



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

Avaliação da Sustentabilidade de Edifícios Metálicos com base em Macro-componentes

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na
Especialidade de Construções

Autor

Pedro Miguel Tomás

Orientadores

Helena Maria dos Santos Gervásio

Paulo Fernando Antunes dos Santos

Coimbra, Julho de 2014

AGRADECIMENTOS

A realização de uma tese de mestrado, apesar de se constituir como um trabalho de cariz individual, não seria possível de se concretizar sem um conjunto de contributos de natureza variada, os quais devem de ser reconhecidos e enaltecidos. Deste modo, expresso os meus sinceros agradecimentos:

Aos professores, Helena Gervásio e Paulo Santos, meus orientadores, por toda a dedicação, disponibilidade, críticas e pelo conjunto de conhecimentos que me transmitiram ao longo da realização deste trabalho.

A todos os meus amigos, que me acompanham desde sempre, obrigado pela vossa sincera amizade e companheirismo.

À minha família e em especial ao meu pai, por todo o apoio, compreensão, dedicação e motivação demonstrados não só no decorrer da realização deste trabalho, como também ao longo do tempo durante o qual frequentei o Mestrado Integrado em Engenharia Civil na Universidade de Coimbra.

A todos, o meu sincero obrigado!

RESUMO

Hoje em dia, tendo em consideração factores tais como: a sobreexploração de recursos naturais, os impactes ambientais consequentes de um crescimento exponencial da indústria ou a criação de resíduos a um ritmo superior ao qual se consegue efectuar uma correcta expropriação ou reciclagem, o conceito de sustentabilidade tem constituído uma preocupação crescente. Como tal, é necessária a criação de medidas que respeitem conceito de sustentabilidade em toda a sua dimensão.

A indústria da construção é uma das grandes responsáveis pelo consumo de recursos naturais e energéticos. Como resposta, têm surgido nos últimos anos uma variedade de metodologias que se propõem avaliar o ciclo de vida de um edifício na sua fase de projecto, considerando as três dimensões principais que compõem o conceito de sustentabilidade: ambiental, económica e sociocultural.

Nesse sentido, e no seguimento do desenvolvimento de uma nova metodologia que pretende avaliar os impactes, ao longo do ciclo de vida de edifícios na sua fase de projecto, foi efectuado um estudo para um conjunto de sistemas de macro-componentes que integram lajes de pavimentos de edifícios metálicos. Este foi levado a cabo com objectivo de constituir uma base de dados relativa à estrutura de um edifício, permitindo efectuar uma avaliação por m² de macro-componente, do desempenho ambiental e económico do seu ciclo de vida.

ABSTRACT

Nowadays, taking into consideration factors such as overexploitation of natural resources, environmental impacts as a consequence of an exponential growth of the industry or the creation of waste at a higher rate than the one who can make a proper expropriation or recycling, the concept of sustainability has been a growing concern. Therefore, the creation of measures respecting the concept of sustainability in all its dimensions is required.

The construction industry is one of the major responsible for the consumption of energy and natural resources. Therefore, a variety of methodologies have arisen in recent years aiming to assess the life cycle of a building in its design stage, considering the three main dimensions that comprise the concept of sustainability: environmental, economic and sociocultural.

Accordingly, and following the development of a new methodology which aims to assess the impacts throughout the life cycle of the buildings at the stage of design, an assessment of a set of macro-component systems for floor slabs of steel buildings was carried out. This was conducted with the purpose of providing a database of a steel buildings, enabling an assessment per m² of macro-component, of the environmental and economical performances of their life cycle.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Enquadramento Geral | 1 |
| 1.2 Objectivos | 2 |
| 1.3 Organização da Dissertação | 2 |
| 2. RESUMO DO ESTADO DA ARTE | 4 |
| 2.1 Desenvolvimento Sustentável | 4 |
| 2.2 O Aço na Construção Sustentável..... | 4 |
| 2.3 Análise de Ciclo de Vida | 5 |
| 2.4 Enquadramento com a Metodologia Desenvolvida..... | 8 |
| 3. ANÁLISE ESTRUTURAL DE EDIFÍCIOS METÁLICOS | 12 |
| 3.1 Introdução | 12 |
| 3.2 <i>Software</i> Utilizado e Introdução de Dados..... | 14 |
| 3.3 Sistemas Construtivos Utilizados | 18 |
| 3.3.1 Vigas alveolares..... | 19 |
| 3.3.2 Vigas tipo “ <i>Slim Floor</i> ” | 22 |
| 3.3.3 Vigas em perfil I | 23 |
| 3.4 Análise de Resultados..... | 24 |
| 3.4.1 Edifícios comerciais | 24 |
| 3.4.2 Edifícios de escritórios | 26 |
| 3.4.3 Edifícios residenciais multifamiliares | 28 |
| 3.4.4 Edifícios residenciais unifamiliares..... | 30 |
| 3.5 Variação do Peso do Aço em Edifícios Multifamiliares em Função do nº de Pisos | 33 |
| 4. ANÁLISE AMBIENTAL | 35 |
| 4.1 Introdução à Metodologia Aplicada | 35 |
| 4.2 Sistemas de Macro-componentes Utilizados..... | 37 |
| 4.3 Análise de Resultados..... | 40 |
| 4.3.1 Edifícios comerciais | 42 |
| 4.3.2 Edifícios de escritórios | 44 |

| | |
|--|----|
| 4.3.3 Edifícios residenciais multifamiliares | 46 |
| 4.3.4 Edifícios residenciais unifamiliares | 47 |
| 5. ANÁLISE ECONÓMICA..... | 51 |
| 5.1 Introdução Geral | 51 |
| 5.2 Análise de Resultados..... | 51 |
| 5.2.1 Edifícios comerciais | 52 |
| 5.2.2 Edifícios de escritórios | 54 |
| 5.2.3 Edifícios residenciais | 56 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 60 |
| 6.1 Conclusões | 60 |
| 6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros | 61 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 63 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Destino dos materiais no fim do seu ciclo de vida (BCSA)..... | 7 |
| Figura 2.2 – Influência das escolhas tomadas em fase de projecto sobre os impactes e custos acumulados no ciclo de vida de uma edificação (Gervásio et al, 2013)..... | 8 |
| Figura 3.1 – Exemplos ilustrativos das tipologias de edifícios considerados. | 13 |
| Figura 3.2 – Geometria adoptada (a cor verde indica que se está perante a possibilidade de admitir vigas secundárias em ambas as direcções)..... | 15 |
| Figura 3.3 – Ilustração dos esquemas considerados para a disposição dos módulos de laje.... | 16 |
| Figura 3.4 – Apresentação esquemática das possíveis configurações da estrutura horizontal. | 16 |
| Figura 3.5 – <i>Layout</i> elucidativo da introdução de dados para a componente horizontal. | 17 |
| Figura 3.6 – Ilustrações relativas a sistemas mistos e não-mistos (BPSC, 2008). | 18 |
| Figura 3.7 – Fases constituintes da produção de vigas alveolares..... | 20 |
| Figura 3.8 – Modelos de dimensionamento de vigas alveolares. | 21 |
| Figura 3.9 – Imagem ilustrativa de sistemas IFB e SFB. | 22 |
| Figura 3.10 – Reforço da ligação de <i>Slim Floors</i> (<i>Slim Floor</i> , 2014). | 22 |
| Figura 3.11 – Figura exemplificativa de um Perfil I (IPE)..... | 24 |
| Figura 3.12 – Solução óptima para edifícios comerciais com $B = 4\text{m}$, consoante a classe de aço estrutural..... | 25 |
| Figura 3.13 – Solução óptima para edifícios comerciais com $B = 5\text{m}$, consoante a classe de aço estrutural..... | 25 |
| Figura 3.14 – Solução óptima para edifícios comerciais com $B = 6\text{m}$, consoante a classe de aço estrutural..... | 26 |
| Figura 3.15 – Solução óptima para edifícios de escritórios com $B = 4\text{m}$, consoante a classe de aço estrutural..... | 27 |
| Figura 3.16 – Solução óptima para edifícios de escritórios com $B = 5\text{m}$, consoante a classe de aço estrutural..... | 27 |
| Figura 3.17 – Solução óptima para edifícios de escritórios com $B = 6\text{m}$, consoante a classe de aço estrutural..... | 28 |
| Figura 3.18 – Solução óptima para edifícios residenciais multifamiliares com $B = 4\text{m}$, consoante a classe de aço estrutural. | 29 |
| Figura 3.19 – Solução óptima para edifícios residenciais multifamiliares com geometria $B = L$ (m), consoante a classe de aço estrutural..... | 29 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.20 – Solução óptima para edifícios residenciais unifamiliares com $B = 4\text{m}$, consoante a classe de aço estrutural. | 30 |
| Figura 3.21 – Solução óptima para edifícios residenciais unifamiliares com a geometria $B = L$ (m), consoante a classe de aço estrutural..... | 31 |
| Figura 4.1 – Conjunto macro-componentes analisadas. | 40 |
| Figura 5.1 – Solução economicamente mais favorável para edifícios comerciais, segundo as diferentes geometrias adoptadas. | 53 |
| Figura 5.2 – Solução economicamente mais favorável para edifícios de escritórios, segundo as geometrias adoptadas..... | 55 |
| Figura 5.3 – Solução economicamente mais favorável para edifícios residenciais multifamiliares, segundo as geometrias adoptadas..... | 56 |
| Figura 5.4 – Solução economicamente mais favorável para edifícios residenciais unifamiliares, segundo as geometrias adoptadas. | 57 |

ÍNDICE DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 2.1 – Organização modular do ciclo de vida de um edifício. | 10 |
| Quadro 3.1 – Dados relativos ao comprimento dos vãos L e B segundo as direcções ortogonais x e y, respectivamente. | 14 |
| Quadro 3.2 – Informação relativa à sobrecarga de utilização e nº de andares para cada classe de edifício. | 14 |
| Quadro 3.3 – Quadro resumo com a solução com melhor desempenho estrutural para cada caso analisado. | 31 |
| Quadro 3.4 – Redução percentual entre a estrutura metálica de edifícios residenciais multifamiliares de 8 e 6 pisos, respectivamente. | 33 |
| Quadro 3.5 – Redução percentual entre a estrutura metálica de edifícios residenciais multifamiliares de 6 e 4 pisos, respectivamente. | 34 |
| Quadro 4.1 – Fases de ciclo de vida incluídas na análise ambiental. | 35 |
| Quadro 4.2 – Peso, por m ² do betão que integra os sistemas de macro-componentes analisados. | 38 |
| Quadro 4.3 – Unidades referentes às categorias a avaliar. | 41 |
| Quadro 4.4 – Valores normalizados relativos a cada categoria de impacte ambiental, por m ² | 42 |
| Quadro 4.5 – Impactes, por m ² , referentes à solução estrutural óptima para edifícios comerciais com B = 4m, consoante a classe de aço. | 43 |
| Quadro 4.6 – Impactes, por m ² , referentes à solução estrutural óptima para edifícios comerciais com B = 5m, consoante a classe de aço. | 43 |
| Quadro 4.7 – Impactes, por m ² , referentes à solução estrutural óptima para edifícios comerciais com B = 6m, consoante a classe de aço. | 44 |
| Quadro 4.8 – Impactes, por m ² , referentes à solução estrutural óptima para edifícios de escritórios com B = 4m, consoante a classe de aço. | 45 |
| Quadro 4.9 – Impactes, por m ² , referentes à solução estrutural óptima para edifícios de escritórios com B = 5m, consoante a classe de aço. | 45 |
| Quadro 4.10 – Impactes, por m ² , referentes à solução estrutural óptima para edifícios de escritórios com B = 6m, consoante a classe de aço. | 46 |
| Quadro 4.11 – Impactes, por m ² , referentes à solução estrutural óptima para edifícios residências multifamiliares com B = 4m, consoante a classe de aço. | 46 |
| Quadro 4.12 – Impactes, por m ² , referentes à solução estrutural óptima para edifícios residências multifamiliares com B = L (m), consoante a classe de aço. | 47 |

| | |
|--|----|
| Quadro 4.13 – Impactes, por m ² , referentes à solução estrutural óptima para edifícios residências unifamiliares com B = 4m, consoante a classe de aço..... | 48 |
| Quadro 4.14 – Impactes, por m ² , referentes à solução estrutural óptima para edifícios residências unifamiliares com B = L (m), consoante a classe de aço..... | 48 |
| Quadro 4.15 – Resumo das soluções com melhor desempenho ambiental para cada caso analisado..... | 49 |
| Quadro 5.1 – Solução óptima para cada tipologia de edifícios segundo cada análise. | 59 |

ABREVIATURAS

- ACP – Cellular beam, composite, precast slab (Vigas alveolares, mistas com laje pré-fabricada);
- ACS – Cellular beam, composite, steel deck (Vigas alveolares, mistas com *steel deck*);
- ADP – E – Abiotic depletion potential for non fossil resources (Potencial de diminuição dos recursos abióticos não-fósseis);
- ADP – F – Abiotic depletion potential for fossil resources (Potencial de diminuição dos recursos abióticos fósseis);
- ANH – Cellular beam, non-composite, hollow core slab (Vigas alveolares, não-mistas com laje alveolar pré-fabricada);
- ANP – Cellular beam, non-composite, precast slab (Vigas alveolares, não-mistas com laje pré-fabricada);
- ANS – Cellular beam, non-composite, steel deck (Vigas alveolares, não-mistas com *steel deck*);
- AP – Acidification potential of soil and water (Potencial de acidificação do solo e da água);
- EP – Eutrophication potential (Potencial de eutrofização);
- GWP – Global Warming Potential (Potencial de aquecimento global);
- ICP – I-profile, composite, precast slab (Vigas de perfil I, mistas com laje pré-fabricada);
- ICS – I-profile, composite, steel deck (Vigas de perfil I, mistas com *steel deck*);
- IFB – Integrated Floor Beam (Vigas tipo “*Integrated Floor Beam*”);
- INH – I-profile, non-composite, hollow core slab (Vigas de perfil I, não-mistas com laje alveolar pré-fabricada);
- INP – I-profile, non-composite, precast slab (Vigas de perfil I, não-mistas com laje pré-fabricada);
- INS – I-profile, non-composite, steel deck (Vigas de perfil I, não-mistas com *steel deck*);
- ODP – Depletion potential of the stratospheric ozone layer (Potencial de depleção da camada de ozono estratosférica);
- POPC – Formation potential of tropospheric ozone (Potencial de formação de ozono troposférico);
- SFB – Slim Floor Beam (Vigas tipo “*Slim floor Beam*”);

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento Geral

A sustentabilidade de edifícios constitui uma grande preocupação para as sociedades actuais, na medida em que este foi, ao longo dos tempos, um tema secundarizado em detrimento de um desenvolvimento do sector da construção direccionado para o máximo proveito económico, negligenciando muitas das vezes, os estágios de planeamento e projecto, conduzindo a uma acumulação desmedida de impactes económicos, ambientais e socioculturais.

A fase de projecto de um edifício apresenta-se como aquela que exerce maior influência no que à performance do ciclo de vida de um edifício diz respeito, apesar das dificuldades inerentes há pouca informação disponível e há falta de experiência direccionada para o efeito. Uma análise de ciclo de vida consiste numa avaliação sistemática, que permite quantificar os possíveis impactes de um edifício ao longo do seu tempo de vida, desde a sua fase de concepção, até ao fim da sua vida útil. Ao longo deste trabalho é analisada e desenvolvida uma metodologia que assenta no uso de macro-componentes para o apoio à decisão na fase de projecto. Entende-se por macro-componente, uma determinada solução construtiva, pré-definida, que agrega todos os elementos construtivos e respectiva informação ambiental relativa ao seu ciclo de vida.

O ciclo de vida de um edifício integra uma panóplia de diferentes fases interligadas e apresentando-se de forma sequencial, indo desde a aquisição, transporte da matéria-prima e execução dos elementos construtivos, até aos módulos de demolição, reutilização ou eventual reciclagem. Assim, aplicando a metodologia em estudo, é possível planear e projectar um edifício sustentável, considerando uma multiplicidade de factores condicionantes de todo o seu ciclo de vida contribuindo para uma mudança de paradigma na indústria da construção. Seguindo estes princípios satisfazem-se as necessidades presentes com uma utilização adequada de recursos naturais, colocando um travão no seu consumo abrupto assegurando deste modo que as gerações futuras terão ao seu dispor todos os meios para suprir as suas necessidades.

1.2 Objectivos

O objectivo principal deste trabalho passa por efectuar uma análise de ciclo de vida, enquadrando os critérios estrutural, ambiental e económica, num âmbito berço-à-cova para edifícios metálicos de topologia comercial, de escritórios e residenciais unifamiliares e multifamiliares. A análise é desenvolvida, por m² com apoio do programa ACE, para um conjunto de macro-componentes destinados a integrar a estrutura de edifícios metálicos que preenchem a demanda do mercado da construção hoje em dia. Macro-componentes definem-se como soluções construtivas pré-definidas para os diversos componentes de um edifício.

Deste modo, recorrendo a esta análise multidisciplinar, pretende-se efectuar a determinação da solução que melhor concilia estas três variantes preconizando os princípios do desenvolvimento sustentável para cada tipologia de edifício consoante a sua geometria. Por conseguinte, esta informação servirá de base no apoio à decisão no que concerne à escolha das soluções construtivas a adoptar durante a fase de projecto de uma edificação, por parte de projectistas e restantes intervenientes.

1.3 Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. Pretende-se apresentar aqui um resumo sucinto do que será tratado em cada capítulo que constitui a dissertação.

O Capítulo 1 engloba a introdução, os objectivos para os quais este trabalho se direcciona e o âmbito em que o mesmo se enquadra.

No segundo capítulo, denominado “Resumo do Estado da Arte”, é feita uma revisão do estado da arte e análise de conceitos relativos ao papel que a construção metálica desempenha na construção sustentável. É ainda feito um enquadramento com a metodologia desenvolvida nesta dissertação.

A análise estrutural de edifícios metálicos, com base no *software* ACE, é desenvolvida no Capítulo 3, de forma a averiguar qual a solução mais adequada para cada tipo de edifício, e ao mesmo tempo, reunir informação para integração na análise a desenvolver.

O Capítulo 4 engloba a análise ambiental. Esta tem o propósito de perceber qual a solução que, de acordo com as diferentes categorias ambientais, regista a melhor performance de ciclo de vida consoante a tipologia e geometria do edifício.

No Capítulo 5 é efectuada uma análise económica com o objectivo de perceber como varia o preço da estrutura relativamente à sua performance ambiental e estrutural.

Por último, o Capítulo 6 agrega as considerações finais, onde são retiradas conclusões e analisados criticamente os resultados obtidos. São ainda deixadas algumas sugestões para futuros trabalhos que possam vir a ser realizados nesta área de estudo.

2. RESUMO DO ESTADO DA ARTE

2.1 Desenvolvimento Sustentável

Desenvolvimento sustentável é por definição, o desenvolvimento que concilia a satisfação das necessidades das sociedades actuais sem comprometer as necessidades das gerações futuras (World Commission on Environment and Development, 1987). Por conseguinte, considerando indicadores como o crescimento contínuo da população mundial, os impactes ambientais a que o planeta se encontra sujeito devido à industrialização e expansão de cidades e o consumo acelerado de recursos naturais, é necessária uma mudança contextual desenvolvendo e pondo em prática mecanismos que permitam sociedades mais sustentáveis. Confirmando essa tendência têm surgido, nos últimos anos, políticas sustentáveis, muitas vezes por iniciativa das grandes construtoras que revelam uma preocupação crescente com esta temática (Zuo et al, 2012). Para tal pressuposto, a sustentabilidade ao nível da construção é essencial, na medida em que, o sector da construção é um dos principais consumidores de recursos disponíveis na crosta terrestre, é responsável pelo consumo de cerca de 40% da energia consumida na União Europeia, pela produção de aproximadamente 35% da totalidade da emissão de gases com efeito de estufa e pela criação de grandes quantidades de resíduos. Neste seguimento, os níveis de desenvolvimento sustentável e por consequência a sustentabilidade podem ser aferidos recorrendo a indicadores como a emissão de gases com efeito de estufa, o consumo de água, a criação de resíduos e o consumo de energia, sendo que avaliando estes periodicamente é possível averiguar se uma determinada instituição, cidade ou país respeita protocolos e normas ambientais como por exemplo o protocolo de *Kyoto* (ISISE, 2014).

A construção sustentável é um processo holístico, contínuo e dinâmico com o propósito de criar uma plataforma de equilíbrio entre o ambiente construído e o ambiente natural reflectindo a aplicação de princípios de desenvolvimento sustentável ao longo de todo o ciclo de vida da edificação (Agenda 21, 2002).

2.2 O Aço na Construção Sustentável

O aço é constituído essencialmente por ferro e carbono, formando uma liga ferrocarbónica. Apresenta ainda na sua composição outros componentes tais como impurezas derivadas do

processo de produção e outros adicionados com o objectivo de melhorar as suas propriedades. Este pode ser produzido recorrendo a dois processos: o alto-forno e o forno eléctrico de arco, sendo que o segundo é o mais vantajoso sob o ponto de vista ambiental (Simões, 2014).

Sustentabilidade sendo um conceito que considera o enquadramento do meio construído no meio ambiente, tem no aço pelas propriedades que este possui, um forte aliado que lhe permite estabelecer essa mesma inter-relação. A construção metálica apresenta-se assim como a solução construtiva que melhor se enquadra na construção sustentável, apresentando para tal, um conjunto alargado de vantagens (ISISE, 2014):

- Baseia-se num processo de construção mais eficiente, permitindo maior rapidez na execução da obra, minimizando os prejuízos associados, e potenciando a organização dos estaleiros contribuindo de forma decisiva para que estes se tornem espaços mais limpos, seguros e com menos ruído;
- Permite a preservação do solo de fundação em que se insere devido à reduzida movimentação de terras visto que necessita de fundações mais ligeiras, diminuindo por consequência o tráfego de camiões em obra;
- A sua ductilidade possibilita uma elevada resistência sísmica, e sua elevada resistência proporciona construções mais leves com reduzida inércia térmica e áreas significativas de envidraçados;
- Propicia devido à sua grande flexibilidade e adaptabilidade uma grande variedade, tanto ao nível do desenho da estrutura, como também a instalação de equipamentos auxiliares para o bom desempenho da edificação;
- Tendo em conta as suas propriedades, o seu tempo útil de vida é consideravelmente superior quando comparado com a construção em madeira ou betão armado, permitindo a aplicação de processos de reutilização e reciclagem.

2.3 Análise de Ciclo de Vida

A consciencialização para temáticas como a gestão cuidada dos recursos naturais existentes na crusta terrestre, bem como para o controle e tratamento de resíduos provenientes da indústria da construção civil há muito que existe. Contudo, esta não era integrada nos modelos

económicos vigentes, privilegiando-se apenas o máximo proveito económico descurando qualquer projecto de desenvolvimento sustentável (BCSA, 2014).

O senso comum tende muitas vezes a efectuar uma conexão única e exclusiva entre sustentabilidade e preocupações energéticas. No entanto, o conceito de sustentabilidade constituindo-se como multidisciplinar, é por consequência bastante mais amplo. Análises de ciclo de vida revelam-se de extrema importância, permitindo avaliar o custo e os impactes ambientais dos materiais constituintes de um edifício, desde a sua recolha e tratamento enquanto matéria-prima até ao fim do seu ciclo de utilização ou preferencialmente, até à sua reutilização ou renovação (Ortiz et al, 2007).

Actualmente, a crise nos mercados globais, as crescentes pressões ambientais, as contínuas alterações climáticas e a rápida oscilação do preço do barril de petróleo, forçaram uma nova abordagem. Assim, regista-se uma tendência de afastamento de um modelo de economia baseada num consumismo abrupto e despreocupado de recursos naturais, para uma economia direccionada para a preservação do património natural, imperando a máxima “fazer mais com menos” (Paul King, 2014).

Uma análise de ciclo de vida pode considerar dois tipos de avaliações distintas: berço-portão-de-fábrica ou berço-à-cova. A primeira efectua apenas uma análise desde a extracção de matéria-prima até ao momento em que deixa a fábrica, permitindo apenas uma imagem parcial, podendo inclusive originar resultados irrealistas e inconclusivos, ao invés da segunda que incorpora todo o ciclo de vida de um elemento construtivo. Uma avaliação berço-à-cova possibilita uma análise mais realista de todos os recursos utilizados e substâncias emitidas, proporcionando tanto a tomada de medidas com base na verdadeira avaliação dos impactes ambientais de uma determinada componente ou elemento, como também a identificação por parte dos produtores e utilizadores das fases do ciclo de vida destes em que podem ser feitas alterações com vista à melhoria da sua performance ambiental (Gervásio et al, 2013).

Um dos meios genericamente utilizados e o mais relevante definido pela norma ambiental ISO 14040, tendo em vista a avaliação da performance ambiental de um elemento construtivo, é a pegada ecológica ou pegada de carbono. Esta representa a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) emitida durante todas as fases do seu ciclo de vida, desde a sua extracção enquanto recurso, transporte, produção, montagem e instalação, manutenção, desmontagem ou demolição ou reciclagem. A pegada ecológica expressa-se em toneladas (CO₂), o que por vezes pode conduzir à ideia de que o aço conduz a impactos mais significativos que outro tipo de soluções como a madeira ou o betão. Todavia tal é explicado com base na elevada relação resistência-peso pela qual o aço se caracteriza. Isto implica que o peso de aço necessário para

um determinado produto é inferior ao de qualquer outro material. Os grandes benefícios da construção metálica registam-se nos últimos estágios do ciclo de vida, com a reutilização ou reciclagem do aço (análise berço-à-cova), factores que não constam numa análise berço-portão-de-fábrica, dado que apenas considera as fases de produção e uso do produto, ignorando os possíveis impactes e vantagens que poderiam registar-se até ao fim do seu tempo de vida, favorecendo os índices respeitantes à construção em madeira e betão mas que na verdade conduzem a valores irrealistas (Tata Steel, 2014).

Um produto chega ao fim do seu ciclo de vida quando é substituído, desmontado ou desmantelado. Contudo, não deverá ser imediatamente considerado como lixo podendo obter o estatuto de produto ou de matéria-prima secundária (*downcycle*). Para obter essa condição, no final do seu ciclo de vida, um produto deverá ter uma utilização específica, mercado ou uma procura de tal matéria-prima, terá de cumprir com o preenchimento de requisitos e normas técnicas em vigor e não deverá acarretar impactes ecológicos e humanos (Silvestre et al, 2013).

A construção civil comporta fundamentalmente três grandes grupos de materiais construtivos: a madeira, o betão e o aço. A Figura 2.1 resume de maneira concisa os possíveis desenlaces que os materiais podem tomar no fim do seu ciclo de vida. Facilmente se constata que, tal como tem vindo a ser sublinhado, o aço apresenta-se como sendo um dos materiais mais ecológicos, dado que no fim do seu ciclo de vida é reciclado e reutilizado. Por outro lado, materiais como madeira e o betão têm uma taxa de reciclagem consideravelmente mais reduzida, sendo que a madeira tem como principal destino final a sua deposição em aterros, por sua vez, o betão é em grande parte reutilizado na qualidade de produto secundário.

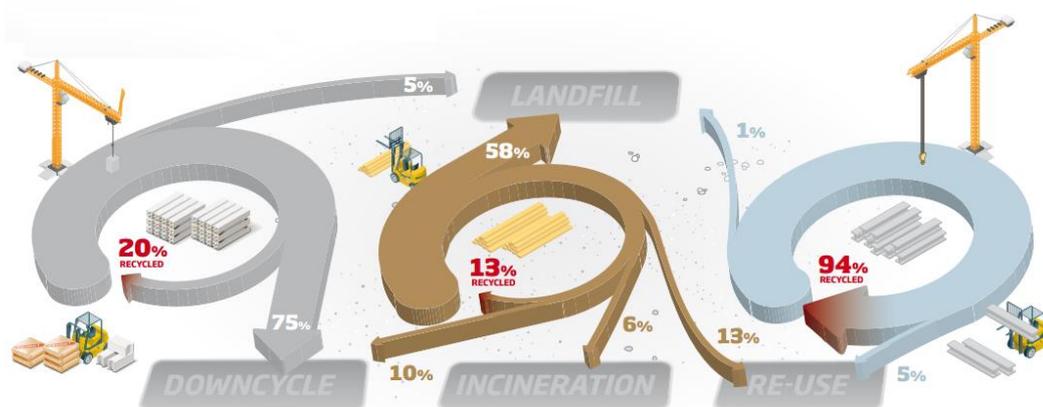


Figura 2.1 – Destino dos materiais no fim do seu ciclo de vida (BCSA).

2.4 Enquadramento com a Metodologia Desenvolvida

Este trabalho de dissertação surge no seguimento da metodologia desenvolvida no artigo de Gervásio et al, 2013, intitulado: “*A macro-component approach for the assessment of building sustainability in early stages of design*”. Desta forma, este foi estudado com especial atenção tendo-se revelado de importância fulcral, visto que, permitiu efectuar um ponto de situação e um enquadramento com a metodologia em estudo. Como tal, a informação explícita ao longo deste subcapítulo tem como principal referência bibliográfica o mesmo.

A metodologia desenvolvida permite uma nova abordagem no que concerne aos impactes do ciclo de vida de um edifício em fase de projecto. Como se sabe, é nos estágios iniciais da fase de projecto que se conseguem resultados mais satisfatórios quando se pretende influenciar o desempenho do ciclo de vida de um edifício, como facilmente se depreende por observação do gráfico presente na Figura 2.2. No entanto, nesta fase, verifica-se uma escassez de informação relativa ao edifício a construir. Pretende-se com o método desenvolvido, contrariar esta condicionante, na medida em que, pretende-se munir os projectistas de uma ferramenta que permita a estimação, com base em sistemas de macro-componentes, dos impactes inerentes à construção do edifício, permitindo desta forma, efectuar uma avaliação da sustentabilidade do edifício.

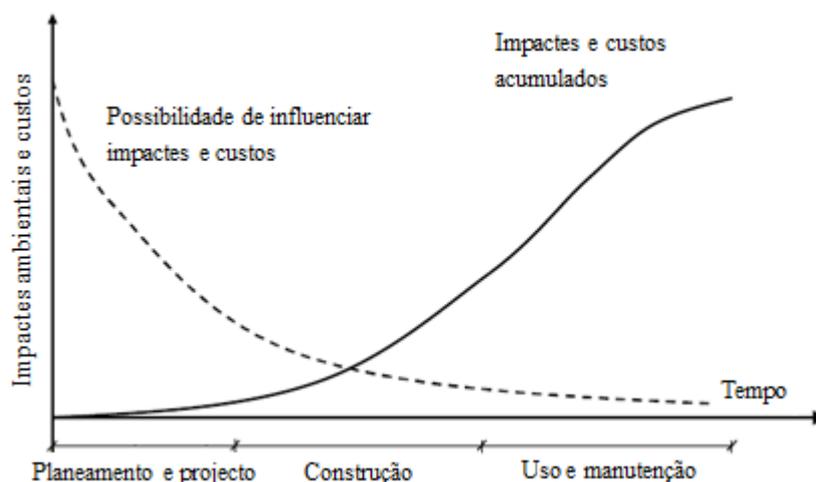


Figura 2.2 – Influência das escolhas tomadas em fase de projecto sobre os impactes e custos acumulados no ciclo de vida de uma edificação (Gervásio et al, 2013)

A fase de projecto subdivide-se em quatro partes: o programa preliminar, o programa de base, o estudo prévio e por fim o ante-projecto. A metodologia incide no programa de base e ante-projecto, caracterizando-se o primeiro por informação escassa, inconclusiva e no qual qualquer avaliação é feita pelo intermédio de suposições e estimativas, enquanto no segundo, a informação disponível é mais ampla, permitindo uma avaliação mais criteriosa. Compete ao projectista, durante estas fases, encontrar soluções para problemáticas como a localização escolhida pelo cliente, a orientação, a forma e a envolvente do edifício, o sistema estrutural a considerar e os acabamentos interiores.

Neste seguimento, poderão surgir uma multiplicidade de soluções, pelo que o principal objectivo passa por encontrar uma solução equilibrada que permita um bom desempenho ambiental mas também estrutural e económico. Assim, a metodologia integra um processo sequencial que se divide em 3 partes: introdução de dados, avaliação dos impactes ambientais e energéticos associados ao edifício e comparação entre soluções alternativas.

Ao nível da estrutura, opta-se na metodologia desenvolvida por uma estrutura metálica em aço, efectuando-se a distinção em 3 categorias:

- Categoria 1 em que tanto a estrutura como a subestrutura é em aço;
- Categoria 2 em que a cobertura e o revestimento das paredes são em aço;
- Categoria 3 em que apenas elementos secundários são em aço.

Relativamente à tipologia dos edifícios são considerados:

- Edifícios residenciais multifamiliares e unifamiliares;
- Edifícios de escritórios;
- Edifícios comerciais.

Conjugando estas 4 tipologias com as 3 categorias estruturais anteriormente referidas, obtém-se uma matriz para classificação da edificação. A zona climática em que o edifício se insere constitui outra variável a ter em conta no projecto na medida em que a posição geográfica em que se encontra condiciona os gastos energéticos a ele associados. Contudo, a questão do comportamento térmico de edifícios não será abordada na presente dissertação.

Ao longo do processo de definição das variantes que constituem a metodologia, deve ser definido o âmbito da análise, isto é, deve ser seleccionada a análise de ciclo de vida a por em prática. Deste modo, é efectuada a escolha entre:

- Análise berço-portão-de-fábrica, que compreende os módulos A1-A3 onde é apenas contabilizada a fase de produto;
- Análise berço mais reciclagem (módulo D), que agrega a fase de produto e reciclagem;
- Análise do tipo berço-à-cova que integra os módulos de A a D, na qual todas as fases de ciclo de vida de um elemento construtivo, desde a sua fase de produto até à sua reutilização e/ou reciclagem, são contabilizadas.

A divisão modular que consta nos possíveis métodos de análise segue as normas europeias EN 15804 (BS EN 15804, 2012) e EN 15978 (BS EN 15978, 2011) como se apresenta no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Organização modular do ciclo de vida de um edifício.

| Fase | Descrição | Módulo |
|--------------------------------------|-------------------------------|--------|
| Produto | Fornecimento de Matéria-prima | A1 |
| | Transporte | A2 |
| | Processo de Fabrico | A3 |
| Construção | Transporte | A4 |
| | Processo de Construção | A5 |
| Uso | Utilização | B1 |
| | Manutenção | B2 |
| | Reparação | B3 |
| | Substituição | B4 |
| | Remodelação | B5 |
| | Uso de Energia Operacional | B6 |
| | Uso de Água Operacional | B7 |
| Fim de vida | Demolição | C1 |
| | Transporte | C2 |
| | Processamento de Resíduos | C3 |
| | Eliminação | C4 |
| Reutilização/Potencial de Reciclagem | | D |

O próximo passo consiste em definir a geometria do edifício de forma a possibilitar a quantificação dos impactes ambientais e as necessidades energéticas deste, sabendo de antemão que na fase preliminar existe mais informação disponível sobre o projecto a executar.

A definição das componentes a aplicar no edifício é efectuada com base em macro-componentes. Estas podem ser divididas consoante a sua aplicabilidade, isto é, se pertencem à estrutura base, à envolvente do edifício ou aos seus interiores, sendo que foi sobre a primeira

que recaiu o estudo efectuado nesta dissertação. As macro-componentes incluem os resultados de análise de ciclo de vida, compreendendo uma análise berço-à-cova mais reciclagem, por unidade funcional, caracterizando-se esta por 1 m² de um componente com características similares de modo a resistir por um período de 50 anos. A metodologia segue a categorização recomendada pelos padrões europeus para a avaliação da performance ambiental dos edifícios.

Concluindo, sublinha-se a importância da tomada de decisões em fase de projecto, visto que é nesta fase que se consegue exercer maior influência nos impactes ambientais, no consumo energético e nos custos do ciclo de vida de uma edificação. A metodologia desenvolvida, devido ao uso de macro-componentes, permite ultrapassar as dificuldades inerentes à falta de informação que caracteriza os estágios da fase de projecto, contornando as ferramentas habitualmente complexas que surgem associadas a análises de ciclo de vida, facultando aos projectistas uma ferramenta que permite desenvolver soluções optimizadas sob o ponto de vista ambiental.

3. ANÁLISE ESTRUTURAL DE EDIFÍCIOS METÁLICOS

3.1 Introdução

A construção metálica tem vindo a ganhar, ao longo dos últimos anos, uma posição de destaque no panorama da construção civil, nas diferentes tipologias construtivas que esta agrega. Este crescendo é justificado com um conjunto de potencialidades que tornam a construção em aço uma solução vantajosa, não só no prisma do construtor e projectista mas também do cliente e utilizador. São analisados neste trabalho um conjunto diversificado de soluções que compõem a estrutura horizontal de edifícios de diferentes tipologias (Figura 3.1):

- Edifícios comerciais;
- Edifícios de escritórios;
- Edifícios residenciais unifamiliares (moradias);
- Edifícios residenciais multifamiliares.



a) Edifício de escritórios.



b) Edifício residencial multifamiliar.



c) Edifício comercial.



d) Edifício residencial unifamiliar (Arjaan de Feyter, 2005).

Figura 3.1 – Exemplos ilustrativos das tipologias de edifícios considerados.

A construção metálica assenta em elementos construtivos pré-fabricados, constituindo-se como o modelo construtivo ideal a desenvolver nos centros urbanos, onde o espaço disponível para construção é reduzido. Além disso, proporciona a uma velocidade de construção considerável, edifícios de elevado padrão, com elevada performance energética e desenvolvido sentido estético (Gervásio, et al 2013).

Os sistemas de macro-componentes abordados na análise estrutural enquadram-se nos princípios: ambiental, económico e sociocultural que a construção sustentável demanda. Sob o ponto de vista ambiental, verifica-se a utilização de materiais amigos do ambiente, de elevada eficiência e com diminuta criação de resíduos devido à taxa de reutilização e reciclagem destes. A nível económico, os sistemas considerados permitem a redução dos custos de investimento, a optimização dos custos operacionais, uma elevada flexibilidade da estrutura possibilitando aos projectistas o desenvolvimento de edifícios de elevada qualidade, funcionalidade e sentido estético, com um reduzido período de construção. No âmbito sociocultural estas soluções construtivas facultam a criação de um ambiente limpo e descontaminado criando uma coexistência saudável entre ambiente natural e o ambiente edificado (SC.i, 2014).

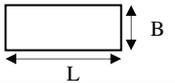
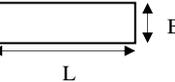
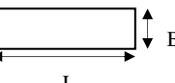
O foco de estudo nesta fase passa por analisar, para cada tipologia de edifício considerada, os diferentes sistemas disponíveis no mercado que compõem as lajes e avaliar qual a que representa a melhor solução sob o ponto de vista estrutural, tendo em consideração o peso em

kg/m² dos seus elementos constituintes. Esse processo decorreu com o apoio de uma ferramenta computacional, o programa ACE (ACE, 2011).

3.2 Software Utilizado e Introdução de Dados

O *software* ACE (ACE, 2011), consiste numa ferramenta de projecto que permite o cálculo, de forma rápida e simples, do peso por m² e do preço de uma determinada estrutura. Assenta num modelo multi-módulo definido por uma laje limitada por vigas principais e secundárias suportando-se em 4 pilares (Naessens et al, 2011). O primeiro passo na introdução de dados consistiu na definição da geometria das várias tipologias a considerar (Quadro 3.1), que compõem uma amostra com uma amplitude de situações que permita chegar a resultados conclusivos. Seguidamente, e de forma a preencher todos os *inputs* do *software*, definiu-se a informação presente no Quadro 3.2, relativa às sobrecargas a considerar (utilização e carga permanente) bem como ao número de andares para os vários edifícios que compõem o estudo.

Quadro 3.1 – Dados relativos ao comprimento dos vãos L e B segundo as direcções ortogonais x e y, respectivamente.

| Tipologia | Geometria | Vão B (m) | Vão L (m) |
|-------------|---|-----------|----------------|
| Residencial |  | B = L | 4, 5, 6 |
| | | 4 | 5, 6, 7 |
| Escritórios |  | 4 | 8, 10, 12 |
| | | 5 | 12, 15, 18, 20 |
| | | 6 | 15, 18, 20 |
| Comercial |  | 4 | 8, 10, 12 |
| | | 5 | 12, 15, 18, 20 |
| | | 6 | 15, 18, 20 |

Quadro 3.2 – Informação relativa à sobrecarga de utilização e n^o de andares para cada classe de edifício.

| Descrição do Edifício | Sobrecarga de utilização (kN/m ²) | Carga permanente (kN/m ²) | N ^o de andares |
|------------------------------|---|---------------------------------------|---------------------------|
| Residenciais unifamiliares | q = 2 | p = 0.4 | 2 |
| Residenciais multifamiliares | q = 2 | p = 0.4 | 8 |
| Escritórios | q = 3 | p = 0.4 | 6 |
| Comerciais | q = 4 | p = 0.4 | 4 |

Os dados foram inseridos no programa ACE (ACE, 2011), através da opção Multi-módulo, definindo para cada caso, a geometria da sua estrutura tipo com base nas dimensões listadas no Quadro 3.1. De forma a serem definidos pilares em todas as intercepções verificadas na estrutura, foi seleccionada a opção “*Column all*” e para gerar as vigas e os pisos foi executado o comando “*Create all modules*” (ACE-TC, 2011). Quanto às vigas secundárias foram definidas automaticamente nas duas direcções, conferindo a configuração à geometria da estrutura apresentada na Figura 3.2.

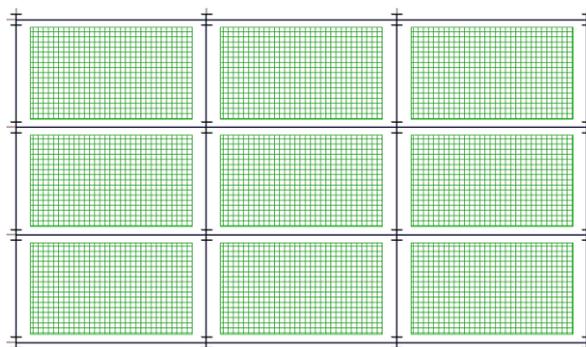


Figura 3.2 – Geometria adoptada (a cor verde indica que se está perante a possibilidade de admitir vigas secundárias em ambas as direcções).

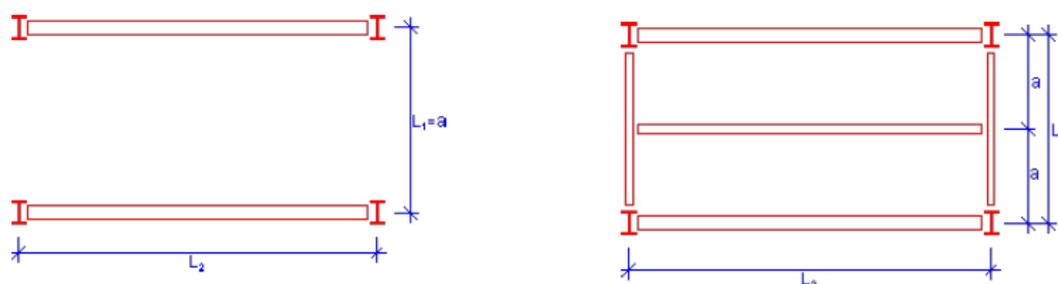
No que respeita às dimensões dos edifícios a analisar, o ACE (ACE, 2011) impõe limites para as vigas principais: limite máximo 20.0m x 20.0m (40.0m x 20.0m para vigas alveolares) e limite mínimo 3.6m x 2.4m. Também para as vigas secundárias (L2 na Figura 3.3), é imposto um limite máximo consoante a solução adoptada para o caso (ACE-TC, 2011):

- *Slim Floor's*, L2 máximo = 12.0 m;
- Vigas de perfil I, L2 máximo = 20.0 m;
- Vigas alveolares, L2 máximo = 40.0 m.

Relativamente à distância entre as vigas secundárias, abreviadamente denominada de “a” (Figura 3.3), é condicionada pela solução construtiva adoptada (ACE-TC, 2011):

- *Steel deck* 2.4 a 6,0 m;
- Laje pré-fabricada 2.4 a 10,8 m;
- Laje alveolar pré-fabricada 2,4 a 16,2 m.

A disposição destes elementos estruturais é ilustrada nas Figuras 3.3 e 3.4. A primeira tem como objectivo demonstrar quais as possíveis distribuições que cada módulo pode tomar para as vigas secundárias intermédias. No caso, podem verificar-se para as situações em estudo, uma ou nenhuma conforme se pode observar na Figura 3.3.

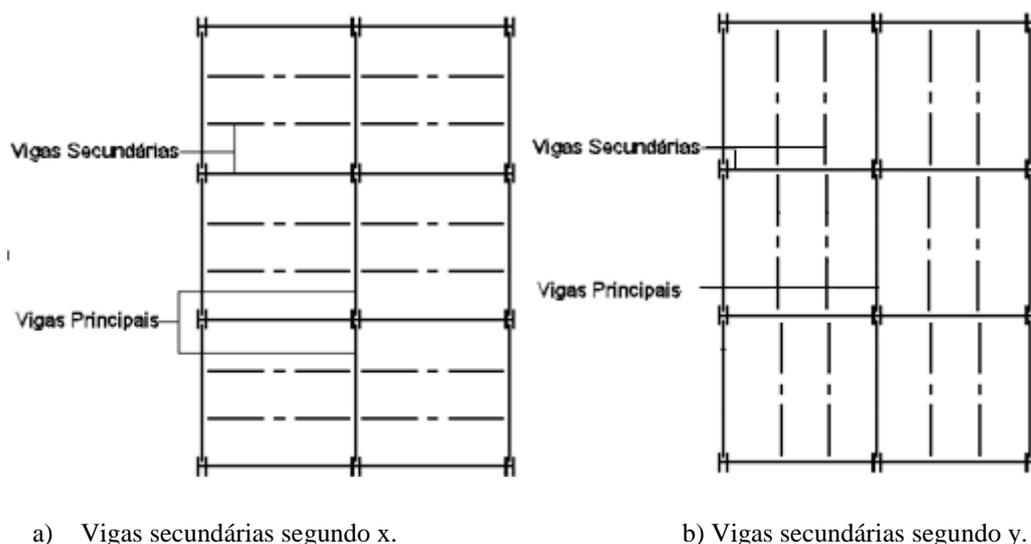


a) Sem viga secundária intermédia.

b) Com uma viga secundária intermédia.

Figura 3.3 – Ilustração dos esquemas considerados para a disposição dos módulos de laje.

Na Figura 3.4 apresentam-se esquematicamente as configurações que as vigas principais e secundárias podem tomar na constituição dos módulos da estrutura. É importante referir que quando as vigas secundárias se encontram dispostas segundo o eixo y-y (Figura 3.4.b) a resposta dinâmica do sistema quando solicitado, será menor comparativamente ao esquema à esquerda, no qual estas estão posicionadas segundo x-x (BPSC, 2008).



a) Vigas secundárias segundo x.

b) Vigas secundárias segundo y.

Figura 3.4 – Apresentação esquemática das possíveis configurações da estrutura horizontal.

O passo seguinte consistiu na introdução de dados para as componentes vertical e horizontal. Assim, começando pela componente horizontal (Figura 3.5), foi definida a tipologia das vigas e lajes, a classe de aço (abreviadamente mencionadas pelo *software* por 2, 3 e 4 para S235, S355 e S460 respectivamente) e betão a aplicar na estrutura e por fim a resistência ao fogo,

tendo contudo esta última sido desprezada no âmbito do presente trabalho. Para a definição das classes de aço e betão, o ACE (ACE, 2011) considera três classes de aço e duas de betão, originando os seguintes pares associados (ACE-TC, 2011):

- S235 e C30/37;
- S355 e C30/37;
- S460 e C40/45.

Os factores de segurança considerados para o estado limite último foram 1.35 e 1.5 para cargas permanentes e variáveis respectivamente. Para o estado limite de serviço o factor de segurança considerado foi 1.00 (ACE-TC, 2011).

Figura 3.5 – *Layout* elucidativo da introdução de dados para a componente horizontal.

O *input* para a componente vertical, divide-se essencialmente em duas fracções, uma relativa ao peso de cada piso a considerar para o dimensionamento e outra que integra fundações, fachadas, piso térreo, cobertura, colunas e contraventamentos. Os valores considerados para os parâmetros acima enunciados, foram para o caso em estudo, os valores gerais admitidos pelo programa, tendo sido apenas para o pré-dimensionamento dos pilares definido o número de pisos para a estrutura segundos os valores constantes no Quadro 3.2. (ACE-TC, 2011).

3.3 Sistemas Construtivos Utilizados

A estrutura horizontal de edifícios é composta por lajes e vigas. As vigas encontram-se ligadas a pilares que estão posicionados de modo a optimizarem o espaço efectivo, permitindo uma grande flexibilidade no seu uso e ocupação. Além de suportarem o carregamento ao qual está sujeito, este tipo de sistemas, assegura que as forças horizontais são devidamente transferidas para os pilares. Contudo, estas forças não são consideradas na análise efectuada na presente dissertação. Do mesmo modo, estes sistemas, permitem a integração de instalações técnicas, que poderão estar integradas no sistema de piso ou sob este (BPSC, 2008).

A maioria das soluções existentes no mercado destinadas à construção metálica são sistemas mistos. Entende-se por mista a solução constituída por mais do que um material/elemento. Diferem dos sistemas não-mistos pela introdução de conectores soldados na ligação entre o banzo superior das vigas metálicas e a laje resultando assim num sistema que se comporta como um conjunto, conferindo-lhe maior rigidez (Figura 3.6.a). Em sistemas não-mistos (Figura 3.6.b), cada elemento comporta-se de modo independente repercutindo-se em efeitos desfavoráveis como o deslizamento da laje e menor resistência à flexão (BPSC, 2008).

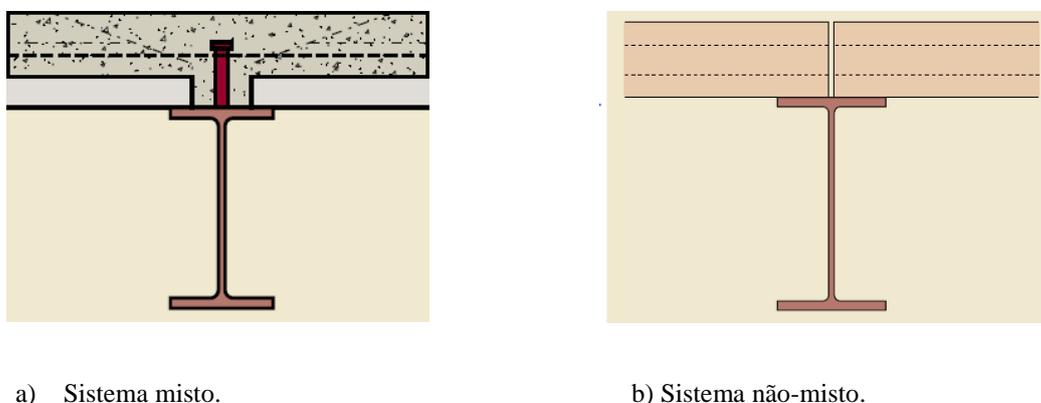


Figura 3.6 – Ilustrações relativas a sistemas mistos e não-mistos (BPSC, 2008).

Ao longo da realização desta dissertação, foi analisado um conjunto de sistemas que conjugam vigas e lajes de diferentes características que, como se encontra em cima referido, poderão ser de natureza mista ou não mista.

Neste seguimento, os modelos estruturais são denominados da seguinte forma:

- IFB – Vigas tipo “*Integrated Floor Beam*”;

- SFB – Vigas tipo “*Slim Floor Beam*”;
- ICS – Viga de perfil I, mista com *steel deck*;
- ICP – Viga de perfil I, mista com laje pré-fabricada;
- INS – Viga de perfil I, não-mista com *steel deck*;
- INP – Viga de perfil I, não mista com laje pré-fabricada;
- INH – Viga de perfil I, não mista com laje alveolar pré-fabricada;
- ACS – Viga alveolar, mista com *steel deck*;
- ACP – Viga alveolar, mista com laje pré-fabricada;
- ANS – Viga alveolar, não-mista com *steel deck*;
- ANP – Viga alveolar, não-mista com laje pré-fabricada;
- ANH – Viga alveolar, não-mista com laje alveolar pré-fabricada.

Por fim, depois de abordadas todas as variáveis integrantes da terminologia utilizada pelo programa ACE (ACE, 2011), demonstra-se pormenorizadamente e a título exemplificativo o significado dos diferentes códigos:

- 2 IFB3Y: 2 – Uma viga secundária intermediária (Figura 3.3.b);
IFB – *Integrated Floor Beam*;
3 – Aço S355;
Y – Vigas secundárias orientadas segundo Y (Figura 3.4.b).
- 1 ANH2X: 1- Sem vigas secundárias intermediárias (Figura 3.3.a);
ANH – Vigas alveolares, não-mistas com laje alveolar pré-fabricada;
2 – Aço S235;
X – Vigas secundárias orientadas segundo X (Figura 3.4.a).

3.3.1 Vigas alveolares

As vigas alveolares são uma solução que tem ganho um relevo considerável no âmbito da construção e mais concretamente na construção metálica e mista. As vigas alveolares enquanto componente estrutural podem suportar directamente o peso da laje, actuando como vigas secundárias, ou por outro lado, suportar as vigas secundárias tomando a função de vigas principais (BPSC, 2008).

A produção de vigas alveolares tem início em secções laminadas a quente. Recorrendo a uma chama de corte, a secção é dividida obtendo-se duas secções em T que por sua vez são soldadas. Este rearranjo conduz a um aumento da altura da secção e da razão entre o seu

momento de inércia e o seu peso. O processo de corte é conduzido e controlado digitalmente, permitindo uma otimização de recursos e um encaixe perfeito entre as duas secções em T, como é observável na Figura 3.7. No fim de montado, cada elemento sofre um processo de controlo de qualidade minucioso de acordo com as especificações do projecto ou do cliente, de modo a cumprir com as exigências funcionais e estruturais ao qual se destina (ACB, 2014).

Existem também vigas alveolares assimétricas, com origem na soldagem de duas secções T provenientes de secções de diferentes classes sendo particularmente adequadas para soluções mistas (ACB, 2014).

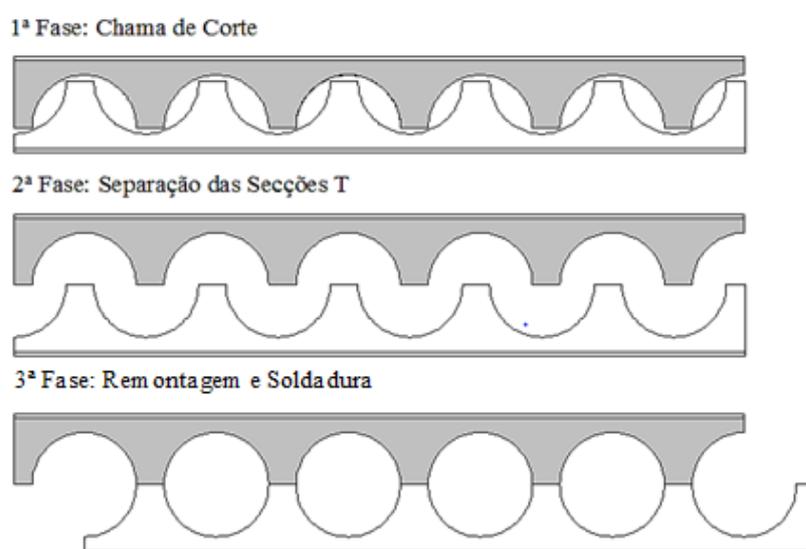


Figura 3.7 – Fases constituintes da produção de vigas alveolares.

As vigas alveolares apresentam um conjunto de vantagens que lhes têm permitido ganhar o seu espaço num mercado em crescimento e extremamente competitivo, Assim (ACB, 2014):

- De modo a corresponder às necessidades actuais, os edifícios necessitam de otimizar o seu espaço, o que recorrendo a vigas alveolares é possível, visto que, equipamentos destinados a instalações técnicas (tubagens, ar condicionado, aquecimento, etc.) podem ser instalados nas aberturas deste tipo de viga;
- Este tipo de soluções permite o reforço, reutilização e modernização de edifícios antigos, preservando o património e herança arquitectónica de uma edificação;

- Possibilitam um processo de drenagem mais eficaz, uma melhoria estética da estrutura, melhorias na circulação do ar e a evacuação mais eficiente de fumos e demais impurezas, sendo por exemplo, pertinente o seu uso em parques de estacionamento;
- Este tipo de solução é bastante utilizado em estruturas *offshore*, visto que, combina força e resistência com uma estrutura leve, permitindo a passagem de tubagens e condutas através dos seus alvéolos.

Existem dois modelos de dimensionamento para as vigas alveolares como se pode observar pela Figura 3.8, um em que se privilegia a otimização da razão entre altura e peso, sendo usado essencialmente para coberturas, passadiços e madres de grande vão, ao passo que no segundo se pretende a otimização do quociente entre o carregamento e o peso, apresentado como classes de aço mais usadas a S355 e S460, destinando-se a pilares, estruturas *offshore*, parques de estacionamento e pavimentos. Neste seguimento, para este trabalho, este tipo de viga não é considerado aquando do uso de aço de classe S235 (ACB, 2014).

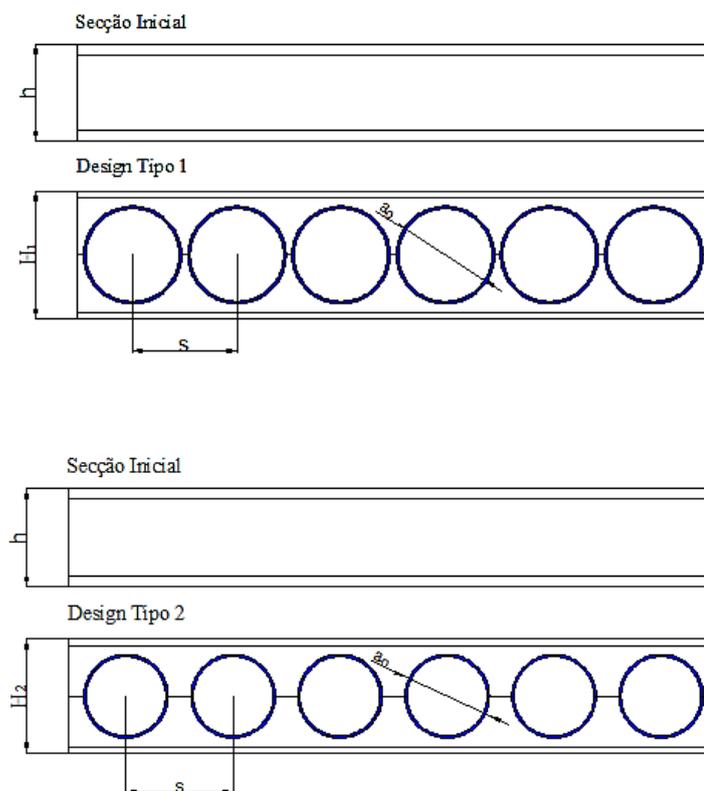
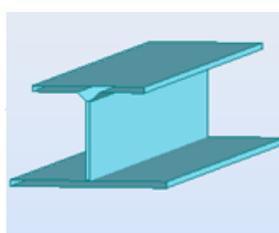


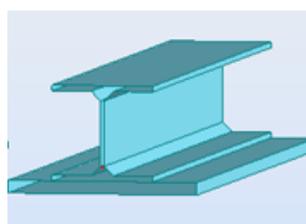
Figura 3.8 – Modelos de dimensionamento de vigas alveolares.

3.3.2 Vigas tipo “*Slim Floor*”

As vigas tipo “*Slim Floor*” consistem num sistema estrutural que concilia rapidez, economia e inovação. São pisos de espessura reduzida, que conjugam vigas assimétricas e lajes pré-fabricadas. Estes dividem-se em IFB (*Integrated Floor Beams*) e SFB (*Slim Floor Beams*), o primeiro (Figura 3.9.a) tem origem numa metade de um perfil HE ou IPE soldado a uma chapa, por sua vez o segundo (Figura 3.9.b) tem origem num perfil HE ou UC ao qual é soldada uma chapa no seu banzo inferior, devendo esta, estender-se um mínimo 100mm para cada lado deste de modo a suportar eficazmente a laje em betão pré-fabricada. (*Slim Floor*, 2014).



a) IFB.



b) SFB.

Figura 3.9 – Imagem ilustrativa de sistemas IFB e SFB.

De forma a melhorar a rigidez e a resistência do sistema, deverá ser colocada uma camada de pelo menos 5 cm de betão, contribuindo também para o aumento da resistência ao fogo e aos efeitos provocados pelas forças horizontais. Adicionalmente ou em alternativa poderá ser efectuado um reforço, procedendo à ligação entre as lajes pré-fabricadas, colocado sobre a viga como se encontra ilustrado na Figura 3.10. De um modo geral, os sistemas IFB e SFB consideram-se como não-mistos, no entanto também poderão verificar-se sistemas mistos quando se recorre à soldadura de conectores.

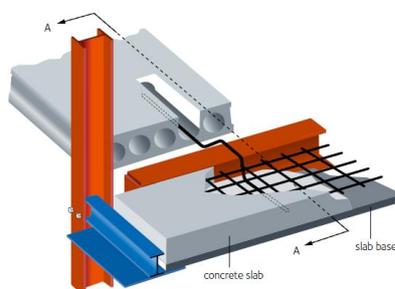


Figura 3.10 – Reforço da ligação de *Slim Floors* (*Slim Floor*, 2014).

Os *Slim Floors* possuem um conjunto alargado de vantagens que fazem deles uma solução atractiva (*Slim Floor*, 2014):

- Geralmente as vigas dispensam protecção contra incêndio na medida em que apresentam resistência durante 60 minutos;
- A sua espessura reduzida, apresentando uma redução de 25-40 cm por piso, permite consoante o projecto, integrar mais um andar. Por conseguinte diminuiu-se o peso da estrutura do edifício ao mesmo tempo que é possibilitada uma grande liberdade no que concerne ao design das fachadas;
- Possibilitam a integração de instalações técnicas na sua face inferior (condutas, tectos falsos, instalações eléctricas), podendo também estar expostas desde que sejam tomadas as devidas preocupações estéticas aquando do seu processo de pré-fabricação;
- Facultam a criação de espaços amplos de trabalho e circulação devido ao reduzido número de colunas que exige;
- Permitem movimento vertical em situações que tenham sido tomadas precauções necessárias para tal durante o seu processo de pré-fabrico, podendo também as lajes estarem preparadas para a introdução posterior de cavidades;
- Constituem-se como um sistema de construção “seca”, com um nível elevado de pré-fabricação que possibilita elevada produtividade permitindo um processo de construção acelerado;
- Caracterizam-se por ser constituídos por uma estrutura leve e de preço competitivo, derivado ao baixo teor em aço por m².

3.3.3 Vigas em perfil I

As vigas em perfil I (Figura 3.11) são uma solução amplamente conhecida, podendo também ser denominadas de vigas em H ou duplo T. Permitem uma grande diversidade de secções podendo ser utilizadas para efeitos estruturais tanto para vigas como para pilares, actuando como um elemento independente ou, por outro lado, integrando um sistema misto.

No desenvolvimento deste trabalho foram consideradas as várias configurações disponíveis no *software* ACE (ACE, 2011). Assim, de entre os perfis em I, foram consideradas as seguintes quatro soluções distintas: IPE, HEA, HEB e HEM.

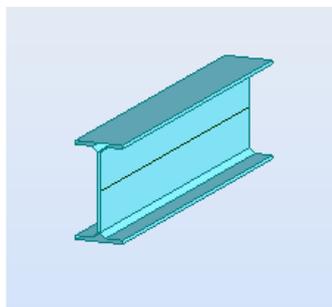


Figura 3.11 – Figura exemplificativa de um Perfil I (IPE).

3.4 Análise de Resultados

Após a introdução da informação admitida para estudo no programa ACE (ACE, 2011) presente nos Quadros 3.1 e 3.2, foram gerados os resultados para cada caso admitido. Com base nestes, foi reunida a informação relativa ao peso do aço/m² e organizada com base em variáveis como a tipologia do edifício, o comprimento do vão, a classe de aço e o tipo de solução adoptada. Posteriormente, de forma a permitir uma análise objectiva, esta informação foi compilada em gráficos de forma a aferir qual a solução que se constitui como a mais vantajosa para cada caso de estudo em específico, segundo os factores condicionantes acima descritos tal como se apresenta em seguida para cada geometria e tipo de utilização.

3.4.1 Edifícios comerciais

Para edifícios comerciais, foi admitida uma altura de 4 pisos, segundo as seguintes geometrias:

- B = 4m; L = 8, 10 e 12m:

Para a disposição geométrica em análise neste ponto, a solução óptima para todas as classes de aço estrutural consideradas neste estudo (S235, S355 e S460) passa pela utilização de IFB, verificando-se uma redução ligeira do peso do esqueleto da estrutura do edifício à medida que se regista um aumento da classe de aço estrutural (Figura 3.12).

Concluiu-se que para o objectivo em estudo, para a geometria em análise, a melhor solução passa pela utilização de S460 com uma viga secundária intermédia.

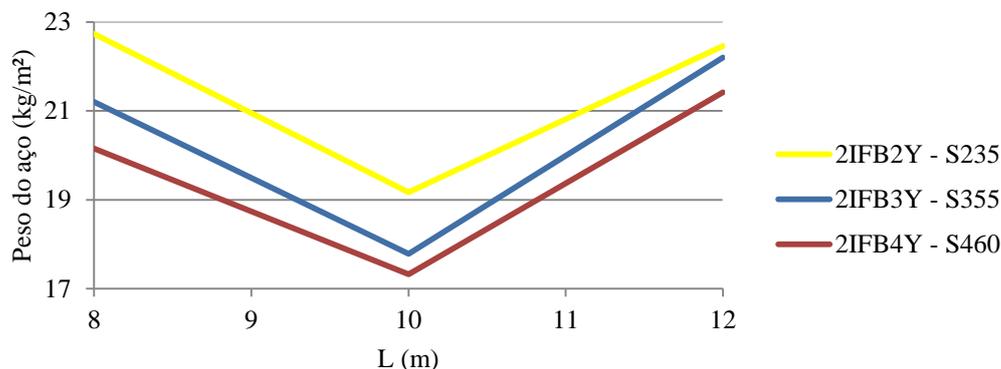


Figura 3.12 – Solução óptima para edifícios comerciais com $B = 4\text{m}$, consoante a classe de aço estrutural.

- $B = 5\text{m}$; $L = 12, 15, 18$ e 20m :

A melhor solução para edifícios comerciais com esta geometria consiste, para o caso de a estrutura ser constituída por aço S235 na utilização de sistemas ICP, registando-se uma tendência para que a relação peso/ m^2 do aço tenda a aumentar com o aumento do vão. Já para situações em que a opção passe pelo uso de aços S355 ou S460, a solução mais vantajosa consiste na utilização de ACP. Dado que as vigas alveolares são mais leves comparativamente às vigas de perfil I verifica-se uma diminuição natural do peso da estrutura aquando do uso destas. Assim, a solução com melhor desempenho estrutural para esta situação passa então pelo uso de 1ACP4X (S460) como se pode observar na Figura 3.13.

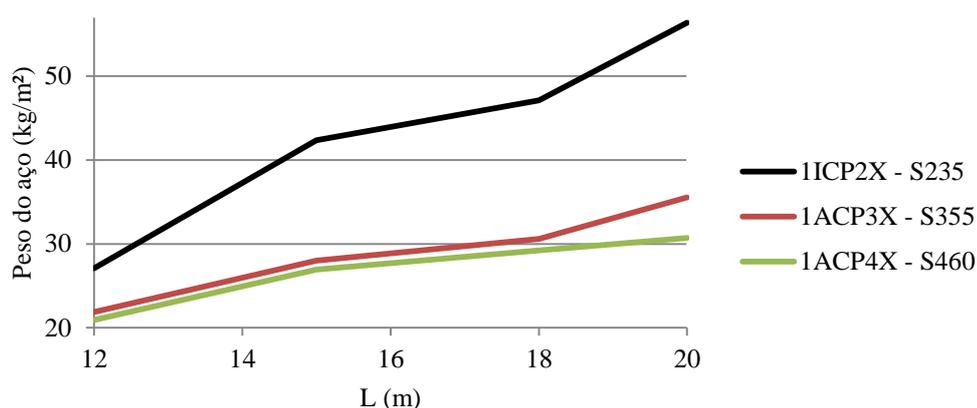


Figura 3.13 – Solução óptima para edifícios comerciais com $B = 5\text{m}$, consoante a classe de aço estrutural.

- $B = 6\text{m}$; $L = 15, 18 \text{ e } 20\text{m}$:

O ACE (ACE, 2011) não considera, para a geometria em estudo neste caso, o uso de sistemas *Slim Floor* devido às dimensões admitidas para o edifício. À semelhança do verificado no ponto anterior, também neste, a solução mais conveniente passa por ICP e ACP para quando se recorrer à utilização de componentes da estrutura de aço S235 e S355 ou S460, respectivamente.

Regista-se a mesma tendência para o peso aumentar com o aumento do vão L , constituindo-se os sistemas de macro-componentes com aço S460 como as estruturas mais eficientes sob o ponto de vista estrutural, como se pode observar pela Figura 3.14.

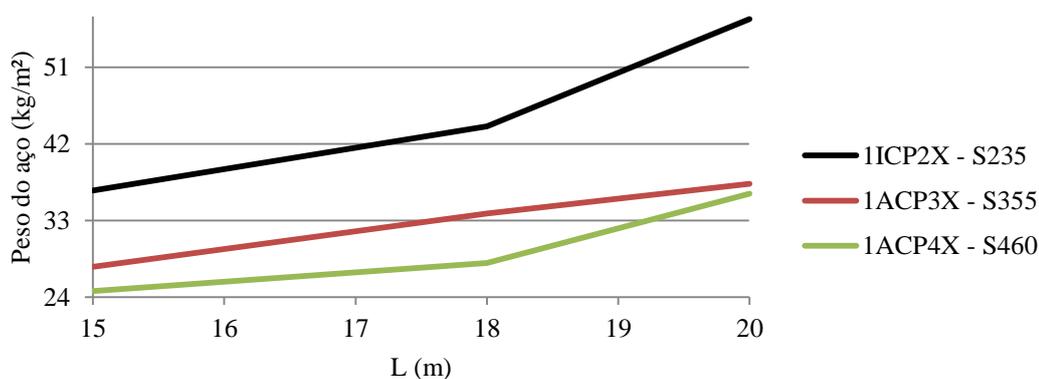


Figura 3.14 – Solução óptima para edifícios comerciais com $B = 6\text{m}$, consoante a classe de aço estrutural.

3.4.2 Edifícios de escritórios

Para a tipologia em estudo neste subcapítulo, os edifícios foram admitidos com uma altura de 6 pisos segundo as seguintes geometrias:

- $B = 4\text{m}$; $L = 8, 10 \text{ e } 12\text{m}$:

Os edifícios de escritórios apresentam sob o ponto de vista estrutural, um comportamento semelhante aos edifícios comerciais, visto que, a geometria adoptada é coincidente verificando-se apenas variação no número de pisos e ao nível da sobrecarga de utilização. Analisando os resultados obtidos na Figura 3.15, constata-se que a solução passa pela utilização de sistemas IFB para as diferentes classes de aço possíveis de adoptar para a estrutura da edificação. Por fim, confirma-se a tendência para que a solução óptima passe pela escolha da classe de aço estrutural S460.

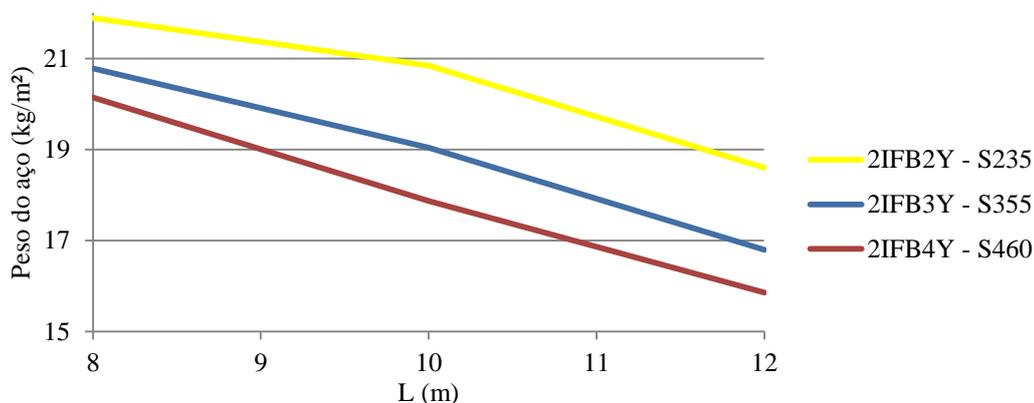


Figura 3.15 – Solução óptima para edifícios de escritórios com $B = 4\text{m}$, consoante a classe de aço estrutural.

- $B = 5\text{m}$; $L = 12, 15, 18$ e 20m :

No mesmo seguimento, a solução mais vantajosa passa pela utilização, para todas as classes de aço estrutural que surgem como opção, de sistemas de piso do tipo IFB. Verifica-se do mesmo modo, a disposição para a diminuição do peso da estrutura com o aumento do vão segundo a direcção X. Ao invés, verifica-se para a globalidade das estruturas respeitantes a edifícios comerciais e de escritórios que o peso do aço tende a aumentar com o aumento de B , ou seja, o vão segundo Y (Figura 3.16).

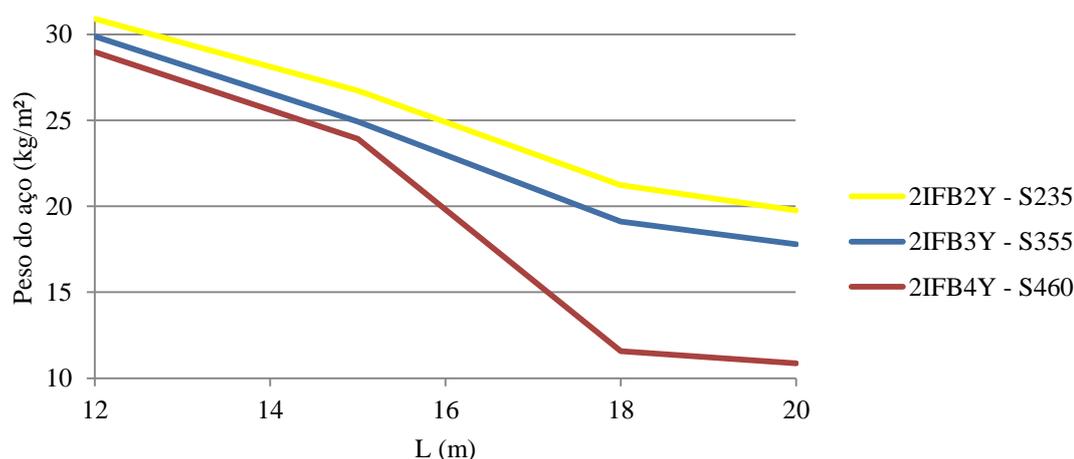


Figura 3.16 – Solução óptima para edifícios de escritórios com $B = 5\text{m}$, consoante a classe de aço estrutural.

- B = 6m; L = 15, 18 e 20m:

Da mesma forma do que foi aferido para edifícios comerciais com as mesmas dimensões, verifica-se que para S235, classe para a qual não se recorre ao uso de vigas alveolares, a solução mais benéfica consiste em ICP, tal como se pode aferir por observação da Figura 3.17. Optando-se por uma estrutura com aço S355 ou S460, classes para as quais o *software* ACE (ACE, 2011) já integra o uso de vigas alveolares, o sistema de macro-componentes que permite obter uma estrutura mais leve é o ANH, sendo que 1ANH4X (S460) se assume como o mais eficiente estruturalmente.

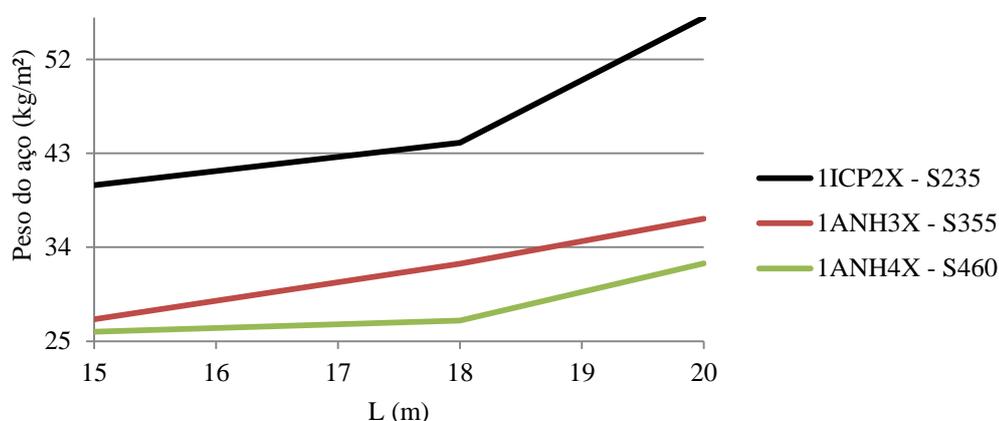


Figura 3.17 – Solução óptima para edifícios de escritórios com B = 6m, consoante a classe de aço estrutural.

3.4.3 Edifícios residenciais multifamiliares

A altura admitida para edifícios residenciais multifamiliares foi de 8 pisos, segundo as seguintes geometrias:

- B = 4m; L = 5, 6 e 7m:

Os resultados obtidos para edifícios multifamiliares apresentam variações relativamente aos resultados obtidos para as tipologias anteriormente abordadas. Tratando-se de edifícios com uma estrutura em aço S235, a solução óptima consiste em ICS. Por seu lado, quando se trata de executar a estrutura com recurso à utilização de aço S355 ou S460, para o primeiro o sistema mais vantajoso é composto por ANH. No que concerne ao segundo, a melhor opção traduz-se, do mesmo modo que para aço S235, pela aplicação de ICS, verificando-se que esta possui a estrutura mais leve, tal como se verifica na Figura 3.18.

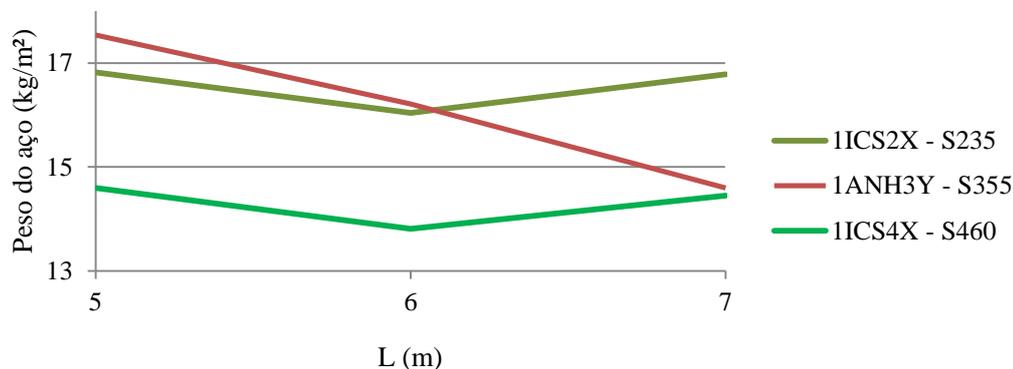


Figura 3.18 – Solução óptima para edifícios residenciais multifamiliares com $B = 4\text{m}$, consoante a classe de aço estrutural.

- $B = L$:

São considerados para este caso de estudo, estruturas com um comprimento de vão L de 4, 5 e 6m. Tanto para S235 como S460 o melhor sistema a por em prática é constituído por ICP, registando-se um decréscimo no peso da estrutura do primeiro para o segundo. Optando por aço S355 a opção mais eficaz passa por ANH, constituindo-se, de entre as 3 opções possíveis, como a que possibilita uma estrutura metálica com melhor desempenho estrutural (Figura 3.19).

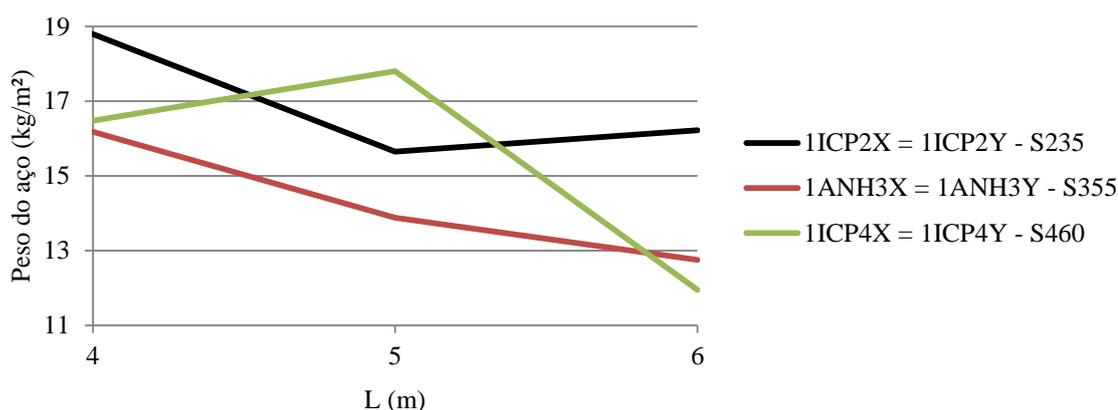


Figura 3.19 – Solução óptima para edifícios residenciais multifamiliares com geometria $B = L$ (m), consoante a classe de aço estrutural.

3.4.4 Edifícios residenciais unifamiliares

Para edifícios residenciais unifamiliares (moradias), foi admitida uma altura de 2 pisos segundo as seguintes geometrias:

- $B = 4\text{m}$; $L = 5, 6 \text{ e } 7\text{m}$:

Para os comprimentos de vão em análise neste ponto, é possível constatar que os sistemas mais eficazes correspondem exactamente aos mesmos que foram utilizados para edifícios habitacionais multifamiliares com igual geometria. Por outro lado, da mesma forma que para $B = L$, também para esta geometria o peso da estrutura tende a apresentar uma diminuição quando comparado com edificações do tipo multifamiliar, embora a mesma seja mais ténue para este caso específico.

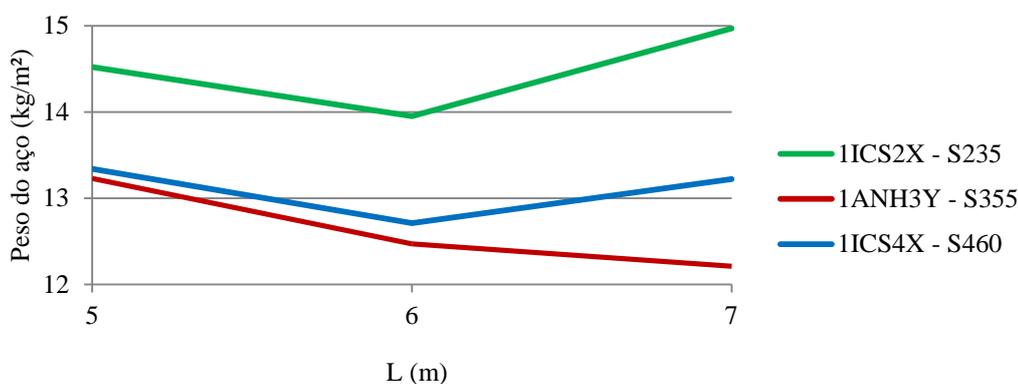


Figura 3.20 – Solução óptima para edifícios residenciais unifamiliares com $B = 4\text{m}$, consoante a classe de aço estrutural.

- $B = L$:

Os sistemas mais eficazes no que concerne a edifícios residenciais unifamiliares, para uma geometria com $B = L$, são exactamente os mesmos que foram admitidos para edifícios residenciais multifamiliares com o mesmo arranjo geométrico.

Deste modo, ANH constitui-se como a solução com melhor performance estrutural (Figura 3.21). Contudo, é de se assinalar uma redução acentuada no peso da estrutura, variação esta que vem de encontro ao esperado visto que correspondem a edifícios de 2 andares (moradias) e 8 andares, respectivamente.

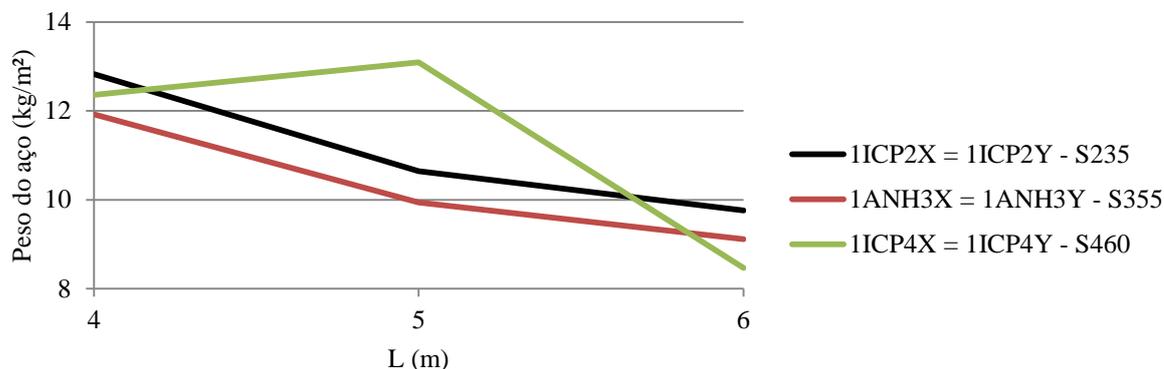


Figura 3.21 – Solução óptima para edifícios residenciais unifamiliares com a geometria $B = L$ (m), consoante a classe de aço estrutural.

No seguinte quadro, encontram-se agrupadas as soluções mais vantajosas estruturalmente, para cada tipologia de edifício estudada, consoante as variáveis condicionantes às quais estas se encontram sujeitas.

Quadro 3.3 – Quadro resumo com a solução com melhor desempenho estrutural para cada caso analisado.

| Tipologia | Sistema Mais Favorável Estruturalmente* | | | | | |
|---------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| | Classe | ICP | ICS | ACP | ANH | IFB |
| Edifícios Comerciais | S235 | | | | | ✓ |
| | S355 | | | | | ✓ |
| | S460 | | | | | ✓ |
| B = 4; L = 8, 10, 12 | S235 | | | | | |
| | S355 | | | | | |
| | S460 | | | | | |
| B = 5; L = 12, 15, 18, 20 | S235 | ✓ | | | | |
| | S355 | | | ✓ | | |
| | S460 | | | ✓ | | |
| B = 6; L = 15, 18, 20 | S235 | ✓ | | | | |
| | S355 | | | ✓ | | |
| | S460 | | | ✓ | | |
| Edifícios de Escritórios | S235 | | | | | ✓ |
| | S355 | | | | | ✓ |
| | S460 | | | | | ✓ |
| B = 4; L = 8, 10, 12 | S235 | | | | | ✓ |
| | S355 | | | | | ✓ |
| | S460 | | | | | ✓ |
| B = 5; L = 12, 15, 18, 20 | S235 | | | | | ✓ |
| | S355 | | | | | ✓ |
| | S460 | | | | | ✓ |
| B = 6; L = 15, 18, 20 | S235 | ✓ | | | | |
| | S355 | | | | ✓ | |
| | S460 | | | | ✓ | |

| Tipologia | Sistema Mais Favorável Estruturalmente* | | | | | |
|--|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| Edifícios Residenciais Multifamiliares | Classe | ICP | ICS | ACP | ANH | IFB |
| B = 4; L = 5, 6, 7 | S235 | | ✓ | | | |
| | S355 | | | | ✓ | |
| | S460 | | ✓ | | | |
| B = L = 4, 5, 6 | S235 | ✓ | | | | |
| | S355 | | | | ✓ | |
| | S460 | ✓ | | | | |
| Edifícios Residenciais Unifamiliares | Classe | ICP | ICS | ACP | ANH | IFB |
| B = 4; L = 5, 6, 7 | S235 | | ✓ | | | |
| | S355 | | | | ✓ | |
| | S460 | | ✓ | | | |
| B = L = 4, 5, 6 | S235 | ✓ | | | | |
| | S355 | | | | ✓ | |
| | S460 | ✓ | | | | |

*com menor peso de aço por m².

É pertinente, no fim de analisadas todas as situações, retirar conclusões que se aplicam de uma forma geral ao estudo efectuado neste capítulo. Neste seguimento é legítimo afirmar:

- A classe de aço estrutural S460 é aquela que apresenta valores mais baixos no peso/m², tal com seria expectável, na medida em que para resistir aos mesmos esforços, fazendo uso de um aço mais resistente é necessária uma menor quantidade de material;
- Existe a tendência, de um modo geral, para nas soluções estruturais analisadas haver uma redução no peso da estrutura metálica por m², à medida que se aumenta o comprimento do vão (L). Tal se deve ao facto de este tipo de soluções estarem optimizadas para vãos com maior extensão. Esta variação é mais pronunciada para lajes do tipo IFB, como se pode aferir por observação das Figuras 3.12, 3.15 e 3.16;
- As excepções à regra verificam-se para os casos em análise nas Figuras 3.13, 3.14 e 3.17, relativos a sistemas que se observa um acréscimo do peso da estrutura nos edifícios em que sua geometria sofra um aumento segundo o vão B;

- Para as geometrias analisadas, os IFB têm os seus módulos constituídos por vigas secundárias orientadas segundo direcção y-y, tendo em cada um destes uma viga intermediária;
- Os sistemas ICP, ICS, ACP e ANH têm as suas vigas orientadas segundo a direcção x não tendo estas qualquer viga intermediária. Para os edifícios residenciais tanto unifamiliares como multifamiliares, os ANH tem as suas vigas dispostas segundo a direcção y.

3.5 Variação do Peso do Aço em Edifícios Multifamiliares em Função do nº de Pisos

Para averiguar a variação do peso da estrutura metálica em edifícios residenciais multifamiliares consoante o número de pisos, foi efectuado um estudo para situações com 8, 6 e 4 pisos. Assim, procedeu-se ao *input* de informação no *software* ACE (ACE, 2011), considerando as mesmas geometrias e carregamentos (sobrecarga e peso próprio). Após a geração dos resultados e organização da informação destes, foi efectuada a razão, entre edifícios de 8 e 6 e pisos e 6 e 4 pisos, para o peso do aço/m² que integra a estrutura dos mesmos, ou seja a totalidade das vigas e pilares que compõem a estrutura vertical e horizontal destes.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se uma ligeira diminuição do peso da estrutura em aço do edifício com a redução do número de pisos. Esta conclusão vem de encontro ao esperado, na medida em que para resistir a esforços mais reduzidos, é necessário uma menor quantidade aço para responder a estes de forma eficaz, sem comprometer a estrutura ou a sua utilização. Mais pormenorizadamente, observando a informação presente nos Quadros 3.4 e 3.5, constata-se que a redução do peso da estrutura metálica é mais acentuada em sistemas de macro-componentes que integrem vigas em I ou vigas alveolares.

Quadro 3.4 – Redução percentual entre a estrutura metálica de edifícios residenciais multifamiliares de 8 e 6 pisos, respectivamente.

| Razão entre o peso aço (kg/m ²) 6/8 pisos | |
|---|--|
| Solução | Redução percentual do peso da estrutura metálica (%) |
| Vigas em I | 6 |
| Vigas Alveolares | 6 |
| <i>Slim Floors</i> | 5 |

Quadro 3.5 – Redução percentual entre a estrutura metálica de edifícios residenciais multifamiliares de 6 e 4 pisos, respectivamente.

| Razão entre o peso aço (kg/m ²) 4/6 pisos | |
|---|--|
| Solução | Redução percentual do peso da estrutura metálica (%) |
| Vigas em I | 8 |
| Vigas Alveolares | 8 |
| <i>Slim Floors</i> | 7 |

4. ANÁLISE AMBIENTAL

4.1 Introdução à Metodologia Aplicada

A análise ambiental, e mais concretamente a redução dos impactes ambientais tem, ao longo dos últimos anos, constituído o objecto de estudo de investigadores e entidades intervenientes no mercado da construção. As medidas que possibilitam a aplicação de políticas de construção sustentável, valorizando o meio ambiente em que se enquadra, passam essencialmente pela redução de consumos energéticos inerentes às diferentes fases do ciclo de vida de um edifício e pelo uso de elementos construtivos com origem em materiais amigos do ambiente. As normas que têm sido estabelecidas resultam em edifícios com desempenho energético assinalável, permitindo que fases relativas ao fim de ciclo de vida tenham ganho relevo no que concerne à análise de ciclo de vida (Matthias et al, 2013).

Neste capítulo é efectuado um estudo dos impactes ambientais, relativos a cada fase do ciclo de vida (berço-à-cova) para os diferentes sistemas de macro-componentes considerados neste trabalho. Os módulos considerados nesta avaliação seguem a EN15804 (BS EN 15804, 2012) e EN 15978 (BS EN 15978, 2011), e enquadrando-se nas fases de produto, construção, fim de vida e reutilização/reciclagem, como se certifica pelo quadro seguinte:

Quadro 4.1 – Fases de ciclo de vida incluídas na análise ambiental.

| Fase | Descrição | Módulo |
|-------------|--------------------------------------|--------|
| Produto | Fornecimento de Matéria-prima | A1 |
| | Transporte | A2 |
| | Processo de Fabrico | A3 |
| Construção | Transporte | A4 |
| Fim de vida | Transporte | C2 |
| | Eliminação | C4 |
| | Reutilização/Potencial de Reciclagem | D |

A análise é classificada com base nas categorias de avaliação existentes, dividindo-se estas em categorias de avaliação de desempenho ambiental e energético.

A avaliação da performance ambiental integra os seguintes indicadores (IES, 2010):

- **Acidificação do Solo e Água**, caracterizada pelo parâmetro potencial de acidificação do solo e água (AP). Esta categoria comporta os processos que contribuem para o aumento da acidez do solo e da água devido ao aumento substancial da concentração de iões de hidrogénio na sua composição. É causado pela deposição de substâncias ácidas nestes ecossistemas devido à emissão descontrolada de compostos como dióxido de enxofre, amónio e ácido nítrico;
- **Aquecimento Global**, expresso pelo parâmetro potencial de aquecimento global (GWP). É um indicador provocado pelas emissões de gases com efeito de estufa que têm a capacidade de absorver a radiação infravermelha emitida da superfície do planeta, repercutindo-se num aumento da temperatura média que por sua vez provoca desequilíbrios no ser humano e também nos ecossistemas terrestres;
- **Criação de Ozono Fotoquímico**, descrito pelo potencial de formação de ozono (POCP). Ocorre devido a processos fotoquímicos com origem na interacção entre compostos orgânicos voláteis e óxidos de azoto, conduzindo a reacções que oxidam as moléculas orgânicas dos elementos expostos a poluentes desta natureza. Acarretam impactes negativos tanto para o ser humano como para o meio natural e construído;
- **Depleção da Camada de Ozono**, caracterizada pelo parâmetro potencial de diminuição da camada de ozono estratosférica (ODP). Consiste numa medição relativa da quantidade de halogénios presentes na estratosfera que contribuem para a degradação da camada de ozono. Tal fenómeno acontece devido ao longo período que os átomos de cloro (clorofluorcarbonetos) e bromo conseguem permanecer nesta camada atmosférica, conduzindo a reacções químicas que destroem as moléculas de ozono;
- **Depleção de Recursos Abióticos Fósseis e não-Fósseis**, parametrizado pelo potencial de redução de recursos abióticos de natureza fóssil e não fóssil (ADP). Entendem-se por recursos abióticos, as matérias-primas ou os meios que sustentam as actividades de produção e consumo. Estas riquezas naturais exercem um papel preponderante no contínuo desenvolvimento das sociedades actuais. No entanto, são muitas vezes consumidas a uma cadência superior aquela à que o planeta consegue repor, condicionando a resposta das necessidades presentes e por consequência as gerações futuras (Yellishetty et al, 2011);

- **Eutrofização**, definida pelo parâmetro potencial de eutrofização (EP). Conduz a um aumento significativo do fornecimento de minerais e nutrientes ao meio vegetal, favorecendo deste modo o seu crescimento acelerado. Tal comportamento é potenciado pela deposição de partículas em suspensão e dissolvidas de nitrogénio que assim condicionam todo o ecossistema em que a vegetação exposta a este fenómeno se insere.

A análise é completada com a descrição dos recursos utilizados, onde é analisado o parâmetro:

- **Consumo de Energia Primária** (PEDt), valor calorífico líquido. Descreve a quantidade de energia primária utilizada ao longo do ciclo de vida de cada elemento construtivo. Este agrega a energia proveniente de recursos energéticos renováveis e não-renováveis.

4.2 Sistemas de Macro-componentes Utilizados

O estudo integra na sua análise os sistemas de macro-componentes que compõem os pisos das tipologias de edifícios em estudo. Assim, o conjunto dos componentes considerados na análise ambiental é constituído por aço, betão, chapa de aço (no caso de utilização de *steel deck*) e conectores (aquando do uso de sistemas mistos) que integram a estrutura.

Neste seguimento, de maneira a proceder ao cálculo dos impactes relativos a cada uma das configurações presentes na Figura 4.1, foi considerado o peso (kg/m^2) de cada componente que integra os diferentes sistemas estruturais analisados. Deste modo:

- O peso do aço introduzido para o cálculo ambiental, consiste no peso relativo à solução óptima estruturalmente (com menos aço por m^2) correspondente a cada caso específico;
- As armaduras ordinárias utilizadas foram as mesmas para todos os sistemas estruturais analisados, consistindo numa malha pesando 2.22 kg/m^2 ;
- Relativamente ao peso da laje de betão, esta varia naturalmente consoante a sua espessura que foi admitida após pesquisa (BPSC, 2008). Esta diverge entre pavimentos mistos ou não-mistos e entre lajes pré-fabricadas alveolares e não alveolares. O peso do betão, relativo a cada caso de estudo, foi obtido através do

produto entre a sua densidade e a sua espessura, apresentando-se no Quadro 4.2 os resultados obtidos;

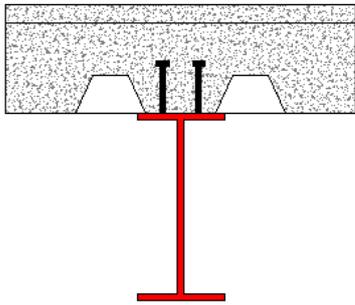
Quadro 4.2 – Peso por m² do betão que integra os sistemas de macro-componentes analisados.

| Sistema | Densidade (kg/m ³) | Espessura (mm) | Peso (kg/m ²) |
|---------|--------------------------------|----------------|---------------------------|
| *ICS | | | |
| *INS | | 95 | 218,5 |
| *ACS | | | |
| *ANS | | | |
| ICP | | | |
| INP | 2300 | 130 | 299 |
| ACP | | | |
| ANP | | | |
| *ANH | | 160 | 368 |
| *INH | | | |
| IFB | | 310 | 713 |
| SFB | | | |

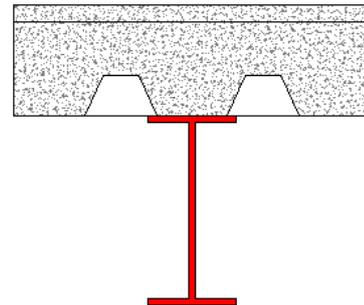
* A espessura da laje de betão tem em consideração as condicionantes que a sua forma impõe.

- A chapa de aço adoptada aquando do uso de *steel decking* consistiu sempre no mesmo modelo, quer se tratem de soluções mistas ou não-mistas, registando um peso de 0.1 kg por metro de chapa;
- Os conectores, que integram unicamente soluções mistas, têm o seu peso incluído no peso do aço que integra a estrutura.

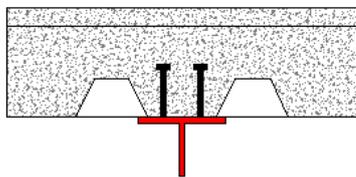
O conjunto seguinte de ilustrações que compõem a Figura 4.1 representa todas as configurações de macro-componentes que foram analisadas. Para cada uma destas foram estimadas as possíveis repercussões que poderão advir da sua utilização, para o meio ambiente, no decorrer seu ciclo de vida.



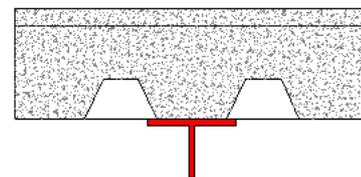
a) ICS.



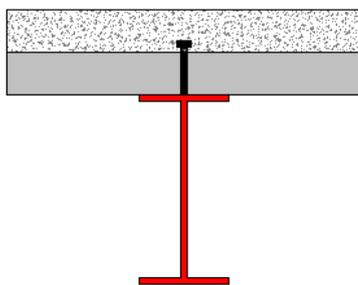
b) INS.



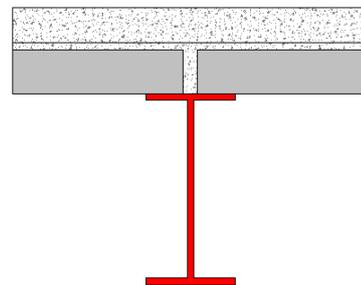
c) ACS.



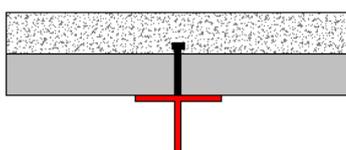
d) ANS.



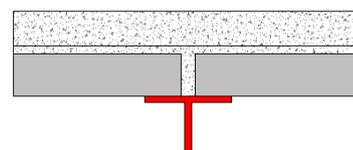
e) ICP.



f) INP.



g) ACP.



h) ANP.

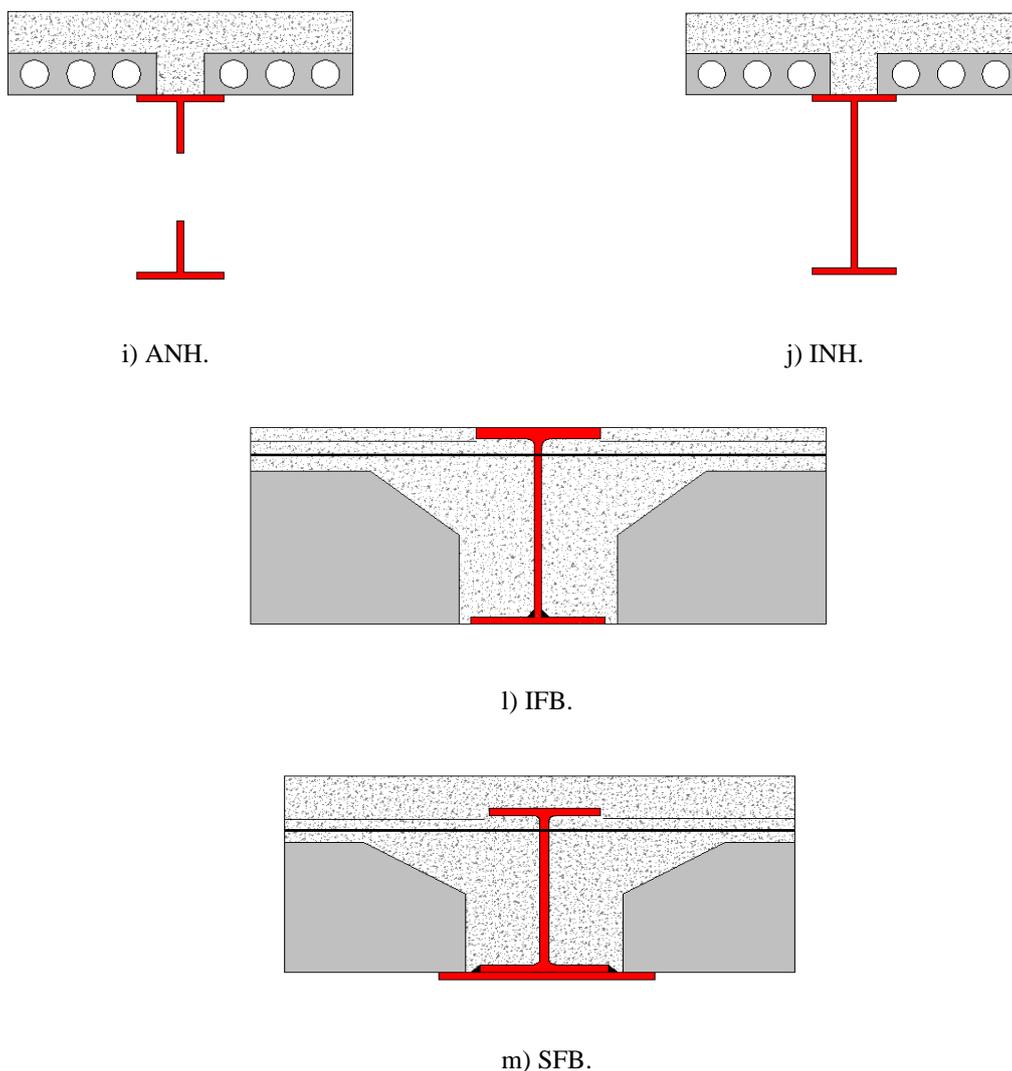


Figura 4.1 – Conjunto macro-componentes analisadas.

4.3 Análise de Resultados

A análise de resultados é efectuada com base no impacte respeitante a cada categoria de avaliação ambiental e energética. Desta forma, para cada geometria e tipologia de edifícios em estudo, foi efectuada o produto entre o peso de cada um dos elementos construtivos que compõem os sistemas presentes na Figura 4.1 e o valor normalizado para o impacte ambiental respectivo, para cada uma das fases consideradas nesta análise ambiental consideradas na análise (Quadro 4.1), como se pode verificar pela fórmula:

$$\text{Peso}_{\text{elemento construtivo}} \times (\text{impacte}_{A1-A3} + \text{impacte}_{A4} + \text{impacte}_{C2} + \text{impacte}_{C4} + \text{impacte}_D)$$

$$= \text{impacte provocado pelo elemento construtivo na categoria em análise (4.1)}$$

Depois de efectuado o cálculo descrito em (4.1), para cada elemento que integre os diferentes sistemas de macro-componentes, foi efectuado o somatório entre estes, obtendo-se assim o impacte final relativo a cada categoria. Neste seguimento, o procedimento descrito foi efectuado para cada categoria de avaliação ambiental e energética. A informação correspondente foi agrupada em quadros, tornando-se possível aferir quais as soluções com menores impactes ambientais e energéticos. Cada um destes é composto por informação relativa à solução óptima correspondente a cada uma das três classes de aço estrutural admitidas (S235, S355 e S460). O Quadro 4.3 agrega os parâmetros ambientais a serem avaliados, com as respectivas unidades.

Quadro 4.3 – Unidades referentes às categorias a avaliar.

| Parâmetro | Unidades |
|-------------|--|
| ADP | kg Sb equiv |
| ADP fósseis | MJ |
| AP | kg SO ₂ equiv |
| EP | kg PO ₄ ⁻³ equiv |
| GWP | kg CO ₂ equiv |
| ODP | kg CFC 11 equiv |
| POCP | kg Eteno equiv |
| PED t | MJ |

Os dados presentes no Quadro 4.4 dizem respeito a valores normalizados respeitantes ao impacte que cada categoria tem no meio ambiente a nível europeu. No mesmo, não constam valores respectivos aos parâmetros associados à categoria ambiental ADP fóssil e à categoria energética PEDt, visto que ainda não existem valores normalizados que caracterizem os impactes associados a estes no continente europeu.

A análise ambiental é dividida em 3 parcelas, tal como se constatará mais adiante nos quadros dos subcapítulos 4.3.1 a 4.3.4. A primeira das quais, denominada valor normalizado, agrega o somatório, para as categorias ADP, AP, EP, GWP, ODP e POCP, da razão entre o impacte relativo a cada sistema de macro-componentes e o respectivo valor de padrão europeu normalizado. Por outro lado, as restantes parcelas contemplam as categorias ADP fóssil e

PEDt, dado que para estas não é possível determinar qual o impacte que respectivamente acarretam a nível europeu. Importa referir que os parâmetros que caracterizam estas duas categorias de avaliação destacam-se como os mais condicionados pelas várias soluções estruturais consideradas nesta análise, ao passo que de entre as categorias que compõe o valor normalizado, destaca-se o aquecimento global, embora com valores na ordem dos 10% dos respectivos a ADP fóssil e PEDt.

Tendo em conta os factores acima descritos, esperam-se resultados com grandezas distintas, mas que permitirão uma comparação objectiva entre os resultados obtidos para cada sistema de macro-componentes consoante a classe de aço considerada. Por conseguinte, tornar-se-á possível aferir qual a melhor solução sob o ponto de vista ambiental e para que categorias de avaliação os impactes são mais significativos.

Quadro 4.4 – Valores normalizados relativos a cada categoria de impacte ambiental, por m².

| Parâmetro | Impacte |
|-----------|----------|
| ADP | 2,02E+10 |
| AP | 3,73E+10 |
| EP | 1,70E+10 |
| GWP | 6,45E+12 |
| ODP | 1,13E+08 |
| POCP | 1,12E+10 |

4.3.1 Edifícios comerciais

Os edifícios comerciais foram admitidos com uma altura de 4 pisos. No que concerne à geometria destes, foi admitido para o comprimento de vão L, o valor intermédio de entre todos os que foram assumidos inicialmente, conduzindo às seguintes geometrias:

- B = 4m; L = 10m:

A solução óptima sob o ponto de vista estrutural, para este caso de estudo, consiste como foi analisado no capítulo 3 em IFB para as classes de aço estrutural possíveis de adoptar (Figura 3.12). Desta forma, o peso do aço destes sistemas de macro-componentes foi admitido para o cálculo efectuado na análise ambiental. Observando o Quadro 4.5 verifica-se a tendência para o decréscimo dos impactes inerentes ao ciclo de vida das soluções consideradas com o aumento da classe estrutural do aço que as integra. Estas variações são explicadas com base no comportamento do peso do aço que tende a reduzir-se com o incremento da sua classe, dado que a laje tem o mesmo modelo para os três casos.

Conclui-se desta forma que a solução 2IFB4Y (S460) é a solução óptima para o caso em análise visto que por m² de macro-componentes que a constituem, conduz a impactes mais reduzidos quer num âmbito ambiental como também energético (Quadro 4.5).

Quadro 4.5 – Impactes, por m², referentes à solução estrutural óptima para edifícios comerciais com B = 4m, consoante a classe de aço.

| Solução | Valor Normalizado | ADP fóssil | PEDt |
|---------|-------------------|------------|---------|
| 2IFB2Y | 3,71E-11 | 1071,69 | 1186,35 |
| 2IFB3Y | 3,68E-11 | 1035,61 | 1148,05 |
| 2IFB4Y | 3,59E-11 | 1023,67 | 1135,38 |

- B = 5m; L = 18m:

Para a geometria em análise neste ponto, dado que as soluções consideradas na análise ambiental são diferentes relativamente à geometria anterior, também os resultados obtidos associados aos impactes provocados pelas respectivas componentes serão diferenciados.

Verifica-se uma maior disparidade entre os valores obtidos, fundamentada com base no facto de que o sistema com melhor desempenho estrutural varia consoante a classe de aço estrutural, visto que para S235 não é possível o uso de vigas alveolares. Por sua vez, estas são consideravelmente mais leves que as vigas em I, pelo que desta forma, para a mesma laje pré-fabricada em betão armado, conduzem a impactes ambientais e energéticos mais reduzidos por m².

A solução mais vantajosa sobe o ponto de vista ambiental é portanto 1ACP4X (S460), como se depreende por observação do Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Impactes, por m², referentes à solução estrutural óptima para edifícios comerciais com B = 5m, consoante a classe de aço.

| Solução | Valor Normalizado | ADP fóssil | PEDt |
|---------|-------------------|------------|---------|
| 1ICP2X | 4,15E-11 | 1484,84 | 1600,08 |
| 1ACP3X | 3,08E-11 | 1055,99 | 1144,90 |
| 1ACP4X | 2,98E-11 | 1019,65 | 1106,32 |

- $B = 6\text{m}$; $L = 18\text{m}$:

A análise efectuada para este arranjo geométrico é em tudo idêntica à efectuada para o ponto anterior. As macro-componentes analisadas sob o ponto de vista ambiental são exactamente as mesmas. Desta forma, 1ACP4X (S460) constitui novamente a solução que acarreta menos consequências ambientais e energéticas (Quadro 4.7), registando impactes ligeiramente inferiores aos verificados para a geometria anterior (Quadro 4.6), dado que a estrutura metálica que o integra é ligeiramente mais leve.

Quadro 4.7 – Impactes, por m^2 , referentes à solução estrutural óptima para edifícios comerciais com $B = 6\text{m}$, consoante a classe de aço.

| Solução | Valor Normalizado | ADP fóssil | PEDt |
|---------|-------------------|------------|---------|
| 1ICP2X | 3,96E-11 | 1405,43 | 1515,88 |
| 1ACP3X | 3,29E-11 | 1139,58 | 1233,62 |
| 1ACP4X | 2,90E-11 | 987,98 | 1072,74 |

4.3.2 Edifícios de escritórios

No que concerne a edifícios de escritórios, foi considerada uma altura de 6 pisos (Quadro 3.2). Quanto à sua geometria, foi admitido para o comprimento de vão L , o valor intermédio de entre todos os que foram assumidos inicialmente, conduzindo às seguintes geometrias:

- $B = 4\text{m}$; $L = 10\text{m}$:

Em edifícios de escritórios com esta disposição geométrica, os sistemas de macro-componentes utilizados passam pela configuração IFB para todas as classes de aço estrutural. Assim, observando o Quadro 4.8 verifica-se uma grande similaridade entre os resultados obtidos. Contudo, estes seguem a tendência verificada para edifícios comerciais, na medida em que os impactes tendem a apresentar uma ligeira atenuação com o incremento da resistência do aço adoptado na solução. Do mesmo modo, a categoria PEDt de avaliação da energia primária consumida, constitui-se como a mais negativa sob o ponto de vista de sustentabilidade, para as soluções consideradas.

Concluindo, tendo em consideração as ilações relativas a este caso de estudo, a configuração 2IFB4Y (S460) é considerada a mais adequada ambientalmente.

Quadro 4.8 – Impactes, por m², referentes à solução estrutural óptima para edifícios de escritórios com B = 4m, consoante a classe de aço.

| Solução | Valor Normalizado | ADP fóssil | PEDt |
|---------|-------------------|------------|---------|
| 2IFB2Y | 3,83E-11 | 1115,04 | 1232,37 |
| 2IFB3Y | 3,71E-11 | 1068,32 | 1182,77 |
| 2IFB4Y | 3,63E-11 | 1037,95 | 1150,53 |

- B = 5m; L = 18m:

Os resultados obtidos neste caso de estudo são, de encontro ao expectável, bastante próximos dos obtidos para a geometria anterior. Como se depreende por comparação dos Quadros 4.8 e 4.9, mantêm-se as tendências aferidas anteriormente no que concerne à variação dos impactes ambientes consoante a solução a adoptar.

Evidencia-se que mais uma vez, a melhor solução consiste no uso de 2IFB4Y (S460). Comparando os resultados obtidos para a solução estrutural, com a solução óptima relativa à disposição geométrica em análise no ponto anterior, verifica-se uma redução assinalável dos impactes associados ao seu ciclo de vida, fundamentada por uma estrutura metálica aproximadamente 6kg/m² mais leve como é possível aferir por comparação das Figuras 3.15 e 3.16.

Quadro 4.9 – Impactes, por m², referentes à solução estrutural óptima para edifícios de escritórios com B = 5m, consoante a classe de aço.

| Solução | Valor Normalizado | ADP fóssil | PEDt |
|---------|-------------------|------------|---------|
| 2IFB2Y | 3,85E-11 | 1124,91 | 1242,84 |
| 2IFB3Y | 3,71E-11 | 1070,14 | 1184,70 |
| 2IFB4Y | 3,22E-11 | 874,66 | 977,22 |

- B = 6m; L = 18m:

Do mesmo modo que o concluído relativamente aos Quadros 4.6 e 4.7, verifica que também para o caso em análise neste ponto que o uso de sistemas de macro-componentes que integrem vigas alveolares, acarreta menores impactes para o meio ambiente (Quadro 4.10). Por conseguinte, a solução 1ANH4X (S460) afirma-se como a que possibilita melhor desempenho ambiental.

Quadro 4.10 – Impactes, por m², referentes à solução estrutural óptima para edifícios de escritórios com B = 6m, consoante a classe de aço.

| Solução | Valor Normalizado | ADP fóssil | PEDt |
|---------|-------------------|------------|---------|
| 1ICP2X | 3,95E-11 | 1403,84 | 1514,12 |
| 1ANH3X | 3,43E-11 | 1154,83 | 1253,94 |
| 1ANH4X | 3,07E-11 | 1013,61 | 1104,05 |

4.3.3 Edifícios residenciais multifamiliares

Para a tipologia em estudo neste subcapítulo, os edifícios foram admitidos com uma altura de 8 pisos. No que à geometria destes diz respeito, foi admitido para o comprimento de vão L, o valor intermédio de entre todos os que foram assumidos inicialmente, conduzindo às seguintes geometrias:

- B = 4m; L = 6m:

Observando o Quadro 4.11 é possível aferir que o sistema de macro-componentes ANH é aquele que possui o desempenho ambiental menos favorável, visto que apresenta na sua constituição maior quantidade de betão por m². Por outro lado, regista-se maior equilíbrio entre os impactes associados às soluções compostas por S235 e S460, destacando-se a última como a estrutura mais eficiente no contexto ambiental. Relativamente às tipologias anteriormente analisadas, os impactes relativos ao ciclo de vida de edifícios residenciais multifamiliares, por m², são consideravelmente inferiores dado que a sua estrutura metálica é substancialmente mais leve.

Quadro 4.11 – Impactes, por m², referentes à solução estrutural óptima para edifícios residências multifamiliares com B = 4m, consoante a classe de aço.

| Solução | Valor Normalizado | ADP fóssil | PEDt |
|---------|-------------------|------------|--------|
| 1ICS2X | 1,88E-11 | 620,69 | 677,95 |
| 1ANH3Y | 2,35E-11 | 705,83 | 779,43 |
| 1ICS4X | 1,72E-11 | 562,80 | 616,51 |

- B = L = 5m:

Contrariamente à tendência até aqui verificada, a solução com estrutura metálica composta por aço S460 não se constitui como a configuração com melhor desempenho ambiental. Este

condicionamento é justificado pelo facto de ICP4 possuir uma estrutura metálica mais pesada comparativamente aos sistemas de macro-componentes que integram aço com resistências inferiores (Figura 3.19). Apesar de a solução ANH3 que é constituída por vigas alveolares apresentar a estrutura metálica mais leve, a sua laje apresenta uma espessura consideravelmente superior o que conduz, por cada m², a impactes mais significativos para o meio ambiente comparativamente a IICP2. Deste modo IICP2 apresenta-se como a configuração com melhor desempenho ambiental como se constata através do Quadro 4.12.

Quadro 4.12 – Impactes, por m², referentes à solução estrutural óptima para edifícios residências multifamiliares com B = L (m), consoante a classe de aço.

| Solução | Valor Normalizado | ADP fóssil | PEDt |
|-----------------|-------------------|------------|--------|
| IICP2X = IICP2Y | 2,10E-11 | 667,64 | 732,69 |
| 1ANH3X = 1ANH3Y | 2,22E-11 | 673,80 | 743,37 |
| IICP4X = IICP4Y | 2,25E-11 | 723,71 | 792,21 |

4.3.4 Edifícios residenciais unifamiliares

De acordo com o assumido no Quadro 3.2, foram admitidos 2 pisos para edifícios residenciais unifamiliares (moradias). Relativamente à sua geometria, foi admitido um comprimento de vão L, com o valor intermédio de entre todos os que foram assumidos inicialmente, originando às seguintes geometrias:

- B = 4m, L = 6m:

A análise efectuada para edifícios residenciais unifamiliares é similar à análise desenvolvida para edifícios residenciais multifamiliares com a mesma geometria. Desta forma, o sistema de macro-componentes IICS4X destaca-se como o menos condicionante para todos os parâmetros de avaliação ambiental, constituindo-se deste modo como a solução óptima sob o ponto de vista ambiental (Quadro 4.13).

O parâmetro PEDt, tal como verificado nos restantes casos estudados, regista o valor mais elevado no que concerne aos impactos associados ao ciclo de vida, por cada m² da solução a considerar para a estrutura do edifício.

Quadro 4.13 – Impactes, por m², referentes à solução estrutural óptima para edifícios residências unifamiliares com B = 4m, consoante a classe de aço.

| Solução | Valor Normalizado | ADP fóssil | PEDt |
|---------|-------------------|------------|--------|
| 1ICS2X | 1,73E-11 | 566,43 | 620,37 |
| 1ANH3Y | 2,10E-11 | 637,20 | 704,52 |
| 1ICS4X | 1,65E-11 | 534,24 | 586,20 |

- B = L = 5m:

Da mesma forma que para a análise estrutural, as curvas relativas a edifícios residenciais multifamiliares e unifamiliares apresentavam um comportamento idêntico (Figuras 3.19 e 3.21), também para a análise ambiental se verifica um desempenho semelhante. Neste sentido, o sistema 1ICP2X (S235) constitui-se como a solução óptima sob o ponto de vista ambiental como se pode verificar no Quadro 4.14, dado que, mesmo tendo a sua estrutura metálica ligeiramente mais pesada que o sistema ANH3, tem uma espessura sua laje de betão consideravelmente inferior à laje pré-fabricada que integra a configuração ANH3 (Quadro 4.2).

Quadro 4.14 – Impactes, por m², referentes à solução estrutural óptima para edifícios residências unifamiliares com B = L (m), consoante a classe de aço.

| Solução | Valor Normalizado | ADP fóssil | PEDt |
|-----------------|-------------------|------------|--------|
| 1ICP2X = 1ICP2Y | 1,77E-11 | 537,58 | 594,65 |
| 1ANH3X = 1ANH3Y | 1,96E-11 | 571,52 | 634,81 |
| 1ICP4X = 1ICP4Y | 1,94E-11 | 601,18 | 662,15 |

No seguinte quadro resumo (Quadro 4.15), encontram-se agrupadas as soluções mais vantajosas sob o ponto de vista ambiental, para cada tipologia de edifício estudada, consoante as variáveis condicionantes às quais estas se encontram sujeitas.

Quadro 4.15 – Resumo das soluções com melhor desempenho ambiental para cada caso analisado.

| Tipologia | Sistema Mais Favorável Ambientalmente | | |
|--|---------------------------------------|---------|--|
| Edifícios Comerciais | Classe | Solução | Condiz com a solução óptima estruturalmente? |
| B = 4; L = 10 | S460 | IFB | ✓ |
| B = 5; L = 18 | S460 | ACP | ✓ |
| B = 6; L = 18 | S460 | ACP | ✓ |
| Edifícios de Escritórios | Classe | Solução | Condiz com a solução óptima estruturalmente? |
| B = 4; L = 10 | S460 | IFB | ✓ |
| B = 5; L = 18 | S460 | IFB | ✓ |
| B = 6; L = 18 | S460 | ANH | ✓ |
| Edifícios Residenciais Multifamiliares | Classe | Solução | Condiz com a solução óptima estruturalmente? |
| B = 4; L = 6 | S460 | ICS | ✓ |
| B = L = 5 | S235 | ICP | X (ANH3) |
| Edifícios Residenciais Unifamiliares | Classe | Solução | Condiz com a solução óptima estruturalmente? |
| B = 4; L = 6 | S460 | ICS | ✓ |
| B = L = 5 | S235 | ICP | X (ANH3) |

Após a análise ambiental, importa reter os princípios fundamentais que a caracterizam. Assim:

- Os parâmetros que caracterizam as categorias mais condicionadas pelos modelos construtivos analisados ao longo deste trabalho são a PEDt, ADP fóssil e GWP, respectivamente. Os restantes apresentam valores consideravelmente mais baixos não constituindo uma ameaça relevante para o meio ambiente;
- PEDt agrega, tal como referido anteriormente, a energia primária proveniente de recursos renováveis e não renováveis. Ao longo do processo de tratamento de dados constatou-se que a apenas uma pequena parte desta é proveniente de recursos renováveis (inferior a 10%) o que pode implicar graves consequências para o meio-ambiente;
- De acordo com o expectável, os impactes tem origem predominantemente nas fases A1-A3, respeitantes ao módulo de produto e D, associado ao módulo potencial de reciclagem e reutilização;

- Para os casos abordados nesta análise ambiental, os edifícios de tipologia residencial, geram ao longo do ciclo de vida, impactes significativamente inferiores aos associados a edifícios comerciais e de escritórios. Esta tendência é justificada pelo facto de a estrutura metálica de edifícios residenciais ser mais leve;
- Ao longo do processamento de dados, comparando os valores obtidos para os impactes relativos a elementos em aço e elementos em betão que integram os sistemas de macro-componentes estudados, constata-se que os elementos metálicos têm impactes mais acentuados. Esse condicionalismo é sustentado pela elevada relação entre a resistência e o peso que caracteriza o aço, o que implica que a quantidade de aço para desempenhar uma determinada função seja bastante inferior à necessária no caso do betão. Desta forma, caso os elementos constituídos por aço, fossem compostos por betão, ter-se-ia por consequência um peso por m^2 substancialmente superior promovendo soluções com impactes ambientais mais expressivos e assim, contrapondo o conceito de desenvolvimento sustentável;
- De modo geral a solução que integra a estrutura metálica com melhor desempenho estrutural é também a que permite um ciclo de vida com performance ambiental mais favorável, verificando-se uma grande similaridade entre o comportamento dos seus gráficos.

5. ANÁLISE ECONÓMICA

5.1 Introdução Geral

A construção civil constitui-se como um dos principais potenciadores das economias globais, exercendo tal influência que condiciona directamente o sistema económico no qual se encontra enquadrada. Consequentemente tratando-se a vertente económica de uma das dimensões da construção sustentável, torna-se pertinente a escolha de modelos construtivos que salvaguardem a integração desta, evidenciando-se neste conceito a construção em aço.

Os custos de construção de um edifício advêm de encargos relativos à mão-de-obra, materiais de construção, equipamentos, maquinaria e tempo de construção. Seguindo um modelo de construção metálica, no qual a estrutura representa entre 12 a 15% do orçamento total, é possível conseguir benefícios económicos. Os mesmos surgem na medida em que é conseguida uma elevada produtividade resultando numa redução de custos no que concerne à mão-de-obra utilizada e duração da obra, conduzindo a uma economia de cerca de 5% do orçamento global da obra (Lawson, 2009).

Neste capítulo, é analisado unicamente o preço do aço por metro quadrado da estrutura metálica (horizontal e vertical) que integra cada uma dos sistemas estudados ao longo deste trabalho. É avaliada a variação deste segundo as condicionantes impostas, tais como a tipologia do edifício em análise e as suas dimensões, efectuando-se uma analogia com as soluções mais favoráveis sob o ponto de vista estrutural e ambiental.

5.2 Análise de Resultados

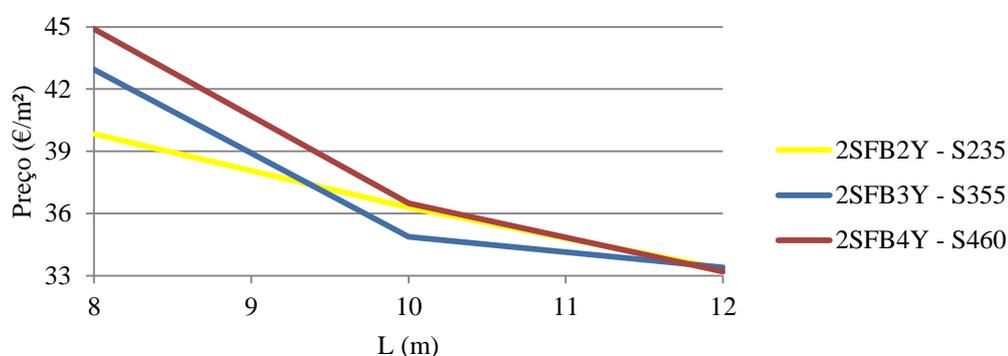
O procedimento que culminou na análise económica é em tudo idêntico ao adoptado para a execução da análise estrutural. Com recurso ao *software* ACE (ACE, 2011), foi compilada informação relativa ao preço/m² do aço que surge na sequência da conjugação de pilares, vigas, conectores, parafusos, transporte, montagem e mão-de-obra associada.

Este processo foi efectuado, segundo os preços praticados na Bélgica, para cada tipologia e geometria admitidas para estudo. Os gráficos presentes nas Figuras seguintes constituem-se como o corolário da recolha dessa mesma informação.

5.2.1 Edifícios comerciais

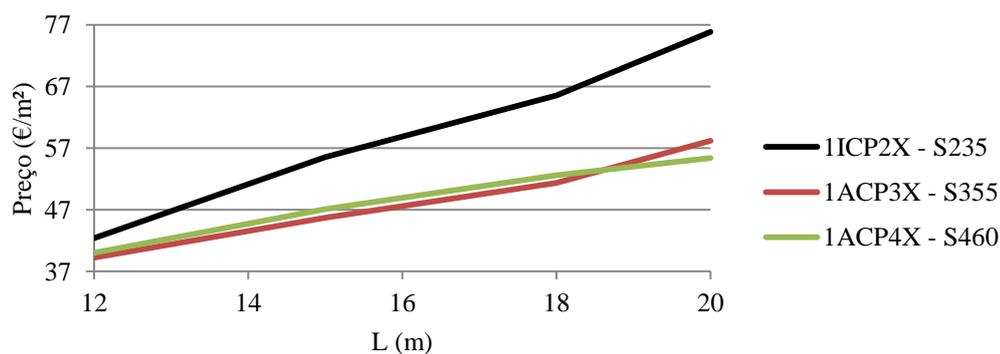
Para edifícios do tipo comercial foi admitida uma altura de 4 pisos, tendo sido adoptadas as seguintes geometrias:

- B = 4m; L = 8, 10 e 12m:



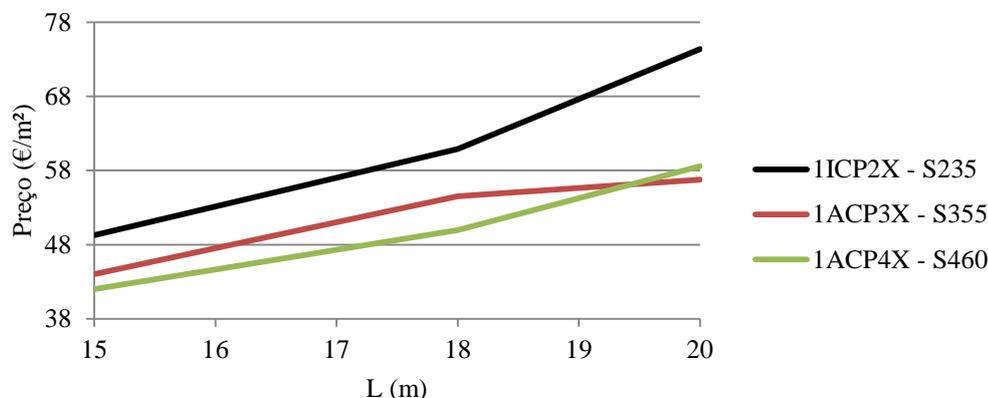
- a) Solução economicamente mais favorável para edifícios comerciais com B = 4m e L = 8, 10 e 12m, consoante a classe de aço estrutural.

- B = 5m; L = 12, 15, 18 e 20m:



- b) Solução economicamente mais favorável para edifícios comerciais com B = 5m, consoante a classe de aço estrutural.

- B = 6m; L = 15, 18 e 20m:



- c) Solução economicamente mais favorável para edifícios comerciais com B = 6m, consoante a classe de aço estrutural.

Figura 5.1 – Solução economicamente mais favorável para edifícios comerciais, segundo as diferentes geometrias adoptadas.

Observando os gráficos relativos à Figura 5.1, que compreendem as soluções economicamente mais viáveis, constata-se que para um edifício com a geometria em estudo na Figura 5.1.a, a solução mais favorável economicamente consiste na utilização do sistema de macro-componentes SFB, contrariamente ao verificado para a solução estrutural, na qual a escolha recaía em IFB. A adopção desta solução conduz a uma economia média de aproximadamente 5€/m² no aço utilizado. No entanto, do mesmo modo que para a análise estrutural, também para a análise ambiental o sistema SFB não permite o melhor desempenho ecológico, na medida em que este integra na sua composição uma maior quantidade de aço por metro quadrado e por conseguinte implica impactos ambientais mais significativos.

Relativamente às configurações presentes na Figuras 5.1.c, a solução que acarreta custos mais reduzidos, condiz com a solução óptima segundo os prismas estrutural e ambiental. Ao invés do verificado na Figura 5.1.b em que, de um modo geral, o sistema ACP3 é o mais económico, não sendo condizendo com a solução óptima estrutural e ambientalmente.

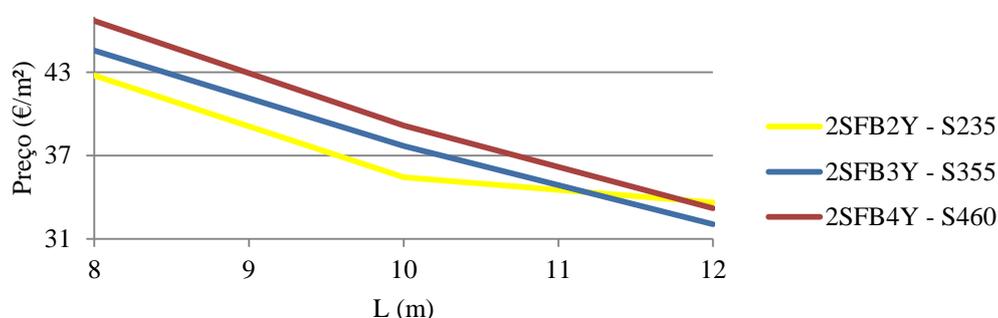
Verifica-se como esperado, que a variação do custo da estrutura acompanha a variação do peso, visto que o custo da estrutura é proporcional à quantidade de aço que a compõe. Deste modo para *Slim Floors* os encargos com a estrutura registam uma diminuição com o aumento do vão L (m) ao invés das soluções consideradas para B = 5m e B = 6m que tem um

comportamento inverso. Por outro lado, no que respeita à variação dos custos com a classe do aço, comprova-se que para *Slim Floors* estes aumentam com o incremento da classe, contrariamente aos sistemas mistos que conjugam vigas alveolares e de perfil I com lajes pré-fabricadas, verificando-se para os primeiros um preço consideravelmente mais baixo que para os demais.

5.2.2 Edifícios de escritórios

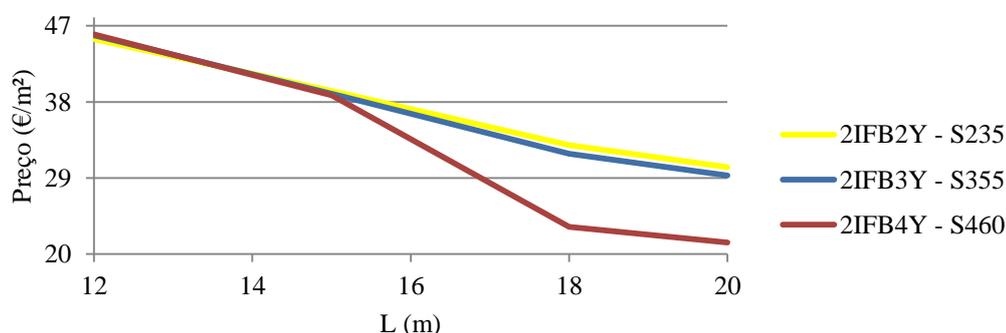
No que diz respeito a edifícios de escritórios, foi considerada uma altura de 6 pisos segundo as seguintes geometrias:

- B = 4m; L = 8, 10 e 12m:



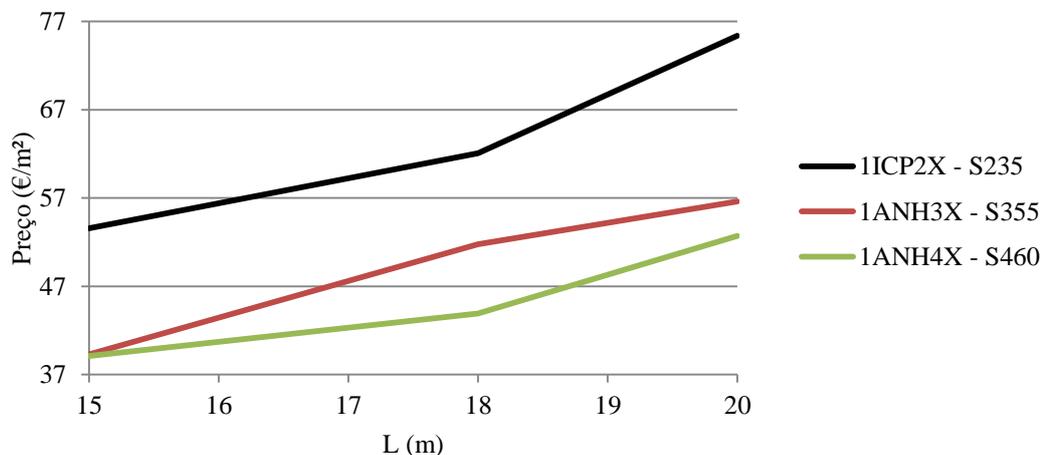
- a) Solução economicamente mais favorável para edifícios de escritórios com B = 4m e L = 8, 10 e 12m, consoante a classe de aço estrutural.

- B = 5m; L = 12, 15, 18 e 20m:



- b) Solução economicamente mais favorável para edifícios de escritórios com B = 4m e L = 8, 10 e 12m, consoante a classe de aço estrutural.

- B = 6m; L = 15, 18 e 20m:



- c) Solução economicamente mais favorável para edifícios de escritórios com B = 4m e L = 8, 10 e 12m, consoante a classe de aço estrutural.

Figura 5.2 – Solução economicamente mais favorável para edifícios de escritórios, segundo as geometrias adoptadas.

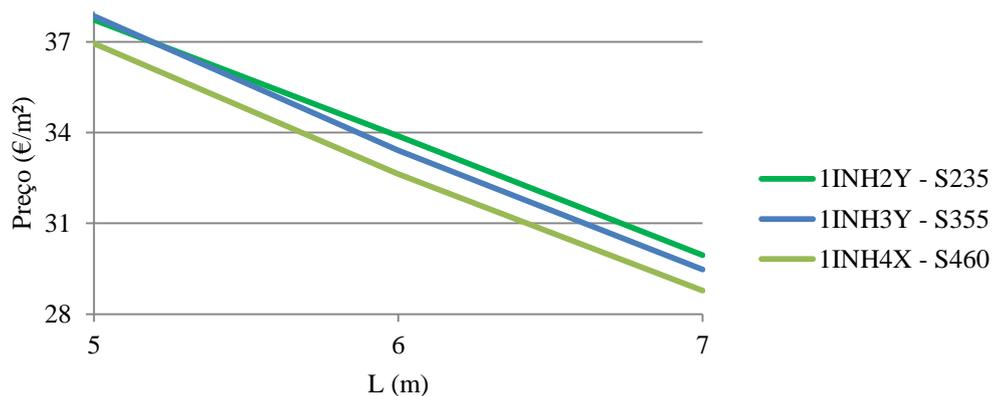
Do mesmo modo do aferido para edifícios comerciais com igual geometria, também para os edifícios de escritórios com a configuração presente na Figura 5.2.a, o sistema SFB assume-se como o mais económico, verificando-se ainda similaridade no seu preço/m². A sua utilização permite a redução de custos com a estrutura de aproximadamente 3.5 €/m². No entanto, os *Slim Floor Beams* apesar de possibilitarem benefícios económicos mais significativos, não sendo as estruturas mais leves no que concerne ao peso da sua estrutura metálica, geram ao longo do seu ciclo de vida impactos ambientais mais pronunciados.

Relativamente a edifícios de escritórios com as dimensões analisadas nas Figuras 5.2.b e 5.2.c, a solução economicamente mais vantajosa é também a solução óptima sob o ponto de vista estrutural e ambiental. Na análise económica que culminou na Figura 5.2.b, na qual foram estudados os custos para todas as soluções possíveis de considerar, constatou-se que os IFB destacam-se significativamente das restantes opções, apresentando relativamente à segunda solução mais favorável uma redução média de 50% nos seus encargos.

5.2.3 Edifícios residenciais

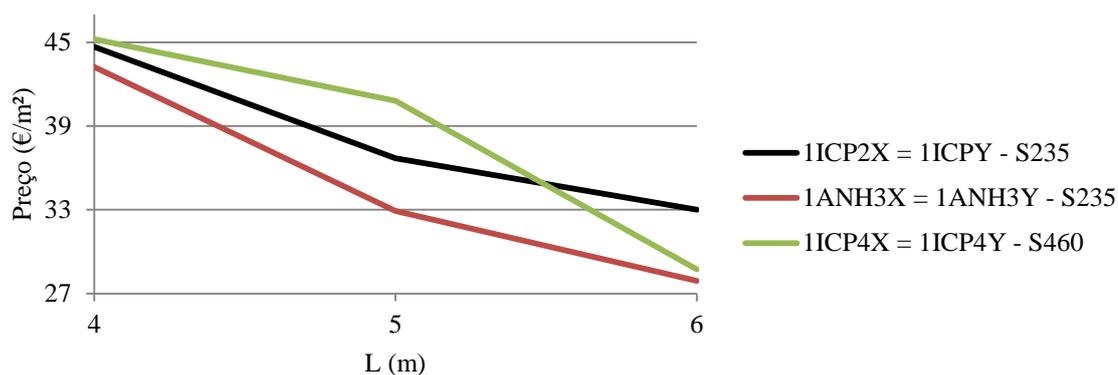
Para edifícios residenciais multifamiliares, foi admitida uma altura de 8 pisos para as seguintes geometrias:

- $B = 4\text{m}$; $L = 5, 6 \text{ e } 7\text{m}$:



a) Solução economicamente mais favorável para edifícios residenciais multifamiliares com $B = 4\text{m}$, consoante a classe de aço estrutural.

- $B = L$:

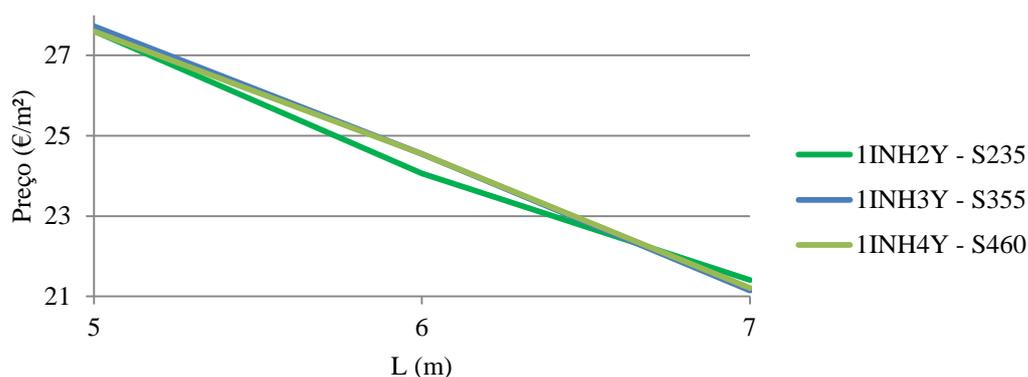


b) Solução economicamente mais favorável para edifícios residenciais multifamiliares com $B = L$ (m), consoante a classe de aço estrutural.

Figura 5.3 – Solução economicamente mais favorável para edifícios residenciais multifamiliares, segundo as geometrias adoptadas.

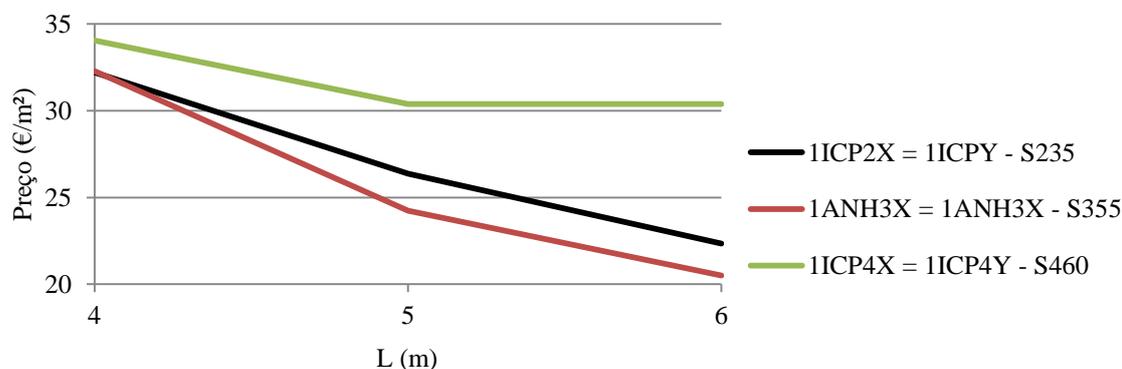
Para edifícios residenciais unifamiliares (moradias), foi admitida uma altura de 2 pisos segundo as seguintes geometrias:

- $B = 4\text{m}$; $L = 5, 6 \text{ e } 7\text{m}$:



- a) Solução economicamente mais favorável para edifícios residenciais unifamiliares com $B = 4\text{m}$, consoante a classe de aço estrutural.

- $B = L$:



- b) Solução economicamente mais favorável para edifícios residenciais unifamiliares com $B = L$ (m), consoante a classe de aço estrutural.

Figura 5.4 – Solução economicamente mais favorável para edifícios residenciais unifamiliares, segundo as geometrias adoptadas.

Os gráficos respeitantes a edifícios residenciais multifamiliares e unifamiliares, presentes nas Figuras 5.3 e 5.4, respectivamente, integram as soluções com custos mais reduzidos. Apresentam um comportamento semelhante dado que as geometrias em estudo para cada uma destas tipologias coincidem, variando unicamente no número de pisos. Este factor tem influência directa no custo/m² da estrutura metálica, registando-se desta forma, um valor consideravelmente mais elevado para edifícios residenciais multifamiliares.

No que respeita às geometrias constantes nas Figuras 5.3.a e 5.4.a, comprova-se que o sistema INHY constitui-se como o que tem menor impacte económico, contudo não é o mais eficiente estrutural e ambientalmente.

No que concerne às Figuras 5.3.b e 5.4.b, onde são analisados respectivamente os custos para edifícios multifamiliares e unifamiliares com configuração geométrica $B = L$, verifica-se que as soluções com menor impacte económico coincidem com as que têm melhor desempenho estrutural. Quanto à variação do custo da estrutura, este regista a tendência do seu comportamento estrutural, ou seja, diminui com o aumento do vão L , devido à proporcionalidade existente. Assim, para uma estrutura mais leve será possível maior economia.

O uso de INHY para edifícios tanto multifamiliares como unifamiliares com $B = 4\text{m}$ e classe de aço estrutural S355, não implica uma grande economia visto que, comparativamente à solução com melhor performance ambiental e estrutural (ANHX) apresenta apenas uma redução inferior a 1€/m². Para as restantes classes de aço aplicadas a edifícios residenciais multifamiliares com a geometria em estudo, a utilização de INHY permite uma redução de custos de aproximadamente 7.5€/m². Já para edifícios residenciais unifamiliares, o preço da estrutura sofre uma redução de cerca de 4.5€ por m².

Depois de realizada a análise económica importa reter as considerações finais que a caracterizam. Deste modo:

- Tal como era expectável, as curvas respeitantes aos gráficos obtidos para a análise económica efectuada neste trabalho, seguem o comportamento das curvas relativas à análise estrutural. Neste sentido, caso o peso da estrutura metálica decaia com o aumento do vão L , também o preço associado a esta irá por consequência decrescer;
- Quando a geometria das edificações permite a sua utilização, verifica-se que os sistemas *Slim Floors* constituem a solução mais económica por larga margem;

- Verifica-se que nem sempre a solução óptima sob o ponto de vista estrutural e ambiental corresponde à solução mais económica. No entanto, a diferença é bastante reduzida e pouco relevante ao nível do orçamento global da obra.

No fim de realizada a análise multidisciplinar definida como objectivo para esta dissertação, verifica-se de um modo generalizado, que a solução que constitui a estrutura metálica com melhor desempenho estrutural, apresenta também a configuração com melhor desempenho ambiental, como se pode observar no Quadro 5.1. Ocorrem excepções pontuais, que surgem derivadas à quantidade de betão por/m² que integra uma determinada macro-componente. Relativamente à análise económica, assiste-se a uma maior discrepância para com a solução óptima sob o ponto de vista estrutural e ambiental. No entanto, tendo em consideração que o objectivo principal desta dissertação reside na análise ambiental e que no orçamento global da obra, a diferença observada para estes terá um impacto desprezável, estas diferenças não deverão condicionar a escolha da solução a utilizar. Deste modo devem ser privilegiados os resultados referentes às análises ambiental e estrutural.

Quadro 5.1 – Solução óptima para cada tipologia de edifícios segundo cada análise.

| Tipologia | Tipo de Análise | | |
|--|-----------------|-----------|-----------|
| | Estrutural | Ambiental | Económica |
| Edifícios Comerciais | | | |
| B = 4 | IFB4 | IFB4 | SFB3 |
| B = 5 | ACP4 | ACP4 | ACP3 |
| B = 6 | ACP4 | ACP4 | ACP4 |
| Edifícios de Escritórios | | | |
| B = 4 | IFB4 | IFB4 | SFB2 |
| B = 5 | IFB4 | IFB4 | IFB4 |
| B = 6 | ANH4 | ANH4 | ANH4 |
| Edifícios Residenciais Multifamiliares | | | |
| B = 4 | ICS4 | ICS4 | INH4 |
| B = L | ANH3 | ICP2 | ANH3 |
| Edifícios Residenciais Unifamiliares | | | |
| B = 4 | ANH3 | ICS4 | INH4 |
| B = L | ANH3 | ICP2 | ANH3 |

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

O objectivo da presente dissertação incidiu no desenvolvimento de uma análise multidisciplinar que faculta a informação necessária para a tomada de decisões na fase de projecto de uma edificação. O primeiro passo consistiu num levantamento bibliográfico enquadrado no tema de modo a servir de suporte para o trabalho, constituindo-se como um processo de actualização de conhecimentos.

A construção sustentável é uma temática em destaque nas sociedades actuais, visto que têm sido reveladas por estas preocupações crescentes no que concerne à preservação do meio ambiente e respectivos recursos naturais. Neste seguimento, revela-se de extrema importância a aplicação na indústria da construção civil de modelos construtivos que respeitem o conceito de sustentabilidade em todas as suas dimensões. Deste modo, o aço pelas suas propriedades e todas as vantagens que lhe são consequentes, pode proporcionar edifícios sustentáveis, com impactes reduzidos quer a nível ambiental como também a nível energético. A sustentabilidade de uma edificação é avaliada com base numa análise do seu ciclo de vida, comportando todas as fases pelos quais os seus componentes passam, desde a sua recolha enquanto matéria-prima até ao seu processo de demolição, reutilização ou reciclagem.

A análise multidisciplinar efectuada conjuga as vertentes: estrutural, ambiental e económica. A primeira a ser explanada foi a análise estrutural, visto que, os seus resultados foram aplicados directamente nas restantes. Assim, no capítulo 3, foram analisados um conjunto de sistemas de macro-componentes que compõem a estrutura de edifícios comerciais, de escritórios e residenciais multifamiliares e unifamiliares. Para cada um deles, tendo em consideração as diferentes geometrias adoptadas e classes de aço, foi determinada a solução com melhor desempenho estrutural, isto é, aquela com menor peso/m².

O passo seguinte, e principal propósito da realização desta dissertação, passou por determinar os impactes ambientais e energéticos, decorrentes do ciclo de vida das várias macro-componentes que integram os diferentes sistemas estudados. Para tal, foi desenvolvido o procedimento enunciado no subcapítulo 4.2.

Os impactes são divididos por categorias que permitem avaliar as consequências que estes provocam no planeta. De entre estas, destacam-se hierarquicamente como as mais prejudiciais a categoria de classificação energética, e as categorias ambientais caracterizadas pelos parâmetros ADP fósseis e GWP. A classificação energética consiste numa quantificação da energia primária total consumida durante a totalidade do ciclo de vida das macro-componentes, destacando-se por larga margem a energia primária proveniente de recursos não renováveis, o que por conseguinte acarreta consequências mais negativas para o ambiente.

Os quadros obtidos para a análise ambiental, possibilitam o inter-relacionamento dos impactes ambientais e energéticos que advém de cada sistema de macro-componentes considerado. Permitem concluir qual a solução mais adequada e quais os parâmetros ambientais que são mais condicionados pela construção de edifícios utilizando os sistemas construtivos analisados.

Por último foi desenvolvida uma análise económica, com o objectivo de aferir a variação que o custo do aço apresentava. Constatou-se que apesar de nem sempre a solução mais económica corresponder à solução óptima estrutural e ambientalmente, a diferença é pouco significativa, devendo ser privilegiada aquela que agregue estas duas últimas.

Com os resultados obtidos para as diferentes análises efectuadas ao longo deste trabalho, torna-se possível saber durante a fase de projecto, para várias tipologias de edifícios segundo um conjunto alargado de disposições geométricas, quais as soluções que projectistas e construtores poderão utilizar, de modo a conceberem uma edificação que cumpra o propósito para o qual foi concebida com reduzidos encargos económicos, produzindo o mínimo de impactes no meio ambiente.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Seguidamente apresentam-se algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros:

- Realizar uma análise ambiental considerando um conjunto mais alargado de macro-componentes que conjuntamente com as soluções consideradas ao longo deste trabalho, compõem a estrutura de edifícios. Ou seja, revestimentos, pavimentos, painéis de fachada e outros elementos construtivos;
- Fazer um estudo comparativo para edifícios com estrutura metálica e com estrutura em betão sujeitos às mesmas condicionantes (tipologia, geometria, etc.) de forma a

permitir uma comparação objectiva dos impactes associados a cada um destes para o meio ambiente, evidenciando os benefícios da aplicação do aço na indústria da construção civil;

- A integração num estudo de natureza semelhante de sistemas de macro-componentes como *Slimdek*, *Slimline*, *Confradal* e *Hoesch Additive Floor*;
- Determinar quais os impactes normalizados respeitantes a Portugal e perceber a influência que estes têm nos valores europeus.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACB, “*Cellular Beams – Long Carbon Europe Sections and Merchant Bars*”, Arcelor Mittal (Documento Digital). Consultado em Março de 2014.

ACE (2011), “*Advanced Cost Estimator*” v.1.8.0, Novembro de 2011, este *software* foi desenvolvido ao abrigo de um projecto financiado pelo RFCS (Research Fund for Coal and Steel) em associação com SCi (The Steel Construction Institute), Arcelor Mittal and Bouwen Met Staal.

ACE-TC (2011) – ACE Technical Notes, v.1.8.0, Novembro de 2011.

Agenda 21, (2002) – Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries CSIR Building and Construction Technology

Arjaan de Feyter (2014) @arjaandefeyter.be, consultado em Maio de 2014.

BCSA - British Constructional Steelwork Association, “*The whole story, from cradle to grave*”, in association with TATA Steel (Documento Digital) Consultado em Fevereiro 2014 (Documento Digital).

BPSC, (2008) – “*Best Practice in Steel Construction, Comercial buildigns – Guidance for Architects, Designers and Constructors*, desenvolvido ao abrigo de um projecto financiado pelo RFCS (Research Fund for Coal and Steel) em associação com SCi (The Steel Construction Institute), Arcelor Mittal and Bouwen Met Staal, Labein – Tecnalia, SBI, Technische Universität Dortmund, CTICM e Forschungsvereinigung Stahlanwendung (FOSTA) (Documento Digital).

BS EN 15804:2012 *Sustainability of construction works - Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products.*

BS EN 15978:2011 *Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method.*

Gervásio, H., Santos, P., Martins, R., e Simões da Silva, L. (2013) “*A macro-component approach for the assessment of building sustainability in early stages of design*”, Building and Environment, Volume **73**: 256-270.

IES – Institute for Environment and sustainability, (2010). *International Reference Life Cycle Data System Handbook – Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment models and indicators*.

ISISE, (2014) - Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering, Simões da Silva, L., Simões, R., Santiago, A., Jordão, S. Estruturas Metálicas, Módulo 3.

Lawson R., (2009), Sustainability of steel in housing and residential buildings, The Steel Construction Institute, Publicação nºSCI P370 (Documento Digital).

Matthias Buylea, Johan Braet, Amaryllis Audenaert, (2013) “*Life cycle assessment in the construction sector: A review*”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, **26**: 379-388.

Naessens, J., Cajot, L.G., Labory, F. (2011), “*Infosteel – Economical Solutions:ACE*”, Mechelen.

Ortiz, O., Castells, F., Sonnemann, G., (2009) “*Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA*”, Construction on Building Materials, Volume **23**: 28-39.

Paul King, chefe executivo do UK Green Building Council “The whole story, from cradle to grave”, BCSA - British Constructional Steelwork Association in association with TATA Steel (Documento Digital).

Report of the World Commission on Environment and Development, (1987): “Our Common Future, Chapter 2: Towards Sustainable Development”.

SC.i – Steel Construction.info <http://www.steelconstruction.info> in association with Tata Steel, BCSA and SCI (Steel Knowledge). Consultado em Março de 2014.

Silvestre, J. D., de Brito, J., Pinheiro, M. D., (2014) “*Environmental impacts and benefits of the end-of-life of building materials e calculation rules, results and contribution to a “cradle to cradle” life cycle*”, Journal of Cleaner Production, Volume **66**: 37-45.

Simões, R. A. D., (2014) Dimensionamento de Estruturas Metálicas – 3ª Edição, Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.

Slim Floor, “An innovative concept for floors – Long Carbon Europe Sections and Merchant Bars”, Arcelor Mittal (Documento Digital). Consultado em Março de 2014.

Tata Steel (2014). @tatasteelconstruction.com/en/sustainability/carbon_and_steel. *The carbon footprint of steel*. Consultado em Fevereiro de 2014.

Yellishetty, M., Mudd, Gavin M., Ranjith, P.G., (2011) “*The steel industry, abiotic resource depletion and life cycle assessment: a real or perceived issue?*”, *Journal of Cleaner Production*, **19**: 78-90.

Zuo, J., Zillante, G., Wilson, L., Davidson, K., Pullen, S., (2012) “*Sustainability policy of construction contractors: A review*”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume **16**: 3910-3916.