



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Tomé Ferreira Martins

DIMENSIONAMENTO DE LAJES DE
EDIFÍCIOS COM BASE EM CRITÉRIOS
AMBIENTAIS SUSTENTÁVEIS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de
Especialização em Mecânica Estrutural, orientada pela Professora Doutora
Helena Maria dos Santos Gervásio e pelo Professor Doutor Luís Alberto
Proença Simões da Silva

Coimbra, 10 de maio de 2019



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Tomé Ferreira Martins

DIMENSIONAMENTO DE LAJES DE EDIFÍCIOS COM BASE EM CRITÉRIOS AMBIENTAIS SUSTENTÁVEIS

BUILDINGS SLAB DESIGN BASED ON SUSTAINABLE ENVIRONMENTAL CRITERIA

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Mecânica Estrutural,
orientada pela Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio
e pelo Professor Doutor Luís Alberto Proença Simões da Silva

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões
que possa conter.

Coimbra, 10 de maio de 2019

AGRADECIMENTOS

Não poderia terminar esta caminhada sem deixar palavras de agradecimento a quem, de alguma forma, dela fez parte.

Assim, gostaria de expressar o meu sincero agradecimento a todos os docentes e não docentes do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra que contribuíram para a minha formação académica e pessoal, em especial à Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio e ao Professor Doutor Luís Alberto Proença Simões da Silva, não só pela disponibilidade e dedicação com que acompanharam o desenvolver deste trabalho, mas também pelos conhecimentos que me foram transmitindo nas diversas unidades curriculares em que tive o prazer de os ter como docentes.

Aos meus colegas de trabalho, o meu reconhecimento pelo companheirismo e espírito de entreatajuda que manifestam diariamente, fomentando a minha contínua aquisição de conhecimentos.

Aos meus amigos, a minha sincera gratidão por todos os momentos que proporcionaram durante esta caminhada, destacando a Carla cujas circunstâncias fizeram com que a acompanhasse sempre de perto. Um enorme agradecimento à Ana, cujo carinho demonstrado durante o desenvolvimento deste trabalho foi fundamental.

Nada disto seria possível sem o apoio incondicional dos meus pais, irmão, cunhada e sobrinhos, reconhecendo a sua compreensão nas situações em que tive de abdicar da sua companhia em prol da minha formação académica.

RESUMO

A sustentabilidade enquadra-se, no âmbito do interesse da humanidade e das políticas a seguir, como um dos maiores desafios do século. O elevado crescimento da população ao nível mundial e o conseqüente aumento das atividades inerentes ao seu desenvolvimento atingiram proporções que ultrapassam a capacidade de resposta do planeta. Neste contexto, o sector da construção desempenha um papel preponderante dada a sua relevante articulação com as três componentes da sustentabilidade: Economia, Sociedade e Ambiente.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia internacionalmente reconhecida e utilizada em diversos setores industriais. No âmbito do setor da construção, consiste na análise sistemática de materiais e processos envolvidos no ciclo de vida de um edifício, permitindo a quantificação dos seus potenciais impactes e, conseqüentemente, a comparação e otimização de alternativas com base em parâmetros analíticos. Contudo, a sua aplicação convencional pressupõe o conhecimento detalhado dos processos e quantidades envolvidas, possibilitando a sua aplicação somente em fases de projeto mais avançadas. Por outro lado, durante as fases iniciais de projeto, o potencial para otimização do desempenho de determinada solução é maior, decrescendo nas fases subsequentes. Desta forma, decisões tomadas em fases iniciais conduzem a soluções mais eficientes e associadas a custos reduzidos.

Assim, o trabalho desenvolvido segue uma metodologia baseada na utilização de macro-componentes como suporte às decisões em fases iniciais de projeto, incorporando estas informações relativas a parâmetros de desempenho ambiental de soluções construtivas predefinidas, sendo expressos por unidade de medida.

Posto isto, foram desenvolvidas macro-componentes para duas tipologias de lajes: lajes mistas de chapa colaborante e lajes de vigotas com blocos de aligeiramento, complementadas com a sua aplicação prática num estudo comparativo entre as duas soluções, para vãos correntes de edifícios residenciais e comerciais, concluindo-se que as primeiras são mais eficientes para vãos menores e as segundas para vãos elevados.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Lajes de edifícios, Avaliação de Ciclo de Vida, Fases iniciais de projeto, Macro-componente

ABSTRACT

In the interests of society and the policies to be followed, sustainability is one of the greatest challenges of the century. The growth of the world's population and the increase of the activities inherent to its development reached proportions that surpassed the capacity of response of the planet. In this context, construction industry plays an important role given its articulation with the three components of sustainability: Economy, Society and Environment.

Life Cycle Assessment is an internationally recognized methodology used in many industrial sectors. In relation to the construction sector, it consists of the systematic analysis of materials and processes involved in the building life cycle, allowing the quantification of its potential impacts and the comparison and optimization of alternatives based on analytical parameters. Nevertheless, its conventional application requires the detailed knowledge of the processes and quantities involved, enabling its application only in more advanced design phases. On the other hand, during initial phases of the project, the potential to optimize the performance of a given solution is higher, decreasing in the subsequent phases. In this way, decisions taken in the early stages lead to more efficient and cost-effective solutions.

Thus, the work developed in this thesis follows a methodology based on the use of macro-components as support for decisions in the early stages of design, taking into account information regarding parameters of environmental performance of predefined constructive solutions, being expressed by unit of measure.

Therefore, macro-components were developed for two types of slabs: composite steel panel slabs and slabs of pre-stressed beams with light concrete blocks. Then a comparative study between the two solutions is carried out for current spans of residential and commercial buildings, concluding that the former are more efficient for smaller spans and the latter for higher spans.

Key words: Sustainability, Building Slab, Life Cycle Assessment, Early stages of design, Macro-component

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE	IV
ABREVIATURAS	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento geral	1
1.2 Objetivos da dissertação	3
1.3 Organização e conteúdos	3
2 CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL	4
2.1 Sustentabilidade – Conceito e enquadramento histórico	4
2.2 Desenvolvimento do conceito de construção sustentável	9
2.3 Impactes decorrentes das atividades construtivas	21
2.3.1 Impactes ambientais	22
2.3.2 Impactes económicos e sociais	26
2.4 Principais obstáculos à consolidação da construção sustentável no mercado	26
2.5 Instrumentos e metodologias de promoção da construção sustentável	27
2.5.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	28
2.6 Importância da escolha das soluções construtivas e respetivos materiais	34
3 DEFINIÇÃO DE MACRO-COMPONENTES RELATIVAS A DUAS TIPOLOGIAS DE LAJES	36
3.1 Considerações iniciais	37
3.2 Metodologia para cálculo das macro-componentes	39
3.3 Base de dados ambientais	41
3.4 Lajes mistas de chapa colaborante	42
3.5 Lajes de vigotas prefabricadas e blocos de aligeiramento	50
3.6 Análise de sensibilidade do parâmetro distância	58
4 APLICAÇÃO PRÁTICA DA METODOLOGIA ESTUDADA	60
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
5.1 Conclusões	62
5.2 Propostas para desenvolvimentos futuros	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
ANEXO A	A-1

ANEXO B.....	B-1
ANEXO C.....	C-1
ANEXO D.....	D-1

ABREVIATURAS

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida

CEN – Comité Europeu de Normalização

CIB - *International Council for Research and Innovation in Building and Construction*

CRISP – *Construction and City Related Sustainable Indicators*

EPD – Declarações Ambientais de Produto (*Environmental Product Declarations*)

GWP – Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential*)

IEA – *International Energy Agency*

ISO – Organização Internacional de Normalização

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

ONU – Organização das Nações Unidas

PIB – Produto Interno Bruto

SLS – Estados Limites de Utilização (*Serviceability Limit State*)

ULS – Estados Limites Últimos (*Ultimate Limit State*)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

A sustentabilidade afigura-se como um dos maiores desafios do corrente século para o planeta Terra e seus habitantes. O elevado crescimento da população a nível mundial e o conseqüente aumento das atividades inerentes ao desenvolvimento da espécie humana atingiram proporções que ultrapassam a capacidade de resposta do planeta a tais solicitações, pondo em causa a sua sustentabilidade.

O desenvolvimento sustentável consiste, simplifcadamente, na procura da melhor qualidade de vida possível, permitindo, contudo, viver num ambiente saudável e capaz de prosperar as condições sociais, económicas e ambientais das gerações atuais e futuras. Desta forma, o conceito de sustentabilidade compreende três dimensões: económica, social e ambiental. Assim, o desenvolvimento sustentável deve procurar benefícios aos níveis económico e social e reduzidos impactes ambientais, estabelecendo o melhor equilíbrio possível entre as três componentes.

Ao longo das últimas décadas, a componente ambiental da sustentabilidade tem merecido maior destaque por parte de organizações ambientais, investigadores e sociedade em geral, face à gravidade dos problemas ambientais que assolam o planeta. Fenómenos como o esgotamento de recursos naturais, o aquecimento global, a redução da camada de ozono, a acumulação de resíduos, a perda de biodiversidade, entre outros, conduziram à necessidade de implementação de estratégias no sentido de mitigar tais ameaças.

Dos fenómenos descritos anteriormente, destaca-se o aquecimento global por ser o fenómeno ambiental que mais ameaça a sustentabilidade futura e cuja tendência de crescimento é mais preocupante (IPCC, 2014). Este fenómeno é causado pela emissão de gases com efeito de estufa (CO₂, CH₄, N₂O, CFCs, etc.) e consiste no aumento da temperatura média dos oceanos e da superfície do planeta. O Potencial de Aquecimento Global (GWP - *Global Warming Potential*) é o indicador referente aos impactes deste fenómeno, que representa a contribuição de cada gás com efeito de estufa para o aquecimento global.

Em 1997, o Protocolo de Quioto deu início a uma série de estratégias que visam a mitigação do fenómeno do aquecimento global e que culminaram, a propósito da Conferência de Copenhaga em 2009, no estabelecimento de esforços para que o aumento global da temperatura se mantenha abaixo de 2°C até ao final do presente século, tendo por base os valores relativos à fase precedente à Revolução Industrial.

Neste contexto, o setor da construção desempenha um papel preponderante. Embora seja um setor essencial para o desenvolvimento económico e social, é também dos que mais contribui para a emissão de gases com efeito de estufa, sendo responsável por mais de um terço das emissões ao nível mundial (UNEP, 2009). De acordo com a mesma fonte, este é também aquele com maior potencial para a redução dessas emissões, de um ponto de vista de custo-benefício. As principais estratégias que visam o desenvolvimento ambiental sustentável deste setor consistem, fundamentalmente, na utilização de materiais e técnicas construtivas com melhor desempenho ambiental e na redução da dependência energética.

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é, no âmbito da construção, uma metodologia que consiste na análise sistemática de materiais e processos envolvidos no ciclo de vida de um edifício, permitindo a quantificação dos seus potenciais impactes e, conseqüentemente, a comparação e otimização de alternativas com base em parâmetros analíticos. Esta metodologia é internacionalmente reconhecida e é utilizada em diversos setores industriais. Contudo, a sua aplicação convencional pressupõe o conhecimento detalhado dos processos e quantidades de materiais envolvidos, viabilizando a aplicação da mesma somente em fases de projeto mais avançadas. Por outro lado, durante as fases iniciais de projeto, o potencial para otimização do desempenho da solução é maior, decrescendo para fases subsequentes. Desta forma, decisões tomadas em fases iniciais conduzem a soluções mais eficientes associadas a custos reduzidos.

Neste âmbito, o trabalho desenvolvido nesta dissertação segue uma metodologia baseada na utilização de macro-componentes como suporte a decisões em fases iniciais de projeto. As macro-componentes consistem na informação acerca de parâmetros referentes a indicadores de sustentabilidade de soluções construtivas predefinidas, englobando as suas principais características e impactes referentes ao seu ciclo de vida, sendo expressas por unidade de medida (geralmente em m²). Por conseguinte, a síntese das propriedades das várias soluções construtivas em formatos e unidades de medida equiparáveis simplifica a análise comparativa entre estas, reduzindo o grau de conhecimento necessário para a aplicação da metodologia. A sua utilização em fases iniciais de projeto possibilita a avaliação e comparação de várias alternativas, mesmo que os dados disponíveis sejam reduzidos.

1.2 Objetivos da dissertação

Os objetivos da presente dissertação são os seguintes:

- Enquadrar o atual estado de desenvolvimento do conceito de sustentabilidade, descrevendo a influência do setor da construção na sustentabilidade do planeta, em particular na sua componente ambiental, destacando o seu potencial para melhorias;
- Sintetizar a metodologia ACV, realçando a importância da mesma aplicada em fases iniciais de projeto;
- Definir macro-componentes para duas tipologias de lajes (laje mista com chapa colaborante e laje com vigotas pré-esforçadas e blocos de aligeiramento) visando a caracterização dos seus impactes ao nível ambiental, nomeadamente a sua contribuição para o Aquecimento Global, ao longo do seu ciclo de vida;
- Realizar uma análise comparativa do desempenho ao nível ambiental, em termos de Potencial de Aquecimento Global, das duas soluções construtivas definidas através de macro-componentes, para vãos correntes de edifícios residenciais e de escritórios.

1.3 Organização e conteúdos

A presente dissertação encontra-se estruturada em 5 capítulos e 4 anexos.

No primeiro e atual capítulo, é efetuado um enquadramento da problemática abordada, são definidos os objetivos propostos e é exposta a organização dos conteúdos do documento.

O segundo capítulo compreende a avaliação do estado de desenvolvimento da problemática estudada, bem como a exposição de conceitos fundamentais para a compreensão da abordagem utilizada para a resolução da mesma.

No terceiro capítulo é desenvolvida e explorada a metodologia com vista à obtenção de soluções (macro-componentes), consistindo o quarto capítulo na aplicação prática desta.

No quinto e último capítulo, são sintetizadas as principais conclusões resultantes do estudo efetuado, sendo também apresentadas propostas de desenvolvimentos futuros.

O Anexo A apresenta a base de dados utilizada no cálculo das macro-componentes, os Anexos B e C contêm informações detalhadas sobre os resultados e o Anexo D descreve uma análise de sensibilidade.

2 CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

2.1 Sustentabilidade – Conceito e enquadramento histórico

A história da existência humana revela que a procura por melhorias no bem-estar e qualidade de vida foi, desde os seus primórdios, uma prioridade. A par disso, situações económicas prósperas e estáveis estabelecem uma base fundamental para o desenvolvimento nesse sentido, daí que esta matéria seja um dos maiores focos de debate político, tanto ao nível nacional como internacional. Assim, e até meados do século XX, as atividades humanas e o seu desenvolvimento basearam-se veementemente nestes princípios, relegando para segundo plano outras temáticas, das quais o ambiente natural é um exemplo. Neste contexto, a proteção ambiental era abordada, sobretudo, sob uma perspetiva antropocêntrica. O ambiente natural constituía um suporte para a vida humana e uma fonte de recursos que interessava preservar, sem que, contudo, lhe fosse atribuído algum valor próprio. As consequências dos danos infligidos eram abordadas apenas ao nível dos prejuízos que isso implicaria na procura de melhores condições de vida, saúde, entre outros interesses inerentes ao desenvolvimento humano (Pinheiro, 2006).

A noção de desenvolvimento sustentável despontou, entre o final da década de 60 e início da década de 70, como uma resposta natural (contudo, tardia) às fragilidades das políticas de desenvolvimento praticadas até então. A crescente consciencialização acerca da progressiva degradação do planeta, decorrente das atividades humanas, levou a que a convivência em harmonia com a natureza se tornasse, progressivamente, uma prioridade no desenvolvimento da humanidade, para além da sua sobrevivência, bem-estar e qualidade de vida.

É nesta altura que se toma consciência que os impactes resultantes das atividades humanas excedem a capacidade de assimilação do planeta provocando danos irreversíveis, dos quais a perda de biodiversidade, o esgotamento de recursos naturais e a incapacidade de gestão dos resíduos produzidos são exemplos. Se estas ameaças não forem mitigadas conduzirão à progressiva devastação do meio natural e, conseqüentemente, à degradação do meio construído.

A crise petrolífera da década de 70 veio reforçar a ideia da finitude dos recursos do planeta, motivando estratégias no sentido da poupança de energia, às quais a indústria da construção não ficou indiferente, nomeadamente através da crescente preocupação acerca da poupança de energia na fase de utilização dos edifícios e sua apreciação na fase de conceção (Mateus, 2009). Na verdade, este é um assunto que ainda se mantém na ordem do dia, fruto da evolução dos índices de emissões poluentes e da escassez de recursos naturais sentida nas últimas décadas.

A década de 80 ficou marcada pelos desenvolvimentos ao nível da compreensão acerca dos fenómenos prejudiciais ao meio ambiente, potenciados pela descoberta do avançado estado de degradação da camada de ozono estratosférico (“buraco” da camada de ozono) e pela intensificação de outros problemas, dos quais as chuvas ácidas são um exemplo. Assim, as questões ambientais passaram a ser abordadas, não só ao nível das suas consequências, mas também dos processos causadores das mesmas, associando os impactes de uma atividade humana ao resultado de todo o seu ciclo, incluindo materiais, resíduos e emissões, bem como a própria tecnologia utilizada.

O crescimento das atividades humanas é, naturalmente, proporcional ao crescimento populacional. Em consequência, a busca por melhorias na qualidade de vida e a crescente necessidade de mobilização de recursos, associadas ao desenvolvimento tecnológico e económico, promovem o aumento de interações com o ambiente natural, agravando assim os desequilíbrios.

Neste contexto, o crescimento exponencial da evolução demográfica das últimas décadas, ilustrada na Figura 2.1, pode comprometer as metas do desenvolvimento sustentável. Assim, em 1950 a população mundial correspondia a cerca 2500 milhões de pessoas, sendo ultrapassados os 3000 milhões em 1960. Em 1999 alcançaram-se os 6000 milhões de pessoas, sendo a população estimada referente ao ano de 2015 de cerca de 7350 milhões, o que significa que a população mundial quase triplicou em 65 anos, fruto, especialmente, do abrandamento das taxas de mortalidade. Paralelamente, as previsões apontam para que a população mundial continue a aumentar, embora seja presumível um abrandamento da taxa de crescimento.

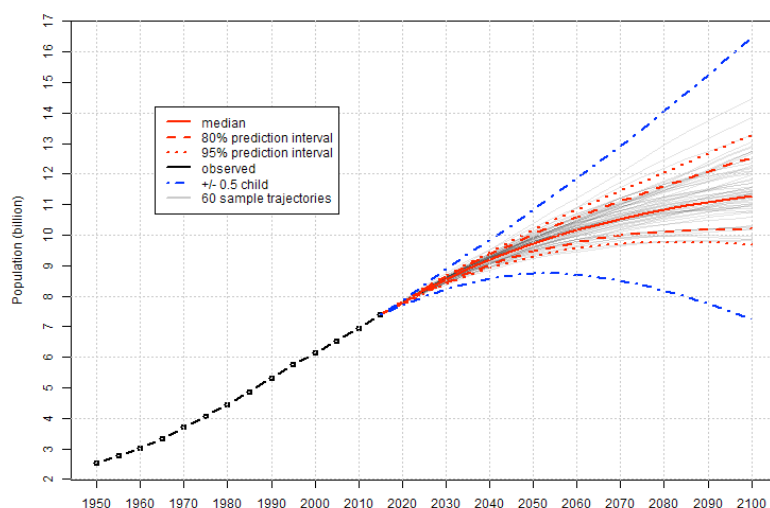


Figura 2.1 – Evolução demográfica mundial (United Nations, 2017)

Paralelamente ao crescimento populacional, assistiu-se, nas últimas décadas, a evidentes desenvolvimentos do nível de vida das pessoas, elevando-se, desta forma, o padrão de conforto das mesmas. Contudo, a evolução tecnológica não foi capaz de acompanhar tais desenvolvimentos no sentido da mitigação dos seus efeitos, exacerbando os desequilíbrios resultantes das atividades humanas. Outra consequência do crescimento populacional é a acrescida necessidade de infraestruturas e edifícios, especialmente nos centros urbanos, como forma de resposta às necessidades da sociedade.

A evolução tecnológica é dependente de uma multiplicidade de fatores, variando o seu grau de desenvolvimento entre os vários setores de atividade. O setor da construção é aquele que apresenta uma evolução tecnológica mais reduzida, quando comparado com os restantes. A mão-de-obra não qualificada, associada à precariedade das condições de trabalho, e a utilização de tecnologias construtivas tradicionais constituem os principais motivos da inércia na adaptação deste setor ao estado atual do desenvolvimento tecnológico. Em contrapartida, é no interior dos edifícios que as pessoas passam grande parte do seu tempo, seja no trabalho ou na habitação, tornando este setor numa peça fundamental na temática do desenvolvimento sustentável, tanto pelos benefícios como pelas adversidades associadas ao mesmo.

O conceito de desenvolvimento sustentável foi evoluindo ao longo do tempo, acompanhando a evolução das necessidades da humanidade. Se inicialmente este se baseava na prosperidade da população coetânea, abordando especialmente questões económicas e sociais, é nas décadas de 70 e 80 que as preocupações pelas gerações futuras e pelo ambiente natural começam, progressivamente, a merecer o devido destaque.

O Relatório de Brundtland, publicado em 1987 pela Organização das Nações Unidas (ONU), definiu o desenvolvimento sustentável como sendo “*o desenvolvimento capaz de satisfazer as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras em suprir as suas próprias necessidades*” (WCED, 1987, p. 54). Este acrescenta ainda que o desenvolvimento sustentável não deve ser encarado como uma condição fixa de harmonia, mas antes como um processo suscetível de transformações, no sentido de compatibilizar os interesses sustentáveis atuais e salvaguardar os futuros. Embora tenham surgido outras definições, esta é aquela que, mesmo passadas três décadas, é aceite com maior consensualidade, sem prejuízo da sua natureza puramente filosófica e política, não constituindo bases inequívocas para a tomada de decisões (Pinheiro, 2006).

Assim, o desenvolvimento sustentável baseia-se em três componentes: a sociedade, a economia e o ambiente, sendo os seus principais objetivos, em cada uma das componentes, os seguintes (Yılmaz e Bakış, 2015):

- Ao nível ambiental:
 - Redução do consumo e gestão sustentável dos recursos naturais, incluindo recursos hídricos;
 - Promoção da reutilização e reciclagem de materiais;
 - Preservação da biodiversidade e dos ecossistemas;
 - Redução da produção de emissões e resíduos e gestão eficiente dos mesmos;
 - Promoção da utilização de fontes de energia renováveis em detrimento de fontes não renováveis;
 - Proteção e conservação do património ambiental, cultural e histórico.
- Ao nível económico:
 - Criação de novos mercados e oportunidades de negócio;
 - Redução do custo dos bens pela via do aumento da eficiência e redução das necessidades energéticas e de materiais na sua produção;
 - Distribuição equitativa do poder de compra da população e combate à pobreza;
 - Crescimento económico próspero e capaz de suportar as necessidades associadas às restantes componentes (sociedade e ambiente).
- Ao nível social:
 - Acesso a condições básicas de vida como saúde, habitação, educação, trabalho, transporte e atividades culturais para toda a população mundial;

- Aumento da qualidade de vida e bem-estar dentro dos limites sustentáveis;
- Promoção da reintegração de grupos desfavorecidos na sociedade;
- Proteção dos direitos humanos e da liberdade das gerações atuais e futuras.

Desta forma, os princípios ao nível da componente ambiental são, em geral, fruto da progressiva consciencialização acerca das ameaças à capacidade de assimilação do planeta, em resultado das atividades humanas. Interessa então a gestão eficaz do consumo de recursos, da produção de resíduos e restantes interações com o ambiente, de forma a que estes processos ocorram a um ritmo inferior à capacidade de absorção e renovação do planeta. Enquadra-se neste contexto a máxima de que as gerações futuras merecem um ambiente no mínimo igual, ou se possível melhor, àquele que se usufrui atualmente. É de realçar que, embora a componente ambiental seja associada principalmente ao ambiente natural, esta contempla também o ambiente construído.

Muitos dos princípios do desenvolvimento social sustentável são intrínsecos à própria existência humana, já que a luta pela sobrevivência e a procura por melhores condições de vida foram uma constante ao longo de toda a história da humanidade. Ainda assim, a evolução social não foi uniforme em todos os países, realçando-se o desequilíbrio entre os designados países desenvolvidos e, por outro lado, os países em desenvolvimento ou subdesenvolvidos. Desta forma, o grau de desenvolvimento social é, em geral, proporcional ao desenvolvimento económico, podendo este último limitar a evolução relativa à componente social, o que reforça a importância das interações entre as três componentes do desenvolvimento sustentável. Também neste contexto se insere uma das principais bandeiras deste conceito, nomeadamente a promoção da equidade social entre as nações, bem como a igualdade de oportunidades entre as várias classes sociais. Paralelamente, é imprescindível a intervenção dos diversos atores sociais neste processo, tanto na definição dos interesses e caminhos a seguir, como pelo sentido de responsabilidade indispensável ao bom funcionamento do mesmo.

Por outro lado, a satisfação das necessidades da população nunca será alcançada sem um desenvolvimento económico sustentado. Desta forma, o desenvolvimento sustentável visa a integração dos interesses ambientais e sociais nas políticas económicas, adicionados aos conceitos tradicionais de mais valias económicas. Assim, o lucro passa a ser avaliado não apenas de uma perspetiva financeira, mas também do ponto de vista ambiental e social, potenciando a eficiência na utilização de recursos, tanto humanos como naturais, e garantindo que o ambiente e a sociedade não constituem um entrave para a economia, mas antes um estímulo para a mesma.

O desenvolvimento sustentável constitui, em suma, uma forma de desenvolvimento capaz de conciliar harmoniosamente os interesses das suas três componentes numa forma de equilíbrio tal que o respeito pela humanidade, o tempo e o espaço seja perentório nas políticas adotadas (Yılmaz e Bakış, 2015). A equidade económica e social e o respeito pelo ambiente e pelas gerações futuras são condições imperativas, ajustando as estratégias de desenvolvimento às necessidades atuais, mas situando o nível de desenvolvimento dentro dos limites necessários ao equilíbrio entre os sistemas natural e artificial (Mateus, 2009), de forma a não condicionar as oportunidades de progresso das gerações vindouras.

Assim, para que se possa considerar um processo sustentável, este deve incluir, obrigatoriamente e sob a pena de o conceito não se concretizar, uma análise multidisciplinar das condições relativas a cada uma das três componentes, incluindo as interações entre elas, como ilustra a Figura 2.2. Além disso, esta análise deve acompanhar todas as fases do processo, desde a sua conceção, passando pela sua implementação até ao produto final. Se for o caso, deve ainda ser equacionada a solução para o material remanescente no fim de vida útil do produto, salientando-se aqui a relevância da reutilização e da reciclagem.



Figura 2.2 – Dimensões da sustentabilidade (Adaptado de Pinheiro, 2006)

2.2 Desenvolvimento do conceito de construção sustentável

O setor da construção tem merecido elevado destaque nas estratégias de promoção do desenvolvimento sustentável, tanto pela sua influência no bem-estar da humanidade como pelas suas particularidades, das quais o atraso tecnológico relativamente aos outros setores é um exemplo. Para melhor se compreender o seu papel num panorama de desenvolvimento

sustentável, interessa, antes de mais, clarificar o significado de construção, a evolução desta atividade ao longo do tempo, bem como as circunstâncias em que a mesma é praticada.

A construção é uma prática que tem acompanhado a evolução humana desde as suas origens, satisfazendo as suas necessidades básicas mais elementares e elevando a sua qualidade de vida e bem-estar. Assim, com a imaginação e mestria do Homem, a construção foi-se desenvolvendo no sentido de ultrapassar os entraves que foram condicionando o seu desenvolvimento, resultando na edificação de estradas, pontes, barragens, edifícios, entre outros.

O termo construção exprime, no enquadramento do presente trabalho, o ato ou efeito de construir, referindo-se, mais propriamente, ao que é construído ou resulta de operações de construção e que se possa considerar imóvel ou fixo ao solo. Incluem-se neste contexto todo o tipo de edifícios (residenciais, comerciais, industriais, serviços, etc.), vias de comunicação (estradas, caminhos-de-ferro, etc.), obras de arte de engenharia, estádios, plataformas marítimas, movimentação de terras, entre outros. Há ainda que salientar as três principais componentes do conceito de construção, nomeadamente a indústria da construção como setor económico, as respetivas atividades construtivas referentes (não apenas a novas construções, mas também a intervenções de renovação, reconstrução e demolição) e o produto final destas atividades, correspondente ao ambiente construído.

A construção possui, relativamente a outras indústrias, algumas particularidades que importam ser analisadas num contexto de desenvolvimento sustentável. Assim, os principais fatores diferenciadores desta são os seguintes:

- Utilização de metodologias convencionais aliada ao diminuto desenvolvimento tecnológico e à mão de obra pouco qualificada;
- Longa duração do ciclo de vida dos produtos (por vezes superior a 50 anos), realçando a importância das decisões tomadas nas fases iniciais do mesmo, especialmente nas fases de conceção, projeto e construção;
- Durabilidade altamente dependente de condições climáticas ou mesmo eventuais acontecimentos fortuitos, dos quais os desastres naturais são exemplo;
- Irrepetibilidade dos processos de produção e do produto final, já que cada caso possui as suas próprias características e condições;
- Multidisciplinaridade relativa ao ciclo de vida dos seus produtos.

Ao nível da economia, o setor da construção desempenha um papel de extrema importância, designadamente através da significativa contribuição para o PIB e volume de emprego, na

formação bruta de capital fixo, salientando-se ainda o considerável efeito de arrastamento nos restantes setores económicos (Pinheiro, 2006). Ao nível europeu, este setor contribui em cerca de 10% para o PIB e aproximadamente 7% do total de empregados, correspondendo a sensivelmente 30% do total de empregos ao nível de todas as indústrias (OCDE@).

A interligação das diversas atividades construtivas com as três dimensões do desenvolvimento sustentável é evidente, já que estas promovem importantes efeitos, não só ao nível económico e social, mas também ambiental. Enquanto que ao nível das primeiras o efeito destas atividades é, geralmente, benéfico, o mesmo não acontece ao nível da componente ambiental. Assim, resultam destas atividades pressões ambientais tais como a ocupação e o uso do solo, o consumo de recursos (especialmente água, materiais e energia), a produção de resíduos e efluentes (líquidos e gasosos), a alteração dos ecossistemas naturais e consequente perda de biodiversidade, entre outras, interferindo diretamente com o ambiente envolvente (Pinheiro, 2006).

No que concerne aos diferentes setores da indústria da construção, o setor dos edifícios e respetivo espaço envolvente assume-se como uma das componentes mais importantes na aplicação dos princípios sustentáveis nesta indústria, tanto pela sua relevância em termos de volume de atividades, como pela sua importância no quotidiano da população, já que é no interior destes que se passa grande parte do tempo, especialmente por motivos habitacionais e profissionais. Por outro lado, e motivado pela crescente procura das últimas décadas, tem-se observado, neste setor, algum desinteresse no que respeita as questões ambientais tornando-o assim numa peça fundamental na promoção da sustentabilidade. Por conseguinte, situações como a redução das emissões atmosféricas, do consumo de água potável e gestão eficaz da exploração de recursos naturais são exemplos de benefícios diretos de um cenário sustentável neste contexto.

As atividades construtivas, das quais os edifícios e seus espaços envolventes são o formato mais comum, são a resposta às necessidades humanas, no sentido da melhoria da qualidade de vida e bem-estar. Os seus efeitos, diretos e indiretos, no meio envolvente fazem-se sentir de diversas formas e ao longo das várias fases do seu ciclo de vida, desde a extração de materiais até à demolição e devolução ao meio ambiente, incluindo a própria fase de construção, operação e intervenções de manutenção e reabilitação, conforme apresentado na Figura 2.3 que ilustra simplificadamente as fases do ciclo de vida de um edifício. Urge, assim, a necessidade de otimização de modos de conceção, construção, renovação e demolição no sentido da procura de melhorias no desempenho do edificado de forma a satisfazer os parâmetros de salubridade e conforto. Enquadram-se, neste contexto, temáticas como a escolha de materiais e soluções construtivas, a própria quantidade de material utilizada e seu

destino no final do ciclo de vida, bem como a energia despendida, não só na fase de operação, mas ao longo de todo o ciclo de vida.



Figura 2.3 – Fases do ciclo de vida de um edifício (Adaptado de ARQHYS@)

O crescimento populacional observado nas últimas décadas tem agravado esta problemática já que a elevada procura de habitação e a falta de capacidade de resposta, especialmente nos países em desenvolvimento, promovem o recurso à habitação precária. Por outro lado, assistiu-se, no passado, à rejeição para segundo plano dos aspetos relacionados com a qualidade dos edifícios, já que a oferta era deficitária relativamente à procura, pois as estratégias focavam-se sobretudo na ampliação do parque habitacional. Atualmente, e dado o estado de saturação do mercado dos edifícios, tanto de escritórios como residenciais, especialmente nos países da OCDE, a qualidade dos mesmos começa a afirmar-se como uma mais-valia no mercado, potenciando benefícios para os utilizadores, mas também oportunidades de negócio para os profissionais da construção.

É neste enquadramento que se desenvolve o conceito de construção sustentável, consistindo, naturalmente, na resposta do setor da construção às metas e objetivos estabelecidos para o desenvolvimento sustentável (Mateus, 2009), tendo em consideração todas as particularidades deste.

A inclusão de princípios de natureza sustentável na construção não é recente, não passando, contudo, de iniciativas¹ esporádicas que não se conseguiram estabelecer no mercado, ainda que tenham contribuído para o desenvolvimento do conceito até ao presente. Foi a partir de

¹ O Tratado de Arquitetura elaborado por Vitruvius no séc. I a.C. estabelece recomendações sobre a localização, orientação e iluminação natural dos edifícios, revelando interesse na eficiência dos edifícios em plena Antiguidade Clássica. A Casa da Cascata (Pensilvânia, EUA), concebida pelo arquiteto Frank Lloyd Wright na década de 1930, é um caso sobejamente conhecido na história da Arquitetura que aposta no edifício como extensão do ambiente, ajustando-o à topografia, privilegiando materiais locais e estabelecendo a harmonia entre este e a natureza, num contexto funcional.

1992, a propósito da conferência do Rio de Janeiro promovida pela ONU, que esta temática passou a merecer o devido destaque nas estratégias políticas mundiais. Com efeito, no seguimento dos desenvolvimentos relativos à sustentabilidade global alcançados até então, definiram-se orientações com vista à adaptação da indústria da construção ao contexto atual do mercado, visando, não só as necessidades dos seus utilizadores, mas também a sua eficiência do ponto de vista da sustentabilidade e das interações entre as suas três componentes.

À semelhança do desenvolvimento sustentável, o conceito de construção sustentável não é estacionário, uma vez que se vai constantemente adaptando à dinâmica do mercado tendo em vista a melhoria de condições das gerações atuais e futuras. Assim, a definição que mais consensualidade reúne é a proposta pelo Professor Charles Kibert (Universidade da Flórida) no âmbito da 1ª Conferência Internacional sobre a Construção Sustentável promovida pelo CIB em Tampa (Flórida) no ano de 1994, que sugere que a construção sustentável tem como objetivo *“a criação e manutenção de um ambiente construído saudável, baseado na utilização eficiente de recursos e em princípios ecológicos”* (Kibert, 2013, p. 8). Esta conferência culminou na definição de um conjunto de princípios que, quando devidamente equacionados pelos respetivos agentes em cada uma das fases do ciclo de vida dos edifícios, conduzem a soluções mais atrativas do ponto de vista da sustentabilidade. Os sete princípios da construção sustentável, de acordo com o CIB, são os apresentados no Quadro 2.1:

Quadro 2.1 – Os sete princípios da construção sustentável, segundo o CIB (Kibert, 2013)

1	Reduzir o consumo de recursos	Reduzir
2	Reutilizar os recursos	Reutilizar
3	Utilizar recursos recicláveis	Reciclar
4	Preservar a natureza	Natureza
5	Eliminar os produtos tóxicos	Resíduos Tóxicos
6	Avaliar os custos do ciclo de vida	Economia
7	Garantir a qualidade	Qualidade

Estes princípios deverão ser considerados em todas as fases do ciclo de vida do respetivo edifício, desde a fase de conceção à fase final do mesmo, referente ao tratamento dos produtos resultantes da desconstrução² e sua devolução ao meio ambiente, incluindo-se, neste contexto, os recursos necessários para as fases de utilização (água, energia, etc.) e manutenção, na eventualidade de serem necessárias intervenções desta natureza.

² Do ponto de vista da sustentabilidade, e tendo em conta que os edifícios estão associados a um ciclo de vida, o termo “desconstrução” será, face ao termo “demolição”, aquele que melhor descreve esta fase.

A construção sustentável é, desta forma, um conceito holístico e multidisciplinar (Mateus, 2009) na medida em que sintetiza em objetivos tangíveis as interações prejudiciais e benéficas mais relevantes, referentes à relação entre os meios construído e natural, fornecendo aos diversos agentes da indústria da construção e à sociedade em geral, indicações objetivas do percurso a seguir no sentido da compatibilização desta indústria com as intenções do desenvolvimento sustentável. Por outro lado, as variadas valências profissionais em que os produtos finais desta indústria se inserem, associadas aos diversos tipos de intervenientes ao longo do seu ciclo de vida (desde as fases de construção, utilização, manutenção ao final do ciclo de vida), manifestam o seu carácter multidisciplinar, realçando a importância da conciliação de esforços e interesses entre os vários intervenientes na procura das melhores soluções, de acordo com os princípios que definem o desenvolvimento sustentável.

As expressões “construção de alto desempenho” e “construção verde” têm sido usualmente empregues como sinónimos de construção sustentável. Todavia, é a expressão “construção sustentável” que melhor define este conceito, evidenciando a importância de uma abordagem holística, integrada e prática numa perspetiva multidisciplinar, como forma efetiva de alcançar o compromisso entre as três componentes do desenvolvimento sustentável (Pinheiro, 2006).

Efetuada uma retrospectiva da evolução do setor da construção nas últimas décadas, é notório que esta tem acompanhado, ainda que com alguma inércia, as estratégias e os objetivos referentes ao desenvolvimento sustentável. Desta forma, fruto das evidências e consequente consciencialização acerca dos impactes das atividades relacionadas com a construção, os fatores de competitividade dos mercados relacionados com esta indústria começaram a incorporar preocupações relativas ao meio ambiente, principalmente ao meio natural, já que era neste âmbito que se faziam sentir as maiores lacunas. Assim, a construção dita “tradicional”, cujos vetores diretores se baseavam, fundamentalmente, num compromisso entre a qualidade, o custo e o tempo necessário para a execução de determinado processo, começou a integrar nas suas estratégias responsabilidades relacionadas com o consumo racional de recursos, a redução de emissões e utilização de materiais prejudiciais à saúde e a preservação da biodiversidade, constituindo esta evolução um novo paradigma na indústria da construção. Os desafios para o presente e futuro consistem na inclusão de todos os princípios referentes às três dimensões do desenvolvimento sustentável, no sentido de promover a harmonia entre a qualidade de vida e do meio ambiente, a equidade social e um desenvolvimento economicamente sustentável, elevando, desta forma, a contribuição deste setor para um panorama de desenvolvimento equilibrado e sustentável. A Figura 2.4 sintetiza este processo evolutivo:

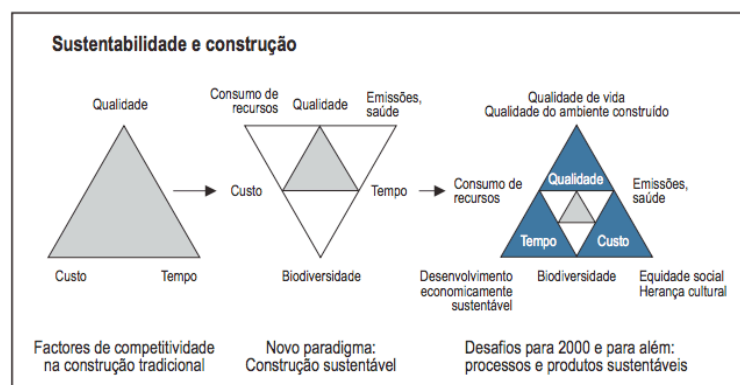


Figura 2.4 – Evolução da indústria da construção (Pinheiro, 2006)

Para que esta evolução se processe de forma eficaz é imprescindível que todos os intervenientes, desde agentes da indústria da construção, principalmente arquitetos e equipa de projetistas, a utilizadores do produto final, tenham um papel ativo e interventivo em todo o processo, desde a sua conceção e até ao fim do ciclo de vida (Vatalis *et al.*, 2013). Pretende-se, deste modo, que a indústria da construção participe, de forma proativa e voluntária, na definição de um novo rumo baseado nos princípios do desenvolvimento sustentável.

O objetivo da construção sustentável foi, mais recentemente, definido em função do desenvolvido pelo grupo de trabalho CRISP (*Construction and City Related Sustainable Indicators*). Desta forma, estabeleceu-se que com a aplicação de práticas sustentáveis na construção se pretende que os produtos desta indústria satisfaçam os necessários requisitos funcionais mediante o menor impacte ambiental possível, estimulando, simultaneamente, melhorias a nível económico, social e cultural às escalas local, regional e global (Mateus, 2009). Fruto do trabalho desenvolvido a propósito do projeto “*Sustainable Buildings*”, promovido pela OCDE e direcionado, dentro desta indústria, para o setor dos edifícios, foram estipuladas cinco prioridades no sentido da integração de práticas sustentáveis (OCDE,2001a):

- Uso eficiente dos recursos, incluindo a gestão eficaz do material resultante da desconstrução e a promoção da reutilização e/ou reciclagem;
- Incentivo à eficiência energética (e conseqüente redução dos gases com efeito de estufa);
- Prevenção da poluição, incluindo a qualidade do ar interior e a diminuição do ruído nos edifícios;
- Harmonização entre o edifício e o meio ambiente durante todo o ciclo de vida do mesmo;

- Adoção de abordagens integradas e sistêmicas das diversas interligações entre as várias dimensões do desenvolvimento sustentável.

No mesmo documento são também identificados e analisados os principais obstáculos relativos à promoção e consolidação da construção sustentável no mercado, estabelecendo-se assim a base para o desenvolvimento de estratégias nesse sentido. No seminário desenvolvido conjuntamente pela OCDE e IEA (*International Energy Agency*) sobre políticas para edifícios sustentáveis (OCDE,2001b), realizado em junho de 2001 em Paris, obtiveram-se como principais conclusões a premência na implementação de políticas que regulamentem os edifícios, tanto os novos como os já existentes, e a conveniência do desenvolvimento de instrumentos não regulamentares, de caráter económico e informativo, de forma a orientar e estimular o desenvolvimento da construção sustentável. O trabalho desenvolvido, ao longo de quatro anos, no âmbito deste projeto, culminou no estabelecimento de um conjunto de recomendações como base para as estratégias políticas de cada país (Pinheiro, 2006):

- Definição de uma estratégia nacional para melhorar o desempenho ambiental do setor dos edifícios;
- Implementação de mecanismos capazes de monitorizar regularmente o desempenho ambiental do edificado;
- Criação de parcerias entre o governo e a indústria de forma a instigar a investigação científica e o desenvolvimento tecnológico;
- Introdução de sistemas de reforço de aquisições públicas sustentáveis na construção;
- Minimização dos custos inerentes à duplicação de processos administrativos;
- Realização de pós-avaliações dos instrumentos políticos, promovendo a cooperação internacional.

Embora o tema construção sustentável esteja cada vez mais na ordem do dia, sobretudo no que toca aos desenvolvimentos científicos correspondidos, com alguma inércia, pelas respetivas estratégias políticas, a sua aplicação na prática resume-se, maioritariamente, ao meio académico (Mateus, 2009) na medida em que a sua aplicação no mercado da construção não é sistemática, consistindo apenas em alguns casos pontuais. Neste contexto, e de acordo com as orientações da OCDE, urge o desenvolvimento, a curto prazo, de instrumentos que possibilitem a avaliação da sustentabilidade das construções com base em critérios objetivos, evidenciando as mais-valias dos produtos sustentáveis e contribuindo, desta forma, para uma melhor promoção deste conceito no mercado. A realização de campanhas informativas salientando os benefícios da construção sustentável aliadas à revisão de códigos, normas e regulamentos deste setor são, de acordo com a Comissão Europeia, algumas das estratégias mais eficazes de forma a alcançar tais objetivos ao nível de cada país.

Neste sentido, foram desenvolvidas uma série de normas internacionais com o objetivo de regular e normalizar as avaliações relativas à sustentabilidade do setor da construção e dos seus produtos. Destas, destacam-se, no âmbito do objeto de estudo da presente dissertação, algumas das desenvolvidas pelos Comitês Técnicos ISO/TC 59 e CEN/TC 350 correspondentes à Organização Internacional de Normalização (ISO) e ao Comité Europeu de Normalização (CEN), respetivamente, e que se apresentam no Quadro 2.2:

Quadro 2.2 – Principais normas ISO e EN relativas à sustentabilidade no setor da construção

Norma	Designação	Ano de publicação
Comité Técnico: ISO/TC 59		
ISO 15932	Sustainability in building construction – General principles	2008
ISO/TR 21932	Sustainability in buildings and civil engineering works – A review of terminology	2013
ISO 21929-1	Sustainability in building construction – Sustainability indicators – Part 1: Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings	2011
ISO/TS 21929-2	Sustainability in building construction – Sustainability indicators – Part 2: Framework for the development of indicators for civil engineering works	2015
ISO 21931-1	Sustainability in building construction – Framework of methods of assessment of the environmental performance of construction works – Part 1: Buildings	2010
ISO 21930	Sustainability in buildings and civil engineering works – Environmental declaration of building products	2017
Comité Técnico: CEN/TC 350		
EN 15643-1	Sustainability of construction works – Sustainability assessment of buildings – Part 1: General framework	2010
EN 15643-2	Sustainability of construction works – Assessment of buildings – Part 2: Framework for the assessment of environmental performance	2011
EN 15643-3	Sustainability of construction works – Assessment of buildings – Part 3: Framework for the assessment of social performance	2012
EN 15643-4	Sustainability of construction works – Assessment of buildings – Part 4: Framework for the assessment of economic performance	2012
EN 15643-5	Sustainability of construction works – Sustainability assessment of buildings and civil engineering works – Part 5: Framework on specific principles and requirement for civil engineering works	2017
EN 15978	Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method	2011

Das normas apresentadas, destaca-se a EN 15978 (EN 15978, 2011), nomeadamente no que toca à definição das fases do ciclo de vida dos edifícios e sua avaliação. Assim, esta norma contextualiza o faseamento simplificado apresentado na Figura 2.3 numa divisão modular, mais conveniente para a aplicação das metodologias de ACV, conforme apresenta o Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Organização modular do ciclo de vida de um edifício de acordo com a EN 15978 (EN 15978, 2011)

Fase	Descrição	Módulo
Fase de produção	Fornecimento de matéria-prima	A1
	Transporte	A2
	Processo de fabrico	A3
Fase de construção	Transporte	A4
	Processo de construção	A5
Fase de utilização / operação	Utilização	B1
	Manutenção	B2
	Reparação	B3
	Substituição	B4
	Remodelação	B5
	Uso de energia operacional	B6
	Uso de água operacional	B7
Fim de vida	Desconstrução / demolição	C1
	Transporte	C2
	Processamento de resíduos	C3
	Eliminação / deposição dos resíduos	C4
Reutilização / potencial de reciclagem		D

Existem, no entanto, algumas variantes que englobam a totalidade ou apenas parte dos módulos enunciados, consoante a finalidade do estudo. De entre estas, destacam-se as três abordagens mais comuns: “do berço à sepultura” (*cradle-to-grave*), “do berço à porta de fábrica” (*cradle-to-gate*) e “do berço ao berço” (*cradle-to-cradle*), conforme esquematizado na Figura 2.5.

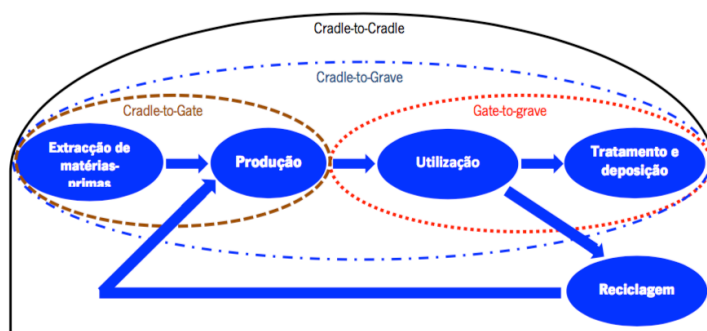


Figura 2.5 – Representação esquemática das fases do ciclo de vida referentes às três variantes mais comuns de ACV (Mateus, 2009)

Uma análise “do berço à sepultura” engloba as fases do ciclo de vida desde a extração e fornecimento de matéria-prima (“berço”) à deposição dos resíduos (“sepultura”), correspondendo aos módulos A1 a C4. Já a análise do tipo “do berço à porta de fábrica” considera apenas a fase relativa à produção dos materiais, desde a extração da matéria-prima (“berço”) ao portão da fábrica, imediatamente antes do transporte dos materiais até ao consumidor final, equivalendo aos módulos A1 a A3. Este tipo de análise tem especial relevância para as Declarações Ambientais de Produto (EPD). Finalmente, a análise “do berço ao berço” inclui a totalidade das fases do ciclo de vida (módulos A1 a D), acrescentando à análise do tipo “do berço à sepultura”, a fase correspondente à reciclagem dos materiais.

Os princípios sustentáveis deverão ser tidos em conta não só para os edifícios a construir, mas também em qualquer intervenção que seja realizada nos edifícios já existentes. Efetuando uma análise do mercado da construção, nomeadamente no que toca ao mercado nacional, verifica-se que, embora já existam tecnologias comprovadamente mais sustentáveis que as ditas convencionais, a parcela de edifícios que têm sido construídos ou intervencionados de forma sustentável é bastante reduzida, fruto do desinteresse por parte dos construtores e dos seus clientes, da falta de instrumentos regulamentares que promovam tais práticas, entre outras razões, as quais se discutem na secção 2.4.

A concretização dos propósitos da construção sustentável em critérios objetivos fornecerá aos agentes da indústria da construção, especialmente aos projetistas, bases inequívocas para a tomada de decisões relativas ao planeamento do ciclo de vida dos edifícios, contribuindo para o desenvolvimento de produtos mais atrativos do ponto de vista da sustentabilidade.

Uma circunstância indeclinavelmente associada à construção sustentável é ideia incorreta de que esta prejudica a dimensão económica em prol da dimensão ambiental, sendo que, na verdade, esta não pretende alcançar um desempenho ambiental excepcional à custa de despesas extraordinárias nem, por outro lado, um desempenho financeiramente mais atrativo sob o

prejuízo de consequências ambientais adversas. A solução, num contexto sustentável, situar-se-á no ponto de equilíbrio entre as variáveis em análise, promovendo o conforto dos utilizadores e a qualidade de vida da população em geral, sem que tal comprometa a viabilidade da solução ao nível económico e ambiental.

Desta forma, a clarificação dos benefícios dos produtos e práticas sustentáveis junto dos intervenientes desta indústria, nomeadamente os utilizadores dos edifícios e os construtores, constituirá um importante incentivo ao desenvolvimento da construção sustentável. Como esta abordagem tem em conta o ciclo de vida dos edifícios na íntegra, a fiabilidade e o desempenho dos produtos a longo prazo são qualidades primordiais, o que resulta numa maior durabilidade do produto final associada a menores custos de manutenção e funcionamento. Contudo, estes fatores nem sempre são imediatamente compreensíveis a curto prazo ou aquando da compra inicial, particularmente quando se trata de clientes menos esclarecidos, reforçando-se assim a pertinência das campanhas informativas e esclarecedoras acerca desta temática.

Neste enquadramento, e à medida que a sustentabilidade vai adquirindo importância na avaliação da qualidade do edificado, surgem novas oportunidades de negócio para os agentes envolvidos no mercado da construção, na medida em que o aumento da procura por este tipo de soluções impulsionará as vendas de produtos desta natureza, desenvolvendo o mercado dos produtos e tecnologias inovadores que, por seguirem princípios sustentáveis, beneficiarão de maior aceitação no mercado do que os baseados em princípios convencionais. Esta situação constitui também um estímulo ao investimento, por parte dos produtores de materiais e soluções construtivas, no desenvolvimento de novas alternativas cada vez mais eficientes de forma a elevarem a sua competitividade no mercado, tornando-se evidentes os benefícios para todos os intervenientes do setor, bem como para a qualidade do produto final (Zabalza *et al.*, 2011).

As estratégias e instrumentos promotores da construção sustentável devem estabelecer, mais do que imposições, incentivos para todas as partes envolvidas neste mercado. Os bancos e instituições de crédito deverão assumir um papel ativo nesta matéria privilegiando, através de vantagens nos seus serviços, os compradores que optem por soluções mais atrativas de acordo com os princípios condutores da sustentabilidade. Para além das mais-valias já enunciadas, o preço de revenda mais elevado destas soluções, relativamente às soluções convencionais, deverá ser uma variável a ponderar na altura da aquisição. Também as entidades públicas têm um papel perentório nesta equação na medida em que destas deve partir o exemplo, designadamente na gestão do seu património edificado de acordo com estes ideais.

Por outro lado, é de todo conveniente incentivar a adoção de práticas sustentáveis em fases iniciais de projeto, com especial destaque para a fase de conceção, já que as decisões tomadas nestas fases influenciam significativamente as características que definem a eficiência do edifício do ponto de vista da sustentabilidade (consumo de energia, custo ao longo do ciclo de vida, reutilização e/ou reciclagem de materiais, etc.). Além disso, quanto mais preliminar for a aplicação de determinada medida, maior será o seu potencial para a minimização, ou mesmo eliminação, da respetiva adversidade. Este assunto é explorado com maior detalhe na secção 2.5.1.4 do presente documento.

2.3 Impactes decorrentes das atividades construtivas

A indústria da construção desempenha um papel determinante na satisfação das necessidades da humanidade fornecendo condições para o seu desenvolvimento e melhoria da qualidade de vida, nomeadamente através da implantação de infraestruturas destinadas a habitação, transportes, saúde, entre outras. Desta forma, as atividades construtivas apresentam uma manifesta interligação com as três dimensões do desenvolvimento sustentável, na medida em que promovem importantes efeitos aos níveis económico, social e também ambiental (Mateus, 2009) ao longo das várias fases do ciclo de vida, sendo que a magnitude de cada impacte é dependente da fase em questão.

O termo impactes não se refere somente a efeitos negativos das atividades construtivas. Entende-se por impactes todos os efeitos, positivos e negativos, destas atividades. Na verdade, embora estas estejam associadas a impactes negativos consideráveis, a maior parcela deverá corresponder aos efeitos positivos, tais como o acesso a infraestruturas que potenciem o aumento da qualidade de vida e a criação de emprego, já que são estes o propósito de qualquer construção. Alguns impactes, particularmente os negativos, são agravados pelas particularidades da indústria da construção (atraso tecnológico, heterogeneidade do produto final, entre outras) conforme discutido anteriormente na secção 2.2.

A magnitude dos efeitos é tanto mais benéfica, do ponto de vista da sustentabilidade, quanto mais preliminar for a sua avaliação, ou seja, um efeito negativo terá um efeito tanto menor quanto mais antecipada for a sua identificação, na medida em que a adoção de medidas com vista à prevenção, redução ou compensação do respetivo efeito será mais eficiente (Andrade, 2013). Do mesmo modo, um efeito benéfico terá mais potencial quando equacionado nas fases iniciais do projeto.

Os impactes das atividades construtivas devem ser avaliados desde a escala global, referente ao planeta, até às escalas locais que dizem respeito às sociedades. Os edifícios, por serem o

setor mais comum dentro da indústria da construção, são o caso mais generalizável, pelo que a análise dos impactes das atividades construtivas se foca, na presente dissertação, neste tipo de construção.

Na secção 2.3.1 são descritos os impactes ambientais genericamente associados ao ciclo de vida dos edifícios, destacando-se a emissão de gases com efeito de estufa, por ser este o impacte em que se baseia o estudo desenvolvido nos capítulos seguintes. Por outro lado, já que a maioria dos impactes aos níveis económico e social estão interligados, designadamente através das suas repercussões no quotidiano dos intervenientes no ciclo de vida dos edifícios, considera-se pertinente a sua consideração em conjunto, como sucede na secção 2.3.2.

2.3.1 Impactes ambientais

Sendo a dimensão ambiental da sustentabilidade o tópico basilar do âmbito da presente dissertação, é natural que esta componente requeira maior destaque do que as restantes duas dimensões. Ressalva-se, no entanto, que na globalidade de um projeto efetivamente sustentável todas as três dimensões devem ser equacionadas com uniforme ponderação, sob a pena do conceito não se aplicar.

Antes de se proceder à identificação dos principais impactes ambientais associados ao ciclo de vida dos edifícios, importa clarificar a definição de Impacte Ambiental. Neste sentido, entende-se por Impacte Ambiental o conjunto de alterações, favoráveis ou desfavoráveis, originadas em parâmetros ambientais e sociais e resultantes da realização de um projeto, num determinado período de tempo e área, comparadas com a situação que ocorreria, no mesmo período de tempo e área, caso o projeto não se realizasse (Pinheiro, 2006).

Ao longo do seu ciclo de vida, um edifício promove pressões no meio ambiente (ambiente natural e ambiente construído) cujos efeitos são presumivelmente negativos, pelo que a sua identificação e análise são fundamentais no sentido da mitigação ou mesmo extinção dos mesmos. Deste modo, os principais impactes ambientais associados ao setor dos edifícios são os seguintes (Mateus, 2009):

- Extração e consumo de matérias-primas, relacionada com o esgotamento dos recursos naturais;
- Utilização dos recursos energéticos finitos, promovendo a sua exaustão;
- Alteração do uso, compactação, contaminação e ocupação do solo;
- Interferência no ciclo hidrológico, consumo de água e produção de águas residuais;

- Interferência na fauna e flora e consequente alteração dos ecossistemas e redução da biodiversidade;
- Emissões atmosféricas, das quais se destacam a emissão de gases com efeito de estufa;
- Emissões dos componentes no interior dos edifícios;
- Degradação estética e produção de resíduos;
- Alterações aos sistemas ambientais de base construída;
- Poluição sonora, térmica e luminosa.

O Quadro 2.4 apresenta os principais indicadores relativos à performance ambiental dos edifícios em contexto sustentável, de acordo com as normas Europeias EN 15643-2 e EN 15978.

Quadro 2.4 – Principais indicadores ambientais de sustentabilidade e respetivas unidades

Categoria	Indicador	Unidade
Avaliação de impactes	Potencial de aquecimento global - GWP	kg CO ₂ equiv
	Potencial de destruição da camada de ozono estratosférica - ODP	kg CFC 11 equiv
	Potencial de acidificação do solo e água - AP	kg SO ₂ ⁻ equiv
	Potencial de eutrofização - EP	kg (PO ₄) ³⁻ equiv
	Potencial de oxidação fotoquímica (smog) - POCP	kg C ₂ H ₄ equiv
	Potencial de destruição de recursos abióticos para elementos – ADP_E	kg Sb equiv
	Potencial de destruição de recursos abióticos para combustíveis fósseis – ADP_F	MJ
Consumo de recursos	Consumo de energia primária (renovável ou não renovável)	MJ
	Consumo de material secundário	kg
	Consumo de combustíveis secundários	MJ
	Consumo de água	m ³
	Produção de resíduos	kg
	Aproveitamento de material reutilizado / reciclado	kg

2.3.1.1 Emissão de gases com efeito de estufa

Dos impactes ambientais enunciados destaca-se a emissão de gases com efeito de estufa, na medida em que é sobre esta temática em particular que incide a exposição prática da metodologia abordada no presente trabalho. A emissão de gases com efeito de estufa é

resultado das intensas atividades humanas, das quais se destaca a utilização de combustíveis fósseis para a produção de energia. Ao nível das suas consequências, distinguem-se dois processos distintos: (i) o aumento da concentração de gases com efeito de estufa na atmosfera (CO_2 , CH_4 , N_2O , entre outros) que intensificam o efeito de barreira³ e que impedem que parte da radiação solar emitida na superfície do planeta, e posteriormente refletida sob a forma de radiação infravermelha, seja dissipada para o exterior da atmosfera; (ii) a emissão de gases (principalmente os que contêm Cloro) que se acumulam na estratosfera e funcionam como catalisadores na desagregação das moléculas de Ozono, adulterando o desenrolar natural do Ciclo Ozono (O_3) – Oxigénio (O_2) e contribuindo para a diminuição da camada de ozono estratosférico em certas zonas da atmosfera, cuja mais direta consequência passa pela redução da proteção da atmosfera face às radiações ultravioletas provenientes do sol.

Neste contexto, as emissões de gases com efeito de estufa são a consequência das atividades humanas que mais contribui para o fenómeno do Aquecimento Global, que consiste no aumento da temperatura média dos oceanos e da superfície do planeta e que é assumido como o fenómeno cuja tendência de crescimento é mais preocupante e, como tal, aquele que mais ameaça a sustentabilidade futura (IPCC, 2014).

O Protocolo de Quioto, estabelecido em 1997, desencadeou uma série de estratégias com vista à redução das emissões deste tipo de gases e consequente mitigação deste fenómeno, culminando, a propósito da Conferência de Copenhaga em 2009, no estabelecimento de esforços por parte dos signatários de forma a limitar o aumento global da temperatura a 2°C até ao final do presente século, tendo por base valores relativos à fase precedente à Revolução Industrial. Também os países membros da União Europeia definiram metas a concretizar até ao ano 2020, consistindo estas na redução em 20% da emissão de gases com efeito de estufa, relativamente aos valores do ano 1990, utilização de pelo menos 20% de energia proveniente de fontes renováveis e 20% de redução no consumo de energia pela via do aumento da eficiência energética.

No que concerne à indústria da construção, e mais precisamente ao setor dos edifícios, estima-se que em 2020 este seja responsável por cerca de 31% das emissões globais de gases com efeito de estufa, subindo o valor da previsão para cerca de 52% em 2050 (Pacheco-Torres *et al.*, 2014), fruto da crescente demanda deste setor, especialmente nos países em próspero desenvolvimento, evidenciando a importância deste no alcance das metas estabelecidas. Além

³ O efeito de estufa natural é essencial para que exista vida no planeta Terra, na medida em que é este que permite amplitudes térmicas prósperas para a sobrevivência dos seres vivos, em especial a espécie humana. Contudo, a tendência de crescimento da concentração de gases com efeito de estufa na atmosfera, principalmente desde a Revolução Industrial, tem agravado desenfreadamente o aumento global da temperatura, comprometendo a sustentabilidade do planeta.

disso, este é o setor que manifesta maior potencial para a redução destas emissões, de um ponto de vista custo-benefício (UNEP, 2009).

O indicador referente ao Aquecimento Global, de acordo com as normas Europeias EN 15643-2 e EN 15978, é o Potencial de Aquecimento Global (GWP) cuja unidade é o quilograma de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂ equiv). O valor de GWP de cada gás, designado por fator de caracterização, depende da eficiência da sua molécula no processo de efeito de estufa e do tempo de vida da mesma na atmosfera, relativamente a igual quantidade de massa de Dióxido de Carbono (CO₂), e para a mesma escala de tempo (geralmente 100 anos). Esta consideração possibilita que o contributo de cada gás seja equiparado a outro gás, neste caso o dióxido de carbono.

Ainda assim, os valores de GWP dos gases com efeito de estufa estão sujeitos a atualizações de acordo com os desenvolvimentos científicos em que se baseiam os estudos, e também da própria evolução da sua concentração atmosférica, sendo que a concentração depende do balanço entre as emissões, resultantes das atividades humanas e das causas naturais, e a capacidade de dissipação dos referidos gases, por parte da atmosfera. O Quadro 2.5 resume os fatores de caracterização dos principais gases com efeito de estufa, para um período de referência de 100 anos.

Quadro 2.5 – Fatores de caracterização dos principais gases com efeito de estufa

Gás	Fórmula química	Tempo de vida na atmosfera (anos)	Fator de caracterização – GWP (tempo de referência: 100 anos)	
			Relatório de avaliação 4 (2007) (IPCC@)	Relatório de avaliação 5 (2014) (IPCC, 2014)
Dióxido de Carbono	CO ₂	30-95	1	1
Metano	CH ₄	12	25	28
Óxido Nitroso	N ₂ O	121	298	265
CFC-12	CCl ₂ F ₂	100	10 900	10 200
HCFC-22	CHClF ₂	12	1 810	1 760
Tetrafluoreto de Carbono	CF ₄	50 000	7 390	6 630
Hexafluoreto de Enxofre	SF ₆	3 200	22 800	23 500
Trifluoreto de Nitrogénio	NF ₃	500	17 200	16 100
Brometo de Metilo	CH ₃ Br	1	5	2
Clorofórmio	CHCl ₃	½	31	16
Cloreto de Metilo	CH ₃ Cl	1	13	12

Dos gases referidos, aquele que mais contribui para o fenómeno do Aquecimento Global é o Dióxido de Carbono, correspondendo a cerca de 83% do total das emissões de gases com efeito de estufa (Chou e Yeh, 2015).

2.3.2 Impactes económicos e sociais

Os impactes económicos e sociais decorrentes das atividades construtivas, mais propriamente do setor dos edifícios, estão relacionados com a influência deste tipo de edificado no quotidiano dos intervenientes do seu ciclo de vida. Assim, os principais impactes relativos a estas duas dimensões são (Mateus, 2009):

- Criação de emprego e geração de riqueza (contribuição para o PIB);
- Criação de edifícios e infraestruturas básicas de suporte ao desenvolvimento;
- Conservação e reabilitação de edifícios;
- Potencialidade de políticas de planeamento e uso do solo erradas e oportunidades de corrupção;
- Pressão sobre os serviços urbanos e aumento das necessidades de transporte e alteração do tráfego e dinâmica local;
- Incómodo para a comunidade (especialmente na fase de construção), incluindo riscos de saúde nos estaleiros de construção e para os ocupantes dos edifícios na fase de utilização.

2.4 Principais obstáculos à consolidação da construção sustentável no mercado

Cada setor económico espelha nos seus produtos, processos de produção, produtores e padrões de consumo, as suas próprias características e particularidades. Estas são fundamentais na ponderação das políticas de sustentabilidade, na medida em que influenciam diretamente a natureza dos instrumentos necessários para a ultrapassagem dos obstáculos existentes (Mateus, 2009). O setor da construção, e em particular o ramo dos edifícios, é perentório na prossecução das metas e objetivos estabelecidos para o desenvolvimento sustentável, sendo de natural importância a consideração das suas particularidades, as quais foram analisadas na secção 2.2, na identificação dos obstáculos à consolidação deste setor, num panorama sustentável, no mercado. O Quadro 2.6 sintetiza os principais obstáculos à consolidação da construção sustentável no mercado de acordo com a sua natureza:

Quadro 2.6 – Principais obstáculos à consolidação da construção sustentável no mercado
(Mateus, 2009)

Obstáculos financeiros
Absentismo na aplicação de avaliações dos custos do ciclo de vida
Custo de capital usualmente mais elevado
Separação contabilística entre os custos de capital e de operação
Os conceitos “rentabilidade de investimento” e “sustentabilidade” são, do ponto de vista de alguns investidores, considerados incompatíveis
Insuficiência de estímulos que promovam o beneficiamento da eficiência de edifícios já existentes
Obstáculos técnicos
Longa duração do ciclo de vida dos edifícios associada à multidisciplinaridade dos intervenientes ao longo do mesmo
Heterogeneidade dos produtos
Mão de obra com baixo nível de especialização
Baixo grau de industrialização do setor e consequente utilização de processos construtivos tradicionais
Insuficiente informação acerca das características, desempenho e impactes de determinados materiais
O ensino das áreas relacionadas com a construção está demasiado vocacionado para as tecnologias convencionais
Insuficiente investimento na investigação e desenvolvimento do setor
Obstáculos de outra natureza
Inexistência de consensualidade na definição do conceito de “construção sustentável”, agravada pela falta de uniformização das metodologias e terminologias
Fraca sensibilidade e grau de conhecimento dos diversos decisores e intervenientes no setor
Insuficiência de políticas de promoção da construção sustentável
Carência de incentivos à reciclagem e/ou reutilização dos materiais de construção

2.5 Instrumentos e metodologias de promoção da construção sustentável

Com a crescente consciencialização acerca da sustentabilidade do planeta e das ameaças a que este está sujeito, surgiram, naturalmente, metodologias com o intuito de analisar e gerir os impactes de produtos e processos inerentes às atividades humanas. No que toca ao setor dos edifícios, integrado na indústria da construção, foi na década de 90 do século passado que começaram a surgir diversas abordagens e sistemas de avaliação do seu desempenho,

principalmente ao nível ambiental, com o objetivo de avaliar, qualitativa e quantitativamente, os seus impactes, servindo estes de apoio à implementação de práticas, medidas e soluções de acordo com os vetores do desenvolvimento sustentável, os quais têm vindo a ser progressivamente adotados (Pinheiro, 2006).

Das metodologias que atualmente se encontram desenvolvidas, ou em fase de desenvolvimento, e cuja aplicação se destina a edifícios, destacam-se o *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM), o *Leadership in Energy & Environmental Design* (LEED), o *Environmental Assessment and Classification System for Residential, Office and Retail Buildings in Finland* (PromisE), o EcoEffect e o *Sustainable Building Tool* (SBTool). Contudo, nenhuma das metodologias desenvolvidas até ao presente é amplamente aceite, na medida em que a sua utilização fora do seu contexto original requer algum trabalho de adaptação ao panorama ambiental, económico e sociocultural do local onde se pretende desenvolver a avaliação. Por outro lado, a própria dinâmica do conceito de sustentabilidade e a sua evolução ao longo do tempo, que depende do estado de desenvolvimento científico e tecnológico, bem como da evolução dos efeitos das atividades humanas, impõe que as ferramentas de avaliação se encontrem em constante evolução, de forma a ultrapassar as suas limitações. Neste contexto, o principal desafio passa pelo desenvolvimento de uma metodologia sistemática que sirva de suporte à conceção de edifícios, permitindo análises equilibradas no que toca às três dimensões da sustentabilidade, sendo simultaneamente prática, transparente e suficientemente flexível ao ponto de ser facilmente ajustável aos diferentes tipos de edificações e locais, conseguindo, de igual modo, adaptar-se à constante evolução tecnológica (Mateus, 2009).

A metodologia utilizada no presente trabalho baseia-se na técnica de avaliação e quantificação de impactes de produtos, processos e serviços, desenvolvida pela Organização Internacional de Normalização (ISO) a propósito da série de normas ISO 14000, denominada de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). O objetivo passa, nesta dissertação, pelo estabelecimento de macro-componentes relativas a duas soluções construtivas para lajes de edifícios, contendo informações relevantes acerca do seu desempenho ao nível da dimensão ambiental da sustentabilidade, possibilitando a análise comparativa de várias alternativas em fases iniciais de projeto, de acordo com as condições discutidas em 2.5.1.4.

2.5.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

As primeiras utilizações da metodologia ACV remontam às décadas de 60 e 70 do passado século, com o propósito de avaliar os impactes de várias alternativas para embalagens de produtos. Contudo, a expressão “Avaliação do Ciclo de Vida” só surgiu na década de 90, adquirindo maior interesse em 1993 aquando da criação, por parte da Organização

Internacional de Normalização, do Comité Técnico 207, cujo âmbito de desenvolvimento se centra no estabelecimento de normas e ferramentas na área dos sistemas de gestão ambiental, numa perspetiva de desenvolvimento sustentável.

Das normas elaboradas pelo Comité Técnico 207 da ISO, realçam-se, de acordo com o contexto da presente dissertação, as desenvolvidas pelo Subcomité 5 (ISO TC 207/SC 5), uma vez que são estas que abordam a temática da análise do ciclo de vida de produtos, processos e serviços, tendo como finalidade o incentivo à abordagem de forma integrada dos temas relacionados com a dimensão ambiental⁴ da sustentabilidade. Neste contexto, a norma ISO 14040 (2006) define os princípios e enquadramento de uma avaliação do ciclo de vida, enquanto que a ISO 14044 (2006) estabelece os requisitos e linhas de orientação.

2.5.1.1 Conceito

A ACV é uma metodologia analítica cujo objetivo é avaliar o conteúdo ao nível de recursos e impactes ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto, possibilitando a análise da contribuição das diversas fases para a globalidade do ciclo e permitindo a comparação e otimização de alternativas, de forma a definir prioridades nos processos de seleção de materiais e produtos (Mateus, 2009). Esta compreende a compilação e avaliação das entradas (matérias-primas, energia, etc.), saídas e potenciais impactes ambientais referentes a um sistema de produto, durante o seu ciclo de vida, conforme ilustra a Figura 2.6:

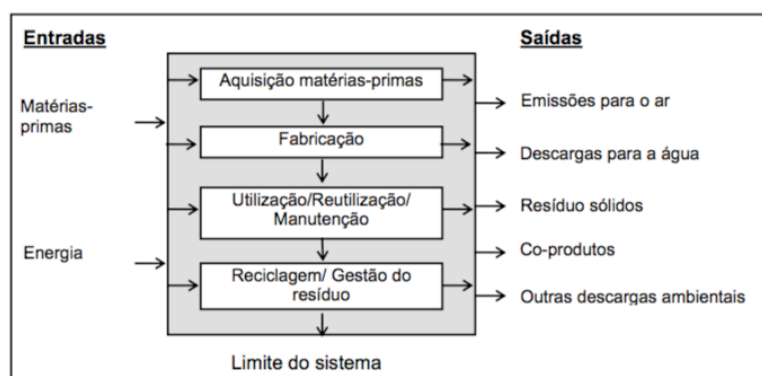


Figura 2.6 – Representação esquemática dos fluxos de um sistema de produto (Ferreira, 2004)

Em consequência do crescente interesse e da evolução do conceito de Construção Sustentável, a metodologia ACV tem vindo a ganhar importância como forma de avaliar os impactes ambientais ao longo do ciclo de vida dos produtos desta indústria, com especial relevância para o setor dos edifícios. A sua utilização potencia a análise e quantificação sistemáticas dos

⁴ Embora as normas ISO da série 14000 se foquem na componente ambiental da sustentabilidade, a metodologia pode ser extensível às outras componentes, mediante algumas adaptações. São exemplos disso as avaliações dos custos de ciclo de vida.

fluxos de materiais e energia envolvidos nas várias fases do ciclo de vida de um edifício, de acordo com a organização modular expressa no Quadro 2.3, fornecendo aos intervenientes (arquitetos, engenheiros, empreiteiros, etc.) bases analíticas para a tomada de decisões referentes à análise de alternativas para a escolha de materiais de construção e processos construtivos (Abd Rashid *et al.*, 2013). Desta forma, esta metodologia motivou maior credibilidade às análises relacionadas com as questões ambientais, já que o seu carácter holístico, sistemático e analítico revela particular rigor científico, elevando assim a pertinência dos temas relacionados com esta dimensão da sustentabilidade (Jaques, 1998).

Embora esta metodologia seja amplamente utilizada na maioria dos setores industriais, como é o caso da indústria automóvel, a sua aplicação à indústria da construção reveste-se de alguma complexidade, na medida em que o ciclo de vida dos seus produtos envolve mais do que uma simples agregação de materiais e processos individuais. Assim, a aplicação da ACV aos edifícios enfrenta alguns desafios comparativamente com a sua aplicação noutras indústrias de produção em série, dos quais se destacam os seguintes (Cabeza *et al.*, 2014):

- Não homogeneidade dos produtos, na medida em que cada edifício possui as suas características, nomeadamente a localização, a utilização, os métodos construtivos, etc.;
- Complexidade relativa à imensurável quantidade de materiais e intervenientes envolvidos, tornando a sua consideração e quantificação exigente;
- Elevada duração do ciclo de vida associada a incertezas durante o mesmo, nomeadamente no que toca ao tipo de utilização, operações de manutenção e renovação, bem como à fase de desconstrução/demolição e destino dos materiais sobrantes, incluindo a hipótese da sua reciclagem.

Além disso, é necessária alguma evolução no que toca à qualidade e uniformização das bases de dados relativas aos impactes dos materiais e processos, já que estas influenciam diretamente a qualidade dos resultados. Todavia, embora estas não se encontrem no nível de desenvolvimento desejado, a metodologia ACV continua a ser uma ferramenta pertinente, uma vez que são preferíveis estimativas, embora lhes estejam associadas algumas incertezas, do que a descon sideração dos impactes associados a determinada situação (Malmqvist *et al.*, 2011).

Outra particularidade da aplicação da metodologia ACV à indústria da construção é a necessidade de introdução de enormes quantidades de dados relativos às entradas no sistema de produto considerado, tornando a sua aplicação morosa, pouco intuitiva e inacessível para utilizadores com menos formação. O desenvolvimento de ferramentas que simplifiquem este processo e que, simultaneamente, elucidem os utilizadores acerca da forma como os

resultados da avaliação podem servir como suporte para as decisões facilitarão a disseminação desta metodologia no mercado (Wallhagen *et al.*, 2011). Por outro lado, essa necessidade de introdução de dados no início do processo inviabiliza a aplicação da metodologia nas fases iniciais do processo. É neste contexto que se insere a metodologia utilizada na aplicação prática da presente dissertação, assentando esta no estabelecimento de macro-componentes de soluções construtivas predefinidas.

2.5.1.2 Descrição da metodologia

A metodologia ACV processa-se, de acordo com as normas ISO 14040 e ISO 14044, segundo quatro fases (Abd Rashid e Yusoff, 2015):

- Definição do objetivo e âmbito – consiste na definição e descrição do produto, processo ou atividade, estabelecendo o contexto no qual a avaliação é realizada. É nesta fase que são fixadas as fronteiras do sistema, os pressupostos e limitações, o procedimento da avaliação, as categorias de impacto e as fases do ciclo de vida selecionadas e a unidade funcional do estudo. No caso concreto dos edifícios, é também identificado o seu tempo de vida útil, uma vez que este tem grande influência na avaliação, nomeadamente na fase de utilização, bem como nas operações de manutenção e renovação durante esta;
- Análise de inventário – envolve a criação de um inventário de fluxos elementares (materiais, energia, etc.) para um sistema de produto. Esta fase inclui a recolha, descrição e verificação de dados (*inputs* e *outputs*) e a modelação do sistema do produto. No que concerne à aplicação da metodologia ao setor dos edifícios, esta é uma fase caracterizada pelo desmedido consumo de tempo e recursos, já que o ciclo de vida de um edifício incorpora uma grande quantidade de materiais e processos;
- Avaliação dos impactes – analisa e avalia os impactes do sistema de produto identificados na fase de análise de inventário. De acordo com a norma ISO 14040, esta fase compreende duas etapas obrigatórias (classificação e caracterização) e duas opcionais (normalização e agregação). A etapa de classificação diz respeito à distribuição dos resultados pelas diversas categorias de impacto, enquanto que a caracterização compreende o estudo da contribuição desses resultados para o valor dos respetivos indicadores de impactes. A etapa de normalização corresponde, naturalmente, à conversão dos valores dos impactes para uma unidade e escala única, correspondendo a etapa de agregação à determinação dos valores para os indicadores globais, tendo em conta uma ponderação em função da importância relativa de cada indicador individual;
- Interpretação – avalia os resultados da análise de inventário e da avaliação dos impactes, de forma a obter as conclusões necessárias para a tomada de decisões. Esta

fase pode ainda incluir a validação dos resultados e análises de sensibilidade e incerteza, de acordo com os propósitos do estudo.

A Figura 2.7 ilustra esquematicamente as diversas fases da metodologia:

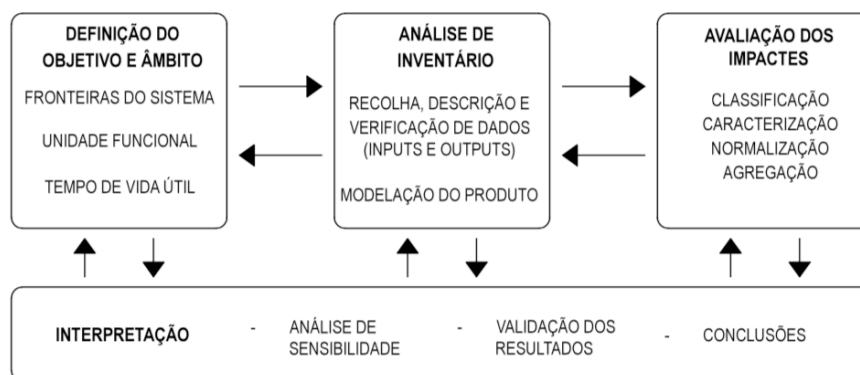


Figura 2.7 – Representação esquemática das fases da metodologia ACV (Adaptado de Abd Rashid e Yusoff, 2015)

2.5.1.3 Tipos de ACV

A metodologia ACV possui várias variantes de aplicação destacando-se as relacionadas com as fases do ciclo de vida consideradas e com o objeto de estudo da avaliação. Assim, as primeiras referem-se às abordagens do tipo “do berço à sepultura”, “do berço à porta de fábrica” e “do berço ao berço”, entre outras, conforme discutido a propósito da Figura 2.5.

No que concerne às variantes relacionadas com o objeto de estudo da avaliação salientam-se a Avaliação dos Custos do Ciclo de Vida (ACCV), que explora o custo ao longo do ciclo de vida, a Avaliação do Ciclo de Vida de Energia (ACVE), cujo objeto de estudo é a energia consumida, e a Avaliação do Ciclo de Vida de Dióxido de Carbono (ACVCO₂), relacionada com as emissões de dióxido de carbono. É com base nesta última que se desenvolve a aplicação prática do presente trabalho.

2.5.1.4 ACV em fases iniciais de projeto

A aplicação da metodologia ACV a um projeto de um edifício deve acompanhar todas as fases da sua concretização, desde a extração e fornecimento de matéria prima à fase de desconstrução, no que diz respeito às etapas do ciclo de vida de um edifício, e desde a fase de conceção até ao seu fim de vida útil, do ponto de vista do faseamento do projeto (Gervásio *et al.*, 2014). Neste sentido, as fases iniciais de projeto são cruciais já que é nestas que são tomadas grande parte das decisões que influenciam o desempenho do edifício, nomeadamente a redução dos impactes negativos e o potenciamento dos aspetos positivos, sendo o potencial

para a sua otimização tanto maior quanto mais preliminar esta for efetivada. Desta forma, decisões tomadas nas fases iniciais conduzem a soluções mais eficientes associadas a custos mais reduzidos, agravando-se a eficácia desta relação para fases subsequentes (Kovacic e Zoller, 2015), conforme ilustra a Figura 2.8:

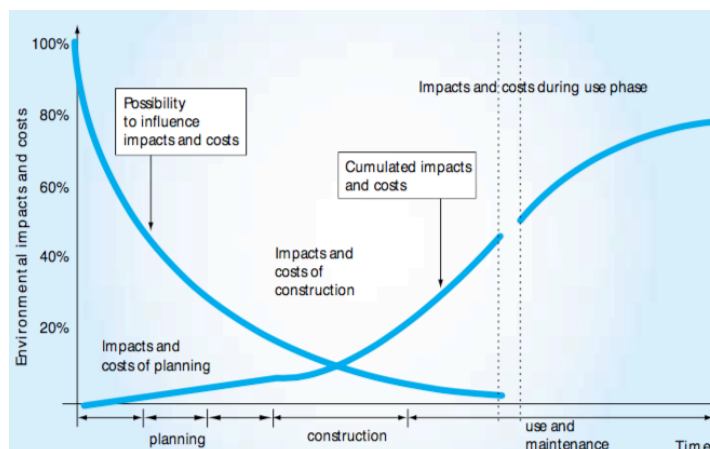


Figura 2.8 – Influência da tomada de decisões na escala temporal de um projeto de um edifício (Kohler e Moffat, 2003)

O projeto de um edifício tem início na intenção do cliente em o realizar, informando a equipa responsável pelo projeto dos seus desejos. Segue-se a fase de conceção, geralmente levada a cabo por um arquiteto, que consiste na definição de um esboço da configuração do edifício, sendo que esta fase é ainda prematura ao nível de informações disponíveis para que possam ser tomadas decisões com base em indicadores quantitativos. Esta situação, aliada ao facto de esta temática não estar tão desenvolvida na área da arquitetura como na engenharia (Schlueter e Thesseling, 2009), faz com que as decisões tendam a ser adiadas para as fases seguintes do projeto (Basbagill *et al.*, 2013), resultando na perda de potencial das mesmas. Seguidamente, na fase de dimensionamento, são determinadas algumas características do edifício, tais como plantas, tipos de soluções construtivas e materiais, culminando esta no projeto final que contém toda a informação necessária para a aplicação convencional da metodologia ACV.

A falta de informação nas fases mais precoces de projeto constitui, portanto, um dos maiores obstáculos à aplicação convencional da metodologia ACV ao setor dos edifícios. A carência de formação dos intervenientes no dimensionamento e a ausência de ferramentas que possibilitem estimativas nas fases mais preliminares e, por outro lado, promovam a inter-relação entre as várias equipas envolvidas no projeto representam também dificuldades na implementação desta metodologia. É neste enquadramento que se insere a metodologia baseada em macro-componentes empregue na aplicação prática do presente trabalho.

Salienta-se ainda que as avaliações de desempenho baseadas em fases iniciais de projeto pretendem, não tanto a obtenção de resultados com alto nível de precisão, mas antes a definição de tendências e, acima de tudo, a avaliação das consequências de cada alternativa em questão (Schlueter e Thesseling, 2009). Assim, esta metodologia não dispensa a aplicação de uma ACV completa em fases finais de projeto, altura em que a informação acerca de todos os elementos será completa, podendo o resultado preliminar, relativo à ACV em fase inicial de projeto, sofrer algum ajuste, mas continuando a serem válidos os pressupostos relativos à comparação das várias alternativas para as soluções construtivas consideradas (Wallhagen *et al.*, 2011).

2.6 Importância da escolha das soluções construtivas e respetivos materiais

No passado, a escolha dos materiais e soluções construtivas a utilizar em determinado edifício dependiam, essencialmente, do custo, da disponibilidade e de questões estéticas (Asif *et al.*, 2007). No entanto, a crescente relevância das questões relacionadas com a sustentabilidade, em especial na sua dimensão ambiental, motivou o mercado da construção a procurar soluções mais adaptadas aos vetores do desenvolvimento sustentável. Assim, e durante as últimas décadas, as políticas e estratégias do setor dos edifícios focaram-se fundamentalmente na sua fase de utilização, com o propósito de reduzir o consumo de energia e os restantes impactos associados a esta fase, já que era nesta que residia o maior potencial, de acordo com a maioria dos estudos (Wallhagen *et al.*, 2011). Enquadram-se nestes contornos os desenvolvimentos ao nível da eficiência energética e do desempenho energético das envolventes dos edifícios.

Fruto da evolução alcançada neste âmbito, a fase de produção, referente aos materiais e soluções construtivas, começa a ganhar importância, tendo em vista que a sua contribuição para o ciclo de vida do edifício ganha alguma preponderância, face à fase de utilização, e o seu potencial não está ainda convenientemente explorado. Estudos sugerem que num edifício de construção convencional o consumo de energia na fase de produção varia, geralmente, entre os 2 e 36% do total do seu ciclo de vida, aumentando para 9 a 46% para os edifícios com elevado desempenho energético. As emissões de gases com efeito de estufa associadas à fase de produção, denominadas geralmente de Carbono Incorporado, seguem esta tendência, com a agravante que, embora seja consumida menor energia na fase de utilização de um edifício com elevado desempenho energético, esse desempenho excepcional é conseguido à custa de mais material ou material cuja produção envolve maior quantidade de Carbono Incorporado, como é o caso dos elementos de isolamento térmico cuja espessura e massa do material influenciam o seu comportamento (Monahan e Powell, 2011). Estas circunstâncias salientam a relevância da análise das emissões de gases com efeito de estufa referentes a esta

fase, podendo isso corresponder a reduções na ordem dos 30% de emissões (Dimoudi e Tompa, 2008).

Assim, quanto maior for a eficiência de um edifício ao nível do seu desempenho na fase de utilização (consumo energético), maior será o contributo relativo da fase de produção, sendo ainda possível, em alguns casos, que o contributo desta última seja superior ao da fase de utilização (Zabalza *et al.*, 2013). Por outro lado, a estrutura de um edifício é geralmente o componente que mais contribui para os impactos na fase de produção, dada a elevada quantidade de material que esta representa. Dos elementos constituintes da estrutura, as lajes são, vulgarmente, o elemento que maior contribuição apresenta, na medida em que é aquele cujo volume de material necessário é maior, já que, em comparação com elementos lineares, dos quais as vigas e os pilares são exemplos, estes elementos planares correspondem, naturalmente, a maiores quantidades (Dimoudi e Tompa, 2008).

Desta forma, a aplicação da metodologia ACV fornece bases para a tomada de decisões relativas aos materiais, soluções construtivas e tecnologias a utilizar nos edifícios, não só na fase de projeto, mas também em possíveis intervenções de reconstrução ou renovação. Dado que esta metodologia permite a análise da contribuição de cada fase para a globalidade do ciclo de vida, é possível destacar aquelas em que o potencial para a minimização das adversidades é maior e, por outro lado, comparar diretamente as várias alternativas ao nível dos materiais.

3 DEFINIÇÃO DE MACRO-COMPONENTES RELATIVAS A DUAS TIPOLOGIAS DE LAJES

De acordo com o discutido nos capítulos anteriores, o aquecimento global, definido pelo indicador GWP de acordo com o Quadro 2.4, é um dos fenómenos ambientais mais preocupantes para a sustentabilidade do planeta dada a sua acentuada tendência de crescimento face aos outros fenómenos. Neste enquadramento conjuntural, a indústria da construção é apontada como aquela com maior potencial para a redução das emissões de gases com efeito de estufa que contribuem para o agravamento deste fenómeno, sendo o setor dos edifícios o formato mais comum e com maior volume de atividade. Por outro lado, a simplicidade das práticas de construção associadas, geralmente, aos edifícios face a outros produtos desta indústria, dos quais as vias de comunicação e as estruturas marítimas são exemplos, torna mais fácil a generalização das conclusões alcançadas para estudos cujo objeto de análise seja este tipo de obras, como é o caso da presente dissertação. Foi também discutida, na secção 2.6, a importância, ao nível da quantidade de material, da contribuição dos elementos laje para a totalidade de impactos associados à estrutura de um edifício, na medida em que estes elementos planares estão, naturalmente, associados a maiores quantidades que elementos lineares como vigas e pilares.

Desta forma, o presente estudo assenta numa metodologia que se baseia no estabelecimento de macro-componentes relativas a soluções construtivas pré-estabelecidas para os vários elementos de uma construção, contendo as informações relevantes acerca das suas características necessárias para o desenvolvimento dos projetos de especialidade em que se inserem. Quando as soluções construtivas têm várias possibilidades de combinação de elementos, de forma a se adaptarem aos vários níveis de requisitos, poderá ser efetuada uma distribuição por escalões, agrupando soluções de características aproximadas numa macro-componente com determinadas características, limitada pelas características mais desfavoráveis das soluções que esta abarca. Este processo de escalonamento envolve, inevitavelmente, uma percentagem de erro associada ao facto das várias soluções particulares serem associadas ao valor referente à correspondente macro-componente. Contudo, se esse erro se mantiver dentro de uma gama de valores tolerável, conforme apresentado adiante nas secções 3.4 e 3.5, o propósito desta metodologia não é desvirtuado, de acordo com as considerações discutidas na secção 2.5.1.4.

Assim, o propósito do presente estudo consiste no estabelecimento de macro-componentes relativas a duas soluções construtivas para lajes de edifícios, contendo informações relevantes acerca do seu desempenho ao nível da dimensão ambiental da sustentabilidade, designadamente a contribuição para o aquecimento global, possibilitando a análise comparativa destas alternativas em fases iniciais de projeto, quando as informações disponíveis são ainda vagas, baseando-se por vezes em esboços referentes à geometria do edifício.

3.1 Considerações iniciais

O objeto de estudo do presente trabalho são as lajes mistas de chapa colaborante, nomeadamente as lajes correspondentes ao perfil de chapa H60 do fabricante O FELIZ (O Feliz, 2016), e as lajes de vigotas prefabricadas de betão pré-esforçado e blocos de aligeiramento do fabricante LEIRIVIGA (Leiriviga, 2012). Estes são, genericamente, dois sistemas de lajes amplamente utilizados no mercado da construção, sendo a facilidade de produção, transporte e montagem, bem como a dispensa dos tradicionais sistemas de cofragem, as principais vantagens da sua aplicação.

Ao nível estrutural, o funcionamento destas lajes baseia-se numa distribuição de carga unidirecional, segundo o sentido longitudinal (direção paralela às nervuras, no caso das lajes de chapa colaborante, e ao desenvolvimento das vigotas, no caso das lajes de vigotas e blocos de aligeiramento). Assim, o seu comportamento estrutural aproxima-se do caso trivial de uma viga simplesmente apoiada, simplificando a parametrização das soluções e respetivos elementos comparativamente com outras soluções, das quais as lajes maciças são um exemplo. As tabelas de cálculo direto propostas no catálogo do fabricante referente às lajes mistas de chapa colaborante (O Feliz, 2016) evidenciam este facto, pela simplicidade que introduzem no processo de dimensionamento.

No que concerne às lajes mistas de chapa colaborante, a escolha do fabricante prendeu-se com o facto de este apresentar o catálogo mais completo ao nível de informações acerca das soluções e materiais envolvidos (O Feliz, 2016), incluindo uma metodologia simplificada de dimensionamento através de tabelas de cálculo direto que resultou de ensaios experimentais. Por outro lado, para além de ser um fabricante nacional de qualidade reconhecida no mercado, o desenvolvimento e otimização deste produto foi efetuado em cooperação com o Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, nomeadamente através de ensaios experimentais realizados nos laboratórios sob a coordenação de docentes desta instituição.

Relativamente às lajes de vigotas e blocos de aligeiramento, o fabricante selecionado é um dos vários que dispõe de Documento de Aplicação (Leiriviga, 2012) atestado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), que define as características e estabelece as condições de execução e de utilização deste sistema de construção de pavimentos, contendo, portanto, todas as informações necessárias para o desenvolvimento do presente estudo. Ainda assim, ressalva-se o facto de as soluções disponibilizadas pelos vários fabricantes serem bastante similares, tanto nas características das vigotas como nos blocos de aligeiramento, na medida em que estas soluções estão atualmente num elevado grau de desenvolvimento e otimização no âmbito da eficiência estrutural, sendo esta condição transversal à generalidade dos fabricantes. Desta forma, considera-se adequada a generalização dos resultados e conclusões para os restantes fabricantes, tendo em conta que esta é uma metodologia de aplicação em fases iniciais de projeto, em conformidade com o discutido na secção 2.5.1.4.

Comparativamente a outras tipologias de lajes, tal como as lajes maciças betonadas em obra, estas duas soluções apresentam algumas vantagens relacionadas, especialmente, com o facto de integrarem elementos prefabricados, na medida em que reduzem a duração e a quantidade de trabalho necessário em obra. Por outro lado, por disporem elementos de aligeiramento, designadamente as nervuras nas lajes mistas de chapa colaborante e os blocos no caso das lajes de vigotas, constituem soluções com mais vazios e, portanto, menor quantidade de material, conduzindo, regra geral, a soluções mais económicas. Outra das principais vantagens é a de dispensarem sistemas de cofragem, já que os próprios elementos constituintes confinam a superfície correspondente à camada de betão complementar aplicada em obra. Assim, durante a fase construtiva e enquanto os elementos não atingem a resistência necessária, há necessidade de utilização de sistemas de escoramento provisório. Desta forma, o escoramento suporta a carga correspondente ao material quando este ainda não funciona em conjunto, mas também as cargas adicionais inerentes aos trabalhos em fase construtiva. Os impactes relativos aos sistemas de escoramento não foram considerados, já que estes são reutilizáveis.

Em termos comparativos, e para além das conclusões relativas ao presente estudo, as duas soluções em questão apresentam, à partida, vantagens e desvantagens. As lajes mistas de chapa colaborante conduzem, comparativamente às lajes de vigotas e blocos de aligeiramento, a soluções de menor espessura, o que pode ser relevante para o cumprimento de condicionantes arquitetónicas. Contudo, pelo facto de conterem blocos de aligeiramento, as soluções de lajes de vigotas são mais leves, quando comparadas com soluções de lajes de chapa colaborante com características mecânicas similares. O processo construtivo e transporte dos materiais é semelhante para as duas tipologias, tendo as lajes de vigotas o

benefício de ser uma solução mais difundida no mercado, existindo, neste sentido, mais fabricantes e distribuidores.

3.2 Metodologia para cálculo das macro-componentes

As macro-componentes relativas a edifícios residenciais e de escritórios são definidas através dos seus limites de vão mínimo e máximo, para ambos os casos de carga. O vão máximo entre apoios é limitado pela capacidade resistente das soluções (verificação de Estados Limites Últimos – ULS) e pelo comportamento em serviço (verificação de Estados Limites de Utilização – SLS), pelo que o vão mínimo é definido pelo vão máximo da macro-componente precedente. Desta forma, a cada macro-componente está associado um valor de GWP, expresso em kg CO₂ equiv. por m² de laje, sendo que o objetivo, em termos de desempenho sustentável, é, naturalmente, minimizar este valor.

As combinações de ações utilizadas foram as definidas na NP EN 1990 (EN 1990, 2002), também conhecida por Eurocódigo 0, sendo as ações de cálculo atuantes determinadas de acordo com a NP EN 1991-1-1 (EN 1991-1-1, 2002). Portanto, para as sobrecargas nos pavimentos considerou-se 2,0 kN/m², para as hipóteses referentes a utilização residencial, e 3,0 kN/m² para utilização referente a escritórios. Relativamente às cargas de revestimentos e paredes, também designadas de restantes cargas permanentes, considerou-se o valor de 1,35 kN/m² de acordo com os valores nominais de pesos volúmicos dos materiais, definidos na NP EN 1991-1-1 (EN 1991-1-1, 2002), para os elementos de um piso genérico e adequado ao que se pratica no mercado. Devido ao facto de a metodologia de cálculo direto referente às lajes de chapa colaborante considerar, simplificada e de forma a agilizar o processo de dimensionamento, que as cargas de revestimentos e paredes são multiplicadas pelo coeficiente parcial relativo às ações variáveis ($\gamma_Q=1,50$) em vez do coeficiente parcial relativo às ações permanentes ($\gamma_G=1,35$) existe, na verdade, uma margem de segurança que permite que valores ligeiramente mais elevados continuem a verificar as condições relativas a ULS:

$$(G_{RCP} \times \gamma_Q) / \gamma_G = 1,50 \text{ kN/m}^2, \text{ com } G_{RCP} = 1,35 \text{ kN/m}^2, \gamma_G = 1,35, \gamma_Q = 1,50 \quad (1)$$

Assim, até valores de 1,50 kN/m² para as cargas de revestimentos e paredes, a validade das verificações para ULS mantém-se. Esta consideração é apenas válida para verificações de ULS e não é extensível às referentes a SLS já que, para este caso, as combinações de ações não contemplam coeficientes parciais. De forma a equiparar os resultados das duas tipologias estudadas, foi utilizada a mesma condição, relativa aos valores de coeficientes parciais, para ambas. Relativamente ao peso volúmico dos materiais analisados no estudo, foi considerado igual a 25 kN/m³ para o betão e 78 kN/m³ para o aço de armaduras. As restantes cargas

relativas à massa de outros elementos, serão oportunamente apresentadas na secção correspondente.

Deste modo, o primeiro passo consiste na determinação dos vãos máximos de todas as possíveis combinações de elementos para ambas as tipologias e casos de carga, e de acordo com as condicionantes ao nível de ULS e SLS. Foi efetuada uma distribuição dos resultados em escalões de 0,2 metros, já que é este o escalonamento considerado nas tabelas de cálculo direto referentes às lajes de chapa colaborante.

O processo segue com a identificação da quantidade, por m^2 , de cada material envolvido nas várias soluções das duas tipologias de lajes, multiplicando esse valor pela respetiva contribuição para o indicador em causa, que neste caso é o GWP e que pode ser adquirido de uma base de dados, sendo o somatório da contribuição dos vários elementos que compõem a solução o valor de GWP que a caracteriza.

$$GWP_i = \sum_e m_e \times GWP_f \quad (2)$$

onde: GWP - valor de GWP (kg CO₂ equiv.)

m – massa (kg)

i – solução particular de um painel de laje (1m²);

e – elemento constituinte do sistema;

f – material constituinte do elemento.

No caso dos módulos do ciclo de vida de um edifício que envolvem transporte, de acordo com o Quadro 2.3 (módulos A4 e C2), o valor final deverá incluir a multiplicação pela distância considerada para o transporte, na medida em que os valores que constam na base de dados referente à contribuição dos materiais para os indicadores são dados em função da distância, expressa em quilómetros.

O valor da distância média da origem de fabrico dos materiais à obra, bem como desta ao local de tratamento do material sobrando, referente aos módulos que envolvem transporte, considerado no presente estudo foi de 80 km para os vários materiais. De modo a melhor aferir a influência deste valor no valor total de GWP, foi efetuada uma análise de sensibilidade deste parâmetro para as macro-componentes definidas, que se apresenta na secção 3.6.

De acordo com o discutido na secção 2.2 e ilustrado na Figura 2.4, existem várias variantes de ACV, tendo em conta os módulos do ciclo de vida, indicados no Quadro 2.3, que são

considerados. Assim, e tendo por limitação a informação fornecida pela base de dados referente aos materiais, foram considerados, no presente estudo, os módulos A1 a A3, que correspondem à fase de produção dos elementos, o módulo A4 que reflete o transporte da fábrica ao local da obra e se insere na fase de construção, o módulo C2, que se insere na fase de fim de vida e corresponde ao transporte do local da obra ao local de eliminação, deposição, reutilização ou reciclagem do material, bem como os módulos C4 e D que correspondem à eliminação ou deposição dos resíduos e à reutilização ou reciclagem, respetivamente. Trata-se, portanto, de um estudo que incide sobre fase produção dos elementos que constituem o sistema construtivo e respetivo transporte até ao local da obra, incluindo também o caminho inverso que consiste no transporte e processo de tratamento do material sobranete. Ficam excluídas a fase de utilização e operação que, no caso em concreto de elementos constituintes de lajes, não será tão relevante como a fase de produção, bem como os processos que envolvem recursos humanos (processo construtivo, desconstrução/demolição e processamento de resíduos) cuja complexidade na quantificação dificulta o estabelecimento de valores sistemáticos para as bases de dados.

3.3 Base de dados ambientais

A quantificação da contribuição de cada material para os indicadores ambientais de sustentabilidade foi efetuada de acordo com os valores referentes à base de dados do *software GaBi*, na versão 7.3.0.40 (Thinkstep AG, 2017). Esta é uma das mais conceituadas base de dados a nível mundial, sendo utilizada por diversas companhias de renome nas ACV dos seus produtos. No que concerne aos valores de GWP, são considerados os fatores de caracterização dos gases com efeito de estufa relativos ao Relatório de Avaliação 5 de 2014 (IPCC, 2014) para um tempo de referência de 100 anos, em conformidade com o expresso no Quadro 2.5.

No Anexo A estão descritos os valores referentes aos materiais considerados no presente estudo, sendo estes relativos a 1 kg de material em questão. Salienta-se novamente o facto de que os valores referentes aos módulos que envolvem transporte, nomeadamente os módulos A4 e C2, devem ser multiplicados pela distância média considerada que, no presente estudo, é de 80 km, já que estes são referentes ao transporte de 1 kg de material por cada quilómetro de distância. Relativamente ao betão de agregados de argila expandida, material constituinte dos blocos de aligeiramento, a base de dados não dispõe de valores relativos ao módulo D, correspondente à reciclagem.

3.4 Lajes mistas de chapa colaborante

Esta tipologia de laje consiste na utilização de uma chapa metálica perfilada, nomeadamente o Perfil H60 do fabricante O FELIZ (O Feliz, 2016), que serve de cofragem perdida e é capaz de suportar o peso do betão fresco e restantes ações inerentes à fase de construção, combinando-se, em fase definitiva, com a camada de betão complementar e funcionando como armadura de tração do sistema estrutural. Deste modo, ao tirar partido da contribuição de todos os elementos, constitui uma alternativa às tipologias de lajes tradicionais, betonadas em obra sobre cofragem, sendo a facilidade e rapidez da execução as principais vantagens, não dispensando, no entanto, escoramento provisório em fase de construção. O facto de ser constituída por elementos de betão e aço estrutural, cujo dimensionamento é realizado de acordo com a EN 1994, também conhecida por Eurocódigo 4, confere-lhe a qualidade de laje mista. A Figura 3.1 ilustra o esquema de montagem e identifica os elementos constituintes desta tipologia de laje:

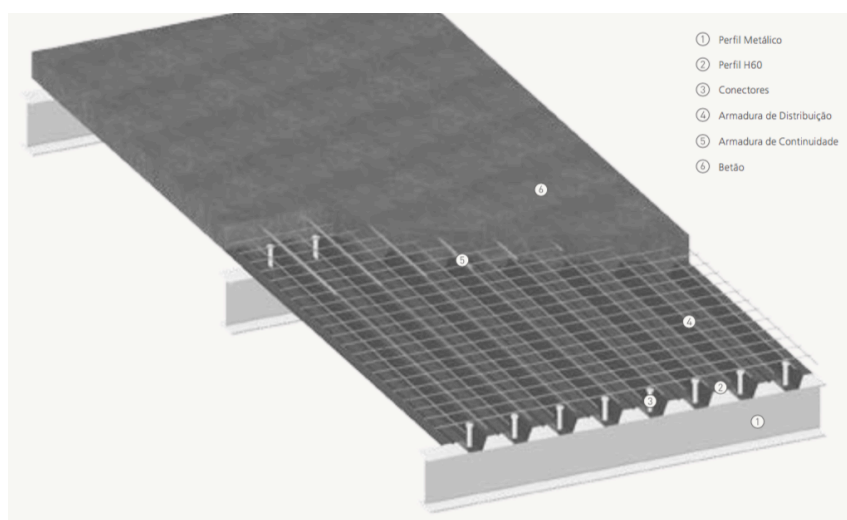


Figura 3.1 – Esquema de montagem de uma laje mista com chapa perfilada H60 (O Feliz, 2016)

Sendo uma laje com um comportamento unidirecional, com a distribuição das cargas na direção paralela às nervuras, considerou-se, ao nível do dimensionamento, a hipótese de esquema estrutural simplesmente apoiado de forma a avaliar do lado da segurança os momentos fletores positivos. Não obstante, o catálogo do fabricante prevê armadura de continuidade sobre os apoios, a adicionar à armadura de distribuição, cujo objetivo é resistir aos momentos fletores negativos que surgem, fruto do grau de encastramento parcial que se gera nos apoios das lajes com continuidade. Desta forma, os resultados para as soluções consideradas estão do lado da segurança, tanto para momentos fletores positivos como negativos. No Quadro 3.1 estão detalhadas as informações relativas os elementos constituintes que foram considerados para esta tipologia de laje:

Quadro 3.1 – Informações relativas aos elementos constituintes das lajes mistas de chapa colaborante (O Feliz, 2016)

Elemento	Material	Disposições	Observações
Chapa perfilada	Aço S320 GD+Z	Espessuras [mm]:	
		0,7	
		0,8	
		1,0	
Betão complementar	Classes: C25/30 C30/37	Alturas [cm]:	
		10 a 24	
		Foram consideradas alturas de laje múltiplas de 2cm, para ambas as classes de betão	
Armadura de distribuição	A500	Ø6	
		Espaçamento [mm]: 200 a 350	
Armadura de apoio (continuidade)	A500	Ø10 e Ø12	
		Espaçamento [mm]: 125 a 200	
Conectores	Aço estrutural	Nelson Stud Welding S3L Shear Connector (d=19mm; h=75mm; 0,216kg/unid)	
		Um conector por cada duas nervuras, nas duas direções; Espaçamento máximo de 450 mm (1)	

(1) De acordo com o catálogo do fabricante (O Feliz, 2016)

64 combinações de soluções para ambos os casos de carga

Designação genérica: X.Xmm – CYY/YY – hZZ

X.X – Espessura da chapa perfilada [mm]
CYY/YY – Classe de betão
hZZ – Altura total da laje [cm]

Assim, efetuou-se o dimensionamento das 64 combinações de soluções, para ambos os casos de carga, através das tabelas de cálculo direto fornecidas no catálogo do fabricante (O Feliz, 2016). Este procedimento consiste na determinação da carga atuante e posterior verificação do vão máximo de cada situação particular na respetiva tabela, tendo em conta as características dos componentes da solução. A tabela fornece ainda a situação condicionante para o dimensionamento, podendo esta ser por Corte vertical ou Corte longitudinal, para verificação de ULS, ou por Deformação para SLS, sendo a flecha máxima admissível para a fase definitiva igual a $L/300$ (O Feliz, 2016). Relativamente aos conectores, a sua definição teve em consideração apenas condicionantes ao nível de espaçamentos máximos e mínimos, pelo que o dimensionamento efetuado através deste procedimento não dispensa uma verificação mais aprofundada. Por outro lado, a contribuição deste elemento para o valor total de GWP de uma solução é bastante reduzida, como se conclui adiante, pelo que esta circunstância não distorce o propósito do presente estudo.

Seguidamente efetuou-se o cálculo da contribuição, em termos de GWP, de cada elemento e para cada solução, bem como do valor total de cada solução, de acordo com a formulação discutida na secção 3.1. A apresentação deste processo de cálculo para todas as soluções tornaria o documento muito extenso, pelo que se optou por apresentar, no Anexo B, a informação relativa a este procedimento para as soluções que originaram a definição de macro-componentes, conforme o descrito adiante. As Figura 3.2 e Figura 3.3 ilustram, para o caso de carga residencial e de escritórios respetivamente, a distribuição das soluções com menor e maior valor total de GWP em função do vão entre apoios. Repare-se que há soluções cujo vão máximo é menor, e que correspondem a valores de GWP superiores a outra solução com vão máximo superior, tal como é o caso da solução de menor GWP para o vão de 4,2 metros, no caso residencial, e 3,8 metros para escritórios, relativamente à solução do valor de vão subsequente. Para colmatar estas situações, procedeu-se à definição das soluções mais eficientes em função do vão, consistindo estas na solução de menor GWP que é válida para o vão em questão. De salientar que as soluções referentes aos menores e maiores valores de GWP referentes a cada caso de carga são, geralmente, mas não forçosamente, as mesmas, com a diferença do vão máximo, na medida em que as ações para o caso de escritórios são mais elevadas, sendo o vão máximo, naturalmente, menor.

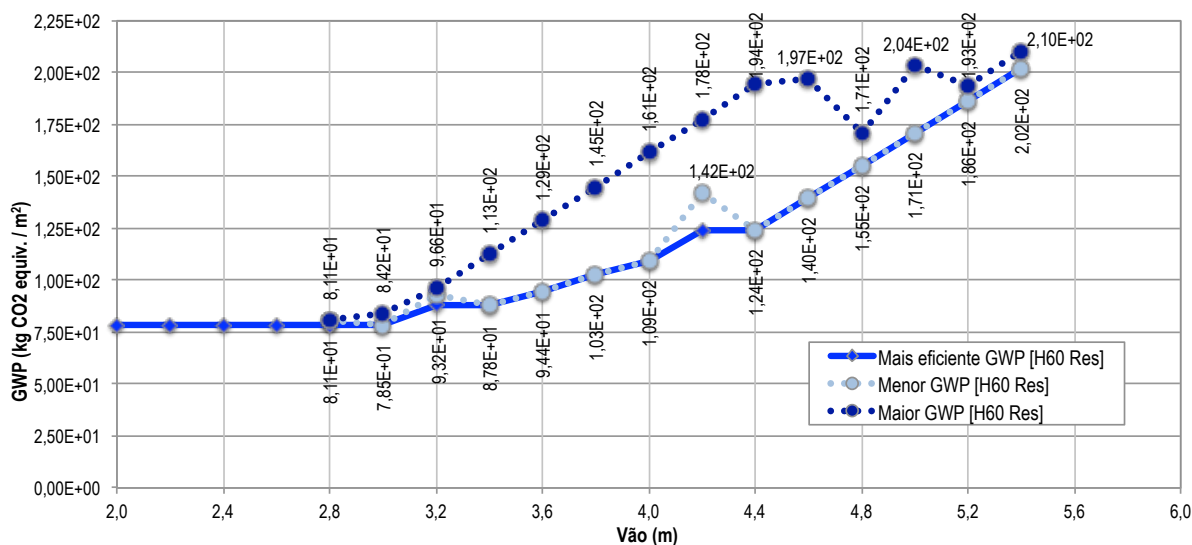


Figura 3.2 – Distribuição dos vãos máximos relativos às soluções de lajes de chapa colaborante para o caso de carga de utilização residencial

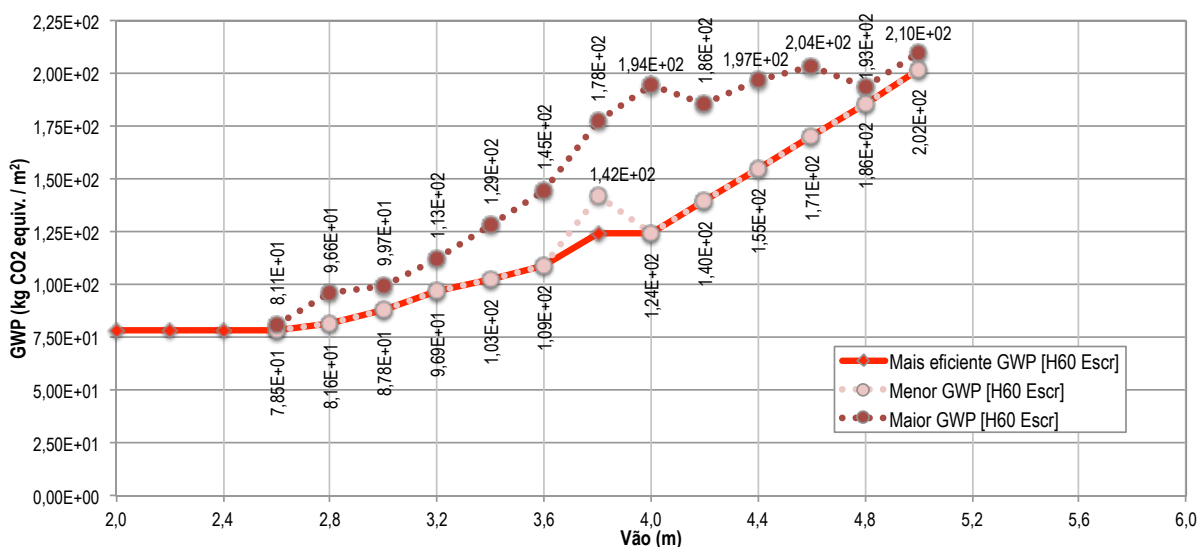


Figura 3.3 – Distribuição dos vãos máximos relativos às soluções de lajes de chapa colaborante para o caso de carga de utilização para escritórios

Posto isto, procedeu-se à definição dos patamares relativos às macro-componentes. O intuito foi alcançar uma distribuição com a maior uniformidade possível no que concerne à dimensão do intervalo entre os vãos mínimo e máximo, e que ao mesmo tempo seja representativa da evolução dos valores de GWP em função do vão correspondente, para as soluções mais eficientes, sendo perentória a minimização do erro face à solução mais eficiente. As Figura 3.4 e Figura 3.5 ilustram os resultados deste processo para os casos de carga residencial e de escritórios, respetivamente, tendo sido definidas 5 macro-componentes designadas de “MC-H60” seguidas do número correspondente:

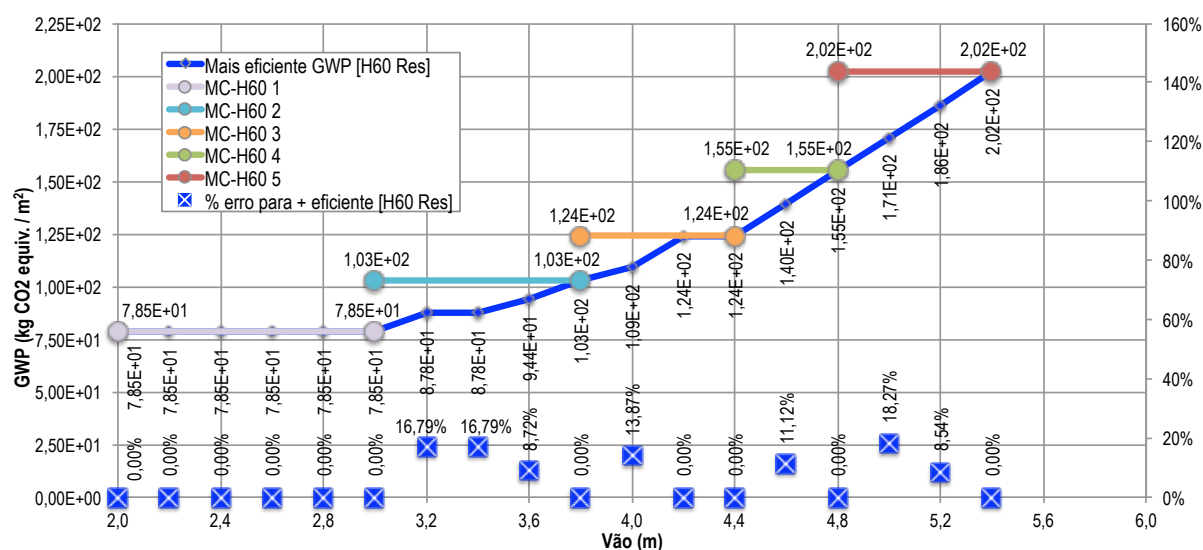


Figura 3.4 – Definição das macro-componentes relativas às lajes de chapa colaborante para o caso de carga de utilização residencial

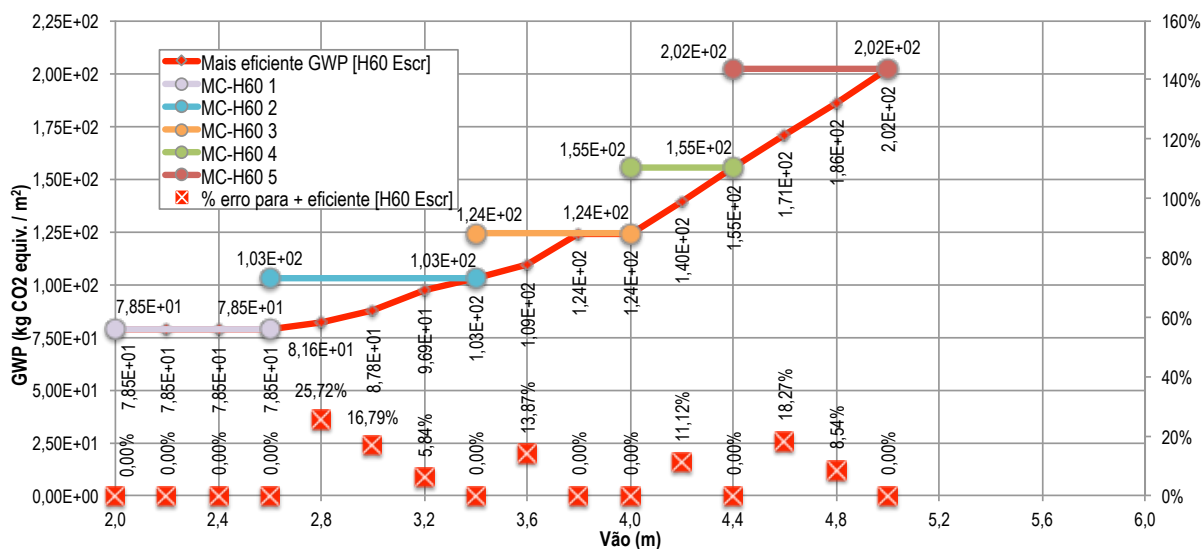


Figura 3.5 – Definição das macro-componentes relativas às lajes de chapa colaborante para o caso de carga de utilização para escritórios

De forma a assegurar a validade das várias soluções que integram as macro-componentes ao nível de dimensionamento para ULS e SLS, a seleção da solução representativa da macro-componente foi efetuada do lado da segurança, sendo esta a solução mais eficiente referente ao vão máximo do respetivo intervalo. Cada macro-componente numerada corresponde à mesma solução de elementos para ambos os casos de carga, diferindo, evidentemente, o intervalo referente aos vãos mínimo e máximo.

Da análise das figuras, conclui-se que as percentagens de erro face à solução mais eficiente para o respetivo vão variam entre 0% e cerca de 26%, sendo que, para a maioria dos vãos característicos o valor do erro é nulo. Por outro lado, a seleção da solução mais eficiente não é imediata para um utilizador da metodologia de dimensionamento proposta pelo fabricante, já que esta não dispõe de informações acerca dos indicadores de sustentabilidade. Desta forma, conclui-se que o erro que se comete ao efetuar um escalonamento em macro-componentes é, em parte, compensado por essa circunstância.

O Quadro 3.2 apresenta as principais características das soluções correspondentes às macro-componentes estabelecidas para as lajes mistas de chapa colaborante. No Anexo B encontram-se detalhadas todas as informações relativas às mesmas, bem como os resultados elementares e totais para os respetivos valores de GWP.

Quadro 3.2 – Quadro resumo das principais características das macro-componentes definidas para as lajes de chapa colaborante

Designação da macro-componente			MC-H60 1	MC-H60 2	MC-H60 3	MC-H60 4	MC-H60 5	Observações
Designação da solução			0.7mm - C25/30 - h10	1.0mm - C25/30 - h12	1.2mm - C25/30 - h14	1.2mm - C25/30 - h18	1.2mm - C25/30 - h24	
Residencial	Vão mínimo	m	0,0	3,0	3,8	4,4	4,8	-
	Vão máximo	m	3,0	3,8	4,4	4,8	5,4	-
	Condicionante de dimensionamento		ULS – Corte longitudinal	ULS – Corte longitudinal	ULS – Corte longitudinal	ULS – Corte longitudinal	ULS – Corte longitudinal	-
Escritórios	Vão mínimo	m	0,0	2,6	3,4	4,0	4,4	-
	Vão máximo	m	2,6	3,4	4,0	4,4	5,0	-
	Condicionante de dimensionamento		ULS – Corte longitudinal	ULS – Corte longitudinal	ULS – Corte longitudinal	ULS – Corte longitudinal	ULS – Corte longitudinal	-
Chapa	Espessura	mm	0.7mm	1.0mm	1.2mm	1.2mm	1.2mm	-
	Massa	kg/m ²	7,95	11,32	13,66	13,66	13,66	-
Betão	Classe	-	C25/30	C25/30	C25/30	C25/30	C25/30	-
	Altura total da lâmina	cm	10	12	14	18	24	-
	Massa	kg/m ²	163,15	214,14	265,13	367,10	520,06	-
Armadura de distribuição	Solução adotada	-	φ6 // 200mm	φ6 // 225mm	φ6 // 275mm	φ6 // 350mm	φ6 // 350mm	Nas duas direções; de acordo com o catálogo do fabricante
	Massa	kg/m ²	2,25	2,00	1,64	1,29	1,29	
Armadura de apoio	Solução adotada	-	φ10 // 200mm	φ10 // 225mm	φ12 // 250mm	φ12 // 175mm	φ12 // 125mm	De acordo com o catálogo do fabricante
	Massa	kg/m ²	0,94	0,83	1,08	1,54	2,16	
Conectores	Quantidade total	unid/m ²	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	De acordo com o catálogo do fabricante
	Massa	kg/m ²	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	
Valor total de GWP		kg CO₂ equiv. /m²	7,85E+01	1,03E+02	1,24E+02	1,55E+02	2,02E+02	-
Peso próprio do sistema		kg/m²	175,47	229,46	282,68	384,76	538,33	-

A Figura 3.6 ilustra a representação esquemática desta tipologia de macro-componentes, incluindo todos os seus elementos constituintes:

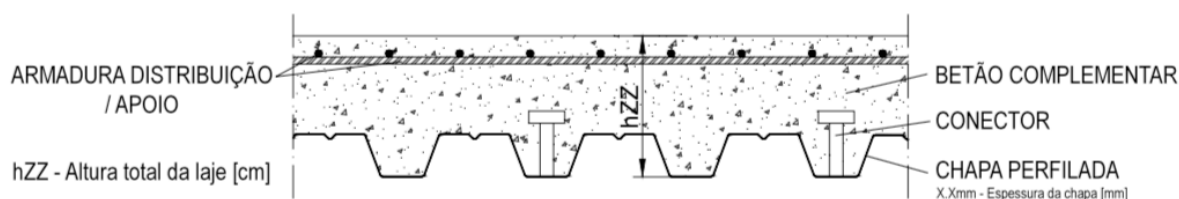


Figura 3.6 – Representação esquemática das macro-componentes relativas às lajes mistas de chapa colaborante

De forma a analisar a influência de cada módulo do ciclo de vida, de acordo com a organização modular exposta no Quadro 2.3, apresentam-se nas Figura 3.7 e Figura 3.8 as suas contribuições em termos absolutos e percentuais, respetivamente:

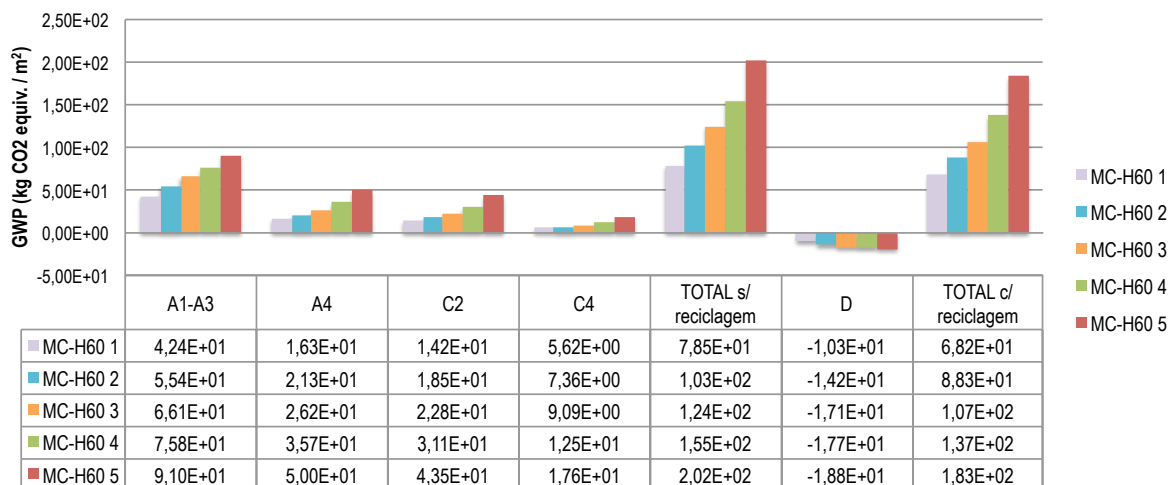


Figura 3.7 – Análise da contribuição dos módulos do ciclo de vida das macro-componentes referentes a lajes de chapa colaborante, em valores absolutos

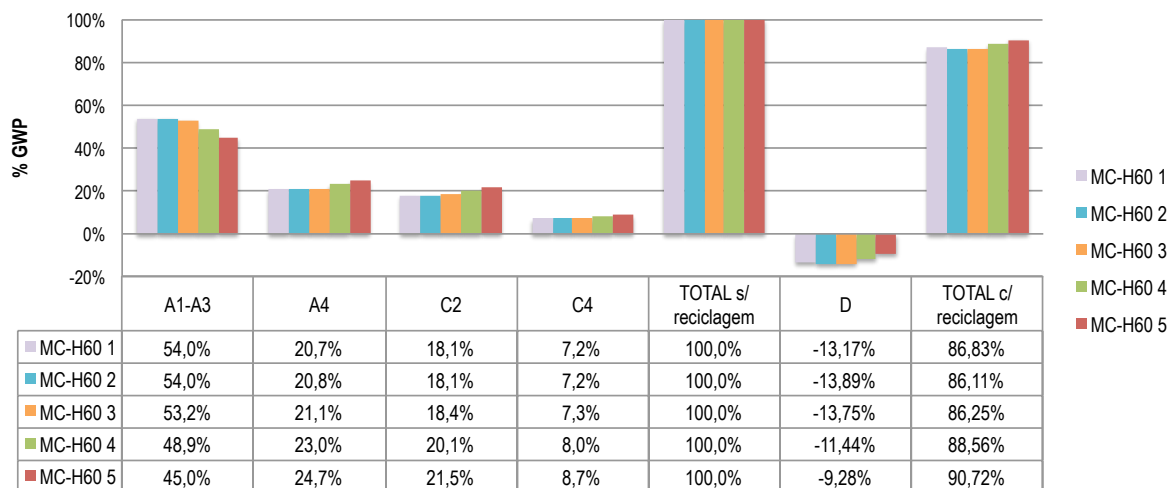


Figura 3.8 – Análise da contribuição dos módulos do ciclo de vida estudados das macro-componentes referentes a lajes de chapa colaborante, em valores percentuais

Conclui-se, através da análise das figuras, que a fase de produção dos materiais, referente aos módulos A1 a A3, é aquela cuja contribuição é maior, rondando os 50% do valor total. No que concerne aos módulos que envolvem transporte, nomeadamente os A4 e C2, a sua contribuição é, naturalmente, dependente da distância considerada conforme o apresentado na secção 3.1 e cuja análise de sensibilidade se apresenta na secção 3.6. Assim, a contribuição destes módulos ronda os 20%, ou 40% quando considerados em conjunto, revelando a influência do parâmetro referente à distância no valor global, bem como a pertinência da

escolha de soluções e fornecedores que minimizem este parâmetro. Relativamente ao módulo C4, que diz respeito à eliminação ou deposição dos resíduos sobrantes, a sua contribuição é inferior a 10% para qualquer das macro-componentes.

De forma a aferir o potencial de reciclagem desta tipologia de lajes, efetuou-se em paralelo, o cálculo do valor de GWP para o caso de o material ser reciclado ou reutilizado no final do ciclo de vida do edifício. Os resultados apontam para valores de potenciais de reciclagem entre os 9% e 14%. Esta hipótese não foi considerada no cálculo dos impactes associados às macro-componentes já que, infelizmente, esta ainda não é uma prática corrente na indústria da construção e, sendo um efeito benéfico, poderia traduzir-se em estimativas demasiado otimistas.

As Figura 3.9 e Figura 3.10 apresentam a contribuição de cada elemento constituinte da macro-componente para o valor total de GWP, em termos absolutos e percentuais, respetivamente:

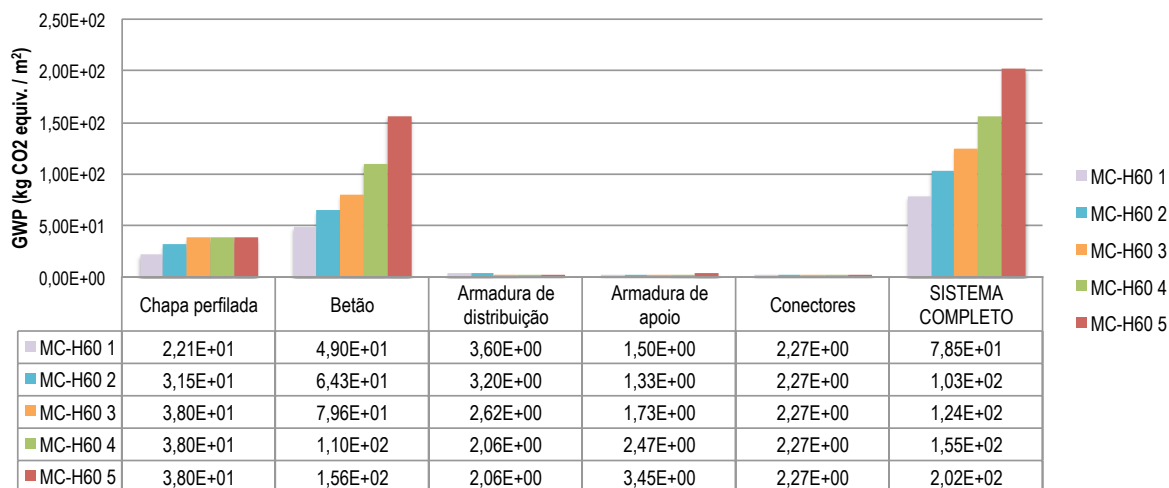


Figura 3.9 – Análise da contribuição dos elementos constituintes das macro-componentes referentes a lajes de chapa colaborante, em valores absolutos

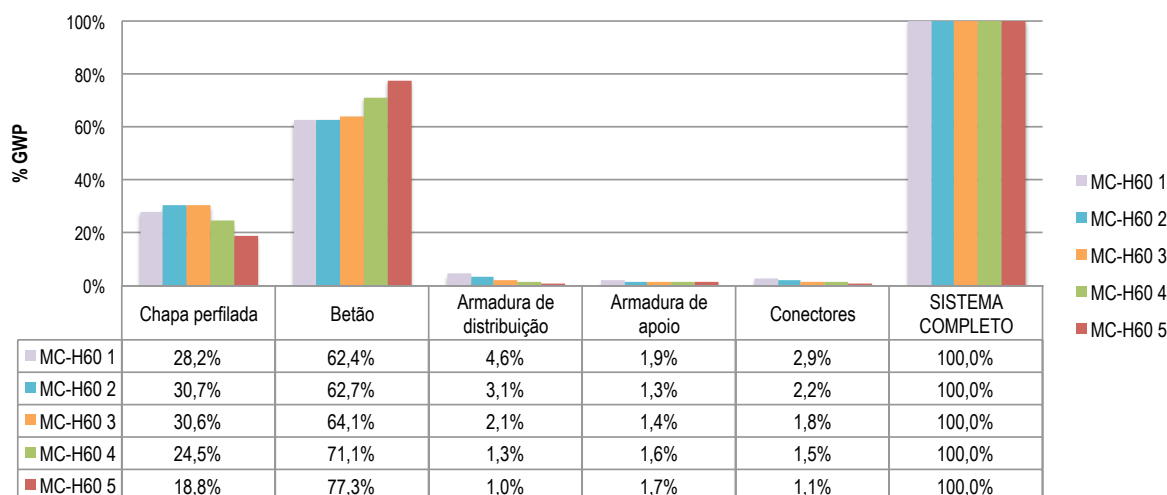


Figura 3.10 – Análise da contribuição dos elementos constituintes das macro-componentes referentes a lajes de chapa colaborante, em valores percentuais

A análise dos resultados evidencia o facto da contribuição dos elementos complementares do sistema, tais como as armaduras e os conectores, para o valor global de GWP do sistema completo ser desprezável, na medida em que são inferiores a 5%. Esta conclusão justifica o facto de não ser necessária, para este tipo de estudo, uma análise detalhada para estes elementos, especialmente para os conectores, de acordo com o debatido atrás.

3.5 Lajes de vigotas prefabricadas e blocos de aligeiramento

Esta tipologia de laje é constituída por vigotas prefabricadas de betão pré-esforçado sob blocos de cofragem em betão de agregados de argila expandida, recebendo, em obra, uma camada de betão complementar, e respetivas armaduras, com função resistente e de solidarização do conjunto (Leiriviga, 2012). Durante a fase de construção, enquanto a resistência do conjunto não é atingida, as ações relativas ao peso dos elementos e as inerentes aos trabalhos em obra são suportadas integralmente pelas vigotas. À semelhança das lajes mistas de chapa colaborante, esta tipologia tem também um comportamento unidirecional, sendo a distribuição das cargas efetuada na direção paralela ao desenvolvimento das vigotas, pelo que foi admitida a hipótese de esquema estrutural simplesmente apoiado conjugada com a consideração de armadura de apoio capaz de resistir aos momentos fletores negativos que se desenvolvem sobre os apoios, consequência do grau de encastramento parcial nos casos em que há continuidade do sistema entre os vãos adjacentes. O Quadro 3.3 apresenta as informações detalhadas dos elementos constituintes desta tipologia de laje, sendo que as nervuras transversais, ou tarugos, não foram consideradas, nem foram exploradas as soluções com vigotas duplas e triplas.

Quadro 3.3 – Informações relativas aos elementos constituintes das lajes de vigotas e blocos de aligeiramento (Leiriviga, 2012)

Elemento	Material	Disposições	Observações
Aço de pré-esforço (vigota)	Aço Y 1770	Vigotas: P2, P3 e P4	de acordo com a Figura 3.11
Betão (vigota)	C35/45		
Blocos de aligeiramento	Betão de agregados de argila expandida	BL48x12; BL38x12; BL30x12 BL22x12; BL48x16; BL38x16 BL30x16; BL22x16; BL38x20 BL30x20; BL23x20; BL38x25 BL30x25; BL22x25	De acordo com a Figura 3.12
Betão complementar	C25/30	Espessura de lâmina acima do bloco [mm]: 30, 40, 50 ,60 e 70	(1)
Armadura de distribuição	A500	Ø6 e Ø8 Espaçamento [mm]: 200 a 350	Nas duas direções; Espaçamento em múltiplos de 25mm (1)
Armadura de apoio (continuidade)	A500	Ø6 e Ø8 Espaçamento [mm]: 200 a 350	1/10 do vão livre mais comprimento de amarração (35xØ); Espaçamento em múltiplos de 25mm (1)
(1) De acordo com o Documento de aplicação (Leiriviga, 2012)			
144 combinações de soluções para ambos os casos de carga			
Designação genérica: PW-BLXXxYY-ZZ			
W – Número correspondente à tipologia da vigota (de acordo com a Figura 3.11)			
XX – Largura do bloco/espacamento livre entre vigotas [cm]			
YY – Altura do bloco [cm]			
ZZ – Altura total da laje [cm]			

As Figura 3.11 e Figura 3.12 ilustram, respetivamente, a geometria transversal dos tipos de vigotas e dos tipos de blocos considerados para as macro-componentes. De forma a não tornar o presente documento demasiado extenso, 4 dos 14 tipos de blocos considerados, sendo estes referentes às soluções que serviram de base para o estabelecimento das macro-componentes, como se discutirá adiante.

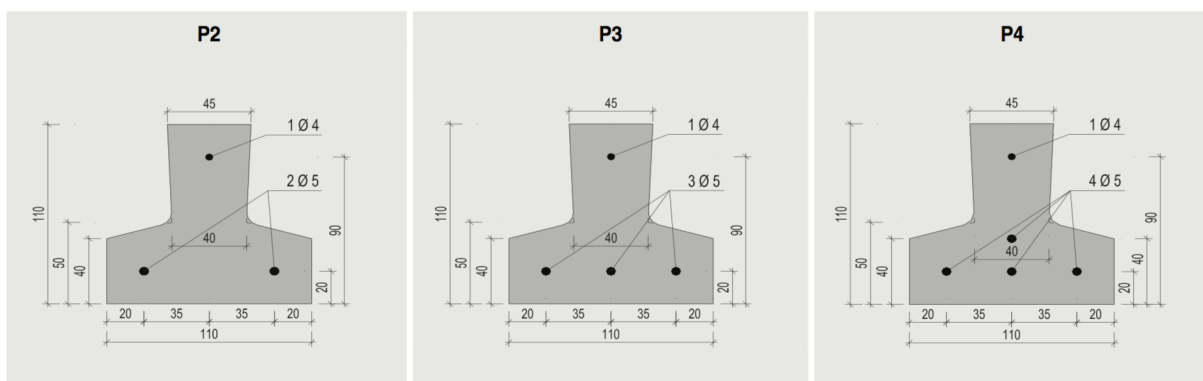
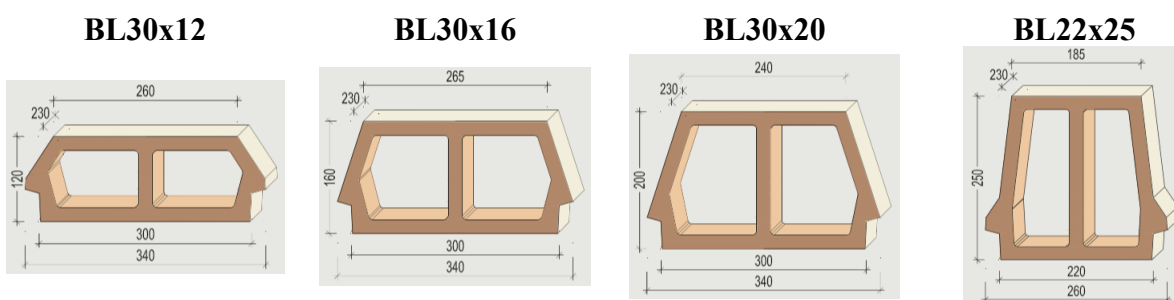


Figura 3.11 – Geometria transversal das vigotas (Leiriviga, 2012)



Todos os blocos têm 23cm de comprimento (na direção das vigotas)

Designação genérica: BLXXxYY

XX – Largura/espacamento livre entre vigotas [cm]

YY – Altura do bloco [cm]

Figura 3.12 – Geometria dos blocos de aligeiramento considerados nas macro-componentes (Leiriviga, 2012)

O processo de estabelecimento das macro-componentes é similar ao descrito na secção 3.4 para o caso das lajes mistas de chapa colaborante. Ainda assim, a metodologia de dimensionamento é diferente, na medida em que, neste caso, é efetuada através das características mecânicas que constam no Documento de Aplicação (Leiriviga, 2012) desta tipologia de laje, nomeadamente os momento fletor e esforço transversal resistentes (M_{Rd} e V_{Rd} respetivamente) para os ULS, e o momento de fendilhação e o fator de rigidez (M_{fctk} e EI) para o caso das verificações relativas a SLS, que são apresentados adiante no Quadro 3.4 para as soluções que deram origem à definição de macro-componentes. Desta feita, foram efetuadas, para as 144 combinações de soluções e de acordo com as condições descritas no Documento de Aplicação (Leiriviga, 2012), as verificações relativas à Flexão e Corte para ULS, e Fendilhação, Flecha instantânea e Flecha a longo prazo para SLS, sendo as flechas limite iguais a $L/400$ e $L/300$, respetivamente. As Figura 3.13 e Figura 3.14 ilustram a distribuição das soluções de menor e maior valor de GWP em função do vão entre apoios para os casos de carga residencial e de escritórios, respetivamente, salientando-se as considerações efetuadas na secção 3.4 acerca da definição das soluções mais eficientes.

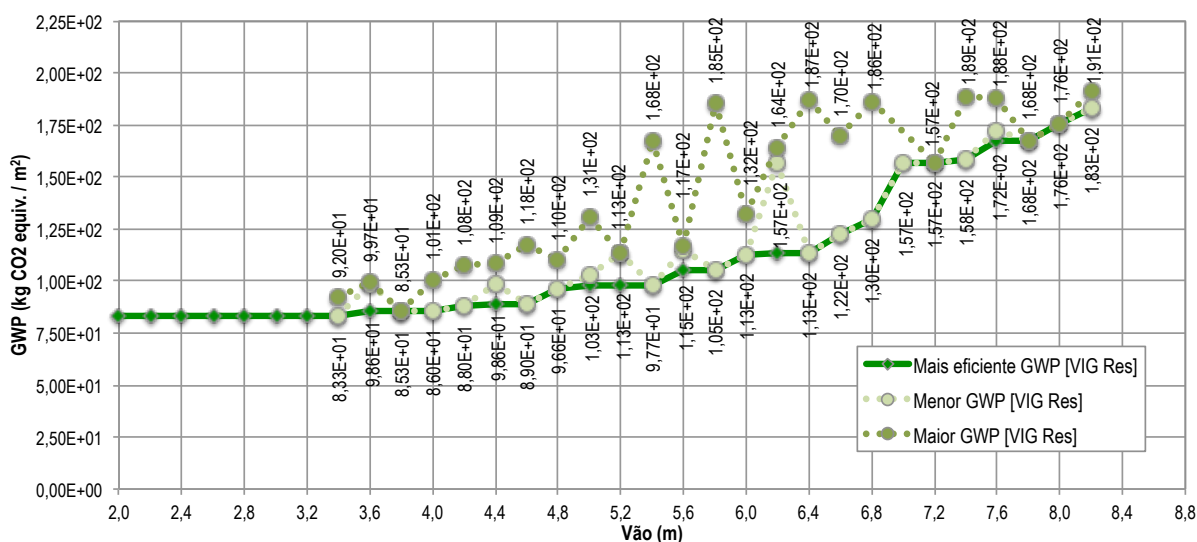


Figura 3.13 – Distribuição dos vãos máximos relativos às soluções de lajes de vigotas e blocos de aligeiramento para o caso de carga de utilização residencial

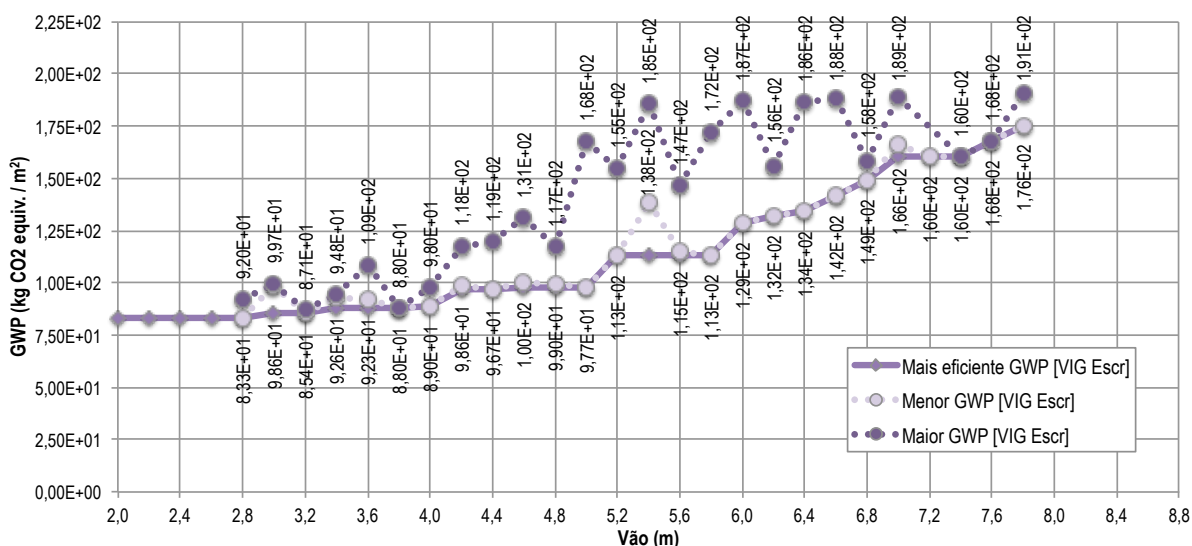


Figura 3.14 – Distribuição dos vãos máximos relativos às soluções de lajes de vigotas e blocos de aligeiramento para o caso de carga de utilização para escritórios

Prosseguiu-se com a definição das macro-componentes referentes às lajes de vigotas e blocos de aligeiramento, tendo em consideração os mesmos pressupostos discutidos a propósito das lajes mistas de chapa colaborante tendo, desta feita, sido definidas 5 macro-componentes designadas de “MC-VIG” seguidas do número correspondente, por ordem crescente de vãos máximos, cujo resultado se ilustra na Figura 3.15 para o caso de carga referente a utilização residencial e na Figura 3.16 para o caso de carga de escritórios. Ao contrário do sucedido para as lajes mistas de chapa colaborante, as soluções que correspondem a macro-componentes não são as mais eficientes para os dois casos de carga, nomeadamente no que concerne às

macro-componentes 3, 4 e 5 para o caso de carga referente a escritórios. Ainda assim, esta condição não invalida o propósito do estudo, na medida em que as percentagens de erro face à solução mais eficiente mantêm-se, ainda assim, abaixo do valor máximo para o caso das lajes mistas de chapa colaborante, situando-se num valor máximo de cerca de 23%.

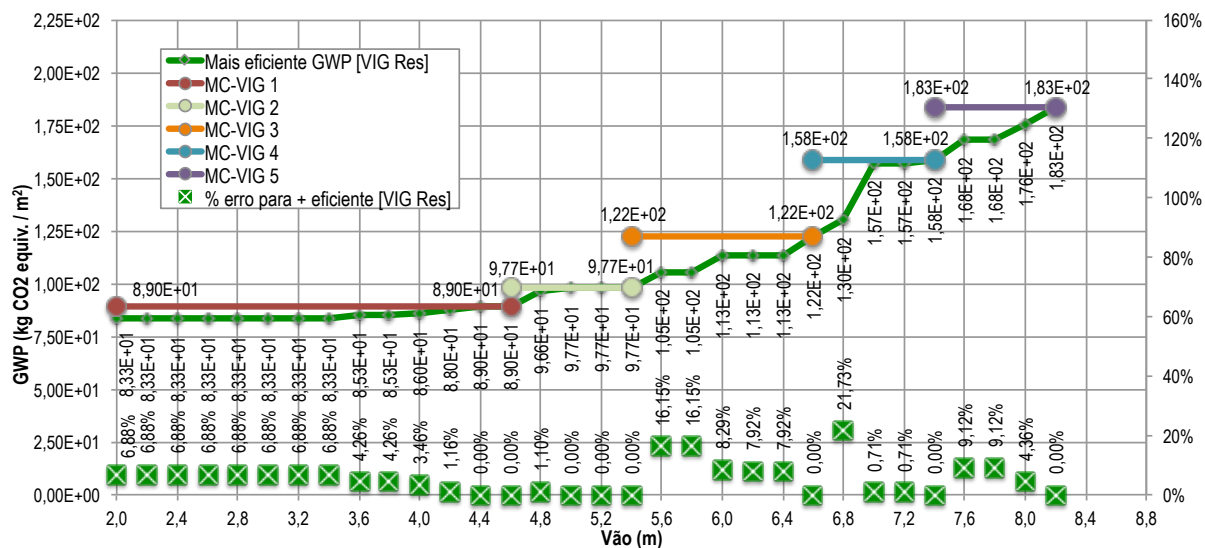


Figura 3.15 – Definição das macro-componentes relativas às lajes vigotas e blocos de aligeiramento para o caso de carga de utilização residencial

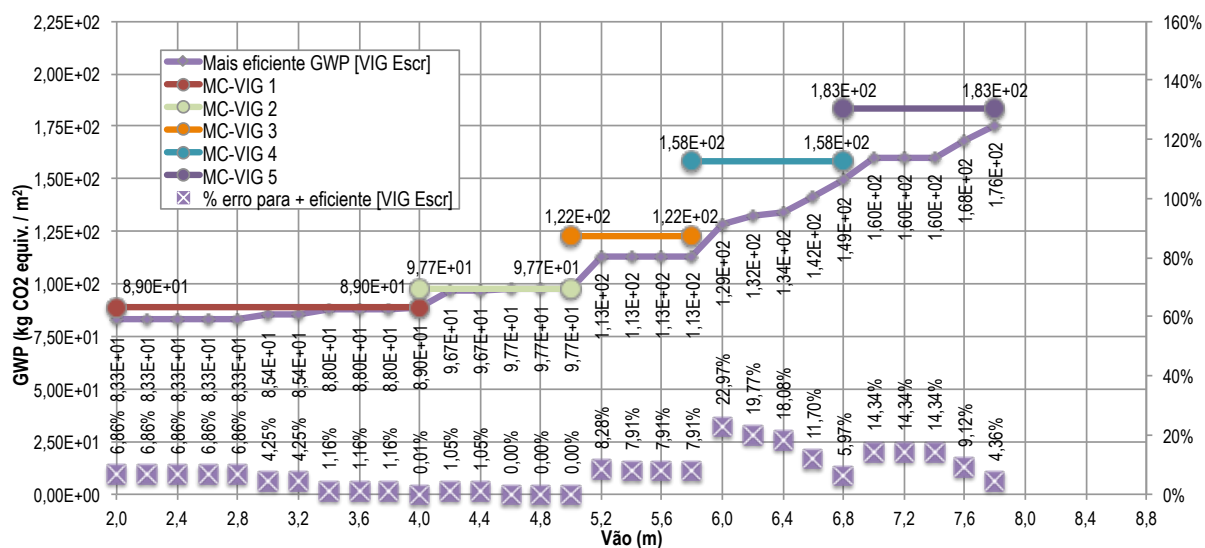


Figura 3.16 – Definição das macro-componentes relativas às lajes vigotas e blocos de aligeiramento para o caso de carga de utilização para escritórios

O Quadro 3.4 resume as principais características das soluções correspondentes às macro-componentes definidas para as lajes de vigotas e blocos de aligeiramento, contendo, o Anexo C, informações detalhadas e valores de GWP elementares e totais.

Quadro 3.4 – Quadro resumo das principais características das macro-componentes definidas para as lajes de vigotas e blocos de aligeiramento

Designação da macro-componente			MC-VIG 1	MC-VIG 2	MC-VIG 3	MC-VIG 4	MC-VIG 5	Obs.
Designação da solução			P3- BL30x12- 15	P3- BL30x16- 19	P4- BL30x20- 24	P3- BL22x25- 28	P4- BL22x25- 31	
Bloco de aligeiramento			BL30x12	BL30x16	BL30x20	BL22x25	BL22x25	(1)
Vigota			P3	P3	P4	P3	P4	(1)
Espessura da laje cm			15	19	24	28	31	(1)
Residencial	Vão mínimo	m	0,0	4,6	5,4	6,6	7,4	-
	Vão máximo	m	4,6	5,4	6,6	7,4	8,2	-
	Condicionante de dimensionamento		SLS - Flecha $t=\infty$	SLS - Flecha $t=\infty$	SLS - Flecha $t=\infty$	ULS - Flexão	SLS - Flecha $t=\infty$	-
Escritórios	Vão mínimo	m	0,0	4,0	5,0	5,8	6,8	-
	Vão máximo	m	4,0	5,0	5,8	6,8	7,8	-
	Condicionante de dimensionamento		ULS - Corte	ULS - Corte	ULS - Corte	ULS - Flexão	ULS - Flexão	-
ULS	Momento flector resistente - MRd	kN.m/m	25,6	35,1	58,5	69,7	97,9	(1)
	Esforço transversal resistente - VRd	kN/m	18,3	23,9	31,0	45,4	50,7	(1)
SLS	Momento de fendilhação - Mfctk	kN.m/m	13,4	20,0	32,9	44,4	58,6	(1)
	Fator de rigidez - EI	kN.m ² /m	4128	8015	16154	27113	39668	(1)
Quantidades por m ²	Vigotas	m	2,44	2,44	2,44	3,03	3,03	(1)
	Blocos	unid.	10,60	10,60	10,60	13,18	13,18	(1)
	Betão	l	41,90	53,30	78,40	94,20	124,20	(1)
Aço de pré-esforço - Vigotas		kg/m ²	1,36	1,36	1,73	1,69	2,15	-
Betão C35/45 - Vigotas		kg/m ²	45,49	45,49	45,36	56,49	56,33	-
Blocos de aligeiramento		kg/m ²	47,70	47,70	53,00	79,08	79,08	-
Betão complementar		kg/m ²	106,82	135,88	199,86	240,14	316,62	-
Armadura de distribuição	Direcção longitudinal	-	φ6 // 250mm	φ6 // 250mm	φ6 // 200mm	φ6 // 200mm	φ8 // 275mm	-
	Direcção transversal	-	φ6 // 250mm	φ6 // 250mm	φ6 // 200mm	φ6 // 200mm	φ6 // 150mm	-
	Massa	kg/m ²	1,80	1,80	2,25	2,25	2,95	-
Armadura de apoio	Solução adotada	-	φ6 // 250mm	φ6 // 250mm	φ6 // 200mm	φ6 // 200mm	φ8 // 275mm	-
	Massa	kg/m ²	0,13	0,12	0,15	0,14	0,20	-
Valor total de GWP		kg CO₂ equiv. /m²	8,90E+01	9,77E+01	1,22E+02	1,58E+02	1,83E+02	-
Peso próprio do sistema		kg/m²	203,29	232,35	302,35	379,79	457,33	-

(1) Informações indicadas no Documento de Aplicação do fabricante (Leiriviga, 2012)

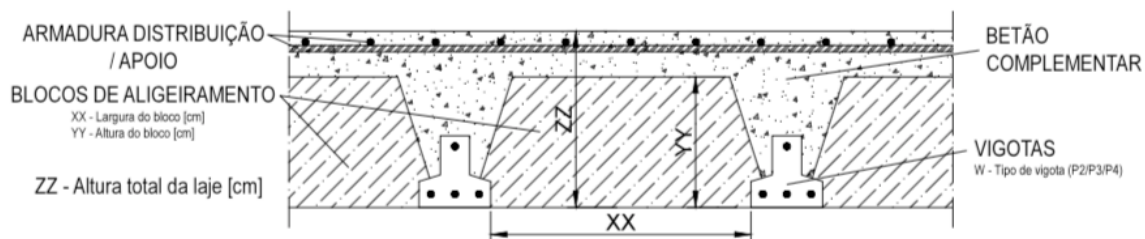


Figura 3.17 Representação esquemática das macro-componentes relativas às lajes mistas de chapa colaborante

Similarmente ao que foi efetuado para a outra tipologia de laje estudada, analisou-se a influência de cada módulo do ciclo de vida, apresentando-se os resultados em termos absolutos na Figura 3.18 e em termos percentuais na Figura 3.19:

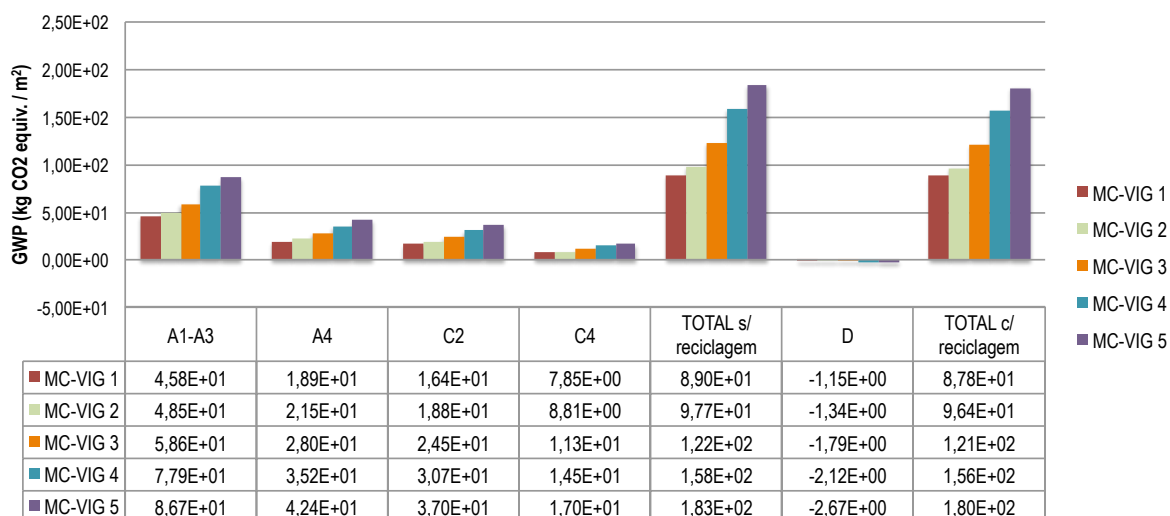


Figura 3.18 – Análise da contribuição dos módulos do ciclo de vida das macro-componentes referentes a lajes de vigotas e blocos de aligeiramento, em valores absolutos

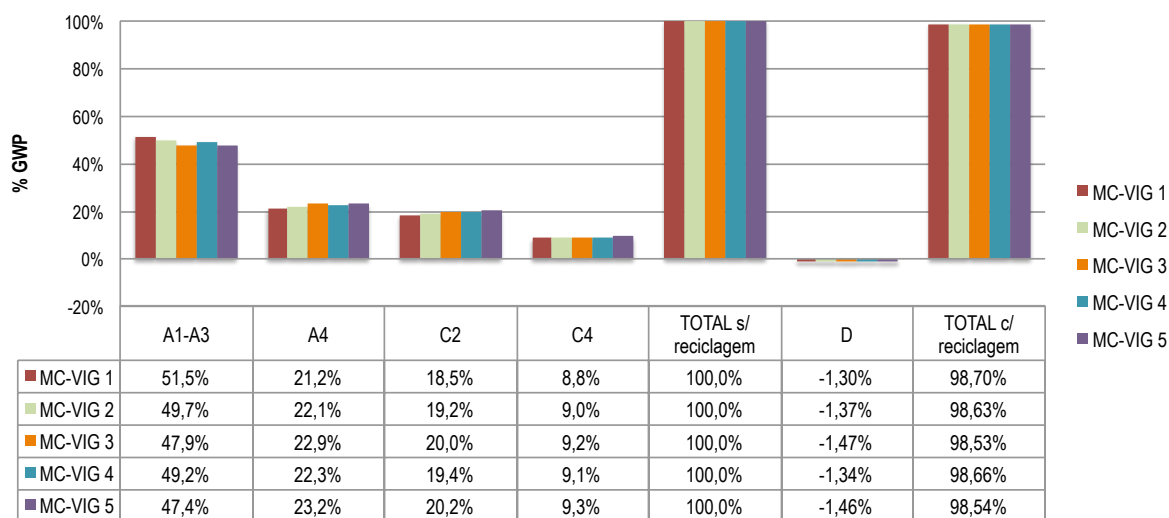


Figura 3.19 – Análise da contribuição dos módulos do ciclo de vida das macro-componentes referentes a lajes de vigotas e blocos de aligeiramento, em valores percentuais

Em termos percentuais, as conclusões desta análise são em tudo análogas às efetivadas para as lajes mistas de chapa colaborante, à exceção das referentes à hipótese de reciclagem, já que os valores do potencial de reciclagem, neste caso, são bastante inferiores. Todavia, o facto de a base de dados não contemplar a parcela referente ao módulo D para o material constituinte dos blocos de betão de agregados de argila expandida justifica, em parte, o baixo potencial de reciclagem destas soluções. A análise da contribuição de cada elemento constituinte da macro-componente para o valor total de GWP é apresentada na Figura 3.20 em valores absolutos e na Figura 3.21 em valores percentuais:

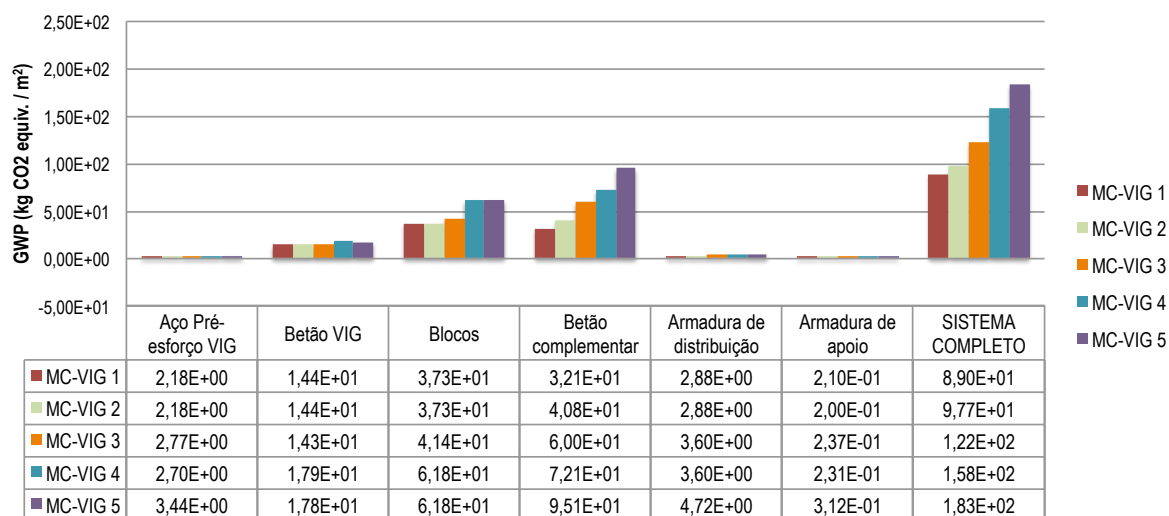


Figura 3.20 – Análise da contribuição dos elementos constituintes das macro-componentes referentes a lajes de vigotas e blocos de aligeiramento, em valores absolutos

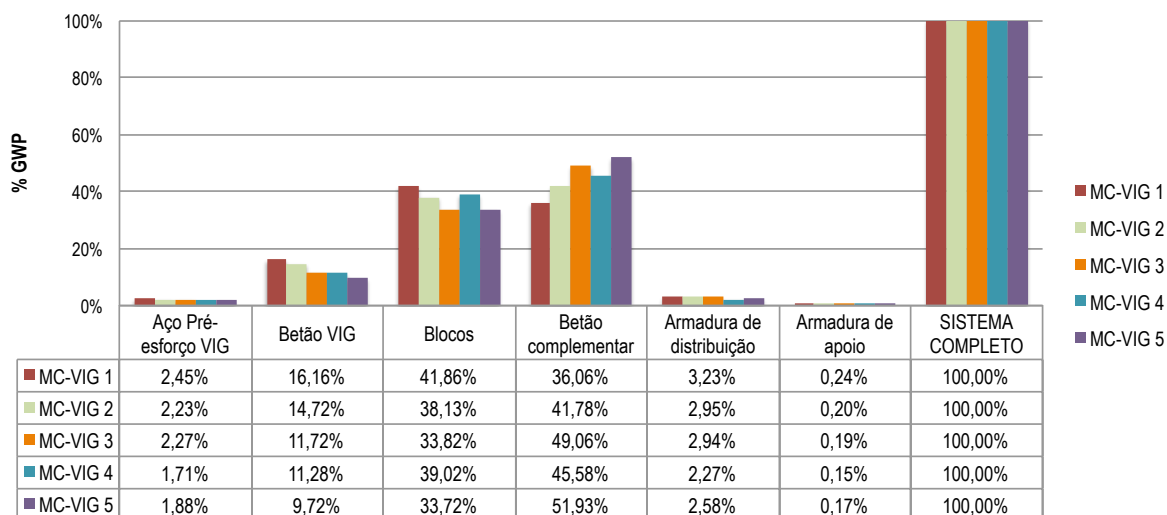


Figura 3.21 – Análise da contribuição dos elementos constituintes das macro-componentes referentes a lajes de vigotas e blocos de aligeiramento, em valores percentuais

Tal como se concluiu para o caso das lajes mistas de chapa colaborante, os elementos secundários, nomeadamente as armaduras, têm uma contribuição residual para o valor total de GWP, pelo que a sua não consideração não invalidaria o estudo. Por outro lado, a camada de betão complementar e os blocos de aligeiramento dividem a maior fração do valor, sendo que a parcela relativa ao primeiro aumenta para as soluções de lajes com maior espessura. O betão correspondente às vigotas assume valores não menosprezáveis entre cerca de 10% e 16%.

3.6 Análise de sensibilidade do parâmetro distância

De forma a avaliar a influência dos módulos do ciclo de vida de um edifício que envolvem transporte, efetuou-se uma análise de sensibilidade considerando distâncias entre 20 km e 140 km, escalonadas em múltiplos de 20 km. A Figura 3.22 ilustra a diferença percentual entre os vários valores analisados e o valor de referência, 80 km, considerado no estudo. A escolha deste valor prende-se com o facto de ser um valor razoável para deslocações dentro de uma dada região, correspondendo, por outro lado, a uma contribuição destes módulos, face ao valor total de GWP, de proporções entre cerca de 39% e 46% conforme sugerem os resultados da Figura 3.23, conduzindo a estimativas de valores para as macro-componentes que abrangem uma larga gama de hipóteses para este parâmetro, ampliando assim a sua validade. No Anexo D são apresentadas informações detalhadas sobre este processo de análise.

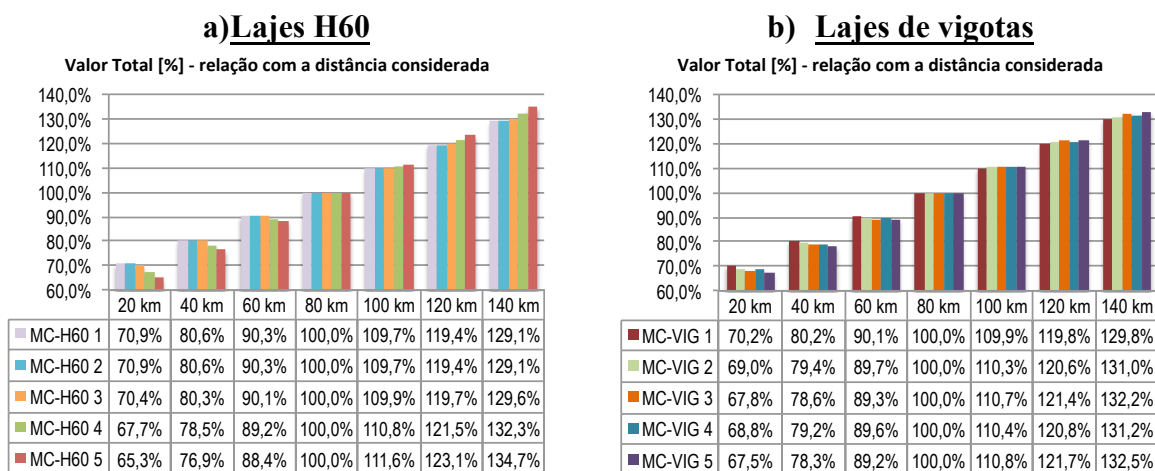


Figura 3.22 – Análise da influência da distância em termos de valor total de GWP

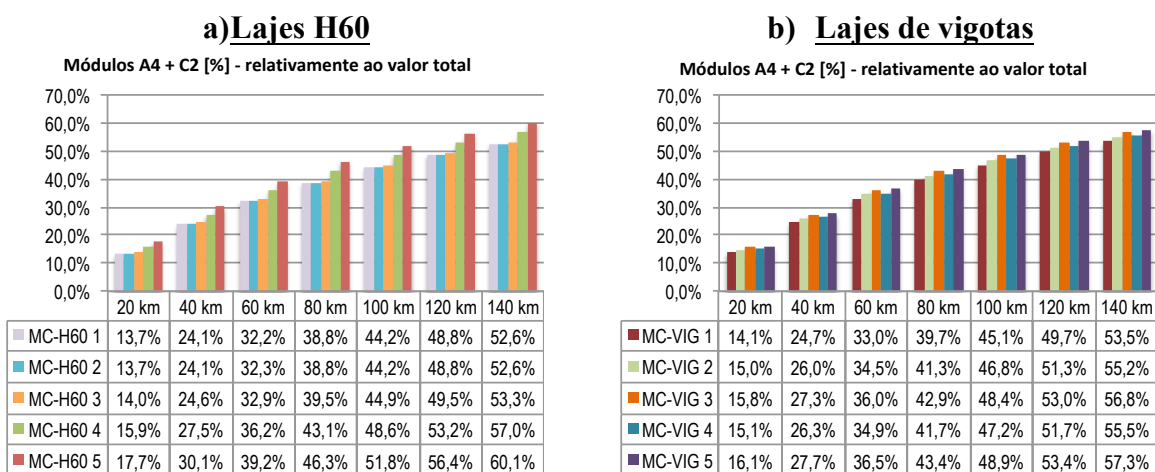


Figura 3.23 – Análise da contribuição dos módulos que envolvem transporte em função da distância

Esta análise realça a importância da seleção de soluções, e respetivos fabricantes, que minimizem o parâmetro respeitante à distância, na medida em que, da análise dos resultados ilustrados na Figura 3.22, se conclui que os valores de GWP podem ser reduzidos em cerca de 30%, para a hipótese da distância assumir o valor de 20km, face aos valores considerados para as macro-componentes, ou, por outro lado, agravarem em cerca de 30% caso o a distância seja de 140km. De acordo com os resultados apresentados na Figura 3.23, para distâncias superiores a 80km, a parcela relativa à soma dos módulos que envolvem transporte, A4+C2, podem ultrapassar os 50% do valor total da solução, situação que se afasta dos princípios sustentáveis, na medida em que os impactes associados ao transporte são superiores às próprias atividades de construção.

4 APLICAÇÃO PRÁTICA DA METODOLOGIA ESTUDADA

A aplicação da metodologia de ACV em fases iniciais de projeto, com base em macro-componentes de soluções construtivas, tem como principal objetivo auxiliar o processo de seleção de soluções com base em informação diminuta, sendo essa condição confirmada pela reduzida extensão do presente capítulo. Desta forma, após estabelecidas as macro-componentes para as duas tipologias de lajes, torna-se imediata a sua comparação em função do vão entre apoios. A Figura 4.1 apresenta essa análise comparativa para o caso de carga referente a utilização residencial:

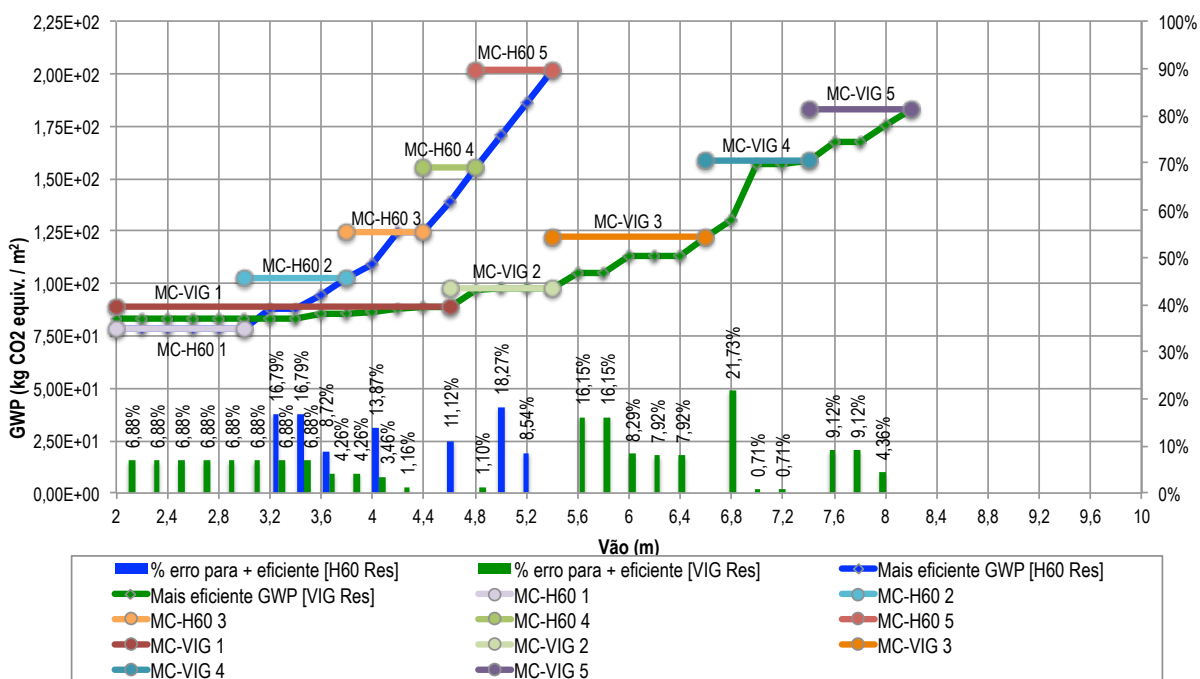


Figura 4.1 – Análise comparativa entre as soluções de macro-componentes relativas a lajes de chapa colaborante e de vigotas e blocos de aligeiramento em função do vão para o caso de carga de utilização residencial

Da análise dos resultados conclui-se que as soluções de lajes de vigotas e blocos de aligeiramento são, na generalidade, mais eficientes, na medida em que alcançam vãos superiores com valores de GWP mais reduzidos, sendo que, ainda assim, as lajes mistas de chapa colaborante são mais eficientes até vãos de 3,0 metros, sendo a percentagem máxima de erro que se comete ao utilizar os valores das macro-componentes face à solução mais eficiente

de 16,79% para as lajes mistas de chapa colaborante e 21,73% para as lajes de vigotas e blocos de aligeiramento.

A Figura 4.2 exibe a análise comparativa das duas tipologias de lajes para o caso de carga referente a escritórios:

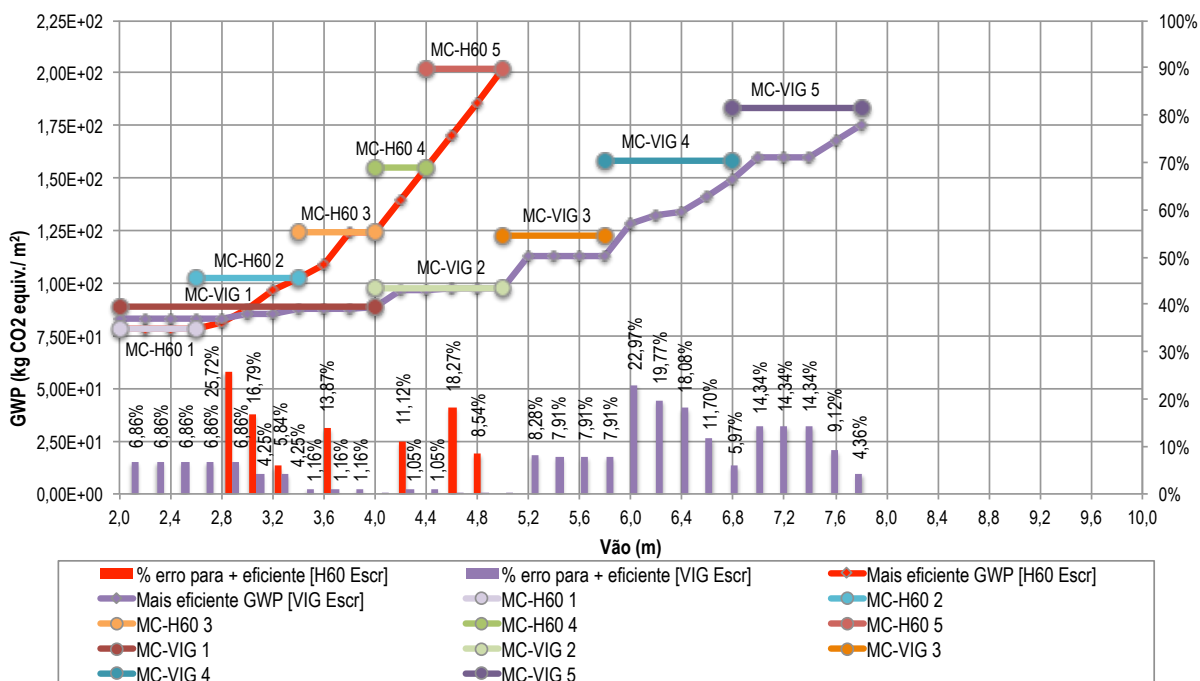


Figura 4.2 – Análise comparativa entre as soluções de macro-componentes relativas a lajes de chapa colaborante e de vigotas e blocos de aligeiramento em função do vão para o caso de carga de utilização para escritórios

As conclusões da análise efetuada para o caso de carga de utilização residencial são válidas também para o caso dos escritórios, sendo que, neste caso, a laje mista de chapa colaborante é mais eficiente até vãos de 2,8 metros, sendo a percentagem máxima de erro de 25,72% e 22,97% para as lajes mistas de chapa colaborante e para as lajes de vigotas e blocos de aligeiramento, respetivamente.

Desta forma, torna-se evidente que as lajes de vigotas e blocos de aligeiramento são, na globalidade, a solução mais eficiente do ponto de vista da contribuição de GWP, até porque mesmo para os vãos onde estas não são as mais eficientes, a diferença entre as duas tipologias é bastante reduzida. Uma das razões que poderá explicar esta circunstância é o grau de desenvolvimento e otimização das duas soluções. Assim, enquanto as lajes de vigotas e blocos de aligeiramento estão no apogeu do seu desenvolvimento, as lajes mistas de chapa colaborante estão ainda a ser sujeitas a evoluções na sua otimização, mas sobretudo nas normas que as regulamentam e que são ainda muito conservadoras.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

O presente capítulo consiste numa breve síntese das principais conclusões, já que estas foram sendo identificadas e discutidas nas respetivas secções.

Assim, concluiu-se que a indústria da construção tem bastante potencial para mitigar as principais ameaças à sustentabilidade do planeta, sendo que, para o caso estudado, referente ao indicador GWP, a escolha da solução com maior eficiência poderá conduzir a reduções dos impactes que poderão chegar a 50%.

A utilização da metodologia baseada em macro-componentes é útil em fases iniciais de projeto já que torna possível uma seleção de soluções alternativas com bases científicas, mesmo quando as informações relativas ao projeto são ainda diminutas.

Da análise das macro-componentes referentes às duas tipologias de lajes estudadas, foram retiradas as seguintes conclusões:

- A contribuição de alguns elementos complementares, tais como as armaduras, para o valor total de GWP de uma solução é desprezável, quando comparada com a contribuição de elementos principais como a camada de betão;
- O parâmetro distância referente aos módulos que envolvem transporte tem profunda influência no valor total de GWP da solução, podendo atingir proporções superiores a metade do valor total. Como tal, é fundamental que se procurem soluções que minimizem este parâmetro. Excluindo os módulos correspondentes ao transporte dos materiais, cuja influência no valor total depende da distância em causa, os módulos correspondentes à fase de produção dos materiais são aqueles que têm maior expressão;
- As lajes de vigotas e blocos de aligeiramento são, no geral, mais eficientes do ponto de vista ambiental, nomeadamente no que concerne ao indicador GWP, fruto do seu elevado grau de desenvolvimento e otimização, sendo que, por outro lado, as lajes

mistas de chapa colaborante estão em fase de evolução, tanto das próprias soluções como das normas que as regulam, que são bastante conservadoras;

- Note-se, no entanto, que se a reciclagem ou reutilização dos materiais fosse considerada na análise, as soluções relativas às lajes mistas de chapa colaborante poderiam ser mais competitivas ao nível da eficiência ambiental, mais concretamente no que toca ao indicador GWP, uma vez que estas têm grandes vantagens em termos de potencial de reciclagem e reutilização face às soluções de lajes de vigotas e blocos de aligeiramento, conforme indicado nas Figura 3.8 e Figura 3.19.

5.2 Propostas para desenvolvimentos futuros

Finalizado o presente estudo, apresentam-se algumas sugestões de desenvolvimentos futuros com vista a complementar o trabalho até aqui desenvolvido:

- Integrar critérios económicos e sociais nas macro-componentes desenvolvidas, bem como os restantes critérios ambientais;
- Integrar demais características relevantes para outras especialidades, tais como desempenho a nível térmico e acústico, nas macro-componentes estabelecidas;
- Desenvolver macro-componentes para outras tipologias de lajes, tais como maciças, fungiformes aligeiradas, alveolares;
- Explorar soluções com vigotas duplas e triplas, para o caso das lajes de vigotas e blocos de aligeiramento;
- Integrar os desenvolvimentos a que estas soluções estão sujeitas, de forma a atualizar o seu desempenho, como é o caso dos desenvolvimentos em curso para os sistemas de reforço adicional com vista ao aumento da resistência ao corte das lajes mistas de chapa colaborante;
- Analisar com maior detalhe, e ao nível nacional, o parâmetro relativo à distância entre o local de fabrico e a obra, bem como da obra ao local de tratamento do material sobran-te, tendo em consideração a localização destes no território nacional, enquadrando-se esta temática na área de planeamento e transportes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abd Rashid, A. F. and Yusoff, S. (2015). “A review of life cycle assessment method for building industry”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 45, pp. 244–248. doi: 10.1016/j.rser.2015.01.043.

Abd Rashid, A. F., Yusoff, S. and Mahat, N. (2013). “A Review of the Application of LCA for Sustainable Buildings in Asia”. *Advanced Materials Research*, 724–725, pp. 1597–1601. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.724-725.1597.

Andrade, T. F. R. (2013). “Integração da análise ciclo de vida nas práticas de projetos de edifícios”. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

ARQHYS@ (2019) www.arqhys.com/arquitectura/construccion-ciclos-edificio.html

Asif, M., Muneer, T. and Kelley, R. (2007). “Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland”. *Building and Environment*, 42(3), pp. 1391–1394. doi: 10.1016/j.buildenv.2005.11.023.

Basbagill, J., Flager, F., Lepech, M. and Fischer, M. (2013). “Application of life cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts”. *Building and Environment*, Elsevier, 60, pp. 81–92. doi: 10.1016/j.buildenv.2012.11.009.

Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G. and Castell, A. (2014). “Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 29, pp. 394–416. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.037.

Chou, J.-S. and Yeh, K.-C. (2015). “Life cycle carbon dioxide emissions simulation and environmental cost analysis for building construction”. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, 101, pp. 137–147. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.04.001.

Dimoudi, A. and Tompa, C. (2008). “Energy and environmental indicators related to construction of office buildings”. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1–2), pp. 86–95. doi: 10.1016/j.resconrec.2008.09.008.

EN 15978 (2011). “Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings, Calculation method”. CEN, Brussels, Belgium.

EN 1990 (2002). “Eurocode: Basis Structural Design”. CEN, Brussels, Belgium.

EN 1991-1-1 (2002). “Eurocode 1: Actions on structures, Part 1-1: General actions”. CEN, Brussels, Belgium.

- Ferreira, J. (2004). “Análise do Ciclo de Vida dos Produtos – Gestão Ambiental”. Instituto Politécnico de Viseu, Viseu.
- Gervásio, H., Santos, P., Martins, R. and Simões da Silva, L. (2014). “A macro-component approach for the assessment of building sustainability in early stages of design”. *Building and Environment*, Elsevier, 73, pp. 256–270. doi: 10.1016/j.buildenv.2013.12.015.
- IPCC (2014). “Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers”. IPCC, p. 31. doi: 10.1017/CBO9781107415324.
- IPCC@ (2019) https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html
- Jaques, R. (1998). “Cradle To the Grave - Lca Tools for Sustainable Development”, 47(47), pp. 15–17.
- Kibert, C. J. (2013) “Sustainable construction: green building design and delivery (Third Edition)”. John Wiley & Sons Inc, Hoboken, New Jersey.
- Kohler, N. and Moffatt, S. (2003). “Life-cycle analysis of the built environment”. *Industry and Environment*, 26(2–3), pp. 17–21.
- Kovacic, I. and Zoller, V. (2015). “Building life cycle optimization tools for early design phases”. *Energy*, Elsevier, 92, pp. 409–419. doi: 10.1016/j.energy.2015.03.027.
- Leiriviga (2012). “Documento de aplicação DA 34, LNEC. (disponível em http://www.leiriviga.pt/uploads/website_leiriviga/elfinder/DA_34%20LNEC.pdf)
- Malmqvist, T., Glaumann, M., Scarpellini, S., Zabalza, I., Aranda, A., Llera, E. and Díaz, S. (2011). “Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines”. *Energy*, Elsevier, 36(4), pp. 1900–1907. doi: 10.1016/j.energy.2010.03.026.
- Mateus, R. F. M. da S. (2009). “Avaliação da Sustentabilidade da Construção: propostas para o desenvolvimento de edifícios mais sustentáveis”. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho.
- Monahan, J. and Powell, J. C. (2011). “An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework”. *Energy and Buildings*, Elsevier, 43(1), pp. 179–188. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.09.005.
- O Feliz (2016). “Laje Mista - Perfil H60”. (disponível em http://www.ofeliz.pt/sites/default/files/o_feliz_laje_mista_-_h60.pdf)
- OCDE (2001a). “Design of Sustainable Building Policies: Scope for Improvement and Barriers”. OCDE, Paris, France.
- OCDE (2001b). “On the design of sustainable building policies: Summary, conclusions and contributions papers”. OCDE, Paris, France.
- OCDE@ (2019) <http://sbs-sme.eu/sector/construction>

-
- Pacheco-Torres, R., Jadraque, E., Roldán-Fontana, J. and Ordóñez, J. (2014). “Analysis of CO2 emissions in the construction phase of single-family detached houses”. *Sustainable Cities and Society*, 12, pp. 63–68. doi: 10.1016/j.scs.2014.01.003.
- Pinheiro, M. D. (2006). “Ambiente e Construção Sustentável”. Instituto do Ambiente, Amadora.
- Schlueter, A. and Thesseling, F. (2009). “Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages”. *Automation in Construction*, Elsevier, 18(2), pp. 153–163. doi: 10.1016/j.autcon.2008.07.003.
- Thinkstep AG (2017). “Leifelden-Echterdingen GaBi Software-System and Database for Life Cycle Engineering” 1992-2017 – Versão 7.3.0.40
- UNEP (2009). “Buildings and climate change: a summary for decision-makers”. United Nations Environmental Programme, Sustainable Buildings and Climate Initiative, pp. 1–62. doi: ISBN: 987-92-807-3064-7 DTI/1240/PA.
- United Nations (2017). “World Population Prospects: The 2017 Revision”. Department of Economics and Social Affairs, Population Division, United Nations. (disponível em <http://esa.un.org/unpd/wpp/>)
- Vatalis, K. I., Manoliadis, O., Charalampides, G., Platias, S. and Savvidis, S. (2013). “Sustainability Components Affecting Decisions for Green Building Projects”. *Procedia Economics and Finance*, Elsevier, 5(13), pp. 747–756. doi: 10.1016/S2212-5671(13)00087-7.
- Wallhagen, M., Glaumann, M. and Malmqvist, T. (2011). “Basic building life cycle calculations to decrease contribution to climate change – Case study on an office building in Sweden”. *Building and Environment*, Elsevier, 46(10), pp. 1863–1871. doi: 10.1016/j.buildenv.2011.02.003.
- WCED (1987). “Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development”. WCED (UN World Commission on Environment and Development), Switzerland.
- Yılmaz, M. and Bakış, A. (2015). “Sustainability in Construction Sector”. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, pp. 2253–2262. doi: 10.1016/j.sbspro.2015.06.312.
- Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A. and Aranda Usón, A. (2011). “Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential”. *Building and Environment*, Elsevier, 46(5), pp. 1133–1140. doi: 10.1016/j.buildenv.2010.12.002.
- Zabalza, I., Scarpellini, S., Aranda, A., Llera, E. and Jáñez, A. (2013). “Use of LCA as a tool for building ecodesign. A case study of a low energy building in Spain”. *Energies*, 6(8), pp. 3901–3921. doi: 10.3390/en6083901.

ANEXO A

Quadro A.1 – Base de dados referente aos materiais considerados no estudo

Betão C25/30 – 1kg	A1-A3	A4 (/km)	B	C2 (/km)	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	1,36E-07	4,33E-11	-	3,78E-11	2,91E-09	1,39E-09
ADP fossil [MJ]	5,66E-01	1,61E-02	-	1,41E-02	1,13E-01	-4,63E-02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,66E-04	5,20E-06	-	4,50E-06	4,94E-05	-1,86E-05
EP [kg Phosphate-Equiv.]	3,12E-05	1,20E-06	-	1,03E-06	7,57E-06	-5,43E-07
GWP [kg CO₂-Equiv.]	9,36E-02	1,16E-03	-	1,01E-03	3,32E-02	-6,41E-03
ODP [kg R11-Equiv.]	6,57E-12	2,03E-14	-	1,77E-14	6,21E-12	1,94E-13
POCP [kg Ethene-Equiv.]	1,95E-05	-1,70E-06	-	-1,46E-06	1,28E-05	-2,87E-06
Betão C30/37 e C35/45 – 1kg	A1-A3	A4 (/km)	B	C2 (/km)	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	1,85E-07	4,33E-11	-	3,78E-11	2,91E-09	1,39E-09
ADP fossil [MJ]	5,22E-01	1,61E-02	-	1,41E-02	1,13E-01	-4,63E-02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,62E-04	5,20E-06	-	4,50E-06	4,94E-05	-1,86E-05
EP [kg Phosphate-Equiv.]	2,80E-05	1,20E-06	-	1,03E-06	7,57E-06	-5,43E-07
GWP [kg CO₂-Equiv.]	1,09E-01	1,16E-03	-	1,01E-03	3,32E-02	-6,41E-03
ODP [kg R11-Equiv.]	7,89E-12	2,03E-14	-	1,77E-14	6,21E-12	1,94E-13
POCP [kg Ethene-Equiv.]	1,89E-05	-1,70E-06	-	-1,46E-06	1,28E-05	-2,87E-06
Aço para armaduras – 1kg	A1-A3	A4 (/km)	B	C2 (/km)	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	-5,47E-06	4,33E-11	-	3,78E-11	1,50E-09	-5,44E-07
ADP fossil [MJ]	1,54E+01	1,61E-02	-	1,41E-02	5,86E-02	-5,03E-01
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	3,93E-03	5,20E-06	-	4,50E-06	2,56E-05	-1,27E-04
EP [kg Phosphate-Equiv.]	3,11E-04	1,20E-06	-	1,03E-06	3,92E-06	-3,52E-06
GWP [kg CO₂-Equiv.]	1,41E+00	1,16E-03	-	1,01E-03	1,72E-02	-5,35E-02
ODP [kg R11-Equiv.]	1,23E-08	2,03E-14	-	1,77E-14	3,21E-12	1,70E-09
POCP [kg Ethene-Equiv.]	6,10E-04	-1,70E-06	-	-1,46E-06	6,64E-06	-2,85E-05
Chapa de aço – 1kg	A1-A3	A4 (/km)	B	C2 (/km)	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	1,31E-06	4,33E-11	-	3,78E-11	1,50E-09	-1,09E-05
ADP fossil [MJ]	2,71E+01	1,61E-02	-	1,41E-02	5,86E-02	-1,01E+01
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	7,93E-03	5,20E-06	-	4,50E-06	2,56E-05	-2,55E-03
EP [kg Phosphate-Equiv.]	4,60E-04	1,20E-06	-	1,03E-06	3,92E-06	-7,04E-05
GWP [kg CO₂-Equiv.]	2,59E+00	1,16E-03	-	1,01E-03	1,72E-02	-1,07E+00
ODP [kg R11-Equiv.]	1,78E-08	2,03E-14	-	1,77E-14	3,21E-12	3,41E-08
POCP [kg Ethene-Equiv.]	1,24E-03	-1,70E-06	-	-1,46E-06	6,64E-06	-5,70E-04
Aço estrutural – 1kg	A1-A3	A4 (/km)	B	C2 (/km)	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	-1,23E-05	3,46E-09	-	3,03E-09	5,01E-10	-5,17E-06
ADP fossil [MJ]	2,11E+01	1,29E+00	-	1,12E+00	1,95E-02	-4,79E+00
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	5,03E-03	4,16E-04	-	3,60E-04	8,52E-06	-1,21E-03
EP [kg Phosphate-Equiv.]	3,92E-04	9,56E-05	-	8,27E-05	1,31E-06	-3,35E-05
GWP [kg CO₂-Equiv.]	1,76E+00	9,26E-02	-	8,10E-02	5,73E-03	-5,09E-01
ODP [kg R11-Equiv.]	3,95E-08	1,62E-12	-	1,42E-12	1,07E-12	1,62E-08
POCP [kg Ethene-Equiv.]	8,85E-04	-1,36E-04	-	-1,17E-04	2,21E-06	-2,71E-04
Betão de agregados de argila expandida – 1kg	A1-A3	A4 (/km)	B	C2 (/km)	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	3,83E-07	4,33E-11	-	3,78E-11	5,01E-09	-
ADP fossil [MJ]	5,04E+00	1,61E-02	-	1,41E-02	1,95E-01	-
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,50E-03	5,20E-06	-	4,50E-06	8,52E-05	-
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,33E-04	1,20E-06	-	1,03E-06	1,31E-05	-
GWP [kg CO₂-Equiv.]	5,50E-01	1,16E-03	-	1,01E-03	5,73E-02	-
ODP [kg R11-Equiv.]	5,31E-11	2,03E-14	-	1,77E-14	1,07E-11	-
POCP [kg Ethene-Equiv.]	1,36E-04	-1,70E-06	-	-1,46E-06	2,21E-05	-

FONTE: GaBi Software – System and Database for Life Cycle (versão 7.3.0.40)

ANEXO B

Quadro B.1 - Informação detalhada referente às macro-componentes de lajes de chapa colaborante

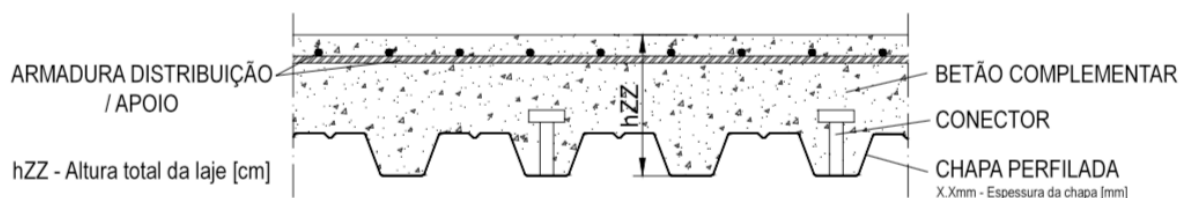
Designação da macro-componente			MC-H60 1	MC-H60 2	MC-H60 3	MC-H60 4	MC-H60 5	Obs.
Designação da solução			0.7mm - C25/30 - h10	1.0mm - C25/30 - h12	1.2mm - C25/30 - h14	1.2mm - C25/30 - h18	1.2mm - C25/30 - h24	
Residência	Vão mínimo	m	0,0	3,0	3,8	4,4	4,8	(1)
	Vão máximo	m	3,0	3,8	4,4	4,8	5,4	(1)
	Condicionante de dimensionamento	-	ULS - Corte Longitudinal	ULS - Corte Longitudinal	ULS - Corte Longitudinal	ULS - Corte Longitudinal	ULS - Corte Longitudinal	(1)
Escritórios	Vão mínimo	m	0,0	2,6	3,4	4,0	4,4	(1)
	Vão máximo	m	2,6	3,4	4,0	4,4	5,0	(1)
	Condicionante de dimensionamento	-	ULS - Corte Longitudinal	ULS - Corte Longitudinal	ULS - Corte Longitudinal	ULS - Corte Longitudinal	ULS - Corte Longitudinal	(1)
Chapa	Espessura	mm	0.7mm	1.0mm	1.2mm	1.2mm	1.2mm	-
	Massa	kg/m ²	7,95	11,32	13,66	13,66	13,66	-
	A1-A3	kg CO ₂ equiv.	2,06E+01	2,93E+01	3,54E+01	3,54E+01	3,54E+01	-
	A4	kg CO ₂ equiv.	7,37E-01	1,05E+00	1,27E+00	1,27E+00	1,27E+00	-
	C2	kg CO ₂ equiv.	6,44E-01	9,17E-01	1,11E+00	1,11E+00	1,11E+00	-
	C4	kg CO ₂ equiv.	1,37E-01	1,95E-01	2,35E-01	2,35E-01	2,35E-01	-
	D	kg CO ₂ equiv.	-8,52E+00	-1,21E+01	-1,46E+01	-1,46E+01	-1,46E+01	-
Total Parcial (sem reciclagem)	kg CO ₂ equiv.	2,21E+01	3,15E+01	3,80E+01	3,80E+01	3,80E+01	-	
Beão	Classe	-	C25/30	C25/30	C25/30	C25/30	C25/30	-
	Altura total da lâmina	cm	10	12	14	18	24	-
	Massa	kg/m ²	163,15	214,14	265,13	367,10	520,06	-
	A1-A3	kg CO ₂ equiv.	1,53E+01	2,00E+01	2,48E+01	3,44E+01	4,87E+01	-
	A4	kg CO ₂ equiv.	1,51E+01	1,99E+01	2,46E+01	3,41E+01	4,83E+01	-
	C2	kg CO ₂ equiv.	1,32E+01	1,73E+01	2,14E+01	2,97E+01	4,20E+01	-
	C4	kg CO ₂ equiv.	5,42E+00	7,11E+00	8,80E+00	1,22E+01	1,73E+01	-
	D	kg CO ₂ equiv.	-1,05E+00	-1,37E+00	-1,70E+00	-2,35E+00	-3,33E+00	-
Total Parcial (sem reciclagem)	kg CO ₂ equiv.	4,90E+01	6,43E+01	7,96E+01	1,10E+02	1,56E+02	-	
Armadura de distribuição	Armadura necessária	mm ² /m	80	80	80	80	80	(1)
	Espaçamento máximo	mm	200	240	280	350	350	(1)
	Solução adotada	-	φ6 // 200mm	φ6 // 225mm	φ6 // 275mm	φ6 // 350mm	φ6 // 350mm	(2)
	Armadura fornecida	mm ² /m	141,4	125,7	102,8	80,8	80,8	-
	Massa	kg/m ²	2,25	2,00	1,64	1,29	1,29	-
	A1-A3	kg CO ₂ equiv.	3,17E+00	2,82E+00	2,30E+00	1,81E+00	1,81E+00	-
	A4	kg CO ₂ equiv.	2,08E-01	1,85E-01	1,52E-01	1,19E-01	1,19E-01	-
	C2	kg CO ₂ equiv.	1,82E-01	1,62E-01	1,33E-01	1,04E-01	1,04E-01	-
	C4	kg CO ₂ equiv.	3,87E-02	3,44E-02	2,81E-02	2,21E-02	2,21E-02	-
D	kg CO ₂ equiv.	-1,20E-01	-1,07E-01	-8,75E-02	-6,88E-02	-6,88E-02	-	
Total Parcial (sem reciclagem)	kg CO ₂ equiv.	3,60E+00	3,20E+00	2,62E+00	2,06E+00	2,06E+00	-	
Armadura de apoio	Armadura necessária	mm ² /m	256	336	416	576	816	(1)
	Espaçamento máximo	mm	200	240	280	350	350	(1)
	Solução adotada	-	φ10 // 200mm	φ10 // 225mm	φ12 // 250mm	φ12 // 175mm	φ12 // 125mm	-
	Armadura fornecida	mm ² /m	392,7	349,1	452,4	646,3	904,8	-
	Massa	kg/m ²	0,94	0,83	1,08	1,54	2,16	-
	A1-A3	kg CO ₂ equiv.	1,32E+00	1,17E+00	1,52E+00	2,17E+00	3,04E+00	-
	A4	kg CO ₂ equiv.	8,68E-02	7,72E-02	1,00E-01	1,43E-01	2,00E-01	-
	C2	kg CO ₂ equiv.	7,59E-02	6,75E-02	8,75E-02	1,25E-01	1,75E-01	-
	C4	kg CO ₂ equiv.	1,61E-02	1,43E-02	1,86E-02	2,65E-02	3,71E-02	-
	D	kg CO ₂ equiv.	-5,02E-02	-4,46E-02	-5,78E-02	-8,25E-02	-1,16E-01	-
Total Parcial (sem reciclagem)	kg CO ₂ equiv.	1,50E+00	1,33E+00	1,73E+00	2,47E+00	3,45E+00	-	

Designação da macro-componente			MC-H60 1	MC-H60 2	MC-H60 3	MC-H60 4	MC-H60 5	Obs.
Designação da solução			0.7mm - C25/30 - h10	1.0mm - C25/30 - h12	1.2mm - C25/30 - h14	1.2mm - C25/30 - h18	1.2mm - C25/30 - h24	
Conectores	Espaçamento máximo	mm	450	450	450	450	450	(1)
	Quantidade longitudinal	unid/m	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	-
	Quantidade transversal	unid/m	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	-
	Quantidade total	unid/m ²	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	-
	Massa	kg/m ²	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	-
	A1-A3	kg CO ₂ equiv.	2,06E+00	2,06E+00	2,06E+00	2,06E+00	2,06E+00	-
	A4	kg CO ₂ equiv.	1,08E-01	1,08E-01	1,08E-01	1,08E-01	1,08E-01	-
	C2	kg CO ₂ equiv.	9,48E-02	9,48E-02	9,48E-02	9,48E-02	9,48E-02	-
	C4	kg CO ₂ equiv.	6,71E-03	6,71E-03	6,71E-03	6,71E-03	6,71E-03	-
	D	kg CO ₂ equiv.	-5,96E-01	-5,96E-01	-5,96E-01	-5,96E-01	-5,96E-01	-
Total Parcial (sem reciclagem)		kg CO ₂ equiv.	2,27E+00	2,27E+00	2,27E+00	2,27E+00	2,27E+00	-
Sistema completo	Peso próprio do sistema	kg/m ²	175,47	229,46	282,68	384,76	538,33	-
	A1-A3	kg CO ₂ equiv.	4,24E+01	5,54E+01	6,61E+01	7,58E+01	9,10E+01	-
	A4	kg CO ₂ equiv.	1,63E+01	2,13E+01	2,62E+01	3,57E+01	5,00E+01	-
	C2	kg CO ₂ equiv.	1,42E+01	1,85E+01	2,28E+01	3,11E+01	4,35E+01	-
	C4	kg CO ₂ equiv.	5,62E+00	7,36E+00	9,09E+00	1,25E+01	1,76E+01	-
	D	kg CO ₂ equiv.	-1,03E+01	-1,42E+01	-1,71E+01	-1,77E+01	-1,88E+01	-
	Total (sem reciclagem)	kg CO ₂ equiv.	7,85E+01	1,03E+02	1,24E+02	1,55E+02	2,02E+02	-

(1) Informações indicadas no catálogo do fabricante (O Feliz, 2016)

(2) Armadura nas duas direções

Valores correspondentes a 1 m² de laje



Cargas consideradas:

Revestimentos e paredes divisórias: 1,35 kN/m²

Sobrecarga residencial: 2,00 kN/m²

Sobrecarga de escritórios: 3,00 kN/m²

Distância considerada no transporte: 80 km

ANEXO C

Quadro C.1 - Informação detalhada referente às macro-componentes de lajes de vigotas e blocos de aligeiramento

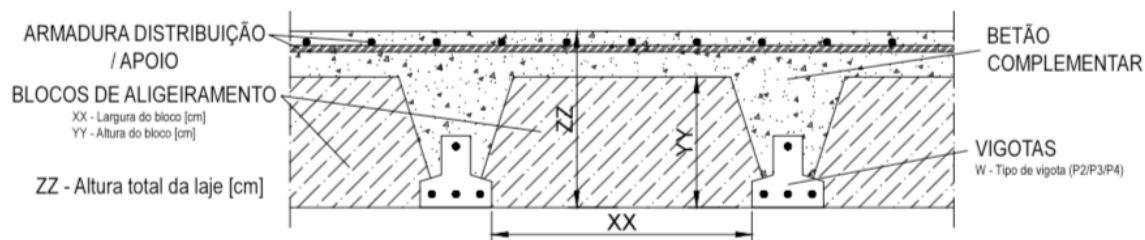
Designação da macro-componente			MC-VIG 1	MC-VIG 2	MC-VIG 3	MC-VIG 4	MC-VIG 5	Obs
Designação da solução			P3- BL30x12-15	P3- BL30x16-19	P4- BL30x20-24	P3- BL22x25-28	P4- BL22x25-31	.
Bloco de aligeiramento			BL30x12	BL30x16	BL30x20	BL22x25	BL22x25	(1)
Vigota			P3	P3	P4	P3	P4	(1)
Espessura da laje cm			15,0	19,0	24,0	28,0	31,0	(1)
Residen cial	Vão mínimo m		0,0	4,6	5,4	6,6	7,4	-
	Vão máximo m		4,6	5,4	6,6	7,4	8,2	-
	Condicionante de dimensionamento		SLS - Flecha $t=\infty$	SLS - Flecha $t=\infty$	SLS - Flecha $t=\infty$	ULS - Flexão	SLS - Flecha $t=\infty$	-
Escritó rios	Vão mínimo m		0,0	4,0	5,0	5,8	6,8	-
	Vão máximo m		4,0	5,0	5,8	6,8	7,8	-
	Condicionante de dimensionamento		ULS - Corte	ULS - Corte	ULS - Corte	ULS - Flexão	ULS - Flexão	-
ULS	Momento flector resistente - MRd kN.m/m		25,6	35,1	58,5	69,7	97,9	(1)
	Esforço transversal resistente - VRd kN/m		18,3	23,9	31,0	45,4	50,7	(1)
SLS	Momento de fendilhação - Mfctk kN.m/m		13,4	20,0	32,9	44,4	58,6	(1)
	Fator de rigidez - EI kN.m ² /m		4128	8015	16154	27113	39668	(1)
Qt. por m ²	Vigotas m		2,44	2,44	2,44	3,03	3,03	(1)
	Blocos unid.		10,60	10,60	10,60	13,18	13,18	(1)
	Betão l		41,90	53,30	78,40	94,20	124,20	(1)
Aço de pré-esforço - Vigotas	Massa kg/m ²		1,36	1,36	1,73	1,69	2,15	-
	A1-A3 kg CO ₂ equiv.		1,92E+00	1,92E+00	2,44E+00	2,38E+00	3,03E+00	-
	A4 kg CO ₂ equiv.		1,26E-01	1,26E-01	1,61E-01	1,57E-01	2,00E-01	-
	C2 kg CO ₂ equiv.		1,10E-01	1,10E-01	1,41E-01	1,37E-01	1,74E-01	-
	C4 kg CO ₂ equiv.		2,34E-02	2,34E-02	2,98E-02	2,91E-02	3,70E-02	-
	D kg CO ₂ equiv.		-7,28E-02	-7,28E-02	-9,28E-02	-9,04E-02	-1,15E-01	-
	Total Parcial (sem reciclagem) kg CO ₂ equiv.		2,18E+00	2,18E+00	2,77E+00	2,70E+00	3,44E+00	-
Betão C35/45 - Vigotas	Massa kg/m ²		45,49	45,49	45,36	56,49	56,33	-
	A1-A3 kg CO ₂ equiv.		4,97E+00	4,97E+00	4,95E+00	6,17E+00	6,15E+00	-
	A4 kg CO ₂ equiv.		4,21E+00	4,21E+00	4,20E+00	5,23E+00	5,22E+00	-
	C2 kg CO ₂ equiv.		3,69E+00	3,69E+00	3,67E+00	4,58E+00	4,56E+00	-
	C4 kg CO ₂ equiv.		1,51E+00	1,51E+00	1,51E+00	1,88E+00	1,87E+00	-
	D kg CO ₂ equiv.		-2,92E-01	-2,92E-01	-2,91E-01	-3,62E-01	-3,61E-01	-
	Total Parcial (sem reciclagem) kg CO ₂ equiv.		1,44E+01	1,44E+01	1,43E+01	1,79E+01	1,78E+01	-
Blocos de agregados de argila expandida	Massa kg/m ²		47,70	47,70	53,00	79,08	79,08	-
	A1-A3 kg CO ₂ equiv.		2,62E+01	2,62E+01	2,91E+01	4,35E+01	4,35E+01	-
	A4 kg CO ₂ equiv.		4,42E+00	4,42E+00	4,91E+00	7,33E+00	7,33E+00	-
	C2 kg CO ₂ equiv.		3,86E+00	3,86E+00	4,29E+00	6,41E+00	6,41E+00	-
	C4 kg CO ₂ equiv.		2,73E+00	2,73E+00	3,04E+00	4,53E+00	4,53E+00	-
	D kg CO ₂ equiv.		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-
	Total Parcial (sem reciclagem) kg CO ₂ equiv.		3,73E+01	3,73E+01	4,14E+01	6,18E+01	6,18E+01	-
Betão complementar C25/30	Massa kg/m ²		106,82	135,88	199,86	240,14	316,62	-
	A1-A3 kg CO ₂ equiv.		1,00E+01	1,27E+01	1,87E+01	2,25E+01	2,96E+01	-
	A4 kg CO ₂ equiv.		9,91E+00	1,26E+01	1,85E+01	2,23E+01	2,94E+01	-
	C2 kg CO ₂ equiv.		8,63E+00	1,10E+01	1,61E+01	1,94E+01	2,56E+01	-
	C4 kg CO ₂ equiv.		3,55E+00	4,51E+00	6,64E+00	7,97E+00	1,05E+01	-
	D kg CO ₂ equiv.		-6,85E-01	-8,71E-01	-1,28E+00	-1,54E+00	-2,03E+00	-
	Total Parcial (sem reciclagem) kg CO ₂ equiv.		3,21E+01	4,08E+01	6,00E+01	7,21E+01	9,51E+01	-

Designação da macro-componente			MC-VIG 1	MC-VIG 2	MC-VIG 3	MC-VIG 4	MC-VIG 5	Obs
Designação da solução			P3- BL30x12-15	P3- BL30x16-19	P4- BL30x20-24	P3- BL22x25-28	P4- BL22x25-31	.
Armadura de distribuição	Armadura necessária	mm ² /m	110	110	140	136	174	(1)
	Direcção longitudinal	-	φ6 // 250mm	φ6 // 250mm	φ6 // 200mm	φ6 // 200mm	φ8 // 275mm	-
	Direcção transversal	-	φ6 // 250mm	φ6 // 250mm	φ6 // 200mm	φ6 // 200mm	φ6 // 150mm	-
	Massa	kg/m ²	1,80	1,80	2,25	2,25	2,95	-
	A1-A3	kg CO ₂ equiv.	2,53E+00	2,53E+00	3,17E+00	3,17E+00	4,16E+00	-
	A4	kg CO ₂ equiv.	1,67E-01	1,67E-01	2,08E-01	2,08E-01	2,74E-01	-
	C2	kg CO ₂ equiv.	1,46E-01	1,46E-01	1,82E-01	1,82E-01	2,39E-01	-
	C4	kg CO ₂ equiv.	3,09E-02	3,09E-02	3,87E-02	3,87E-02	5,08E-02	-
	D	kg CO ₂ equiv.	-9,63E-02	-9,63E-02	-1,20E-01	-1,20E-01	-1,58E-01	-
Total Parcial (sem reciclagem)	kg CO ₂ equiv.	2,88E+00	2,88E+00	3,60E+00	3,60E+00	4,72E+00	-	
Armadura de apoio	Armadura necessária	mm ² /m	110	110	140	136	174	(1)
	Solução adotada	-	φ6 // 250mm	φ6 // 250mm	φ6 // 200mm	φ6 // 200mm	φ8 // 275mm	(2)
	Massa	kg/m ²	0,13	0,12	0,15	0,14	0,20	-
	A1-A3	kg CO ₂ equiv.	1,85E-01	1,76E-01	2,09E-01	2,03E-01	2,75E-01	-
	A4	kg CO ₂ equiv.	1,21E-02	1,16E-02	1,37E-02	1,34E-02	1,81E-02	-
	C2	kg CO ₂ equiv.	1,06E-02	1,01E-02	1,20E-02	1,17E-02	1,58E-02	-
	C4	kg CO ₂ equiv.	2,25E-03	2,15E-03	2,55E-03	2,48E-03	3,35E-03	-
	D	kg CO ₂ equiv.	-7,01E-03	-6,69E-03	-7,93E-03	-7,73E-03	-1,04E-02	-
	Total Parcial (sem reciclagem)	kg CO ₂ equiv.	2,10E-01	2,00E-01	2,37E-01	2,31E-01	3,12E-01	-
Sistema completo	Peso próprio do sistema	kg/m ²	203,29	232,35	302,35	379,79	457,33	-
	A1-A3	kg CO ₂ equiv.	4,58E+01	4,85E+01	5,86E+01	7,79E+01	8,67E+01	-
	A4	kg CO ₂ equiv.	1,89E+01	2,15E+01	2,80E+01	3,52E+01	4,24E+01	-
	C2	kg CO ₂ equiv.	1,64E+01	1,88E+01	2,45E+01	3,07E+01	3,70E+01	-
	C4	kg CO ₂ equiv.	7,85E+00	8,81E+00	1,13E+01	1,45E+01	1,70E+01	-
	D	kg CO ₂ equiv.	-1,15E+00	-1,34E+00	-1,79E+00	-2,12E+00	-2,67E+00	-
Total (sem reciclagem)	kg CO ₂ equiv.	8,90E+01	9,77E+01	1,22E+02	1,58E+02	1,83E+02	-	

(1) Informações indicadas no Documento de Aplicação do fabricante (Leiriviga, 2012);

(2) 1/10 do vão adicionado do comprimento de amarração (35Ø)

Valores correspondentes a 1 m² de laje



Cargas consideradas:

Revestimentos e paredes divisórias: 1,35 kN/m²

Sobrecarga residencial: 2,00 kN/m²

Sobrecarga de escritórios: 3,00 kN/m²

Distância considerada no transporte: 80 km

ANEXO D

Quadro D.1 – Informação detalhada acerca da análise de sensibilidade do parâmetro distância referente aos módulos que envolvem transporte para as macro-componentes de lajes de chapa colaborante

Distância	20 km	40 km	60 km	80 km (distância considerada)	100 km	120 km	140 km
Relação com a distância considerada	25,0%	50,0%	75,0%	-	125,0%	150,0%	175,0%
MC-H60 1							
Valor Total [GWP]	5,56E+01	6,33E+01	7,09E+01	7,85E+01	8,61E+01	9,37E+01	1,01E+02
Valor Total [%] – Relação com a distância considerada	70,9%	80,6%	90,3%	100,0%	109,7%	119,4%	129,1%
Módulos A1-A3 + C4 [GWP]	4,80E+01	4,80E+01	4,80E+01	4,80E+01	4,80E+01	4,80E+01	4,80E+01
Módulos A1-A3 + C4 [%]	86,3%	75,9%	67,8%	61,2%	55,8%	51,2%	47,4%
Módulos A4 [GWP]	4,07E+00	8,14E+00	1,22E+01	1,63E+01	2,04E+01	2,44E+01	2,85E+01
Módulos A4 [%]	7,3%	12,9%	17,2%	20,7%	23,6%	26,1%	28,1%
Módulos C2 [GWP]	3,55E+00	7,09E+00	1,06E+01	1,42E+01	1,77E+01	2,13E+01	2,48E+01
Módulos C2 [%]	6,4%	11,2%	15,0%	18,1%	20,6%	22,7%	24,5%
Módulos A4 + C2 [%]	13,7%	24,1%	32,2%	38,8%	44,2%	48,8%	52,6%
Módulos A4 + C2 [%] - Relação com a distância considerada	25,0%	50,0%	75,0%	100,0%	125,0%	150,0%	175,0%
MC-H60 2							
Valor Total [GWP]	7,27E+01	8,27E+01	9,26E+01	1,03E+02	1,13E+02	1,23E+02	1,32E+02
Valor Total [%] – Relação com a distância considerada	70,9%	80,6%	90,3%	100,0%	109,7%	119,4%	129,1%
Módulos A1-A3 + C4 [GWP]	6,28E+01	6,28E+01	6,28E+01	6,28E+01	6,28E+01	6,28E+01	6,28E+01
Módulos A1-A3 + C4 [%]	86,3%	75,9%	67,7%	61,2%	55,8%	51,2%	47,4%
Módulos A4 [GWP]	5,32E+00	1,06E+01	1,60E+01	2,13E+01	2,66E+01	3,19E+01	3,73E+01
Módulos A4 [%]	7,3%	12,9%	17,2%	20,8%	23,6%	26,1%	28,1%
Módulos C2 [GWP]	4,64E+00	9,27E+00	1,39E+01	1,85E+01	2,32E+01	2,78E+01	3,25E+01
Módulos C2 [%]	6,4%	11,2%	15,0%	18,1%	20,6%	22,7%	24,5%
Módulos A4 + C2 [%]	13,7%	24,1%	32,3%	38,8%	44,2%	48,8%	52,6%
Módulos A4 + C2 [%] - Relação com a distância considerada	25,0%	50,0%	75,0%	100,0%	125,0%	150,0%	175,0%
MC-H60 3							
Valor Total [GWP]	8,74E+01	9,97E+01	1,12E+02	1,24E+02	1,37E+02	1,49E+02	1,61E+02
Valor Total [%] – Relação com a distância considerada	70,4%	80,3%	90,1%	100,0%	109,9%	119,7%	129,6%
Módulos A1-A3 + C4 [GWP]	7,52E+01	7,52E+01	7,52E+01	7,52E+01	7,52E+01	7,52E+01	7,52E+01
Módulos A1-A3 + C4 [%]	86,0%	75,4%	67,1%	60,5%	55,1%	50,5%	46,7%
Módulos A4 [GWP]	6,56E+00	1,31E+01	1,97E+01	2,62E+01	3,28E+01	3,93E+01	4,59E+01
Módulos A4 [%]	7,5%	13,2%	17,6%	21,1%	24,0%	26,4%	28,5%
Módulos C2 [GWP]	5,71E+00	1,14E+01	1,71E+01	2,28E+01	2,86E+01	3,43E+01	4,00E+01
Módulos C2 [%]	6,5%	11,5%	15,3%	18,4%	20,9%	23,0%	24,8%
Módulos A4 + C2 [%]	14,0%	24,6%	32,9%	39,5%	44,9%	49,5%	53,3%
Módulos A4 + C2 [%] - Relação com a distância considerada	25,0%	50,0%	75,0%	100,0%	125,0%	150,0%	175,0%

Distância	20 km	40 km	60 km	80 km (distância considerada)	100 km	120 km	140 km
MC-H60 4							
Valor Total [GWP]	1,05E+02	1,22E+02	1,38E+02	1,55E+02	1,72E+02	1,88E+02	2,05E+02
Valor Total [%] – Relação com a distância considerada	67,7%	78,5%	89,2%	100,0%	110,8%	121,5%	132,3%
Módulos A1-A3 + C4 [GWP]	8,83E+01	8,83E+01	8,83E+01	8,83E+01	8,83E+01	8,83E+01	8,83E+01
Módulos A1-A3 + C4 [%]	84,1%	72,5%	63,8%	56,9%	51,4%	46,8%	43,0%
Módulos A4 [GWP]	8,93E+00	1,79E+01	2,68E+01	3,57E+01	4,46E+01	5,36E+01	6,25E+01
Módulos A4 [%]	8,5%	14,7%	19,4%	23,0%	26,0%	28,4%	30,5%
Módulos C2 [GWP]	7,77E+00	1,55E+01	2,33E+01	3,11E+01	3,89E+01	4,66E+01	5,44E+01
Módulos C2 [%]	7,4%	12,8%	16,9%	20,1%	22,6%	24,7%	26,5%
Módulos A4 + C2 [%]	15,9%	27,5%	36,2%	43,1%	48,6%	53,2%	57,0%
Módulos A4 + C2 [%] - Relação com a distância considerada	25,0%	50,0%	75,0%	100,0%	125,0%	150,0%	175,0%
MC-H60 5							
Valor Total [GWP]	1,32E+02	1,55E+02	1,79E+02	2,02E+02	2,25E+02	2,49E+02	2,72E+02
Valor Total [%] – Relação com a distância considerada	65,3%	76,9%	88,4%	100,0%	111,6%	123,1%	134,7%
Módulos A1-A3 + C4 [GWP]	1,09E+02	1,09E+02	1,09E+02	1,09E+02	1,09E+02	1,09E+02	1,09E+02
Módulos A1-A3 + C4 [%]	82,3%	69,9%	60,8%	53,7%	48,2%	43,6%	39,9%
Módulos A4 [GWP]	1,25E+01	2,50E+01	3,75E+01	5,00E+01	6,24E+01	7,49E+01	8,74E+01
Módulos A4 [%]	9,5%	16,1%	21,0%	24,7%	27,7%	30,1%	32,1%
Módulos C2 [GWP]	1,09E+01	2,18E+01	3,26E+01	4,35E+01	5,44E+01	6,53E+01	7,61E+01
Módulos C2 [%]	8,2%	14,0%	18,3%	21,5%	24,1%	26,2%	28,0%
Módulos A4 + C2 [%]	17,7%	30,1%	39,2%	46,3%	51,8%	56,4%	60,1%
Módulos A4 + C2 [%] - Relação com a distância considerada	25,0%	50,0%	75,0%	100,0%	125,0%	150,0%	175,0%

NOTA: Valores de GWP em kg CO₂ equiv / m²

Quadro D.2 – Informação detalhada acerca da análise de sensibilidade do parâmetro distância referente aos módulos que envolvem transporte para as macro-componentes de lajes de vigotas e blocos de aligeiramento

Distância	20 km	40 km	60 km	80 km (distância considerada)	100 km	120 km	140 km
Relação com a distância considerada	25,0%	50,0%	75,0%	-	125,0%	150,0%	175,0%
MC-VIG 1							
Valor Total [GWP]	6,25E+01	7,13E+01	8,02E+01	8,90E+01	9,78E+01	1,07E+02	1,15E+02
Valor Total [%] – Relação com a distância considerada	70,2%	80,2%	90,1%	100,0%	109,9%	119,8%	129,8%
Módulos A1-A3 + C4 [GWP]	5,37E+01	5,37E+01	5,37E+01	5,37E+01	5,37E+01	5,37E+01	5,37E+01
Módulos A1-A3 + C4 [%]	85,9%	75,3%	67,0%	60,3%	54,9%	50,3%	46,5%
Módulos A4 [GWP]	4,71E+00	9,43E+00	1,41E+01	1,89E+01	2,36E+01	2,83E+01	3,30E+01
Módulos A4 [%]	7,5%	13,2%	17,6%	21,2%	24,1%	26,5%	28,6%
Módulos C2 [GWP]	4,11E+00	8,22E+00	1,23E+01	1,64E+01	2,06E+01	2,47E+01	2,88E+01
Módulos C2 [%]	6,6%	11,5%	15,4%	18,5%	21,0%	23,1%	24,9%
Módulos A4 + C2 [%]	14,1%	24,7%	33,0%	39,7%	45,1%	49,7%	53,5%
Módulos A4 + C2 [%] - Relação com a distância considerada	25,0%	50,0%	75,0%	100,0%	125,0%	150,0%	175,0%

Distância	20 km	40 km	60 km	80 km (distância considerada)	100 km	120 km	140 km
MC-VIG 2							
Valor Total [GWP]	6,74E+01	7,75E+01	8,76E+01	9,77E+01	1,08E+02	1,18E+02	1,28E+02
Valor Total [%] – Relação com a distância considerada	69,0%	79,4%	89,7%	100,0%	110,3%	120,6%	131,0%
Módulos A1-A3 + C4 [GWP]	5,74E+01	5,74E+01	5,74E+01	5,74E+01	5,74E+01	5,74E+01	5,74E+01
Módulos A1-A3 + C4 [%]	85,0%	74,0%	65,5%	58,7%	53,2%	48,7%	44,8%
Módulos A4 [GWP]	5,39E+00	1,08E+01	1,62E+01	2,15E+01	2,69E+01	3,23E+01	3,77E+01
Módulos A4 [%]	8,0%	13,9%	18,4%	22,1%	25,0%	27,4%	29,5%
Módulos C2 [GWP]	4,70E+00	9,40E+00	1,41E+01	1,88E+01	2,35E+01	2,82E+01	3,29E+01
Módulos C2 [%]	7,0%	12,1%	16,1%	19,2%	21,8%	23,9%	25,7%
Módulos A4 + C2 [%]	15,0%	26,0%	34,5%	41,3%	46,8%	51,3%	55,2%
Módulos A4 + C2 [%] - Relação com a distância considerada	25,0%	50,0%	75,0%	100,0%	125,0%	150,0%	175,0%
MC-VIG 3							
Valor Total [GWP]	8,30E+01	9,61E+01	1,09E+02	1,22E+02	1,36E+02	1,49E+02	1,62E+02
Valor Total [%] – Relação com a distância considerada	67,8%	78,6%	89,3%	100,0%	110,7%	121,4%	132,2%
Módulos A1-A3 + C4 [GWP]	6,99E+01	6,99E+01	6,99E+01	6,99E+01	6,99E+01	6,99E+01	6,99E+01
Módulos A1-A3 + C4 [%]	84,2%	72,7%	64,0%	57,1%	51,6%	47,0%	43,2%
Módulos A4 [GWP]	7,01E+00	1,40E+01	2,10E+01	2,80E+01	3,51E+01	4,21E+01	4,91E+01
Módulos A4 [%]	8,4%	14,6%	19,3%	22,9%	25,9%	28,3%	30,3%
Módulos C2 [GWP]	6,11E+00	1,22E+01	1,83E+01	2,45E+01	3,06E+01	3,67E+01	4,28E+01
Módulos C2 [%]	7,4%	12,7%	16,8%	20,0%	22,6%	24,7%	26,5%
Módulos A4 + C2 [%]	15,8%	27,3%	36,0%	42,9%	48,4%	53,0%	56,8%
Módulos A4 + C2 [%] - Relação com a distância considerada	25,0%	50,0%	75,0%	100,0%	125,0%	150,0%	175,0%
MC-VIG 4							
Valor Total [GWP]	1,09E+02	1,25E+02	1,42E+02	1,58E+02	1,75E+02	1,91E+02	2,08E+02
Valor Total [%] – Relação com a distância considerada	68,8%	79,2%	89,6%	100,0%	110,4%	120,8%	131,2%
Módulos A1-A3 + C4 [GWP]	9,23E+01	9,23E+01	9,23E+01	9,23E+01	9,23E+01	9,23E+01	9,23E+01
Módulos A1-A3 + C4 [%]	84,9%	73,7%	65,1%	58,3%	52,8%	48,3%	44,5%
Módulos A4 [GWP]	8,81E+00	1,76E+01	2,64E+01	3,52E+01	4,40E+01	5,28E+01	6,16E+01
Módulos A4 [%]	8,1%	14,1%	18,6%	22,3%	25,2%	27,6%	29,7%
Módulos C2 [GWP]	7,68E+00	1,54E+01	2,30E+01	3,07E+01	3,84E+01	4,61E+01	5,38E+01
Módulos C2 [%]	7,1%	12,3%	16,2%	19,4%	22,0%	24,1%	25,9%
Módulos A4 + C2 [%]	15,1%	26,3%	34,9%	41,7%	47,2%	51,7%	55,5%
Módulos A4 + C2 [%] - Relação com a distância considerada	25,0%	50,0%	75,0%	100,0%	125,0%	150,0%	175,0%
MC-VIG 5							
Valor Total [GWP]	1,24E+02	1,43E+02	1,63E+02	1,83E+02	2,03E+02	2,23E+02	2,43E+02
Valor Total [%] – Relação com a distância considerada	67,5%	78,3%	89,2%	100,0%	110,8%	121,7%	132,5%
Módulos A1-A3 + C4 [GWP]	1,04E+02	1,04E+02	1,04E+02	1,04E+02	1,04E+02	1,04E+02	1,04E+02
Módulos A1-A3 + C4 [%]	83,9%	72,3%	63,5%	56,6%	51,1%	46,6%	42,7%
Módulos A4 [GWP]	1,06E+01	2,12E+01	3,18E+01	4,24E+01	5,30E+01	6,36E+01	7,42E+01
Módulos A4 [%]	8,6%	14,8%	19,5%	23,2%	26,1%	28,6%	30,6%
Módulos C2 [GWP]	9,25E+00	1,85E+01	2,77E+01	3,70E+01	4,62E+01	5,55E+01	6,47E+01
Módulos C2 [%]	7,5%	12,9%	17,0%	20,2%	22,8%	24,9%	26,7%
Módulos A4 + C2 [%]	16,1%	27,7%	36,5%	43,4%	48,9%	53,4%	57,3%
Módulos A4 + C2 [%] - Relação com a distância considerada	25,0%	50,0%	75,0%	100,0%	125,0%	150,0%	175,0%

NOTA: Valores de GWP em kg CO₂ equiv / m²