corresponde aos terrenos da antiga fábrica da *Sidul* em Alcântara, Lisboa.



Imagem 52 – Terrenos da antiga fábrica da *Sidul*, Alcântara – Lisboa⁵³

A escolha deste lugar para a implantação da proposta prende-se com a existência de um projeto do arquiteto Siza Vieira para a construção de três edifícios em altura, datado do ano 2003 mas que não chegou a ser executado, já que o projeto foi abandonado no ano 2004. O referido projeto consistia na construção de três torres de 35 andares (aproximadamente 105 metros de altura) e seis outros edifícios, mais baixos, destinados a habitação, comércio e escritórios (imagem 53).

⁵³ Fonte: Imagem adaptada do *Google maps*.

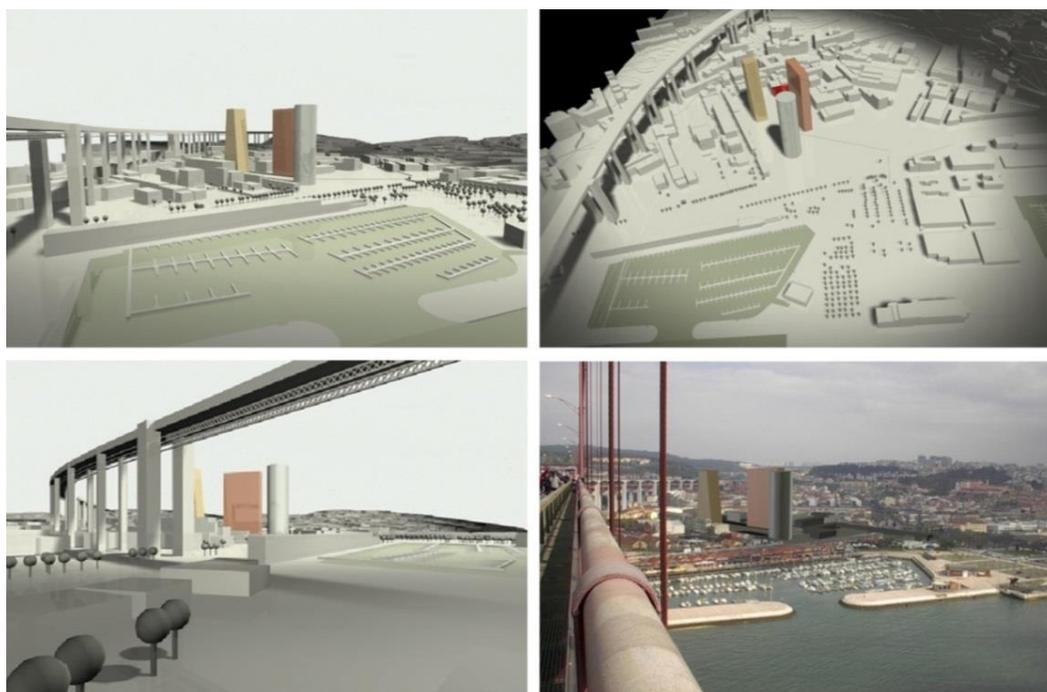


Imagem 53 – Torres de Alcântara, Arq. Álvaro Siza (imagens do projeto) ⁵⁴

É certo que não é comum construir-se em altura em Portugal, mas à altura, Álvaro Siza e antecipando o referido ‘medo das alturas’, explicava que as torres permitem libertar vastos espaços verdes e de usufruto público: cerca de 3,3 hectares num terreno de 4,5 hectares. Segundo o arquiteto, construir edifícios com oito pisos, de acordo com o estipulado no Plano Diretor Municipal (PDM) iria gerar uma excessiva e monótona ocupação do espaço: “*Pareceu-me monstruoso, resultava numa espécie de casernas e ficava muito denso*” ^[55]. A somar aos espaços verdes conseguidos, a abertura de uma alameda quase perpendicular ao rio Tejo em conjunto com uma construção baixa que faz a ligação à beira rio, ultrapassando a barreira do caminho-de-ferro e da estrada, integram o projeto.

Apesar dos argumentos utilizados pelo arquiteto no que diz respeito à organização e ao aproveitamento do espaço urbano, o projeto não chegou a ser posto em prática, porque para além de não respeitar a limitação de cêrceas vigente nos regulamentos em vigor, foi confrontado com um conjunto de impedimentos. Estes estavam relacionados tanto com população, que não compreendia o porquê de se construir em altura numa zona ribeirinha, como com os membros da câmara municipal de Lisboa. A somar a estes dois problemas, surgiu também o próprio cliente que acabou por desistir do investimento devido à demora na aprovação por parte das entidades responsáveis.

Pelos argumentos a favor e contra a execução de edifícios em altura continuarem a ser atuais, esta proposta recupera essa temática, propondo uma nova torre com um sistema construtivo revolucionário neste local de Lisboa.

⁵⁴ Fonte: <http://www.carloscastanheira.pt/en/arquitectura/parcerias/master-plan-e-towers-for-alcantara> (acedido em 6/7/2014).

⁵⁵ Fonte: <http://www.publico.pt/local-lisboa/jornal/siza-vieira-propoe-torres-mutantes-para-alcantara-207134> (acedido em 6/7/2014).

3.7.4 Sistema de Desenho da Fachada

À semelhança do desenho do espaço interior, o desenho do alçado de um edifício é de maior importância na conceção de um projeto. Isto é, é através deste que o ambiente e o espaço interior criado transpiram e se mostram ao exterior.

Tal como nos demais projetos elaborados ao longo do percurso académico, no presente trabalho, e apesar de se tratar de um projeto que procura experimentar um novo sistema construtivo, também foi dada a devida importância ao desenho da fachada. Assim, e na continuidade do método de trabalho que tem vindo a ser adotado são agora apresentadas várias possibilidades de desenho do mesmo, seguindo contudo um sistema-regra, apresentado posteriormente, que orienta o arquiteto na conceção das mesmas. Com a elaboração do referido sistema-regra pretende-se mostrar que as limitações que o sistema apresenta são reduzidas e que apesar da sua existência, o sistema continua a permitir e a oferecer uma grande versatilidade e liberdade de desenho ao arquiteto no ato criativo e conceção do projeto.

De acordo com o supracitado no ponto 3.4, uma das maiores barreiras ao desenho da ‘pele do edifício’ que a utilização do *UT System* impõe prende-se com a necessidade de colocar vigas perimetrais com 1,50 metros de altura ininterruptas em todos os pisos (ver imagem 54). Isto é, as vigas de madeira lamelada colada cruzada (MLCC) funcionam como cintas estruturais em cada um dos pisos que vão unir todo o sistema, sendo portanto essenciais ao funcionamento do mesmo. Em termos visuais a existência destes elementos tem uma expressão muito vincada criando a sensação de que estes ‘fatiam’ a torre em segmentos. Contudo, e apesar de a sua existência ser fundamental para a estabilidade estrutural, a colocação das mesmas pode variar em função da posição que esta assume em relação à laje de piso, podendo-se assim dissimular a sua presença no desenho do alçado.

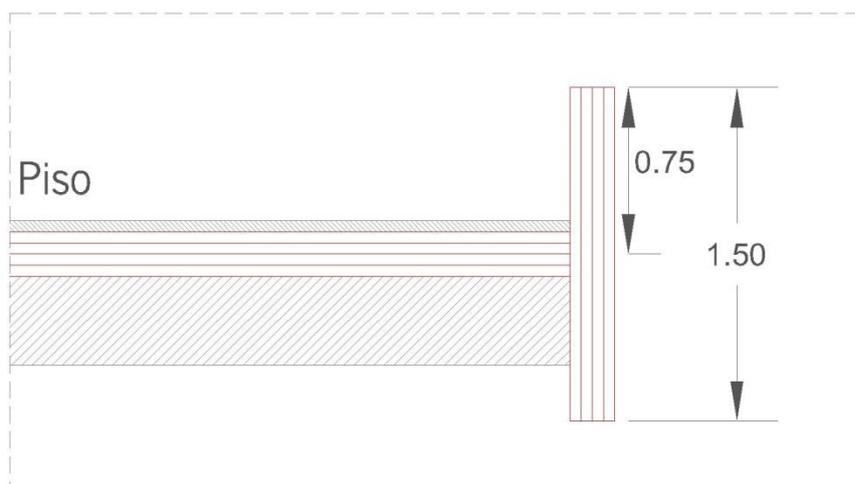


Imagem 54 – Colocação da Viga de MLCC a Eixo da Laje Estrutural

Conhecendo as barreiras que o sistema impõe e, acima de tudo, procurando evidenciar as suas potencialidades na expressão exterior final da torre, enunciam-se agora as ‘regras’ que importam conhecer antes de se proceder ao desenho dos alçados. É com base nestas premissas

que a expressão do alçado pode crescer, permitindo total liberdade criativa ao arquiteto. No entanto é de realçar que todas elas devem ser respeitadas e conhecidas a fim de um bom funcionamento e da integridade da estrutura. Assim, apresenta-se agora aquilo que pode ser designado de 'Guia para o Desenho do Alçado'.

- REGRA 1

A distância entre pisos tem que ser obrigatoriamente de, no mínimo, 4,0 metros. Este valor garante um pé direito livre de 3,0 metros (obrigatório para usos do tipo comercial / escritórios) após a colocação de todas as infraestruturas necessárias como os AVACS e os respetivos acabamentos quer de teto quer de pavimento.

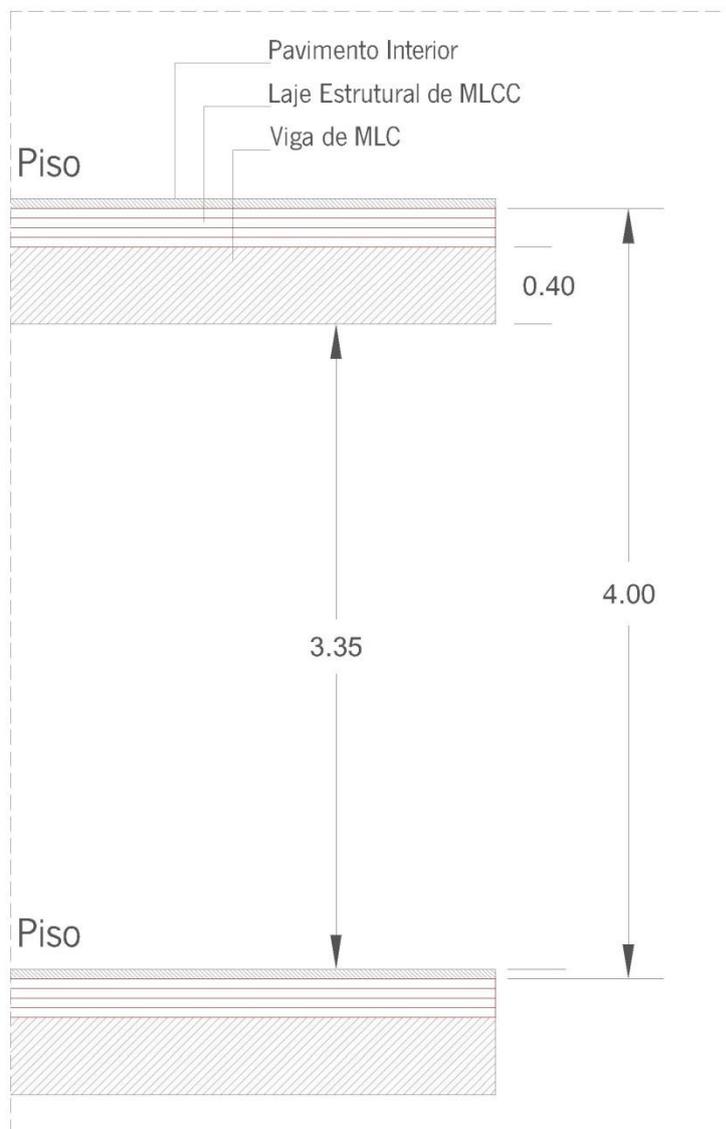


Imagem 55 – Esquema Métrico da Organização dos Pisos

▪ REGRA 2

A deslocação da viga perimetral de MLCC no sentido ascendente deve ser feita salvaguardando uma distância mínima abaixo da laje de piso de 0,65 m. É importante salvaguardar este valor, uma vez que é necessário fazer o remate do sistema de vigas de madeira lamelada colada existente sob a laje de piso. É através da colocação da viga perimetral que é feito o acabamento e é conseguida a proteção necessária destes elementos. Assim a viga de MLCC pode localizar-se de nível com as referidas vigas de MLC ou o seu acabamento interior.

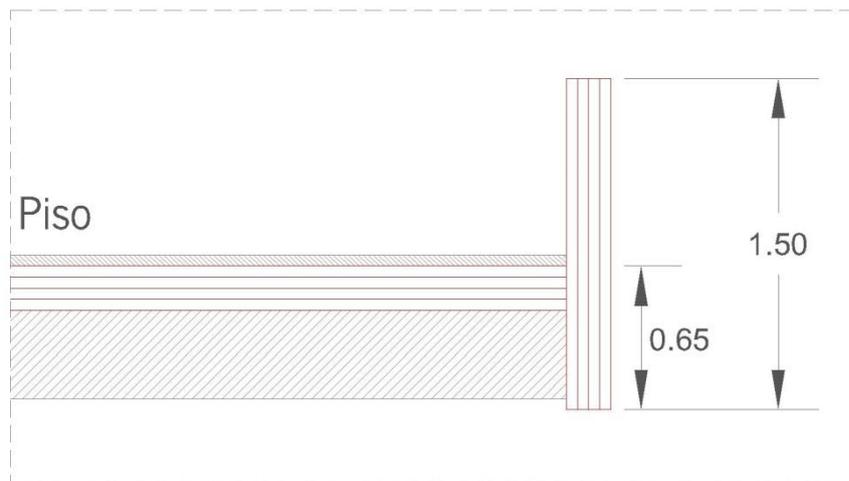


Imagem 56 – Colocação da Viga de MLCC acima da Laje Estrutural

▪ REGRA 3

A deslocação da viga perimetral de MLCC no sentido descendente, no sentido de libertar a totalidade do vão, deve ser feita até ao nível do acabamento do pavimento. Isto é, é necessário deixar uma margem mínima de 0,10 m, ou superior dependendo da solução escolhida, para a colocação do revestimento da laje de piso.

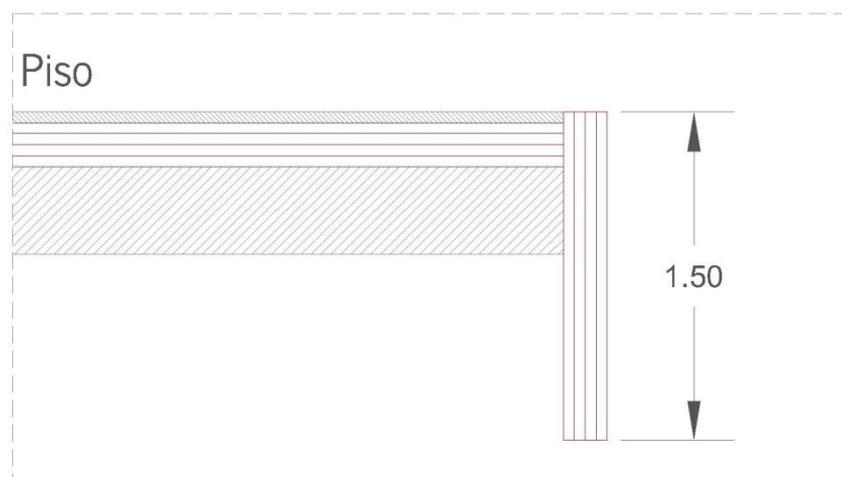


Imagem 57 – Colocação da Viga de MLCC abaixo da Laje Estrutural

- REGRA 4

É obrigatória a total continuidade das vigas de MLCC, na sua altura mínima de 1,50 metros, na totalidade do perímetro do piso.

- REGRA 5

É necessário e obrigatório manter a posição da viga de MLCC em relação à laje na totalidade do perímetro do piso. Isto é, caso se opte por colocar a viga a eixo da laje esta opção tem que ser adotada para todo o perímetro do piso, não pode haver alterações na sua posição.

Sendo conhecidos os diferentes pontos a ter em consideração no momento do desenho do alçado, o limite para o desenho do mesmo está na criatividade de cada um. Isto é, comparativamente com os edifícios analisados durante a análise bibliográfica, o sistema construtivo aqui analisado permite uma maior autonomia no desenho da fachada, já que apresenta reduzidas limitações e permite a quase totalidade da abertura da mesma.

Com o objetivo de mostrar essa mesma liberdade e versatilidade da composição da pele do edifício apresentam-se de seguida algumas das muitas possibilidades de desenho da mesma, adotando para cada uma delas sistemas compositivos diferentes em função daquilo que é a intenção final de desenho. De salientar aqui, que este desenho de alçado foi elaborado como um exercício gráfico onde se pretende mostrar as potencialidades que o sistema introduz em relação aos edifícios já construídos, como tal não há qualquer relação direta com o desenho do espaço interior também desenvolvido para o presente trabalho.

- PROPOSTA 1

Esta solução (imagem 58) apresenta-se como a resposta base à composição da fachada, sendo pois o resultado direto do desenho do sistema estrutural. Isto é, aqui estão representados todos os elementos estruturais necessários para a estabilidade do edifício que têm expressão na fachada e apenas esses mesmos, apresentando portanto a área máxima de aberturas para o exterior. Para esta solução, opta-se por colocar as vigas perimetrais de MLCC a eixo da laje estrutural de cada piso tendo como resultado uma expressão exterior marcada e forte, com prevalência das linhas horizontais em contraponto com a verticalidade da torre.

Em termos compositivos, o alçado é muito fragmentado e há uma presença muito forte daquilo que é a estrutura do edifício, como as vigas perimetrais referidas acima e os pilares de MLCC que desenham duas linhas verticais bastante expressivas. Este tipo de desenho pode ser facilmente adotado e adequa-se aos diferentes tipos de uso que o edifício pode receber. No entanto, se se considerar uma utilização residencial, e principalmente se estiver localizado em Portugal, é preferível optar por uma solução com maior percentagem de área opaca para assim se conseguir maior privacidade para os utilizadores. No que aos vãos envidraçados diz respeito, estes estão marcados de acordo com uma métrica regular dada exatamente pelos pilares de MLCC que se encontram na fachada, criando assim uma malha e um jogo de cheios e vazios na totalidade do edifício.

No que diz respeito ao conjunto volumetria da torre mais a ‘pele’ de revestimento, consegue-se perceber que não existe grande continuidade no tipo de desenho, isto é, os cheios e vazios proporcionados pelos avanços e recuos dos pisos passam despercebidos no alçado por se optar por uma solução de vãos envidraçados na totalidade do perímetro de cada piso. Contudo, o tipo de vidro utilizado para preencher esses mesmos vãos pode fazer toda a diferença em termos expressivos, já que o resultado final obtido é totalmente diferente caso se opte por um vidro transparente e de cor clara ou por um vidro de índice de reflexão elevado e de cor mais escura, por exemplo.

É de notar que para esta solução de alçado estão representadas as opções tomadas no desenho do espaço interior apresentadas em planta no presente trabalho.

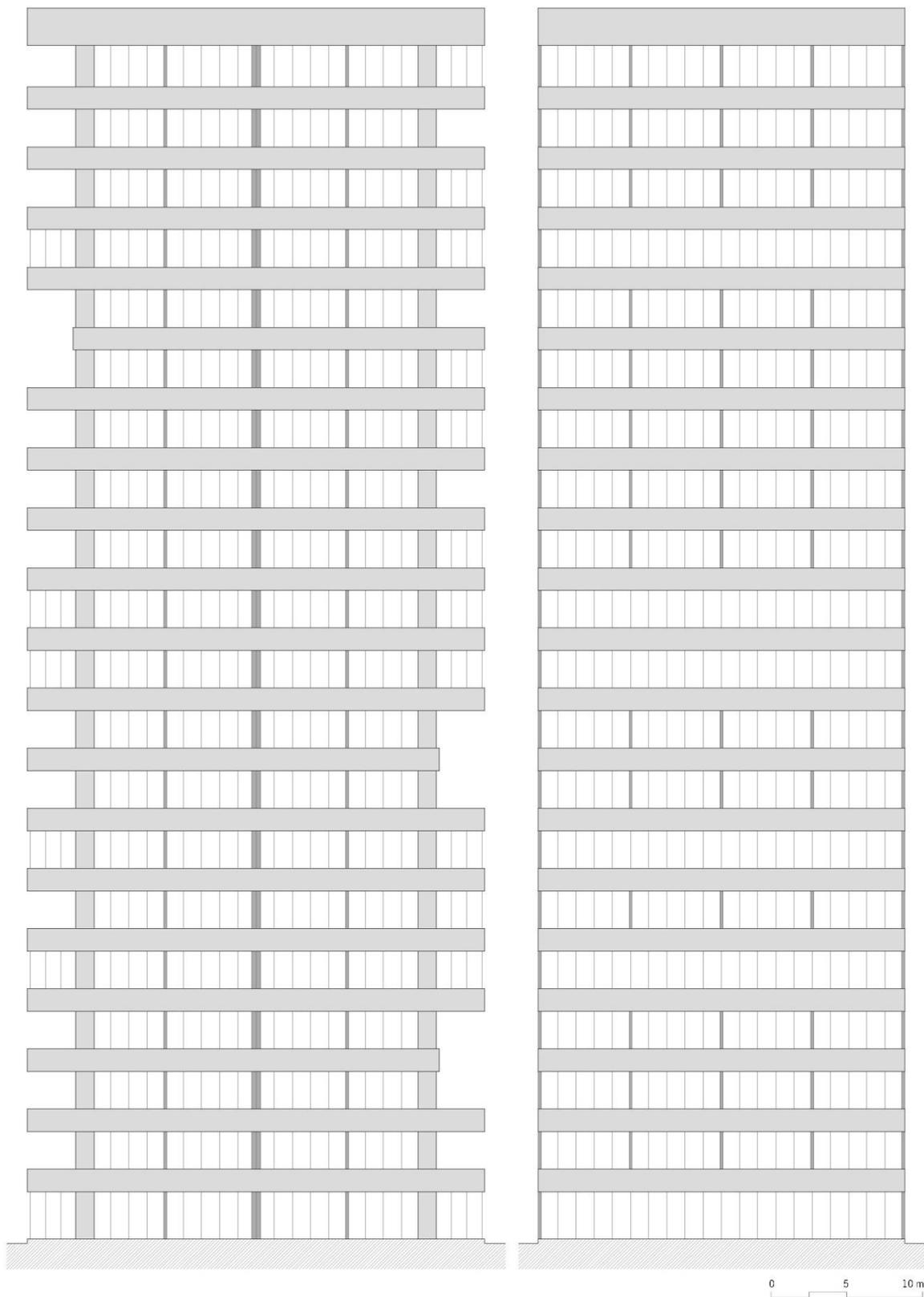


Imagem 58 – Proposta 1: Desenho do Alçado Frente (esq.) e do Alçado Lateral (dir.)

- PROPOSTA 2

Na solução 2 (imagem 59) opta-se por dar ao alçado uma expressão distinta, criando para tal um jogo de cheios e vazios com base na mesma métrica regular utilizada na proposta anterior. Em relação às vigas perimetrais de MLCC a solução adotada é semelhante à utilizada na proposta anterior, optando por colocá-las a eixo da laje estrutural de piso. Para além da questão dos vãos e da colocação das vigas perimetrias, nesta proposta e com o objetivo de conferir alguma textura à fachada, opta-se por colocar a madeira termo tratada utilizada como revestimento exterior em orientações distintas. Assim nas vigas perimetrais aplicam-se as lâminas de madeira na horizontal, dando ênfase à marcação horizontal criada pelas próprias 'cintas' enquanto nos panos opacos se aplicam na vertical. Esta aplicação na vertical respeita a marcação dos prumos da caixilharia e possibilita a dissimulação dos pilares presentes no alçado.

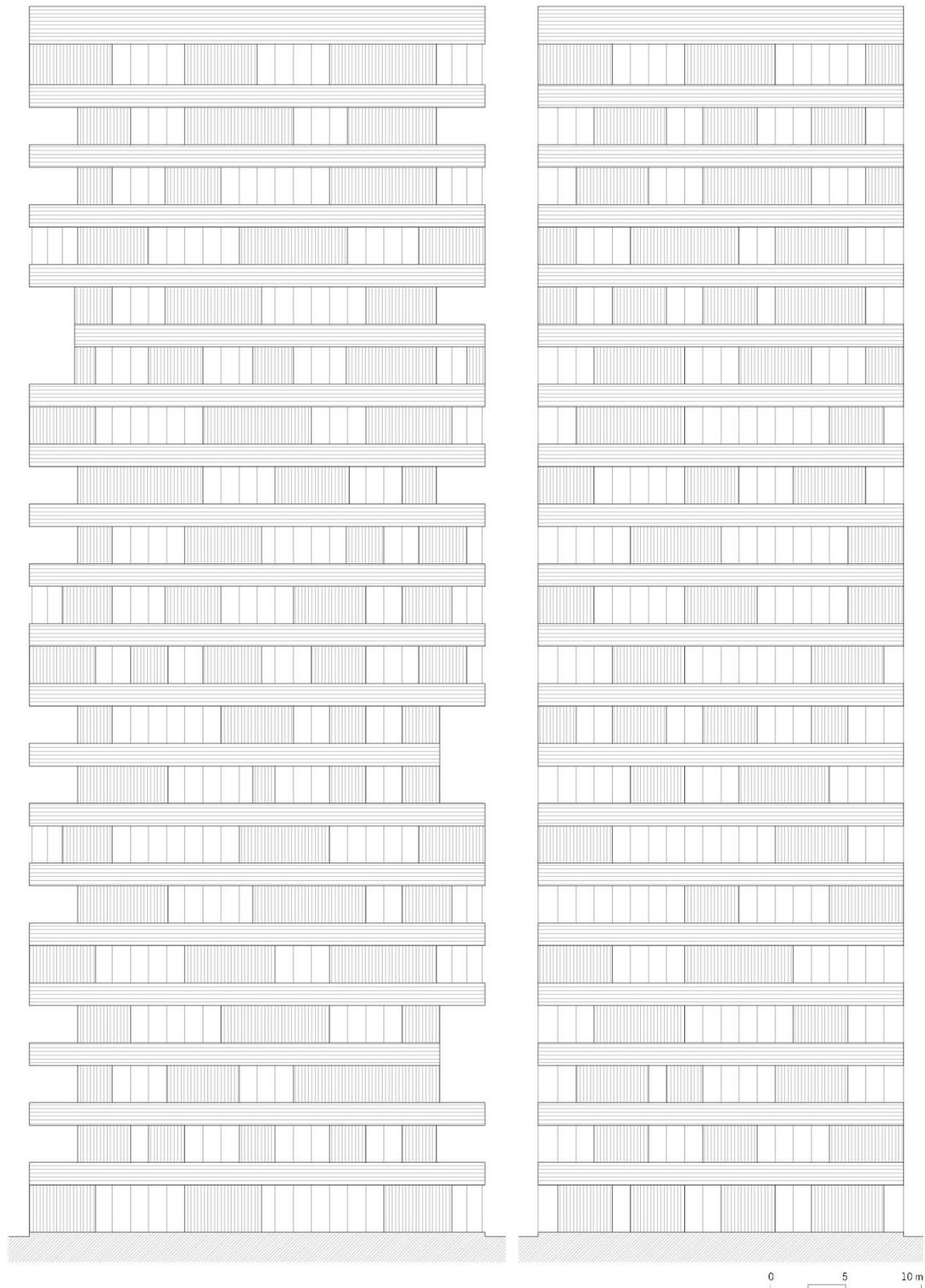


Imagem 59 – Proposta 2: Desenho do Alçado Frente (esq.) e Alçado Lateral (dir.)

- PROPOSTA 3

Para esta proposta, a solução passa por colocar as vigas perimetrais em diferentes posições nos diferentes pisos. A mobilidade deste elemento estrutural permite a desconstrução de uma imagem criada pela horizontalidade das vigas perimetrais. Para além de se moverem as vigas, nesta solução é ainda adotado um sistema de cheios e vazios que desenharam o alçado (ver imagem 60).

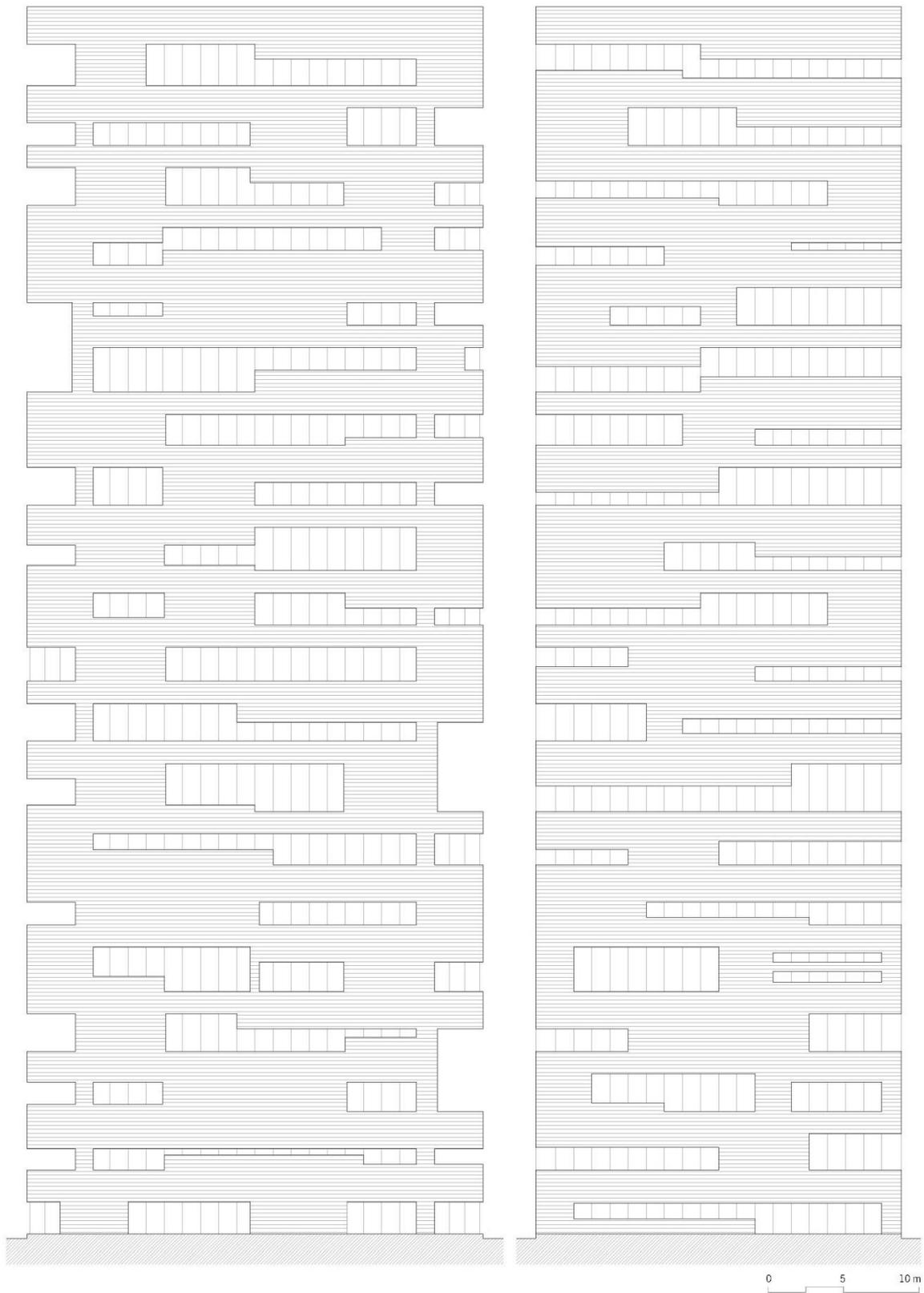


Imagem 60 – Proposta 3: Desenho do Alçado Frente (esq.) e Alçado Lateral (dir.)

No desenho do alçado apresentado na imagem 60 torna-se difícil identificar as vigas perimetrais, já que através da colocação de panos opacos e transparentes se consegue dissimular o referido elemento estrutural. No entanto ele está lá presente, e o esquema seguinte mostra exatamente isso. Ora, e tal como foi referido anteriormente, esta mobilidade está sujeita ao cumprimento de algumas regras já enunciadas. Neste esquema (imagem 61) pretende-se mostrar que se é possível integrar de forma mais ou menos simples as vigas no conjunto do alçado.

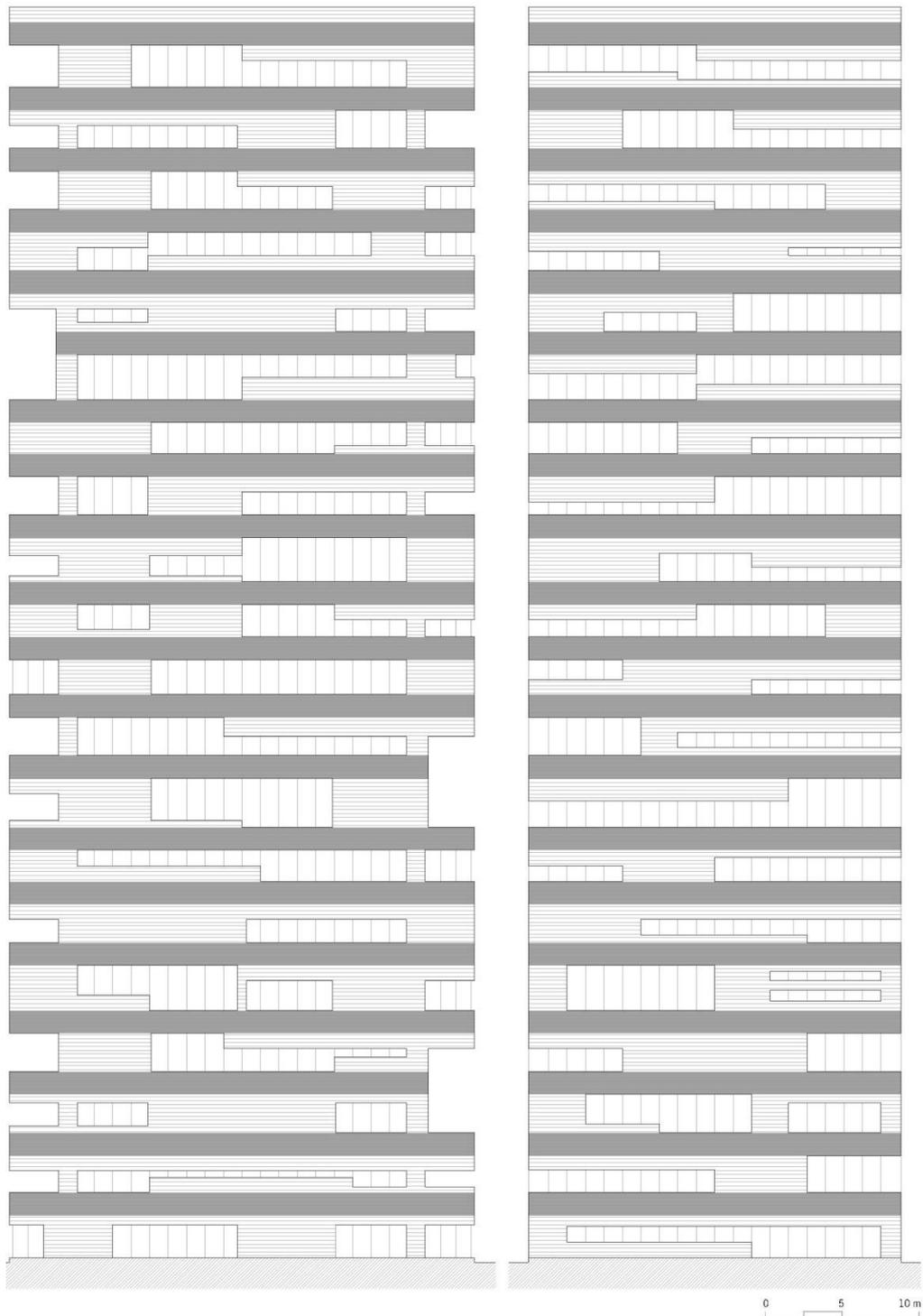


Imagem 61 - Esquema de Localização das Vigas Perimetrais no Alçado

- PROPOSTA 4

No decorrer do trabalho foram tomadas algumas decisões sobre o desenho tridimensional da torre, como a questão de fazer os recortes e respectivas varandas em apenas duas fachadas opostas (fazendo mover os pisos apenas num sentido). Contudo, e por se tratar de um sistema estrutural simétrico, esta variação de pisos pode ocorrer em ambos os sentidos (longitudinal e transversal) criando uma torre recortada em todas as faces, em que todas elas estão dotadas de avanços e recuos. A proposta 4 (imagem 62) procura mostrar isso mesmo, uma torre com uma volumetria totalmente recortada, mais versátil e com uma imagem forte e irreverente.

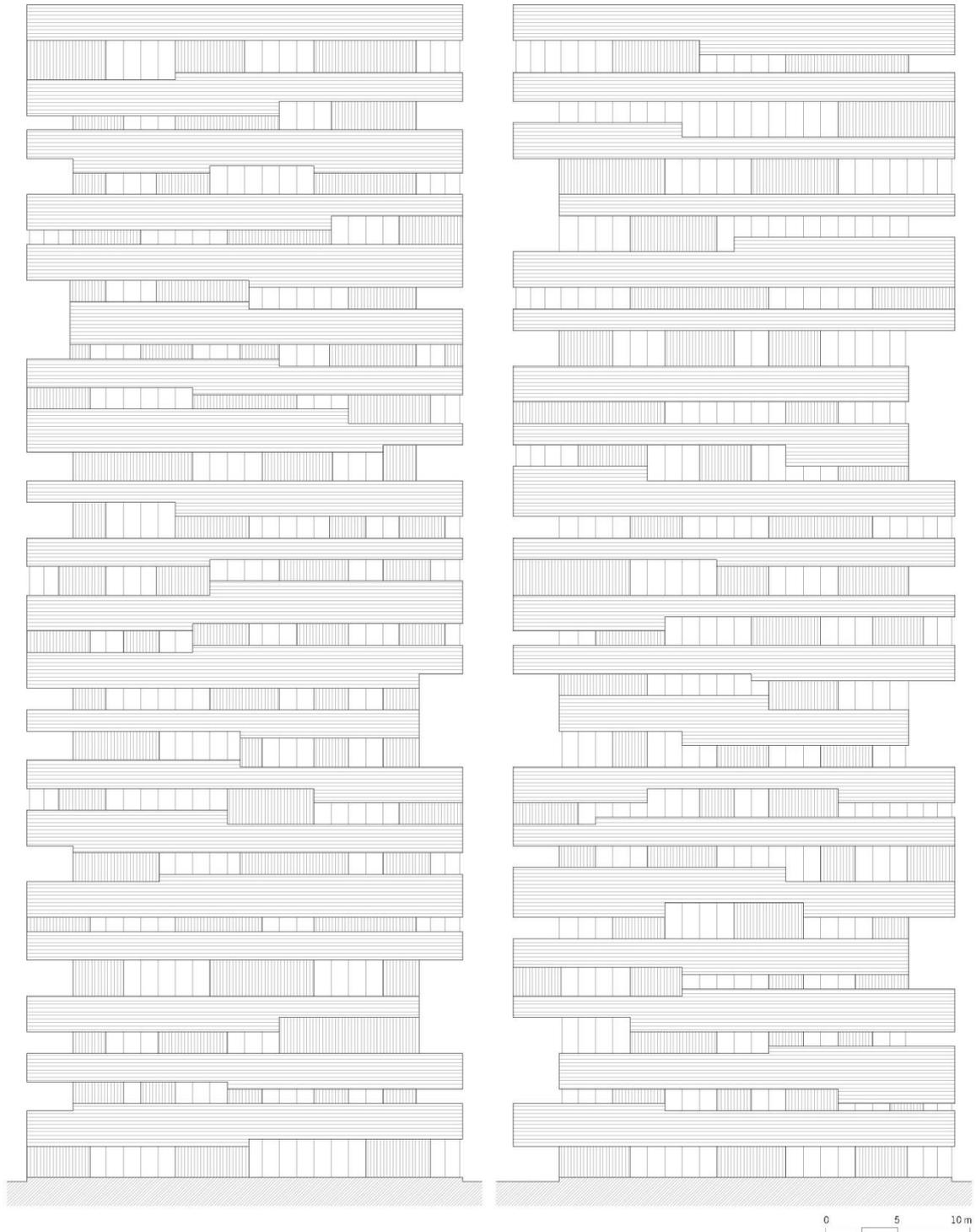


Imagem 62 – Proposta 4: Desenho do Alçado Frente (esq.) e Alçado Lateral (dir.)

Em termos de composição dos alçados, aqui é feita uma conjugação das duas propostas anteriores. Isto é, opta-se por manter as vigas em relação à laje de piso, mas opta-se por fazer uma variação no seu tamanho, somando aos 1,50 metros do elemento estrutural mais área opaca conforme pretendido. Em simultâneo recorre-se aos dois sistemas de aplicação das peças

de madeira que fazem o revestimento exterior, um na horizontal e outro na vertical, para conferir textura e diversidade à imagem final obtida.

Como resultado final, obtém-se uma torre com uma expressão forte dos elementos horizontais, que vão sendo recortados pelos vãos em função das necessidades do espaço interior, ao mesmo tempo que vão sendo fechadas áreas desses mesmos vãos com um método de aplicação distinto das vigas e que evidencia a verticalidade destes mesmos.

Através da exposição destas quatro propostas de desenho das fachadas é possível perceber as potencialidades e possibilidades que o sistema vem introduzir. Isto é, se se fizer uma análise comparativa entre os edifícios já construídos e o agora apresentado são evidentes as diferenças tanto em termos de composição de alçado como de volumetria de torre. Enquanto nas primeiras propostas o arquiteto está limitado a aberturas de reduzido tamanho e em pouca quantidade e a um desenho paralelepípedo da torre, com este novo sistema obtém maior liberdade na composição da ‘pele’ do edifício e no seu desenho tridimensional.

Relativamente ao desenho da fachada, pode afirmar-se que o sistema *UT System* impõe apenas duas barreiras ou restrições à total liberdade de composição da mesma. São elas a localização de quatro pilares contínuos de MLCC em duas das quatro fachadas do edifício e a existência das vigas perimetrais com obrigatoriamente 1,50 metros de altura em todo o contorno de cada piso. Apesar de poder parecer restritivo, as vigas perimetrais podem assumir funções importantes no conjunto da torre, podendo funcionar como guardas de varandas ou sistemas de sombreamento para além de que a sua existência pode ajudar a caracterizar o aspeto final do edifício em termos geométricos, marcando os pisos e conferindo horizontalidade.

3.7.5 Revestimento e Acabamento Exterior

O revestimento exterior é um dos principais pontos a ter em consideração quando se trabalha com estruturas em madeira lamelada colada cruzada (MLCC) uma vez que esta não pode estar exposta aos agentes presentes no meio ambiente, como a água ou a radiação solar. Assim sendo, o material utilizado como acabamento exterior é tão importante como o material utilizado para a estrutura, já que este vai funcionar como ‘pele’ que protege o ‘esqueleto’ do edifício.

Como foi referido no ponto anterior 3.3, a ideia inicial do projeto surge com imagem conseguida no decorrer do jogo infantil de peças de madeira, *Jenga*. É através da subtração de peças de madeira a uma torre compacta que se obtém uma estrutura alta cheia de recortes e vazios. Ora se conceito do edifício passa pela composição conseguida com peças paralelepípedicas de madeira, porque não tentar introduzir essa mesma imagem no aspeto exterior da torre agora concebida? Para além de esta hipótese ser facilmente exequível em termos de composição de alçado, também o é em termos da expressão do material, sendo para tal apenas necessário selecionar o material adequado em madeira, ou com acabamento final em madeira, que seja capaz de suportar as condições atmosféricas ao longo da sua vida útil e seja possível de aplicar num edifício em altura.

Atualmente, no mercado existem vários produtos que podem satisfazer as necessidades descritas no parágrafo anterior. No entanto, e para se tomar uma decisão informada, foram analisados três materiais distintos, apresentados na tabela 18 assim como as suas características.

Tabela 18 – Características dos Materiais de Revestimento Exterior

	Utilização		Garantia de Durabilidade	Espessuras	Dimensões	Densidade	Condutividade Térmica	Preço €/m ²
	Ext.	Int.						
HPL Painéis Fenólicos	x	x	10 anos	4 a 20 mm	1300 x 3050 mm 1300 x 2800 mm	1440 kg/m ³		14,30
Aglomerado Melamínico	x	x		6, 8, 10, 13, 16, 18, 19, 22, 25, 28 e 30 mm	2800 x 2070 mm	1000 kg/m ³	0,18	68,26
Madeira Termo Tratada	x	x	30 anos	até 420 mm	21 x 118 mm 21 x 142 mm	350 - 480 kg/m ³	Pinho=0,099	34,00

Para a referida análise selecionaram-se três materiais distintos em termos de composição mas semelhantes em termos de acabamento final. O primeiro, HPL Painéis Fenólicos (*high pressure laminates*) é um material composto por lâminas de papel Kraft que foram impregnadas em resinas fenólicas, e cujo fabrico é feito por termo-endurecimento. Desta forma é possível obter um painel compacto, plano e homogéneo, de grande durabilidade e adequado para inúmeras aplicações. A sua composição pode ainda ser reforçada com fibras de madeira o que permite obter painéis com superfícies coloridas [56]. Por sua vez, o Aglomerado Melamínico é um material composto à base de madeira natural, proveniente de florestas certificadas e de gestão sustentada, o que confere às placas grande resistência e durabilidade. Tal como no primeiro caso, também deste material são comercializadas diversas referências que possibilitam diferentes tipos de acabamento, desde a mudança da cor ou brilho até ao tipo de textura pretendida [57]. E por último, a Madeira Termo Tratada resulta de um processo de modificação molecular da madeira, efetuado com vapor de água e alta temperatura, com total ausência de produtos químicos. Graças a este tipo de tratamento, a madeira adquire uma grande estabilidade dimensional e uma resistência aos efeitos do clima superior à da madeira não tratada, não se degradando na presença de água e resistindo aos ataques de insetos e à podridão [58].

Tendo em consideração o parágrafo anterior, e pela análise da tabela percebe-se que, e em função daquilo que se pretende, o material que mais se adequa à aplicação na fachada do edifício é a Madeira Termo Tratada (ver imagem 63), já que é o que apresenta maior garantia de durabilidade com reduzida manutenção, para além de que apresenta um acabamento e textura final semelhante ao da própria madeira maciça e capaz de responder às exigências do desenho do alçado. Em termos comparativos, o HPL Painéis Fenólicos apresenta-se como sendo o mais económico mas em contrapartida tem um reduzido tempo de duração, e o Aglomerado

⁵⁶ Fonte: http://www.jular.pt/conteudos.php?lang=pt&id_menu=287 (acedido a 2/10/14).

⁵⁷ Fonte: http://www.jular.pt/conteudos.php?lang=pt&id_menu=18 (acedido a 2/10/14).

⁵⁸ Fonte: http://www.jular.pt/conteudos.php?lang=pt&id_menu=286 (acedido a 2/10/14).

Melamínico é o mais dispendioso mas do qual não se conhece a sua garantia de durabilidade. Considerando todos os dados, a madeira termo tratada é aquela que melhor cumpre os requisitos enunciados anteriormente.



Imagem 63 – Aspetto da Madeira Termo Tratada e Caso de Prático de Aplicação ⁵⁹

Para além da escolha do material de acabamento exterior, é importante conhecer as diversas possibilidades que existem no mercado para o isolamento do edifício. Por se ter optado por uma fachada revestida com placas de Madeira Termo Tratada, o sistema de aplicação do revestimento deve ser do tipo Fachada Ventilada, de forma a garantir a sua estabilidade e função. A fachada ventilada (imagem 64) consiste na aplicação do revestimento deslocado da parede principal, com a intenção de deixar circular o ar entre estes dois elementos.

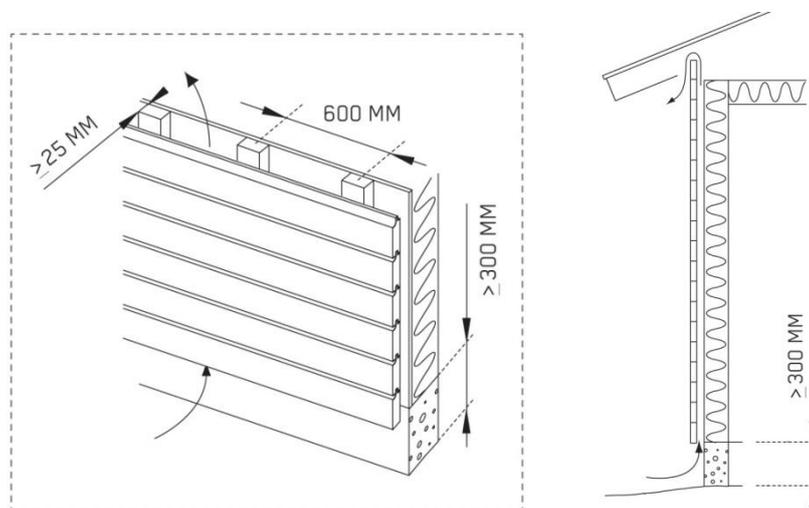


Imagem 64 – Esquema de Montagem da Madeira Tratada em Sistema de Fachada Ventilada ⁶⁰

Relativamente aos isolamento térmico a aplicar no edifício, as soluções disponibilizadas atualmente são muitas e a escolha de um material em concreto deve ser uma opção ponderada e tendo por base o conhecimento das características específicas de cada um deles. Na tabela 19,

⁵⁹ Fonte Imagem da Esquerda: http://www.jular.pt/conteudos.php?lang=pt&id_menu=286 (acedido a 2/10/14);

Fonte Imagem da Direita: <http://www.carpintariavenezolana.com/carpv/pt/produutos/decks.html> (acedido a 2/10/14).

⁶⁰ Fonte: http://www.lunawood.fi/files/2013/6792/8493/Lunawood_-_Facade_Installation.pdf (acedido a 2/10/14).

são apresentadas as características técnicas dos materiais mais utilizados em Portugal e também de dois materiais menos conhecidos mas que vale a pena analisar.

Tabela 19 – Características Técnicas dos Materiais de Isolamento Térmico

	Espessuras (mm)	Densidade (kg/m³)	Condutividade Térmica	Resistência à difusão do vapor de água (μ)	Preço €/m²
XPS	30 a 80	30	0,034 - 0,036	80 - 180	4,72
EPS	30 a 80	10 - 30	0,038 - 0,039	30 - 70	4,68
Aglomerado Negro de Cortiça	10 - 15 - 20 - 25 - 30 - 40 - 50 - 60 - 80 - 100 - 150 - 200 - 300	105 - 130	0,037 - 0,04	7 a 14	11,89
Lã Mineral Natural	25 - 30 - 45 - 60	150 - 175	0,037	1	3,61
Steico Flex	20 a 60 - 80 - 100 - 120 - 140 - 160 - 180 - 200 - 220 - 240	50	0,038	1/2	16,42
Steico Protect	40 - 60 - 80	265	0,048	5	28,18

Analisando a tabela apresentada percebe-se que há essencialmente uma grande variação de preços no que diz respeito aos diferentes materiais e não tanto uma significativa diferença em termos de capacidade de resposta. Isto é, se compararmos os valores da condutividade térmica percebe-se que todos eles são muito semelhantes o que significa que todos eles cumprem com as objetivos pretendidos e para o qual foram escolhidos. Sabe-se ainda que hoje em dia a questão da sustentabilidade dos materiais é cada vez mais importante na construção civil e a tendência passa por se utilizarem materiais renováveis e provenientes de fontes naturais. Assim sendo, e tendo em conta os materiais naturais presentes na tabela, são eles o aglomerado negro de cortiça, a lã mineral, e os produtos da *Steico* [61], pretende-se selecionar o mais que se adequa ao projeto que está a ser levado a cabo. Ora se por questões económicas evidentes se põe de parte os produtos à base de fibras de madeira da *Steico*, também é natural que se dê primazia aos produtos portugueses, como a cortiça. Portugal é um país reconhecido internacionalmente pela qualidade da sua cortiça e respetivos derivados, por isso faz sentido que seja esta a opção pretendida.

Considerando as razões apontadas anteriormente, percebe-se que a seleção do material de isolamento acaba por ser uma questão mais pessoal e relacionada com a localização do edifício do que uma questão de competências funcionais do próprio material. Contudo importa referir que todos os materiais analisados são soluções possíveis de serem utilizadas num sistema de fachada ventilada para um edifício em altura.

⁶¹ 'STEICO NATURAL BUILDING PRODUCTS' é uma marca de produtos para isolamento térmico à base de fibras de madeira. Disponível em <http://www.steico.co.uk/>

3.7.6 Compartimentação do Espaço Interior

Da análise aos edifícios construídos percebe-se que um dos maiores problemas da utilização da MLCC na construção em altura está relacionado com a compartimentação excessiva do espaço interior. Assim, é através da elaboração do projeto de um edifício em altura que se pretende mostrar se o *UT System* é ou não capaz de dar resposta a este problema. Tal como referido em pontos anteriores, este sistema distingue-se dos demais no tipo de elementos estruturais a que recorre, já que ao invés de utilizar paredes resistentes, é constituído por um sistema de pilares de MLCC e MLC e de vigas em MLC. Só por ser permitida esta mudança, a questão da compartimentação já vê alguns avanços.

Na imagem 65 apresenta-se a planta de um piso tipo do edifício proposto nesta dissertação, e aqui estão representados todos os elementos estruturais contínuos necessários para a configuração da estrutura da torre.

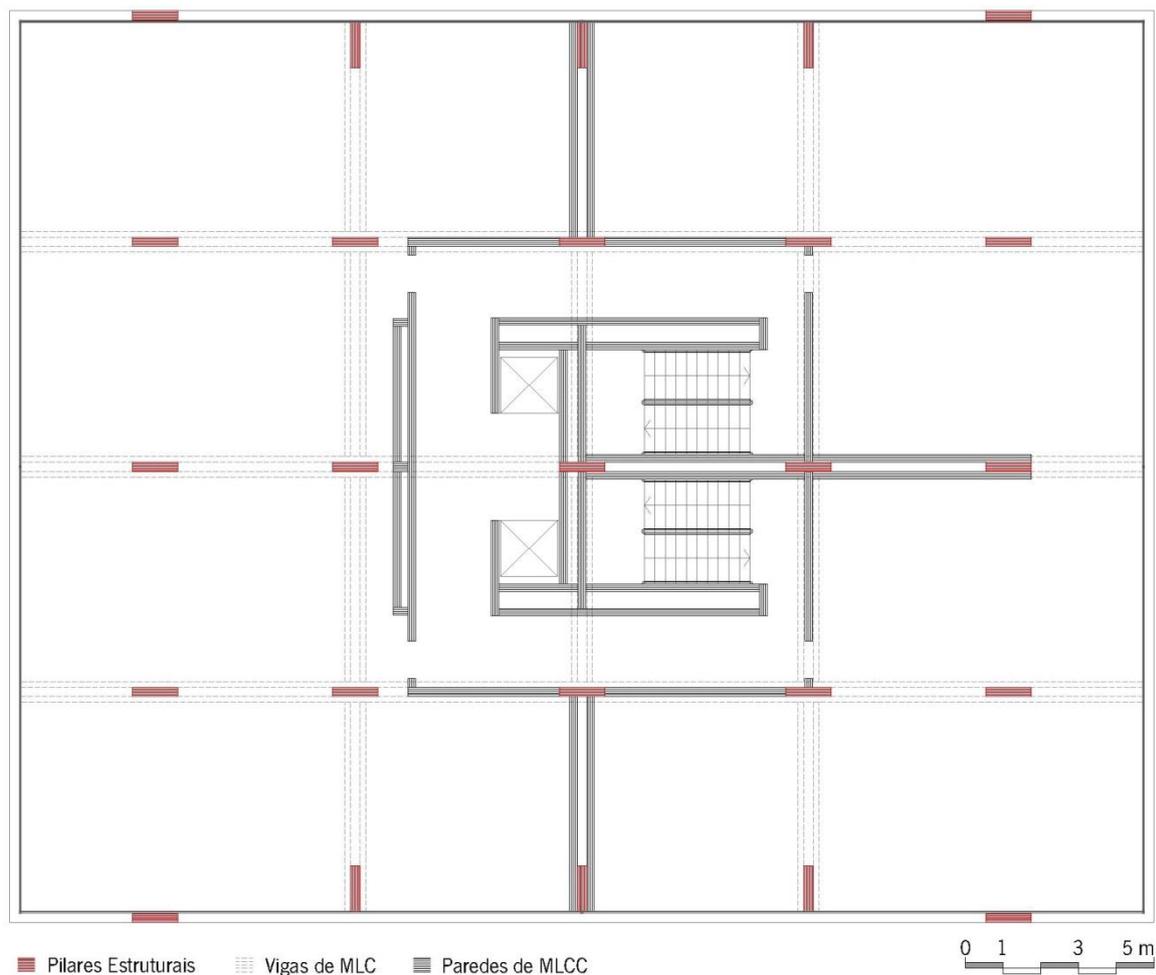


Imagem 65 – Planta de um Piso-Tipo do Edifício Proposto

Se se fizer uma comparação entre o espaço interior conseguido com o *UT System* e o desenhado para um edifício com a construção celular (imagem 66) percebem-se as mudanças. Através do sistema viga e pilar é possível desenhar um espaço mais amplo e com um número reduzido de paredes contínuas resistentes, o que dá maior liberdade ao arquiteto no momento de compartimentar os pisos.

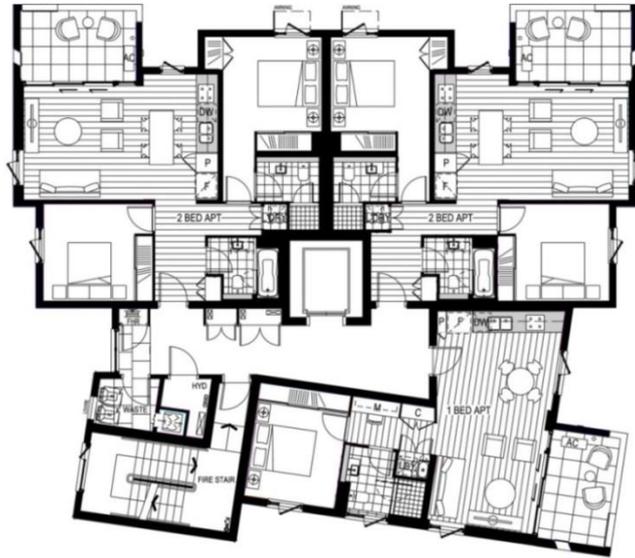


Imagem 66 – Planta de Piso do *Forté*, Melbourne – Austrália (2012) ⁶²

De igual forma, se se fizer uma comparação entre a planta de piso conseguida com o *UT System* (imagem 65) e a planta proposta por Michael Green com o *FFTT System* para um edifício de 20 andares (imagem 67), consegue-se compreender a inovação que o sistema experimentalizado introduz à problemática.

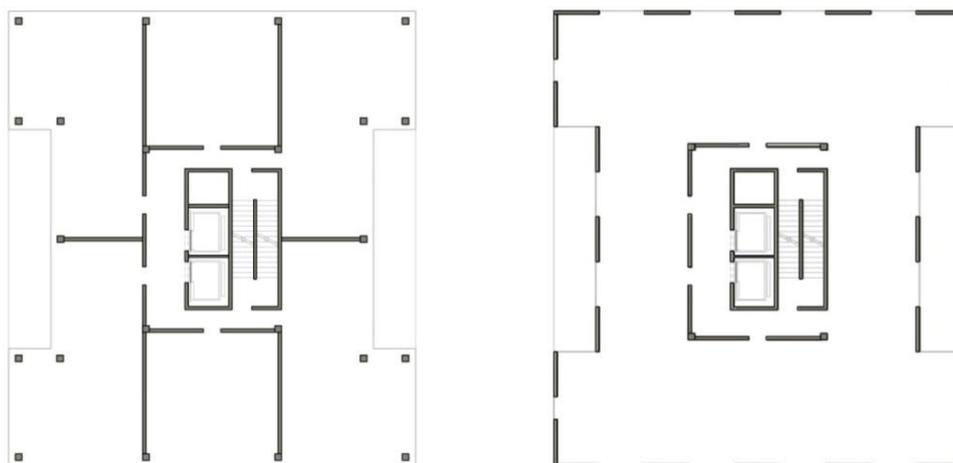


Imagem 67 – *FFTT System*: Proposta 1 e 2 para um Edifício de 20 Andares ⁶³

⁶² Fonte: <http://www.architectureanddesign.com.au/awards/2014-awards-finalists/multi-density-residential/forte-by-lend-lease> (acedido a 9/10/14).

⁶³ Fonte: GREEN, Michael; KARSH, J. Eric, *Tall Wood - The case of Tall Wood Buildings: How Mass Timber offers a safe, economical, and environmentally friendly alternative for Tall Building Structures*, British Columbia, 2012.

Nas propostas apresentadas por Michael Green percebe-se que há sempre um comprometimento ou da liberdade do espaço interior ou do desenho da fachada. Porque se na proposta 1 (imagem 67 à esquerda) se consegue uma fachada totalmente aberta, perde-se a amplitude do espaço através da colocação das seis paredes resistentes, e, pelo contrário, se na proposta 2 (imagem 67 à direita) se consegue a total abertura do espaço interior sem haver necessidade de colocar elementos estruturais, há uma perda significativa no desenho do alçado que fica limitado à posição dos elementos resistentes contínuos. No edifício proposto consegue-se criar um diálogo entre estas duas peças fundamentais, o alçado e o espaço interior, tentando dar respostas às questões levantadas ao longo da revisão bibliográfica, sem contudo marginalizar a composição de um deles apenas.

Uma outra particularidade que esta solução confere ao tema prende-se com a possibilidade de utilizar uma menor quantidade de painéis de MLCC, isto é, ao reduzir o número de elementos resistentes necessários, todas as paredes que fazem a compartimentação do espaço interior podem ser concretizadas com um material mais económico e que requeira mão-de-obra não tão especializada. Na planta de piso apresentada na imagem 68, todas as paredes representadas a azul podem ser construídas com um sistema leve do tipo gesso cartonado, por exemplo, ou outro semelhante, não tendo, por razões estruturais, que ser também elas construídas com recurso à MLCC. Este pormenor permite, para além de reduzir o custo da obra, uma maior polivalência e facilidade na montagem e desmontagem das paredes divisórias, facilitando a adaptação aos diferentes tipos de usos e necessidades ao longo do tempo.



Imagem 68 – Representação das Paredes Divisórias

Diretamente relacionada com a questão da compartimentação do espaço interior está o problema do uso e da função atribuída a este tipo de edifícios. Ao longo da análise efetuada, ficou claro que os edifícios construídos apenas funcionam como habitação, e tal acontece porque o sistema de construção celular, adotado para a maior parte, deles implica um grande número de paredes resistentes. Dada esta necessidade estrutural, a opção tomada pela equipa de projeto passa sempre por atribuir ao edifício a função residencial, já que esta consegue suportar o elevado número de paredes divisórias existentes.

A experimentação deste sistema construtivo tem como um dos objetivos principais exatamente perceber se esta questão da função pode ou não ser contornada com a utilização do *Urban Timber System*. Tal como foi referido anteriormente, a diferença deste sistema está no tipo de elementos resistentes a que recorre, pilares e vigas. Com esta alteração estrutural é mais simples dar resposta a este problema e atribuir outro tipo de usos ao espaço interior.

O edifício proposto visa mostrar um sistema construtivo e as suas variadas potencialidades quando utilizado para construir edifícios altos. Por isso mesmo, não foi selecionada para a proposta uma função específica para todos os pisos, antes pelo contrário, pareceu importante mostrar as diferentes soluções que este consegue assumir. Assim, e para haver um termo comparativo com o já construído, apresenta-se uma proposta de desenho para uma utilização do

tipo residencial e, com a objetivo de evidenciar a versatilidade do sistema, é elaborada também uma solução de planta mais livre, aqui designada como assumindo a função de escritórios.

A imagem 69 mostra uma adaptação do espaço e dos elementos estruturais existentes à utilização do tipo residencial.



Imagem 69 – Planta Tipo para Utilização Residencial

Aqui é clara a organização da área interior em função daquilo que são as necessidades de uma habitação, criando as divisões necessárias à sua boa utilização. Para uma maior harmonia de desenho, opta-se por utilizar os pilares contínuos de MLC como elementos chave na divisão e compartimentação do espaço. No entanto, este tipo de organização é apenas uma das muitas possibilidades que o sistema disponibiliza, já que a posição dos pilares permite essa mesma liberdade de desenho.

A vantagem deste sistema em termos de adaptação aos diferentes usos prende-se exatamente com a possibilidade de as paredes divisórias se poderem organizar em função da vontade de cada um, o limite é dado pela criatividade do arquiteto. Se se fizer uma comparação muito breve com a planta do *Stadthaus* de Londres (imagem 70), percebe-se o passo em frente

que este sistema estrutural dá ao permitir desenhar apenas as paredes desejadas para conformar o espaço.



Imagem 70 – Planta de Piso do Stadthaus, Londres ⁶⁴

No que diz respeito à utilização do espaço como habitação, o sistema *UT System* possibilita uma maior versatilidade no desenho e na compartimentação da área interior. Contudo, é com a proposta para a utilização do espaço como escritórios que o sistema estrutural mostra como é inovador. Esta proposta de utilização tem sido designada por ‘Escritórios’, mas não significa que o espaço tenha que ser efetivamente utilizado para esse fim. A determinação serve apenas para identificar um uso que não sendo residencial, também não é de comércio, mas é de uso mais público que o primeiro.

Na imagem 71 apresenta-se a proposta de compartimentação para esse uso mais público, que pode funcionar como escritórios de facto, ou outro, como incubadora de empresas, tão utilizado nestes últimos anos. Se assim for, cada ‘empresa’ ocupa uma das áreas individuais disponíveis, e usufrui de um bloco de instalações sanitárias comuns a cada piso. Relativamente aos compartimentos criados, estes apresentam diferentes áreas, uma vez que nem todos precisam da mesma dimensão. Uma empresa pode precisar de metade do piso enquanto outra necessita apenas de um quarto, por exemplo. Outro aspeto importante neste tipo de uso passa

⁶⁴ Fonte: Adaptada de <http://albertanorweg.blogspot.pt/2009/07/stadthaus-24-murray-grove-waugh.html> (acedido a 9/10/14).

pela possibilidade de o espaço poder ser dividido em função daquilo que são as necessidades reais de cada utilizador, mesmo dentro das próprias ‘células’ de trabalho. Podem existir ‘células’ que funcionam em ‘*open space*’ e outras em que é necessário dividir o espaço em compartimentos mais reduzidos. Por questões funcionais, cada uma destas células dispõe de uma pequena copa localizada junto à zona de passagem das infraestruturas de abastecimento.

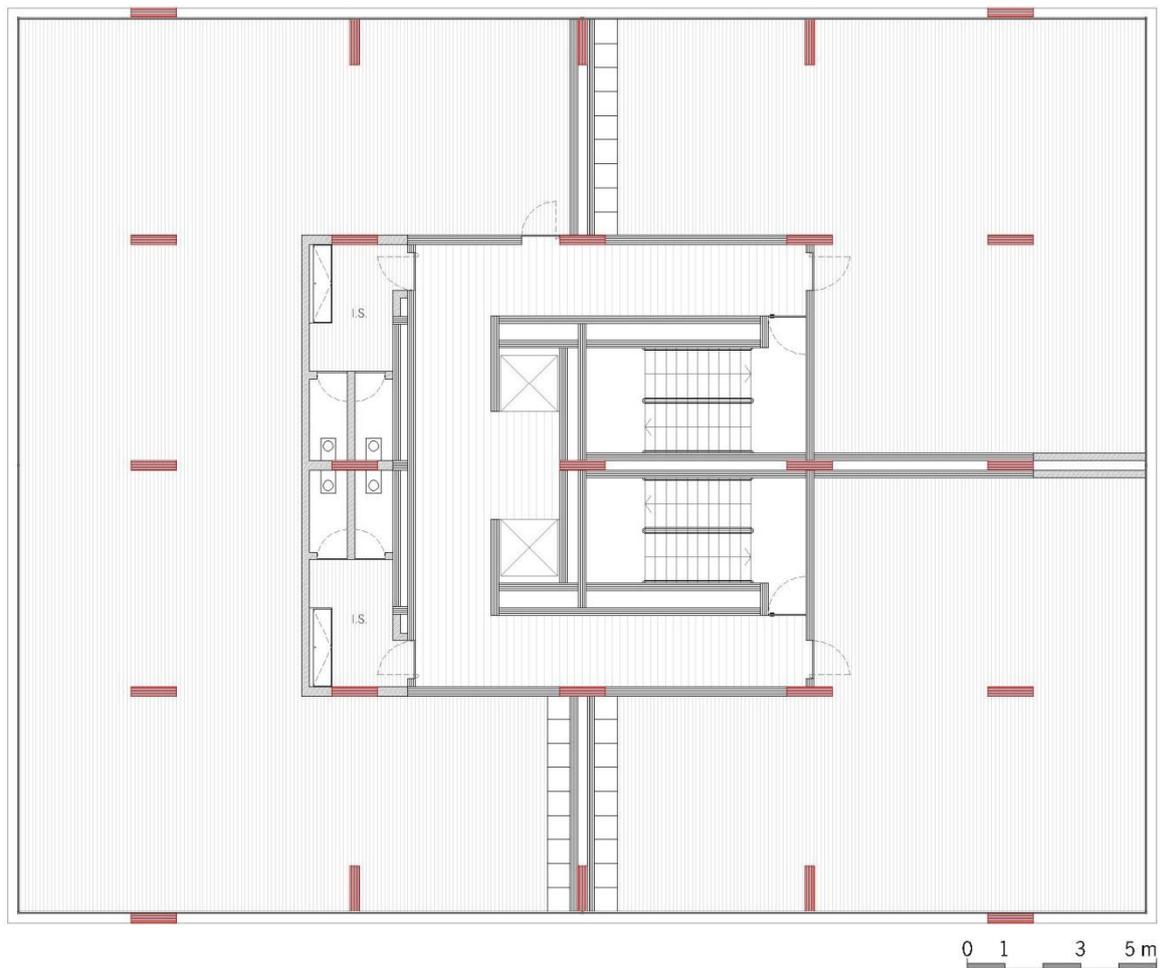


Imagem 71 – Planta Tipo para Utilização do Tipo Escritórios

É esta versatilidade na conceção do espaço interior demonstrada nos pontos anteriores que possibilita uma maior adaptação aos diferentes usos que o edifício pode adotar (ver imagens 72 e 73). Em suma, fica claro que o número de paredes estruturais não implica o tipo de utilização que se pretende dar ao piso ou ao edifício, como acontece nos demais construídos, assim como não interfere no facto de o edifício poder assumir diferentes usos mesmo em diferentes andares. Isto é, com recurso a este sistema construtivo o edifício pode assumir uma utilização mista, no qual existem pisos destinados à habitação ao mesmo tempo que outros estão preparados para um uso de trabalho como os escritórios mencionados anteriormente.



Imagem 72 – Representação do Espaço Interior destinado à Habitação



Imagem 73 – Representação do Espaço Interior destinado a Escritórios

Analisada a questão da compartimentação e da função atribuída ao piso, a proposta para o edifício apresentada acrescenta outra particularidade ao sistema arquitetónico em comparação com os edifícios já construídos. Isto é, propõe-se agora deixar à vista o sistema estrutural, nomeadamente os pilares contínuos, e assim tirar partido das potencialidades visuais da madeira no espaço interior. Para tal, no edifício proposto existem paredes que assumem o aspeto da madeira no seu estado natural. Esta opção permite conferir ao espaço interior diferentes características visuais e táteis como também ajuda a definir diferentes áreas e usos numa mesma divisão. A imagem 74 mostra uma das diferentes possibilidades de organização e de acabamento de um apartamento - tipo do edifício proposto.



Imagem 74 – Representação Tridimensional de Apartamento Tipo

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No princípio do presente trabalho, as inquietações sobre a possibilidade de se poder utilizar a madeira em edifícios altos eram muitas e eram ainda mais as dúvidas sobre a viabilidade de tal solução estrutural. Apesar de não existir muita informação de base desenvolvida, muito por se tratar de uma problemática recente, o tema desencadeou desde logo curiosidade e vontade de experimentar, testar e verificar se é ou não exequível. No seguimento da vontade de investigar e de conhecer mais sobre o tema foram criados objetivos e metas a alcançar. Considerou-se desde logo uma mais-valia a investigação que à data decorria na Escola de Engenharia da Universidade do Minho (EEUM) porque, para além de ter sido um apoio ao longo do trabalho, funcionou também uma fonte de informação segura sobre o tema. Feita a revisão bibliográfica e conhecidos os projetos desenvolvidos noutros países, passou-se à fase principal desta investigação – testar e experimentar um sistema estrutural novo desenvolvido na EEUM, o *Urban Timber System*.

O *UT System* inova em relação aos restantes sistemas já desenvolvidos no facto de recorrer apenas à utilização da madeira como material estrutural e de utilizar um sistema de viga – pilar até então não utilizado nas construções em altura com MLCC. Assim, e depois de se conhecer o sistema proposto é feita uma experimentação, aplicando a um caso prático, a fim de perceber as suas potencialidades. No seguimento daquilo que foi o teste ao sistema estrutural quando aplicado a um edifício com uma volumetria recortada e com uma cêrcea de aproximadamente 80 metros percebeu-se que, de facto, é possível conceber uma torre de 20 pisos utilizando apenas madeira.

Com a elaboração do projeto e respetiva análise estrutural concluiu-se que a utilização do *UT System* é viável, no entanto, a problemática não acaba aqui. É possível de facto conceber uma torre em madeira, contudo importa compreender a sua aplicabilidade ao território português, país onde o preconceito de construir com madeira é ainda muito grande. Atualmente a sociedade portuguesa tem vindo a mudar, contudo é ainda muito comum associar-se à madeira a grande propensão aos incêndios, apresentando fraca resistência ao fogo e de baixo valor estrutural.

Em Portugal não há o hábito de se construir com madeira, nem mesmo pequenos edifícios unifamiliares, já que está enraizada na cultura e na sociedade a ideia da construção de casas mais ‘seguras’ e mais ‘resistentes’ capazes de durar ‘uma vida inteira’. Associado a estes termos vem por norma o betão armado e o tijolo cerâmico. Contudo, pode afirmar-se que a madeira é igualmente capaz de dar resposta a estas necessidades, por haver já provas dadas do material. Quando se fala em construir em madeira, há ainda, e quase de imediato, um questionamento por parte do construtor ou do cliente, mas quando se propõe construir em altura recorrendo a este material, por norma a resposta é negativa. É, portanto, importante dar a conhecer as potencialidades deste material e as vantagens que a sua utilização acarreta, nomeadamente a sustentabilidade que o acompanha, sendo fundamental informar os engenheiros e os construtores desta nova forma de construir.

Com a presente investigação consegue-se mostrar que a utilização dos compostos de madeira (MLCC, MLC) na construção em altura tem de facto muitas vantagens. Para além da questão da sustentabilidade referida acima, o tempo de construção e a quantidade de trabalhadores envolvidos são aspetos importantes e a ter em consideração. Isto é, se se comparar o estaleiro de obra, o número de trabalhadores e o tempo necessário para se construir um edifício

com 20 andares em betão armado, por exemplo, com a proposta apresentada percebe-se que esta forma de construir deveria ser alterada. No entanto, não se pretende com a investigação afirmar que todos os edifícios devem, de agora em diante, ser construídos em madeira, até porque tal afirmação não é realista. É antes objetivo da investigação mostrar e dar a conhecer uma nova forma de construir, que está agora a dar os primeiros passos na Europa.

No entender do autor, em Portugal a implementação de um sistema construtivo baseado apenas em madeira está ainda longe de acontecer, pelas razões apresentadas acima. Contudo, com este trabalho procurou-se também contribuir com uma nova abordagem à utilização da Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) para a problemática que tem vindo a ser estudada fora do país. Ao questionar os métodos utilizados na construção de edifícios altos em MLCC até então, propondo novas soluções e formas de aplicação do material está a contribuir-se com conhecimento para um assunto em crescimento.

A solução adotada para o edifício proposto mostra que é possível construir edifícios mais altos sem recorrer a materiais alternativos como o betão armado ou aço, proposto por Michael Green por exemplo, e sem ser necessário recorrer a um grande número de paredes resistentes. Esta é uma das questões que mais complicava o trabalho do arquiteto, já que estava limitado ao desenho denso do sistema estrutural. Com esta investigação dá-se mais um passo no sentido de contrariar este problema, já que o sistema analisado dá uma liberdade extra ao arquiteto no momento da conceção do projeto, tanto para o desenho do espaço interior como da própria fachada do edifício. A somar a esta liberdade de desenho, a amplitude interior conseguida introduz uma mais-valia à utilização da MLCC na construção, já que possibilita a adaptação do espaço a diferentes usos que não o residencial.

Apesar de se dar a conhecer uma nova aplicação do material ao sistema estrutural de um edifício alto, e mesmo este apresentando diversas vantagens, há que salientar que o custo associado a uma obra deste tipo ainda é um aspeto negativo. De acordo com a bibliografia analisada, a construção com MLCC é ainda cerca de 5 % mais cara que o sistema tradicional em betão armado. Tal acontece porque para além de a madeira ser um material mais dispendioso, é necessário fazer todo o transporte do material do país de fabricação até ao local de obra, com recurso a camiões de grande dimensão, para além de que é necessário que exista mão-de-obra especializada capaz de ‘montar’ o edifício de acordo com o projeto de execução do mesmo. Contudo, e considerando todas as vantagens e mais-valias apresentadas ao longo da dissertação, no entender do autor, este valor não é de todo significativo. É necessário entender o sistema como um todo e não apenas considerando a questão monetária.

De acordo com o que foi referido acima, se ao desconhecimento, às questões culturais e às exigências em obra do sistema, se somar a referida questão monetária, percebe-se que é difícil implementar a construção em madeira em Portugal. Contudo, se se considerarem as cada vez maiores preocupações com o meio ambiente, principalmente das gerações mais novas, bem como a busca e o interesse por novas soluções e métodos construtivos, crê-se que daqui a alguns anos seja possível construir um edifício com as características do projeto proposto em Portugal.

Estas questões apresentadas nos parágrafos anteriores devem ser esclarecidas através da passagem do conhecimento e do desenvolvimento de trabalhos que mostrem a potencialidade e a versatilidade da utilização da madeira na construção a fim de um maior desenvolvimento da problemática. Tal como referido, as preocupações com o meio ambiente e com a sustentabilidade são cada vez mais importantes e significativas no momento da escolha dos materiais que

compõem um edifício. É aqui que a madeira dá mostras das suas vantagens em detrimento das soluções tradicionais. Um exemplo das referidas mais-valias é o desempenho energético que um edifício construído com MLCC assume, comparativamente com as soluções habituais. Hoje em dia, as preocupações com a qualidade do ar interior, a poupança de energia e o desempenho do edifício fazem parte do desenho de projeto desde a fase inicial. Procuram-se produzir edifícios mais ecológicos, capazes de garantir o conforto interior sem haver necessidade de recorrer a mecanismos auxiliares de climatização. Assim, pretende-se agora expor as capacidades térmicas do material aqui investigado a fim de dar a conhecer outra vantagem da sua utilização.

No que diz respeito ao desempenho energético do edifício, e dada a baixa condutibilidade térmica da madeira ($\lambda=0,13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$), o sistema proposto em MLCC proporciona a conceção de paredes mais esbeltas que a construção tradicional em alvenaria. Uma solução de paredes exteriores com isolamento contínuo pelo exterior do tipo ETICS e com acabamento pelo interior em gesso cartonado, por exemplo, assume um coeficiente de transmissão térmica (U) de $0,38 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, conseguido com uma espessura total de parede de aproximadamente 0,17 metros [65]. Esta particularidade permite obter os valores necessários de isolamento térmico sem que para tal seja necessária uma grande secção de parede. A somar a esta vantagem, a massa volúmica da madeira proporciona algum atraso térmico, isto é, o intervalo de tempo que ocorre entre a ocorrência de temperaturas elevadas na face exterior da parede e a transmissão dessa temperatura para o interior. Esta particularidade é significativa, principalmente nos meses de Verão, pois permite manter o interior do edifício com uma temperatura inferior durante um maior período de tempo.

Em termos energéticos, e considerando o parágrafo anterior, pode afirmar-se que a madeira apresenta vantagens quando comparada com as soluções tradicionais em aço ou betão armado. E se às características próprias da madeira se somar os devidos materiais de isolamento térmico, pode afirmar-se que é possível alcançar o conforto térmico interior necessário à utilização do espaço.

De acordo com a presente investigação é realista pensar que a utilização da madeira na construção tem possibilidades de crescer e de vir a estabelecer-se nas cidades europeias. Contudo há ainda um ponto que deve ser esclarecido, já que é um dos aspetos mais apontados quando se refere a utilização deste material no sector da construção.

A construção em madeira diz-se sustentável. Então e a quantidade de árvores que têm que ser abatidas para se construir um edifício de 20 andares? Isso não é de todo sustentável.

A resposta a este argumento é simples, mas é importante que também ela seja transmitida e dada a conhecer para que estes mitos sejam esclarecidos. A utilização da madeira para a construção não pode, nem deve, ser entendida como apenas o momento do corte de árvores. No entanto, pode desde logo esclarecer-se que a madeira utilizada para os painéis estruturais de MLCC é proveniente de florestas com certificação de gestão florestal sustentável e de cadeia de responsabilidade. Esta certificação estabelece que a produção e o corte da área florestal são controlados, assegurando a proteção da biodiversidade e das áreas com importância ambiental e cultural, e garantindo sempre um rácio positivo entre o número de árvores cortadas e o número de árvores plantadas.

⁶⁵ Fonte: JORGE, Luís, *Edifícios construídos com painéis de madeira lamelada colada-cruzada (X-Lam)*, Seminário Casas de Madeira, Castelo Branco, 2013.

Esclarecido o problema do abate de árvores, é necessário evidenciar outras vantagens que a utilização da madeira acarreta. Nomeadamente a capacidade de mitigar o aumento das emissões de gases com efeito de estufa em todo o ciclo de vida do edifício, desde o corte na floresta, à transformação do material, ao seu uso em obra, a manutenção e ao destino em fim de vida. Tal só é possível porque as construções em madeira aumentam o sequestro de carbono, e vêm substituir outros materiais mais poluentes como o aço, o betão ou a alvenaria e estimulam o plantio de árvores e o aumento significativo da área florestal. A somar a estes pontos surge ainda a questão da eficiência energética referida anteriormente.

Para além dos aspetos apresentados acima, outra particularidade que permite afirmar que a construção em madeira é de facto sustentável, está relacionada com o aproveitamento do material chegado o fim de vida útil do edifício. Nesta altura, os painéis podem ser retirados e reutilizados em outra estrutura, sem que se tenham perdido quaisquer capacidades físicas e mecânicas do painel. No entanto, se tal não for possível estes podem ser enviados para valorização energética da madeira ou reciclados, contribuindo para a produção de painéis de aglomerado de madeira. De acordo com a bibliografia analisada, nenhum dos componentes utilizados na construção, como colas ou produtos de preservação da madeira impedem a sua reutilização ou outro destino no final de vida do edifício [66].

Em suma, e considerando toda a informação enunciada acima, pode afirmar-se que a construção em madeira não se apresenta de todo como um problema para o meio ambiente. Pelo contrário, a sua implementação permite uma melhor gestão dos recursos naturais, promovendo a produção de árvores e o aumento de área florestal e reduzindo de forma significativa a utilização de materiais mais poluentes como é o caso do aço e do betão armado, utilizados frequentemente.

Conhecidas todas as vantagens do material e após terem sido dadas mostras da sua potencialidade e aplicabilidade à construção, pode concluir-se que a ambição de construir edifícios altos com madeira está mais perto de se realizar do que se seria de esperar, aos olhos da sociedade portuguesa. Contudo não se pretende com a elaboração da investigação impor uma nova forma de construir nem em Portugal. Pretende-se acima de tudo dar a conhecer o material e as suas possibilidades na área da construção, ao mesmo tempo que se pretende desmistificar algumas ideias e preconceitos criados na sociedade atual no que à madeira diz respeito.

Tal como referido acima, com a elaboração deste trabalho pretende-se contribuir com um novo conhecimento para a problemática e dar mais um passo em frente no sentido do desenvolvimento da mesma.

⁶⁶ Fonte: <http://www.madeiraurbana.com/index.php> (acedido a 26/10/14).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SILVA, C., BRANCO, J.M. e LOURENÇO, P.B. *A project contribution to the development of sustainable multistory timber buildings*. 2012.
- SILVA, C., BRANCO, J.M. e LOURENÇO, P.B.. *MLCC na construção em altura*. Congresso Construção 2012 – 4º Congresso Nacional. Coimbra. 2012.
- SILVA, Catarina. *Tall buildings using CLT - An integrated design considering moisture induced effects, PhD Thesis Plan*. Universidade do Minho. Guimarães. 2012.
- LOURENÇO, Paulo B., BRANCO, J.M., CRUZ, Helena e NUNES, Lina., *Casas de Madeira: Edifícios construídos com painéis de madeira lamelada-colada cruzada*. Seminário LNEC. Lisboa 2013.
- COSTA, Ana Alexandra P. da. *Construção de Edifícios com Cross Laminated Timber (CLT)*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Construções Civas. FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Julho de 2013.
- GREEN, Michael e KARSH, J. Eric. *Tall Wood - The case of Tall Wood Buildings: How Mass Timber offers a safe, economical, and environmentally friendly alternative for Tall Building Structures*. British Columbia. 2012.
- GRAÇA, João Mariz e GONÇALVES, Hélder. *Conceitos Bioclimáticos para os edifícios em Portugal*. DGGE/IP-3E. Lisboa. Novembro de 2004.
- RINGHOFER, Andreas e SCHICKHOFER, Gerhard. *Multi-storey residential buildings in CLT – Interdisciplinary principals of designs and construction*. WCTE 2014 – World Conference on Timber Engineering. Quebec City – Canadá. Agosto 2014.
- RINGHOFER, Andreas e SCHICKHOFER, Gerhard. *Timber in Town – Current examples for residential buildings in CLT and tasks for the future*. Graz University of Technology. Austria, 2013.
- FRANGI, A., Fontana, M. e Knobloch, M. “*Fire Design Concepts for Tall Timber Buildings*”. Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering. Vol. 18 (2). pp.148-155. 2008.
- FPIInnovations. *CLT Handbook - Cross-Laminated Timber*. Canada: Sylvain Gagnon and Ciprian Pirvu. 2011.
- National Research Council Canada. *Full-scale Fire Resistance Tests on Cross-laminated Timber*. Volume 17, Number 4. NRC Publications. Dezembro de 2012.
- DAGENAIS, Christian, WHITE, Robert H. e SUMATHIPALA, Kuma. *CLT Handbook – USA Edition, Chapter 8 – Fire Performance of Cross-laminated Timber Assemblies*. pp. 285. FPIInnovations. 2013.
- Portaria nº 1532/2008 de 29 de Dezembro. Diário da República nº 250 – 1ª série. Ministério da Administração Interna, Lisboa.
- Portaria nº 96/2008 de 9 de Junho. Diário da República nº 110 – 1ª série. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Lisboa.

- Hu, Lin, Adams, David L. *CLT Handbook – USA Edition, Chapter 9 – Sound Insulation of Cross-laminated Timber Assemblies*. FPIInnovations. 2013.
- GAGNON, Sylvian. *CLT – acoustic performance*. FPIInnovations. Vancouver. Fevereiro de 2011.
Disponível em: <http://wecbc.smallboxcms.com/database/rte/files/CLT-Acoustic%20Performance.pdf> (acedido a 26/10/14).
- CECCOTTI, Ario, SANDHAAS, Carmen e YASUMURA, Motoi. *Seismic Behaviour of Multistory Cross-laminated Timber Buildings*: Proceedings of the International Convention of Society of Wood Science and Technology and United Nations Economic Commission for Europe – Timber Committee. Genebra – Suíça. Outubro de 2010.
- DEBARATHY, Luke. *Review of Seismic Performance of Cross Laminated Timber (CLT) as a new Archetype per FEMA p625*. Disponível em:
[http://public.wsu.edu/~ldebarathy/Review%20of%20Cross%20Laminated%20Timber%20\(CLT\)%20as%20a%20New%20Archetype%20per%20FEMA%20p695.pdf](http://public.wsu.edu/~ldebarathy/Review%20of%20Cross%20Laminated%20Timber%20(CLT)%20as%20a%20New%20Archetype%20per%20FEMA%20p695.pdf) (acedido a 26/10/14).
- JORGE, Luis. *Edifícios construídos com painéis de madeira lamelada colada-cruzada (X-Lam)*. Seminário Casas de Madeira. Castelo Branco. 2013.

SÍTIOS DA INTERNET

<http://www.tisem.pt/> (acedido a 2/1/14)

<http://www.ecofriend.com/graphite-apartments-provide-fillip-wood-as-construction-material.html>
(acedido a 2/1/14)

<http://www.masstimber.com/node/1829/download/76393eed759604f207b484a42ac954cf>
(acedido a 3/1/14)

http://www.seattle.gov/dpd/cms/groups/pan/@pan/documents/web_informational/dpds021903.pdf (acedido a 3/1/14)

<https://lh4.googleusercontent.com/-XTqTTnPWUM8/TYPdDYrTKLI/AAAAAAAAAVg/n0W6oBHjD-k/s1600/CLT+-+ecobuild.co.uk.jpg> (acedido a 4/1/14)

<http://www.klhelement.com/en/produit> (acedido a 4/1/14)

<http://www.clt.info/es/produkt/bauen-mit-massivholz/> (acedido a 5/1/14)

<http://www.binderholz.com/en/products/cross-laminated-timber-bbs.html> (acedido a 5/1/14)

<http://www.waughthistleton.com/project.php?name=murray> (acedido a 5/1/14)

<http://www.lunawood.fi/en/brochures-and-guides/> (acedido a 10/7/14)

http://issuu.com/banema/docs/lunawood_brochure_eng_2012 (acedido a 10/7/14)

<http://www.timber-building.com/features/a-new-wood-architecture/> (acedido a 20/8/14)

<http://www.sotecnisol.pt/revestimentos/fachadas-ventiladas/> (acedido a 27/8/14)

<http://www.steico.com/en/products/wood-fibre-insulation/steicoflex/characteristics.html>
(acedido a 27/8/14)

<http://dataholz.com/en/index.html> (acedido a 10/9/14)

<http://pt.archready.com/articles/articleDEtail/arranha-ceus-em-madeira> (acedido a 2/10/14)

<http://www.archdaily.com.br/br/623862/por-que-edificios-de-madeira-estao-em-ascensao-uma-entrevista-com-a-especialista-em-estruturas-de-madeira-da-perkins-mais-will> (acedido a 2/10/14)

<http://www.publico.pt/local-lisboa/jornal/siza-vieira-propoe-torres-mutantes-para-alcantara-207134> (acedido a 7/10/14)

<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/ci-ic/article/v17n4-4> (acedido a 7/10/14)

<http://www.rethinkwood.com/masstimber/mass-timber-and-fire-performance> (acedido a 20/10/14)

<http://www.structuremag.org/?p=1129> (acedido a 20/10/14)

<http://pt.fsc.org/a-importancia-do-fsc.300.htm> (acedido a 26/10/14)

<http://www.madeiraurbana.com/index.php> (acedido a 26/10/14)

<http://www.swst.org/meetings/AM10/ppts/Ceccotti.pdf> (acedido a 26/10/14)

http://www.ivalsa.cnr.it/sofie.html?tx_wfqbe_pi1%5BPERSONA%5D= (acedido a 26/10/14)

ANEXOS

ANEXO 1 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLCC 320 mm – Planta de Piso Tipo 1
ANEXO 2 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLCC 320 mm – Planta de Piso Tipo 2
ANEXO 3 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLCC 320 mm – Planta de Piso Tipo 3
ANEXO 4 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLCC 320 mm – Planta de Piso Tipo 4
ANEXO 5 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLCC 320 mm – Planta de Piso Tipo 5
ANEXO 6 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLCC 320 mm – Planta de Piso Tipo 6
ANEXO 7 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLCC 1000 mm – Planta de Piso Tipo 1
ANEXO 8 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLCC 1000 mm – Planta de Piso Tipo 2
ANEXO 9 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLCC 1000 mm – Planta de Piso Tipo 3
ANEXO 10 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLCC 1000 mm – Planta de Piso Tipo 4
ANEXO 11 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLCC 1000 mm – Planta de Piso Tipo 5
ANEXO 12 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLCC 1000 mm – Planta de Piso Tipo 6
ANEXO 13 – Pré-dimensionamento da Estrutura | Solução Estrutural MLCC Painel Simples
ANEXO 14 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLCC 2 x 240 mm – Planta de Piso Tipo 1
ANEXO 15 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLCC 2 x 240 mm – Planta de Piso Tipo 2
ANEXO 16 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLCC 2 x 240 mm – Planta de Piso Tipo 3
ANEXO 17 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLCC 2 x 240 mm – Planta de Piso Tipo 4
ANEXO 18 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLCC 2 x 240 mm – Planta de Piso Tipo 5
ANEXO 19 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLCC 2 x 240 mm – Planta de Piso Tipo 6
ANEXO 20 – Pré-dimensionamento da Estrutura | Solução Estrutural MLCC Painel Duplo
ANEXO 21 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLC 250 mm – Planta de Piso Tipo 1
ANEXO 22 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLC 250 mm – Planta de Piso Tipo 2
ANEXO 23 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLC 250 mm – Planta de Piso Tipo 3
ANEXO 24 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLC 250 mm – Planta de Piso Tipo 4
ANEXO 25 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLC 250 mm – Planta de Piso Tipo 5
ANEXO 26 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLC 250 mm – Planta de Piso Tipo 6
ANEXO 27 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLC 250 mm – Corte Transversal AA'
ANEXO 28 – Peças Desenhadas | Solução Estrutural MLC 250 mm – Corte Longitudinal BB'
ANEXO 29 – Pré-dimensionamento da Estrutura | Solução Estrutural MLC
ANEXO 30 – Pormenores Construtivos | Ligação Piso de Cobertura – Viga Perimetral
ANEXO 31 – Pormenores Construtivos | Solução para Paredes Exterior

ANEXO 32 – Pormenores Construtivos | Ligação Pavimento Interior – Viga Perimetral

ANEXO 33 – Pormenores Construtivos | Solução para Piso Térreo

ANEXO 34 – Pormenores Construtivos | Solução para Paredes Interiores

ANEXO 35 – Peças Desenhadas | Uso como Habitação – Planta de Piso Tipo 1

ANEXO 36 – Peças Desenhadas | Uso como Habitação – Planta de Piso Tipo 2

ANEXO 37 – Peças Desenhadas | Uso como Habitação – Planta de Piso Tipo 3

ANEXO 38 – Peças Desenhadas | Uso como Habitação – Planta de Piso Tipo 4

ANEXO 39 – Peças Desenhadas | Uso como Habitação – Planta de Piso Tipo 5

ANEXO 40 – Peças Desenhadas | Uso como Habitação – Planta de Piso Tipo 6

ANEXO 41 – Peças Desenhadas | Uso como Escritório – Planta de Piso Tipo 1

ANEXO 42 – Peças Desenhadas | Uso como Escritório – Planta de Piso Tipo 2

ANEXO 43 – Peças Desenhadas | Uso como Escritório – Planta de Piso Tipo 3

ANEXO 44 – Peças Desenhadas | Uso como Escritório – Planta de Piso Tipo 4

ANEXO 45 – Peças Desenhadas | Uso como Escritório – Planta de Piso Tipo 5

ANEXO 46 – Peças Desenhadas | Uso como Escritório – Planta de Piso Tipo 6