

MESTRADO INTEGRADO
ARQUITETURA

Matéria e Sustentabilidade na Arquitetura Contemporânea: o betão e a madeira.

Matheus Pirola Aliseda

M
2023



Matheus Pirola Aliseda. Matéria e Sustentabilidade na
Arquitetura Contemporânea: o betão e a madeira.



M.FAUP 2023

Matéria e Sustentabilidade na Arquitetura
Contemporânea: o betão e a madeira.

Matheus Pirola Aliseda

FACULDADE DE ARQUITETURA



MATÉRIA E SUSTENTABILIDADE NA ARQUITETURA CONTEMPORÂNEA:

O BETÃO E A MADEIRA

MATHEUS PIROLA ALISEDA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA À FACULDADE DE
ARQUITETURA DA UNIVERSIDADE DO PORTO**

ORIENTAÇÃO

PROFESSOR DOUTOR ELISEU MANUEL VIEIRA GONÇALVES

PORTO 2022/2023

Agradecimentos

O percurso que agora culmina na conclusão deste trabalho não seria possível sem o suporte sólido e inabalável da minha família que, mesmo distante se fez tão perto, que mesmo separada continuou, e continuará, inteira.

À minha mãe, pelo amor incondicional e pela ternura avassaladora.

Ao meu pai, pelo modelo de justiça e caráter.

À minha irmã, minha primeira e melhor amiga.

Às famílias que aqui encontrei, Porto, Braga, Lisboa e Cabo Verde, tão importantes quanto aquela que no Brasil deixei e, assim como a primeira, levarei comigo sempre.

Ao meu orientador, Professor Doutor Eliseu Gonçalves, pela paciência inesgotável, pelo conhecimento transmitido e pelo papel fundamental na minha formação académica.

Resumo

O panorama ambiental atual não é de todo encorajador. O agravamento do aquecimento global tem relação direta com o ritmo de produção acelerado e com os sistemas industriais. A Revolução Industrial, e com ela a hiper-artificialização dos materiais de construção, originou simultaneamente o produto sintético e a demanda, dentre os quais podemos citar o aço, o betão e os polímeros. Este novo cenário e as novas diretrizes socioculturais rapidamente assimilaram os novos bens de consumo e colaboraram para o afastamento entre os materiais e o processo criativo.

Apontam-se neste trabalho alguns conceitos como o regionalismo crítico, design sustentável, estereotomia e a tectónica na tentativa de fornecer uma nova perspetiva sobre os materiais naturais e, a partir deles, mitigar os impactos ambientais da construção. Isto, porém, compreendendo que dentro do panorama atual, materiais como o betão são de extrema importância para a manutenção da maioria dos sistemas que mantêm a nossa sociedade em funcionamento. Considera-se, portanto, a necessidade de explorar alternativas que reúnam qualidades propícias para que materiais como o betão armado continuem a fazer parte da dialética construtiva atual sem romper com a proposta da sustentabilidade.

Em contrapartida, a madeira sempre foi um material construtivo de excelência, apesar de ser prescindida por materiais mais “tecnológicos”, o seu desempenho ecológico, seu pertencimento à tradição edificatória e a sua versatilidade reforçam o seu valor atualmente. Este valor apreende-se através da sobrevida conquistada por este material a partir de tecnologias que permitiram elevar as suas propriedades para outro patamar.

O presente trabalho propõe-se a explorar um sistema de análise conhecido como avaliação do ciclo de vida para compreender os parâmetros da sustentabilidade nos edifícios e alguns aspetos da ecologia do betão e da madeira. Contando com projetos desenvolvidos em Portugal, procura-se demonstrar as potencialidades estéticas, construtivas e ambientais destes dois materiais sob a ótica nacional.

Abstract

The current environmental scenario is not at all encouraging. The worsening of global warming is directly related to the accelerated pace of production and industrial systems. The Industrial Revolution, and with it the hyper-artificialization of construction materials, simultaneously originated the synthetic product and demand, among which we can mention steel, concrete and polymers. This new landscape and the new socio-cultural guidelines quickly assimilated the new consumer goods and contributed to the gap between materials and the creative process.

This work points out some concepts such as critical regionalism, sustainable design, stereotomy and tectonics in an attempt to provide a new perspective on natural materials and, from them, mitigate the environmental impacts of construction. This, however, understanding that within the current scenario, materials such as concrete are extremely important for the maintenance of most of the systems that keep our society running. It is considered, therefore, the need to explore alternatives that gather favorable qualities so that materials such as reinforced concrete continue to be part of the current constructive dialectic without breaking with the proposal of sustainability.

On the other hand, wood has always been a constructive material of excellence, despite being displaced by more “technological” materials, its ecological performance, its belonging to the building tradition and its versatility reinforce its value today. This value is apprehended through the reinvention conquered by this material from technologies that allowed to raise its properties to another level.

The present work proposes to explore an analysis system known as life cycle assessment to understand the parameters of sustainability in buildings and some aspects of the ecology of concrete and wood. Relying on projects developed in Portugal, the aim is to demonstrate the aesthetic, constructive and environmental potential of these two materials from a national perspective.

Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida

CIB - *Conseil International du Bâtiment*

CLT - *Cross-laminated timber* ou madeira lamelada cruzada

CSA - *Canadian Standard Association*

EPA - *United States Environmenal Protection Agency*

GEE - Grupo dos gases de efeito de estufa

GLULAM - *Glued Laminated timber*

ISO - *International Organization for Standardization*

ITeCONS - Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção

LCA - *Life-cycle assessment*

LCI - *Life-cycle inventory analysis*

LCIA - *Life cycle impact assessment*

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MARS-SC - Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas

MLC - Madeira lamelada colada

OSB – *Oriented Strand Board*

PAG - Potencial de aquecimento global

PEC - Energia primária incorporada

PWGSC - Departamento de Obras Públicas e Serviços Governamentais Canadence

RCD - Resíduos de construção e demolição

Índice

Introdução	11
1. Materiais e sustentabilidade	15
1.1. Contestação ideológica: apelo à arquitetura sensorial	15
1.2. Desenvolvimento da construção sustentável	27
1.3. Nascer e renascer, uma nova perspetiva sobre o ciclo de vida	37
2. O Betão e a Madeira	49
2.1. Contexto histórico	49
2.2. Tecnologias atuais do betão	59
2.3. Tecnologias atuais da madeira	69
3. Casos de estudo	77
3.1 Terminal de Cruzeiros de Lisboa	77
3.2. Escola Redbridge	84
Considerações finais	92
Bibliografia	94

Introdução

O presente trabalho, pretende abordar os aspetos físicos, económicos e ambientais do betão e da madeira na arquitetura contemporânea em Portugal. As inquietações que atuaram como força motriz deste trabalho consolidaram-se no terceiro ano do MIARQ. Ainda que a consciência dos desafios da preservação ambiental e do desenvolvimento sustentável me acompanhassem muito antes deste período, o conhecimento, para refletir sobre possíveis soluções, foi consolidado a partir da introdução do estudo dos materiais de construção na atividade de projeto.

O pensamento arquitetónico aborda, entre outros temas, a materialização dos espaços, pois, é consensual que a arquitetura tem como uma das suas finalidades mais importantes o abrigo. A matéria em arquitetura está intimamente ligada aos materiais que conformam estes abrigos que acolhem e influenciam as atividades humanas. Esta influência manifesta-se através de estímulos sensoriais quando estes espaços são inundados pela luz e revelam cores, formas, sombras, texturas e temperatura. Para além de trazer expressão aos espaços, os materiais de construção condicionam formas, determinam técnicas construtivas e têm parte importante nos custos financeiros e ambientais do edificado.

A contemporaneidade, para além de colocar em causa as relações interpessoais e os espaços onde se desenvolvem, também tem sido marcada pelas problemáticas acerca do meio ambiente, da economia e do desenvolvimento sustentável. Nos últimos 30 anos a preocupação com os recursos naturais e com o clima tem aumentado devido à conscientização dos efeitos das atividades humanas. Sobre o equilíbrio do meio ambiente podemos nomear algumas destas inquietações a começar pela diminuição da reserva de combustíveis fósseis, aumento do uso de energia elétrica na maioria dos setores industriais e, principalmente, pelo parque edificado residencial, a produção exacerbada de bens de consumo e de materiais para a construção civil, crescente dependência de materiais não renováveis, o aumento da emissão de gases de efeito de estufa, e muitas outras questões que, apesar de importantes, não são pertinentes para a discussão pretendida. No âmbito do setor da construção civil, podemos citar, também, a “hiper-artificialização” dos materiais de construção e os efeitos que esta exerce sobre a viabilidade técnica e económica da reciclagem ou reutilização dos mesmos.

Assim, o objetivo geral deste trabalho é melhor compreender os impactos económicos e ambientais que uma intervenção arquitetónica pode gerar, assim como explorar algumas ferramentas capazes de minimizar estes impactos. Partindo do pressuposto que a génese da elaboração de uma resposta adequada esteja latente nos materiais de construção. Parte importante desta investigação será a análise das novas tecnologias do betão armado e da madeira industrializada, a partir da qual pretende-se estabelecer uma comparação do ponto de vista da sustentabilidade. Este confronto entre a madeira e o betão, referidos, respetivamente, como o material mais ecológico e o mais utilizado em escala global, trará valor à discussão em torno de uma arquitetura mais consciente e sustentável.

A metodologia utilizada para fundamentar a discussão está apoiada na observação das práticas de construção recorrentes, em literaturas que contemplam a vertente histórica e as tecnologias atuais e, por fim, na análise dos casos de estudo. A observação de casos práticos nacionais pretende identificar as formas arquitetónicas e os materiais de construção correntes na arquitetura portuguesa, a bibliografia apresenta-se como a principal ferramenta para a elaboração de ideias em relação aos materiais de construção e temáticas adjacentes; por fim, os casos de estudo ajudam a exemplificar e sustentar a vertente teórica a partir de exemplos construídos. Acredita-se que a ferramenta de investigação life-cycle assessment (LCA), ou avaliação do ciclo de vida, poderá contribuir para a identificação das fraquezas e potencialidades dos materiais de construção. Esta ferramenta metodológica destina-se ao rastreio das emissões de carbono, consumo de matérias-primas e gasto energético inerente aos componentes construtivos. O domínio das informações sobre a pegada ecológica dos materiais é determinante na busca por uma construção sustentável em arquitetura.

Para cumprir com esta proposta, o desenvolvimento dos assuntos propostos por este trabalho apoia-se, dentre outras, na seguinte bibliografia: Os livros *Materials and the environment*¹ e *Ecology of building material*² abordam o ciclo de vida dos materiais, as dinâmicas da industrialização da produção e questões sobre a sustentabilidade dos materiais. Os livros *História crítica da arquitetura moderna*³ e *A matéria da invenção*⁴ acrescentam uma perspectiva sobre a relação entre a materialidade, a cultura e espacialidade.

1 ASHBY, M. F. - *Materials and the Enviroment: Eco-Informed Material Choice*.

2 BERGE, B. - *Ecology of Building Materials*.

3 FRAMPTON, K. - *História crítica da arquitetura moderna*.

4 MANZINI, E. - *A matéria da invenção*.

No presente trabalho, os temas relativos à arquitetura, matéria e contemporaneidade são desenvolvidos em uma lógica narrativa tripartida. A primeira parte destina-se a uma reflexão sobre a transformação da matéria ao longo do percurso histórico com foco na perspectiva dos materiais de construção e da sua sustentabilidade. Procura-se, também, introduzir a noção de arquitetura sensorial e esclarecer o conceito de desenvolvimento sustentável, uma vez que os sentidos remetem à escolha e aplicação dos materiais e a sustentabilidade, ainda mais no cenário atual, é uma consideração imprescindível dentro da edificação. Este primeiro momento encerra-se com uma abordagem sobre a ferramenta de avaliação do ciclo de vida (LCA), sua definição, critérios e aplicações.

A segunda parte tem como foco justificar a escolha do betão e da madeira como peças centrais deste estudo. Para além disso, é apresentada a breve história destes materiais e algumas das suas novas tecnologias com potencial para estabelecer paradigmas mais sustentáveis na edificação em Portugal.

Na terceira parte é feita uma análise segundo as reflexões desenvolvidas no decorrer do trabalho, o qual é encerrado com as considerações finais.

1. Materiais e sustentabilidade

1.1. Contestação ideológica: apelo à arquitetura sensorial

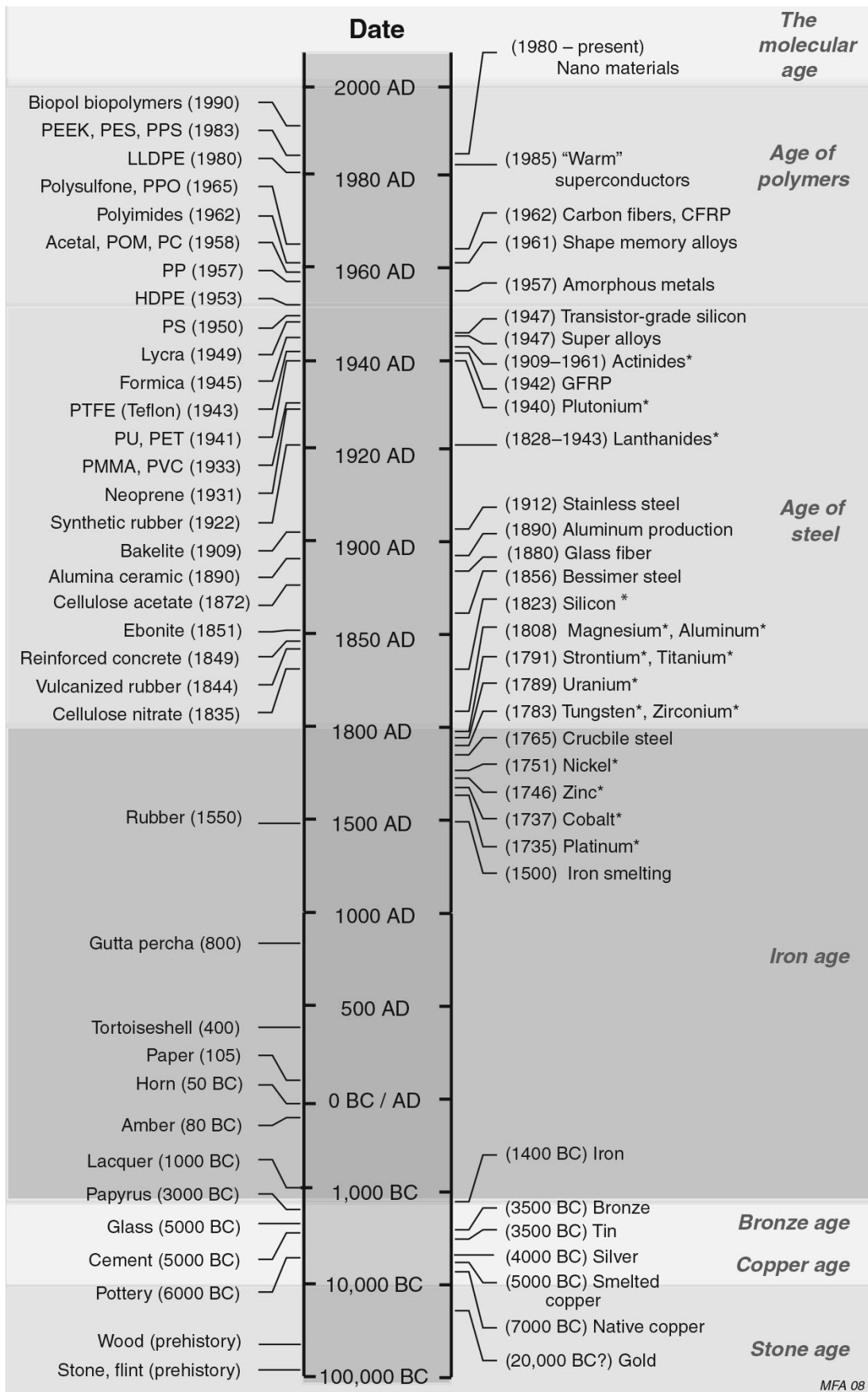
As ideologias que permeiam os movimentos arquitetônicos são tão relevantes para a composição de um espaço quanto os materiais que o compõem. Quando estas ideias conduzem ao distanciamento dos sentidos e, por consequência, da manifestação de cores, texturas e temperaturas, a valorização dos materiais de construção pode oferecer uma contraproposta à esta realidade a partir da exploração de materiais naturais.

Neste capítulo pretende-se explorar o embate entre as ideologias que levaram ao surgimento do movimento moderno e do regionalismo crítico proposto pelo autor Kenneth Frampton (1930-), uma vez que esta crítica se desenvolve por meio de uma releitura dos materiais e tradições autóctones a partir das tecnologias construtivas modernas. A valorização dos materiais locais, maioritariamente com baixa energia incorporada, aplicados segundo técnicas atualizadas pode ter uma repercussão positiva no que tange à crescente dependência por materiais não renováveis das últimas décadas e em relação a sustentabilidade dos edifícios.

Para cumprir este propósito abordam-se alguns aspetos da Revolução Industrial e das suas conquistas no que se refere ao domínio dos processos industriais e científicos, contrapondo-se a experiência empírica e tátil que dominava os métodos de transformação da matéria antes do século XVIII. Posteriormente, esclarecem-se alguns pontos sobre os ideais embebidos na modernidade, em especial, o seu embate com a essência cultural no processo de globalização. Processo que coloca em causa tanto as formas arquitetônicas como os materiais enraizados na tradição.

Para além dos ganhos ecológicos e do contraponto a este movimento globalizante, Frampton propõe o conceito de regionalismo crítico como um caminho para a preservação identitária. A proposta consolida-se através da arquitetura sensorial e da recuperação da idiossincrasia dos materiais de construção, consequentemente introduz outro ponto de vista no desenho dos espaços e na maneira como são experienciados.

Analogamente, a elaboração da nossa forma de ver, pensar e interagir com o mundo resultou do desenvolvimento de estruturas socioculturais baseadas na tecnologia, sobretudo na capacidade de transformação e aplicação destes processos tecnológicos. O anseio pela manipulação da matéria e pela organização dos espaços é um impulso nato dos seres humanos, principalmente quando se encontram em sociedade. Por esta e outras razões, os materiais têm tanta impor-



tância para o nosso desenvolvimento, ao passo que dividimos a história humana em intervalos de tempo e lhes atribuímos o nome do material com maior relevância durante aquele período.

A Revolução Industrial foi o momento mais significativo na história das ciências construtivas, no qual a capacidade de mecanizar grande parte da produção dos materiais foi conquistada. Este acontecimento não significou apenas um salto em relação à manipulação dos materiais existentes, como também, abriu caminho para a descoberta ou invenção de muitos outros. Tudo isso em um espaço de tempo cada vez menor. A tecnologia anterior a este evento divisor, baseava-se na transformação macroscópica dos materiais, nela a matéria transformada mantinha seu desempenho e, de certa forma, traços marcantes da sua aparência elementar.

A partir da junção entre os novos processos industriais e científicos, a transformação da matéria passa a atingir níveis microscópicos, a partir do qual, torna-se mais fácil a perda da sua essência. O novo domínio sobre a matéria, juntamente com os avanços sociais conquistados por meio do salto tecnológico, originou o paradoxo da especificidade, onde a configuração virtualmente infinita de um mesmo material implica a especialização da utilidade⁵. A transformação dos materiais naturais, mesmo industrializados, na maior parte dos casos ocorre a partir de procedimentos menos exigentes do ponto de vista ambiental.

Para ilustrar um destes processos de transformação menos tecnológicos, recorremos ao exemplo do artesanato, mais especificamente, no trabalho de transformar uma pedra em um componente edificatório. A forma inicial, caótica e orgânica, lentamente era transformada em superfícies mais ou menos ortogonais com arestas bem marcadas para agregar mais estabilidade ao todo. Mesmo após transformada em bloco a pedra ainda se comportava como pedra e tinha aspecto de pedra, em outras palavras, mesmo depois da sua manipulação macroscópica os materiais mantinham o seu valor intrínseco⁶.

A manutenção da especificidade dos materiais naturais garantia a correspondência entre forma artificial e natureza, quando os edifícios em pedra deixavam de cumprir as suas funções, o material poderia ser utilizado noutra edificação. Esta continuidade de função não é uma característica da forma do trabalho, mas sim das qualidades intrínsecas ao material. Por outro lado, se um desses edifícios fosse deixado à ruína, não destoaria da paisagem pois, devido a sua materialidade autóctone, permaneceria em correspondência com o meio.

5 MANZINI, Ezio- *A matéria da invenção*, p. 42.

6 Idem, p. 31.

No período anterior à Revolução Industrial, o processo de fabricação ou manipulação dos materiais era o resultado do acumulo de experimentos ao longo do tempo. Até o momento, esta era a única ferramenta de evolução do conhecimento, a qual Manzini chamou de *experimentação histórica*. Esta ferramenta consistia em um longo processo empírico de selecionar as situações favoráveis, ou acontecimentos fortuitos, que levavam a descobertas relacionadas ao manuseio da matéria. Para melhor ilustrar o contexto do desenvolvimento destas atividades, o autor afirma que o “... *conhecimento de um artesão é o de alguém que, fazendo bem determinada coisa, não consegue explicar porque a faz desse modo.*”⁷, mas apoia-se numa rede de experiências empíricas convertidas em conhecimento teórico.

O nome dado a este processo já revela o seu caráter lento, posto que a matéria-prima e o trabalho do artífice estão associados às condicionantes naturais, nomeadamente, o tempo e as estações⁸. O conhecimento do artesão é um “... *saber profundamente empírico, enraizado nas condicionantes naturais e sociais particulares, pressupõe uma visão linear e contínua do tempo que favorecia a criação de linhagens de produtos somente alterada significativamente se algum imprevisto feliz acontecesse.*”⁹. Portanto, pode-se afirmar que a perpetuação da técnica, segundo imposições sociais e naturais, unida à criação de uma tradição de artefactos artesanais pode corresponder a uma forma de expressão cultural.

Para atingir tal objetivo o reconhecimento da matéria é de extrema importância e apoia-se, principalmente, no tato. O reconhecer do elemento de trabalho era o momento de confronto com as limitações, mas também, do estímulo criativo¹⁰. O material para o artesão ou aquilo que é pré-existente para o arquiteto, não configuram uma limitação da ação, pois o processo criativo no contexto arquitetónico surge a partir da procura por soluções para um conjunto de problemáticas específicas. Soma-se a isso a utilização de um repertório de ações previamente adquirido, uma espécie de arsenal de “ferramentas” com potencial criativo particular a cada indivíduo. Quando somado ao conhecimento da matéria física converte-se na solução, quanto mais complexas as condicionantes, mais inventiva deve ser a resposta.

7 Idem, p. 57.

8 GONÇALVES, Eliseu- *A linguagem da gravidade*. p. 45.

9 Idem, Pág. 45.

10 MANZINI, E. - *A matéria da invenção*. Pág. 56.

O mesmo pode ser dito sobre o desenvolvimento de um projeto que contemple os novos materiais de construção. No entanto, as formas atuais tendem a ser fruto da interseção entre dados codificados do terreno, que contabilizam as características geoclimáticas, e as informações dos materiais, que consideram os seus atributos comportamentais. A partir disso, pode-se questionar a intensidade com que a tecnologia e a ciência, enquanto ferramentas de exercício mental a partir de informações sobre a realidade, podem levar ao afastamento da experiência sensorial. A proximidade, como dito anteriormente, é uma etapa importante no método de identificar as potencialidades espaciais não codificáveis.

Diante disso, as formas culturais tradicionalmente vinculadas à figura clássica do artesão e do arquiteto dificilmente encontram correspondência nos tempos atuais. Antes, o exercício do conhecimento era intrínseco ao material e fazia com que na ausência da matéria-prima, a habilidade do artífice não encontrasse uma finalidade¹¹. Este vínculo tão íntimo entre atividade individual e substância dava origem à produtos únicos, onde as características do trabalho e a expressão étnica ajudavam a dar forma ao elemento final. Atualmente, nota-se maior incidência num exercício, que se equilibrava entre propósitos e costumes, a imposição da função como finalidade máxima.

Em oposição a esta velha dinâmica, dentro do novo espectro da manipulação dos materiais pós-revolução industrial destaca-se a industrialização. Nela, a forma sistemática de produção e o controle sobre cada processo da fabricação, proporcionam uma certa uniformidade do que se produz, no que diz respeito aos materiais de construção, esta invariabilidade traduz-se na estabilidade comportamental. Uma vez que os fatores externos são devidamente estudados é possível prever a reação dos materiais não apenas a cenários conhecidos, mas também, em situações hipotéticas. Graças a produção em massa dos materiais de construção e da estabilidade no seu comportamento, o processo construtivo tornou-se mais dinâmico e acessível.

A repercussão foi a crescente dependência por materiais não renováveis, o aumento da emissão de gases de efeito de estufa e a “hiper-artificialização” dos materiais de construção. Para além de afastarem-se do processo criativo, estes materiais artificiais têm no seu ADN processos contranatura de fabricação ou união de materiais imiscíveis, facto que intensifica o seu efeito nos sistemas naturais que, por sua vez, não conseguem assimilar os materiais “hiper-artificiais”.

11 Idem, p. 57.

Por exemplo, o cimento Portland representa hoje o material ligante mais utilizado graças a sua excelente resistência e maleabilidade. Soma-se a isto o seu processo de produção extremamente estável, suscetível a reprodução nos locais mais variados desde que existam argila e calcário¹². O betão armado ganhou popularidade durante o Movimento Moderno, sob uma estética marcada pela aposta na aparente simplicidade das formas através da complexidade das soluções estruturais e dos materiais construtivos. Durante o mesmo período, a procura por uma nova estética levou ao distanciamento entre as formas tradicionais e a ‘nova arquitetura’, como consequência, a linguagem dos materiais autóctones perdeu relevância diante da gramática das novas diretrizes plásticas e ideológicas¹³.

Depois da primeira metade do século XX surgiu um ideário progressista que reverbera na arquitetura e na arte a nova estrutura sociopolítica posterior à primeira e à segunda Guerra Mundial. A evolução destas ideologias culminou no que denominamos *globalização*, *civilização mundial*, ou *modernidade*. Segundo Frampton¹⁴, a civilização mundial é o produto de duas forças, a *cultura mundial* e a *técnica universal*. A primeira delas é composta por conjunto de símbolos e formas através dos quais a cultura que emerge da lógica capitalista se expressa. A segunda representa a difusão do método de produção industrial e dos seus materiais, cuja maioria está inserida na categoria de materiais artificiais. Ambas podem conduzir ao afastamento da sustentabilidade na medida em que impõem uma lógica de culto ao consumo e dos materiais “hiper-artificiais”.

Outro dos possíveis efeitos que a dinâmica industrial pode trazer para a arquitetura é o impulso de padronização, tanto do artefacto arquitetónico como daquilo que o envolve. A envolvente é a amalgama das suas características geológicas, biológicas e climáticas. Neste sentido, a regularidade das formas pré-fabricadas confronta-se com a aleatoriedade orgânica do terreno. Embora a tecnologia tenha oferecido a possibilidade de grandes transformações topográficas, entre elas a terraplanagem, esta manipulação corre o risco de transformar-se em norma ao contrário de uma retórica pontual no projeto de arquitetura. Este tipo de alteração do terreno revela o comportamento tecnocrata difundido pela modernidade, uma ação que pode conduzir à descaracterização dos sítios e à interferência com os ciclos naturais. Um dos termos utilizados para referir ao espaço resultante desta interferência tecnicista é o *não lugar*¹⁵.

12 TORGAL, Pacheco; Et al- *A Sustentabilidade dos Materiais de Construção*, p. 123.

13 BARKAUSKAS, Friedbert; Et al- *Concret Construction Manual*, p. 32.

14 FOSTER, Hal (1983) - *The Anti-aesthetic*, p. 20.

15 Idem, p. 26.

A modernidade é o resultado dos avanços técnicos, económicos e socioculturais; fundamentalmente firmado no ideário ocidental capitalista. Para além do risco de degradação ambiental e outras questões relacionadas, a prevalência dessas ideologias pode significar a destruição gradativa da individualidade¹⁶. O *paradoxo da modernidade* qualifica o cenário onde para vencer o subdesenvolvimento um país precisa adotar certa racionalidade científica, técnica e política; que em certos casos pode significar a sobreposição de tradições éticas, comportamentais e construtivas em favor de uma lógica massificada.

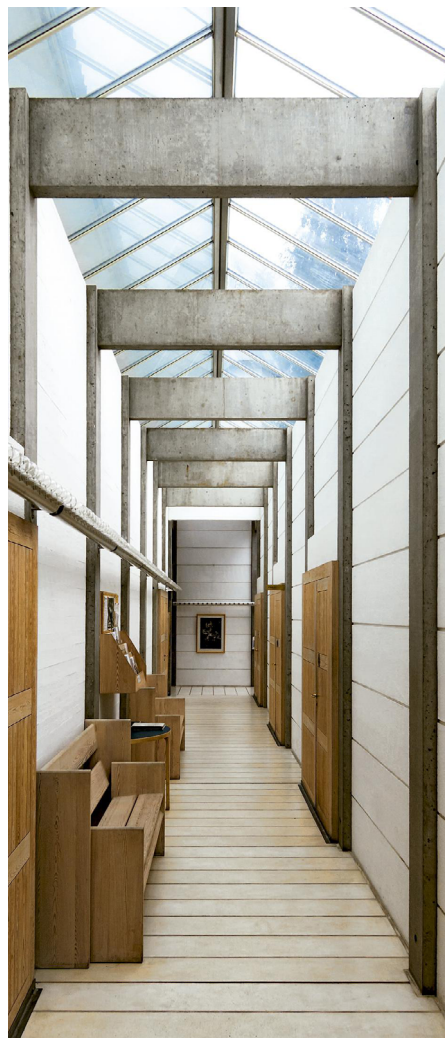
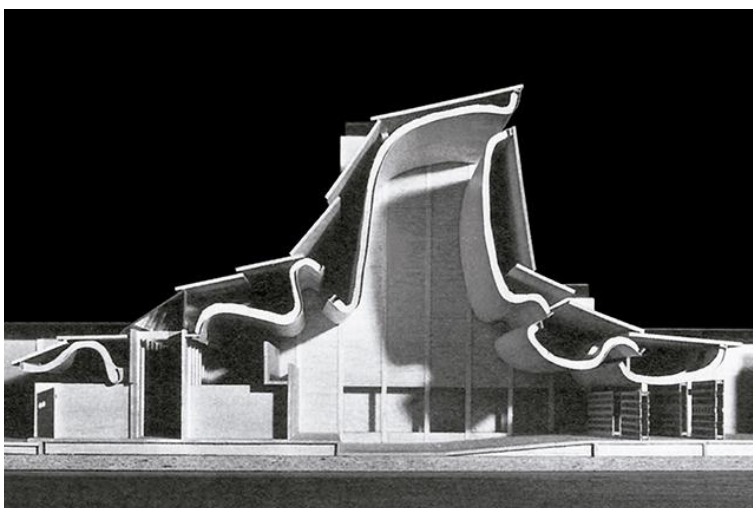
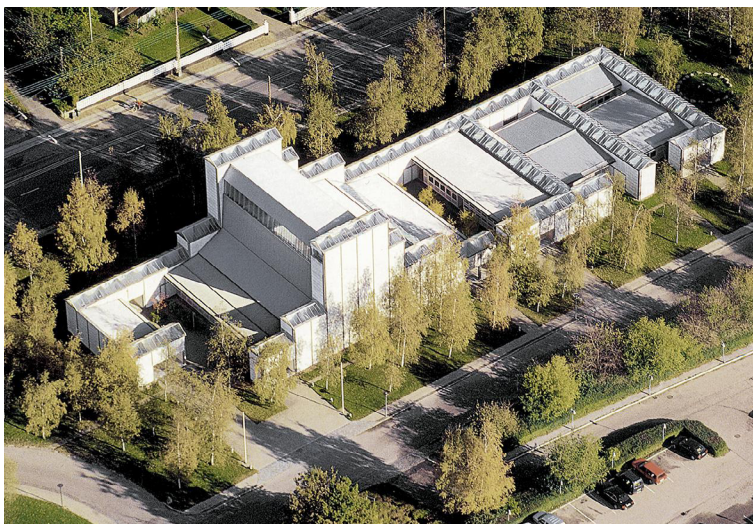
Este paradoxo pode ocorrer de igual forma na arquitetura, onde as formas e técnicas de uma cultura de massa conduzem ao distanciamento daquilo que nos envolve e dos seus elementos naturais. Para além disso, o resultado da otimização do processo construtivo e dos materiais de construção, conduz à possível perda da correspondência entre a identidade e o objeto, ou, entre a matéria e processo. Segundo Frampton, uma vez que a cultura universal está, na sua maior parte, apoiada no sentido da visão, o *regionalismo crítico* tem como objetivo contestar a experiência visual normativa através de uma arquitetura sensorial conseguida através dos materiais naturais inseridos na tradição. A perda da proximidade é combatida por meio da valorização de materiais e formas pertencentes ao núcleo criativo, bem como o reconhecimento e manutenção das nuances topográficas e características dos sítios.

Na visão de Frampton, a textura opõe-se a cenografia na medida que instiga a vivência dos espaços mediante o toque. A partir desta aproximação os sentimentos que os materiais são capazes de provocar. O modo como a textura e a forma de cada componente construtivo revelam sua objetividade e capacidade de transcender a aparência técnica significa a aproximação entre espaço utilitário e espaço cultural.

Na prática, o *regionalismo crítico* propõe uma releitura das técnicas e ideologias da globalização, moduladas através dos materiais e das formas que fazem parte das manifestações culturais tradicionais. Um dos pontos chave para isto é o autoconhecimento no que tange às características físicas do local, materiais autóctones, luz e peculiaridades construtivas. Para isto, o arquiteto deve abster-se das formas hiper artificiais e das artes decorativas do passado, sem abster-se das novas técnicas, e a partir de um estudo crítico e sensibilizado, associar a tecnologia do presente ao resgate de formas e materiais culturalmente estabelecidos¹⁷ em busca da maior sustentabilidade nos espaços construídos.

16 FRAMPTON, Kenneth - *História crítica da arquitetura moderna I*, p. 381.

17 FRAMPTON, Kenneth - *História crítica da arquitetura moderna I*.



2 - Igreja Bagsvaerd, espaço litúrgico.

3 - Igreja Bagsvaerd, entrada lateral.

4 - Igreja Bagsvaerd, vista aérea.

5 - Igreja Bagsvaerd, espaços de circulação.

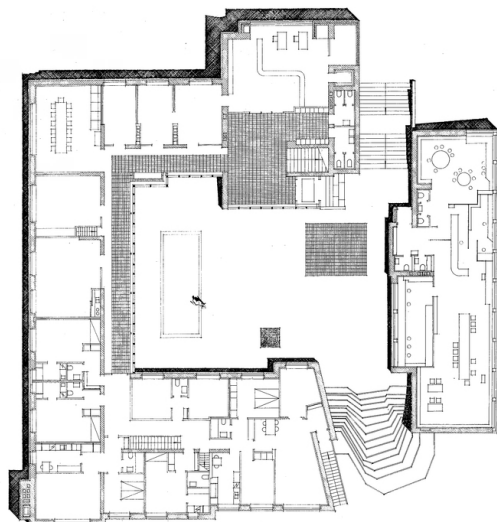
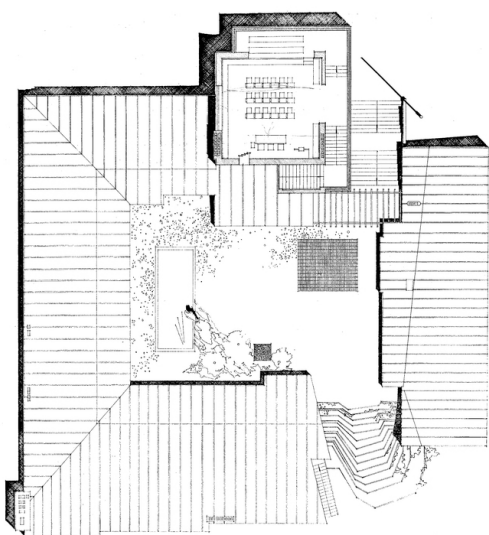
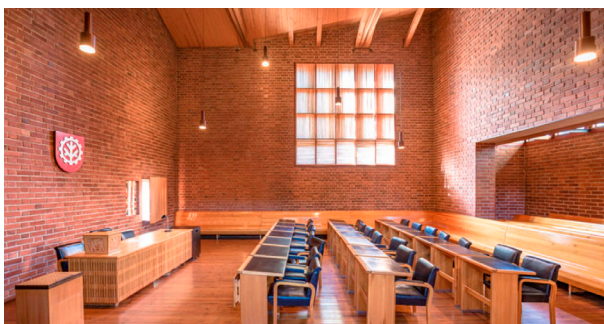
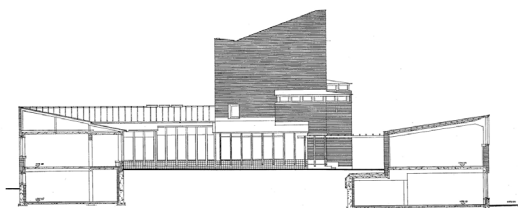
6 - Igreja Bagsvaerd, maquete do espaço litúrgico.

Podemos tomar como exemplo deste raciocínio crítico a Igreja Bagsvaerd (1976) na Dinamarca, onde a técnica universal e a cultura mundial são subvertidas pelo arquiteto Jørn Utzon. Ainda que neste exemplo a ideia dos materiais da tradição não seja explorada em todo o seu potencial, a atenção às texturas está no betão aparente nas portas e no mobiliário de madeira. Em Bagsvaerd a lógica construtiva está de acordo com as ideologias modernas de otimização dos espaços e dos elementos construtivos, o desenho do edifício sujeita-se a uma malha quadriculada rígida onde na interseção das linhas guia assentam os elementos de sustentação verticais. Os pilares, as vigas e os elementos de fechamento das paredes são pré-fabricados em betão armado, sendo que os primeiros possuem ranhuras laterais para receber e travar os painéis que constituem as paredes, no topo recebem a viga ou mais um pilar quando a composição do edificado cresce em altura. Visto pelo exterior, o edifício é composto por formas ortogonais bem delimitadas tanto em planta como em corte, e esta ortogonalidade é reforçada pela repetição dos painéis das paredes.

A cobertura do edifício é composta por painéis metálicos e vidro que, assim como as peças de betão pré-fabricadas, encontra sustentação na técnica universal. Nota-se que a partir de materiais industrializados universais, Utzon faz alusão às coberturas inclinadas das construções em madeira tradicionais. Para além de inundar os espaços de circulação com luz natural os corredores funcionam como uma espécie de estufa, diante das características climáticas do local, ajudam a manter uma temperatura amena no interior do edifício.

O espaço litúrgico distingue-se dos demais por conta do caráter sinuoso da sua cúpula de betão armado. A existência da mesma deve-se ao facto de que, na cultura ocidental, as cúpulas e as abóbadas são dispositivo arquitetónico característicos dos espaços onde existe alusão ao sagrado. Entretanto, precedentes semelhantes a estas formas onduladas do teto são mais comuns em culturas orientais, nomeadamente nos templos pagodes chineses ou nos templos budistas japoneses. Neste sentido, o espaço sagrado proposto por Utzon é resultado do diálogo entre semânticas religiosas particulares de culturas distintas, contudo, sem cair na repetição da ornamentação extensiva.

Ainda que a utilização de elementos pré-fabricados esteja associada a uma lógica de aplicação normativa dentro do exercício da técnica universal, as formas extremamente plásticas do betão moldado *in situ* conferem ao material da racionalidade moderna uma irracionalidade simbólica. Este efeito é conseguido porque neste espaço o edifício possui duas peles, a primeira volta-se para o exterior, otimizada e construída com materiais pré-fabricados, a segunda está entre a primeira e o espaço de culto, portanto, encontra-se livre de restrições plásticas e funcionais.



7 - Câmara Municipal de Säynätsalo, escada ocidental.

8 - Câmara Municipal de Säynätsalo, corte pelo pátio interior.

9 - Câmara Municipal de Säynätsalo, vista do pátio.

10 - Câmara Municipal de Säynätsalo, corte transversal.

11 - Câmara Municipal de Säynätsalo, planta do piso 1 e planta de cobertura.

Já na arquitetura de Alvar Aalto nota-se que a maioria dos espaços expressam relações sensoriais entre materiais e carregam características da arquitetura tradicional finlandesa. Os principais materiais utilizados por ele são o tijolo a madeira e o granito, sendo estes dois últimos endêmicos da Finlândia e profundamente enraizados no seu núcleo cultural. O tijolo, para além de remeter a tradição medieval finlandesa, foi adotado como uma referência a arquitetura italiana e devido ao seu potencial de comunicar cores e texturas¹⁸. A câmara municipal de Säynätsalo, 1952, é um exemplo da arquitetura sensorial e da releitura dos materiais tradicionais.

Os volumes que compõem este edifício possuem uma cobertura inclinada metálica aplicada sobre uma estrutura de sustentação em madeira que, mutuamente, remete à forma da cobertura inclinada e ao material tradicional e à assimilação dos materiais modernos com a incorporação do revestimento metálico. Na sala do concelho isto se torna ainda mais evidente com a exposição das vigas de madeira.

A relação do edificado com a topografia é outro ponto importante e seguramente demonstrada neste projeto. O sítio de implantação é relativamente plano, entretanto, o arquiteto cria nuances topográficas entre a envolvente e o interior do edifício que, do lado exterior apresenta dois pisos, porém a percepção que se tem a partir do pátio é de apenas um piso. A chegada ao pátio interno acontece por meio de duas escadas, a escada oriental marca o acesso principal ao edifício e, como tal, possui formas regulares e um material nobre, nomeadamente granito. A escada ocidental tem uma forma mais orgânica, feita a partir de socacos no próprio terreno e tábuas de madeira. Estes dois elementos demonstram a procura do pertencimento entre objeto arquitetónico e lugar, para isto, o arquiteto evoca a relação com a topografia, com a natureza e a idiossincrasia dos materiais.

Em ambos os projetos percebe-se a harmonia entre materiais da tradição local e de materiais industrializados, também se percebe o diálogo entre estes materiais e a composição de uma retórica de formas com alusão à tradição. Para além disso, devido ao clima intenso daquelas localidades, nos dois casos existe a intenção do controle da temperatura de forma passiva através da procura pela luz ou do soterramento de um dos lados do edifício. Submeter estes exemplos à uma análise de sustentabilidade sob os parâmetros atuais é irreal, porém, os ensinamentos acerca da escolha dos materiais e da elaboração das formas é a principal lição a aprender.

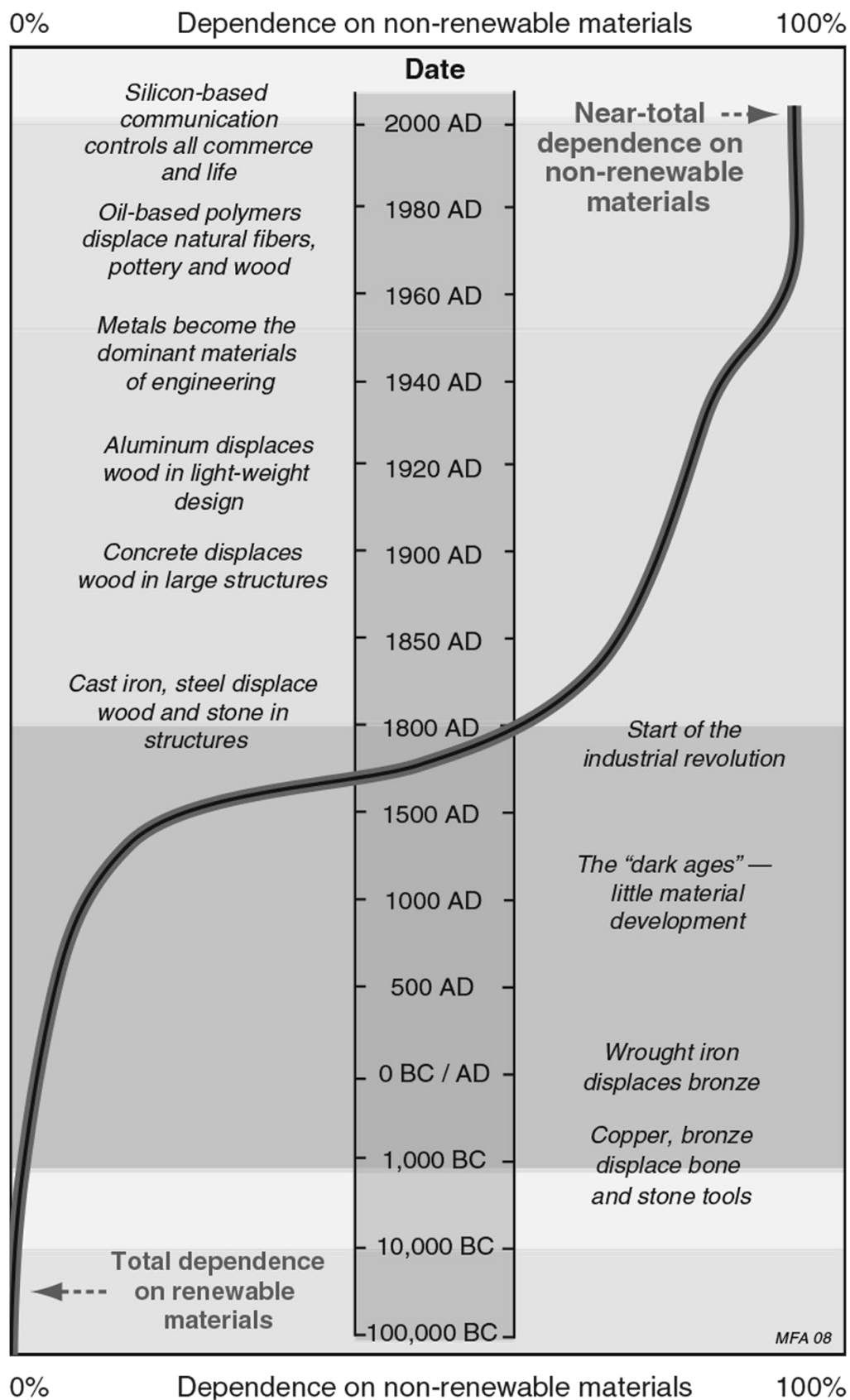
18 FRAMPTON, Kenneth - *História crítica da arquitetura moderna*, p. 235.

1.2. Desenvolvimento da construção sustentável

Diante das aflições atuais que englobam temas como a ecologia, economia e as questões sociais, este capítulo dedica-se à contextualização de um assunto capaz de influenciar ou mitigar algumas destas questões, nomeadamente, a sustentabilidade. É importante reconhecer que as esferas compreendidas dentro desse assunto são complexas e a tentativa da sua assimilação em dinâmicas já existentes desencadeia grandes desafios. Ao considerar o grande impacto que a indústria da construção exerce no planeta e a sua relevância para o desenvolvimento da sustentabilidade em arquitetura, propõe-se uma abordagem à noção de construção sustentável. Da relação entre sustentabilidade e construção, surge um léxico com o intuito de abarcar as novas dinâmicas construtivas, dentro desta nomenclatura destaca-se o conceito de design sustentável. Esta ideia é fruto da evolução da técnica moderna amplamente difundida no século XXI, contudo, guarda semelhanças com processos mais antigos e menos tecnológicos que, de igual modo, tinham a capacidade de moldar os espaços.

A transformação dos espaços naturais foi primordial para a nossa evolução, por meio dela moldamos o ambiente à nossa volta e criamos condições mais favoráveis ao nosso desenvolvimento. Após uma breve abordagem sobre o processo de transformação da matéria, antes e depois da Revolução Industrial, podemos identificar semelhanças entre os materiais e os espaços uma vez que um dificilmente existe sem o outro. A forma como assimilamos a transformação e utilização da matéria tornou-se parte da nossa sociedade e fez surgir uma relação de dependência, tanto dos materiais como dos processos. Como sabemos, esta necessidade não permaneceu estática e restrita a apenas um elemento, transitou de materiais simples para materiais cada vez mais complexos e de elementos renováveis para não renováveis.

Há 300 anos, as atividades humanas apoiavam-se quase inteiramente em matérias-primas renováveis: madeira, couro, ossos e fibras naturais. A pedra, embora não pertença a este grupo, é um material construtivo singular pois, além da sua ocorrência em natura, possui grande durabilidade e resistência. Para além desta, os poucos elementos não renováveis utilizados antes do século XVIII eram o ferro, zinco, cobre e estanho. Contudo, estas ligas metálicas eram utilizadas em ínfimas quantidades quando comparadas aos demais materiais, isto porque sua aplicação era restrita a fabricação de ferramentas e joias.



12 - Tabela não linear da dependência de materiais não renováveis ao longo do tempo. Retirada de: ASHBY, p. 9.

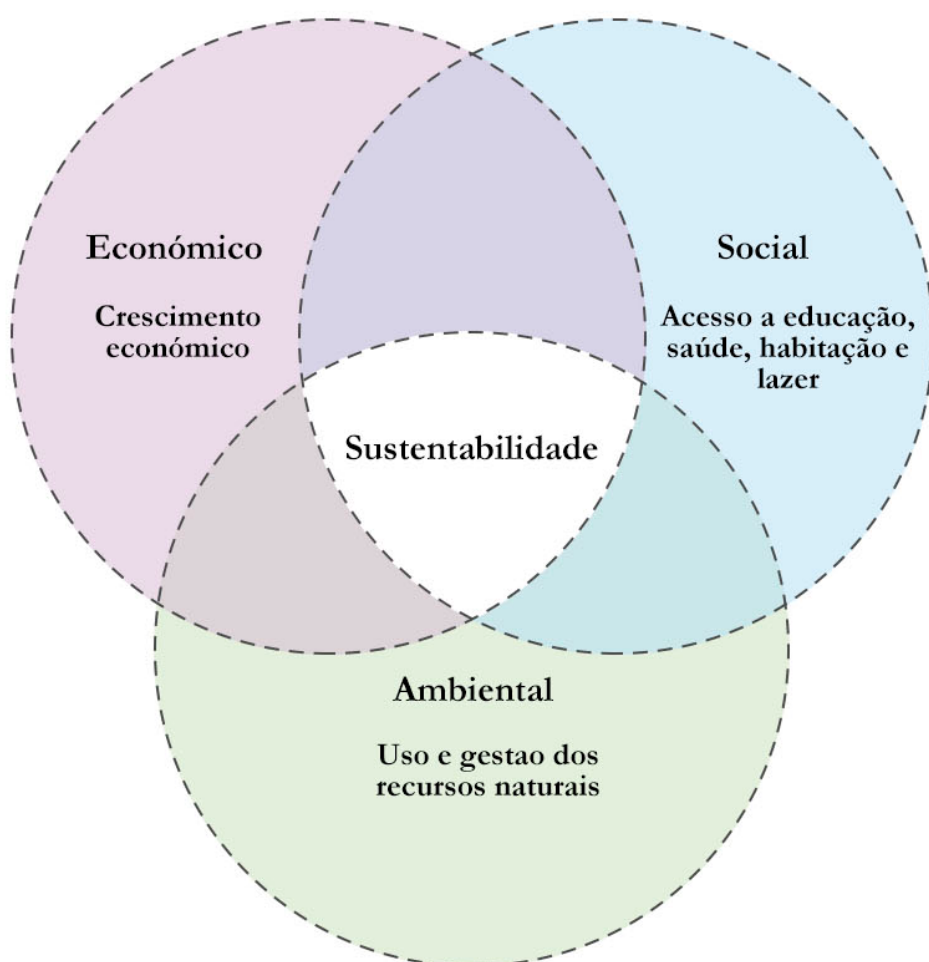
Progressivamente a natureza desta dependência modificou-se, ao passo que no final do século 20 a demanda por materiais não renováveis correspondia a 90% do consumo mundial. Associada à transição dos elementos naturais para os sintéticos, assistimos à outra mudança cujo impacto nas formas arquitetónicas encontra-se na mesma escala de grandeza: a passagem de elementos de construção naturais e pesados, pedra, para elementos estruturais leves e sintéticos, betão e aço. Esta afirmação confronta-se com o caso da madeira que, na Europa pós-Revolução Industrial, gradativamente perdeu espaço nos estaleiros de obra, para materiais pré-fabricados artificiais como o tijolo e o bloco de cimento.

Em adição à esta mudança de paradigma no âmbito dos materiais, uma série de conflitos que tiveram início na década de 70 geraram certa instabilidade sobre alguns países do golfo pérsico, os quais eram responsáveis por grande parte da produção mundial de petróleo. Devido a este período de conflitos, a produção deste combustível fóssil decresceu drasticamente e os seus preços aumentaram exponencialmente, a indústria norte americana e europeia viram-se em estado de alerta. Estes acontecimentos não só foram esclarecedores a respeito da dependência mundial de combustíveis fósseis como, também, para a sua finitude.

A própria noção de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável ganhou outra dimensão em 1987 na Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, onde o documento conhecido como Relatório Brundtland foi elaborado. Este começa por determinar as intervenções humanas em ecossistemas naturais para posteriormente elaborar diretrizes para mitigar os seus efeitos. De acordo com o ponto número nove do documento, o assentamento de agricultura, desvio de cursos d'água, extração de minerais, emissão de calor e gases nocivos na atmosfera, florestas com finalidade comercial e manipulação genética são alguns dos exemplos da intervenção humana. Até a segunda metade do século vinte, tais intervenções tinham um alcance pontual, atualmente o impacto das mesmas é mais severo tanto na escala regional como global.

Ainda segundo este relatório, o desenvolvimento é um fenómeno que envolve a transformação tanto da economia como da sociedade. Neste sentido, o desenvolvimento sustentável requer, para além das condições necessárias para o desenvolvimento, políticas que assegurem a perpetuação dos ecossistemas. Para isto é imperativo a gestão dos recursos naturais e a difusão da equidade entre as gerações.¹⁹ A partir desta afirmação podemos deduzir três pilares para o desenvolvimento sustentável: o desenvolvimento económico, o desenvolvimento social e a preservação ambiental.

19 United Nations - *Our Common Future*, p. 54.



Neste documento também podemos extrair a definição de desenvolvimento sustentável, cuja essência reside na capacidade de a geração atual atingir as suas necessidades sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atingirem as suas. A partir do momento em que este ideal é definido, nasce um sentimento de obrigação, mais concretamente, de responsabilidade da geração atual com o planeta que será herdado pelas gerações futuras²⁰. Estas ideias evoluíram ao ponto em que a manutenção e a capacidade de evolução dos padrões socioeconómicos juntamente com a preocupação em relação aos recursos naturais, deu origem ao princípio de equidade, segundo o qual cada geração tem direito aos mesmos espaços ambientais e aos mesmos recursos naturais que a geração anterior.

Ainda em relação a isto, a perpetuação das atividades humanas depende da capacidade de funcionamento a longo prazo dos ciclos sociais, económicos e naturais. Reconhecer o impacto das nossas ações é apenas o primeiro passo para garantir a continuidade destes processos. Com base neste fundamento, evidencia-se que as dinâmicas necessárias para o funcionamento da nossa sociedade não devem interferir em demasia com os ciclos naturais ao ponto de excederem a capacidade de resiliência do planeta.²¹

A água ajuda-nos a compreender os ciclos de recuperação do planeta, para além de ser indispensável ao uso humano e industrial. Ao abordar o tema da água é necessário mencionar a produção de energia elétrica, levando em conta que nos países como o Brasil, as hidroelétricas são a maior fonte de fornecimento de eletricidade. Espera-se que esta relação conhecida por “*water-energy nexus*” se intensifique ainda mais nos próximos anos com o movimento em direção a fontes energéticas mais ecológicas. Como é de conhecimento geral, deste líquido tão essencial a vida, apenas 1% é elegível para o consumo humano, dentro desta pequena parcela a água precisa ser repartida entre o nosso consumo, a indústria, a agricultura, a produção de energia elétrica e, por fim, a manutenção dos ecossistemas naturais.

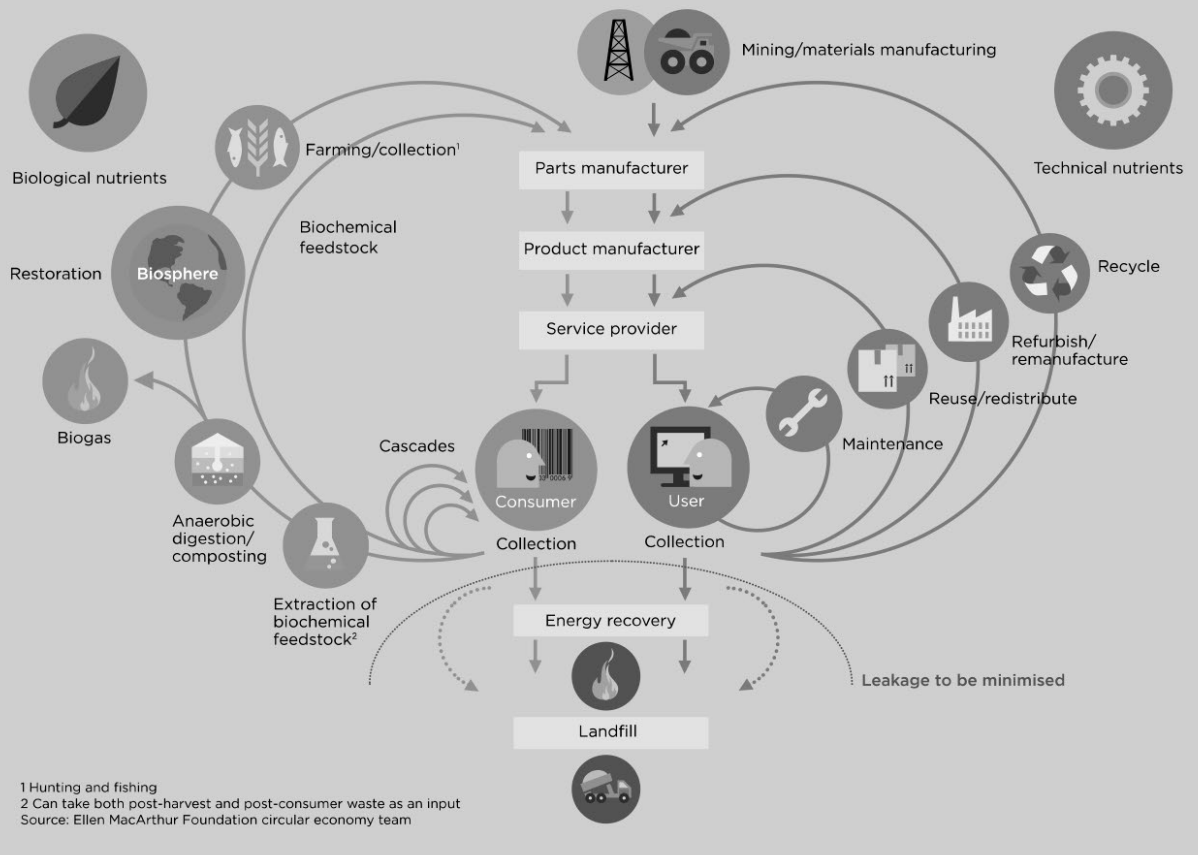
Ao compreender o cenário dos recursos naturais e reconhecer o ritmo, lento para os padrões atuais, da transformação dos processos industriais, um fator primordial para a sustentabilidade dos materiais e componentes de construção é a economia circular. A origem do pensamento sobre a circularidade é atribuída à Walter R. Stahel, um arquiteto suíço que em 1982, no texto “The Product Life Factor”, propôs uma economia baseada num ciclo em espiral. Seu objetivo era minimizar os fluxos de energia, o consumo de matéria-prima e a degradação ambiental; sem, entretanto, restringir o desenvolvimento económico, técnico e social²².

20 MANZINI, Ezio; et al - *Design for Environmental Sustainability*, p. 4.

21 Idem, p. 6.

22 CHESHIRE, David - *Building Revolutions*, p. 4.

FIGURE 6 The circular economy—an industrial system that is restorative by design



Em 2013 foi definido pela Ellen MacArthur Foundation que a economia circular é “... um sistema industrial restaurativo ou regenerativo por intenção e por design. Substitui o conceito de ‘fim-da-vida útil’ por restauração, transita para o uso de energias renováveis, elimina o uso de materiais tóxicos, os quais limitam o reuso, e foca-se na eliminação dos resíduos através de um planeamento superior dos materiais, produtos, sistemas, e modelos de negócio”²³.

Por outras palavras, a economia circular foca-se em manter a utilidade e o valor dos recursos e dos materiais durante o maior tempo possível como alternativa ao seu abandono, pretende cumprir este objetivo através do prolongamento da vida útil dos produtos, da possibilidade de reutilização, remontagem e, em último caso, que na sua composição façam parte apenas materiais não tóxicos para facilitar a sua reinserção à biosfera. Para além disso, atua no controlo e no planeamento dos resíduos, definindo-os como subprodutos a serem explorados pela mesma ou por outras cadeias de produção²⁴.

- Em suma, os princípios centrais da economia circular contemplam:
- Reutilização dos materiais e componentes construtivos
- Remanufactura
- Reciclagem
- Redução de resíduos
- Retenção de valor

Após estabelecidos os fundamentos da sustentabilidade e da economia circular, percebe-se que, sem exceção, todas as ações têm alguma repercussão no meio ambiente. O setor da construção é um dos maiores consumidores de materiais sintéticos e de recursos naturais do planeta. Isto, pois, a energia incorporada na construção de um edifício corresponde a somatória da energia necessária para obtenção da matéria-prima, transformação desta em materiais de construção, da energia gasta no transporte dos insumos ao estaleiro de obra e da construção do edifício. Como se não bastasse, soma-se a isto a energia necessária para o funcionamento do edifício que em poucos anos excede o gasto energético da sua construção.²⁵ Diante da complexidade da cadeia de produção por trás da construção de um simples edifício, torna-se evidente os benefícios da incorporação dos princípios sustentáveis neste ramo. Nasce, assim, o conceito de construção sustentável e junto com ele um léxico que compreende as novas nuances do processo construtivo.

23 The Ellen MacArthur Foundation. “Towards the circular economy”, p. 7.

24 CHESHIRE, David - *Building Revolutions*, p. 3.

25 ASHBY, Michael F - *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*, p. 236.

Em um documento publicado em 1994 pelo *Conseil International du Bâtiment (CIB)*²⁶ determinou-se que uma construção sustentável é aquela, cuja concepção e construção baseiam-se na gestão eficiente dos recursos e no design ecológico, com a intenção de criar espaços com atmosferas saudáveis tanto para os seus ocupantes quanto para o ecossistema onde está inserida²⁷. Em uma construção sustentável estes princípios conduziram as decisões relacionadas ao desenho do projeto, à escolha dos materiais, ao processo de edificação e de desconstrução. Salienta-se que a proposta de substituir a palavra demolição por desconstrução, demonstra um comprometimento com o reaproveitamento dos recursos. Diante da reflexão sobre estes ideais, o CIB elaborou sete pontos para uma construção sustentável:

- Reduzir o consumo de recursos.
- Reutilização de recursos.
- Utilização de recursos reciclados.
- Proteção do meio ambiente.
- Eliminação de materiais tóxicos.
- Análise do custo do ciclo-de-vida.
- Prezar pela qualidade e durabilidade.

A partir disto, popularizaram-se termos como *design sustentável* (sustainable design), *edifícios de alta performance* (high-performance building) e *construção verde* (green building). Embora estejam relacionados e em determinados casos sejam utilizados como sinónimos, cada expressão possui suas particularidades.

Podem, portanto, ser organizados de forma análoga ao que é feito por Francisco Barata no livro *Transformações e Permanências na Habitação Portuguesa*²⁸, no qual são definidos os conceitos de tipologia, tipo e modelo para melhor estruturar o ensino de projeto. Com o esclarecimento da nomenclatura relacionada à sustentabilidade prevê-se a desmistificação da construção sustentável.

26 O CIB, fundado em 1953, é uma rede internacional de cooperação no âmbito da pesquisa e divulgação de informação acerca das tecnologias da construção. Desde o seu surgimento esteve vinculado à ONU com a finalidade de melhorar a qualidade das edificações e diminuir os impactos ambientais do setor.

27 KIBERT, Charles J. - *Sustainable construction: green building design and delivery*.

28 FERNANDES, Francisco Barata - *Transformações e Permanências na Habitação Portuguesa: As forma da casa na forma da cidade*.

Do particular para o geral, o *green building* é o termo que caracteriza o objeto contruído que concentra as ferramentas de um sistema de alta performance sob a ótica da construção sustentável. Um *high-performance building* é aquele que, através de um pensamento sistêmico e coordenado entre os especialistas de diferentes áreas, apoia-se na integração entre ferramentas e sistemas para criar um edifício cuja performance económica, energética e ecológica seja superior aos edifícios convencionais. Estas duas ideias correspondem, respetivamente, ao conceito de modelo e tipo. Enquanto o primeiro enuncia um artefacto acabado com características específicas que pode ser repetido indefinidamente, o segundo corresponde a uma matriz que se manifesta através de soluções formais e, por isso, sua essência recai sobre a integração dos dispositivos de projeto.

Em relação ao *sustainable design*, reconhecer a existência de um desenho sustentável abre espaço para supor a existência de um design que de modo, mais ou menos, premeditado não o seja. De acordo com Van der Ryan e Cowan, o design é “...a modelação intencional da matéria, energia, e do processo em direção à uma finalidade específica ou desejada.”²⁹. Para estes autores a definição de projetar é extremamente abrangente e deixa espaço para interpretações. Analogamente, a sua definição de desenho sustentável contempla a mesma transformação da matéria e da energia, entretanto, a partir de processos em harmonia com os sistemas naturais.

Quando estes autores mencionam a harmonia com o meio ambiente, deixam implícito os aspetos da construção sustentável como parte de um sistema edificado cuja manutenção demanda pouca energia, maximiza a eficiência dos materiais e encontra-se em harmonia com a envolvente. Este, por fim, relaciona-se com o conceito de tipologia pois compreende o processo que permite determinar as formas arquitetónicas e as ferramentas de projeto a partir de uma leitura dos sistemas naturais que compõem o sítio de implantação. Neste sentido, pode-se assumir que o desenho sustentável é a base a partir da qual os sistemas de alta performance e seus materiais são determinados

29 VAN DER RYAN, Sim, et all - *Ecological Design*.

Ao considerar alguns projetos de Alvar Aalto, Frank Lloyd Right, Jorn Utzon, Louis Kahn e outros, percebemos que um projeto de arquitetura assume, a partir do estudo da envolvente, a otimização do controlo passivo da temperatura e da ventilação através de retóricas formais que estejam de acordo com a utilização dos espaços; isto para não mencionar a atenção e o cuidado com a implantação das massas edificadas num jogo de contraponto entre espaços construídos e não construídos. De modo semelhante, no desenho destes espaços existe grande consideração em relação aos materiais que encerram e, mais do que isto, caracterizam os espaços através de cores, texturas e do apelo cultural.

Isto posto, quase que se pode substituir a ideia de um design sustentável pela noção de *arquitetura crítica* difundida por Frampton, contudo, utilizada por muitos outros antes dele. Da mesma forma, podemos restringir este último termo ao projeto arquitetónico onde consideram-se as nuances da envolvente, dos materiais e dos ocupantes na criação dos espaços. Sugere-se que a gênese da construção sustentável e do eco-design derivam de uma tipologia de desenho arquitetónico comum, a partir da qual o intuito é responder, de certa forma, à sustentabilidade social, económica e ambiental sem a possibilidade de apoiar-se nas tecnologias da atualidade. Neste ponto, mesmo com o apoio da economia circular, torna-se claro que a repetição de um modelo sustentável fora de contexto não garante a perpetuação da sustentabilidade, a compreensão dos conceitos e das ferramentas, mais do que a repetição dos dispositivos, está na base de uma arquitetura mais sustentável.

1.3. Nascer e renascer, uma nova perspectiva sobre o ciclo de vida

A indústria da construção civil e por consequência os espaços construídos, são os principais consumidores de matéria-prima e energia. Dentro da União Europeia é estimado que o parque edificado consuma aproximadamente 40% da energia produzida, seja responsável por 30% das emissões de CO₂ e gere aproximadamente 40% dos resíduos produzidos pelos seres humanos. Para além disso, este setor envolve, dentro da EU, mais de 30 milhões de profissionais. A totalidade destes factos torna este o maior setor industrial do mundo³⁰. Por isso, neste capítulo pretende-se aprofundar os princípios para a compreensão do ciclo de vida dos materiais, bem como, explorar os seus contributos para a sistematização de processos e para a escolha consciente dos materiais de construção.

A repercussão ideológica da ECO 92³¹ e do conceito de desenvolvimento sustentável tem enraizado, ainda que lentamente, nas atividades industriais e económicas da nossa sociedade. Pode-se especular que um dos possíveis efeitos desta assimilação, atrelada aos benefícios económicos desta prática, é a tentativa de aumentar a eficiência de processos industriais e dos seus produtos, facto que contribui para a redução dos impactos ambientais da produção industrial. Em relação a eficiência industrial, alguns autores apontam que para alcançar o estado de sustentabilidade a partir da otimização dos processos de produção seria necessário reduzir o consumo de matéria-prima em 90% e, mesmo assim, manter a oferta de serviços e produtos constante³². Este quadro é simplesmente impossível de ser conseguido com a tecnologia disponível atualmente e apesar de não invalidar os esforços de otimização dos processos, revela a impossibilidade de depender apenas desta única ação.

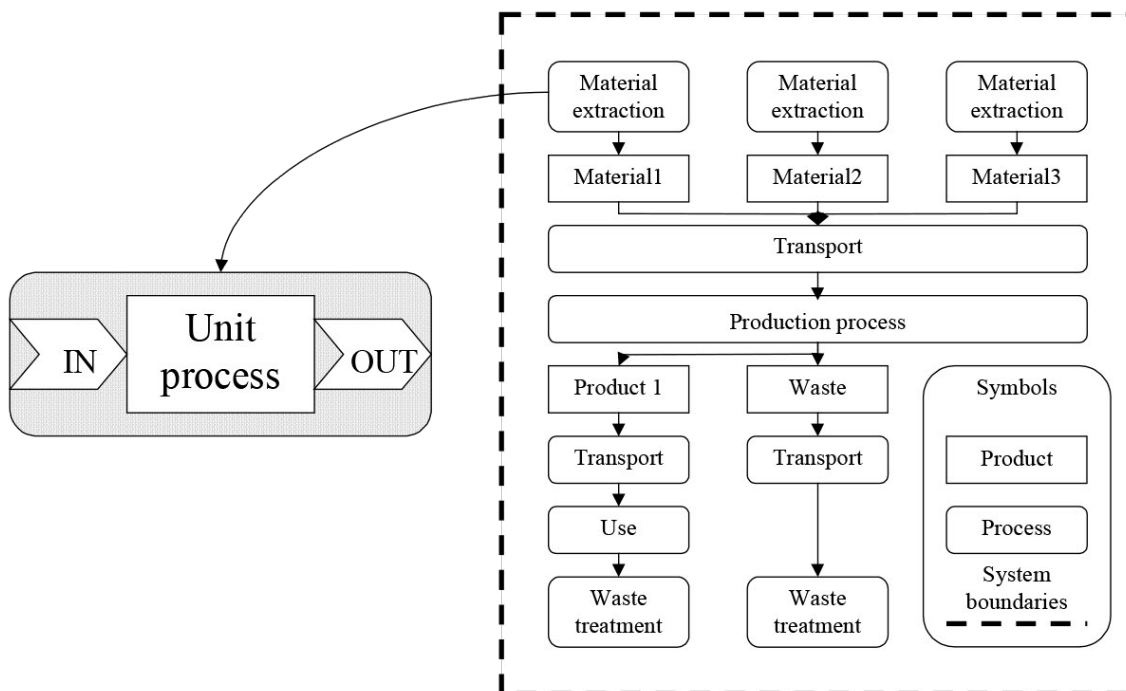
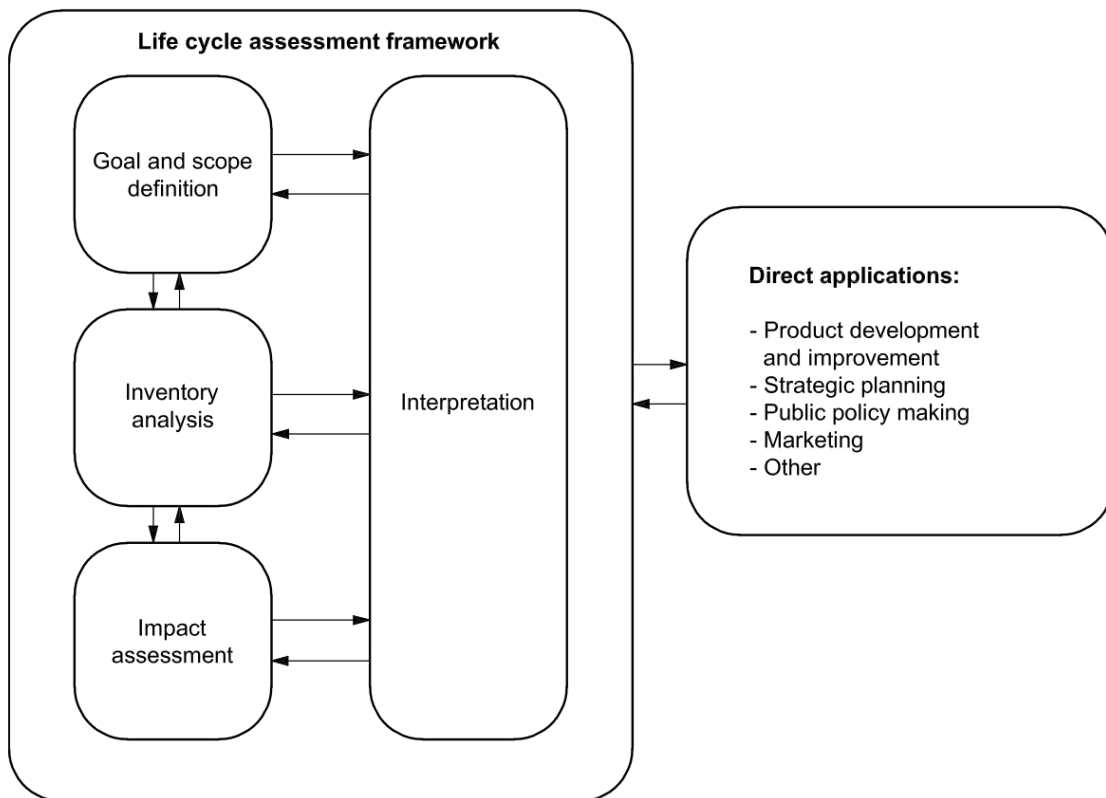
Outra medida que pode contribuir para um panorama mais sustentável é o *Life Cycle Assessment (LCA)* ou *Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)*, uma ferramenta capaz de auxiliar na compreensão holística de serviços, produtos e processos industriais. A sua essência centra-se na difícil tarefa de identificar o impacto ambiental destas entidades através do discernimento dos *inputs* e *outputs* de todos os processos relacionados aos elementos de análise. É importante esclarecer que a ACV é uma ferramenta essencialmente comparativa, utilizada para relacionar duas entidades que desempenham funções semelhantes e para facilitar decisões mais conscientes fundamentadas num sistema de informações³³.

30 CIB- Agenda 21 on Sustainable Construction. p. 25.

31 Conferencia conduzida pelas Organização das Nações Unidas no Rio de Janeiro cujo principal tema era a preservação ambiental e o desenvolvimento.

32 MANZINI, Ezio - Design for Environmental Sustainability, p. 7.

33 PAULSEN, Jaboc - Life Cycle Assessment for Building Products, p. 11.



15 - Etapas da Avaliação do Ciclo de Vida - ISO/TC 207, p. 8.

16 - Composição gráfica do ACV a partir de unidades de processo - PAULSEN, p. 6.

A ACV consiste na criação de um modelo de organização de informações em duas esferas, nomeadamente, a material e a temporal. A esfera material diz respeito à extração da matéria-prima, ao transporte, ao processo de agregação de valor (processos industriais), à manutenção dos produtos e à gestão dos seus efluentes. A esfera temporal, tem relação com a gestão temporal da matéria, nas etapas descritas acima, durante um intervalo de tempo determinado com base no objetivo do estudo em questão³⁴.

Neste sentido, o espectro temporal da ACV, normalmente, abrange todo o ciclo de vida de um serviço ou produto, que neste caso recebe a classificação de *cradle to grave* (berço ao túmulo). Nele, são considerados os *inputs* e *outputs* das etapas abrangidas pela esfera material, portanto, considera a matéria-prima, o gasto energético e a emissão de CO₂ desde a extração dos insumos até a gestão e tratamento dos resíduos no fim da vida útil do produto³⁵. Existem, no entanto, diferentes abordagens neste estudo, *cradle to gate* é quanto o estudo considera os sistemas envolvidos desde o início da extração das matérias-primas até o momento em que os insumos chegam a fábrica³⁶.

Este estudo também pode percorrer da origem do material até o seu envolvimento em outro sistema, por exemplo, avaliar o processo de fabricação de uma embalagem até o momento em que recebe o produto para ser transportado. A este sistema é dado o nome de *cradle-to-site* (berço ao sítio). Sua inspeção tem início na extração da matéria-prima, soma-se o transporte até a fábrica, o seu processo de transformação e por fim, o percurso do produto acabado até que seja inserido em outro sistema ou comece a desempenhar uma função. Sobre isto, vale realçar que a densidade dos materiais é responsável por ditar, não só o custo energético e financeiro, mas também, a logística do transporte³⁷.

Face ao exposto, entende-se que as diferentes abordagens na análise do ciclo de vida são aplicadas consoante os objetivos do ensaio. É aceitável, também, concluir que diante de uma abordagem generalizadora o estudo encontra-se incompleto quando não contabiliza os recursos e os impactos ambientais durante a fase de função, durante o traslado dos materiais e durante a gestão dos resíduos.

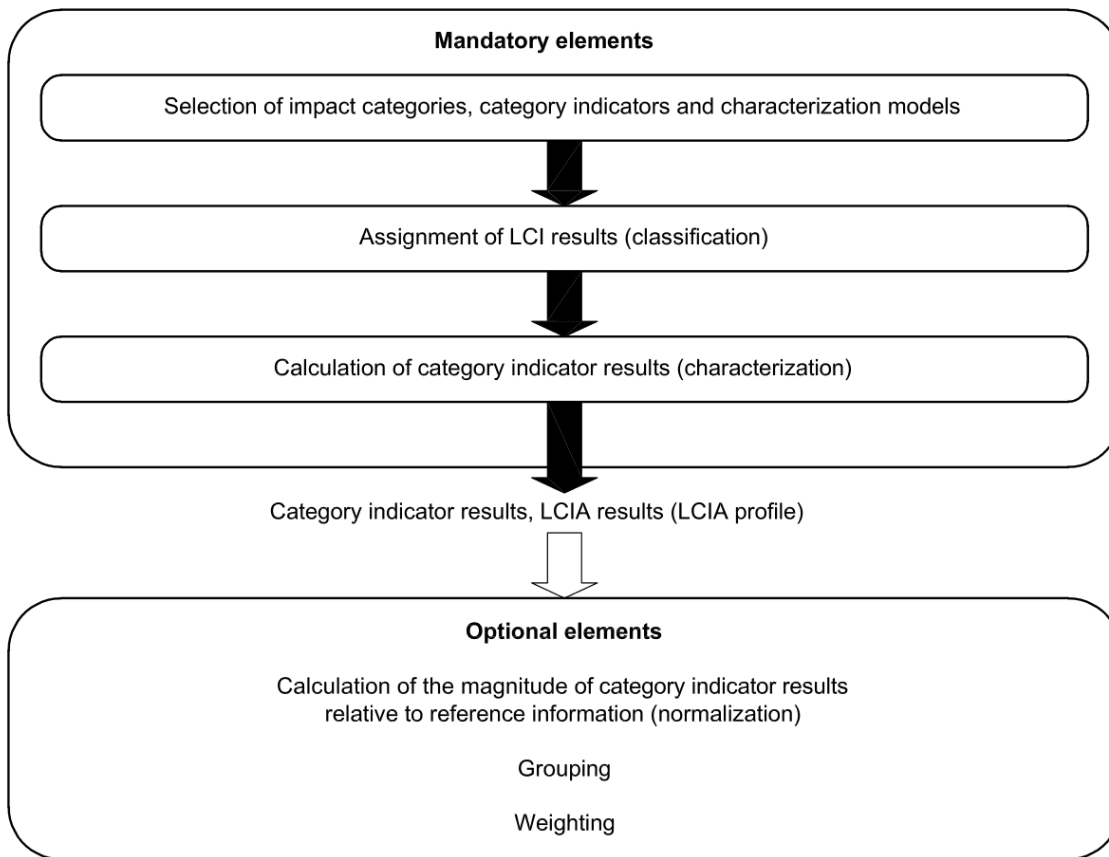
34 Idem, p. 3.

35 ASHBY, Michael F. - Materials and the Enviroment: Eco-Informed Material Choice, p. 42.

36 TORGAL, Fernando P.; et all - A Sustentabilidade dos Materiais de Construção, p. 72.

37 Idem, p. 72.

LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT



Design life of building	Inaccessible or structural componentes	Components where replacement is expensive or difficult (incl. Below ground drainage)	Major replaceable componentes	Building services
Unlimited	Unlimited	100	40	25
150	150	100	40	25
100	100	100	40	25
60	60	60	40	25
25	15	25	25	25
15	15	15	15	15
10	10	10	10	10
NOTE 1 – Easy to replace componentes may have design lives of 3 or 6 years.				
NOTE 2 – Na unlimited design life very rarely used, as it significantly reduces design options.				

17 - Componentes da análise do impacto do ciclo de vida - ISO/TC 207, p. 15.

18 - Sugestão para durabilidade mínima da vida útil para componentes de construção - ISO/TC 59, p. 13.

Diante da multiplicidade de formas de aplicação desta ferramenta de rastreio, em 2006 a *International Organization for Standardization (ISO)* procurou definir diretrizes e estandardizar o método³⁸. De acordo com este documento, os pontos que regem a ACV pretendem auxiliar na:

- Identificação de fraquezas ou oportunidades de aprimorar a ecoeficiência dentro das fases do ciclo de vida de um produto, material ou serviço.
- Tomada de decisão mais consciente ou no planeamento estratégico por oferecer informações relacionáveis sobre diferentes agentes (*informed decision*).
- Seleção dos indicadores de performance ambiental mais relevantes segundo os objetivos do estudo, a incluir os métodos de recolha de dados.
- Marketing de produtos e serviços ao associá-los às informações conseguidas a partir do estudo.

Para realizar os objetivos definidos acima, o estudo organiza-se em quatro fases, as quais apesar de desenvolverem-se de forma linear não são estáticas. Isto significa que em cada momento do estudo as informações mais recentes podem levar a reestruturação de uma ou mais fases do sistema. Estas quatro etapas do LCA podem ser identificadas como: *objetivo e domínio, análise de inventário, análise de impacto e interpretação*.

Assim como sugere o nome da primeira fase, *objetivo e domínio*, nela são definidos tanto o propósito do estudo como a esfera de análise³⁹. Como mencionado anteriormente, a Avaliação do Ciclo de Vida estabelece uma análise comparativa entre agentes, por isso, o seu método de comparação decorre através da criação de uma *unidade funcional*, em outras palavras, um cenário ao qual são submetidos os diferentes objetos de estudo. Por exemplo, para comparar o desempenho funcional e ecológico entre duas tintas, o ponto de partida não deve ser um litro de cara exemplar, pois elas podem não ter o mesmo desempenho de fixação, intensidade de cor e densidade. Nesse caso, a *unidade funcional* mais adequada seria uma que contemplasse os dois elementos em uma situação de igualdade e contabilizasse a vertente temporal característica deste tipo de estudo, por exemplo, “um metro quadrado de superfície pintada com uma densidade particular de revestimento e uma vida útil de dez anos”⁴⁰.

38 ISO/TC 207. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.

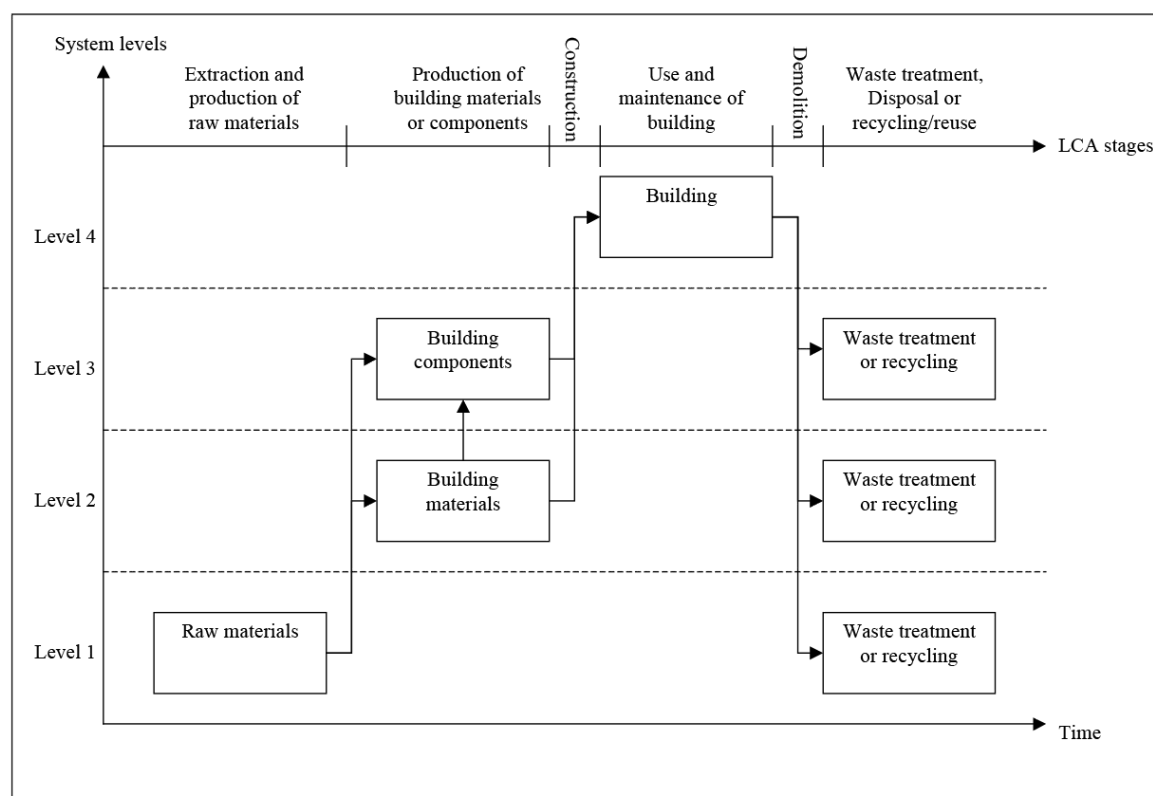
39 PAULSEN, Jaboc - *Life Cycle Assessment for Building Products*, p. 5.

40 Idem, p. 5.

Category	Design service life for building	Examples
Temporary	Up to ten years	• non-permanent construction buildings, sales offices, bunkhouses • temporary exhibition buildings
Medium life	25 to 49 years	• most industrial buildings • most parking structures*
Long life	50 to 99 years	• most residential, commercial, and office buildings • health and educational buildings • parking structures below buildings designed for long life category*
Permanent	Minimum period, 100 years	• monumental buildings (eg, national museums, art galleries, archives) • heritage† buildings

* Parking structures should have a design service life at least equal to the building they serve, except parking structures serving long life category buildings may be designed for medium life provided they are not located directly under the long life superstructure or provided deterioration of the parking structure would not adversely affect the building served. See CSA Standard S413.

† Buildings are not designed as a heritage structures but may be assigned the designation by virtue of their historical significance. One purpose of applying such a designation to a building is to ensure that, henceforth, it will be preserved permanently. The concepts contained in this Guideline will be of assistance in establishing appropriate maintenance and repair programs for designated buildings.



19 - Categorias de tempo de serviço para edifícios. CSA - Standard S478-95, p. 7.

20 - Níveis de sistema e fases do ciclo de vida dos componentes construtivos sob a vertente temporal (tabela gráfica esquemática). PAULSEN, p. 12.

A *unidade funcional* é subdividida em *unidades de processo* que correspondem aos sistemas ou ações necessárias para viabilizar o panorama geral. Estes seguimentos devem transparecer com clareza o limite entre as suas fronteiras na tentativa de facilitar a identificação e quantificação dos *inputs* e *outputs* pertencentes a cada um⁴¹. Dentro da analogia das tintas, um bom exemplo de *unidade de processo* seria o sistema de fabricação da tinta, no qual a água, a energia elétrica e emissão de CO₂ seriam exemplos de insumos e produtos da manufatura da tinta.

Na segunda fase, *análise de inventário* ou *life cycle inventory analysis (LCI)*, desenvolve-se a coleta, codificação da informação e eventuais cálculos relacionados aos *inputs* e *outputs* das *unidades de processo*. Os dados que fazem parte da construção desta etapa incluem⁴²:

- Energia, matéria-prima, produtos auxiliares e outras substâncias.
- Produtos, subprodutos e resíduos.
- Emissão de gases, libertação de resíduos na água e no solo.
- Outros aspetos ambientais.

A exploração dos dados coletados, por vezes, necessita de cálculos que contemplem a validação dos dados adquiridos, a associação entre dados e *unidades de processo* e a associação entre dados e *unidades funcionais*. Além disso, o cálculo do consumo energético deve atentar-se ao tipo de combustível utilizado para a sua produção, a eficiência do processo, os insumos e produtos do sistema e a distribuição desta energia.

A fase três, *análise de impacto* ou *life cycle impact assessment (LCIA)*, concentra-se na avaliação do impacto ambiental potencial de um produto ou serviço a partir das informações sobre os *inputs* e *outputs* introduzidos pelo LCI. Este processo inicia-se por selecionar as categorias e os indicadores ambientais aos quais serão submetidas os dados resultantes da interseção entre o LCI e as questões ambientais relacionáveis⁴³. Estas perturbações ambientais podem ser apontadas na primeira fase do estudo, durante a formulação dos objetivos do LCA. Os erros que podem ocorrer nesta fase do estudo resultam da falta de rigor nos passos anteriores, pois, o LCIA restringe-se a análise dos processos que ocorrem sob o domínio e a partir das informações recolhidas e validadas na fase do inventário⁴⁴.

41 Idem, p. 5.

42 ISO/TC 207 - *Environmental management- Life cycle assessment- Principles and framework*, p. 13.

43 PAULSEN, Jaboc - *Life Cycle Assessment for Building Products*, p. 6.

44 ISO/TC 207 - *Environmental management- Life cycle assessment- Principles and framework*, p. 15.

A *interpretação*, quarta e última fase da Avaliação do Ciclo de Vida, começa por confrontar os dados do inventário (LCI) e do impacto ambiental potencial (LCIA) sob as diretrizes definidas durante a primeira fase do estudo. Como resultado, esta etapa deve fornecer conclusões a respeito das forças e fraquezas de cada sujeito submetido ao ensaio, bem como oferecer recomendações alinhadas aos objetivos definidos na primeira fase⁴⁵.

Esta ferramenta de identificação do impacto ambiental, *Life Cycle Assessment*, é frequentemente utilizada para analisar produtos e serviços com vida útil relativamente curta, normalmente embalagens para transporte ou contenção de substâncias⁴⁶. Nestes casos de análise mais frequentes o período de serviço dos produtos é bem determinado e de fácil rastreio, entretanto, quando este sistema é aplicado à construção civil a compreensão da vida útil dos edifícios, dos seus materiais e dos seus componentes não é uma tarefa tão simples.

Na tentativa de aprofundar o conhecimento científico nesta área, o documento ISO 15686-1 busca entender as nuances da vida útil dos componentes construtivos e dos edifícios⁴⁷. Neste documento, a vida útil ou tempo de serviço (*service life*) é definida como o “período de tempo depois da sua instalação ou construção segundo o qual o edifício e os seus componentes atendem ou superam a performance exigida”⁴⁸. Em relação a esta afirmação, é certo que existem diferentes categorias de materiais de construção, alguns deles são facilmente substituíveis, porém, outros estão de tal forma inseridos nas edificações que a sua manutenção ou substituição é difícil ou financeiramente inviável.

Visto que alguns elementos embebidos nas edificações não são elegíveis para substituição, a vida útil do edifício como um todo fica refém da “capacidade das suas partes de desempenhar as suas funções durante um período específico e sob determinados parâmetros de qualidade”⁴⁹. Neste sentido, os pilares, as vigas e as fundações correspondem aos principais componentes construtivos que, na maior parte dos casos são insubstituíveis, tornam-se responsáveis por ditar o tempo de serviço limite do edificado.

45 Idem, p. 16.

46 PAULSEN, Jaboc - *Life Cycle Assessment for Building Products*, p. 11.

47 ISO/TC 59 - *Building and constructed assets- Service life planning- General principles*.

48 Idem, p. 2.

49 Idem, p. 3.

A *Canadian Standard Association (CSA)*, em conjunto com o Departamento de Obras Públicas e Serviços Governamentais Canadense (PWGSC), criou em 1995 um documento cuja finalidade era prover uma série de recomendações para auxiliar no aumento da durabilidade dos edifícios⁵⁰. Para além de observações sobre os materiais, processos construtivos e de manutenção dos edifícios, as informações disponibilizadas por este ensaio demonstram que, na visão da CSA, a maior parte dos edifícios que compõem as nossas cidades estão inseridos na categoria de edifícios de vida longa.

Partindo do pressuposto que a maior parte do parque edificado urbano tem uma vida útil que oscila dos 50 aos 99 anos, torna-se evidente que mesmo após somar o tempo de fabricação dos componentes construtivos, o processo de edificação e de demolição, o tempo de serviço dos edifícios corresponde à etapa mais duradoura dentro do seu ciclo de vida. Devido ao espaço de tempo extremamente alargado em que se desenvolve na “fase de uso”, a informação disponível sobre os materiais de construção durante o funcionamento do edifício é escassa e muitas vezes baseada em suposições formuladas através de experiências laboratoriais. Contudo, devido a sua importância, a omissão desta fase no processo de Avaliação do Ciclo de Vida pode conduzir a resultados imprecisos.

Para evitar enganos, as seis fases sobre as quais atua a ferramenta ACV podem ser organizadas em quatro níveis⁵¹. Esta abordagem isola as diferentes fases do processo construtivo e obriga uma análise mais completa em relação a fase de uso e manutenção do edificado. Enquanto as fases do ACV estão intimamente ligadas à cronologia dos procedimentos, os quatro níveis correspondem à sistemas complexos de transformação da matéria.

O *nível 1* compreende atividades que decorrem da interação direta com o meio ambiente, pode estar relacionada à extração de materiais primários ou à deposição de resíduos provenientes de quaisquer fases do ciclo de vida. O *nível 2* e *3* engloba o processo de transformação do material bruto em produtos e vice-versa, a diferença entre estes dois níveis fundamenta-se na complexidade dos processos de modificação e dos seus resultados. O *nível 2* inclui a fabricação dos materiais de construção como blocos de cimento ou tijolos, enquanto o *nível 3* compreende a produção de componentes construtivos⁵², nomeadamente, vigas, pilares, paredes e outros.

50 Canadian Standard Association (CSA) - *Guideline on Durability in Building*.

51 PAULSEN, Jaboc - *Life Cycle Assessment for Building Products*, p. 11.

52 Segundo Andrea Deplazes em *Constructing Architecture: Materials, processes, structures*; os materiais de construção correspondem a menor parte dos componentes construtivos, identificados no decorrer do livro como paredes, coberturas, fundações e outros.

Possíveis parâmetros dentro dos indicadores da MARS-SC		
Ambientais	Funcionais	Económicos
Potencial de aquecimento global (PAG)	Isolamento sonoro (condução aérea)	Custo de construção
Energia primária incorporada (PEC)	Isolamento sonoro (percussão)	Custo de manutenção
Conteúdo reciclado	Isolamento térmico	Custo de demolição ou desmantelamento
Potencial de reciclagem	Durabilidade	Valor residual
Potencial de reutilização	Comportamento ao fogo	Custo do tratamento para devolução ao meio ambiente
Quantidade de recursos naturais utilizados	Impermeabilidade	
Toxicidade	Estabilidade	
Acidificação	Comportamento sísmico	
Eutrofização das reservas de água	Construtibilidade	
Quantidade de água incorporada	Flexibilidade	
	Inovação e desenho	

Parâmetros	Peso (%)
Aquecimento global	24
Acidificação	8
Eutrofização	8
Utilização de combustíveis fósseis	8
Qualidade do ar interior	16
Alteração dos habitats	24
Utilização de água	4
Emissão de gases poluentes	8
Criação de “Smog”	6
Toxicidade para os ecossistemas	11
Toxicidade para o ser humano	11
Destruição da camada de ozónio	5

21 - Parâmetros do MARS-SC. MATEUS, R., p. 201.

22 - Peso dos parâmetros na avaliação do desempenho ambiental (EPA) - MATEUS, R., p. 205.

Por fim, o *nível 4*, está inteiramente associado aos processos que decorrem durante a fase de serviço do edificado. Nessa etapa é importante contabilizar os custos ambientais iniciais pois, como indicado no ACV, a simples escolha entre inúmeros materiais e componentes de construção introduz custos ambientais intrínsecos e pressupõe ciclos de vida. Outra questão importante é o tipo e os métodos de manutenção e substituição dos elementos construtivos, fatores importantes para a avaliação do impacto ambiental a longo prazo.

As fases de construção e demolição não são desenvolvidas com muita profundidade pois correspondem à transição dos elementos construtivos entre níveis⁵³. Na construção de um edifício os materiais são organizados para formarem um sistema complexo e nesse processo gasta-se energia elétrica, água, combustíveis fósseis e são liberados resíduos e gases para a atmosfera. Na demolição, ou desconstrução, os insumos consumidos no decorrer do processo podem ser os mesmos, entretanto, a finalidade é reduzir o edifício a materiais e componentes de construção individuais. Dessa forma, as informações relevantes para a Avaliação do Ciclo de Vida são os *inputs* e *outputs* resultantes destas duas etapas.

Os sistemas ACV voltam-se para a avaliação da sustentabilidade na totalidade dos edifícios, de modo que a sustentabilidade das soluções construtivas corresponde à apenas um dos parâmetros de avaliação. Mesmo assim, tais sistemas possuem maior eficiência ao avaliar soluções construtivas com maior quantidade de informação disponível em sua base de dados, ou seja, com maior incidência na localidade onde a ferramenta de avaliação é desenvolvida. Por isto, a sua aplicação em outras localidades torna-se complexa devido a especificidades dos materiais ou componentes de construção, por outro lado, este procedimento pode transformar-se numa atividade morosa e demorada.

Diante dos desafios impostas pelo panorama sustentável estrangeiro, surge a Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC), desenvolvida pelos autores Ricardo Mateus e Luís Bragança. Este método assenta na avaliação das soluções construtivas em três níveis: ambiental, funcional e económico⁵⁴.

53 PAULSEN, Jaboc - *Life Cycle Assessment for Building Products*, p. 12.

54 MATEUS, R. - *Tecnologias Construtivas para a Sustentabilidade da Construção*, p. 198.

O parâmetro ambiental considera o impacto potencial das soluções construtivas sobre o meio ambiente. Fazem parte das principais considerações o potencial de aquecimento global (PAG), a energia primária incorporada (PEC), poluição e utilização de água, potencial de reciclagem e de reutilização.

O parâmetro funcional avalia a sustentabilidade das soluções construtivas, sendo elas paredes exteriores, paredes interiores, lajes, coberturas e etc. Portanto, este ponto sujeita-se à diferentes exigências em concordância com o elemento avaliado.

Por fim, o parâmetro económico encontra desafios semelhantes na medida que os preços dos materiais de construção alteram conforme forças externas e imprevisíveis. Para além disso, existem diversos custos vinculados à construção, nomeadamente, a produção, o transporte, o custo da mão-de-obra, da manutenção, do pós-tratamento e outros. Deve-se, ainda, incluir o valor residual de cada solução na avaliação económica.

Vale ressaltar que já se teorizou amplamente a respeito do peso dos parâmetros ambientais, dentre os estudos destacam-se aqueles realizados pela *United States Environmental Protection Agency* (EPA). Neles, doze parâmetros ambientais foram analisados tendo em conta seus efeitos nocivos ao meio ambiente. Em relação ao sistema MARS-SC, na ausência de estudos locais que identifiquem e sustentem a determinação da relevância dos parâmetros, devem ser considerados aqueles apontados pelo EPA⁵⁵.

55 MATEUS, R. - *Tecnologias Construtivas para a Sustentabilidade da Construção*, p. 205.

2. O Betão e a Madeira

2.1. Contexto histórico

O betão é um material composto por inertes, água e cimento, pertence à classe dos materiais cerâmicos e carrega no seu ADN uma herança tecnológica com mais de doze mil anos que consiste numa massa hidráulica que enrijece na presença de água. O elemento que carrega este legado construtivo é o Cimento Portland, um aglomerante hidráulico inventado no século XIX. É muito provável que a invenção da versão primitiva do cimento tenha sido um acaso, esta afirmação nasce do facto de ter-se identificado edificações com mais de 12000 anos em que uma tecnologia semelhante é utilizada. Por volta da mesma época foram encontrados traços de cal hidratada na Palestina e no Egipto⁵⁶.

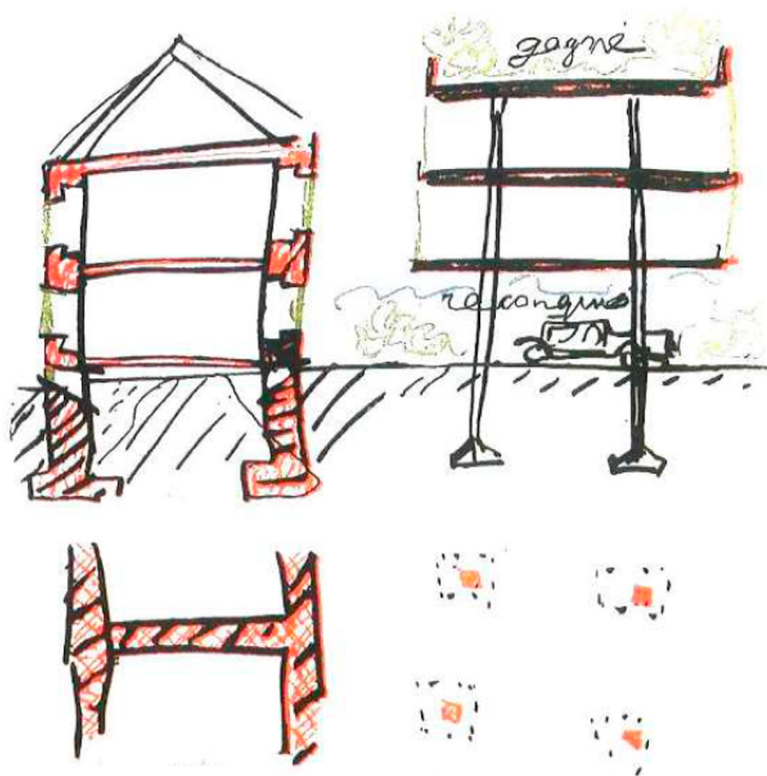
Um milénio antes de Cristo, foi descoberto pelos fenícios que ao misturar cinzas vulcânicas com cal, areia e água, obtinha-se uma massa impermeável que se tornava rígida. Os responsáveis por elevar a utilização deste aglomerante hidráulico foram os romanos, chamavam-no de *opus caementitium*, uma argamassa com características muito semelhantes ao cimento. Graças a esta invenção os espaços obtidos através da arte edificatória romana perduraram até os dias de hoje⁵⁷. No entanto, durante a Idade Média o “cimento romano” caiu em desuso e foi substituído por uma mistura, as vezes de barro e cal, outras de barro e areia. Não se sabe a real motivação por trás do abandono deste material que provou sua eficácia ao longo dos anos por um material de menor desempenho. Pode-se teorizar que um dos motivos tenha sido a dificuldade de obtenção da cinza vulcânica, uma substância pouco comum, restrita a localidades próximas à vulcões.

Até o início do século XVIII não houve nenhum avanço significativo no desenvolvimento de materiais ligantes. Quando, no ano de 1729, Bernard Forest de Bélidor publicou um manual de construção civil denominado *La Science des Ingénieurs*, livro no qual são descritos os processos de produção para diferentes tipos de argamassas ligantes a base de cal e com aditivos hidráulicos diversos. Neste trabalho, também foram enunciadas experiências com abóbadas moldadas in situ a partir do preenchimento de cofragens a partir de argamassas com cal hidratada. Mais tarde, em 1753, o mesmo autor publicou outro manual com nome de *architecture hydraulique*; onde surge pela primeira vez o termo “béton” para designar uma pasta resistente a água com capacidade de solidificação⁵⁸.

56 KID-BARKAUSKAS, Friedbert; et al. - *Concrete Construction Manual*, p. 9.

57 Idem, p. 9.

58 Idem, p. 11.



23 - Desenho de Corbusier sobre o impacto da Revolução Industrial nas formas construtivas.

A invenção do cimento Portland, composto maioritariamente por calcário descarbonizado e argila, é atribuída ao inglês Joseph Aspdin que no ano de 1824 patenteou o protótipo. No século XIX o cenário tecnológico estava na iminência de um grande salto tecnológico, como consequência desta onda de desenvolvimento científico e percebido o valor daquele material, o protótipo do cimento levou apenas 20 anos para alcançar características muito próximas ao que existe hoje⁵⁹. Sua produção e utilização tem aumentado exponencialmente desde então.

Para compreender a relevância deste material de construção é preciso entender a revolução que as características estéticas e o seu desempenho trouxeram para o universo da edificação e, por consequência, à prática da arquitetura. Como indicado anteriormente, durante a maior parte da existência humana as edificações eram feitas inteiramente com materiais naturais e homogêneos, dos quais podemos citar a madeira, pedra, argamassa de cal, argila, palha e o junco. Apenas no século XVIII foi introduzido o metal e no séc. XIX o aço, estes dois materiais foram responsáveis por potencializar o desenho estrutural dos espaços edificados graças a sua capacidade de resistir à compressão e à tração simultaneamente. Capacidade que, antes destas ligas metálicas serem introduzidas na construção civil, era atribuída apenas à madeira⁶⁰.

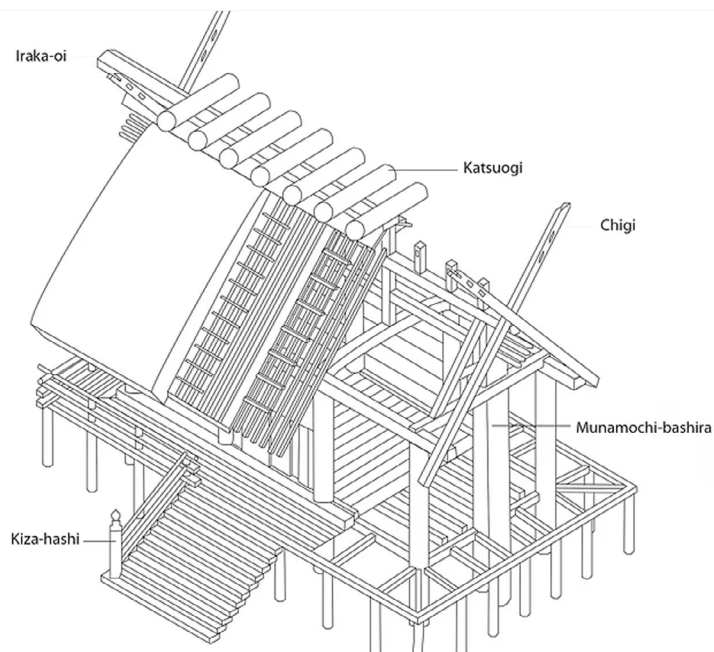
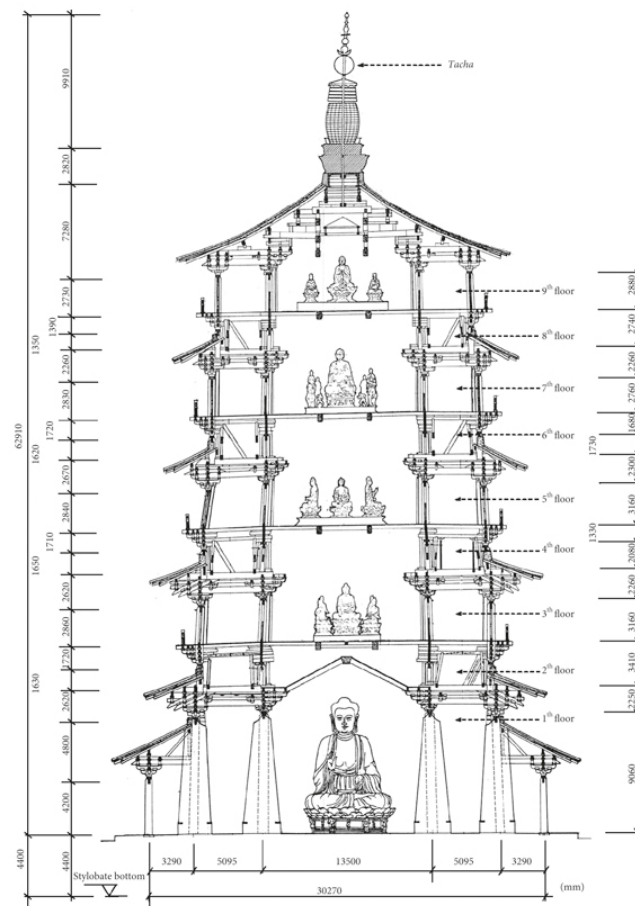
O betão armado acabou por se converter num dos símbolos deste movimento por causa das suas qualidades físicas e estéticas. Estas são o culminar da potencialidade do aço e do betão onde a soma dos dois excede o potencial de cada um individualmente. Podemos defini-lo muito bem com a palavra maleável, para além de assumir qualquer forma é possível regular seu desempenho para que corresponda de maneira precisa à demanda. Este material viabilizou formas espaciais que ultrapassavam o potencial dos antigos materiais e métodos construtivos, inaugurando uma série de dispositivos construtivos que podem ser muito bem representados pelos cinco pontos da arquitetura moderna⁶¹.

Le Corbusier (1887- 1965), o criador deste manifesto, foi uma figura indispensável no desenvolvimento da linguagem arquitetónica do betão armado. As experiências conduzidas por ele fizeram com que a linguagem deste material, que já dominava a técnica, transitasse para a expressão plástica. Para além de ser um dos primeiros a introduzir elementos pré-fabricados no universo da arquitetura, ao arquiteto Le Corbusier é atribuída a invenção do *brise-soleil*, um dispositivo que para além do controle da incidência do sol trazia certa plasticidade aos alçados.

59 BERGE, Bjørn - *Ecology of Building Materials*, p. 92.

60 KID-BARKAUSKAS, Friedbert; et al. - *Concrete Construction Manual*, p. 16.

61 Idem, p. 25.



24 - Corte do Templo Pagode de Fogong.

25 - Desenho esquemático do Templo de Ise.

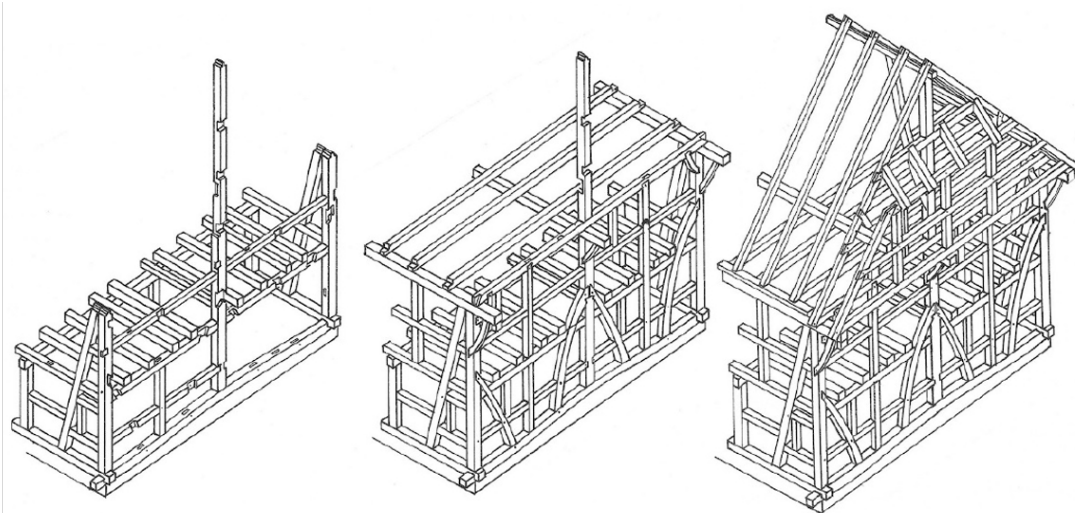
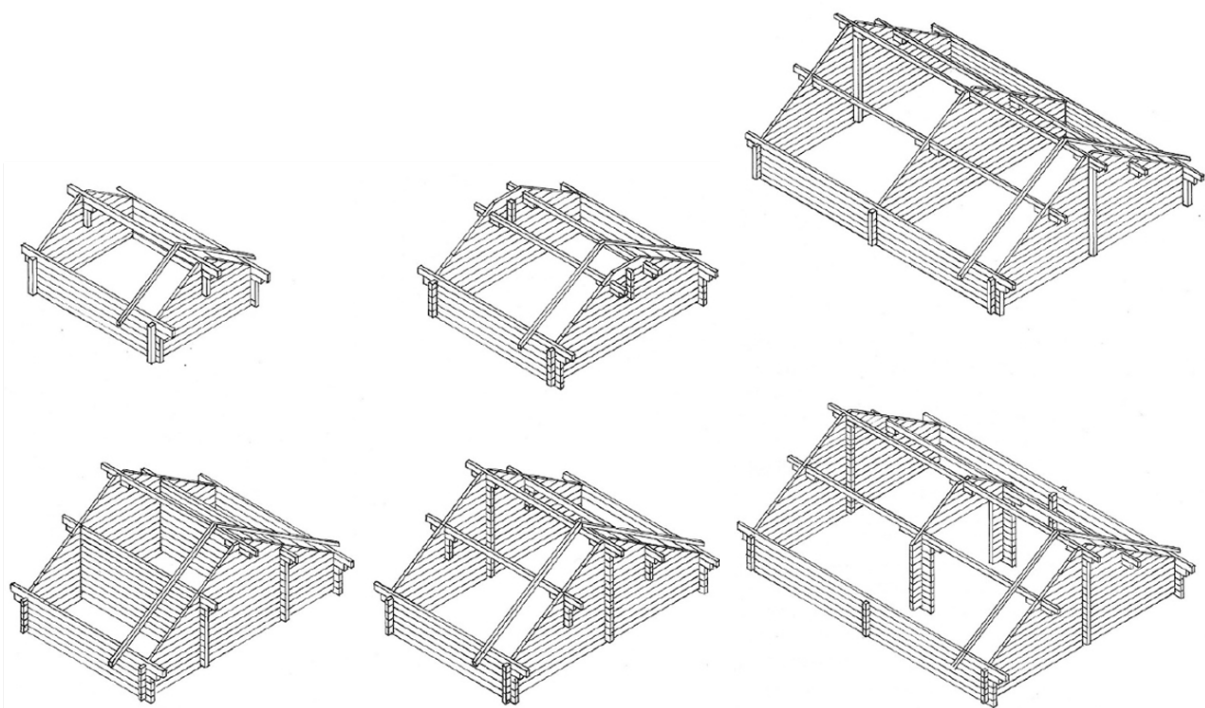
Na arquitetura de Le Corbusier se compreendeu a versatilidade do betão, percebida a partir do sistema construtivo formado por pilares e vigas da Dom-ino House (1914), até a cobertura amorfa da capela de Notre-Dame-du-Haut (1955) em Ronchamp⁶². O próprio Le Corbusier evidenciou num desenho a diferença entre o antigo método construtivo das paredes portantes e a nova liberdade plástica dos alçados. Esta autonomia foi conquistada a partir da possibilidade de desvincular os elementos que encerram os espaços da função estrutural, conseguida através do novo material.

Em relação a madeira, pode-se afirmar que foi o primeiro material de construção com que os seres humanos tiveram contacto e que a forma construtiva desenvolvida a partir dela foi o ponto de partida para todos os sistemas construtivos que vieram a seguir. A madeira é uma matéria-prima abundante e versátil, graças a isto foi rapidamente difundida pelo mundo independentemente da crença, geografia e clima. Por ser um material utilizado em diferentes partes ao redor do globo e por sua versatilidade, surgiram diversas linguagens arquitetónicas no processo de adaptação do material ao meio sociocultural e geográfico. No início, prevaleciam as formas simples de compartimento único, posteriormente estas formas tornaram-se cada vez mais complexas e passaram a comportar compartimentos internos. A madeira ainda que não fosse o elemento principal da composição construtiva até a invenção das abóbadas era a única opção para fechamento dos espaços e coberturas. Há pouco mais de quatro mil anos os gregos incorporavam a madeira na composição de coberturas, as quais podiam vencer até 15 metros de comprimento⁶³.

Em oposição a arquitetura de pedra nas margens do mediterrâneo, Herzog ainda afirma que no Japão a madeira foi utilizada como o material primário de construção desde o período Jomon (3500- 300 a.C.). Nos 600 anos seguintes, uma retórica construtiva se tornou recorrente na edificação de templos religiosos japoneses, foi canonizada a arquitetura do xintoísmo, o credo mais antigo documentado no Japão. Dentre estes templos podemos apontar aquele dedicado a deusa Amaterasu, localizado na província de Mie e construído em 692. Este templo é composto pela união de diversos edifícios construídos quase exclusivamente em madeira, os quais são inteiramente reconstruídos a cada 20 anos em uma cerimónia religiosa chamada de *Shikinen Sengu*.

62 Idem, p. 28.

63 HERZOG, Thomas; et al. - *Timber Construction Manual*, p. 25.



26 - Variações da organização interior na construção com toros de madeira maciça. SILVA, p. 193.

27 - Fases de construção da estrutura de uma habitação em amarração de madeira maciça com cobertura de duas águas. SILVA, p. 205.

O autor também faz uma comparação entre o Japão e a China, onde o Templo Pagode de Fogong, construído em 1056 durante a dinastia Liao, revela a importância da construção em madeira nesta localidade. Este edifício religioso demonstrou grande resiliência ao sobreviver à vários desastres naturais e por isto se tornou um ícone do budismo. Como se não bastassem as intempéries naturais, existia o costume de que a cada nova dinastia os edifícios pertencentes aos monarcas anteriores fossem destruídos como forma de afirmação de um novo reinado. Este templo é o pagode, torre com múltiplos beirais, totalmente construído em madeira mais antigo da China e atinge uma altura de 67,32 m. O rés-do-chão é o único onde vemos os pilares de madeira envolvidos por uma espessa parede de adobe encerrando o piso térreo, os oito pisos superiores são constituídos inteiramente por madeira.

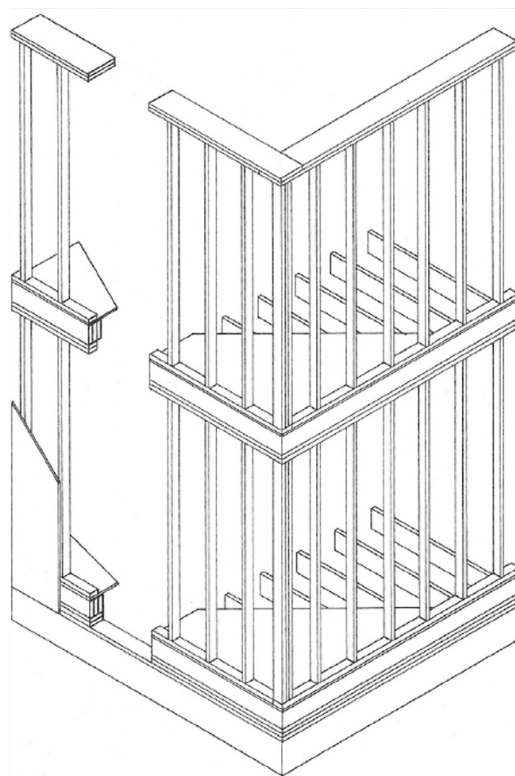
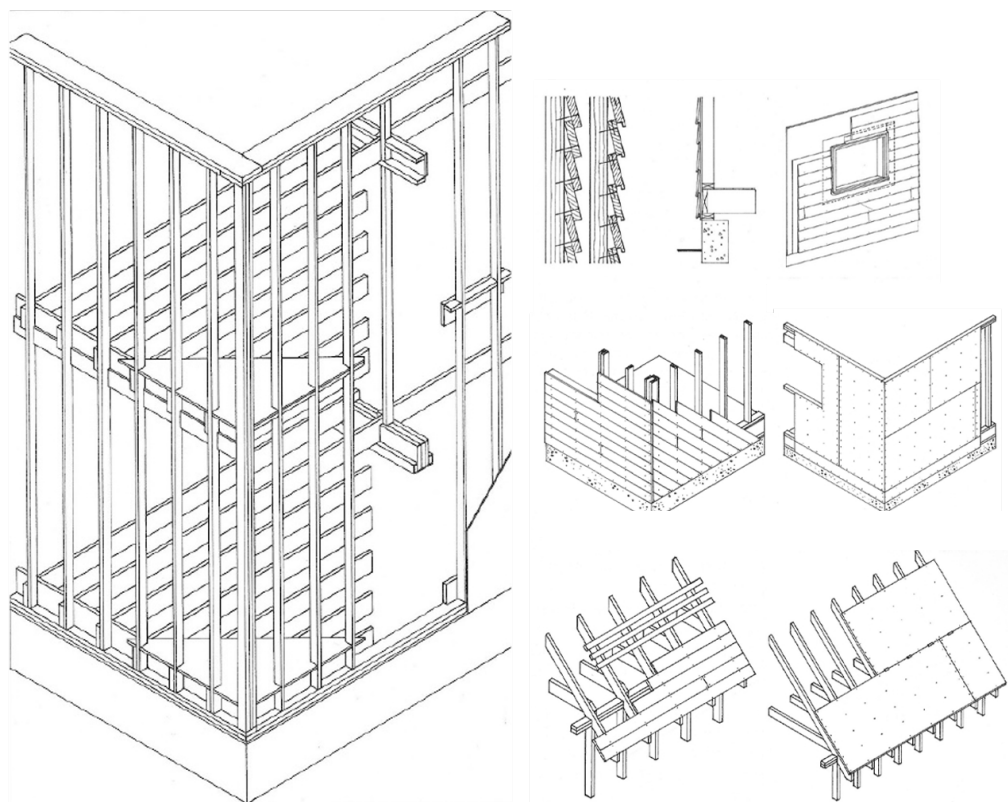
Já nas regiões mais ao norte da Europa a construção em *toros de madeira maciça* foi uma das primeiras a ser difundida e acredita-se que foi desenvolvida no período Neolítico⁶⁴. Este sistema edificatório é composto por paredes portantes conseguidas a partir do empilhamento de toros de madeira na horizontal, limitando o número e a envergadura das aberturas nas paredes exteriores. A ideia mais aceite é que este tipo de construção chegou ao norte europeu a partir das incursões vikings em territórios que atualmente pertencem a Rússia, ainda que esta forma de construção mais rústica não fosse a melhor diante do clima intenso e das intempéries mais severas da região norte, correspondia ao ápice da técnica edificatória em madeira daquele povo.

A construção em *toros de madeira maciça* evoluiu e os toros começaram a ser esquadrihados para minimizar o possível aparecimento de frestas entre os perfis e melhorar o conforto no interior dos espaços. Embora este sistema construtivo seja utilizado atualmente, diante das exigências de conforto térmico, teve de se reinventar e o fez através da introdução de uma segunda linha de parede, a qual permitiu a aplicação de isolamento térmico e fechamento dos sistemas complementares do edifício, nomeadamente, água, eletricidade e outros.

Em contraponto, na Europa central as técnicas de construção por *armação de madeira maciça*, se desenvolveram na Idade do Bronze⁶⁵. Este sistema construtivo foi o mais utilizado na Europa medieval e sua persistência ao longo do tempo possibilitou o surgimento de variantes tipológicas e tecnológicas. Desde o princípio ficou evidente a necessidade de escoramento e triangulação na estrutura, onde os elementos verticais e horizontais precisavam de um terceiro, composto por um perfil na diagonal ou dois a formar uma cruz de amarração.

64 OLIVER, P. - *Encyclopedia of Vernacular Architecture of the World*, p. 1381.

65 Taylor, S. G; et al. - *La Madera*, p. 64.



28 - Aplicação horizontal do revestimento exterior em escamas e corte construtivo. Revestimento estrutural das paredes com tábuas na horizontal ou diagonal e revestimento em contraplacado. Revestimento estrutural da cobertura com tábuas ou contraplacado. Composição conseguida a partir da montagem de imagens em SILVA, p. 211.

29 - Sistema Platform Frame: a estrutura do pavimento torna-se independente da estrutura das paredes e oferece uma plataforma onde assentam as paredes do piso seguinte. Composição conseguida a partir da montagem de imagens em SILVA, p. 209.

Esta forma construtiva mais leve, adaptada a climas mais amenos e com boa resistência a água foi muito influenciada pelas tecnologias navais da época. Por mais que esta tecnologia tenha sua origem na europa central, chegou até a península ibérica e às margens do mediterrâneo onde o clima brando destas localidades permitiu a utilização do espaço exterior como extensão da casa, isto fez com que a organização dos espaços e alguns conceitos estruturais passassem por transformações⁶⁶.

Em Portugal este sistema é mais conhecido como *tabique* e nele a parede exterior era normalmente revestida com reboco ou soletos de ardósia. No princípio o rés-do-chão era marcado pelo encontro dos montantes de madeira com o solo, entretanto, devido a necessidade de evitar patologias relativas a humidade a madeira do primeiro piso foi gradualmente substituída por pedra. A estrutura em madeira dos pisos superiores avança em relação ao plano da fachada do rés-do-chão criando o sobrado, dispositivo que além de mitigar os efeitos da água na junção da madeira com a pedra demonstra uma adequação de soluções construtivas à funcionalidade e ao clima⁶⁷.

O *Balloon Frame* surgiu nos Estados Unidos da América no final do século XIX e foi o primeiro sistema industrializado de construção de edifícios⁶⁸. Embora existam divergências em relação a sua origem a teoria mais aceita é que o sistema construtivo norte americano é uma evolução da *amarração de madeira maciça*. Este método edificatório é constituído por uma estrutura linear portante composta por dois tipos de perfis de madeira, perfis verticais chamados de prumos (5cm x 10cm) e perfis horizontais batizados de vigas (5cm x 20cm). Estes dois elementos apresentam dimensões reduzidas quando comparados ao sistema medieval europeu, pois o método de construção norte americano desenvolveu-se num cenário de adaptação às especificidades americanas e a necessidade de construir de forma rápida durante a ocupação da parte Este do atual território estadunidense⁶⁹.

Nas construções em *Balloon Frame* os prumos prolongavam-se do rés-do-chão até o topo do edificado, herança da *armação de madeira maciça*, contudo, diante da necessidade de tornar a matéria-prima ainda mais eficiente e fácil de ser transportada fez com que esta maneira de edificar evoluísse rapidamente para o *Platform Frame*.

66 HERZOG, Thomas; et al. - *Timber Construction Manual*, p. 28.

67 SILVA, A. - *A Madeira na Arquitetura*, p. 207.

68 BENEDETTI, C. - *Legno Architettura. I futuro della tradizione*, p. 139.

69 SILVA, A. - *A Madeira na Arquitetura*, p. 208.

Neste último manteve-se as dimensões dos perfis, mas os prumos já não apresentam continuidade entre os pisos, sobre as paredes portantes apoia-se uma plataforma que recebe a estrutura de sustentação e fechamento do piso superior e assim progressivamente. Esta plataforma também está presente na transição entre o solo e o edificado, desta forma os prumos não descarregam diretamente na viga de fundação, mas numa plataforma apoiada sobre a viga⁷⁰.

70 Idem, p. 212.

2.2. Tecnologias atuais do betão

Com o fim do Movimento Moderno, a pós-modernidade aflorou discussões sobre o desenvolvimento sustentável e a sustentabilidade dos materiais de construção. Isto porque, 150 anos após a Revolução Industrial, tomamos consciência de que a nova dinâmica de consumo e o ritmo intenso de produtividade, somados ao aumento exponencial da população, culminariam no eventual esgotamento das matérias-primas não renováveis.

Antes desse marco, edificação e natureza mantinham uma relação muito mais harmónica, em certa medida pela utilização de materiais naturais. Contudo, no início do século XIX as estruturas em madeira são substituídas por estruturas metálicas e o betão substitui a pedra no cenário estrutural. Este foi o ponto chave na passagem de materiais naturais para materiais artificiais. No início do século XX o betão armado sobrepõe-se o aço na execução de grandes obras estruturais, 20 anos depois o alumínio substitui a madeira em elementos construtivos auxiliares como portas e janelas. Todo este movimento culmina, ao final do século XX, na consagração dos polímeros como substitutos principais da madeira e da cerâmica, revelando as tendências do novo panorama edificatório.

Dentro deste cenário, o betão é o material de construção mais utilizado e, depois da água, é a substância mais consumida no mundo⁷¹. Isto por causa das suas propriedades químicas, mecânicas, da sua fácil utilização, fabricação e da matéria-prima necessária para a produção do cimento ser abundante em quase todas as partes do mundo. Este material de construção é indispensável para a edificação de infraestrutura, das quais podemos citar os sistemas de abastecimento de água, produção de energia elétrica, sistema de esgoto, hospitais, e outras obras de grande porte. Para além destas, o betão também conquistou espaço em edifícios plurifamiliares com dimensões reduzidas e edifício unifamiliares, como discutido anteriormente, tornando-se uma substância indispensável para o desenvolvimento técnico e fortemente presente no desenvolvimento cultural.

71 MEHTA, P. et al. - *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*.

Como já mencionado, este material é obtido através de uma mistura composta por cimento, inertes e água. Os inertes são elementos agregados a mistura que podem ser de origem rochosa, arenosa ou sintética. Para além de conferir preenchimento e estabilidade à massa, quando bem determinados podem auxiliar na redução no custo e no impacto ambiental do todo. Sua classificação é feita com base na dimensão das suas partículas, granulometria, e podem ser divididos em duas categorias, inertes grossos e inertes finos, cujos principais representantes são, respetivamente, o cascalho e a areia com base de sílica. Estas partículas podem corresponder de 60 a 80% do volume total do betão, sua dimensão e característica são grandezas variáveis que se alteram de acordo com o tipo de função pretendida para o produto final.

Atualmente, a produção de cimento Portland corresponde a 79% do consumo energético final do betão, em números isto corresponde até 3000 Kj/Kg, mesmo após quase 200 anos de melhoramento tecnológico na sua cadeia de produção. Contudo, existem características a cerca deste material que não podem ser mitigadas com tecnologia, um exemplo é a obtenção de matéria-prima. Este processo ocasiona impactos ambientais devido à extração de recursos naturais não renováveis e devido à utilização de combustíveis fósseis. Este facto faz com que a indústria do cimento seja responsável por 8% da emissão global anual de CO₂. O gás carbónico é o expoente máximo dentro do grupo dos gases de efeito de estufa (GEE), associados ao agravamento das alterações climáticas devido à sua capacidade de aprisionar energia no espectro infravermelho (radiação). Em 2006 foram produzidos 2,6 milhões de toneladas de cimento Portland, um cálculo rápido permite supor que, neste mesmo ano, foram produzidas 6,5 milhões de toneladas de betão, fazendo desta indústria a maior consumidora de recursos naturais do planeta. Estima-se que a produção anual de cimento possa atingir 5,6 bilhões de toneladas em 2050⁷².

Após entender a dimensão da indústria da construção, em especial a representatividade que a produção do cimento detém neste meio, fica claro que algo deve ser feito para mitigar os efeitos nocivos deste material. Em suma, existem dois pontos que podem ser enquadrados como os principais responsáveis pelos impactos ambientais da produção de betão. O primeiro é a extração de matéria-prima, o segundo, a quantidade de cimento Portland utilizado. A forma mais eficaz, a curto e longo prazo, de minimizar a repercussão de um material de construção é, se possível, diminuir a produção e consequentemente o seu consumo, todavia, o betão é tão necessário que um cenário onde a sua utilização é inteiramente substituída é impensável. Portanto, resta-nos recorrer à ecologia industrial, ramo das ciências ambientais cujo objetivo é análise de processos industriais e do seu impacto nos ecossistemas naturais, e à economia circular.

72 TORGAL, Pacheco; et al. – *A sustentabilidade dos materiais de construção*, p. 124.

A extração de matérias-primas para a manufatura do betão, em especial os inertes, são obtidas a partir da moagem de rochas e areia, tais insumos, além de substâncias não renováveis, têm sua extração e transporte indissociável da utilização de combustíveis fósseis. Por mais que não possamos reduzir a produção do betão, podemos decrescer a demanda por inertes substituindo-os por agregados reciclados obtidos através da demolição ou por subprodutos de outras indústrias. Na luta por uma construção mais sustentável, a reutilização e a reciclagem de resíduos dos estaleiros de obra, bem como de outros setores industriais, deveria surgir como um imperativo a nível global.

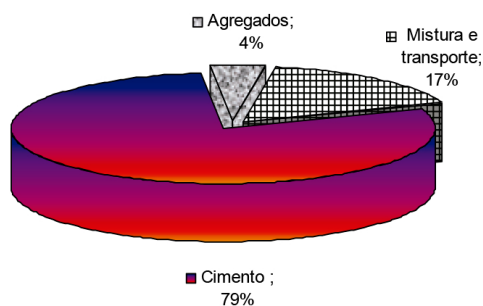
Em Portugal, este processo de substituição teve seu primeiro projeto de regulamentação apresentado no ano de 2006, por meio da especificação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC E 471. Em Portugal encontram-se em implementação políticas específicas no âmbito da gestão dos resíduos de construção e demolição, nomeadamente o Decreto-Lei n.º 46/2008, este foi o primeiro passo na definição dos requisitos exigidos para reintegração de resíduos, em particular como inertes reciclados grossos no fabrico de betões com ligantes hidráulicos⁷³. Em harmonia com o artigo publicado pelo LNEC os materiais a serem utilizados devem, de maneira indiscutível, atender à algumas exigências técnicas e ambientais pré-estabelecidas.

O processo de reciclagem começa por analisar os materiais elegíveis para reutilização, após a sua determinação inicia-se a demolição e o processamento destes resíduos, estes processos podem ocorrer em centrais de reciclagem ou *in situ* mediante ao auxílio dum maquinário apropriado. Este procedimento é desenvolvido em 4 etapas: triagem, redução primária, britagem e peneiração.

A função da primeira operação é retirar as substâncias indesejadas do processo, por exemplo: plástico, borracha, madeira, cartão, papel, metais e matéria orgânica. Em seguida, a redução primária é a fase em que o entulho passa pela primeira moagem e resíduos inapropriados continuam a ser retirados. Segue a terceira fase, britagem, na qual a granulometria das partículas é gradualmente ajustada para a quarta fase, peneiração, onde as partículas de diferentes tamanhos são separadas e classificadas. Estes resíduos de construção e demolição (RCD) são separados e categorizados segundo a sua procedência para que possam ser organizados em diferentes proporções para compor três classes de agregados: ARB1, ARB2 e ARC.

73 LNEC - *Guia para utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos*.

Consumo de energia - Betão Pronto C16/20
275 Kwh/m³



Classe	Proporção dos constituintes (EN 12620:2002/A1:2008))					
	R_c (%)	$R_c + R_u$ (%)	R_b (%)	R_s (%)	$X + R_g$ (%)	FL (%)
ARB1	≥ 90		≤ 10	≤ 5	$\leq 0,5$	≤ 2
ARB2	≥ 70		≤ 30	≤ 5	≤ 1	≤ 2
ARC	≥ 90			≤ 10	≤ 2	≤ 2

CONSTITUINTES (EN 933-11):

- R_c – betão, produtos de betão e argamassas;
- R_u – agregados não ligados, pedra natural e agregados tratados com ligantes hidráulicos;
- R_g – materiais betuminosos;
- R_b – elementos de alvenaria de materiais argilosos (tijolo, ladrilhos, telhas, etc.), elementos de alvenaria de silicatos de cálcio e betão celular não flutuante;
- R_s – vidro;
- FL – material flutuante em volume;
- X – outros: materiais coesivos (p.ex. solos argilosos), plásticos, borrachas, metais (ferrosos e não ferrosos) madeira não flutuante e estuque.

Classe de agregado reciclado	Classe de resistência	Percentagem de incorporação	Classe de exposição ambiental ⁽¹⁾
ARB1	C 40/50	25 %	X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XS1, XA1 ⁽²⁾
ARB2	C 35/45	20 %	

(1) Conforme definida na norma NP EN 206-1.

(2) Em fundações.

30 - Consumo de energia dos processos de fabricação do betão. *TORGAL*, p.123.

31 - Classificação dos agregados reciclados grossos. *LNEC*, p. 3.

32 - Condições de aplicação de inertes reciclados para classes de resistência em betões. *LNEC*, p. 5.

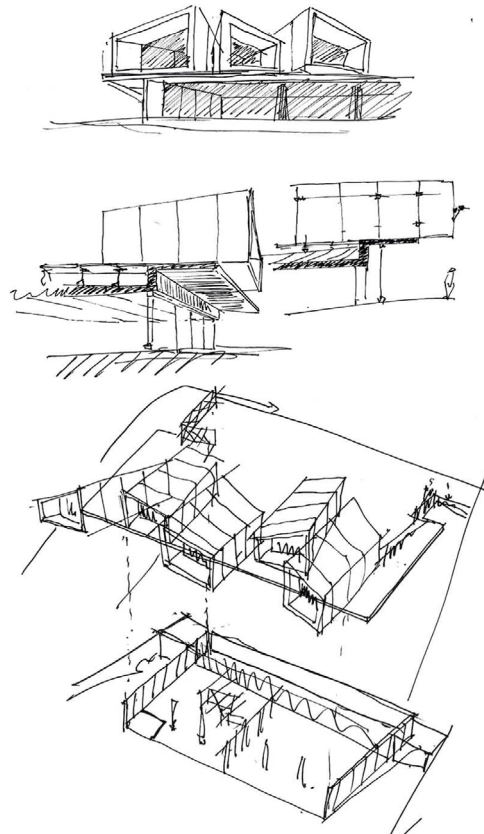
Os grupos de agregados reciclados ARB1 e ARB2 correspondem a proporções sugeridas entre os setes tipos de agregados grossos reciclados de uma construção tipo. Estas duas mesclas de partículas recicladas podem ser utilizadas na produção de betão estrutural e corresponder até 25% em betões simples e 20% em betões armados. Os agregados reciclados ARC são destinados a betões sem função estrutural, mais especificamente de enchimento ou regularização, e em ambientes sem agressão química.

De igual forma, a absorção de subprodutos de outros setores pode ajudar a diminuir a quantidade de cimento Portland nas edificações onde a exigência de desempenho é menor, como é o caso dos edifícios de habitação. Um destes substitutos é a pozolana, material capaz de substituir parcialmente o cimento Portland. Contudo, diante da transição rumo a energias mais ecológicas, o estoque de cinzas vulcânica e substância com características pozolânicas, provenientes da queima de carvão ou de centrais de biomassa, pode diminuir significativamente nos próximos anos. Diante disso, cresce a busca por outros resíduos capazes de desempenhar o mesmo papel.

Em Portugal, tornam-se cada vez mais comuns estudos, semelhantes àqueles conduzidos pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto⁷⁴, com a finalidade de identificar subprodutos de indústrias variadas com potencialidades pozolânicas. Algumas das substâncias estudadas são: vidro moído, cinzas volantes de biomassa, resíduos da queima de detritos florestais, cinzas de casca de arroz e griz (resíduo proveniente da indústria do papel). A conclusão destes estudos constatou que a maior parte destes aditivos contribuem para a redução do cimento Portland na fabricação de betão.

Pode-se apreender que estes estudos levam em conta que em Portugal existe grande quantidade de eucaliptos, principal matéria-prima na produção de papel e que devido à um clima com altas temperaturas, são necessárias medidas de controlo e limpeza destas áreas florestais. A transformação dos resíduos derivados destas ações de segurança pública em subprodutos para o betão, tornam estudos desse âmbito ainda mais interessantes sob uma ótica nacional de segurança e sustentabilidade.

74 COUTO, Joana S. - *Betões eco-eficiente com resíduos*.



33 - Painél de betão pré-fabricado.

34 - Painéis alveolares de betão armado pré-esforçado.

35 - Manuseio de um painél alveolar em obra.

36 - Esquiços Atelier SUMMARY.

37 - Instalação de uma viga pré-fabricada de betão armado

38 - Projeto Vale de Cambra, Atelier SUMMARY.

Outro caminho dentro da busca por uma maior sustentabilidade reside num processo de conversão de ganhos. Esta abordagem justifica a utilização de recursos não renováveis, apesar de não os promover, quando os ganhos materiais ou económicos beneficiam os sistemas naturais ou contribuem para o desenvolvimento da produção de energia renovável⁷⁵. Um cenário hipotético desta conversão seria, investir na produção de energia solar utilizando o capital gerado através da extração e comercialização de combustíveis fósseis; ou ainda, a utilização de parte da energia conseguida através da queima de combustíveis fósseis para reflorestamento.

Esta forma de abordagem é referida por alguns autores como “sustentabilidade fraca”⁷⁶ por não contribuir ativamente para a redução de processos fundamentados em substâncias não renováveis, contudo, qualifica-se como uma ação sustentável. Tal princípio é encontrado na base de novos produtos da indústria cimenteira como o Betão Verdi Zero, material de construção produzido pela Secil e referido pela mesma como o primeiro betão neutro em carbono de Portugal.

Para que este produto conquistasse o certificado *CarbonNeutral*, a empresa utilizou um sistema de compensação de emissões de CO₂. Este sistema apoiou-se em iniciativas ambientais, em especial nas áreas de reflorestamento, produção de energia em parques eólicos e na promoção do aquecimento de águas através da energia solar. O crédito de carbono gerado por estas iniciativas é capaz de neutralizar as emissões de carbono da produção do Betão Verdi Zero.

A Secil apostou na sistematização das etapas do ciclo de vida do produto, semelhante a uma análise *LCA*, facto que possibilitou um olhar mais atento à algumas etapas, nomeadamente, a dinâmica de transporte, extração de matéria-prima e da produção. Em relação a fabricação deste material, foram introduzidos subprodutos de outros setores industriais como matéria-prima para diminuir a quantidade de cimento Portland e de inertes. Nota-se, portanto, uma clara adesão ao sistema de economia circular⁷⁷ na produção do Betão Verdi Zero.

Para além destas medidas anteriores, reciclagem, compensação de carbono e economia circular, a pré-fabricação pode ser uma mais-valia na redução do impacto ambiental, principalmente quando somada às ações anteriores. Os elementos pré-fabricados de betão não invalidam a polivalência do material que, mesmo quanto transformado em peças industrializadas, pode desempenhar distintas funções, a saber, pilares, vigas, lajes, fechamento de fachada e outros.

75 KIBERT, Charles J. - *Sustainable construction*, p. 97.

76 Idem, p. 97.

77 SECIL – Verdi Zero.



39 - Cité manifeste, Rés-do-Chão em fase de obra.

40 - R/C mais instalação do primeiro piso.

41 - Estruturas primárias R/C e Piso 1 finalizadas.

42 - Cité manifeste, Alçado concluído.

43 - Cité manifeste, Interior concluído.

A junção destes elementos resulta num sistema portante totalmente modular, a partir do encaixe entre as peças, com a capacidade de ser desvinculado totalmente dos outros sistemas do edifício, nomeadamente os serviços e as fachadas⁷⁸.

Em Portugal, as lajes pré-fabricadas em betão armado mais comuns são compostas por painéis alveolares pré-esforçados. Nestas lajes, os painéis são pousados sobre vigas, normalmente pré-fabricadas, paralelamente um ao outro com pequenas juntas entre eles. Para garantir que esta laje se comporte como apenas um elemento é realizado a união entre estes painéis através da aplicação de uma massa de betão, conhecida como betão de solidarização. É possível, também, elevar a solidez desta solução com a aplicação de uma camada de betão armado sobre a superfície da laje⁷⁹.

Seguindo a natureza da montagem da laje, a forma com que distribui os esforços do edifício assemelha-se à uma laje unidirecional, contudo, quando comparada a uma laje maciça de betão armado nota-se que a solução pré-fabricada é mais leve e possui melhor desempenho termoacústico devido aos vazios no seu interior⁸⁰. Para além do desempenho termoacústico, a pré-fabricação dos elementos de betão implica outras características no processo de construção. Entre elas pode-se apontar o caráter final com que as peças chegam a obra, facto que dispensa a necessidade de utilizar cofragens e escoras, contribuindo para a rapidez da montagem da estrutura.

Este tipo de tecnologia, aplicada a um material com grande durabilidade e resistência como o betão, pode potencializar as suas características na medida em que torna estas peças pré-fabricadas reutilizáveis. A possibilidade de reutilização das partes pode traduzir-se na capacidade de desconstrução do todo e, a partir disso, possível expandir a vida útil de cada componente ou da estrutura como um todo. Contudo, a reutilização das peças é garantida caso não haja a aplicação de uma camada de betão complementar sobre a superfície da laje⁸¹ ou no encontro entre as vigas e pilares, ou seja, é importante que o arquiteto tenha isto em mente durante a fase de projeto.

78 DEPLAZES, Andrea – *Constructing architecture: materials*, p. 74.

79 MATEUS, R.; et al - *Tecnologias Construtivas para a Sustentabilidade da Construção*, p. 217.

80 Idem, p. 217.

81 MATEUS, R.; et al - *Tecnologias Construtivas para a Sustentabilidade da Construção*, p. 217.

Um exemplo destas estruturas industrializadas e de uma possível desconstrução programada é o projeto Cité Manifeste em Mulhouse, França, entre cinco projetos que exploram este conceito, voltamo-nos à habitação social projetada por Anne Lacaton & Jean Philippe Vassal. Este conjunto de 14 habitações desenvolve-se a partir de um sistema modular porticado, composto de pilares e vigas pré-fabricadas de betão, sobre o qual assenta uma laje composta por painéis, igualmente pré-fabricados, de betão. Sobre esta base pétrea de betão, repousam estufas, elaboradas a partir de estruturas aligeiradas de aço galvanizado com algumas faces encerradas por painéis de policarbonato transparente e outras com gesso cartonado e isolamento térmico⁸².

Os temas dos materiais industrializados e do controle passivo da temperatura através de estufas são recorrentes nos projetos de Lacaton & Vassal. Assim como a exploração da linguagem destes produtos industriais e do contraponto entre planos transparentes e opacos, estruturas leves e (metálicas), menos leves (madeira) e pesadas (betão).

Isto posto, conclui-se que a reciclagem do betão, a introdução de subprodutos no setor cimenteiro e a pré-fabricação de peças de betão são medidas capazes de atenuar o impacto ambiental deste material de construção amplamente utilizado. Estas ações, para além de melhorarem a ecologia dos componentes construtivos, abrem precedentes para pesquisas em diferentes áreas industriais e incentivam o desenvolvimento de uma rede de produção cada vez mais integrada. Nela, a economia circular tem a possibilidade de tornar-se uma regra ao contrário de uma ação pontual. Ainda que a circularidade não seja capaz de eliminar completamente o uso do cimento e reverter os paradigmas construtivos, é promissora na medida em que contribui ativamente para a redução da pegada ecológica do betão e para um futuro mais sustentável.

82 Lacaton & Vassal Architectes. Retirado de: <https://www.lacatonvassal.com/index.php>

2.3. Tecnologias atuais da madeira

Este material emblemático sempre fez parte, em menor ou maior intensidade, do repertório construtivo de grande parte dos povos, até a revolução industrial e os avanços da tecnologia dos materiais na construção civil, a madeira era o material que mais facilmente poderia ser incorporado em todas as partes de uma edificação. Isto por causa da sua leveza, resistência à compressão e tração que se mostrou de extrema importância ao longo do desenvolvimento das ciências construtivas⁸³. A madeira não é apenas versátil, suas características técnicas se equiparam a alguns materiais sintéticos desenvolvidos especificamente para finalidades estruturais.

Para demonstrar as suas potencialidades, pode-se comparar duas estruturas semelhantes, uma em madeira e outra em metal. Nesta análise constata-se que a armação em madeira apresenta em média 50% mais desempenho de sustentação que a outra devido a sua densidade reduzida, facto que contribui para a redução da somatória final das cargas da estrutura. Soma-se a isto o facto deste material natural ser mais higiénico do que outros com o mesmo grau de porosidade, isto significa que a reprodução de bactérias e fungos neste material é menor do que em plásticos e em aço inoxidável⁸⁴.

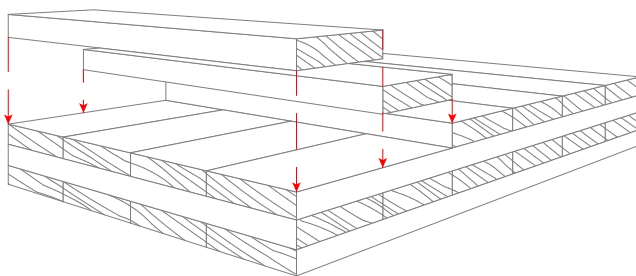
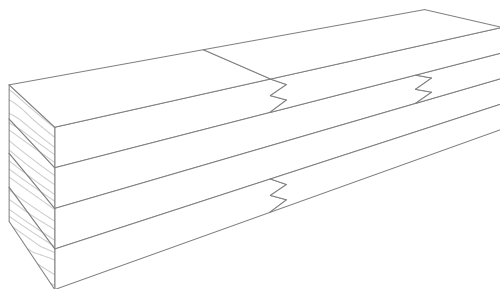
Outra característica da madeira é sua baixa condutividade térmica se comparada aos metais, materiais pétreos e plásticos. Contudo, um argumento contra este material é a presença de altos níveis de carbono na sua composição, a configurar maior suscetibilidade a combustão e ao enfraquecimento acelerado quando exposto a grandes variações de humidade e temperatura. Não obstante, este é um argumento de duas vias, o aprisionamento de grandes quantidades de carbono faz com que a madeira seja um importante aliado no controlo do efeito de estufa⁸⁵.

Isto porque o período no qual os organismos vegetais estão mais suscetíveis a absorção de carbono e liberação de oxigénio é durante a sua fase de crescimento, neste período os organismos vegetais liberam maior quantidade de oxigénio na atmosfera do que de gás carbónico, quando atingem o ápice do seu crescimento a liberação destes dois gases é equivalente. Portanto a gestão da produção de madeira para construção é um dos aspetos chave na sustentabilidade deste material.

83 BERGE, Bjørn - Ecology of Building Materials, p. 157.

84 BERGE, Bjørn - Ecology of Building Materials, p. 157.

85 BERGE, Bjørn - Ecology of Building Materials, p. 159.



44 - Desenho esquemático de um perfil de madeira lamelada colada. Desenho do autor.

45 - Desenho esquemático de um painel de CLT. Desenho do autor.

As florestas cujo propósito é a produção de matéria-prima para fins industriais, a indústria da construção não é exceção, são normalmente exploradas em forma de monocultura. Em Portugal, a monocultura de Eucaliptos é maioritariamente destinada à produção de celulose para a indústria de papel, segundo Bjørn Berge, estes sistemas naturais correspondem à desertos quando observados do ponto de vista ecológico, pois a monocultura conduz à acidificação do solo, dos cursos d'água e impossibilita a maioria dos sistemas naturais⁸⁶. Soma-se a isto a necessidade de inseticidas, fungicidas e fertilizantes que, na maioria dos casos, derivam de matérias-primas minerais.

A madeira mais utilizada nos componentes construtivos é o Espruce, uma árvore que demora em média 40 anos para atingir o ponto de corte. A sua produção tem maior expressividade em países como a Alemanha, Áustria e Suíça, onde este material tem grande representatividade dentro da tradição construtiva. Por isto, é notável a quantidade de edifícios e empresas envolvidas neste mercado, dentro do qual existem, também, construções em madeira com baixa tecnologia e energia incorporada⁸⁷.

Estes produtos à base de madeira, seja qual for o seu nível de industrialização, são destinados em sua maior parte ao consumo local, reduzindo o impacto ambiental do transporte. O perfil do cultivo e da colheita com baixo impacto ambiental tem repercussões positivas na pegada ecológica, não apenas dos produtos, mas também dos edifícios que utilizam estes componentes construtivos. Além do mais, alguns produtos vegetais podem ter uma vida útil superior a 100 anos quando recebem manutenção adequada e periódica⁸⁸.

Os componentes construtivos de madeira não são recentes, contudo, o século XX foi marcado pelo salto tecnológico dando origem a “*engineered timber*”. Este material possui alguns nomes: *engineered wood*, *mass timber*, *composite wood*, *man-made wood* e *manufactured board*. Ainda que as traduções dos termos em inglês resultem no termo “*madeira engenheirada*” ou *madeira fabricada*. Estes produtos são mais conhecidos por *madeira industrializada*.

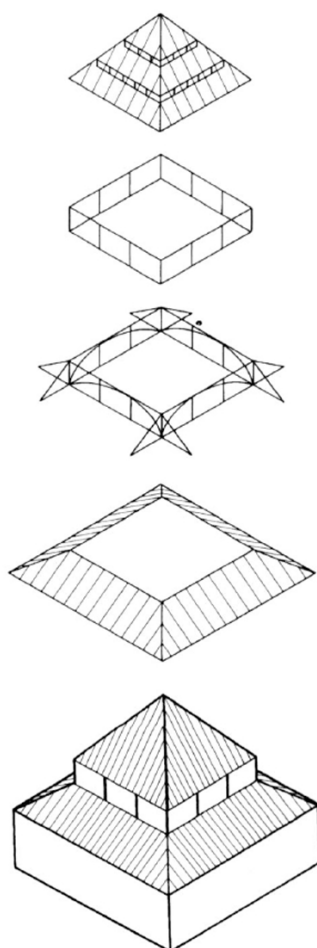
A madeira é um material de construção que ao longo do tempo tornou-se tendencialmente pré-fabricado, contudo, como resultado dos processos industriais, as peças industrializadas foram aperfeiçoadas e as suas qualidades intrínsecas melhoradas. A *madeira industrializada* pode ser dividida em dois grandes grupos de produtos⁸⁹.

86 BERGE, Bjørn - Ecology of Building Materials, p. 168.

87 HEGGER, Manfred; et al. - *Construction Materials Manual*, p. 66.

88 BERGE, Bjørn - Ecology of Building Materials, p. 160.

89 HEGGER, Manfred; et al. - *Construction Materials Manual*, p. 71-72.



46 - Imagens e esquemas da cobertura em madeira do Marriage Room no Register Office.

47 - Fabricação de uma viga de madeira lamelada colada.

O primeiro deles abriga os produtos feitos a partir de peças de madeira sólida, sejam perfis cilíndricos ou esquadrihados de um único toro, tábuas de madeira sólida ou perfis ortogonais feitos através da colagem de peças menores. Ou seja, nestes produtos existem poucas ou nenhuma mudança na estrutura natural da madeira, apenas eventuais cortes e junções de peças.

O segundo grupo é composto por produtos fabricados a partir de resíduos do corte da madeira ou pequenos pedaços da mesma. Estes, por sua vez, são prensados e colados até formarem painéis com espessuras, formas e dimensões variadas. O facto deste grupo de componentes construtivos ser, normalmente, feito a partir dos subprodutos do primeiro grupo estendendo o valor incorporado ao material, insere-se na economia circular por definição e essência.

A madeira lamelada colada (MLC), ou *glued laminated timber (glulam)*, pertencente ao primeiro grupo dos produtos fabricados a partir de madeira maciça. A primeira estrutura de que se tem conhecimento é a estrutura da cobertura do Marriage Room no Register Office em Southampton, Reino Unido, construído em 1860. Apesar dos perfis lamelados serem unidos por parafusos e pregos ao invés de uma resina adesiva, este ainda é o exemplar mais antigo, de uma estrutura composta por peças longilíneas de madeira, ainda existente.

A tecnologia para unir peças de madeira e criar um único perfil, com dimensões superiores ao que poderia ser atingido a partir de um único tronco de árvore, foi amplamente explorado depois da invenção de resinas adesivas hidrófugas em 1930⁹⁰. Estes perfis, normalmente utilizados como vigas, podem atingir até 35 metros de comprimento e 2,2 metros de altura⁹¹, equiparando-se aos vãos atingidos com estruturas metálicas e com o betão armado, com a vantagem de que a madeira é um material muito mais leve do que os outros dois.

Para atingir este nível de qualidade, a produção destes elementos tem de acontecer em ambientes controlados. O processo de secagem da madeira em temperatura ambiente pode levar de três meses a um ano, dependendo das dimensões dos perfis, quando feito em ambientes controlados, estufas, este tempo é reduzido drasticamente. Contudo, a secagem artificial da madeira aumenta a probabilidade do surgimento de fungos, resultado da maior temperatura; além do mais, o gasto energético desse processo pode chegar a mais de 300% e refletir diretamente na sustentabilidade do produto⁹².

90 Society, T. C. - Henry Fuller's Glued Laminated Timber Roof for Rusholme Road Congregational Sunday School and other early Timber Roofs, p. 29-45.

91 DEPLAZES, Andrea - *Constructing Architecture: Materials, Processes, Structures*, p.85.

92 BERGE, Bjørn - *Ecology of Building Materials*, p. 171.



48 - Estrutura primária de um edifício em cross-laminated timber (CLT).

49 - Montagem de painel de fechamento do exterior com janelas instaladas.

O desenvolvimento industrial da madeira lamelada colada e das ciências estruturais tornou possível a fabricação do *Cross-laminated Timber* (CLT), ou madeira lamelada cruzada, no ano de 1990⁹³. O material em questão é um painel sólido de madeira constituído através do empilhamento de camadas de tábuas organizadas lateralmente, onde cada camada é orientada transversalmente em relação à anterior⁹⁴.

Por tratar-se de um painel maciço com elevada resistência o CLT é um material extremamente versátil, pode ser empregue em paredes, lajes ou coberturas inclinadas. Estes painéis são processados em estaleiros industriais onde as condições de humidade e temperatura da fabricação são meticulosamente controladas. A madeira é transformada em lamelas que, por sua vez, passam por diversos procedimentos antes da etapa de colagem, na qual uma cola é aplicada e os painéis são prensados até que o ligante solidifique por completo.

Em outras palavras, o CLT é um material de construção pré-fabricado e, como tal, implica certo nível de detalhamento de projeto para que as peças sejam montadas no sítio da obra. Como estas peças são cortadas por robôs de precisão, o *cross-laminated timber* beneficia-se das técnicas mais atuais de desenho digital, como o BIM (*Building Information Modeling*), ao passo que o grau de detalhamento capaz de ser atingido neste tipo de modelo 3D parametrizado é transmitido automaticamente ao produto final com incrível precisão.

Conclui-se que, da mesma forma que o betão armado modificou a linguagem construtiva dos elementos pétreos com a sua capacidade de resistência a tração, a tecnologia atual das madeiras lameladas coladas e do CLT expandiu a linguagem construtiva da madeira⁹⁵. Ao passo que, na contemporaneidade, a madeira deixou de estar restrita a estruturas lineares e esbeltas, para tornar-se matéria-prima de paredes e lajes maciças e estruturais.

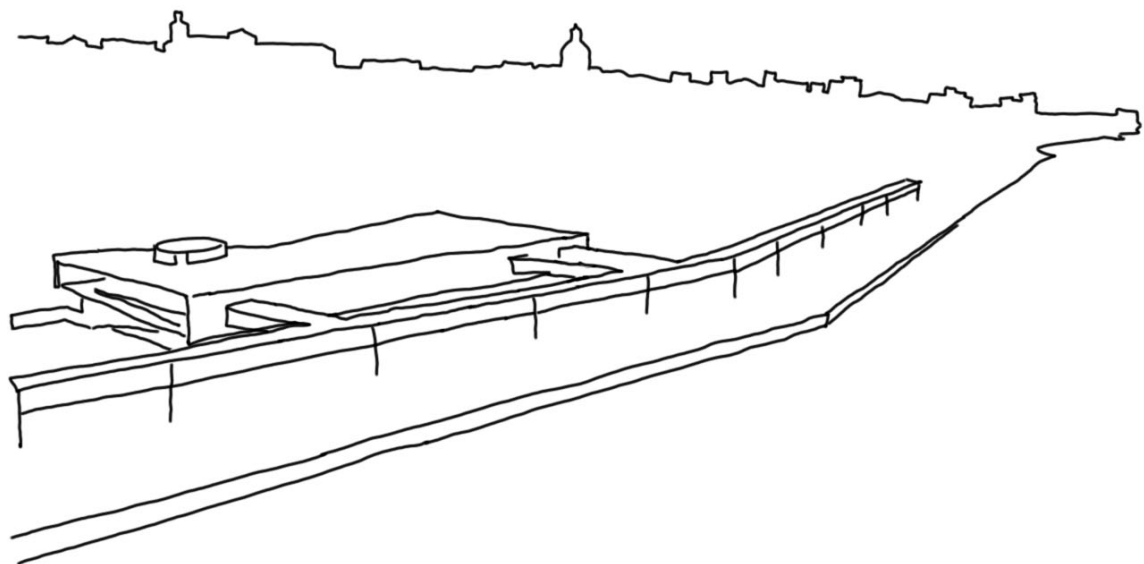
93 THOMPSON, H - A Process Revealed.

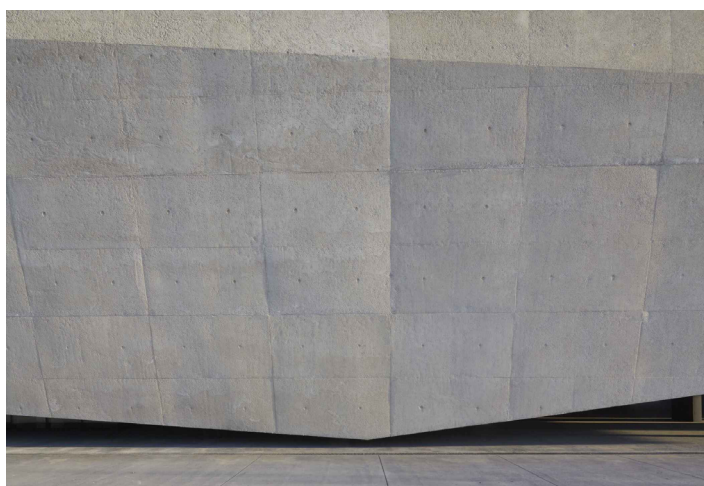
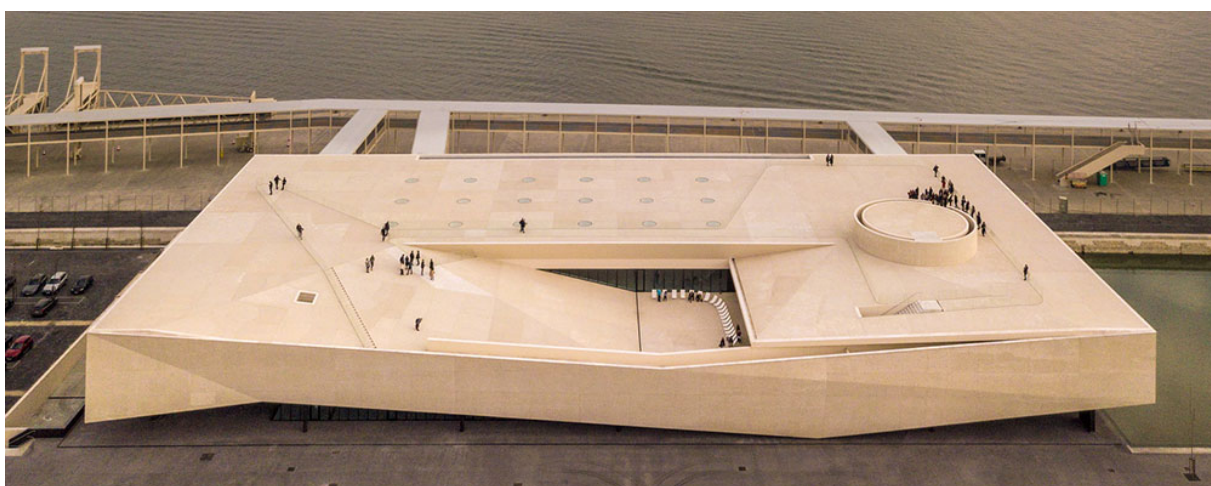
94 DEPLAZES, Andrea - *Constructing Architecture: Materials, Processes, Structures*, p.89.

95 DEPLAZES, Andrea - *Constructing Architecture: Materials, Processes, Structures*, p.78.

3. Casos de estudo

3.1 Terminal de Cruzeiros de Lisboa





50 - Terminal de Cruzeiros de Lisboa.

51 - Terminal de Cruzeiros de Lisboa, vista aérea.

52 - Terminal de Cruzeiros de Lisboa, foier principal.

53 - Terminal de Cruzeiros de Lisboa, parede exterior.

O projeto do atual Terminal de Cruzeiros de Lisboa foi o primeiro colocado no concurso público internacional lançado pela Administração do Porto de Lisboa em 2010. O edifício está localizado na Doca do Jardim do Tabaco, na Av. Infante Dom Henrique, em Lisboa; a construção foi iniciada em agosto de 2016 e finalizada em novembro de 2017. O projeto foi desenvolvido pelo Atelier Carrilho da Graça com um programa que se desenvolve em três pavimentos, nos quais os dois pisos do edifício recebem os serviços e a cobertura praticável assume a função de miradouro.

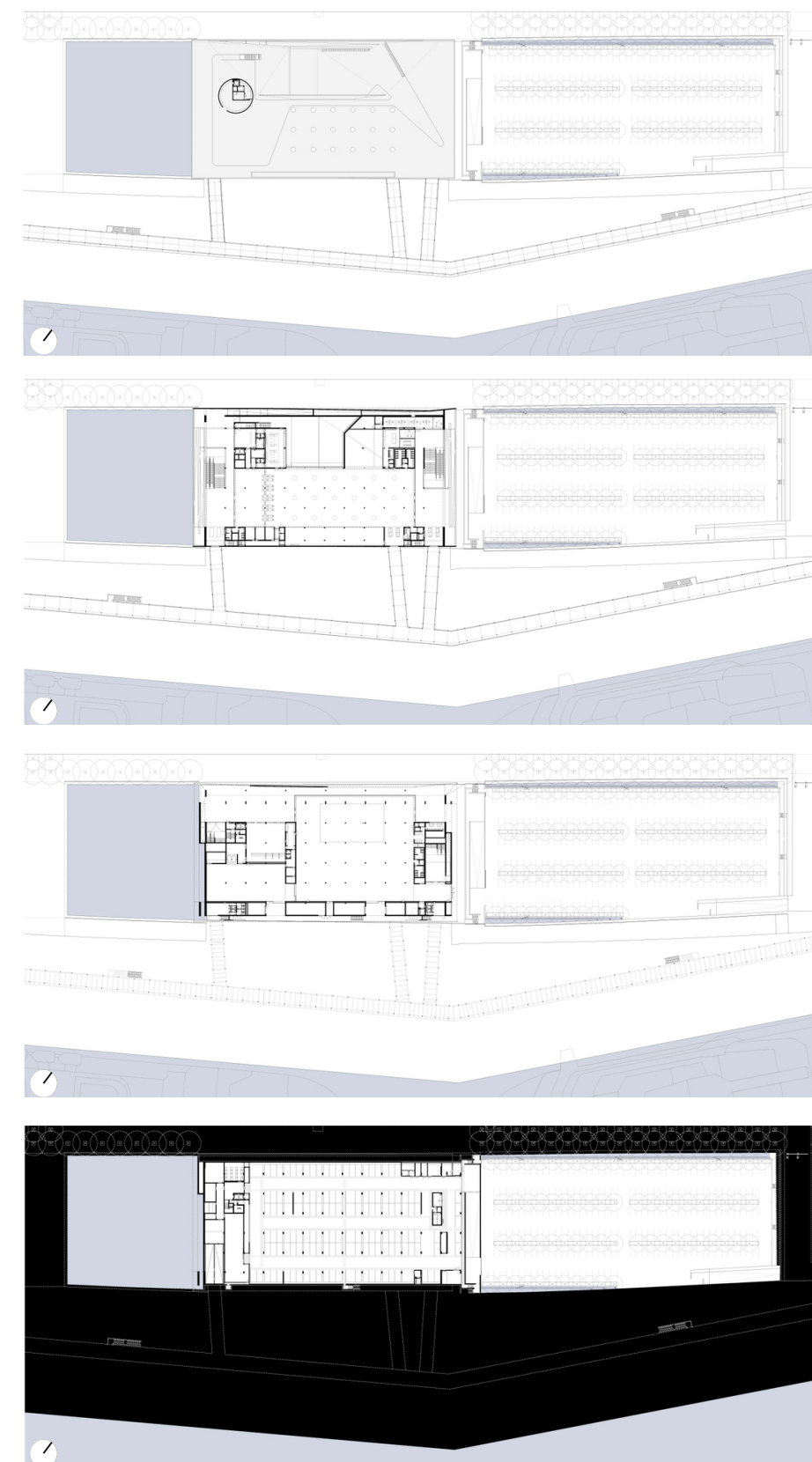
A proposta deste projeto era, a nível dos materiais de construção, a contenção dos distúrbios à beira-rio e, se possível, a diminuição do custo da obra. O desafio de realizar uma intervenção com esta dimensão utilizando materiais convencionais, seria alocar grande parte do investimento na construção das fundações do edifício, situação agravada pela localização do projeto. Para ajudar a conter o peso total do edifício e minimizar a intervenção subterrânea, surgiu a necessidade de desenvolver um material com propriedades específicas para este cenário.

O material escolhido para a materialização deste projeto foi o betão, contudo, segundo as exigências da equipa responsável pelo projeto, o edifício deveria incorporar uma das riquezas naturais portuguesas mais icónicas, a cortiça, sem que o desempenho estrutural fosse comprometido. Para concretizar esta ambição foi necessária a união de empresas como a SECIL, Unibetão, Amorim Cork Composites e o ITeCONS (Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção)⁹⁶. Como resultado, obteve-se um material que aproveita subprodutos da indústria corticeira na fabricação da argamassa e betão, denominado Betão Unileve Cortiça Branco. Este produto pode apontar caminhos para a descarbonização da indústria cimenteira prevista pelo Pacto Ecológico Europeu⁹⁷.

Segundo a Engenheira Ângela Nunes, diretora do Centro de Desenvolvimento de Aplicações de Cimento da SECIL, o betão de cortiça é uma inovação pois corresponde ao primeiro betão estrutural onde os inertes, normalmente compostos por rochas naturais, são substituídos na sua totalidade por um material natural renovável. Os inertes introduzidos são grânulos de cortiça expandida obtidos através da reciclagem de produtos de cortiça, graças a isso, este betão converte-se num material de construção totalmente reciclável.

⁹⁶ APEB. *Betão*. Nº 39, julho de 2018, p. 22.

⁹⁷ De acordo com o Conselho Europeu, o Pacto Ecológico Europeu consiste em um conjunto de iniciativas e estratégias com a finalidade de alcançar a neutralidade climática até 2050.



54 - Terminal de Cruzeiros de Lisboa, planta de cobertura.

55 - Terminal de Cruzeiros de Lisboa, planta do piso 1.

56 - Terminal de Cruzeiros de Lisboa, planta do rés-do-chão.

57 - Terminal de Cruzeiros de Lisboa, planta do piso -1.

Entre os benefícios deste novo produto pode-se destacar a sua leveza e o seu desempenho térmico, em média o betão estrutural de cortiça é 30% mais leve que os betões convencionais e apresenta um desempenho térmico 50% maior⁹⁸. O betão corrente possui uma densidade entre 2000 e 2600 Kg/m³ ⁹⁹, enquanto o betão Unileve Cortiça apresenta uma densidade de 1755 Kg/m³ e conserva as mesmas características de desempenho estrutural que o betão corrente.

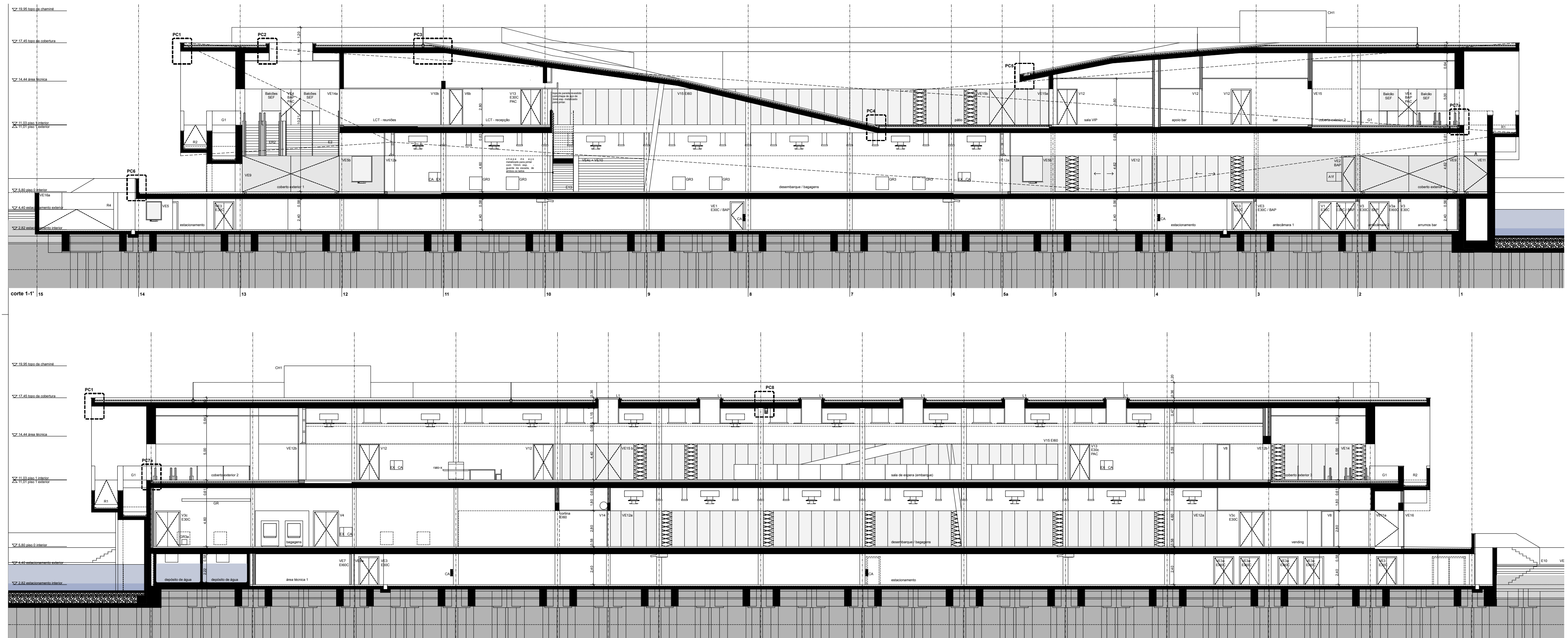
O projeto para o terminal de cruzeiros enaltece tanto a plasticidade como a textura do material construtivo do movimento moderno na sua mais nova e tecnológica formalização. O facto de o betão de cortiça ser o material que compõe a superfície externa do edificado, suscetível aos agentes químicos e físicos, denota uma confiança na resistência do novo material e na sua potencialidade estética. Contudo, vale ressaltar o facto de que no interior do Terminal de Cruzeiros de Lisboa o betão de cortiça não é utilizado como material estrutural ou de revestimento.

Diante da qualidade que se espera deste material e da crescente utilização da cortiça dentro da indústria cimenteira, não é descabido afirmar que a restrição do betão de cortiça estrutural à camada exterior do edifício pode estar relacionada ao facto deste produto ainda não ser comercializado livremente. O Betão Unileve de Cortiça Branco com propriedades estruturais apresenta um bom desempenho ecológico a partir da introdução de materiais naturais renováveis na sua composição, dentro da vertente social, este material colabora para o incentivo da indústria nacional e valorização de materiais locais, sem falar do seu potencial para a economia circular.

O desempenho deste novo betão, juntamente com a sua vertente ecológica, garantiu à SECIL uma menção honrosa no âmbito do Premio Nacional de Sustentabilidade, edição 2020/21, na categoria de Descarbonização. Ainda que haja muito que ser feito em relação aos impactos ambientais da indústria cimenteira, indícios apontam para um futuro promissor em relação as tecnologias construtivas que envolvem o betão armado.

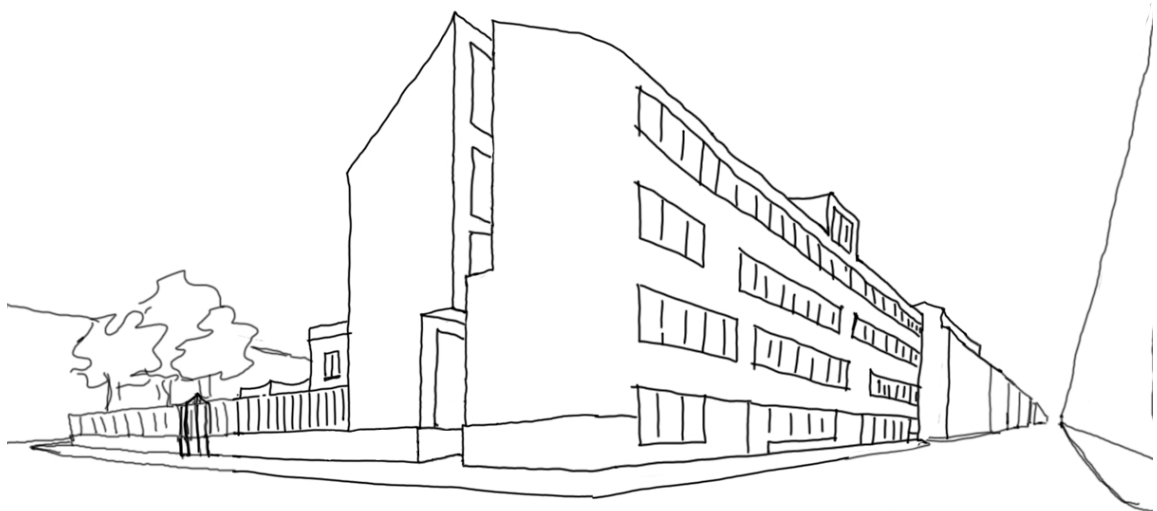
98 SECIL. (n.d.). *Sustentabilidade e negocios 2020-21*.

99 KID-BARKAUSKAS, Friedbert; et al. - *Concrete Construction Manual*, p. 22.



59 - Terminal de Cruzeiros de Lisboa, cortes longitudinais.

3.2. Escola Redbridge





60 - Complexo Redbridge, vista aérea.

63 - Pavilhão Sul, vista aérea.

61 - Redbridges school, entrada principal Edifício Norte.

64 - Edifício Norte, cafeteria.

62 - Redbridges school, Pavilhão Sul

Este projeto, insere-se na Rua Francisco Metrass na freguesia de Campo de Ourique em Lisboa, foi idealizado pelo atelier ARX Portugal sob a direção dos arquitetos José Mateus e Nuno Mateus. A construção dos dois edifícios que compõem esta unidade escolar, nomeadamente o Edifício Norte e o Pavilhão Sul, desenvolveu-se no intervalo de um ano, entre 2017-2018. Desde o princípio foi determinado que a madeira seria o melhor material para veicular uma mensagem ecológica e criar um ambiente acolhedor que instigasse a procura pelo saber, para além disso, o curto espaço de tempo disponibilizado para a realização da escola foi determinante na escolha do sistema construtivo e dos materiais de acabamento¹⁰⁰.

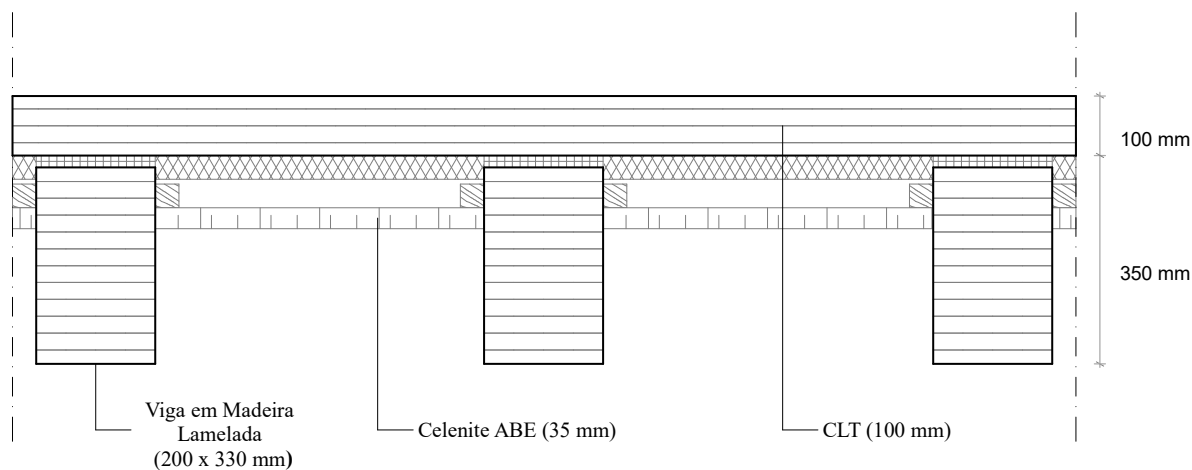
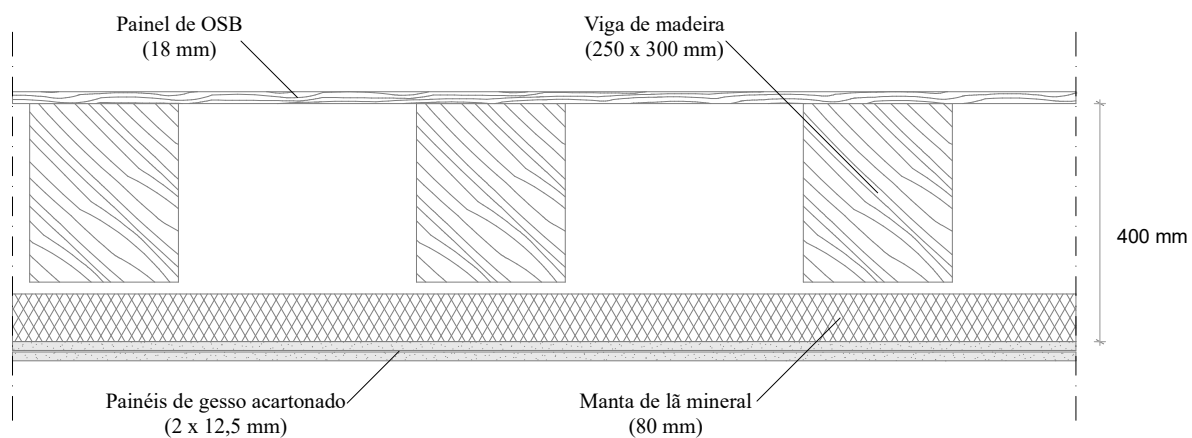
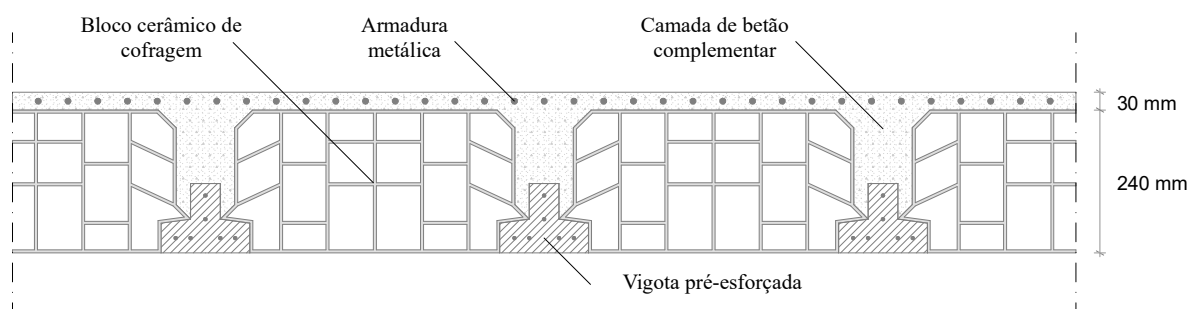
O Edifício Norte é um volume longitudinal com implantação retangular e quatro pisos acima do solo. Destina-se a receber as atividades associadas ao 1º e 2º ciclos do ensino primário bem como o aparato administrativo, no piso -1 está o estacionamento e a área técnica. A nível estrutural, existem dois métodos construtivos presentes no Edifício Norte, o betão armado e a madeira. Como é evidente, o betão foi o material utilizado no piso -1 e -2 devido a sua maior resistência a humidade e por sua estabilidade mecânica elevada. Este sistema também é utilizado nos núcleos de acesso vertical, tanto por uma questão de salvaguarda em casos de incêndio quanto para oferecer pontos de contraventamento à estrutura de madeira.

O rés-do-chão e os três pisos acima são constituídos por uma estrutura porticada de madeira lamelada colada (MLC), um sistema construtivo totalmente modular cujas peças são pré-fabricadas em estaleiros e transportadas ao sítio. O processo construtivo do Edifício Norte subordina-se a uma malha ortogonal rígida que compõe um sistema porticado de pilares e vigas de madeira, a introdução da uniformidade nos elementos construtivos estruturais faz com que os ciclos de obra sejam mais dinâmicos e com que o tempo total de obra seja reduzido¹⁰¹.

Os componentes mais significativos no tempo de obra, no custo económico e impacto ambiental são os elementos estruturais, as paredes e as lajes. Neste exemplo, a base da laje é composta por painéis de CLT com 100 mm de espessura pousados sobre vigas de MLC de 330 x 200 mm, esta estrutura fundamental do pavimento assenta sobre o sistema porticado estrutural, também em MLC. O painel de CLT é sobreposto por duas camadas cruzada de barrotes de madeira (60 x 60 mm) e manto de lã mineral, encimados por painéis de Viroc (20 mm).

100 ARX Portugal Arquitectos lda. [Consunt. 20 Dezembro 2021]. Disponível em: <https://www.arx.pt/projecto/redbridge/>

101 Espaço de arquitetura. [Consult. 20 Dezembro 2021]. Disponível em: <https://espacodearquitetura.com/projetos/escola-redbridge/>



65 - Laje aligeirada com vigotas pré-esforçadas.

66 - Pavimento em madeira com isolamento térmico.

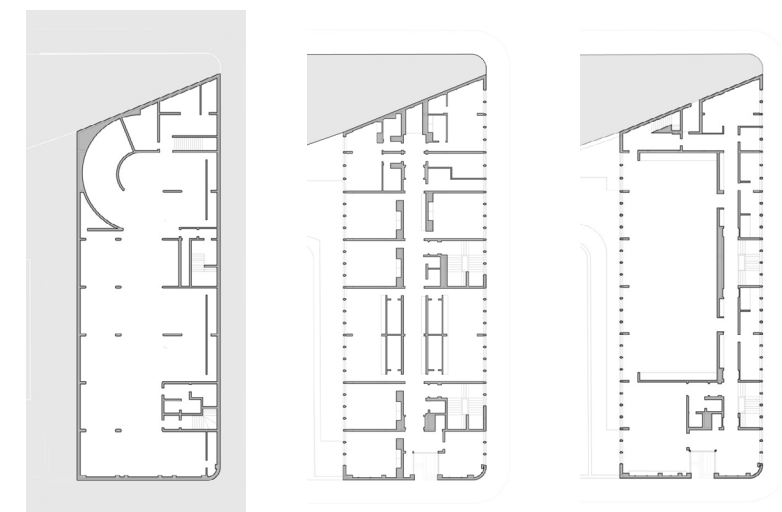
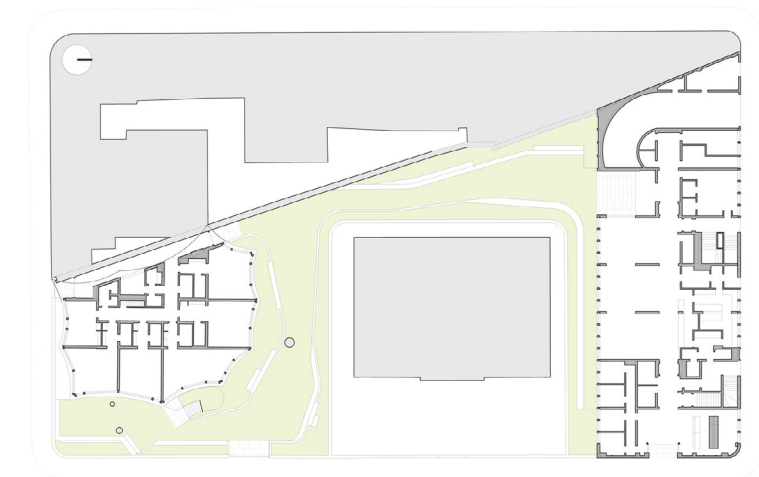
67 - Escola Redbridge, corte construtivo do Edifício Norte.

Com o objetivo de alcançar uma construção mais sustentável e consciente é válido traçar um paralelo com as estruturas convencionais utilizadas em Portugal. Segundo Ricardo Mateus e Luís Bragança, o tipo de laje mais utilizado em Portugal é a laje aligeirada (ver imagem 61). Esta solução construtiva consiste na utilização de vigotas pré-esforçadas de betão armado dispostas paralelamente entre si e de blocos cerâmicos a preencher os vãos restantes, esta malha intercalada é coberta com uma armadura metálica e uma camada de betão complementar¹⁰².

No que diz respeito aos pavimentos, os mesmos autores afirmam que uma estrutura em madeira com teto falso e isolamento termoacústico (ver imagem 62) é, entre as soluções construtivas recorrentes em Portugal, a solução mais ecológica ainda que o custo seja mais elevado do que uma laje aligeirada convencional. De acordo com a Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC), a massa, energia primária incorporada e o potencial de aquecimento global correspondem, respetivamente, à 7%, 17% e 8% dos valores associados à solução convencional¹⁰³.

O pavimento utilizado no edifício da Escola Redbridge incorpora um painel de CLT ao invés de um painel de OSB (*oriented strand board*), para além de conferir mais estabilidade e resistência, a escolha deste componente construtivo aumenta significativamente o custo inicial da laje (ver imagem 63). Apesar deste painel possuir maior energia incorporada, não altera em demasia o impacto ambiental final. Isto porque os processos de fabricação de ambos os materiais estão fundamentados em princípios relativamente semelhantes, por utilizarem a mesma matéria-prima estão sujeitos à mesma taxa de captura de carbono.

Já o Pavilhão Sul, em contraponto a ortogonalidade do Edifício Norte, é um volume hexagonal com faces concavas, possui uma forma resultante do negativo entre a forma do terreno e a copa das árvores pré-existentes. Este volume orgânico acolhe atividades associadas ao jardim de infância bem como um pequeno espaço administrativo e um espaço de lazer. O sistema construtivo do Pavilhão Sul possui concordâncias com o Edifício Norte ao utilizar “*engineered wood*”; entretanto, assume uma forma menos convencional ao invés de sujeitar-se à uma malha ortogonal ritmada.



68 - Redbridge school, planta rés-do-chão Pavilhão Sul e Edifício Norte.

69 - Redbridge school, corte Pavilhão Sul e Edifício Norte.

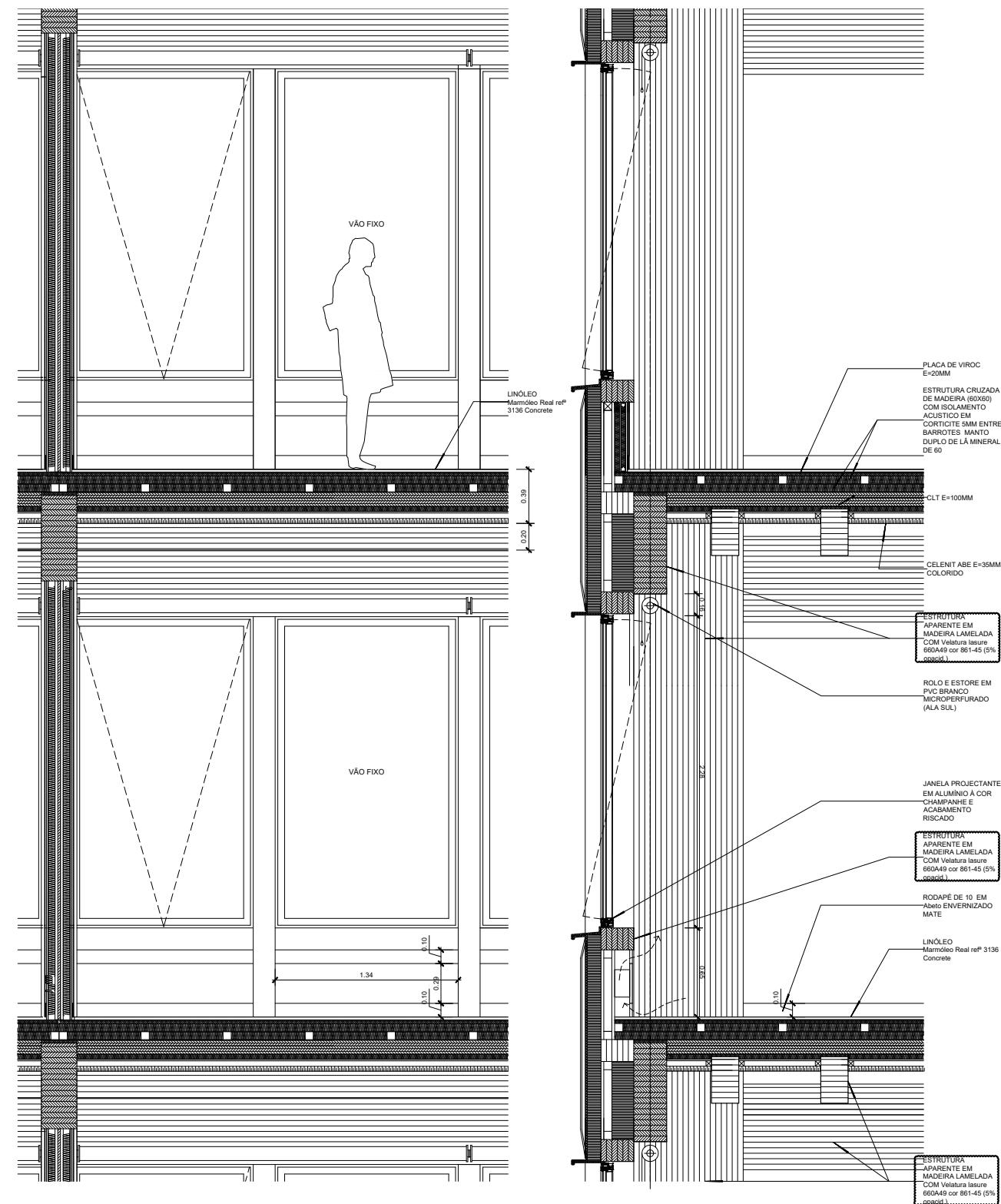
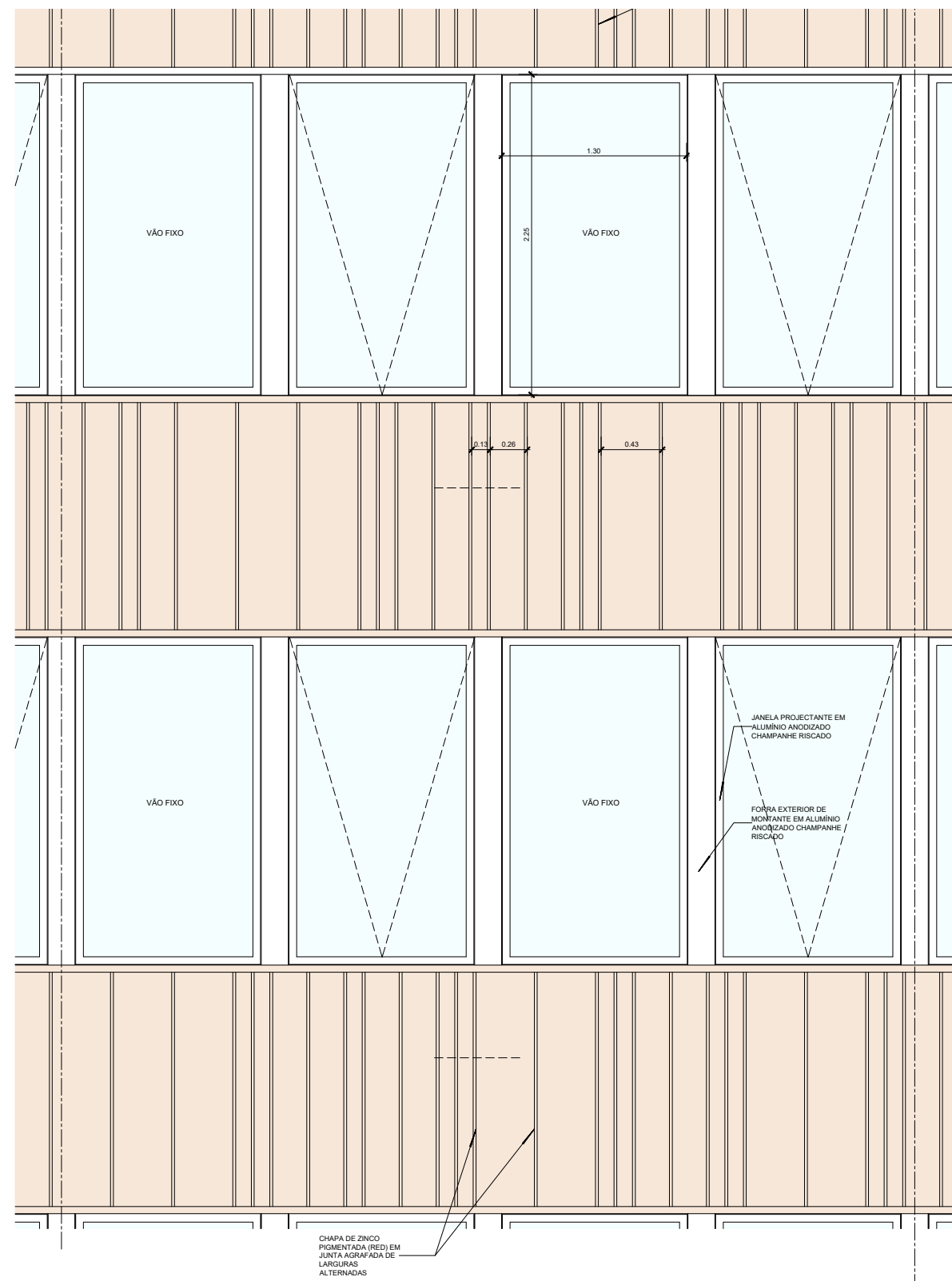
70 - Edifício Norte, planta do piso -1.

71 - Edifício Norte, planta do piso 1 e 2.

72 - Edifício Norte, planta do piso 3.

102 MATEUS, Ricardo; et al - *Tecnologias Construtivas para a Sustentabilidade da Construção*, p. 209.

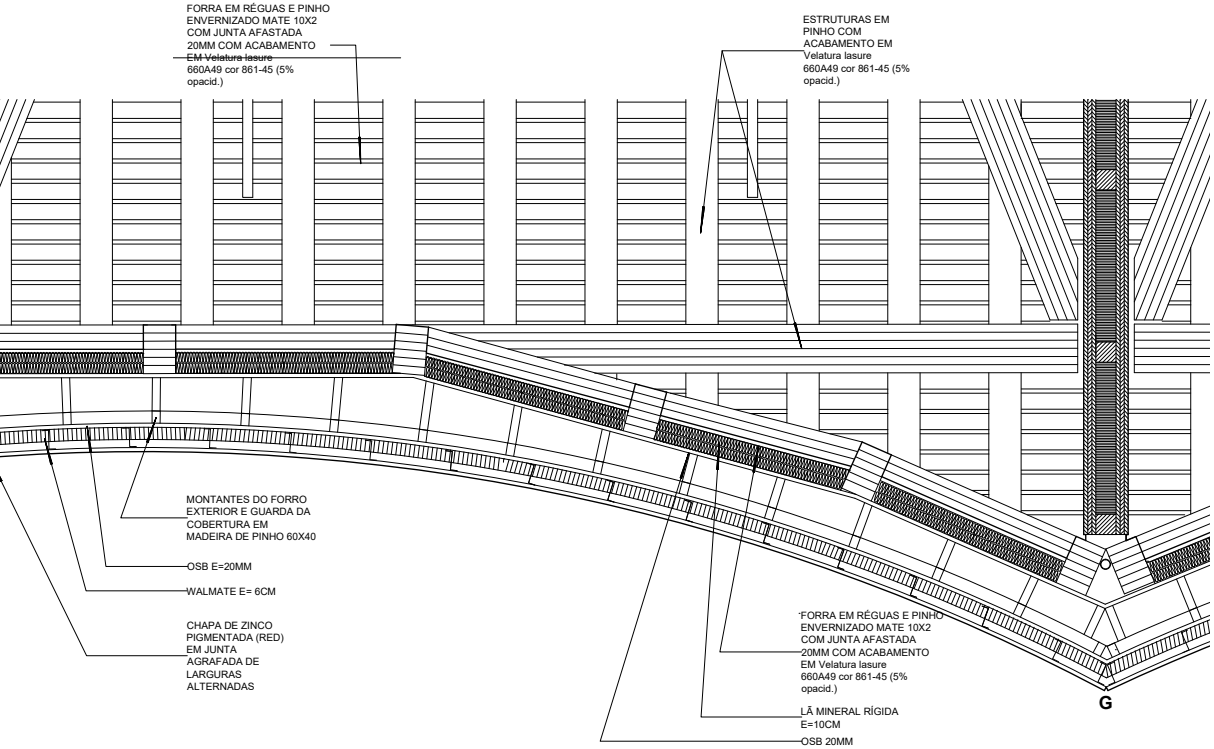
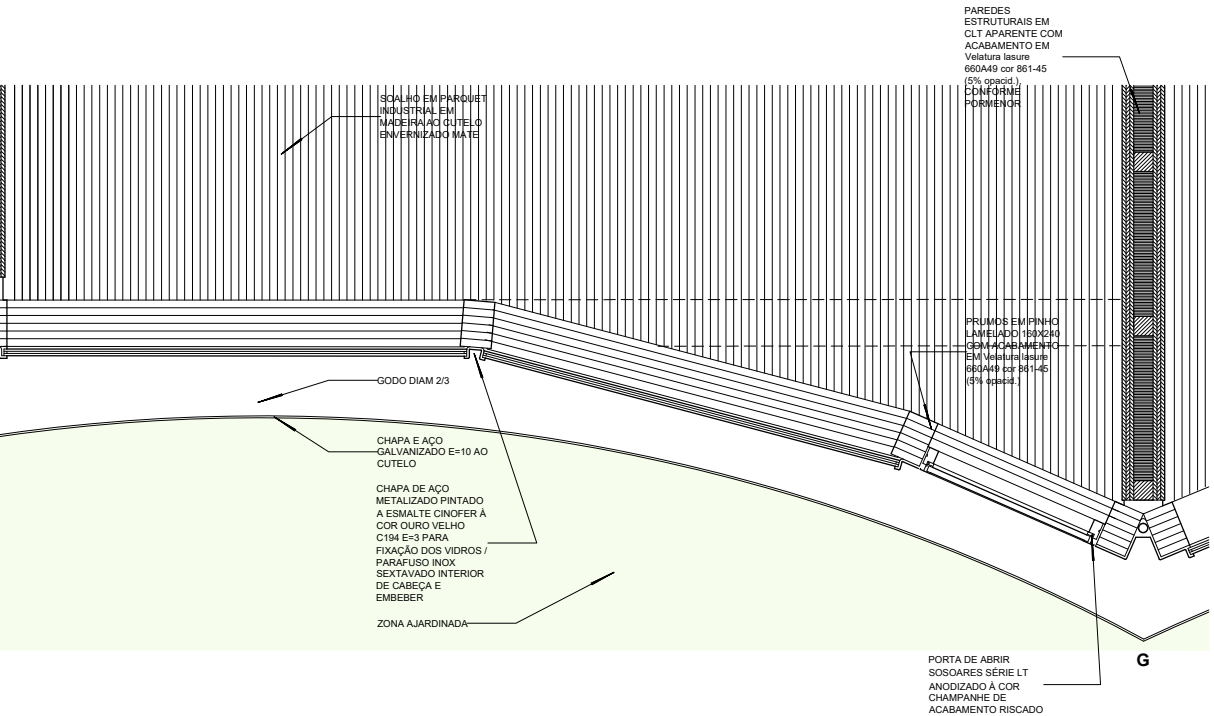
103 MATEUS, Ricardo; et al - *Tecnologias Construtivas para a Sustentabilidade da Construção*, p. 243.



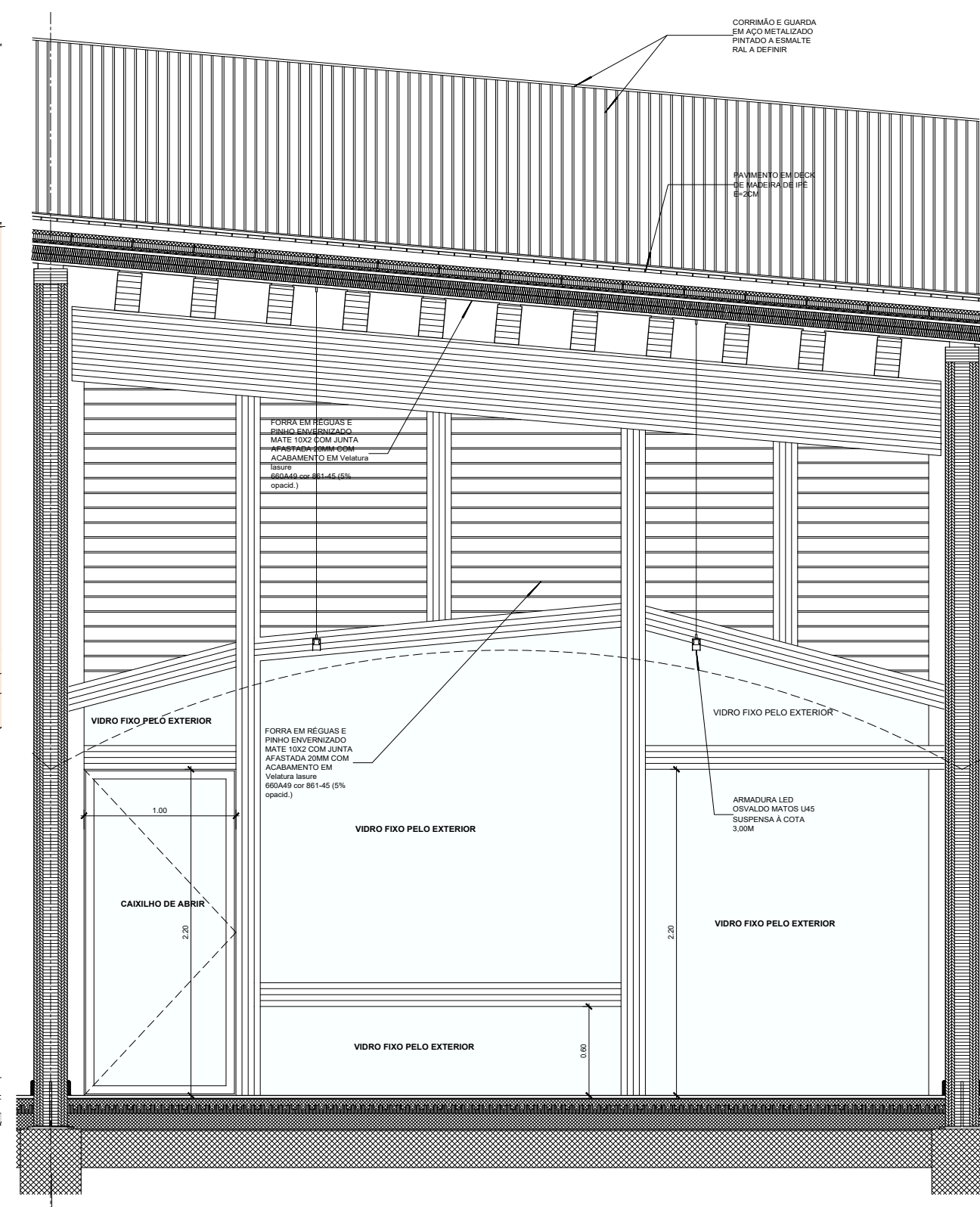
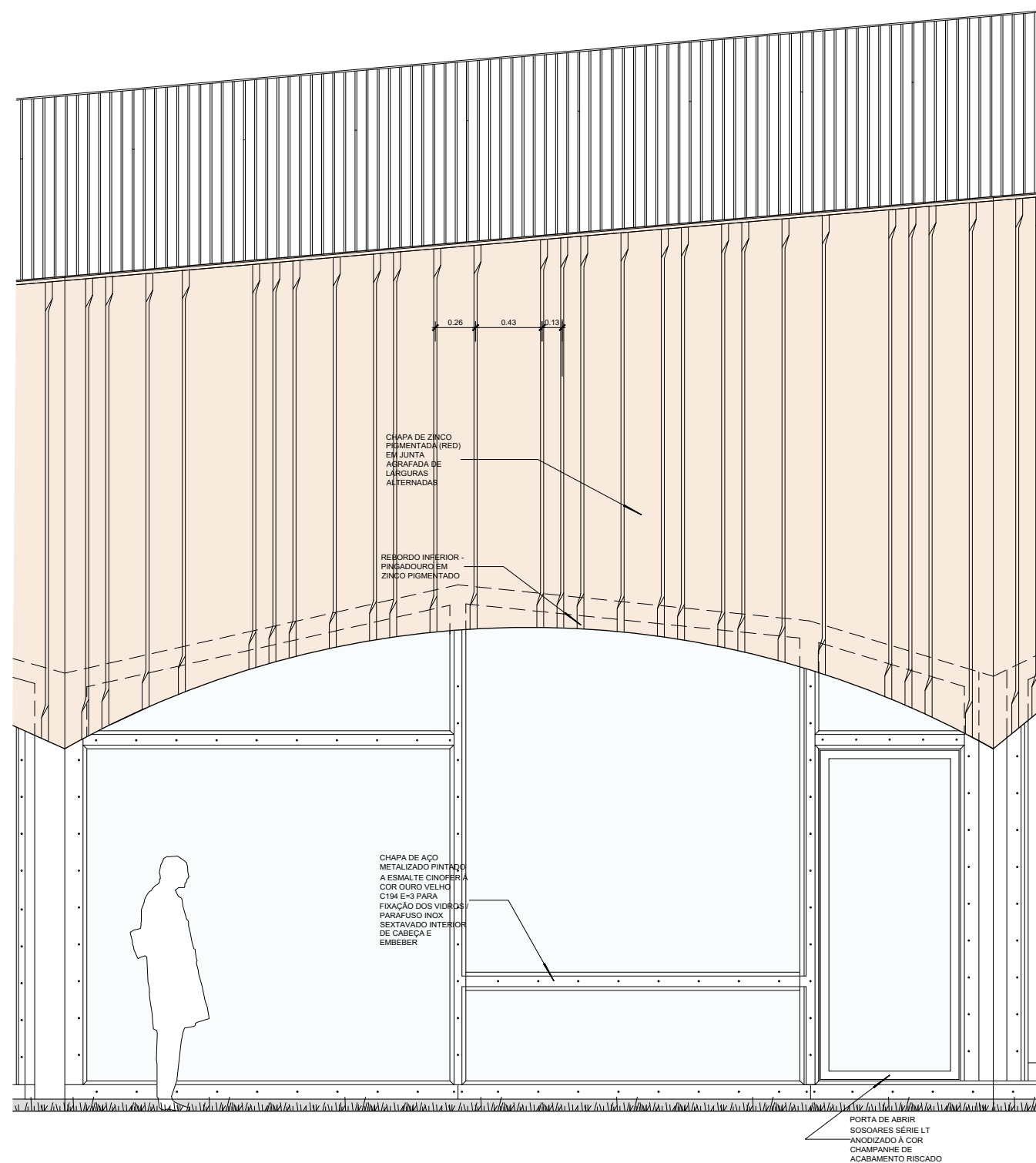
73 - Redbridge school, alçado e corte construtivo.

O edifício forma-se a partir de dois sistemas construtivos, na fachada utiliza um sistema de pilares e vigas em MLC, mais compatível com as formas sinuosas e com as aberturas para iluminação e acesso. No interior da estrutura, a divisão entre os espaços assume uma configuração linear e ortogonal com função estrutural, por isso, utiliza uma parede tipo sanduiche composta por dois painéis pré-fabricados de CLT e isolamento termoacústico. O CLT é um material de madeira pré-fabricado com diferentes qualidades de acabamento, com elevada densidade e alto desempenho estrutural, por esta razão é facilmente incorporado a um sistema de paredes portantes onde o gesso cartonado pode ser substituído pela própria madeira estrutural. Por tratar-se de um edifício destinado a atividades educativas e recreativas de crianças, o painel de madeira oferece maior resistência em comparação ao gesso.

Embora o custo inicial da obra possa ser elevado, o revestimento em madeira possuir menor pegada ecológica total para além de afirmar uma linguagem estética condizente com os ideais sustentáveis do edifício¹⁰⁴.



104 Espaço de arquitetura. [Consult. 20 Dezembro 2021]. Disponível em: <https://espacodearquitetura.com/projetos/escola-redbridge/>



75- Redbridge school, alçado e corte construtivo, Pavilhão Sul.

Considerações finais

O presente trabalho começou com o questionamento sobre qual seria o material mais sustentável, indagação que se comprovou, ao mesmo tempo, incompleta e retórica diante do conhecimento adquirido no decorrer deste processo.

Percebendo que a arquitetura é fruto de uma sociedade múltipla, das tecnologias edificatórias, da expressão cultural e das condicionantes físicas do sítio, entende-se o impacto que forças externas podem ter sobre esta atividade e sobre a ecologia dos materiais. Quando os sistemas naturais começam a sofrer as consequências de um desenvolvimento rápido e desregulado, dentro do qual a construção civil é uma das principais causadoras deste impacto, é compreensível que haja algum efeito nas práticas arquitetónicas.

Dentro da discussão sobre sustentabilidade, a questão do betão é complexa. Este é o material de construção mais utilizado atualmente, indispensável na criação de grandes estruturas urbanas, cuja expressão estética popularizou-se durante o movimento moderno. Contudo, o betão contribui para a degradação ambiental na medida em que a sua produção depende da extração de matérias-primas não renováveis e da liberação de gases de efeito de estufa, resultantes da fabricação do cimento Portland.

Em oposição ao betão, a madeira sempre foi um material de construção versátil e com grande potencial sustentável, a partir do qual linguagens arquitetónicas desenvolveram-se e ganharam complexidade. Apesar disso, a madeira continua a ser um material de construção com pouca expressividade no panorama mundial.

Na medida em que a humanidade ganha consciência do impacto da organização socioeconómica pós-revolução industrial, emerge o debate acerca do desenvolvimento sustentável. Nele, torna-se relevante o confronto entre a madeira e o betão, sobre a perspectiva da sustentabilidade das soluções construtivas.

Mesmo através do sistema de Avaliação do Ciclo de Vida, constata-se que a sustentabilidade dos materiais de construção é muito mais profunda do que a comparação entre a energia incorporada ou a pegada de carbono. Ainda que a madeira seja um material natural com grande capacidade de captura de carbono, não existem florestas em Portugal para fins construtivos. Sobre isso, sabe-se que o transporte contribui para o aumento da energia incorporada dos materiais e, consequentemente, diminui o seu potencial sustentável.

O estudo sugere que, em contrapartida, no que tange à construção em betão, os elementos pré-fabricados são a resposta mais sustentável na maioria dos casos, mesmo após compreender que o custo inicial é significativamente maior do que as soluções convencionais. Isto porque, a pré-fabricação destes elementos introduz a possibilidade de reutilização dos componentes construtivos, desde que seja previsto em projeto.

A partir dos estudos conduzidos neste trabalho, entende-se que parte importante da avaliação da sustentabilidade é compreender as condicionantes e oportunidades do território. Visto que Portugal é o maior produtor de cortiça do mundo, a consolidação de um betão armado feito a partir desse material natural representa uma oportunidade única do ponto de vista técnico e ecológico.

Em suma, conclui-se que, apesar da relevância da temática da sustentabilidade, a relação dos materiais com a arquitetura estende-se para além das suas características técnicas e ecológicas. Isto pode ser analisado quer do ponto de vista da tectónica e da estereotomia, quer do ponto de vista do regionalismo crítico.

Dentro da tectónica e da estereotomia, entende-se que os materiais de construção não são autoritários na imposição de formas sobre a composição arquitetónica, sobretudo diante das tecnologias de manipulação da matéria disponíveis na contemporaneidade. Não obstante, os materiais possuem uma linguagem e uma essência que, através da manipulação correta, tornam-se potencializadoras da forma.

Segundo os ideais do regionalismo crítico, a relação entre forma e matéria, consequentemente, a relação entre a sustentabilidade dos edifícios e os materiais de construção, é um espectro do projeto de arquitetura indissociável das circunstâncias e das características do território.

Bibliografia

Livros

ASHBY, Michael F. *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*. 1º. Canada: Butterworth-Heinemann, 2009.

BAEZA, Alberto C. *A ideia construída*. 6º. Portugal: Caleidoscópio, 2018.

BENEDETTI, Cristina; BACIGALUPI, Vincenzo. *Legno Architettura. I futuro della tradizione*. Roma: Edizioni Kappa, 1991.

BERGE, Bjørn. *Ecology of Building Materials*. 2º. Oxford: Architectural Press / Elsevier, 2000.

CHESHIRE, David. *Building Revolutions: Applying the circular economy to the built environment*. Reino Unido: RIBA, 2016.

DEPLAZES, Andrea. *Constructing Architecture: Materials, Processes, Structures*. Suíça, Basileia: Birkhäuser, 2005.

FERNANDES, Francisco Barata. *Transformações e Permanências na Habitação Portuense: As formas da casa na forma da cidade*. 2º. Porto: FAUP, 1999.

FOSTER, Hal. *The Anti-aesthetic*. 5º. Estados Unidos da América: Bay Press, 1983.

FRAMPTON, Kenneth. *História crítica da arquitetura moderna*. 4º. Traduzido por Jefferson L. Camargo. São Paulo, São Paulo: Martins Fontes, 2015.

HEGGER, Manfred; AUCH-SCHWELK, Volker; FUCHS, Matthias; ROSENKRANZ, Thorsten. *Construction Materials Manual*. Suíça: Birkhäuser, 2006.

HERZOG, Thomas; NATTERER, Julius; SCHWEITZER, Roland; VILZ, Michael. *Timber Construction Manual*. Basileia: Birkhäuser, 2004.

KIBERT, Charles J. *Sustainable construction: green building design and delivery*. 3º. United States of America: John Wiley & Sons, 2012.

KID-BARKAUSKAS, Friedbert; KAUHSEN, Bruno; POLÓNYI, Stefan; BRANDT, Jörg. *Concrete Construction Manual*. 1º. Traduzido por Philip Thrift. Alemanha: Birkhäuser, 2002.

MANZINI, Ezio. *A matéria da invenção*. 1º. Lisboa: Centro Português de Design, 1993.

MANZINI, Ezio; VEZZOLI, Carlo. *Design for Environmental Sustainability*. 1º. Londres: Springer, 2008.

MATEUS, Ricardo; BRANGANÇA, Luís. *Tecnologias Construtivas para a Sustentabilidade da Construção*. Porto: Edições Ecoply, 2006.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 3. Nova York: McGraw-Hill Professional, 2005.

MOHANTY, Amar K.; MISRA, Manjusri; DRZAL, Lawrence t.. *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. 1º. Nova York: Taylor & Francis e-Library, 2006.

OLIVER, Paul. *Encyclopedia of Vernacular Architecture of the World*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

TÁVORA, Fernando. *Da organização do espaço*. 6ª. Porto: Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto, 2006.

TAYLOR, Sir George; HOLMES, George; HOOD, Robert R.; BRAZIER, John D.. *La Madera*. Barcelona: Blume, 1978.

THOMPSON, Henrietta. *A Process Revealed*. Londres: FUEL, 2009.

THÖRNQUIST, Thomas. *Trä och Kvalitet*. Stockholm: Byggsförskningsradet, 1990.

TORGAL, F. Pacheco; JALALI, Said. *A Sustentabilidade dos Materiais de Construção*. TecMinho. Portugal: Gráfica Vilaverdense- Artes Gráficas, Lda., 2010.

VAN DER RYAN, Sim; COWAN, Stuart. *Ecological Design*. Washington, DC: Island Press, 1996.

VELDE, Bruce; MEUNIER, Alain. *The Origin of Clay Minerals in Soil and Weathered Rocks*. 1. Berlim: Springer, 2008.

Artigos, Publicações e Revistas

APEB. “Betão nº39.” *Betão*, junho 2018.

Canadian Standard Association (CSA). “Guideline on Durability in Building.” *Standard S478-95*, Dezembro de 1995.

CORREIA, João R.; BRITO, Jorge; PEREIRA, A.. “Effects on concrete durability of using recycled ceramic.” *Materials and Structures*, Março de 2006: 169-177. Disponível em (https://www.researchgate.net/publication/225935499_Effects_on_concrete_durability_of_using_recycled_ceramic_aggregates)

COUTO, Joana S. “Betões eco-eficientes com resíduos.” *Jornadas de Materiais na*

Construção, 2011: 171-214. Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/~jmc2011/wp-content/uploads/2011/03/Joana_Sousa_Coutinho.pdf

HAMMOND, Geoffrey; JONES, Craig. “The Inventory of Carbon and Energy (ICE).” *University of Bath & BSRIA*, Outubro de 2011. Disponível em: https://www.bsria.com/uk/product/dDJAnX/embodied_carbon_the_inventory_of_carbon_and_energy_ice_bg_102011_a15d25e1/

ISO/TC 207. “Environmental management- Life cycle assessment- Principles and framework.” *ISO 14040*, 2006: 20. Disponível em: <https://www.iso.org/home.html>

ISO/TC 59. “Building and constructed assets- Service life planning- General principles.” *BS ISO 15686- 1*, 2000: 54. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/509332432/BS-ISO-15686-1-2000-Buildings-and-constructed-assets-Service-life-planning-General-principles-1#>

LNEC. “Guia para utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos.” *Especificação LNEC E 471-2009*, Dezembro de 2009. Moreira, Anabela Mendes. “Materiais Compósitos.” *ESTT-escola superior de tecnologia de tomar*, 2008/2009: 12. Disponível em: <https://www.lnec.pt/fotos/editor2/guia-para-a-utilizacao.pdf>

REDDY, B.V.V.; JAGADISH, K.S.. “Embodied energy of common and alternative building materials and technologies.” *Energy and Buildings*, 25 de Novembro de 2001: 129-137. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/222648166_Embodied_Energy_of_common_and_alternative_Building_materials_and_technologies

Society, The Construction History. “Henry Fuller’s Glued Laminated Timber Roof for Rusholme Road Congregational Sunday School and other early Timber Roofs.” *Construction History*, 1994: 29-45. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/41613729>

The Ellen MacArthur Foundation. “Economic and business rationale for an accelerated transition.” *Towards the circular economy*, 2013.

Dissertações, Teses e Relatórios

BASTOS, Nuno M. *Construção em Madeira - Preconceito ou Inadequação? Processos atuais: da conceção à execução*. Porto: FAUP, 2019.

CIB. *Agenda 21 on Sustainable Construction*. Holanda: CIB Report, 1999. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/261611781_CIB_Agenda_21_for_sustainable_construction_Why_how_and_what

GONÇALVES, Eliseu. *A linguagem da gravidade. Para uma reflexão sobre o ensino da razão e ser dos elementos arquitetónicos estruturais*. Prova de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, Porto: FAUP, 2005.

PAULSEN, Jaboc. *Life Cycle Assessment for Building Products- The significance of the usage phase*. Tese de Doutoramento, Suécia: Instituto Real de Tecnologia, 2001.

SECIL. “Sólidos na transformação: relatório de sustentabilidade 2021.” Relatório de sustentabilidade, 2021.

SECIL. *Sustentabilidade e negocios/Edicao 2020-21*. s.d. [Consult. 27 Dezembro 2022]. Disponível em: <https://sustentabilidade.negocios.pt/vencedores/edicao-2020-21/>

SILVA, Ana Isabel da Costa. “A Madeira na Arquitetura: Práticas construtivas ente finais de oitocentos e finais de século XX.” Tese de Doutoramento, Porto: FAUP, 2014.

United Nations. “Report of the World Commission on Environment and Development.” *Our Common Future*. Assembléia Geral das Nações Unidas, 1987.

Websites

Espaçodearquitetura. [Consult. 20 Dezembro 2021]. Disponível em: <https://espacodearquitetura.com/projetos/escola-redbridge/>

MATEUS, Nuno; MATEUS, José - **ARX Portugal Arquitectos, lda**. [Consult. 20 Dezembro 2021]. Disponível em: <https://www.arx.pt/projecto/redbridge/>

LACATON, Anne; VASSAL, Jean Philippe - **Lacaton & Vassal Architectes**. [Consult. 20 de Maio 2023]. Disponível em: <https://www.lacatonvassal.com/index.php>

Crédito de imagens

- 1 - ASHBY, Michael F. *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*. 1º. Canada: Butterworth-Heinemann, 2009, p. 3.
- 2 - <https://www.archdaily.com.br/br/01-106997/classicos-da-arquitetura-bagsvaerd-church-s-lash-jorn-utzon>
- 3 - <https://www.archdaily.com.br/br/01-106997/classicos-da-arquitetura-bagsvaerd-church-s-lash-jorn-utzon>
- 4 - <https://www.archdaily.com.br/br/01-106997/classicos-da-arquitetura-bagsvaerd-church-s-lash-jorn-utzon>
- 5 - <https://www.archdaily.com.br/br/01-106997/classicos-da-arquitetura-bagsvaerd-church-s-lash-jorn-utzon>
- 6 - <https://www.archdaily.com.br/br/01-106997/classicos-da-arquitetura-bagsvaerd-church-s-lash-jorn-utzon>
- 7 - <https://www.archdaily.com/783392/ad-classics-saynatsalo-town-hall-alvar-aalto>
- 8 - <https://www.archdaily.com/783392/ad-classics-saynatsalo-town-hall-alvar-aalto>
- 9 - <https://www.archdaily.com/783392/ad-classics-saynatsalo-town-hall-alvar-aalto>
- 10 - <https://www.archdaily.com/783392/ad-classics-saynatsalo-town-hall-alvar-aalto>
- 11 - <https://www.archdaily.com/783392/ad-classics-saynatsalo-town-hall-alvar-aalto>
- 12 - ASHBY, Michael F. *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*. 1º. Canada: Butterworth-Heinemann, 2009, p. 9.
- 13 - <https://www.ambientelegal.com.br/sustentabilidade/>
- 14 - The Ellen MacArthur Foundation. “Economic and business rationale for an accelerated transition.” *Towards the circular economy*, 2013, p. 24.
- 15 - ISO/TC 207. “Environmental management- Life cycle assessment- Principles and framework.” *ISO 14040*, 2006: 20, p. 8.
- 16 - PAULSEN, Jaboc. *Life Cycle Assessment for Building Products- The significance of the usage phase*. Tese de Doutorado, Suécia: Instituto Real de Tecnologia, 2001, p. 6.
- 17 - ISO/TC 207. “Environmental management- Life cycle assessment- Principles and framework.” *ISO 14040*, 2006: 20, p. 15.

- 18 - ISO/TC 59. “Building and constructed assets- Service life planning- General principles.” *BS ISO 15686- 1*, 2000: 54, p. 13.
- 19 - Canadian Standard Association (CSA). “Guideline on Durability in Building.” *Standard S478-95*, Dezembro de 1995, p. 7.
- 20 - PAULSEN, Jaboc. *Life Cycle Assessment for Building Products- The significance of the usage phase*. Tese de Doutoramento, Suécia: Instituto Real de Tecnologia, 2001, p. 12.
- 21 - MATEUS, Ricardo; BRANGANÇA, Luís. *Tecnologias Construtivas para a Sustentabilidade da Construção*. Porto: Edições Ecoply, 2006, p. 201.
- 22 - MATEUS, Ricardo; BRANGANÇA, Luís. *Tecnologias Construtivas para a Sustentabilidade da Construção*. Porto: Edições Ecoply, 2006, p. 205.
- 23 - CORBUSIER - Précisions sur un état présent de l’architecture et de l’urbanisme, 1930.
- 24 - <https://www.hindawi.com/journals/ace/2020/2341375/>
- 25 - <https://www.pinterest.pt/pin/349732727297376134/>
- 26 - Variações da organização interior na construção com toros de madeira maciça. SILVA, p. 193.
- 27 - SILVA, Ana Isabel da Costa. “A Madeira na Arquitetura: Práticas construtivas ente finais de oitocentos e finais de século XX.” Tese de Doutoramento, Porto: FAUP, 2014, p. 205.
- 28 - SILVA, Ana Isabel da Costa. “A Madeira na Arquitetura: Práticas construtivas ente finais de oitocentos e finais de século XX.” Tese de Doutoramento, Porto: FAUP, 2014, p. 211.
- 29 - SILVA, Ana Isabel da Costa. “A Madeira na Arquitetura: Práticas construtivas ente finais de oitocentos e finais de século XX.” Tese de Doutoramento, Porto: FAUP, 2014, p. 209.
- 30 - TORGAL, F. Pacheco; JALALI, Said. *A Sustentabilidade dos Materiais de Construção*. TecMinho. Portugal: Gráfica Vilaverdense- Artes Gráficas, Lda., 2010, p.123.
- 31 - LNEC. “Guia para utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos.” *Especificação LNEC E 471-2009*, p. 3.
- 32 - LNEC. “Guia para utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos.” *Especificação LNEC E 471-2009*, p. 5.
- 33 - <https://www.master-builders-solutions.com/pt-pt/servicos-por-categoria-profissional/produtores-de-betao/produtores-de-betao-pre-fabricado>
- 34 - <https://www.master-builders-solutions.com/pt-pt/servicos-por-categoria-profissional/pro>

dutores-de-betao/produtores-de-betao-pre-fabricado

35 - <https://www.master-builders-solutions.com/pt-pt/servicos-por-categoria-profissional/produtores-de-betao/produtores-de-betao-pre-fabricado>

36 - <https://espacodearquitetura.com/projetos/pre-fabricados/>

37 - Instalação de uma viga pré-fabricada de betão armado

38 - <https://espacodearquitetura.com/projetos/pre-fabricados/>

39 - <https://www.lacatonvassal.com/index.php>

40 - <https://www.lacatonvassal.com/index.php>

41 - <https://www.lacatonvassal.com/index.php>

42 - <https://www.lacatonvassal.com/index.php>

43 - <https://www.lacatonvassal.com/index.php>

44 - Desenho do autor.

45 - Desenho do autor.

46 - <https://www.jstor.org/stable/41613729>

47 - https://www.glued-laminated-timber.com/glued-laminated-timber/glulam-produced-for-specific-building-projects/factory-assembly/mn_42552

48 - https://www.siga.swiss/global_en/knowledge/building-solutions/cross-laminated-timber-the-ultimate-guide-to-clt-and-how-to-protect-it

49 - https://www.siga.swiss/global_en/knowledge/building-solutions/cross-laminated-timber-the-ultimate-guide-to-clt-and-how-to-protect-it

50 - <https://www.carrilhodagraca.pt/>

51 - <https://www.carrilhodagraca.pt/>

52 - <https://www.carrilhodagraca.pt/>

53 - <https://www.carrilhodagraca.pt/>

54 - <https://www.archdaily.com.br/br/897585/terminal-de-cruzeiros-de-lisboa-carrilho-da-graca-arquitectos>

55 - <https://www.archdaily.com.br/br/897585/terminal-de-cruzeiros-de-lisboa-carrilho-da-graca-arquitectos>

56 - <https://www.archdaily.com.br/br/897585/terminal-de-cruzeiros-de-lisboa-carrilho-da-graca-arquitectos>

- 57 - <https://www.archdaily.com.br/br/897585/terminal-de-cruzeiros-de-lisboa-carrilho-da-graca-arquitectos>
- 58 - <https://www.carrilhodagraca.pt/>
- 59 - <https://www.carrilhodagraca.pt/>
- 60 - <https://www.arx.pt/projecto/redbridge/>
- 61 - <https://www.arx.pt/projecto/redbridge/>
- 62 - <https://www.arx.pt/projecto/redbridge/>
- 63 - <https://espacodearquitetura.com/projetos/escola-redbridge/>
- 64 - <https://espacodearquitetura.com/projetos/escola-redbridge/>
- 65 - MATEUS, Ricardo; BRANGANÇA, Luís. *Tecnologias Construtivas para a Sustentabilidade da Construção*. Porto: Edições Ecoply, 2006, p. 213.
- 66 - MATEUS, Ricardo; BRANGANÇA, Luís. *Tecnologias Construtivas para a Sustentabilidade da Construção*. Porto: Edições Ecoply, 2006, p. 225.
- 67 - Desenho do autor.
- 68 - <https://www.archdaily.com.br/br/935449/escola-redbridge-arx-portugal-arquitetos>.
- 69 - <https://www.archdaily.com.br/br/935449/escola-redbridge-arx-portugal-arquitetos>.
- 70 - <https://www.archdaily.com.br/br/935449/escola-redbridge-arx-portugal-arquitetos>.
- 71 - <https://www.archdaily.com.br/br/935449/escola-redbridge-arx-portugal-arquitetos>.
- 72 - <https://www.archdaily.com.br/br/935449/escola-redbridge-arx-portugal-arquitetos>.
- 73 - BASTOS, Nuno M. *Construção em Madeira - Preconceito ou Inadequação? Processos atuais: da conceção à execução*. Porto: FAUP, 2019, p. 156.
- 74 - BASTOS, Nuno M. *Construção em Madeira - Preconceito ou Inadequação? Processos atuais: da conceção à execução*. Porto: FAUP, 2019, p. 147.
- 75 - BASTOS, Nuno M. *Construção em Madeira - Preconceito ou Inadequação? Processos atuais: da conceção à execução*. Porto: FAUP, 2019, p. 146.