



Quantificação do carbono equivalente na construção metálica e mista

JÚLIO TORRE ONOFRE PEREIRA

outubro de 2023

QUANTIFICAÇÃO DO CARBONO EQUIVALENTE NA CONSTRUÇÃO METÁLICA E MISTA

Júlio Torre Onofre Pereira

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

QUANTIFICAÇÃO DO CARBONO EQUIVALENTE NA CONSTRUÇÃO METÁLICA E MISTA

Júlio Torre Onofre Pereira

1210200

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor José Augusto de Sousa Ferreira Brandão e do Engenheiro Adriano Lopes.

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

AGRADECIMENTOS

É com grande gratidão que dedico este trabalho de dissertação a todos aqueles que contribuíram de maneira significativa para a sua realização.

Em primeiro lugar, quero expressar minha profunda apreciação ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), instituição de ensino que proporcionou as ferramentas e o ambiente académico necessários para desenvolver este trabalho. Agradeço à administração, professores e funcionários do ISEP pelo seu compromisso com a excelência educacional.

Ao meu orientador do ISEP, o Doutor José Brandão, estendo os meus agradecimentos. A sua orientação, conhecimento e incansável dedicação foram fundamentais para a realização desta dissertação.

Gostaria de estender os meus agradecimentos à SE2P, a empresa que desempenhou um papel crucial neste trabalho. O Engenheiro Adriano Lopes, orientador na empresa, merece um agradecimento especial por sua orientação, experiência e apoio. Também reconheço a contribuição valiosa dos outros engenheiros da empresa, em particular o Engenheiro Alberto Araújo, cujo conhecimento enriqueceu significativamente este trabalho.

Aos restantes professores do mestrado em Construções Mecânicas, agradeço pela qualidade das aulas, pela partilha de conhecimentos valiosos e pelo incentivo ao pensamento crítico.

O meu agradecimento também se estende aos meus amigos, namorada e familiares, que estiveram ao meu lado ao longo desta jornada. As palavras de incentivo e apoio emocional foram fundamentais para superar os desafios que surgiram.

Por fim, quero expressar meu apreço à unidade célula de inovação e experimentação operacional de sistemas não tripulados (CEOV) da Marinha Portuguesa, pela generosidade em disponibilizar todo o tempo necessário à conclusão desta dissertação.

página propositadamente em branco

RESUMO

Nos últimos anos a concentração de dióxido de carbono resultante de toda a atividade humana, tem aumentado drasticamente, deixando o planeta em alerta para as alterações climáticas. Em 2021 o setor da construção produziu cerca de 37% das emissões globais de CO₂ relacionadas com o uso de energia, o que leva à necessidade de desenvolver uma metodologia de quantificação e redução das emissões de CO₂ em edifícios/infraestruturas. Esta dissertação tem como objetivo aprofundar o tema da quantificação e redução do carbono equivalente na construção metálica e mista. Recorreu-se a uma pesquisa detalhada tanto da literatura existente como dos prováveis avanços a esperar da investigação científica, baseada nos resultados de pesquisa publicados nos últimos anos.

A avaliação do ciclo de vida é atualmente o método mais aceite para quantificar o carbono equivalente ao longo de toda a vida útil de um edifício. É um método bastante complexo que ainda apresenta algumas limitações e imprecisões, baseado essencialmente nas declarações ambientais de produto encontradas em bases de dados. Nesta dissertação o método de cálculo é desenvolvido e apresentado, com base nas informações obrigatórias nas declarações ambientais, dos certificados de sustentabilidade e nas metas de diminuição de carbono equivalente. São quantificadas as emissões de dois casos de estudo, segundo o cálculo desenvolvido. As utilizações de materiais reciclados apresentam uma redução de 60% relativamente a materiais não reciclados. Um dos casos de estudo mostra que existem grandes benefícios a retirar da realização de projetos com objetivos específicos com a diminuição da pegada de carbono. Exemplificando com a substituição da cobertura metálica por uma cobertura de madeira, que resultou numa diminuição de até 10%.

PALAVRAS-CHAVE

Dióxido de carbono equivalente; Carbono operacional; Carbono incorporado; Avaliação do ciclo de vida; Declaração ambiental do produto; Indústria da construção.

página propositadamente em branco

ABSTRACT

In recent years, carbon dioxide concentration, resulting from all human activity, has increased dramatically, leaving the planet on alert for climate change. In 2021, the construction sector produces about 37% of global CO₂ emissions related to energy use, leading to the need to develop a methodology for quantifying and reducing CO₂ emissions in buildings/infrastructures. This dissertation delves into the topic of quantifying and reducing carbon equivalent in metallic and mixed construction. Detailed research was carried out on both the existing literature and the likely advances to be expected from scientific research, based on research results published in recent years.

Life cycle assessment is currently the most accepted method for quantifying carbon equivalent over the entire useful life of a building. It is a very complex method that still presents some limitations and inaccuracies, essentially based on environmental product declarations found in databases. In this dissertation the calculation method is developed and presented, based on mandatory information in environmental declarations, sustainability certificates and carbon equivalent reduction targets. Emissions from two case studies are quantified, according to the calculation method developed. The use of recycled materials presents a 60% reduction compared to non-recycled materials. One of the case studies shows that there are great benefits to be gained from carrying out projects with specific objectives to reduce the carbon footprint. For example, replacing the metal roof with a timber roof, which resulted in a reduction up to 10%.

KEYWORDS

Carbon Dioxide Equivalent; Operational Carbon; Embodied Carbon; Life Cycle Assessment; Product Environmental Declaration; Construction Industry.

página propositadamente em branco

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABELAS	IX
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Metodologia	3
1.4. Organização da dissertação.....	3
1.5. Apresentação da empresa.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Organizações que se posicionam na redução do Carbono	5
2.1.1. Comissão Europeia	5
2.1.2. American Institute of Architects	5
2.1.3. London Energy Transformation Initiative.....	5
2.1.4. Royal Institute of British Architects.....	6
2.1.5. Royal Institution of Chartered Surveyors	6
2.2. Quantificação do Carbono Equivalente.....	6
2.3. Declaração Ambiental do Produto	12
2.4. Carbono Incorporado nos Materiais de Construção	15
2.4.1. Betão	15
2.4.2. Aço.....	17
2.4.3. Madeira	20
2.4.4. Tijolo	22
2.4.5. Alumínio	23
2.4.6. Vidro	24
2.4.7. Impacto dos materiais no carbono incorporado e estratégias para a sua redução..	25
2.5. Relação entre o Carbono Incorporado e Carbono Operacional.....	27
2.6. Elementos de construção de um edifício	29
2.6.1. Subestrutura.....	30
2.6.2. Superestrutura	31
2.6.3. Fachada e telhado	32
2.6.4. Serviços do edifício.....	33
2.6.5. Trabalhos externos.....	34
3. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE CÁLCULO	35
3.1. Informações transmitidas na quantificação do carbono.....	35
3.2. Ferramenta de Cálculo	39
3.2.1. Base de Dados para Portugal	39

3.3. Certificados de Sustentabilidade.....	42
3.4. <i>Benchmarks</i> e Metas de Carbono Incorporado.....	46
3.4.1. Regulações de carbono na Europa	53
3.5. Cálculos dos Módulos ACV	56
3.5.1. Módulos A1 a A3	56
3.5.2. Módulo A4	60
3.5.3. Módulo A5	63
3.5.4. Módulo B1	66
3.5.5. Módulo B2	68
3.5.6. Módulo B3	69
3.5.7. Módulo B4	70
3.5.8. Módulo B5	72
3.5.9. Módulos B6 e B7.....	73
3.5.10. Módulo C1	74
3.5.11. Módulo C2	76
3.5.12. Módulo C3	77
3.5.13. Módulo C4	79
3.5.14. Módulo D.....	80
4. CASOS DE ESTUDO: RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	83
4.1. Edifício TWINS (Caso de estudo 1)	83
4.1.1. Apresentação do edifício TWINS.....	83
4.1.2. Parâmetros admitidos nos casos de estudo.....	85
4.1.3. Apresentação dos resultados obtidos nos casos de estudo.....	88
4.2. Pavilhão Industrial (Caso de estudo 2).....	90
4.2.1. Apresentação do Pavilhão Industrial.....	90
4.2.2. Parâmetros admitidos nos casos de estudo.....	94
4.2.3. Apresentação dos resultados obtidos nos casos de estudo.....	100
5. CONCLUSÃO	107
5.1. Conclusões finais	107
5.2. Limitações e trabalhos futuros.....	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
APÊNDICE A	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Emissões de CO ₂ nos edifícios entre 2010-2021 (esquerda) e participação dos edifícios no total de emissões de CO ₂ em 2021 (direita). Imagem adaptada de [2]. Fonte: IEA.	1
Figura 2- Variação das emissões e energia em edifícios, 2010-2020. Imagem adaptada de [3] Fonte: IEA 2021a.	2
Figura 3 - Emissões dos diferentes grupos de gases efeito estufa, 1990-2019. Imagem adaptada de [11].	7
Figura 4 - Comparação entre Economia Circular e Linear. Imagem adaptada de LETI [12].	8
Figura 5 - Etapas e Módulos da avaliação ciclo de vida (ACV). Imagem adaptada de LETI [12].	9
Figura 6 - Reciclabilidade dos diferentes materiais de construção. Imagem adaptada de [67].	18
Figura 7 - Diferentes tipos de madeira maciça. Imagem adaptada de [81].	20
Figura 8 - Comparação do GWP entre treliças somente de aço e treliças de madeira e aço. Imagem adaptada de [86].	21
Figura 9 - Emissões de carbono dos diferentes materiais da estrutura em estudo. Imagem adaptada de Hawkins [88].	22
Figura 10 - Carbono incorporado dos alumínio. Imagem adaptada de [94].	24
Figura 11 - Fornecimento total de energia por fonte, Portugal 1990-2020. Imagem adaptada de IEA [108].	28
Figura 12- Elementos de construção de um edifício. Imagem adaptada de [140].	29
Figura 13 - Comparação do carbono incorporado das seis diferentes soluções de subestrutura. Imagem adaptada de [110].	31
Figura 14 - Contribuição de cada fase do ciclo de vida para as emissões de CO ₂ em %. Imagem adaptada de [112].	33
Figura 15 - Síntese geral dos macro objetivos e correspondentes indicadores de Level(s). Imagem adaptada de [116].	43
Figura 16 - Comparação dos diferentes tipos de certificação ambiental. Imagem adaptada de [126].	45
Figura 17 - Contribuição em percentagem dos elementos de construção para a pegada total de carbono equivalente de um edifício. Imagem adaptada de [12].	47
Figura 18 - Sistema de classificação da LETI para todo o edifício (esquerda) e apenas para a subestrutura e superestrutura (direita) de um edifício residencial para os módulos A1-A5.	48
Figura 19 - Sistema de classificação da LETI para todo o edifício (esquerda) e apenas para a subestrutura e superestrutura (direita) de um edifício Escolar para os módulos A1-A5.	48
Figura 20 - Sistema de classificação da LETI para todo o edifício (esquerda) e apenas para a subestrutura e superestrutura (direita) de um edifício Escolar para os módulos A1-A5.	49
Figura 21 - Sistema de classificação da LETI para todo o edifício (esquerda) e apenas para a subestrutura e superestrutura (direita) de um edifício Residencial para os módulos A1-A5, B1-B4, C1-C4.	49
Figura 22 - Sistema de classificação da LETI para todo o edifício (esquerda) e apenas para a subestrutura e superestrutura (direita) de um edifício Escolar para os módulos A1-A5, B1-B4, C1-C4.	50

Figura 23 - Sistema de classificação da LETI para todo o edifício (esquerda) e apenas para a subestrutura e superestrutura (direita) de um edifício Comercial para os módulos A1-A5, B1-B4, C1-C4.	50
Figura 24 - Sistema de classificação SCORS para a subestrutura e superestrutura de todo o tipos de construção os módulos A1-A5.	51
Figura 25 - Resultado do estudo de benchmarking em edifícios europeus no relatório da One Click LCA. Imagem retirada de [123].	52
Figura 26 - Classificação <i>One Click LCA</i> para os módulos A1-A4, B4-B5, C1-C4 tanto para todo o edifício residencial (esquerda) como apenas para a sua subestrutura e superestrutura (direita).	52
Figura 27 - Classificação <i>One Click LCA</i> para os módulos A1-A4, B4-B5, C1-C4 tanto para todo o armazém (esquerda) como apenas para a sua subestrutura e superestrutura (direita).	53
Figura 28 – Metas indicadoras de carbono estrutural para os módulos A1-A5. Imagem adaptada de [126].	55
Figura 29 – Base de dados da europa presentes no software <i>One Click LCA</i>	58
Figura 30 - Frente do edifício TWINS.	83
Figura 31 - Traseira do edifício TWINS.	84
Figura 32 – Vista 3D da estrutura de contenção.	84
Figura 33 – Fibras metálicas como reforço do betão armado. Imagem adaptada de [139].	85
Figura 34 - Resultados do Caso 1 (esquerda) e Caso 2 (direita) sob a forma de percentagens relativas aos módulos ACV do edifício Twins.	89
Figura 35 - Resultados do Caso 3 (esquerda) e Caso 4 (direita) sob a forma de percentagens relativas aos módulos ACV do edifício Twins.	90
Figura 36 – Estrutura metálica do Pavilhão industrial	91
Figura 37 – Alçado norte do pavilhão.	91
Figura 38 – Estrutura e composição das sapatas (esquerda) e do pavimento (direita) do pavilhão	92
Figura 39 – Estrutura mista do pavilhão.	93
Figura 40 - Resultados do Caso 1 (esquerda) e Caso 2 (direita) sob a forma de percentagens relativas aos módulos ACV do pavilhão industrial.	102
Figura 41 - Resultados do Caso 3 (esquerda) e Caso 4 (direita) sob a forma de percentagens relativas aos módulos ACV do pavilhão industrial.	103
Figura 42 - Resultados do Caso 5 (esquerda) e Caso 6 (direita) sob a forma de percentagens relativas aos módulos ACV do pavilhão industrial.	104
Figura 43 - Resultados do Caso 7 (esquerda) e Caso 8 (direita) sob a forma de percentagens relativas aos módulos ACV do pavilhão industrial.	104
Figura 44 - Resultados do Caso 9 sob a forma de percentagens relativas aos módulos ACV do pavilhão industrial.	105

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – GWP dos principais gases efeito estufa. Adaptado de RICS [10].....	6
Tabela 2 - Ferramentas de cálculo para as emissões de carbono equivalente.....	12
Tabela 3 - Guia para o uso de ACV ou DAP. Tabela adaptada de AIA [43].....	15
Tabela 4 - Carbono incorporado (Fator de carbono) dos diferentes materiais de construção.	26
Tabela 5 - Elementos críticos a serem incluídos na avaliação do carbono pela RICS. Tabela adaptada de RICS [10] e LETI [12].	29
Tabela 6 – Módulos incluídos no estudo ACV.....	35
Tabela 7 - Elementos de construção contemplados nos estudos 1 e 2. Adaptada da Tabela 5.	36
Tabela 8 - Definições de áreas com os respetivos elementos incluídos.	37
Tabela 9 - Carbono incorporado de diferentes materiais genéricos para Portugal.....	41
Tabela 10 - Cenários de transporte desenvolvidos para projetos situados no Reino Unido.....	61
Tabela 11 - Distâncias padrão do <i>software One Click LCA</i>	62
Tabela 12 - Fator de carbono no transporte para os diferentes modos de transporte.	62
Tabela 13 - Fator de carbono para cenários de atividades de construção (A5-2).	64
Tabela 14 – Cenários possíveis para tratamento de resíduos dos materiais desperdiçados.	65
Tabela 15 -Taxa de desperdício de cada material da base de dados <i>One Click LCA</i>	65
Tabela 16 - Fator de emissão de diferentes tipos de refrigerantes.	66
Tabela 17 - Capacidade de absorção de diferentes tipos de vegetação.....	68
Tabela 18 - Cenários possíveis para tratamento de resíduos dos materiais danificados.	70
Tabela 19 - Valores padrão de expectativa de vida do material fornecida por RICS.....	71
Tabela 20 - Cenários possíveis para tratamento de resíduos dos materiais substituídos.	72
Tabela 21 - Emissão de carbono equivalente de diferentes cenários de demolição.	75
Tabela 22 - Emissão de carbono na demolição baseada em percentagens de A5-2.	75
Tabela 23 - Pressupostos de transporte padrão para diferentes cenários de fim de vida [114], [133]	76
Tabela 24 – Processos de fim de vida declarados no módulo C3.	77
Tabela 25 - Cenários de tratamento de resíduos de cada material.	78
Tabela 26 – Cenários de aterro de resíduos de cada material.....	79
Tabela 27 - Parâmetros admitidos no caso 1 para a quantificação do carbono equivalente do edifício TWINS.....	86
Tabela 28 - Parâmetros admitidos no caso 2 para a quantificação do carbono equivalente do edifício TWINS.....	87
Tabela 29 - Parâmetros admitidos no caso 3 para a quantificação do carbono equivalente do edifício TWINS.....	87
Tabela 30 - Parâmetros admitidos no caso 4 para a quantificação do carbono equivalente do edifício TWINS.....	88
Tabela 31- Resultados dos casos alternativos do edifício TWINS.	88
Tabela 32 - Parâmetros admitidos no caso 1 para a quantificação do carbono equivalente do pavilhão industrial.....	94
Tabela 33 - Parâmetros admitidos no caso 2 para a quantificação do carbono equivalente do pavilhão industrial.....	95

Tabela 34 - Parâmetros admitidos no caso 3 para a quantificação do carbono equivalente do pavilhão industrial.....	96
Tabela 35 - Parâmetros admitidos no caso 4 para a quantificação do carbono equivalente do pavilhão industrial.....	96
Tabela 36 - Parâmetros admitidos no caso 5 para a quantificação do carbono equivalente do pavilhão industrial.....	97
Tabela 37 - Parâmetros admitidos no caso 6 para a quantificação do carbono equivalente do pavilhão industrial.....	97
Tabela 38 - Parâmetros admitidos no caso 7 para a quantificação do carbono equivalente do pavilhão industrial.....	98
Tabela 39 - Parâmetros admitidos no caso 8 para a quantificação do carbono equivalente do pavilhão industrial.....	99
Tabela 40 - Parâmetros admitidos no caso 9 para a quantificação do carbono equivalente do pavilhão industrial.....	99
Tabela 41 - Resultados dos casos de estudo do pavilhão industrial (caso 1 ao caso 5).....	100
Tabela 42 - Resultados dos casos de estudo do pavilhão industrial (caso 6 ao caso 9).....	100

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

AAAs	Aglutinantes Ativados por Álcalis
ACM	<i>Aluminum Composite Material</i>
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AIA	<i>American Institute of Architects</i>
BECCS	<i>bioenergy with carbon capture and storage</i>
BF-BOF	<i>Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace</i>
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CA	Capacidade de absorção
CBAM	<i>Carbon Border Adjustment Mechanism</i>
CC	Cenário de carbonatação
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i>
CCU	<i>Carbon Capture and Utilization</i>
CD	Cenário de demolição
CH ₄	Metano
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ e	Dióxido de Carbono Equivalente
CP	Cimento <i>Portland</i>
CTMD	Cenários de tratamento de resíduos dos materiais desperdiçados
CTMDA	Cenários de tratamento de resíduos dos materiais danificados
CTMS	Cenários de tratamento de resíduos dos materiais substituídos
CTR	Cenário de tratamento dos resíduos
DAP	Declaração Ambiental do Produto
EAF	<i>Electric Arc Furnace</i>
EC3	<i>Embodied Carbon in Construction Calculator</i>
EVM	Expectativa de vida do material
EVR	Expectativa de vida do refrigerante
FA	Área funcional
FCT	Fator de carbono no transporte
FE	Fator de emissão do refrigerante
FE(C3)	Fator de emissão dependendo do cenário C3 atribuído ao material
FE(C4)	Fator de emissão dependendo do cenário C4 atribuído ao material
GEE	Gases Efeito Estufa
GIA	<i>Gross Internal Area</i>
GIFA	<i>Gross Internal Floor Area</i>
GRC	<i>Glass Fiber Reinforced Concrete</i>

GWP	<i>Global Warming Potential</i>
HFC	Hidrofluorocarbono
IEA	International Energy Agency
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LEA	<i>Low-carbon Emission Approaches</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LETI	<i>London Energy Transformation Initiative</i>
MPG	<i>Milieu Prestatie Berekening</i>
NO ₂	Óxido nitroso
PFC	Perfluorocarbono
PRE	Período de referência do estudo
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i>
QBE	Quantidade de betão exposto ao ar
QMI	Quantidade de material inicial
QMR	Quantidade de material reparado
RCP	Regra de Categoria do produto
RIBA	<i>Royal Institute of British Architects</i>
SCORS	<i>Structural Carbon Rating Scheme</i>
SE2P	Sociedade de Engenharia, Projeto e Planeamento
SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre
T _{anual}	Taxa de fuga anual do refrigerante
T _{fvida}	Taxa de fuga de fim de vida do refrigerante
T _{r_{anual}}	Taxa de reparação anual

Lista de Símbolos

P_{CO_2}	Dióxido de carbono sequestrado	kgCO ₂ e
cf	Fração de carbono na madeira	%
ρ_ω	Densidade da madeira no teor de humidade dado	kg/m ³
V_ω	Volume de madeira no teor de humidade dado	m ³

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Durante milhões de anos a concentração de gases efeito estufa (GEE) na atmosfera foi mínima e estes eram facilmente removidos por processos naturais. No entanto, com o aumento da atividade humana, como a queima de combustíveis fósseis para eletricidade, indústria e transporte; uso excessivo de fertilizantes químicos e até mesmo a produção animal industrial, a concentração de GEE tem aumentado drasticamente. Como consequência, a temperatura do planeta está a aumentar cada vez mais, o chamado aquecimento global, causando inúmeras alterações climáticas.

O aquecimento do mar, desaparecimento do gelo do ártico, subida do nível médio do mar, alterações na precipitação, incêndios, secas e acidificação dos oceanos são algumas das consequências derivadas do aquecimento global. Na Europa, entre 1970 e 2019 foram contabilizados cerca de 1 673 desastres que levaram a 159 305 mortes e milhares de milhões de euros em prejuízos. Os desastres mais frequentes na europa são inundações (38%) e tempestades (32%), no entanto, os desastres naturais com mais óbitos registados são as temperaturas extremas, com cerca de 148 109 vidas perdidas. Em Portugal continental os desastres que ocorrem com mais frequência são os incêndios e as temperaturas elevadas, já nas ilhas, as derrocadas de terra e as tempestades são mais frequentes [1].

O dióxido de carbono (CO₂) é o gás de efeito estufa mais abundante na atmosfera e são inúmeras as atividades que contribuem para a sua emissão. Em 2021 a indústria da construção, nomeadamente a construção de edifícios, contribui com 37% das emissões globais de CO₂ relacionadas com o uso de energia (Figura 1) [2].

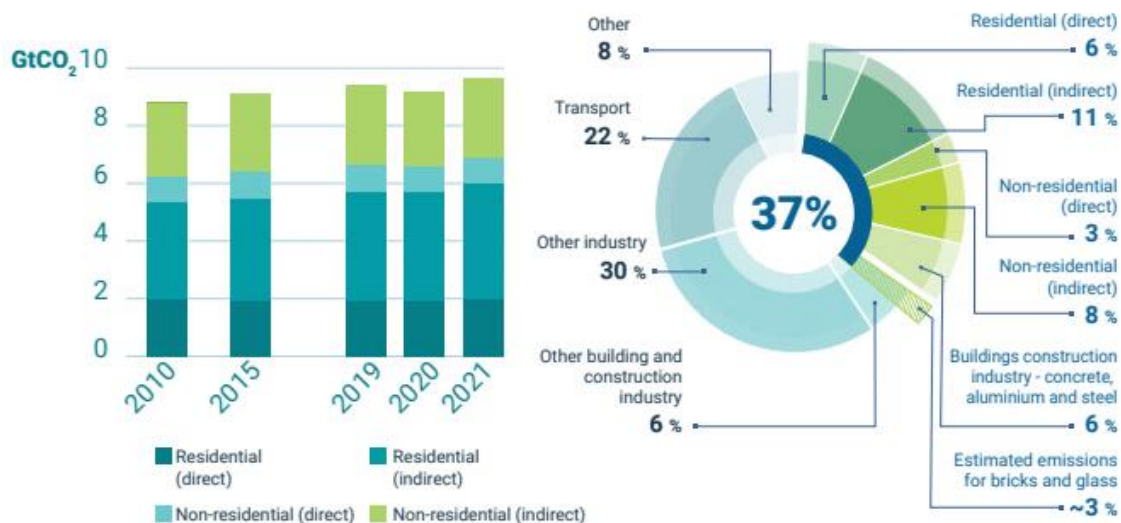


Figura 1- Emissões de CO₂ nos edifícios entre 2010-2021 (esquerda) e participação dos edifícios no total de emissões de CO₂ em 2021 (direita). Imagem adaptada de [2]. Fonte: IEA.

Dos 37% das emissões de dióxido de carbono, cerca de 10% está relacionado com o fabrico dos materiais utilizados na construção, desde o betão, aço, madeira e vidro. A restante percentagem (27%) diz respeito às emissões libertadas durante a ocupação do edifício, energia utilizada no aquecimento, ar condicionado, eletrodomésticos e iluminação. Estes 27% são divididos em dois

grupos: emissões diretas e indiretas. Cerca de 8 % de emissões foram provenientes do uso direto de combustíveis fósseis em edifícios e os restantes 19% foram devidos ao uso da eletricidade, ou seja, emissões indiretas.

Em 2021 as emissões de dióxido de carbono aumentaram cerca de 5% em comparação a 2020, apresentando um valor de 10 Gt de CO₂, conseguindo superar o ano de 2019 em 2%, cujo valor foi de 9,6 Gt de CO₂. O ano 2020 é um ano atípico relativamente às emissões de dióxido de carbono, uma vez que em relação a 2019 as emissões relacionadas ao aquecimento, refrigeração e iluminação caiu 10%, cerca de 9,6 Gt de CO₂ em 2019 para 8,7 Gt. No caso das emissões relacionadas com o fabrico dos materiais de construção, estas caíram de 3,6 Gt de CO₂ em 2019 para 3,2 Gt em 2020 (Figura 2) [3].



Figura 2- Variação das emissões e energia em edifícios, 2010-2020. Imagem adaptada de [3] Fonte: IEA 2021a.

Através da Figura 2 pode observar-se que a taxa média de crescimento anual da construção de edifícios tem vindo a aumentar em todo o mundo desde 2010, em consequência do crescimento populacional. Associado a este crescimento de construção o consumo de energia também aumentou, sendo acompanhada pelo aumento das emissões de CO₂. No entanto, em 2020 houve uma queda de 4% na construção e como resultado, houve uma redução nas emissões de dióxido de carbono. Essa queda deveu-se principalmente ao impacto da pandemia de COVID-19 que resultou em inúmeros bloqueios, nomeadamente na obtenção da matéria-prima.

Segundo as Nações Unidas o aumento da temperatura global deve estar limitado a 1,5°C em 2030, conforme exigido no Acordo de Paris. Nesse sentido, as Nações Unidas afirmam que as emissões de dióxido de carbono precisam ser reduzidas em 45% até 2030 e devem atingir a neutralidade até 2050. A indústria da construção tem uma significativa percentagem nas emissões globais de dióxido de carbono, por isso é importante estudar e desenvolver construções mais sustentáveis a fim de reduzir essas emissões e contribuir para um planeta mais limpo.

“At the COP 27 climate conference in Egypt, we need commitments that will deliver a reduction of emissions by 45 per cent by 2030 so we can reach net zero emissions by mid-century.” António Guterres, secretário-geral das Nações Unidas.

1.2. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é aprofundar o tema da quantificação da emissão de carbono equivalente na construção em Portugal. Este tema divide-se em três objetivos:

- Conhecer como se quantifica as emissões de carbono equivalente na construção de edifícios e estruturas através da literatura existente;
- Desenvolver um método de cálculo, encontrando as principais dificuldades no cálculo das emissões e perceber quais as principais barreiras em Portugal;
- Conseguir quantificar e encontrar estratégias de redução das emissões de carbono equivalente durante o projeto de estruturas, a serem realizados pela empresa SE2P (Sociedade de Engenharia, Projeto e Planeamento).

Como objetivo adjacente, a presente dissertação pretende possibilitar a integração dos conhecimentos adquiridos nas etapas anteriores e o desenvolvimento de uma visão alargada sobre a área de especialização das Construções Mecânicas no domínio científico da Engenharia Mecânica.

1.3. Metodologia

Perante o desafio apresentado pela empresa SE2P de quantificar e encontrar estratégias de redução de carbono equivalente na elaboração de projetos de estruturas metálicas e mistas, foi necessário primeiramente recorrer a uma pesquisa detalhada tanto do estado de arte como dos prováveis avanços a esperar da investigação científica, baseada nos resultados de pesquisa publicados nos últimos anos.

Numa segunda fase foram selecionados dois projetos reais em fase de análise na empresa SE2P, e foram aplicados os conhecimentos retirados da pesquisa de modo a conseguir quantificar as emissões de carbono equivalente em Portugal. Para essa quantificação recorreu-se a uma ferramenta de cálculo (*One Click LCA*) com auxílio de todas as informações retiradas anteriormente.

Foram investigados um grande número de alternativas de materiais, transporte, cenários de fim de vida, etc. para os projetos em estudo de forma a obter toda a gama de valores de emissões que é possível conseguir com a metodologia tradicional de projetos, incluindo os casos mais favoráveis possíveis.

Foi também realizado um projeto alternativo num dos casos de estudo, segundo o eurocódigo, para investigar a medida em que o projeto para a pegada de carbono é eficaz.

1.4. Organização da dissertação

Além da presente Introdução, esta dissertação é composta pela Revisão bibliográfica, no capítulo 2, dividida em seis subcapítulos, com particular ênfase nos avanços científicos realizados nos últimos anos no assunto. No capítulo 3 é apresentado o desenvolvimento do método de cálculo em que se refere os dados que influenciam a quantificação do carbono equivalente (subcapítulo 3.1), a ferramenta de cálculo utilizada (subcapítulo 3.2), a certificação de sustentabilidade (subcapítulo 3.3), as metas de carbono atuais (subcapítulo 3.4) e no subcapítulo 3.5 são apresentados os cálculos para cada módulo da avaliação do ciclo de vida. No capítulo 4 são discutidos e apresentados os

resultados da quantificação de carbono equivalente de dois casos de estudo: o projeto de um edifício residencial em betão (projeto TWINS no subcapítulo 4.1) e de um pavilhão industrial em estrutura metálica (subcapítulo 4.2). Por último, no capítulo 5 são expostas as principais conclusões, bem como as limitações e trabalhos futuros.

1.5. Apresentação da empresa

A dissertação apresentada foi realizada no âmbito de um estágio na empresa Sociedade de Engenharia, Projeto e Planeamento (SE2P), nas instalações da mesma e utilizando os seus recursos. A empresa SE2P, constituída a 29 de setembro de 2006, é um gabinete de projetos especializado em estruturas metálicas e mistas para a construção civil [4].

A SE2P integra as seguintes áreas de intervenção [4]:

- Gestão de Projetos;
- Projetos de Estruturas;
- Projetos de Redes de Abastecimento de Água;
- Projetos de Redes de Combate a Incêndios;
- Projetos de Redes Drenagem de Águas Residuais Domésticas e Industriais;
- Projetos de Redes Drenagem de Águas Residuais Pluviais;
- Projetos de Redes de Gás;
- Projetos de Comportamento Térmico;
- Projetos de Condicionamento Acústico;
- Projetos de Segurança Integrada;
- Projetos de Segurança e Saúde;
- Fiscalização e Coordenação de Obras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É apresentado neste capítulo o resultado duma revisão bibliográfica que pretende mostrar o estado atual do conhecimento científico sobre a quantificação e a redução do carbono equivalente na construção metálica e mista.

2.1. Organizações que se posicionam na redução do Carbono

Como apresentado anteriormente, a indústria da construção é responsável por uma significativa parte das emissões globais de dióxido de carbono. Em consequência existem diversas organizações que se pronunciam relativamente a este assunto e que se ocupam em estabelecerem legislação, metas e guias para que arquitetos e projetistas desenvolvam edifícios mais sustentáveis. Neste subcapítulo são apresentadas algumas dessas organizações que têm como principal objetivo permitir que os projetistas trabalhem em conjunto para atingirem a meta estabelecida pelo Acordo de Paris em 2015.

2.1.1. Comissão Europeia

A Comissão Europeia, para além de outras funções, negocia e adota atos legislativos, na maioria dos casos, juntamente com o Parlamento Europeu. Recentemente, estabeleceu para a União Europeia o objetivo de reduzir as suas emissões de gases com efeito de estufa. Para tornar esta transição ecológica uma realidade criou o pacote **Objetivo 55 (Fit for 55)**. Este pacote é composto por um conjunto de propostas legislativas e alterações à legislação da UE em vigor para alcançar a neutralidade climática até 2050 e reduzir as emissões líquidas de gases de efeito estufa em pelo menos 55% até 2030. Um dos elementos que contribui para esses objetivos é a revisão do *effort sharing regulation* (regulamento de partilha de esforços), que atualiza as atuais metas de redução de emissões dos estados-membros para 2030 em setores como transportes, **edifícios**, agricultura e resíduos [5].

2.1.2. American Institute of Architects

A organização American Institute of Architects (AIA) é hoje, uma das organizações com maior envolvimento em sustentabilidade na indústria da construção. Esta associação profissional foi fundada em 1857 e tem como objetivo representar os arquitetos americanos. A AIA disponibiliza ao mercado ferramentas de apoio à criação de projetos sustentáveis, como o guia AIA 2030, o AIA 2030 Commitment e o AIA 2030 Design Data [6].

2.1.3. London Energy Transformation Initiative

A London Energy Transformation Initiative (LETI) é uma rede voluntária, situada no Reino Unido, com mais de 1.000 profissionais na área da construção que tentam colocar o planeta no caminho para um futuro de carbono zero. Embodied Carbon Primer, Climate Emergency Design Guide, Client Guide for Net Zero Carbon Buildings e Climate Emergency Retrofit Guide são algumas das

publicações LETI para apoiar os projetistas a trabalharem em direção a metas de redução nas emissões de carbono [7].

2.1.4. Royal Institute of British Architects

A Royal Institute of British Architects (RIBA) foi fundado em 1838 e tem-se dedicado nos últimos anos a ajudar, por meio de guias, os arquitetos e projetistas a obterem melhores resultados de desempenho em projetos de edifícios sustentáveis. 2030 Climate Challenge guide, RIBA Sustainable Outcomes Guide e RIBA Plan of Work 2020 são alguns dos guias disponíveis pela RIBA para auxiliar projetos sustentáveis [8].

2.1.5. Royal Institution of Chartered Surveyors

A Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS) reconhece a importância de reduzir as emissões de carbono e tem trabalhado com governos e outras organizações para desenvolver políticas e padrões relacionados à sustentabilidade no setor da construção. O *RICS Professional Statement on Whole Life Carbon Assessment for the Built Environment* estabelece diretrizes para avaliar e gerir as emissões de carbono durante todo o ciclo de vida de um edifício, incluindo as emissões geradas durante a fase de uso e demolição [9].

2.2. Quantificação do Carbono Equivalente

Antes de quantificar as emissões de carbono equivalente pela indústria da construção é necessário conhecer a sua unidade de medida. A medição é realizada em CO₂ equivalente (CO₂e), que é uma medida internacional para estabelecer uma igualdade entre todos os gases com efeito estufa e o dióxido de carbono. Ou seja, os restantes gases GEEs são convertidos em CO₂ equivalente para realizar uma análise mais simplificada das emissões libertadas na construção.

Para estabelecer a equivalência entre todos os gases efeito estufa e o dióxido de carbono é importante conhecer o Potencial de Aquecimento Global ou *Global Warming Potential (GWP)* de cada um. O GWP dos gases de efeito estufa está relacionado com capacidade que cada um deles tem em reter calor na atmosfera num determinado período, neste caso 100 anos, comparado à capacidade do CO₂. O potencial de Aquecimento Global dos principais gases efeito estufa são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – GWP dos principais gases efeito estufa. Adaptado de RICS [10].

GEEs	GWP em 100 anos	Típicas Fontes
Dióxido de carbono (CO ₂)	1	Combustão; Reações bioquímicas
Metano (CH ₄)	25	Decomposição
Óxido Nitroso (N ₂ O)	298	Fertilizantes; Emissões de automóveis
Hexafluoreto de Enxofre (SF ₆)	22 800	Produção de Magnésio; Equipamentos elétricos de transmissão; Fabrico de semicondutores

Tabela 1 – Continuação.

GEEs	GWP em 100 anos	Típicas Fontes
Perfluorocarbono (PFC)	7 390 –12 200	Fundição de alumínio
Hidrofluorocarbono (HFC)	124 – 14 800	Refrigeração industrial, comercial e residencial; Gases industriais

Analisando a Tabela 1 podemos verificar que o óxido nitroso tem um potencial de aquecimento global de 298, ou seja, 1 kg de óxido Nitroso tem o mesmo impacto nas mudanças climáticas que 298 kg de dióxido de carbono e, portanto, 1 kg de Óxido Nitroso equivale a 298 kg de CO₂e. Deste modo, a fórmula para o cálculo do carbono equivalente é o produto da quantidade de um gás pelo seu GWP.

A Figura 3 apresenta a quantidade de emissões pelos grupos de gases efeito estufa desde 1990 até 2019 em Gt CO₂e por ano. Em 2019, o dióxido de carbono (CO₂) ocupou a maior percentagem (75%) de todos os GEE presentes na atmosfera, o metano (CH₄) representa 18%, o óxido nitroso (N₂O) e os restantes gases (F-gases) representam, respetivamente, 4% e 2% das emissões globais dos gases efeito estufa. O facto do CO₂ ser o gás de efeito estufa mais abundante na atmosfera faz com que seja utilizado para abordar todos os GEEs de uma forma abreviada [11].

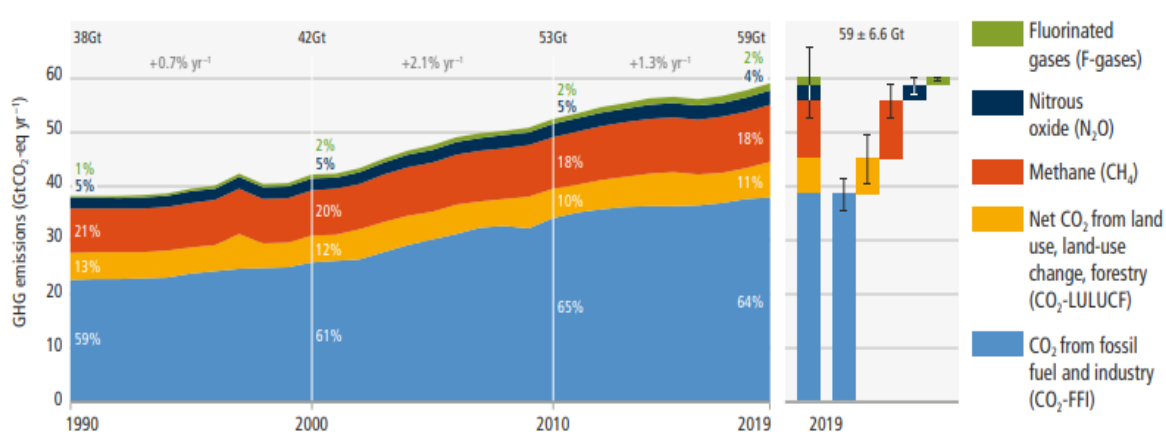


Figura 3 - Emissões dos diferentes grupos de gases efeito estufa, 1990-2019. Imagem adaptada de [11].

Fica evidente que o cálculo do dióxido de carbono equivalente é uma ferramenta necessária para o cálculo do dióxido de carbono em estruturas metálicas e mistas, bem como para o cálculo de metas de redução das emissões de gases efeito estufa. Na quantificação das emissões associadas aos edifícios e infraestruturas, estas podem ser divididas em dois grandes grupos, **carbono operacional** e **carbono incorporado**.

O **carbono incorporado** (*Embodied carbon*) diz respeito às emissões de dióxido de carbono associadas ao consumo de energia e processos químicos durante a extração e processamento de materiais, fabrico, transporte, montagem, manutenção/substituição e, numa última fase, demolição, processo de desmontagem e deposição de qualquer material ou reciclagem, não excluindo qualquer transporte relacionado com esta última fase. O carbono incorporado é geralmente expresso em quilogramas de dióxido de carbono equivalente por quilograma de material (kg CO₂e/kg). O termo *Upfront embodied carbon* refere-se às emissões de CO₂e libertadas antes que infraestrutura ou edifício entre em uso, que são em grande parte impactos do fabrico de

materiais [10], [12]–[14]. O **carbono operacional** (*Operational carbon*) refere-se à libertação de dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa associados ao consumo de energia enquanto o edifício é habitado/utilizado. Esta energia está relacionada com o aquecimento, refrigeração, fornecimento de água, sistemas de ventilação e iluminação, aparelhos de cozinha e até mesmo elevadores. Quando se quantifica tanto o carbono incorporado como o carbono operacional surge um novo conceito - **Whole life carbon** [10], [12]–[14].

A **avaliação do ciclo de vida** tem sido aceite como a metodologia mais indicada para avaliar os impactos ambientais da indústria da construção, nela encontra-se associado o conceito de economia circular. **Economia circular** (*Circular economy*) é um conceito industrial que tem como finalidade manter os materiais em uso o maior tempo possível, sendo depois reutilizados ou reciclados, deixando assim o mínimo possível de resíduos. A economia circular substitui a economia linear e o seu conceito de “Fim de vida”, onde os materiais são extraídos, fabricados, usados e deitados fora [12], [15].

Para edifícios, aplicar a economia circular significa criar um ambiente que prioriza a recuperação e reutilização sobre a demolição e construção. Por outras palavras, os edifícios devem ser projetados para serem adaptados, reconstruídos e desconstruídos para aumentar o seu tempo de vida útil e devem incorporar componentes e materiais que possam ser recuperados para reutilização e/ou reciclagem. O conceito de economia circular em contraste com o habitual conceito de economia linear é mostrado na Figura 4 [12], [15].

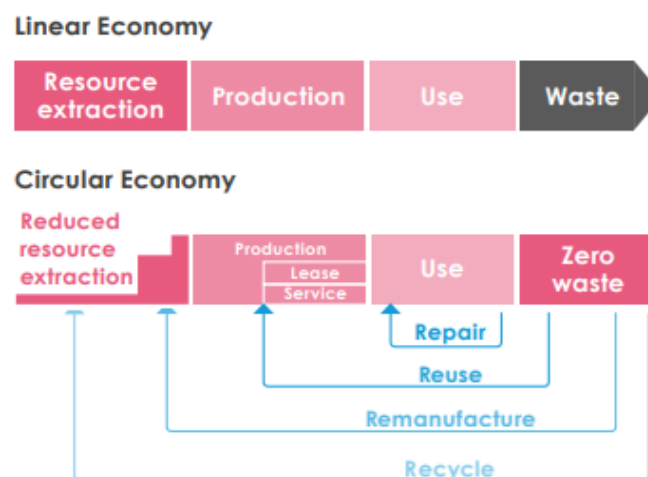


Figura 4 - Comparação entre Economia Circular e Linear. Imagem adaptada de LETI [12].

Avaliação do ciclo de vida (ACV) ou em inglês, *Life Cycle Assessment* (LCA), baseada na norma EN 15978:2011, foi desenvolvida pela CEN TC 350 e é considerada uma metodologia sustentada em várias etapas, cujo objetivo é medir os impactos ambientais num edifício ou infraestrutura (Figura 5). O potencial de aquecimento global (GWP) é o parâmetro usado para medir e acompanhar a emissão de carbono equivalente. As diferentes etapas da ACV podem ser divididas em: **Etapa do produto** - contém os módulos A1 a A3; **Etapa da construção** - contém os módulos A4 e A5; **Etapa do uso** - contém os módulos B1 a B7; **Etapa de fim de vida** - Contem os módulos C1 a C4; e por último a **Etapa D** que incide sobre o conceito de economia circular. Esta última etapa é considerada um suplemento e não é obrigatório ser incluído no cálculo do dióxido de carbono [10], [12].

A Avaliação do Ciclo de Vida consiste em 4 componentes principais que se usadas corretamente podem fornecer uma avaliação precisa e aprofundada dos impactos ambientais de um edifício. Esses quatro componentes são: definir os objetivos e limites do estudo; prever as quantidades de materiais e processos no edifício; avaliar o impacto ambiental, ou seja, avaliar a quantidade de emissões de dióxido de carbono equivalentes para cada material e em seguida calcular a pegada de carbono de todos os materiais de construção envolvidos no projeto. Por último, os resultados devem ser interpretados e se necessário deve-se alterar o projeto e repetir todo o processo para uma redução da emissão de carbono equivalente no projeto [12], [16].

A altura mais importante para calcular o carbono incorporado é nas etapas iniciais do projeto. É crucial que o projetista tenha tempo e oportunidade para fazer mudanças no projeto baseadas nas quantidades de carbono incorporado. O principal princípio para calcular o carbono incorporado é multiplicar a quantidade de material pelo seu coeficiente de carbono incorporado. A quantidade de material pode ser calculada de diferentes maneiras, dependendo da etapa do design e das ferramentas disponíveis. Nas etapas iniciais pode ser calculado com estimativas em tamanhos e cálculos simples e numa fase mais avançada as quantidades de materiais podem ser extraídas de modelos 3D da respetiva estrutura. O coeficiente de carbono incorporado é dividido pelos diferentes módulos da ACV e são dependentes da informação encontrada em base de dados [17]. Na Figura 5 é possível observar a metodologia *Life Cycle Assessment*, em que se relaciona os conceitos *embodied carbon*, *operational carbon*, *Whole life carbon* e *circular economy*.

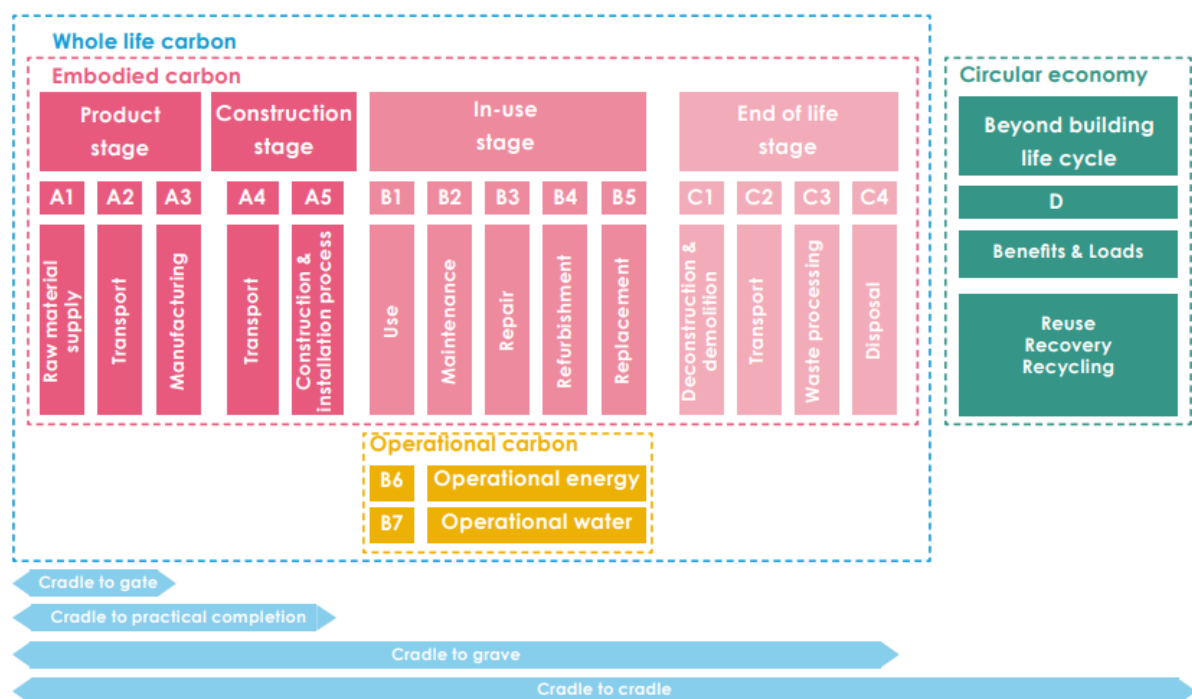


Figura 5 - Etapas e Módulos da avaliação ciclo de vida (ACV). Imagem adaptada de LETI [12].

Os diferentes módulos da ACV podem ser descritos da seguinte maneira:

Módulos A1-A3 - Nestes módulos são consideradas as emissões fruto do fabrico de materiais ou produtos. As emissões surgem da energia usada na extração de materiais, no processo de refinamento, transporte e por último, no fabrico final do material [10]. Estes módulos representam, normalmente, mais de 50% de todo o carbono incorporado de uma estrutura [17].

Módulo A4 - Transporte de materiais necessários para a construção desde o local da fábrica até ao local da obra, incluindo o transporte de equipamentos de construção. No entanto, o transporte de pessoas para o local da obra é excluído [18].

Módulo A5 - É considerada a instalação dos materiais, assim como os elementos de ligação: parafusos, rebites e soldadura. As emissões provenientes da preparação dos materiais, como recortes, furos e soldadura em fábrica também devem ser contabilizadas, assim como a quantidade de materiais que são desperdiçados e devem ser depositados em aterro [18].

Segundo a Comissão Europeia [19], a preparação do terreno para a construção da estrutura, a instalação de infraestruturas auxiliares e a construção de acessos ao local da obra podem não ser consideradas.

Módulo B1 - São consideradas as emissões do uso normal do edifício ao longo do período do estudo de referência. Segundo a norma EN 15978, no estudo de ACV de uma dada estrutura é exigida uma vida útil para a determinação da equivalência funcional dos edifícios, 60 anos é o tempo de vida útil padrão recomendada por RICS [10], [18].

Módulo B2 - Incide sobre atividades realizadas para manter os requisitos de funcionamento funcionais e técnicos de um dado componente de construção. Por exemplo, a limpeza de coberturas ou uma simples substituição das vedações de borracha de uma janela são consideradas manutenção da estrutura [18].

Módulo B3 - São considerados os trabalhos efetuados para reparar um componente do edifício. Por exemplo, a substituição de um simples vidro partido é considerada uma reparação numa janela. É importante sublinhar que os módulos A1-A3 para o novo material, assim como o transporte (A4), A5 para a substituição do material e por último os módulos C1-C4 para a deposição dos resíduos, devem ser contabilizados neste módulo [18].

Módulo B4 - Substituição de componentes danificados que não podem ser reparados ou que chegaram ao fim de vida antes da vida útil do edifício. Substituição de janelas, paredes divisórias ou coberturas podem ser considerados exemplos de substituição de componentes. É importante sublinhar que os módulos A1-A3 para o novo material, assim como A4 para o transporte, A5 para a substituição do material e por último os módulos C1-C4 para a deposição dos resíduos, devem ser contabilizados neste módulo [18].

Módulo B5 - Diz respeito a obras realizadas para renovar ou reaproveitar o edifício. Por exemplo, instalação de paredes divisórias para alterar o layout do último andar do edifício, transformando o espaço comercial em apartamentos [18].

Módulos B6-B7 - Incide unicamente no consumo de energia e água do edifício durante o seu tempo de vida útil [18].

Módulo C1 - Refere-se ao desmantelamento ou demolição do projeto no seu fim de vida [18].

Módulo C2 - Transporte dos materiais demolidos até ao centro de reciclagem ou local de aterro [18].

Módulo C3 - Incide sobre a triagem, recolha e tratamento dos resíduos da demolição para os diferentes processos (reutilização, reciclagem, recuperação de energia, disposição final) numa instalação de processamento de resíduos [18].

Módulo C4 - Refere-se à eliminação final dos resíduos da demolição num local destinado ao mesmo [18].

Módulo D - Este módulo quantifica os impactos dos edifícios que são projetados para reutilização e reciclagem dos materiais. Quando é incluído na avaliação do ciclo de vida, demonstra bastantes benefícios para a pegada final de CO₂, tratam-se de emissões negativas que causam impacto nos módulos A1-A3, obtenção da matéria-prima, de novos projetos [18].

Ao longos dos últimos anos foram realizados diversos estudos sobre a emissão de dióxido de carbono em estruturas e edifícios utilizando como metodologia as etapas ACV. Bahramian e Yetilmezsoy, [20] realizaram uma recolha de 87 estudos de caso para avaliar quais as etapas mais incluídas no estudo ACV. O fabrico dos materiais, (A1, A2 e A3), o transporte dos materiais para o local (A4) e as fases de construção e instalação (A5) são consideradas na maior parte dos estudos em análise ($\geq 70\%$). Por outro lado, os módulos do uso, manutenção e substituição (B1, B2 e B4) só foram analisados em 57% dos estudos selecionados, 63% dos estudos consideram a análise do uso operacional de energia e água (B6 e B7), somente 54% dos estudos incluíram o módulo de fim de vida (C1 a C4) e apenas 11% dos estudos avaliaram os benefícios do módulo D. Em cada um dos estudos analisados, a ausência dum módulo depende principalmente do objetivo do estudo e da disponibilidade dos dados necessários, ou então o impacto dessas etapas é relativamente baixo em comparação com todo o ciclo de vida da estrutura. É o caso do processo de construção (A5), segundo *Orr et al.* [17] este módulo é apenas responsável por cerca de 1% das emissões totais de CO₂. Muitos estudos apresentam o cálculo do carbono incorporado para as etapas iniciais (A1 a A5), que depende do material e é relativamente fácil de avaliar. Contudo ainda faltam metodologias, dados e regulamentação que levem a uma redução dos impactos desses materiais no carbono incorporado das etapas de uso, nomeadamente, a manutenção, reparação, substituição, demolição, e reciclagem e/ou aterros provenientes do módulo D. Os módulos B1 a D ocupam-se de processos cujas contribuições para o carbono equivalente são difíceis de estimar, o que leva os estudos a excluírem essa porção das suas avaliações do ciclo de vida [21]. Neste sentido, os estudos ACV podem ser realizados numa análise *Cradle to gate* - inclui os módulos A1 a A3, *Cradle to practical completion* ou *upfront embodied carbon* - em que inclui os módulos A1 a A5, *Cradle to grave* - inclui os módulos A1 a C4 e por último *Cradle to cradle* que envolve todas os módulos da ACV (A1 a D).

A quantificação do carbono equivalente no ciclo de vida de um edifício ou infraestrutura pode ser efetuada por uma simples folha de cálculo, no entanto trata-se de um processo bastante alongado, principalmente na extração das quantidades dos materiais de construção envolvidos no projeto quando se trabalha com modelos BIM. Contudo, este não é o fator mais crítico na quantificação de carbono equivalente. Por exemplo, os valores de carbono equivalente listados pelas várias fontes são frequentemente diferentes, seja desde valores de consumos de máquinas de transporte ou construção, até aos tratamentos de resíduos dos materiais. Isso levanta questões sobre quais os valores legítimos e também sobre a possibilidade de comparar estudos baseados em fontes de dados distintas, já que pequenos pormenores podem resultar em grandes diferenças no cômputo geral. Perante estas complicações existem diversas ferramentas disponíveis que permitem calcular as emissões de carbono equivalente de um modo mais simplificado e eficaz, permitindo uma maior transparência do processo de cálculo e uma melhor comparação entre estudos realizados com a mesma ferramenta. Na Tabela 2 são apresentadas algumas ferramentas disponíveis atualmente no mercado para o cálculo das emissões de CO₂ equivalente em estruturas ou edifícios.

Tabela 2 - Ferramentas de cálculo para as emissões de carbono equivalente.

Software	Alcance do Software	Região	Grátis
Athena Sustainable Materials	A1-A3	Estados Unidos da América	Sim
Hawkins\Brown Emission Reduction Toolkit (H\BERT)	A-D	Reino Unido	Sim
Beacon	A1-A3	Mundo	Sim
TallyCAT (EC3)	A1-A5	Estados Unidos da América	Sim
OpenLCA	A1-A3	Holanda	sim
CCaLC Tool	A-D	Reino Unido	Não
GaBi	A1-A3	Alemanha	Não
SimaPro	A1-A3	Holanda	Não
Tally	A-D	Estados Unidos da América	Não
eTool	A-D	Mundo	Não
OneClick LCA	A-D	Mundo	Não

2.3. Declaração Ambiental do Produto

Como referido anteriormente, cerca de 50% do carbono incorporado de uma estrutura refere-se ao fabrico dos materiais envolvidos na construção, um processo primário para a redução de dióxido de carbono incorporado nas estruturas/edifícios deve incidir sobre a escolha dos materiais utilizados no projeto. Para tal o projetista deve ter acesso aos materiais acompanhado do seu carbono incorporado, indicado pelos fabricantes, para facilitar as decisões de aquisição e definir metas de descarbonização. Uma ferramenta para atingir esse objetivo é a recolha e o uso de Declarações Ambientais de Produto (DAPs), ou em inglês, *Environmental Products Declarations* (EPDs).

A **Declaração Ambiental do Produto** é um documento verificado por terceiros com base em modelos ACV, cujo objetivo é comunicar de forma transparente e comparável informações sobre o impacto ambiental de um produto, elaborados em conformidade com normas internacionais [12], [22], [23].

A nível internacional, as declarações ambientais podem ser classificadas em três tipos: tipo I, II e III, com base na metodologia utilizada. A DAP do tipo I é uma marca ou um logótipo com base no cumprimento de um conjunto de critérios ambientais, já a declaração ambiental do tipo II é uma informação autodeclarada elaborada pelos próprios fabricantes. As declarações ambientais do tipo

III são verificadas por terceiros e apresentam informações ambientais sobre o ciclo de vida de um produto para permitir comparações entre bens com a mesma função e ajudar a fazer comparações entre produtos distintos. Existem normas específicas para cada tipologia: a *International Organization for Standardization (ISO)* publicou a ISO 14024 para a declaração tipo I, ISO 14021 para declarações do tipo II e ISO 14025 para o tipo III. O processo de elaboração das DAPs é regulado por um órgão específico, denominado operador de programa (derivado do inglês, *Program Operator*). O operador de programa pode ser uma empresa, uma autoridade pública, um organismo científico ou uma outra organização [22], [24].

No âmbito das iniciativas europeias, Portugal criou o Sistema DAP Habitat [25], um programa nacional para o registo de Declarações Ambientais do tipo III para produtos de habitação. Este projeto tem como objetivo desenvolver uma ferramenta de verificação e registo de DAP de habitação, baseada em critérios objetivos e independentes. Esses critérios são usados para criar Regras de Categoria de Produto (RCP) que são utilizadas para elaborar DAPs validadas e armazenadas numa base de dados pública [26], [27].

Biswas *et al.* [28] demonstraram, utilizando a metodologia ACV, a realização de uma declaração ambiental do produto (DAP) em oito diferentes produtos de betão produzidos no Catar pelo fabricante SMEET. Foram apresentados os impactos sobre a obtenção de matéria-prima (A1), transporte da mesma até o local de fabrico (A2) e o processo de fabrico do betão (A3), cuja soma dos três resulta na DAP. Possíveis hipóteses para diminuir o carbono incorporado do material em estudo também são apresentadas.

Segundo Lorenz [22], algumas das informações mais importantes incluídas numa declaração ambiental do produto são: regras para a categoria do produto (RCP); etapas do ciclo de vida; unidade declarada ou funcional; descrição do produto e os impactos ambientais.

As **regras para a categoria do produto** são um conjunto de regras e diretrizes para um determinado produto ou grupo de produto. Uma RCP determina como um operador de programa deve realizar a ACV para uma DAP dessa categoria de produto, tornando-o comparável e verificável [22], [29]. Para produtos de construção, existem dois RCPs principais: ISO 21930 e EN 15804, a DAP é obrigada a indicar qual delas foi utilizada. Existem duas versões da ISO 21930 (2006 e 2017) que podem ser referenciados em DAPs atuais e existentes, e várias versões da norma EN 15804. É notável a observação do RCP usado no desenvolvimento da DAP uma vez que declarações ambientais do produto sob diferentes RCPs não podem ser comparadas [22]

As **etapas do ciclo de vida** incluídas da ACV, assim como os módulos, são sempre descritos na DAP. Os possíveis módulos, bem como as etapas do ciclo de vida de um produto são baseadas na norma EN 15804, como anteriormente referido, e podem ser observadas na Figura 5. As DAPs podem ser criadas em várias combinações de módulos de ciclo de vida, no entanto o mínimo para uma declaração ambiental do produto é a inclusão da etapa de produção (A1–A3). A chamada avaliação *cradle-to-gate* que representa os módulos do ciclo de vida sobre os quais os fabricantes têm o maior controle. Cada DAP é detalhada com as etapas que inclui na análise do ciclo de vida de um produto e também com o que é excluído na sua avaliação [22].

Os impactos ambientais relatados numa DAP são baseados numa **unidade declarada ou funcional**. A unidade declarada é frequentemente usada para uma análise *cradle-to-gate*, quando a função do produto é desconhecida ou não pode ser declarada para o todo ciclo da vida. Tanto a norma EN 15804 como a ISO 21930 define a unidade declarada como uma quantidade de um produto de

construção para uso como unidade de referência numa DAP baseada em ACV. Exemplos de uma unidade declarada é a massa (kg) ou volume (m³). A unidade funcional é definida nas normas ISO 21930 e EN 15804 como a quantificação de um desempenho de um sistema do produto para um produto de construção, incluindo todas as fases do ciclo de vida. Uma DAP baseada numa unidade funcional requer o uso de cenários que definem o desempenho do sistema do produto [22].

Todas as DAPs incluem uma **descrição do produto**, esta deve ser detalhada o suficiente para permitir que projetista perceba a composição e utilização do produto. Nomes dos produtos de construção, códigos dos produtos, uma representação visual e uma breve descrição da utilização do produto são detalhes que devem ser incluídos na DAP [22].

A regra para a categoria do produto estabelece os **impactos ambientais** e itens de inventário do ciclo de vida que devem ser avaliados numa DAP. Todos os impactos são indicados com base na unidade declarada ou funcional do produto. Normalmente os impactos ambientais relatados incluem o potencial de aquecimento global (GWP), potencial de acidificação, potencial de eutrofização, potencial da criação de oxidante fotoquímico e potencial de destruição da camada de ozono. Itens de inventário de ciclo de vida podem incluir consumo de água doce, uso de energia primária, uso de recursos e fluxos. O dióxido de carbono está incluído na secção do GWP, com as unidades em kg CO₂e [22].

No **ANEXO A** é possível encontrar uma DAP internacional referente a secções de aço estrutural emitidas pelo grupo CELSA no ano 2021. Através da observação da declaração ambiental do aço estrutural é possível encontrar todos os parâmetros anteriormente referidos (as etapas do ciclo de vida consideradas, a unidade, a regra de categoria do produto utilizada, os impactos ambientais e uma pequena descrição do produto), assim como outros aspetos também importantes, por exemplo, a validade da DAP.

As DAPs são o ponto de partida para uma construção mais sustentável, no entanto esta informação deve estar ao alcance de todos os projetistas. *Building Transparency* é uma organização americana sem fins lucrativos que visa aumentar a transparência na construção e infraestrutura, desenvolvendo padrões de dados, ferramentas e recursos para ajudar a construir e operar edifícios e infraestruturas mais sustentáveis. O *Embodied Carbon in Construction Calculator* (EC3) [30] é um banco de dados gratuito de DAPs de construção e também uma ferramenta de software que permite calcular o carbono incorporado em projetos de construção [31]. Ecoinvent [32], Institut Bauen und Umwelt [33], The International EPD® System [34], The Inventory of Carbon and Energy (ICE) [35], EPD Ireland [36], BRE Green Book Live [37], ECO Platform [38], Gabi [39], Athena [40], Transparency Catalog [41] e o Climate Earth [42] são também bases de dados que divulgam a quantidade de emissão de carbono equivalente por parte dos materiais de construção ou de possíveis processos envolvidos no ciclo de vida do projeto.

As declarações ambientais do produto são essenciais para avaliar o impacto de carbono de um projeto, mas nem sempre são suficientes para avaliar a pegada total de carbono equivalente de um projeto. Na maior parte dos casos a DAP apresenta somente a emissão de dióxido de carbono equivalente correspondentes às etapas A1, A2 e A3 (fabrico do material de construção) e não consideram o seu efeito no tempo de uso e na demolição do edifício. Na Tabela 3 é possível perceber quais as limitações DAP, assim como quando se deve aplicar a mesma.

Tabela 3 - Guia para o uso de ACV ou DAP. Tabela adaptada de AIA [43].

Objetivo	Usar ACV	Usar DAP
Medir a redução de carbono incorporado com a reutilização de edifícios	●	
Identificar pontos de redução no início do projeto	●	
Calcular a pegada total de carbono de um edifício	●	
Comparar a pegada de carbono de diferentes designs de um edifício	●	
Comparar a pegada de carbono de dois tipos de construção (Ex. Edifício em aço vs. edifício em aço e madeira)	●	
Comparar a pegada de carbono entre materiais		●
Comparar a pegada de carbono de um produto especificamente durante a sua seleção e aquisição		●

Depois da análise da Tabela 3 é perceptível a importância da DAP para iniciação e escolha dos materiais do projeto, porém não se deve esquecer a ferramenta verdadeiramente eficaz no cálculo do carbono equivalente total presente num projeto, já que a AVC avalia todo o ciclo de vida do projeto.

2.4. Carbono Incorporado nos Materiais de Construção

O impacto ambiental do projeto e, portanto, a intensidade de carbono incorporado depende dos materiais e processos relacionados à produção dos mesmos. O principal foco de investigação atualmente permanece no carbono operacional, reduzindo cada vez mais a sua contribuição para as emissões de carbono. Como resultado, é esperado que o carbono incorporado represente quase 100% do total de emissões de CO₂ de edifícios até 2050 [21]. O projetista deve optar sempre por materiais de baixo carbono levando em consideração o final da vida útil do material de modo a promover a economia circular. Desta forma, para qualquer material, o projetista deve considerar se o produto tem uma declaração ambiental do produto (DAP), pode ser reciclado ou reutilizado e se possui alto teor de carbono, o que pode ser feito para o reduzir. Os materiais de construção mais utilizados são o betão, o aço, a madeira, o alumínio, os tijolos e o vidro, combinados de inúmeras maneiras, sendo assim também inúmeras as combinações e teores de carbono equivalente que se pode obter num projeto [12].

2.4.1. Betão

O betão é o material mais utilizado no setor da construção, anualmente são utilizados cerca de trinta milhares de milhões de toneladas de betão em todo o mundo [44] resultando em mais de dois milhares de milhões de toneladas de dióxido de carbono emitidas anualmente a partir da produção mundial de cimento Portland (CP). A composição típica do betão é uma mistura de cimento, geralmente cimento Portland, e agregado. Como consequência, o betão possui a maior pegada de carbono entre todos os materiais de construção, pois 7% a 8% das emissões globais de carbono vêm exclusivamente do cimento para a produção de betão [45], [46]. O impacto das

estruturas em betão no ambiente deve-se principalmente ao clínquer, que é o principal material utilizado em todo o mundo para produzir o cimento. O valor médio da emissão de CO₂ para um quilo de CP é de 0,86 kg de CO₂ [47], o que inclui a libertação de 0,53 kg CO₂ por quilo de clínquer devido à descarbonatação do calcário. Quando se opta por um betão de maior resistência este possui um maior teor de clínquer e conseqüentemente um maior valor de carbono incorporado. Devido a estes altos impactos, a avaliação de CO₂ ao longo do ciclo de vida do betão e a estratégia para reduzir o consumo de CP na produção de betão tornaram-se uma questão ambientalmente importante [48].

Chen et al. [49] identificam quatro técnicas para a potencial redução de carbono incorporado do betão: materiais cimentícios suplementares; ligantes cimentícios de baixo carbono; agregados provenientes de betão reciclado e betão de alta resistência.

A utilização de **materiais cimentícios suplementares** tem sido a estratégia mais utilizada devido a sua ampla disponibilidade e baixo custo. Por exemplo, *Hossain* [50] concluiu que 20% de substituição de cimento Portland por cinzas volantes leva a 17% menos emissão total de CO₂ numa quantidade unitária de aglutinantes. *Flower e Sanjayan* [51] relataram que a substituição de 25% de cimento Portland por cinzas volantes levaria a uma redução de 13% a 15% de carbono incorporado no betão. Outros estudos afirmam que substituições de CP por 25% a 35% de cinzas volantes, reduz as emissões de CO₂ em 18% a 27% [52]–[54].

Zhao et al. [55] identificaram a maior taxa de redução de carbono incorporado no betão pela substituição de cinzas volantes. Concluíram que se 50% do cimento Portland fosse substituído por cinzas volantes, as emissões de CO₂ seriam reduzidas em 41,4%. *Crossin* [56] abordou a substituição de cimento Portland por escória granulada de alto forno. Concluiu que seria possível uma redução de 47,5% das emissões de CO₂ no betão com a substituição de 70% do CP por escória granulada de alto forno.

No caso dos **ligantes cimentícios de baixo carbono** *McLellan et al.* [57] afirmaram que cerca de 44% a 64% do CO₂ poderia ser reduzido ao optar por betão de Aglutinantes ativados por álcalis (AAAs) em vez de betão de cimento Portland. Da mesma forma, *Abbas et al.* [58] realizaram um estudo ACV em betão AAAs e concluíram que poderia ser reduzido até 61% de CO₂ comparado com o betão de CP do mesmo grau de resistência.

O maior potencial de redução de carbono incorporado foi alcançado por *Batuecas et al.* [59] que realizaram um estudo comparativo de ACV sobre AAAs e mostraram que cerca de 79% do CO₂ poderia ser reduzido usando AAAs em comparação com o cimento Portland. *Chen et al.* [49] apresentam ainda o potencial de redução de carbono incorporado para cada tipo de ligante de baixo carbono, os aglutinantes ativados por álcalis e os aglutinantes de sulfo aluminato de cálcio.

O potencial médio de redução de carbono incorporado de **agregados de betão reciclado** é o mais baixo entre todas as técnicas estudadas. *Braga et al.* [60] afirmam que a utilização de agregados de betão reciclado pode levar à redução de 21,6%, mas também a um aumento de 27,5% de carbono incorporado.

No caso do **betão de alta resistência** *Choi et al.* [61] analisaram o uso de betão de alta resistência em pilares de betão armado de um edifício de 35 andares e identificaram cerca de 10% de redução no carbono incorporado nos pilares usando betão de maior resistência (24 MPa alterado para 35 MPa). Conduziram estudos semelhantes para investigar as reduções de carbono incorporado

devido à melhoria da resistência do betão (dentro de 50 MPa). Nesses estudos foram observadas reduções de 2,5% a 12% de carbono incorporado.

De acordo com Dong [62], 32,5% das emissões de carbono podem ser reduzidas numa ponte. No entanto, materiais mais resistentes normalmente requerem maior quantidade de carbono incorporado por unidade de volume, o que significa que o uso destes materiais para estruturas não garante necessariamente menos emissões de CO₂. Logo, é necessário estabelecer um equilíbrio entre a redução do uso de betão por unidade de volume e a quantidade de carbono incorporado.

Gartner [63] também sugeriu a substituição de cimento Portland por cimento hidráulico alternativo contendo escória de alto-forno e cinzas volantes de combustão de carvão que poderiam resultar em menores emissões totais de CO₂ por unidade de volume de betão de desempenho equivalente. Habert e Roussel [64] estudaram também duas diferentes opções ambientais para uma mistura de betão sustentável. A primeira é a substituição do clínquer por adições minerais no cimento, já na segunda trata-se da redução do volume de betão necessário para um determinado processo de construção. Estimam que as emissões de CO₂ na primeira opção podem ser reduzidas em 15%, e na segunda, em 30%.

Uma técnica também em estudo, para reduzir o carbono incorporado no betão, é a captura e o posterior armazenamento do dióxido de carbono na geração de energia. Depois de capturar o carbono existem várias maneiras de o armazenar, no entanto a mais comum é depositar debaixo do solo. No entanto o processo de transporte do dióxido do carbono para o local do armazenamento é considerado uma das dificuldades neste processo. Do mesmo modo, embora o armazenamento subterrâneo do CO₂ seja uma boa ideia, existem vários riscos associados com esta forma de armazenamento: Por quanto tempo o carbono capturado será armazenado e quão seguro é o armazenamento. Mesmo assim, quando implementada esta tecnologia de captura de carbono em centrais energéticas verifica-se uma redução de emissão de gases de efeito estufa entre 39% a 78% em relação à produção de cimento [16].

Cabeza *et al.* [65] também apresentaram três estratégias globais que mostraram resultados positivos na mitigação de emissões de CO₂ em fábricas de cimento, sublinhando o que já foi anteriormente referido na redução do carbono incorporado no betão. Essas estratégias de redução incluíram: a redução no consumo de energia; captura e armazenamento do dióxido de carbono e a utilização de materiais alternativos.

A absorção de carbono devido à carbonatação do betão durante a utilização e reciclagem da estrutura tem sido cada vez mais foco de interesse devido ao seu impacto ambiental. Yang *et al.* [48] analisaram a absorção de CO₂ ao longo de 40 anos de uso de uma estrutura e 60 anos da atividade de reciclagem. Estimam que a absorção de CO₂ durante o uso foi de 5,5% a 5,7% e durante o processo de reciclagem foi de 10% a 12%. Desta forma, a absorção de CO₂ resultante da carbonatação do betão pode chegar a 15,5% a 17% da emissão de CO₂ da sua produção.

2.4.2. Aço

O aço é o segundo material mais utilizado na construção, depois do betão, o que resulta também numa quantidade significativa de emissão de dióxido de carbono. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), o setor siderúrgico é responsável por cerca de 5% das emissões de dióxido de

carbono mundiais, em que a produção de uma tonelada de aço liberta aproximadamente 1,4 toneladas de CO₂ para a atmosfera [66].

O aço é o único material que pode significar uma verdadeira economia circular devido à sua alta reciclabilidade, normalmente cerca de 90% dos produtos do aço são recuperados no seu fim de vida útil e reciclados para o fabrico de novo aço. As propriedades do aço permanecem inalteradas independentemente das vezes que é reciclado. Na Figura 6 é observada a elevada reciclabilidade do aço em contraste com os materiais betão e madeira [67].

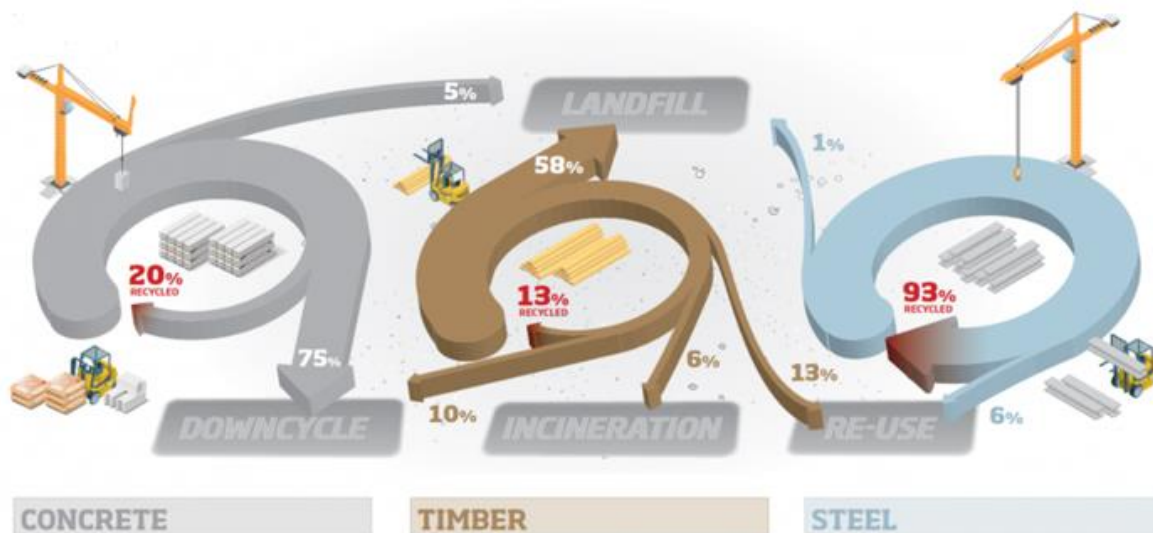


Figura 6 - Reciclabilidade dos diferentes materiais de construção. Imagem adaptada de [67].

Segundo a *Arcelor Mittal*, um dos maiores produtores de aço do mundo, para produzir uma tonelada de aço primário com o método alto forno, são necessários 1400 kg de minérios de ferro, 800 kg de carvão, 300 kg de calcário e 120 kg de aço reciclado. Ao mesmo tempo para cada tonelada de aço são também produzidos subprodutos valiosos, cerca de 400 kg de escoria de alto-forno. No subcapítulo anterior foi abordado uma das possíveis aplicações deste subproduto, a substituição de cimento Portland por escoria de alto-forno pode reduzir a pegada de carbono no fabrico de betão. Como consequência, estes dois processos devem estar ligados, por exemplo entres parcerias de empresas, de modo a promover a redução de emissões [68].

Existem dois principais processos para a obtenção do aço, o processo de alto forno (BF-BOF, derivado do inglês *Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace*) e o processo de arco elétrico (EAF, derivado do inglês *Electric Arc Furnace*). A principal diferença entre estes dois processos é o diferente uso de matérias-primas, BF-BOF utiliza ferro fundido como principal matéria-prima enquanto o processo EAF utiliza 100% aço reciclado. O processo BF-BOF consome grandes quantidades de carvão como matéria-prima e também energia, além de produzirem grandes quantidade de CO₂. Já no processo EAF o aço reciclado é utilizado como principal matéria-prima, não existindo a produção de ferro e o consumo de carvão. A EAF utiliza a eletricidade como principal fonte de energia, que é muito mais limpa, principalmente se houver a possibilidade de ser obtida através de fontes renováveis. Assim, comparando os dois processos de fabrico é claramente visível a vantagem em utilizar o processo EAF, uma vez que oferece um menor gasto energético e uma redução das emissões de CO₂. No entanto, a substituição do processo BF-BOF para o processo EAF reduz a extração de minério de ferro, mas aumenta a procura de aço reciclado. Esse aumento de procura pode ser um problema

porque ainda é incerto se haverá aço reciclado suficiente para poder suportar o desenvolvimento do processo EAF [69], [70]. A *Arcelor Mittal* possui neste momento o aço *XCarb* que é obtido através do processo EAF com altos níveis de aço reciclado e 100% energia renovável, alcançando um baixo nível de carbono incorporado no aço [68].

Do mesmo modo, podem ser aplicadas outras tecnologias de baixo carbono no processo de fabrico do aço, uma dessas tecnologias é a recuperação de calor para gerar energia. Por exemplo, a recuperação de calor residual no processo de sinterização pode ser usada posteriormente para o aquecimento ou geração de energia [69], [70].

Ates [71] descreve que a implementação de uma melhoria da eficiência energética e uma produção mais limpa na produção de ferro e aço turca resulta, entre 2010 e 2030, numa redução de 37% e 50%, respetivamente ao consumo energético e à emissão de carbono. No estudo realizado por Wang *et al.* [72] foi apresentada uma melhoria no processo BF-BOF e obteve-se uma redução de 24 milhões de toneladas de CO₂, no mesmo estudo foi também aplicada a têmpera a seco de coque que resultou na redução de 3,52 milhões de toneladas de CO₂. Dutta e Mukherjee [73] estudaram a injeção de carvão pulverizado, melhoria no sistema de controlo do processo alto-forno e a recuperação do calor residual e apresentaram um potencial de redução de emissões de CO₂ em 2030 de 8%. Ma *et al.* [74] aplicaram tecnologias específicas de aproveitamento de energia e com a implementação do processo EAF preveem uma redução de emissão de CO₂ de 2241 kg por tonelada em 2010 para 1346 kg por tonelada em 2050.

Chen *et al.* [75] realizaram um artigo de revisão bibliográfica sobre as emissões de carbono do aço e apresentaram uma descrição do processo de obtenção do mesmo, juntamente com as principais fontes de emissão em cada fase do processo de fabrico. A fabricação do ferro, para posterior obtenção do aço, é a etapa do processo com maior consumo de energia e emissões na indústria siderúrgica, contribuindo com mais de metade de todas as emissões de carbono da indústria [76]. Do mesmo modo, Chen *et al.* [75] também apresentou 10 possíveis estratégias para a redução do carbono incorporado do aço, das quais fazem parte: recuperação do gás de exaustão do forno e do calor residual; uso de combustíveis alternativos e energia renovável; fabricação do ferro alternativa/melhorada; agentes redutores alternativos; matérias-primas alternativas; captura, transporte e armazenamento do carbono; maior eficiência do forno; processo de fabricação de coque alternativo; processos de fundição/laminação alternativos e processo de aglomeração alternativo/melhorado.

O processo de captura, transporte e armazenamento do CO₂ tem sido uma técnica de principal foco de investigação para reduzir as emissões tanto no betão, como anteriormente referido, mas também no fabrico do aço e outros materiais. Feng *et al.* [77] elaboraram uma pesquisa sobre uma nova ideia de processo que visa reduzir o custo e o consumo de energia por unidade de CO₂ capturado. Depois de capturado o carbono, além de poder ser armazenado este tem uma ampla gama de aplicações, inclusive na indústria siderúrgica. Wei *et al.* [78] observam que a utilização de CO₂ no processo de fabricação de aço, pelo processo EAF, resultou numa maior eficiência, pureza e menor impacto ambiental. Valluri *et al.* [79] referem mais oportunidades de utilização de dióxido de carbono capturado.

2.4.3. Madeira

Apesar dos materiais mais utilizados na construção serem o betão e o aço, a preocupação com as emissões de carbono incorporadas nos materiais tem levado os intervenientes a considerar o uso da madeira como material de construção. O uso da madeira evita os processos de fabrico intensivos em carbono, como a produção de clínquer e a fundição do aço, ao mesmo tempo a plantação de árvores, necessária para tornar o uso de madeira em larga escala viável, também leva à captura e armazenamento de dióxido de carbono da atmosfera. Este processo de sequestro de carbono refere-se ao CO₂ que é removido da atmosfera durante o crescimento da árvore através do processo de fotossíntese [80].

Nas duas últimas décadas, uma nova classe de produtos estruturais em madeira tem sido desenvolvida usando resíduos industriais ou madeira de qualidade inferior ou de diâmetros menores como matéria-prima. Estes produtos excepcionalmente fortes e versáteis são conhecidos como madeira maciça, que cada vez mais é utilizada na construção à medida que se começa a reconhecer e tirar proveito das suas vantagens. A madeira laminada cruzada (CLT, derivado do inglês *Cross laminated timber*) foi desenvolvida pela primeira vez na Europa no início da década de 1990 e é a madeira maciça mais utilizada, é também considerada a alternativa mais adequada a materiais de construção convencionais, como o betão. A madeira CLT é geralmente construída com camadas ímpares coladas umas às outras e dispostas ortogonalmente. Atualmente cerca de 70% da produção mundial de CLT situa-se na Europa. Na Figura 7 é possível observar os diferentes tipos de madeira maciça [81], [82].

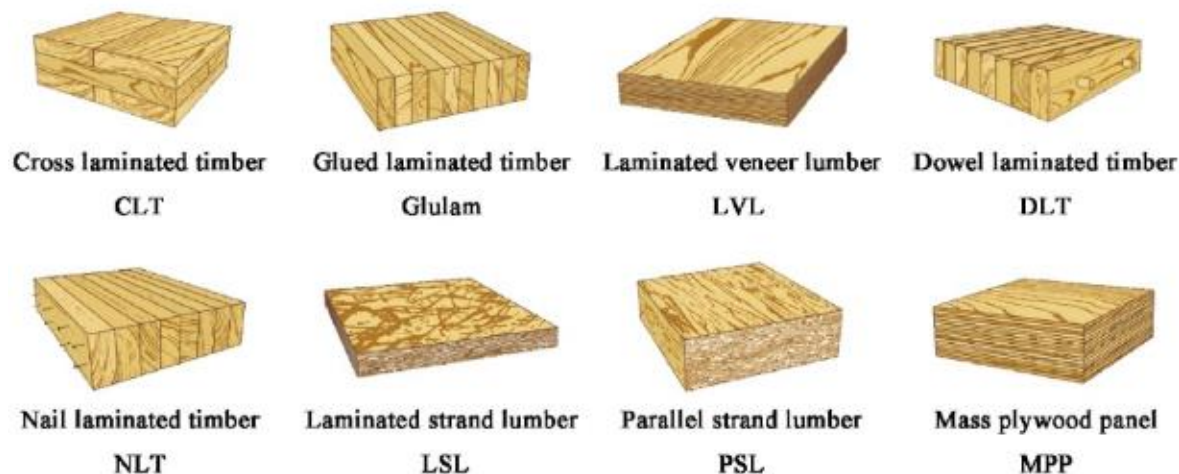


Figura 7 - Diferentes tipos de madeira maciça. Imagem adaptada de [81].

Ao longo do tempo têm sido realizados estudos a demonstrar que edifícios de madeira CLT apresentam sempre menos carbono incorporado que edifícios de materiais convencionais. Além disso os painéis CLT podem ser reciclados ou reutilizados, o que permite reduzir ainda mais a sua pegada de carbono. *Younis e Dodoo* [82] realizaram uma revisão de artigos que tinham como assunto o impacto da pegada de carbono de edifícios construídos em madeira CLT. Em média os resultados desses estudos revelaram que com o uso de madeira CLT ocorre uma redução de 40% na emissão de carbono. Esta redução de gases efeito estufa é ainda mais acentuada se for considerado o sequestro de carbono na avaliação.

Buchanan e Levine [83] mostraram que edifícios de madeira necessitam de menor energia no processo de fabrico resultando numa menor quantidade de emissões de carbono relativamente a outros materiais, como o tijolo, alumínio, aço e betão. *Nässén et al.* [84] compararam edifícios com estruturas de madeira e betão com o objetivo de avaliar as suas emissões de dióxido de carbono. Segundo os autores a estrutura de madeira causa menores emissões de CO₂, no entanto as estruturas de betão têm impactos de carbono semelhantes à estrutura de madeira quando a mesma é queimada para aproveitamento de energia, na etapa de fim de vida, sem o processo de captura e armazenamento de carbono (CCS) [13].

Ching e Carstensen [85] realizaram um estudo sobre a otimização de treliças mistas em aço e madeira para um design mais reduzido de carbono incorporado. Para as soluções de estruturas sujeitas a restrições de peso, a solução final encontrada é uma treliça toda em aço, pois o aço é 18,3 vezes mais rígido que a madeira, mas somente mais 13,8 vezes mais pesado que a madeira, ou seja, o aço apresenta uma rigidez 1,3 vezes superior à madeira por unidade de peso. Em contraste, quando o projeto é sujeito a restrições de potencial de aquecimento global, as soluções finais consistem numa treliça toda ela em madeira, uma vez que este material é 2,6 mais rígido que o aço por unidade de massa de carbono incorporado. Apesar de a solução de treliças só em madeira ser a solução mais vantajosa relativamente ao carbono incorporado, nem sempre é a solução mais vantajosa para resistir aos esforços impostos na estrutura. Nesse aspeto o artigo estudou treliças mistas de aço e madeira, em que todos os elementos de tração foram substituídos por aço e os elementos de compressão continuaram a ser de madeira. Com este design de treliças é possível reduzir a quantidade de CO₂e em 6,8% e 2,6%, para a viga encastrada e viga simplesmente apoiada, respetivamente, em comparação com soluções de treliças somente em aço. O design estudado das treliças, bem como o seu potencial de aquecimento global, é observado na Figura 8 .

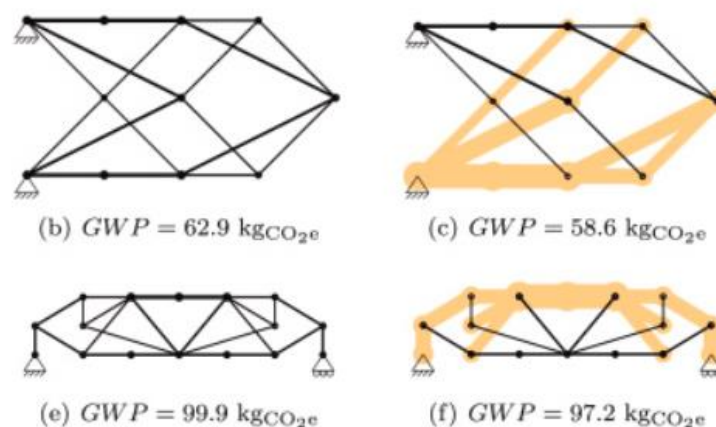


Figura 8 - Comparação do GWP entre treliças somente de aço e treliças de madeira e aço. Imagem adaptada de [85].

Apesar das vantagens evidentes do uso da madeira no setor da construção existem alguns aspetos que devem ser tidos em conta. O uso da madeira provoca uma grande desflorestação e para contrariar esse problema sempre que uma árvore é cortada deve ser substituída por outra, ou seja, a madeira deve ser sempre proveniente de florestas geradas de forma sustentável. Desta forma, o carbono sequestrado apenas deve ser contabilizado no crescimento da nova árvore, se esta não for plantada o carbono sequestrado não pode ser contabilizado na análise ACV. Outro aspeto importante é o fim de vida da madeira, geralmente existem três possibilidades nesta etapa: reciclagem, queima com aproveitamento da energia e deposição em aterro. *Morris et al.* [86]

realizaram um estudo e concluíram que o carbono incorporado da madeira laminada colada (*Gulam*) é fortemente influenciado pelos três tipos de cenários de fim de vida, a contabilização do carbono sequestrado e o tempo de emissão considerado. O mesmo revelou que considerando diferentes aspectos de fim de vida os resultados para o carbono incorporado da madeira *Gulam* são bastante distintos. Hawkins [87] comparou o carbono incorporado do betão, aço e madeira para a estrutura de um edifício de seis andares. Foi efetuada uma análise *cradle-to-grave* em que são considerados três tipos de ciclo de vida para a madeira: *Timber 1*, *Timber 2* e *Timber 3*. Na *Timber 1* é contabilizado o sequestro de carbono e no fim de vida 55% da madeira é reciclada, 44% da madeira é queimada com aproveitamento de energia e apenas 1% é colocada em aterro. Em *Timber 2* é considerado o pior caso, o sequestro de carbono não é contabilizado, ou seja, não é plantada uma árvore para substituir a cortada, e é também admitido um fim de vida igual à *Timber 1* (55% da madeira é reciclada, 44% da madeira é queimada com aproveitamento de energia e apenas 1% é colocada em aterro). Para o caso *Timber 3* é indicado o cenário mais otimista, é contabilizado o sequestro de carbono e é admitido que 90% das emissões de combustão são capturadas usando a bioenergia com captura e armazenamento do carbono (BECCS do inglês *bioenergy with carbon capture and storage*). A captura do carbono não é permitida num padrão ACV, mas foi utilizado no estudo como um cenário hipotético. Na Figura 9 é possível observar as emissões de carbono para a estrutura de betão, aço e aos três cenários da madeira.

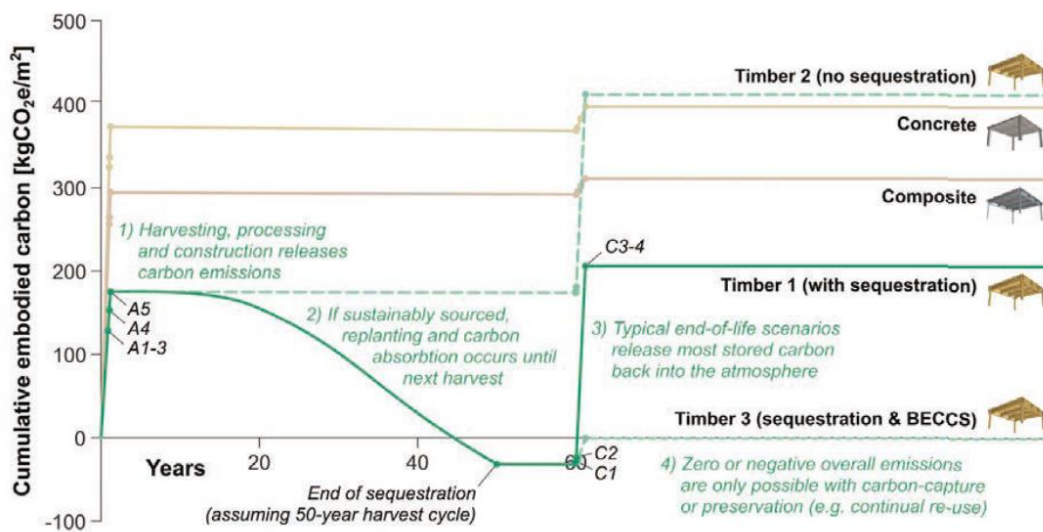


Figura 9 - Emissões de carbono dos diferentes materiais da estrutura em estudo. Imagem adaptada de Hawkins [87].

Com a observação da Figura 9 é possível perceber que a consideração do carbono sequestrado nem sempre é clara na aplicação da análise ACV. O mesmo deve ser calculado e relatado em todo o ciclo de vida, principalmente no módulo D e não somente nos módulos A1-A5, avaliações do ciclo de vida somente com os módulos iniciais pode induzir uma falsa redução de carbono incorporado, uma vez que não é considerado o seu fim de vida.

2.4.4. Tijolo

O tijolo é um material muito comum para a construção de paredes, fachadas, pavimentos e até mesmo algumas fundações. O tijolo é produzido através da argila cozida a elevadas temperaturas,

mas também pode ser produzido através do cimento ou cinzas volantes. As emissões vêm tanto do elevado consumo de energia, causada pela queima de combustíveis fósseis no cozimento, como dos processos relacionados com a fabricação de argila. A fim de diminuir os impactos ambientais e alcançar o desenvolvimento sustentável da indústria da construção tem-se tentado encontrar soluções para diminuir o seu carbono incorporado [12], [88].

De acordo com Reddy [89] os tijolos de lama estabilizada são uma alternativa energeticamente eficiente em contraste com os tijolos de argila cozida. São blocos maciços fabricados pela compactação de uma mistura de solo, areia, cimento e água. Estes tijolos economizam cerca de 60 a 70% da energia usada em tijolos de argila cozida e podem aproveitar resíduos industriais como pó de pedra e cinzas volantes na sua composição [13].

Raut *et al.* [90] realizaram um trabalho experimental cujo objetivo era desenvolver o fabrico de tijolos sustentáveis através da utilização de resíduos. Neste caso os resíduos utilizados são o fosfogesso, proveniente da produção de ácido fosfórico, e cinza de casca de arroz, proveniente da moagem do arroz. Foi produzido um tijolo do tipo H com diferentes proporções de fosfogesso, cinza de casca de arroz e cimento. O tijolo do tipo H apresentou melhores propriedades do que os tijolos de cinzas volantes e argila cozida: melhor resistência à compressão, flexão e corte, menor absorção de água e melhor isolamento térmico.

Xin *et al.* [91] experimentaram reutilizar resíduos de vidro provenientes de locais domésticos ou comerciais, como bares, estádios, hotéis, restaurantes, etc. em contraste aos tijolos de argila cozida. Verificou-se que as melhores propriedades do tijolo foram obtidas com a adição de 15% de resíduos de vidro à argila. Obteve-se uma redução de temperatura de cozimento, resultando numa redução de gasto energético e consequentemente emissões de dióxido de carbono. O novo tijolo apresenta também uma menor condutividade térmica em relação ao tijolo padrão resultando numa redução da emissão de carbono operacional.

Segundo um guia da LETI [12] deve-se optar por uma argamassa mais macia que o tijolo, para facilitar a sua remoção durante a demolição sem danificar ou partir os tijolos. Contudo tijolos danificados podem ser triturados e usados em agregados. A escolha de argamassa e tijolo deve ser otimizada para um baixo teor de carbono, mas suficiente para o propósito possibilitando a recuperação de tijolos, dando ênfase à economia circular.

2.4.5. Alumínio

A produção de alumínio primário requer um alto consumo de energia, quase 10 vezes mais do que o aço. Devido ao processo intensivo em energia o carbono incorporado do alumínio é elevado, especialmente se for usado em grandes volumes no projeto. Com o objetivo de reduzir o carbono incorporado tanto quanto possível, a energia utilizada no processo de fabrico deve ser gerada através de fontes renováveis. Se o uso do alumínio na estrutura for inevitável, deve ser importado de países com uma infraestrutura de energia amplamente renovável, por exemplo Noruega ou Islândia. Quando o alumínio é produzido em países distantes do mercado europeu (ou seja, Austrália, China, Brasil, Índia, Guiné, Indonésia, Jamaica, Rússia e Suriname), o carbono incorporado aumenta devido às longas distâncias de transporte entre a extração, processamento e fabrico do material, se o seu destino final for na Europa [12].

Em contrapartida, o alumínio é altamente reciclável, as suas propriedades permanecem inalteradas independentemente das vezes que é reciclado. No mundo, cerca de 75% de todo o alumínio alguma vez produzido ainda se encontra em uso. O processo de reciclagem apenas consome cerca de 5% da energia necessária para processo de fabrico primário. Contudo, a quantidade de alumínio reciclado no mercado é insuficiente para atender às necessidade do mercado da construção e será sempre por isso necessária a produção de alumínio primário. É importante recuperar o máximo possível do alumínio quando este chega ao seu fim de vida útil num determinado projeto [12].

Seo *et al.* [92] estudaram o impacto da origem do alumínio em janelas na Austrália. Assim, o estudo comparou o impacto de usar alumínio primário ou reciclado e também comparou o uso de diferentes fornecedores para o fabrico do alumínio, sediados na China ou na Austrália. Quando o alumínio primário foi utilizado como matéria-prima para as janelas, o alumínio apresentou uma contribuição de emissão de carbono de 43,4 kg de CO₂e, isto é, superior em 88%. No entanto, quando se utilizou 10% de alumínio reciclado, foi possível obter uma redução de 4% no carbono incorporado. Quando foi utilizado 30% de alumínio reciclado, foi obtida uma redução de 8,7 kg CO₂e. Relativamente aos diferentes fornecedores, foi verificado que o carbono incorporado do alumínio primário chinês é superior 4,3 kg de CO₂e relativamente ao alumínio primário australiano, o que resultou num aumento de 11% do carbono incorporado das janelas feitas do alumínio chinês. Isto porque, o alumínio chinês consome mais energia no processo de fabrico. Embora o alumínio chinês seja enviado da China, as emissões de carbono relacionadas com o transporte são quase insignificantes, cerca de 0,28 kg de CO₂e. O carbono incorporado dos diferentes alumínios é observável na Figura 10.

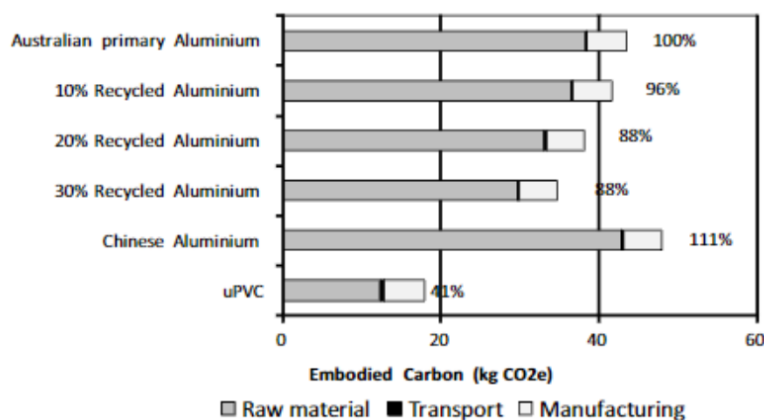


Figura 10 - Carbono incorporado dos alumínios. Imagem adaptada de [92].

2.4.6. Vidro

O vidro de Soda-cal representa 90% de toda o vidro fabricado. É composto de 70-74% de sílica, juntamente com carbonato de sódio, cal, óxido de magnésio e óxido de alumínio para melhorar seu desempenho. Dado as suas propriedades translúcidas únicas, o vidro é usado para fachadas, janelas, claraboias, divisórias, lâmpadas e tubos.

O vidro reciclado pode ter um segundo uso como o isolamento ou agregados, por exemplo, para o fabrico de betão. As taxas de reciclagem de vidro são difíceis de aplicar à construção e existem poucos dados relativamente ao carbono incorporado de vidro reciclado em contraste com o vidro primário. Na maior parte das vezes os resíduos de vidro são enviados para a reciclagem, mas na

verdade não são reciclados para obtenção de vidro, mas sim para outras aplicações, como por exemplo agregados para fabrico de outros materiais, como apresentado anteriormente [12].

É importante realçar a importância de observar o carbono total do vidro quando incorporado no projeto. Um vidro fino de baixo carbono pode parecer a opção correta nas etapas iniciais, contudo é uma falsa redução de carbono se o calor for facilmente perdido no uso da estrutura, resultando numa maior emissão de CO₂ no uso. Por outro lado, em alguns casos, o vidro duplo pode ser mais eficiente em termos de emissões de carbono do que vidros triplos, pois a pegada de carbono incorporado de vidro triplo pode ser maior que a redução do carbono operacional no tempo de vida do edifício. Quando é necessário o quadro da janela, a madeira é geralmente o melhor material, apresenta uma vida mais longa em relação ao PVC e apresenta um melhor desempenho térmico que o alumínio. Para diminuir as emissões resultante do vidro deve-se adotar janelas de tamanhos padrões, o que facilita a reutilização do vidro, em vez de ser reciclado ou depositado num aterro [12].

2.4.7. Impacto dos materiais no carbono incorporado e estratégias para a sua redução

Como anteriormente apresentado, são inúmeras as estratégias já aplicadas e em estudo com o intuito de reduzir ao máximo as emissões de dióxido de carbono libertadas no fabrico de materiais. Nesse sentido precisam de ser adotadas medidas que visem a redução de CO₂. A adoção da Economia Circular é o ponto de partida para o setor da construção desempenhar um papel estratégico na concretização dessas reduções. Orsini e Marrone [93] analisaram a literatura científica sobre materiais de baixo carbono e apresentaram várias estratégias e ações na redução do carbono incorporado nos materiais, denominadas *Low-carbon Emission Approaches* (LEAs). As 8 estratégias específicas, construídas de forma original, fruto da organização crítica da revisão da literatura são:

LEA 1 - Utilização de materiais alternativos: Diz respeito a materiais complementares com baixa emissão de CO₂ para fabricar produtos de construção como o cimento ou betão.

LEA 2 - Utilização de materiais reutilizáveis, reciclados ou resíduos: Estratégia cujo objetivo é implementar os princípios da Economia Circular, ou seja, na utilização de materiais reciclados provenientes de demolições ou de resíduos.

LEA 3 - Utilização de materiais naturais: Esta abordagem visa desenvolver novos materiais de construção usando materiais naturais, como madeira, terra e argila.

LEA 4 - Utilização de materiais locais: Assenta na utilização de materiais locais reduzindo a distância entre as matérias-primas e o local de produção.

LEA 5 - Inovação do processo produtivo: Baseia-se na implementação de novas tecnologias como a *Carbon Capture and Storage* (CCS) e *Carbon Capture and Utilization* (CCU).

LEA 6 - Utilização de fontes de energia renováveis: Esta estratégia baseia-se na implementação de um sistema de produção de energia renovável.

LEA 7 - Melhoria do desempenho: Estratégia cujo objetivo é melhorar o desempenho dos materiais, reduzindo a quantidade de matérias-primas necessárias para atingir o mesmo nível de desempenho.

LEA 8 - Aplicações corretas: Incide na aplicação de materiais de construção durante a fase de construção, a fim de evitar desperdícios de materiais e baixo desempenho de aplicação.

O artigo concluiu que para reduzir o carbono incorporado nos materiais de construção é possível usar materiais alternativos (redução de carbono até 40%), usar materiais naturais (até 90%), introduzir matérias-primas secundárias (até 40/50%), implementar sistemas CCS e CCU no processo produtivo (até 70%), aumentar a utilização de energia de fontes renováveis (até 60%). Na Tabela 4 é possível observar os valores típicos de carbono incorporado para diferentes materiais.

Tabela 4 - Carbono incorporado (Fator de carbono) dos diferentes materiais de construção.

Material	Tipo	Detalhes	Fator de Carbono (kg CO ₂ e/kg)
Betão	No local: Substrutura; superestrutura.	C 32/40 (32/40 MPa) com 100% de cimento Portland [35].	0,149
		C 32/40 (32/40 MPa) substituição 15% de cimento Portland por cinzas volantes [35].	0,139
		C 32/40 (32/40 MPa) substituição 40% de cimento Portland por cinzas volantes [35].	0,109
		C 32/40 (32/40 MPa) substituição 25% de cimento Portland por escória granulada de alto forno [35].	0,120
		C 32/40 (32/40 MPa) substituição 70% de cimento Portland por escória granulada de alto forno [35].	0,063
		C 40/50 (40/50 MPa) com 100% de cimento Portland [35].	0,172
		C 40/50 (40/50 MPa) substituição 40% de cimento Portland por cinzas volantes [35].	0,123
		C 40/50 (40/50 MPa) substituição 70% de cimento Portland por escória granulada de alto forno [35].	0,072
	Betão pré-moldado	100% de cimento Portland [35].	0,148
		Substituição 50% de cimento Portland por escória granulada de alto forno [35].	0,097
Aço	Barras de reforço	Produzido em <i>Gerlafingen</i> (Suíça) com 75% de aço reciclado [30].	0,368
		Produzido em <i>San Nicolás de los Garza</i> (México) com 100% de aço reciclado [30].	0,451
	Secção estrutural laminada a quente	Produzido no Norte da América com 97% de ferro reciclado [30].	0,687
		Processo a arco elétrico com 90% de aço reciclado, mas com 92% de energia não renovável [30].	0,930
	Tubos laminados a quente	Processo a arco elétrico com 98% de energia renovável (fabricado na Noruega) [30].	0,211
Tijolo	Tijolo de barro	[35]	0,213

Tabela 4 – Continuação.

Material	Tipo	Detalhes	Fator de Carbono (kg CO _{2e} /kg)
Madeira	Madeira estrutural	CLT sem considerar o carbono sequestrado [35].	0,437
		CLT considerando o carbono sequestrado [35].	-1,20
	Chão/estrutura	Glulam sem considerar o carbono sequestrado [35].	0,512
		<i>Softwood</i> sem considerar o carbono sequestrado [35].	0,263
		<i>Softwood</i> considerando o carbono sequestrado [35].	-1,29
Alumínio	Perfil	Produzido na europa com 31% de alumínio reciclado [35].	6,83
	chapa	Produzido na europa com 31% de alumínio reciclado [35].	6,58
Vidro	Vidro duplo	2,5 kg por milímetro de espessura [35].	1,63
	Vidro triplo	2,5 kg por milímetro de espessura [35].	1,75

2.5. Relação entre o Carbono Incorporado e Carbono Operacional

Na quantificação do carbono total de uma estrutura é efetuado um cálculo do carbono incorporado e também o cálculo do carbono operacional. Na conceção do projeto, apesar de frequentemente só se incluir cálculos do carbono incorporado dos materiais, deve existir uma preocupação com a redução do carbono operacional resultante do consumo de energia de um edifício na sua fase de uso. Existem diversos estudos realizados sobre a contribuição do consumo de energia na fase de uso para a pegada total das emissões de carbono de todo o ciclo de vida do edifício.

Estudos [94], [95], [96] mostraram que até 85% do consumo total de energia ao longo do ciclo de vida é atribuível à fase de operação, enquanto o fabrico de materiais de construção, a respetiva montagem e a renovação representam um total de 15% do consumo total de energia. Citherlet e Defaux [97] descobriram que, ao reduzir a energia operacional em 20%, melhorando o isolamento térmico da fachada, a emissão de carbono em todo o ciclo de vida pode ser reduzida em cerca de 16%. Se o isolamento for aumentado com a aplicação de janelas de vidro triplo com revestimentos de baixas emissões a energia de operação pode ser reduzida em 54%, resultando numa redução total de 49% na energia, e consequente do *Whole life carbon* da estrutura [98]. Num estudo realizado em Lisboa verificou-se que ao longo dos 75 anos de vida útil dos edifícios, a fase de uso foi responsável por 69% a 83% pelo consumo de energia primária e emissões de GEE [99].

Feehan *et al.* [100] estudaram a otimização de fachadas em edifícios para reduzir o carbono operacional ao longo de 50 anos. O estudo incidiu sobre duas variáveis, a espessura da camada de isolamento numa mesma configuração de fachada e a aplicação de vidros duplos ou triplos. Os resultados da análise mostram que a aplicação de vidros triplos apresenta uma redução de 8,3% do carbono emitido ao longo dos 50 anos de operação do edifício. No caso do isolamento, quando se

optou por uma maior camada de isolamento, neste caso quase o dobro, houve uma redução de 3,25% do carbono operacional ao longo da vida útil do edifício.

Um estudo efetuado na China [101] incidiu sobre a influência do design da parede sobre o consumo de energia de uma estrutura pré-fabricada ao longo do ciclo de vida de 15 anos. No fim do estudo concluiu-se que diferentes escolhas de materiais e várias espessuras do mesmo material podem ter influências distintas no consumo de energia operacional do edifício. Foram indicadas a escolha de material mais adequado para a camada mais externa, isolamento externo e interno, bem como a distância ideal do espaço de ar que deve existir na parede. Neste caso de estudo verificou-se que uma espessura de ar maior do que 20 mm apresenta uma redução no consumo de energia operacional, e conseqüentemente uma redução nas emissões de carbono operacional, no entanto para espessuras superiores a 40 mm não se observa nenhuma vantagem.

Citherlet e Defaux [102] compararam num estudo três casas: uma casa padrão suíça (casa A); uma casa de baixo consumo de energia (casa B) e por último, uma casa com um maior isolamento e tecnologias incorporadas, como um sistema de recuperação de calor de ventilação, coletores solares e painéis fotovoltaicos (Casa C). Tendo em conta os valores de energia renovável e não renovável na suíça para a obtenção de energia, os resultados mostraram que o consumo de energia não-renovável foi reduzido em 33% na casa B e 66% na casa C em relação à casa A. Relativamente aos impactos dos gases com efeito de estufa, principalmente o carbono, as duas casas de baixo consumo energético revelam reduções significativas (62%) em relação à casa padrão suíça [103].

Em Portugal, nos edifícios residenciais, a energia é consumida em 60% na forma de eletricidade, enquanto o gás natural corresponde a 40% do consumo [104]. Na Figura 11 é possível observar que os combustíveis fósseis importados representaram 76% da oferta de energia primária em Portugal em 2020 (24% de gás natural, 6% de carvão e 43% de petróleo) [105]. É importante incluir no projeto fontes de energia renováveis para diminuir ao máximo o carbono operacional.

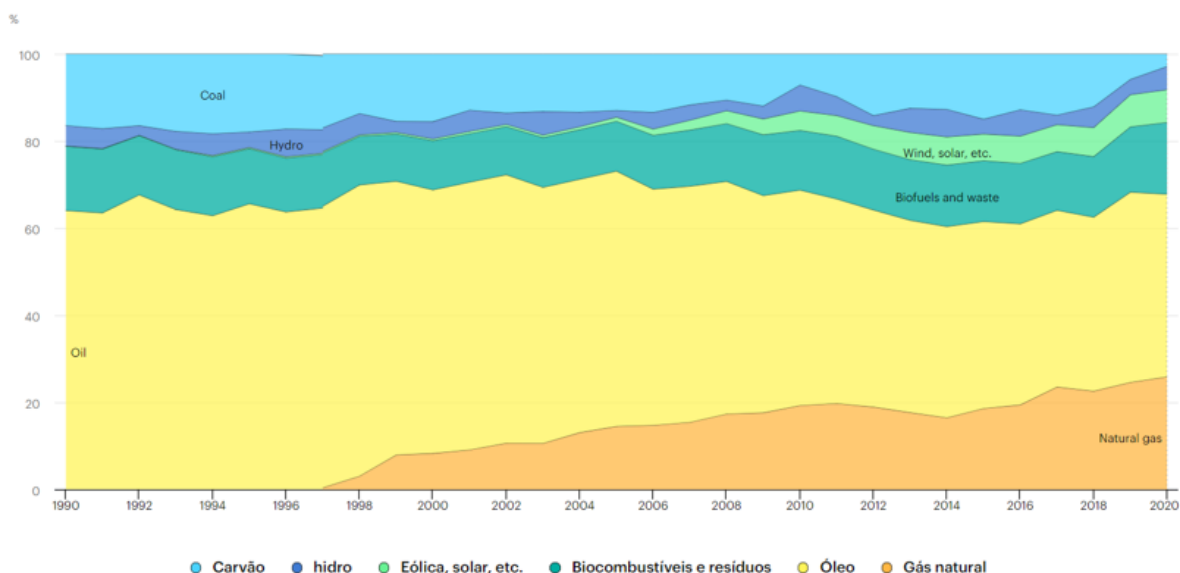


Figura 11 - Fornecimento total de energia por fonte, Portugal 1990-2020. Imagem adaptada de IEA [106].

Segundo Atmaca e Atmaca [107], que pretenderam avaliar as emissões de dióxido de carbono em edifícios na Turquia, é possível reduzir a pegada de carbono com a implementação de estratégias de baixo carbono. Neste artigo concluíram que: aquecimento, ventilação e ar condicionado de alta eficiência permitem evitar 2,05 kg CO₂e/m²/ano; Iluminação LED pode evitar 2,4 kg CO₂e/m²/ano;

gestão de águas pluviais (aproveitar a água da chuva) chega a evitar 0,55 kg CO₂e/m²/ano; isolamento evita a emissão de 9,77 kg CO₂e/m²/ano e recursos energéticos renováveis (painéis fotovoltaicos) evita 1,86 kg CO₂e/m²/ano. No total, pode ser evitada a emissão de 18,47 kg CO₂e/m²/ano, o que representa cerca de 37,79% da pegada total de carbono do edifício.

2.6. Elementos de construção de um edifício

A construção de qualquer estrutura ou edifício é dividida em elementos de construção, desde as fundações aos acabamentos finais. No cálculo das emissões do dióxido de carbono equivalente é necessário entender quais os elementos que devem ser incluídos e não incluídos na quantificação do carbono. Na Tabela 5, adaptada de LETI [12] e RICS [10], são indicados quais os elementos críticos, divididos em três níveis, a considerar na quantificação do carbono segundo RICS. Para além de entender quais os elementos a considerar no cálculo das emissões é também necessário comunicar ao público-alvo os elementos que foram ou não considerados no estudo de modo a revelar uma maior transparência nos resultados da quantificação do carbono equivalente. Na Figura 12 é possível observar os elementos de construção.

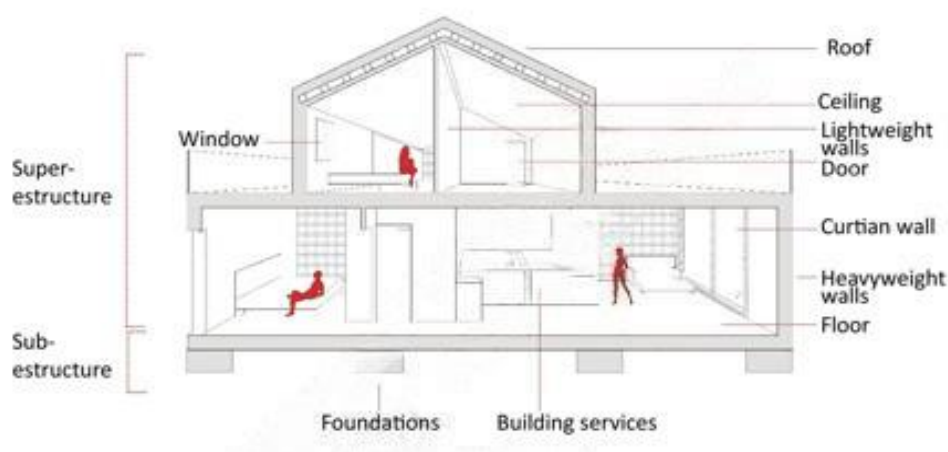


Figura 12- Elementos de construção de um edifício. Imagem adaptada de [138].

Tabela 5 - Elementos críticos a serem incluídos na avaliação do carbono pela RICS. Tabela adaptada de RICS [10] e LETI [12].

Grupo nível 1	Grupo nível 2	Grupo nível 3
Subestrutura	Subestrutura	Fundações padrão
		Sistemas de fundação especiais
		Construção do piso mais baixo
		Escavação da cave
		Paredes para a cave
Superestrutura	Superestrutura	Estrutura de aço
		Chapa de aço autoportante
		Revestimentos de betão para estrutura de aço

Tabela 5 – Continuação.

Grupo nível 1	Grupo nível 2	Grupo nível 3
		Estrutura de betão
		Estrutura de madeira
		Outros tipos de estrutura
	Pisos superiores	Pisos
	Coberturas	Estrutura da cobertura
		Cobertura
		Sistemas de cobertura especiais
		Luzes do teto, claraboias e aberturas.
	Escadas e rampas	Estrutura de escadas e rampas
	Fachada	Paredes tanto acima do solo como abaixo do solo
		Proteções contra o sol e chuva
	Janelas e portas externas	Janelas externas
	Paredes divisórias	Paredes divisórias
Serviços de construção	Aquecimento e ar condicionado	Aquecimento central e local
		Arrefecimento central e local
		Ar condicionado
	Ventilação	Ventilação local e central
		Extração e controlo de fumos
	Instalações e sistemas de combustíveis	Armazenamento de combustível
Distribuição de combustível		
Trabalhos externos	Estradas e pavimentos	Estradas, pavimentos e revestimentos especiais

2.6.1. Subestrutura

A subestrutura pode variar entre pequenas fundações de tiras a grandes paredes subterrâneas que, na maior parte dos casos, é feita em betão armado. A subestrutura de um edifício é geralmente o elemento que mais contribui para o desempenho estrutural, uma vez que suporta toda a superestrutura. Neste elemento são usadas grandes quantidades de material, nomeadamente betão, e por isso é dada o máximo de atenção à otimização do design. A eliminação de caves e estacionamentos subterrâneos, redução do peso do edifício e redução na quantidade de reforço são estratégias que visam a redução de carbono incorporado na subestrutura. No entanto, a adoção de aço de reforço 100% reciclado, a redução de desperdício, utilização de betão pré-modelado sempre que possível, uma vez que maior percentagem de cimento pode ser reduzida, alternativas de betão com agregados reciclados e isolamentos abaixo do solo com menor teor de carbono, como vidro espumado, são também estratégias que devem ser aplicadas para a redução do carbono [12]. Peter Laidler [108] estudou o impacto de uma série de alternativas de sistemas de fundação para a casa *Quarry House*. A casa *Quarry House* é uma casa concebida para atingir a neutralidade carbónica, é construída através de caixas de madeira compensada sem adição de formaldeído,

corde CNC e aparafusadas entre si de modo a formar estruturas ortogonais, o denominado sistema *U-build*. Como esperado, a solução com o maior nível de carbono é a solução mais convencional: um pavimento de betão e aço sobre sapatas de betão. Pelo contrário, a solução com o nível de carbono mais baixo é a solução com um pavimento de madeira suspenso sobre pneus usados cheios de agregados de pedra. Na Figura 13 é possível observar as seis soluções de subestrutura analisadas no estudo.

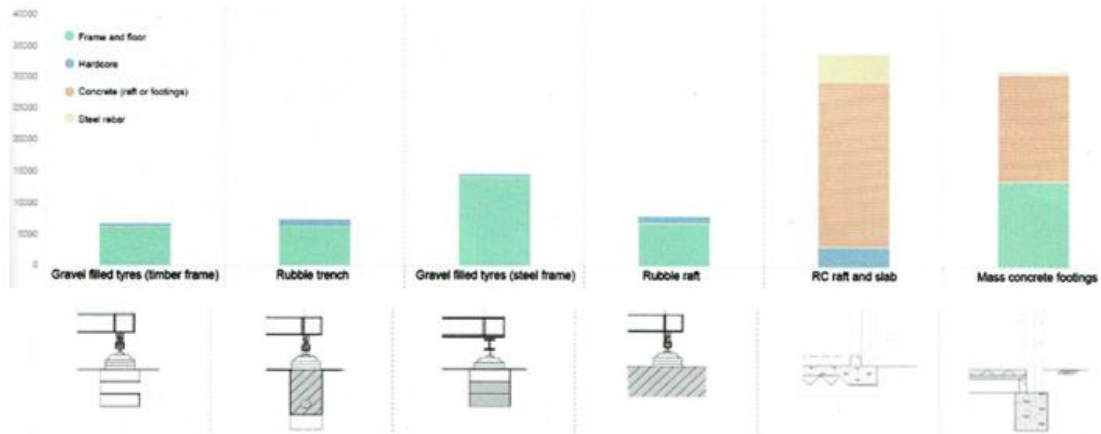


Figura 13 - Comparação do carbono incorporado das seis diferentes soluções de subestrutura. Imagem adaptada de [108].

2.6.2. Superestrutura

A Superestrutura diz respeito à estrutura do edifício necessária para suportar as lajes, telhados e acabamentos internos e proporciona estabilidade. Normalmente, uma superestrutura é composta de colunas, lajes, paredes e elementos de contraventamento. Para reduzir o carbono incorporado neste elemento pode-se preservar e reutilizar estruturas existentes, otimizar os pontos de carregamento, projetar fachadas mais leves, utilizar materiais reutilizáveis, utilizar madeira laminada (CLT) em substituição ao aço e betão, priorizar elevadas quantidades de aço reciclado, distâncias de transporte mais curtas e substituição de cimento Portland por subprodutos [12].

Em [109] analisaram o desempenho ambiental da substituição do betão de quatro resistências à compressão (24, 27, 30 e 35 MPa) por betão de alta resistência (40 MPa à compressão). A substituição por betão de alta resistência foi aplicada somente nos membros verticais da superestrutura (pilares, paredes, etc.). Como consequência, aplicação de betão de alta resistência resulta na redução da seção transversal dos membros estruturais e, portanto, reduz o número de barras de aço da armadura e quantidade de betão utilizados nesses membros. A redução da quantidade de betão e armadura dos membros verticais foram de 8,8% e 30,3%, respetivamente. Relativamente às emissões, quanto maior for a resistência do betão maior é a sua emissão de CO₂, como consequência do aumento da quantidade de cimento. Para resolver esse problema, o estudo assumiu uma substituição de 20% de cimento por escória de alto-forno, deste modo a quantidade de cimento não é muito elevada e a emissão de CO₂ assemelha-se às outras classes de betão. Para avaliar a redução das emissões deste método, o estudo compreendeu três casos de estudo: Caso 1 – avaliação do ciclo de vida num período de 100 anos com uma reconstrução do edifício aos 50 anos de vida útil sem reparação do betão devido ao processo de carbonatação; Caso 2 – avaliação do ciclo de vida num período de 100 anos através da manutenção de membros estruturais

deteriorados pelo processo de carbonatação e Caso 3 - avaliação do ciclo de vida num período de 100 anos através da aplicação de betão de alta resistência sem manutenções associadas no período de vida útil. Como resultado, o consumo de energia do ciclo de vida no Caso 3 diminuiu 15,53% e 2,95%, respetivamente, em comparação aos casos 1 e 2, já as emissões de CO₂ diminuiram 16,70% e 3,37%, respetivamente, em comparação aos casos 1 e 2.

2.6.3. Fachada e telhado

A otimização da fachada no início do projeto pode ser altamente benéfica para a redução das emissões de carbono equivalente. Oferecer soluções de materiais com baixo carbono no desenvolvimento de design podem levar a decisões de design cativantes. Painéis de fachada com betão pré-fabricado podem ser usados para maximizar a eficiência estrutural e pode adicionar detalhes estéticos à fachada, já o uso de materiais não estruturais, como o metal, pode aumentar o carbono incorporado. Como referido anteriormente no capítulo 2.5, o desempenho térmico da fachada deve ser sempre considerado num ciclo de vida completo, várias espessuras de paredes podem projetar diferentes valores de carbono operacional. Ao projetar a fachada é também importante ter em consideração a manutenção, prováveis intervenções de substituição e o fim de vida dos materiais, devendo sempre considerar uma opção viável à economia circular [12].

As fachadas são elementos que apresentam o maior nível de transferência de calor entre o interior e o exterior dos edifícios mais altos. Como referido várias vezes o tipo de fachada tem influência no consumo de energia durante a fase operacional do edifício que, conseqüentemente, contribui para as emissões de carbono equivalente. Taborianski et al. [110] com o objetivo de estudar a influência de vários tipos de fachada nas emissões de CO₂ equivalente durante a fase de uso desenvolveram uma metodologia para avaliar as emissões de carbono geradas durante todo o ciclo de vida das fachadas em edifícios de escritórios. Os resultados, com base nos parâmetros utilizados no estudo, mostram que as fachadas com vidros estruturais e vidros não coloridos emitem mais CO₂ ao longo de seu ciclo de vida (122 kg de CO₂/m² de fachada), seguido por fachadas de tijolos revestidas com painéis de alumínio ou ACM (*Aluminum Composite Material*) (114 kg de CO₂/m² de fachada), fachadas utilizando vidros estruturais e vidros com reflexo (97 kg de CO₂/m² de fachada) e por último, fachadas de tijolos com revestimento de argamassa (81 kg de CO₂/m² de fachada). Por outro lado, a fachada que emite menos CO₂ é a alvenaria com blocos de betão e argamassa, apresenta uma barreira térmica superior às fachadas de vidro estrutural e os materiais utilizados na fachada apresentam uma menor emissão de CO₂. Na Figura 14 são apresentados os resultados obtidos para as emissões de CO₂ durante o ciclo de vida dos vários tipos de fachada estudados e a respetiva contribuição de cada etapa para o resultado. A fase de uso representa cerca de 60% das emissões na fachada de vidros estruturais com vidro sem cor, 49% na fachada de vidros estruturais e vidro com reflexo, 30% na fachada de alvenaria revestidas com ACM e, finalmente, cerca de 40 % nas fachadas de alvenaria revestidas com argamassa.

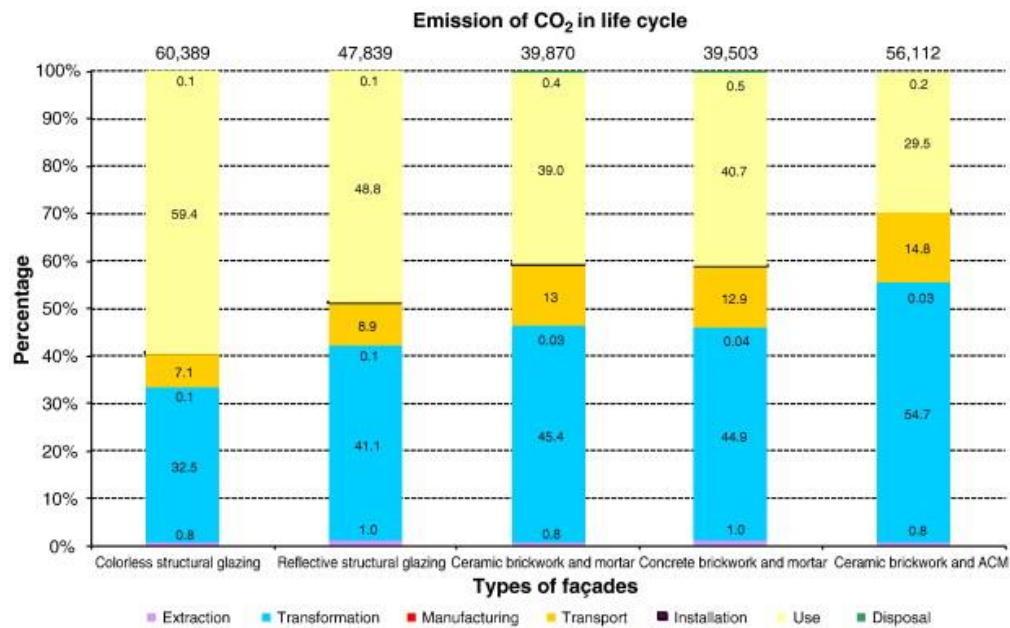


Figura 14 - Contribuição de cada fase do ciclo de vida para as emissões de CO₂ em %. Imagem adaptada de [110].

Seo *et al.* [92] realizaram um estudo centrado no carbono incorporado da estrutura de uma janela de vidro, cujas dimensões de altura e largura são 600 mm. Os autores avaliaram o impacto da esquadria da janela em alumínio e *Polyvinyl chloride* (PVC). Os resultados mostraram que para a janela de alumínio, o carbono incorporado total é 43,4 kg de CO₂e. Por outro lado, quando o PVC é utilizado como o material da estrutura da janela o carbono incorporado total da janela é 18,0 kg de CO₂e. Quando se opta por uma fachada com janelas PVC é possível conseguir uma redução de 58% de carbono incorporado face às janelas de alumínio.

2.6.4. Serviços do edifício

Os serviços do edifício dizem respeito à iluminação, aquecimento, refrigeração, ventilação e ar condicionado. Estudos mostraram que os serviços de construção representam 2%- 27% de carbono incorporado (11% em média). Em casos de recuperação de edifícios, a proporção de carbono incorporado relacionado aos serviços pode ser consideravelmente maior. Muitos serviços de construção têm uma vida útil muito inferior à do próprio edifício, particularmente os elementos de adaptação como iluminação e unidades terminais. Outros, como sistemas de distribuição e aquecimento comum, normalmente têm uma vida longa e pode, em alguns casos, durar mais do que o próprio edifício. Componentes de serviços de construção são feitos principalmente de metais e, portanto, têm uma grande pegada de carbono inicial, porém possuem altas taxas de reciclagem. Uma das preocupações é garantir que todos os equipamentos possuem fáceis acessos para futuras inspeções, manutenções e substituições. Também devem ser fáceis de desmontar para operar de um modo mais eficiente e por um período mais longo, e no fim de vida devem ser reciclados ou reutilizados. Na instalação de sistemas de refrigeração deve ser sempre considerado o impacto de possíveis fugas do líquido utilizado para a refrigeração. Líquidos como R410A e R407C têm geralmente um alto Potencial de Aquecimento Global (GWP), o que significa que, mesmo com baixas taxas de fugas, eles são muito prejudiciais para o meio ambiente. Por outro lado, CO₂ e o amoníaco têm GWP substancialmente mais baixos, mas têm outras implicações de saúde e

segurança que devem ser considerados. A ventilação natural economiza grandes quantidades de material de ventilação em contraste aos sistemas mecânicos. No entanto, de ser considerado os benefícios que uma instalação de ventilação mecânica pode proporcionar ao edifício. Muitos dos edifícios com melhor desempenho em termos de consumo de energia, emissões de dióxido de carbono e conforto dos ocupantes incluem ventilação mecânica com recuperação de calor e aberturas para um maior conforto [12].

2.6.5. Trabalhos externos

Trabalhos externos podem abranger paisagismo ao nível do rés-do-chão, terraços, coberturas e pode incluir objetos abaixo do solo, como tanques de irrigação. O uso de pedra natural é preferível ao uso de lajes de betão devido ao facto de as lajes de pedra natural serem mais finas para o mesmo valor de carga que o betão. Contudo a localização da pedreira, durabilidade e requisitos de manutenção devem ser contabilizados para haver certeza do benefício do uso de pedra natural face ao betão. O mesmo acontece para decks de madeira, a madeira deve ter origem sustentável e certificada. A quantidade de vida vegetal deve ser maximizada em espaços, como por exemplo, paredes verdes e em áreas não utilizadas, como coberturas, varandas, recuos de fachadas e paredes para conseguir um isolamento adicional e ao mesmo tempo incitar a captura de carbono. Do mesmo modo, áreas exteriores devem ser utilizadas para cultivar árvores e plantas polinizadoras a fim de incentivar a polinização e locais de nidificação para pássaros apoiando a biodiversidade. As áreas abertas, por exemplo telhados, devem acomodar painéis fotovoltaicos para aumentar a energia renovável e reduzir a pegada de carbono. A iluminação externa deve ser cuidadosamente analisada para maximizar a sua eficiência, ou seja, evitar a poluição luminosa, como por exemplo reduzir o nível de luz no chão iluminando paredes e evitando focos debaixo de árvores não perenes [12].

3. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE CÁLCULO

Neste capítulo são apresentados os métodos aplicados para conseguir uma abordagem simplificada na quantificação da emissão de carbono equivalente da construção metálica e mista. A informação que deve ser transmitida nos cálculos é exposta, bem como todo o cálculo por detrás de cada módulo da metodologia ACV. O método de cálculo desenvolvido neste capítulo serviu para quantificar as emissões de carbono equivalente em dois casos de estudo apresentados posteriormente no capítulo 4. Atendendo ao desafio da empresa SE2P, o método de cálculo desenvolvido também serviu para elaborar um *template* para posterior uso da empresa.

3.1. Informações transmitidas na quantificação do carbono

No cálculo da pegada de carbono de qualquer edifício ou infraestrutura são inúmeros os parâmetros que podem variar entre diferentes estudos. Isto é, estudos dum mesmo projeto realizados por diferentes entidades podem apresentar bastantes diferenças no modo como é obtido o valor do carbono equivalente. Por exemplo, muitos estudos incidem somente no cálculo do carbono incorporado e não contemplam o carbono operacional, mesmo que seja realizada uma análise *Cradle to cradle* ou, ainda, num sentido mais crítico, os elementos de construção incluídos no estudo podem deferir e causar falsas interpretações. Para que a quantificação do carbono equivalente seja o mais transparente possível, é obrigatório facultar vários tipos de informação.

Os módulos do ciclo de vida que são incluídos no estudo é a informação mais crítica e deve ser transmitida com maior clareza possível. A informação deve preferencialmente surgir numa tabela indicando os módulos incluídos. Na Tabela 6 são apresentados os módulos incluídos nos estudos desta dissertação e é um excelente exemplo de como este tipo de informação deve ser transmitida.

Tabela 6 – Módulos incluídos no estudo ACV.

Produto		Construção					Etapa de Uso						Fim de vida				Benefícios
							Relativa ao fabrico dos materiais			Relativa ao uso do edifício							
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	NI	NI	✓	✓	✓	✓	✓	

Nota: NI = Não Incluído.

Através Tabela 6 é possível afirmar que os casos de estudo abordados nesta dissertação são analisados numa perspetiva *Cradle to cradle*, não incluindo os módulos B6 e B7, avaliando o impacto de toda a vida útil da estrutura. No entanto, como a quantificação relativas aos módulos B1 a D são apoiadas em suposições sobre a forma como as estruturas serão tratadas após a sua construção que não podem ser garantidas, também é efetuada uma análise *upfront embodied carbon* que apenas inclui os módulos A1-A5.

Para além dos módulos incluídos no estudo, outro grande aspeto a ter em conta no cálculo do carbono equivalente são os elementos de construção que são quantificados. Como referido anteriormente no capítulo 2.6, são vários os elementos que devem ser incluídos no estudo, no

entanto, nem sempre é possível fazê-lo. A empresa SE2P é um gabinete que realiza projeto de estruturas para o setor da construção civil e apenas inclui subestrutura e superestrutura dos edifícios. Deste modo, os estudos de carbono equivalente realizados pela empresa estão limitados a estes elementos e subsequentemente também os estudos abordados nesta dissertação. No futuro os estudos devem ser completados pelos devidos indivíduos competentes para os restantes elementos de construção. Na Tabela 7 é possível observar com mais detalhe os elementos incluídos nos estudos desta dissertação e como devem ser facultados na análise das emissões de carbono.

Tabela 7 - Elementos de construção contemplados nos estudos 1 e 2. Adaptada da Tabela 5.

Grupo nível 1	Grupo nível 2	Grupo nível 3			
Subestrutura	Subestrutura	Fundações padrão			
		Sistemas de fundação especiais			
		Construção do piso mais baixo			
Superestrutura	Superestrutura	Paredes da cave			
		Estrutura de aço			
		Chapa de aço autoportante			
		Revestimentos de betão para estrutura de aço			
		Estrutura de betão			
		Estrutura de madeira			
	Pisos superiores	Coberturas	Outros tipos de estrutura		
			Pisos		
			Estrutura da cobertura		
	Escadas e rampas	Fachada	Cobertura		
			Sistemas de cobertura especiais		
		Fachada	Escadas e rampas	Estrutura de escadas e rampas	
				Paredes tanto acima do solo como abaixo do solo	
			Paredes divisórias	Janelas e portas externas	Proteções contra o sol e chuva
					Varandas
Acabamentos	Portas, pavimentos e tetos	NI			
		NI			
Serviços de construção	Aquecimento e ar condicionado	NI			
	Ventilação	NI			
	Instalações e sistemas de combustíveis	NI			
Trabalhos externos	Estradas e pavimentos	NI			

Nota: NI = Não Incluído.

Apesar de se transmitir os módulos da avaliação do ciclo de vida e os elementos incluídos na quantificação do carbono equivalente, ainda não é possível comparar diferentes projetos. Com efeito, projetos de edifícios e infraestruturas não possuem todos o mesmo tamanho, e como é de esperar edifícios maiores possuem uma maior pegada de carbono equivalente. Em resposta a este impasse deve-se sempre quantificar também a pegada de carbono equivalente segundo a área do edifício ou infraestrutura.

Para o caso dos edifícios, isto implica a medição da área total da edificação e a apresentação dos resultados não só em kgCO₂e, mas também em kgCO₂e/m². Com a necessidade da medição de área dos projetos surge também a obrigação de a saber medir e saber transmitir. Existem diversos modos de medir a área de um edifício e como consequência, existem também várias definições de área de construção. Na Tabela 8 é possível observar quais os elementos de área incluídos no cálculo segundo várias definições de área. O projetista deve adaptar a melhor definição de área no seu projeto e transmiti-la com clareza.

Tabela 8 - Definições de áreas com os respetivos elementos incluídos.

	País	Paredes Internas	Paredes externas	Pisos Internos	Cave	Sótão	Escadas	Área de Estacionamento externo
Agarage (Área de Estacionamento)	Suécia	Sim	Não	Não	Sim	Não	Sim	Sim
Atemp (Área Interna)	Suécia	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não
BRA (Oppvarmet bruksareal)	Noruega	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não	Não
BTA (Bruttoareal)	Noruega	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
BVO (Brutovloeropper vlak)	Países Baixos	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
GFA (Área Bruta Piso)	Mundo	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
GIFA (Área Bruta Piso Interno, IPMS/RICS) / GIA	Mundo	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Não
GIFA (Área Bruta Piso Interno, ASHRAE)	EUA/Canadá	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Não
OA (Opvarmet etageareal)	Dinamarca	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não
SBA (Samlet bruttoareal)	Dinamarca	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não
N-M² (Área Líquida Aquecida)	Finlândia	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Não

A definição usada nesta dissertação é GIA, do inglês *Gross Internal Area*, por ser a definição mais utilizada em todo o mundo. No entanto a GIFA, do inglês *Gross Internal Floor Area*, muito usada na indústria da construção do Reino Unido inclui os mesmos elementos de área e também pode ser utilizada para futuras comparações. A área total de cada piso interior de um edifício é medida a partir da superfície interior das paredes exteriores ou da superfície interior das paredes em comum com os edifícios adjacentes. A área das colunas e pilares interiores está incluída na medição. A medida andar a andar consiste em todos os espaços fechados, incluindo a área de paredes internas, porões, coberturas, salas de equipamentos, penetrações verticais em cada andar (como poços de elevadores e escadas) e estacionamento interno. No entanto, não inclui passagens cobertas e abertas, pátios sem telhado ou varandas. A apresentação do resultado da pegada de carbono equivalente em $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$ GIA é importante para fins de *benchmarking* (consultar o capítulo 3.4) e para que a comparação de todos os tipos e tamanhos de construção seja possível, desde que estejam quantificados segundo a mesma definição de área. A questão que ainda se coloca em relação à área é em que altura e onde é que deve ser realizada a medição da área total dos projetos. Áreas de diferentes projetos devem ser medidas preferencialmente em modelos BIM (*Building Information Modeling*). Se não for possível a medição de área através dos modelos BIM, a lista de quantidades ou planos de custos também é uma boa solução. Por fim, se nenhuma destas duas opções foi possível, a medição pode ser efetuada com desenhos dos construtores.

No caso das infraestruturas torna-se um pouco mais complexo, existindo ainda alguma discordância entre autores na literatura existente. As infraestruturas correspondem a pontes, estradas, linhas ferroviárias, tratamento de resíduos e água, centrais elétricas, barragens, entre outros. Relativamente à construção de pontes existe uma divisão entre os autores: alguns preconizam a quantificação da pegada de carbono em $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$ FA, outros em $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{km}$. Autores como *Cameron Archer-Jones* e *Daniel Green* [111] defendem um rating de carbono alinhado com PAS 2080 usando a área funcional (FA) do tabuleiro da ponte. Já RICS [112] defende a quantificação de carbono equivalente por quilómetro ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{km}$) para pontes e também para estradas, linhas ferroviárias e linhas de energia. RICS também apresenta medidas para os resultados de outros diferentes tipos de projeto dentro das infraestruturas. Para infraestruturas de tratamento de resíduos ou água os resultados devem ser também apresentados em $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$ de água ou resíduos tratados. Para centrais elétricas, incluindo barragens, plataformas petrolíferas e eólicas os resultados devem surgir em $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kWh}$ produzido. Do mesmo modo, as infraestruturas de telecomunicações devem apresentar a pegada de carbono equivalente em $\text{kgCO}_2/\text{Mbps}$.

Para além destes três aspetos existe ainda alguns dados que são necessários serem sempre apresentados quando se efetua e se apresenta a quantificação da pegada de carbono equivalente em qualquer projeto. O tipo de estrutura é sempre relevante, quando se trata de um edifício existem diferenças nas metas de carbono dum edifício comercial ou dum edifício residencial, por isso deve-se sempre indicar qual o tipo e o uso do projeto. O mesmo se aplica a infraestruturas, analisadas anteriormente. Para ajudar futuras comparações de projetos, o *software* de cálculo utilizado, bem como as bases de dados em que foram retirados os materiais de construção requerem também a devida apresentação.

3.2. Ferramenta de Cálculo

Como referido anteriormente no capítulo 2.2 existem diversas ferramentas disponíveis no mercado para facilitar a quantificação do carbono equivalente dos respetivos projetos. De modo a encontrar o melhor *software* de cálculo da pegada de carbono para os estudos desta dissertação e também para futuros projetos, procedeu-se a uma avaliação e uma rápida utilização de alguns *softwares*. De todas as ferramentas listadas na Tabela 2 as que apenas incluem os módulos A1-A3 não são indicadas para projetos, mas sim para a avaliação do ciclo de vida do produto, podendo originar posteriormente uma DAP do respetivo material em estudo. Das restantes ferramentas deu-se preferência à única gratuita, a ferramenta *Hawkins\Brown Emission Reduction Toolkit* (H\BERT). A ferramenta é um plug-in para o programa *Revit* que permite extrair automaticamente as quantidades dos materiais. A ferramenta facilita a avaliação de edifícios inteiros, opções de projeto, montagens de edifícios e materiais. No entanto, os impactos dos diversos materiais presentes no projeto são extraídos do banco de dados ICE, um banco de dados que apenas possui dados genéricos de materiais provenientes do Reino Unido. Por impossibilidade de usar DAPs específicas para os materiais de construção esta ferramenta foi também excluída. O mesmo aconteceu com a ferramenta *Tally*, apesar de possuir um plug-in para *Revit* para extrair as quantidades dos materiais e possibilitar a procura e escolha de DAPs, as mesmas são maioritariamente situadas geograficamente na América do Norte e apenas um reduzido número dizem respeito a produtores europeus.

O *software* selecionado para a quantificação do carbono equivalente nos casos de estudos apresentados nesta dissertação é a ferramenta *One Click LCA*. A *One Click LCA* permite quantificar as emissões de dióxido de carbono equivalente em todo o ciclo de vida tanto de edifícios, segundo a norma EN 15978, como de infraestruturas, segundo a norma EN 17472, proporcionando também a avaliação do custo do ciclo de vida. A ferramenta de cálculo de custo do ciclo de vida da *One Click LCA* é projetada de acordo com as normas EN 16627 e ISO 15686-5. Os resultados são descritos com base nas categorias de custo obrigatórias na norma EN standard, incluindo todos os módulos de construção, manutenção, uso e o fim da vida útil, permitindo comparar alternativas de design mais ecológicas, mas também mais eficientes no custo. Outra grande vantagem do uso desta ferramenta é a possibilidade de medir a circularidade dos materiais. É possível selecionar a fonte dos materiais utilizados no projeto, bem como projeção dos resíduos, ou seja, o fim de vida dos materiais, permitindo quantificar e avaliar a circularidade dos materiais do projeto. A ferramenta possui também um plug-in para *Revit* que permite a importação automática de dados e permite a integração de variadas plataformas, como *Tekla*, *IES-VE*, *SketchUp* e muitas mais. Além destas vantagens a ferramenta permite obter mais de sessenta certificações ambientais, como BREEAM, LEED, PAS 2080 e Level(s) e, mais importante, possui inúmeras DAPs e materiais genéricos de praticamente todas as bases de dados dispersas por todo o mundo, incluindo a DAP Habitat.

3.2.1. Base de Dados para Portugal

Atualmente em Portugal a única base de DAPs existente é a DAP Habitat, uma base de dados que contém DAPs de materiais de construção. Porém, como as declarações ambientais do produto é um tópico recente no mercado da construção e as mesmas ainda estão dependentes de ações voluntárias por parte dos produtores de materiais de construção, a DAP Habitat possui apenas quarenta e uma declarações ambientais de produtos (valor referente a setembro de 2023). Para o

setor da construção português a escassez de informações ambientais dos materiais é um grave problema, já que os projetistas estão dependentes deste tipo de informação para calcular e posteriormente, reduzir a pegada de carbono equivalente dos seus projetos. A fim de preencher esta lacuna a base de dados *One Click LCA* possui vários materiais genéricos para um elevado número de países, incluindo Portugal. Os materiais genéricos são recursos semelhantes às Declarações Ambientais de Produto (DAP), podendo até estar no formato de uma DAP, no entanto, são muitas vezes baseados em emissões médias ou têm as emissões médias de uma gama de produtos.

No *One Click LCA*, existem três fontes de materiais genéricos que podem ser usados na quantificação do carbono equivalente:

- Dados genéricos sob a forma de uma DAP;
- Dados genéricos de bases de dados genéricas;
- Dados genéricos *One Click LCA*.

Dados genéricos sob a forma de uma DAP

Dados genéricos podem ser publicados em qualquer operador de programa e geralmente esses dados são executados por associações. Por exemplo, a associação de fabricantes de membranas plásticas pode trabalhar em conjunto para criar uma DAP genérica a partir de uma gama de diferentes produtos de membrana de plástico do mercado. Nesses casos, é possível encontrar esses produtos como opções genéricas, mas num formato de uma declaração ambiental do produto (DAP).

Dados genéricos de bases de dados genéricas

Neste caso os dados genéricos são provenientes de bancos de dados que apenas contêm também dados genéricos. Estas bases de dados oferecem frequentemente dados genéricos localmente relevantes, ou seja, dados relativos a um determinado país. Por exemplo, o banco de dados ICE é um banco de dados de materiais genéricos do Reino Unido, que podem ser facilmente utilizados para projetos provenientes do país. Existe ainda um pequeno número de bases de dados genéricas, o que significa que, para muitos países, não existe uma base de dados genérica localmente relevante.

Dados genéricos *One Click LCA*.

Como referido anteriormente Portugal não possui muitas DAPs de materiais de construção nem uma base de dados de materiais genéricos, deste modo a ferramenta *One Click LCA* apresenta uma base de dados genéricos para qualquer país. Para cada material genérico que é criado, os especialistas do *software One Click LCA* realizam uma avaliação do ciclo de vida (ACV) do produto e publicam-no. Os dados genéricos são atualizados quase todas as semanas com novas opções de materiais. Para além de materiais, a ferramenta também proporciona dados genéricos de atividades, por exemplo: quantidade de carbono equivalente emitido na fase da demolição (C1) por área, permitindo estimar a quantidade de emissão de carbono na demolição do edifício ou infraestrutura.

Para além de possuir materiais genéricos para Portugal, a ferramenta de cálculo *One Click LCA* também assegura a utilização de materiais genéricos de outros países sem comprometer a qualidade dos resultados, através de um fator de compensação local. O método de compensação

local é um método de localização que ajusta automaticamente o consumo de energia do fabrico do material ao mix de fontes de eletricidade local para que seja possível obter os resultados dos materiais genéricos mais representativos para Portugal. É importante realçar que a mistura de combustíveis do processo de fabrico não é alterada, apenas a eletricidade, pois ela varia entre locais de fabrico. Na localização do fabrico dos materiais é tido em conta a eletricidade da rede e a eficiência energética do país desejado, em vez do país em que o material é produzido.

A compensação local é realizada pela dedução do fator de compensação ao valor do carbono incorporado do material em questão. O fator de compensação é obtido através da Equação (1).

$$\text{Fator de compensação} = ((A_{Original} \times B_{Original}) - (A_{Pretendido} \times B_{Pretendido})) \times C \quad (1)$$

Em que:

A = Eficiência na utilização da energia;

B = Impacto da energia (kgCO_{2e});

C = Energia necessária para o fabrico do material (kWh).

Por último, o cálculo do impacto final do material é dado pela Equação (2).

$$\text{Impacto final} = \text{Impacto original} - \text{Fator de compensação} \quad (2)$$

Na Tabela 9 é possível observar valores típicos de carbono incorporado de alguns materiais genéricos para Portugal extraídos a partir da base de dados do *software One Click LCA*.

Tabela 9 - Carbono incorporado de diferentes materiais genéricos para Portugal.

Material	Tipo	Detalhes	Fator de Carbono (kg CO _{2e} /kg)
Betão	No local: Substrutura; superestrutura.	C 32/40 (32/40 MPa) com 100% de cimento Portland.	309 kg CO _{2e} /m ³
		C 32/40 (32/40 MPa) substituição 30% de cimento Portland por cinzas volantes.	231 kg CO _{2e} /m ³
		C 32/40 (32/40 MPa) substituição 50% de cimento Portland por cinzas volantes.	180 kg CO _{2e} /m ³
		C 32/40 (32/40 MPa) substituição 60% de cimento Portland por escória granulada de alto forno.	172 kg CO _{2e} /m ³
		C 32/40 (32/40 MPa) substituição 70% de cimento Portland por escória granulada de alto forno.	158,5 kg CO _{2e} /m ³
		RC 40/50 (40/50 MPa) com 100% de cimento Portland.	387 kg CO _{2e} /m ³
		C 40/50 (40/50 MPa) substituição 40% de cimento Portland por cinzas volantes e escória granulada de alto forno.	263 kg CO _{2e} /m ³
		C 40/50 (40/50 MPa) substituição 75% de cimento Portland por escória granulada de alto forno.	173 kg CO _{2e} /m ³
Aço	Barras de reforço	Barras para reforço de betão, com 60% do conteúdo reciclado.	1,41
		Barras para reforço de betão, com 90% do conteúdo reciclado.	0,67

Tabela 9 - Continuação.

Material	Tipo	Detalhes	Fator de Carbono (kg CO ₂ e/kg)
	Secção estrutural laminada a quente	Perfil com 0% do seu conteúdo reciclado.	3,21
		Perfil com 90% do seu conteúdo reciclado.	0,74
	Tubos laminados a frio	Perfil com 30% do seu conteúdo reciclado.	2,6
Tijolo	Tijolo de barro		0,24
Madeira	Madeira estrutural	CLT sem considerar o carbono sequestrado.	167 kg CO ₂ e/m ³
		CLT considerando o carbono sequestrado.	-708 kg CO ₂ e/m ³
	Chão/estrutura	Glulam sem considerar o carbono sequestrado.	160 kg CO ₂ e/m ³
		<i>Softwood</i> sem considerar o carbono sequestrado.	88 kg CO ₂ e/m ³
		<i>Softwood</i> considerando o carbono sequestrado.	-719 kg CO ₂ e/m ³
Alumínio	Chapa		5,03
Vidro	Vidro triplo		1,25

3.3. Certificados de Sustentabilidade

Os certificados ambientais têm sido o principal impulsionador da utilização da avaliação do ciclo de vida (ACV) para quantificar as emissões de carbono incorporadas associadas aos edifícios. Podem, em teoria, ser um motor para a implementação de uma conceção de baixo carbono nos projetos. A maioria dos quadros de certificação ambiental exige a realização de alguma forma de avaliação do ciclo de vida. Para lidar com os desafios ambientais apresentados por edifícios e materiais de construção, a Comissão Europeia introduziu o sistema de certificação voluntária chamado Level(s) em sua comunicação sobre eficiência de recursos no setor da construção em 2014. Após um período inicial de desenvolvimento de 2015 a 2017, o Level(s) foi testado em mais de 100 projetos de construção em toda a União Europeia e passou por refinamentos metodológicos [113]. O principal objetivo do Level(s) é capacitar os profissionais envolvidos em todas as fases de projetos de construção, desde o planeamento até a execução, a contribuir de forma substancial para melhorias ambientais mais amplas ao nível europeu. Ele visa estabelecer um conjunto comum de indicadores-chave de sustentabilidade para edifícios de escritórios e residenciais. Além de avaliar o desempenho ambiental, que é a prioridade central, o Level(s) também permite a avaliação de outros aspetos importantes relacionados com desempenho, como saúde e conforto, custo do ciclo de vida e riscos potenciais para o desempenho futuro [114].

O *framework* do Level(s) baseia-se em seis grandes objetivos estratégicos que delineiam as prioridades de contribuição dos edifícios para os objetivos políticos da União Europeia e dos seus

Estados-Membros. Essas áreas incluem energia, uso de materiais, gestão de resíduos, água e qualidade do ar interior. Dentro de cada um desses objetivos macro, existem 16 indicadores, cada um deles cuidadosamente selecionado para medir o desempenho e a contribuição de um edifício para um objetivo específico. Na Figura 15 é apresentada uma síntese geral dos macro objetivos, indicadores e unidades de medida abrangidos na certificação Level(s).

Macro-objetivo	Indicador	Unidade de medida
1: Emissões de gases com efeito de estufa e de poluentes atmosféricos ao longo do ciclo de vida de um edifício	1.1 Desempenho energético na fase de utilização	quilowatt-hora por metro quadrado por ano (kWh/m ² /ano)
	1.2 Potencial de aquecimento global do ciclo de vida	kg de equivalentes de CO ₂ por metro quadrado por ano (kg eq. CO ₂ /m ² /ano)
2. Ciclos de vida de materiais circulares e eficientes em termos de recursos	2.1 Lista de quantidades, materiais e vidas úteis	Quantidades unitárias, massa e anos
	2.2 Resíduos e materiais de construção e demolição	kg de resíduos e materiais por m ² de área útil total
	2.3 Conceção orientada para a adaptabilidade e renovação	Pontuação de adaptabilidade
	2.4 Conceção orientada para a desconstrução, reutilização e reciclagem	Pontuação de desconstrução
3. Utilização eficaz dos recursos hídricos	3.1 Consumo de água em fase de utilização	m ³ /ano de água por ocupante
4. Espaços saudáveis e confortáveis	4.1 Qualidade do ar interior	Parâmetros de ventilação, CO ₂ e humidade Lista-alvo de poluentes: COVT, formaldeído, COV CMR, razão de LCI, bolor, benzeno, partículas, rádon
	4.2 Tempo fora do intervalo de conforto térmico	% de tempo fora do intervalo durante as estações de aquecimento e arrefecimento
	4.3 Iluminação e conforto visual	Lista de verificação de nível 1
	4.4 Acústica e proteção contra o ruído	Lista de verificação de nível 1
5. Adaptação e resiliência às alterações climáticas	5.1 Proteção da saúde e conforto térmico dos ocupantes	Previsão da % de tempo fora do intervalo nos anos de 2030 e 2050 (ver também o indicador 4.2)
	5.2 Maior risco de fenómenos meteorológicos extremos	Lista de verificação de nível 1 (em desenvolvimento)
	5.3 Maior risco de inundações	Lista de verificação de nível 1 (em desenvolvimento)
6. Custo do ciclo de vida e valor otimizados	6.1 Custos do ciclo de vida	EUR por metro quadrado por ano (€/m ² /ano)
	6.2 Criação de valor e exposição ao risco	Lista de verificação de nível 1

Figura 15 - Síntese geral dos macro objetivos e correspondentes indicadores de Level(s). Imagem adaptada de [114].

O Indicador 1.2 tem como objetivo ampliar o foco da avaliação do consumo de energia durante a ocupação dos edifícios (Indicador 1.1) para incluir a análise das emissões de gases de efeito de estufa ao longo de todo o ciclo de vida dos edifícios. Este indicador permite a apresentação de relatórios das emissões de gases de efeito de estufa, medidas em termos de dióxido de carbono equivalente por área (kg CO₂e/m²), que ocorrem em diferentes fases do ciclo de vida dos edifícios.

Nesta certificação a vida útil do projeto deve ser considerada 50 anos e nenhum dos módulos ACV é de carácter obrigatório. Relativamente à unidade de medida de área nenhuma referência é realizada.

Em Portugal, existe o certificado de sustentabilidade Líder A, desenvolvido pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa, que não requer a avaliação do ciclo de vida do edifício e concentra-se principalmente em critérios como eficiência energética e qualidade do ar interior. Portanto, a certificação Level(s) destaca-se como a melhor opção para a avaliação das emissões de carbono equivalente em edifícios nacionais. Para auxiliar os profissionais que desejam adotar essa certificação, é possível encontrar manuais de utilizador relacionados ao *framework* Level(s) em [115]. Esses manuais fornecem orientações detalhadas e recursos valiosos para aqueles que se procuram familiarizar com os requisitos e critérios dessa certificação ambiental.

Para além da certificação Level(s) são inúmeras as certificações existentes a nível internacional. Na Figura 16 é possível observar a certificação aplicada em cada país e também quais as que podem ser aplicadas a nível internacional. Como é possível contemplar, as certificações não exigem a mesma unidade de medida de área, o mesmo tempo de vida e os módulos obrigatórios e facultativos de incluir na quantificação das emissões de carbono equivalente.

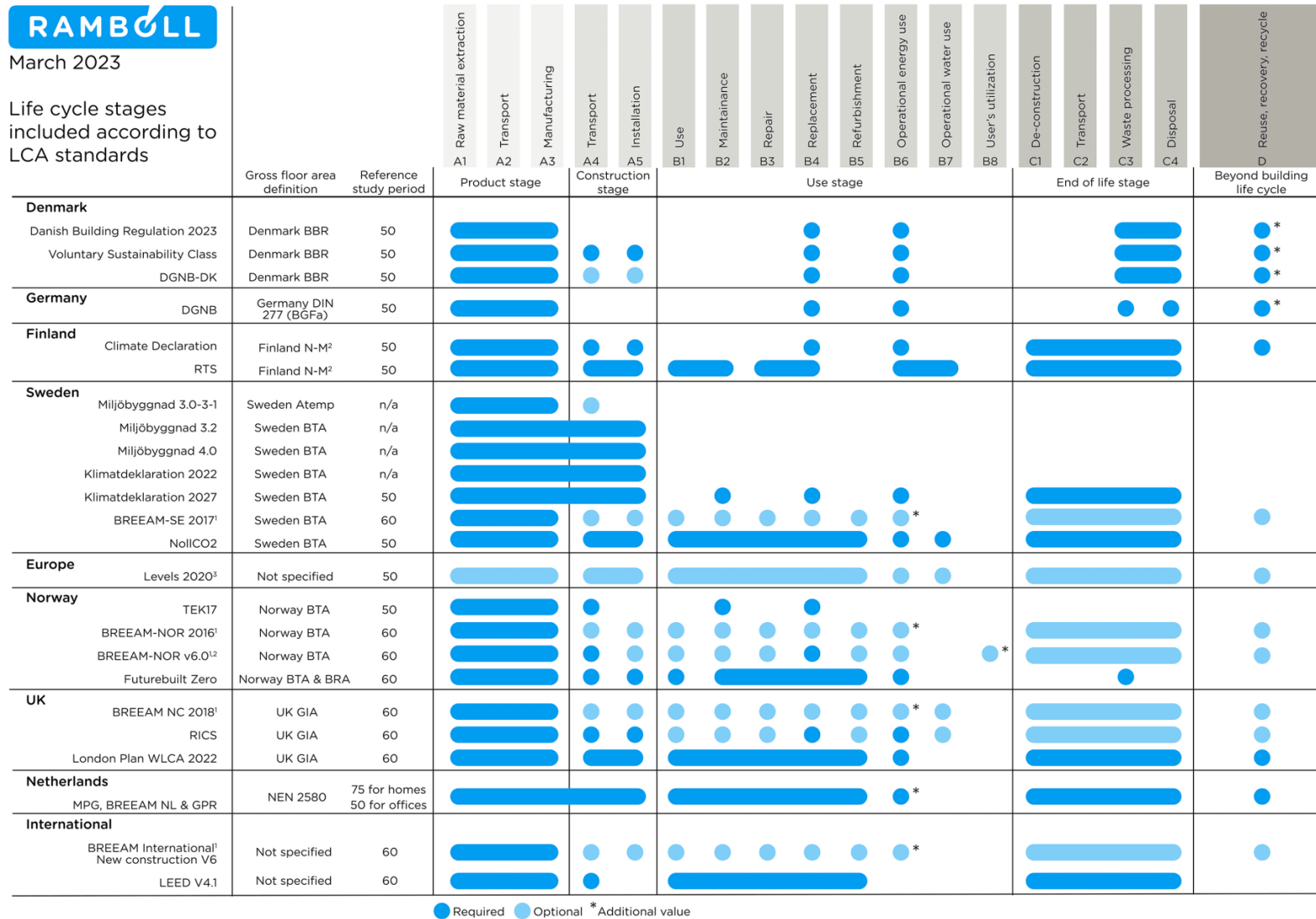


Figura 16 - Comparação dos diferentes tipos de certificação ambiental. Imagem adaptada de [124].

3.4. *Benchmarks* e Metas de Carbono Incorporado

Com a grande percentagem de emissão de carbono equivalente pelo setor da construção, as organizações que se pronunciam relativamente a este assunto começam a definir limites da emissão de dióxido de carbono equivalente para conseguirem atingir a neutralidade que tanto ambicionam. Como referido anteriormente, as Nações Unidas afirmam que as emissões de dióxido de carbono precisam de ser reduzidas em 45% até 2030. Como resposta a este pedido as metas existentes incidem sobre os limites máximos referentes ao mesmo ano. Através destas metas é possível qualquer projetista perceber se a infraestrutura ou edifício projetado vai de encontro aos limites estabelecidos para que haja uma redução nas emissões de carbono equivalente no setor da construção. Qualquer atraso na criação de metas para a construção, poderá implicar altos níveis de carbono incorporado de novas construções sem qualquer redução das emissões de carbono equivalente e conseqüentemente sem impacto significativo no objetivo maior, redução do aquecimento global. Para haver medidas eficazes na redução de carbono equivalente é necessário existir dados sólidos sobre os atuais níveis de emissões dos edifícios e das infraestruturas. Contudo estes dados nem sempre são fáceis de encontrar e os que existem enfrentam uma série de desafios para serem dados úteis no estudo de *benchmarks*. Desta forma, para obter metas de carbono incorporado para de facto haver redução das emissões na construção é necessário entender os atuais níveis de emissões na construção para posteriormente definir valores limites na construção de novos edifícios e infraestruturas a fim de reduzir as atuais emissões de carbono equivalente.

A LETI e RIBA desempenham um papel importante na redução das emissões do carbono equivalente e têm definido metas para alcançar a devida neutralidade carbónica no setor da construção em 2050. Para surgirem publicações de metas, primeiramente realizaram um estudo de *benchmark* sobre as emissões de dióxido de carbono incorporado na construção do Reino Unido. LETI dividiu os valores em 800 kgCO₂e/m² para edifícios residenciais e 1000 kgCO₂e/m² para edifícios não residenciais para os módulos A1 a A5 [116]. RIBA encontrou valores ligeiramente mais elevados e também os dividiu em dois valores, 1200 kgCO₂e/m² para edifícios residenciais e 1400 kgCO₂e/m² para não residenciais para os módulos A1-A5, B1-B5, C1-C4 [117]. A partir destes valores foram definidas metas para o ano de 2030. No entanto, quando comparados com outros estudos sobre *benchmark* de edifícios na europa ou no mundo estes valores são bastante elevados.

O estudo [118] organizado por *Ramboll* e a universidade de *Aalborg* com o apoio da fundação *Laudes* estabeleceu uma linha de base do nível atual do carbono incorporado em edifícios reunindo dados de vários países da europa. Os dados baseiam-se em ACV disponíveis que foram usadas para fornecer informações sobre o nível atual do carbono incorporado. Desta forma, apenas cinco países tinham dados suficientes para serem utilizados no estudo. Bélgica, Dinamarca, Finlândia, França e Holanda foram os países incluídos no estudo. No total foram analisados 769 edifícios de diferentes tipos, desde edifícios residenciais a escritórios e hospitais. O estudo incidiu no carbono incorporado dos edifícios em todo o ciclo de vida e os resultados foram apresentados para edifícios residenciais e não residenciais. Os valores de carbono incorporado para os edifícios residenciais variam entre 400 e 800 kgCO₂e/m² com um valor médio representativo de 600 kgCO₂e/m², já nos edifícios não residenciais os valores variam entre 100 e 1200 kgCO₂e/m² com um valor médio representativo também de 600 kgCO₂e/m². Dos 600 kgCO₂e/m² cerca de 400 kgCO₂e/m² diz respeito ao *upfront carbon* do edifício (A1 a A5). Relativamente à subestrutura e superestrutura, estes elementos

apenas representam 31% de toda a pegada de carbono incorporado, ou seja, apenas cerca de 120 kgCO₂e/m² diz respeito à subestrutura e superestrutura nos módulos A1 a A5.

Do mesmo modo, o estudo [119] financiado pela Fundação *Charles Pankow, Skanska USA* e o Departamento de Qualidade Ambiental de *Oregon* abordou uma série de casos ACV de vários tipos de edifícios e chegou à mesma conclusão. Edifícios nos módulos A1-A5 possuem um valor médio de 384 kgCO₂e/m², embora o carbono incorporado dependa de vários fatores, incluindo a localização geográfica, o tamanho e a função do edifício.

Depois de analisar estas quatro fontes de *benchmark* torna-se discutível quais os valores reais das emissões de carbono equivalente que atualmente se praticam no setor da construção, já que reduções a partir de uma referência sobrestimada não resultará em nenhum impacto ambiental. A principal causa é a diferença geográfica, talvez no Reino Unido os valores de emissão sejam mais elevados que no resto da Europa ou até mesmo que os diferentes países não possam ser comparados e deva existir uma *benchmark* e posteriormente uma meta de emissões para cada país europeu. No estudo de *Ramboll*, apesar da média dos cinco países envolvidos no estudo ser 600 kgCO₂e/m² para todo o ciclo de vida, a França diferenciou-se por apresentar um valor médio de 1100 kgCO₂e/m² para todo o edifício, valor muito elevado comparativamente à média europeia, mas idêntico aos valores encontrados para o Reino Unido. Seja qual for a explicação, ainda é necessário existir mais dados e mais pesquisas sobre este tópico, tornando a procura pelo *benchmark* uma questão de alta importância.

Apesar de ainda ser tema de debate, neste capítulo são apresentadas metas para a emissão de carbono equivalente publicadas por diversos autores para posteriormente conhecer a posição dos casos de estudo elaborados nesta dissertação relativamente às emissões de carbono equivalente. LETI, com apoio nos valores de linha de base, publicou metas de carbono incorporado para 2030 reduzindo os valores de linha de base em 65%. A meta de 2030 para edifícios residenciais e escolares é 300 kgCO₂e/m² somente para os módulos A1 a A5 (excluindo o carbono sequestrado), já para edifícios comerciais a meta é 350 kgCO₂e/m² para os mesmos módulos. Estes valores representam todos os elementos de construção do edifício e não podem ser usados para os casos de estudos, porém a LETI fornece também as percentagens que cada elemento de construção contribui para a pegada total de carbono equivalente, apresentado na Figura 17.

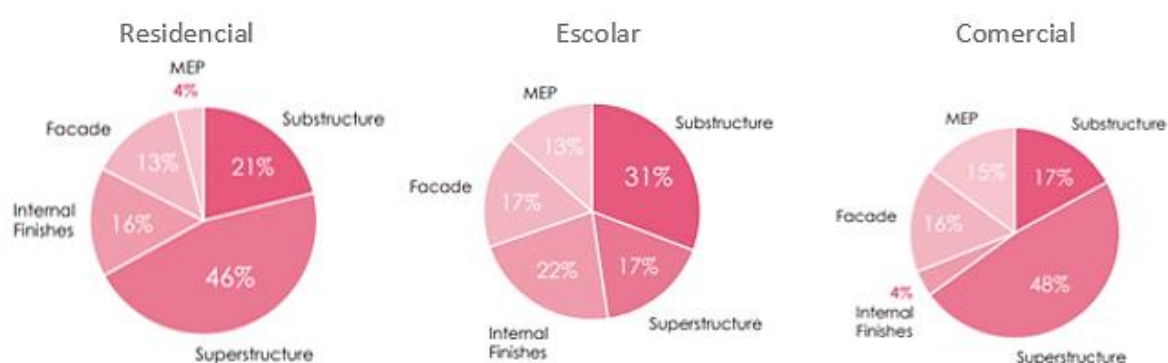


Figura 17 - Contribuição em percentagem dos elementos de construção para a pegada total de carbono equivalente de um edifício. Imagem adaptada de [12].

De acordo com as percentagem de subestrutura e superestrutura é possível conseguir uma meta mais precisa para os casos de estudo desta dissertação, nesse sentido as metas estabelecidas pela

LETI para edifícios residenciais e escolas passam a ser $200 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ e $145 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$, respectivamente, já para edifícios comerciais a meta passa a ser $230 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ [116]. Para além das metas, a LETI possui também um sistema classificação do edifício, desde a categoria A++ até à categoria G, conseguindo classificar assim diferentes projetos com base no valores de $\text{kgCO}_2\text{e/m}^2$. Na Figura 18 é possível observar estas classificações para edifícios residenciais.

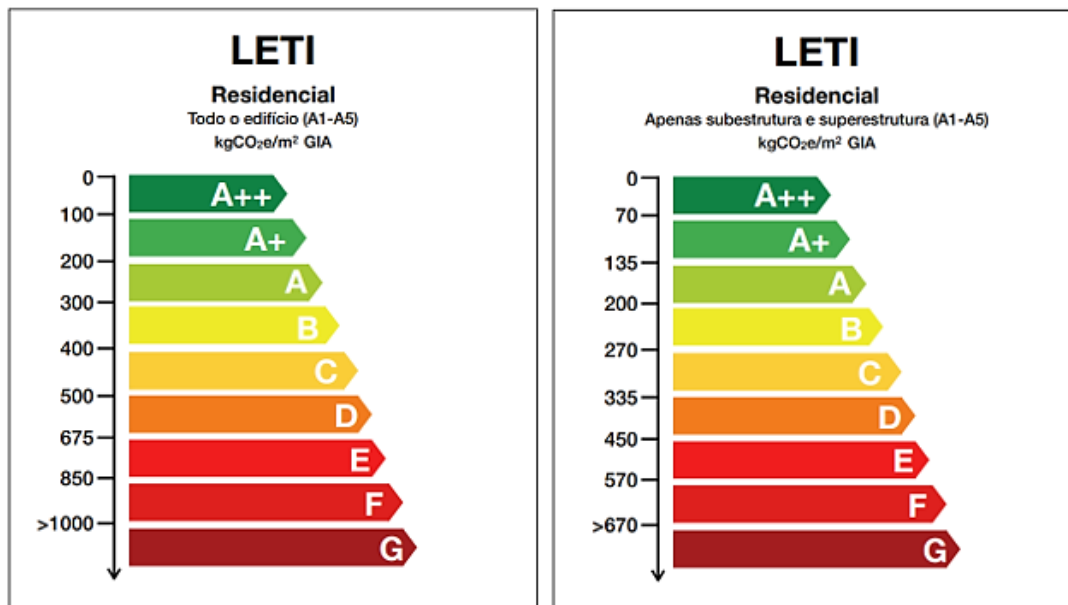


Figura 18 - Sistema de classificação da LETI para todo o edifício (esquerda) e apenas para a subestrutura e superestrutura (direita) de um edifício residencial para os módulos A1-A5.

Do mesmo modo LETI também possui sistemas de classificação para edifícios escolares (Figura 19) e para edifícios comerciais (Figura 20).

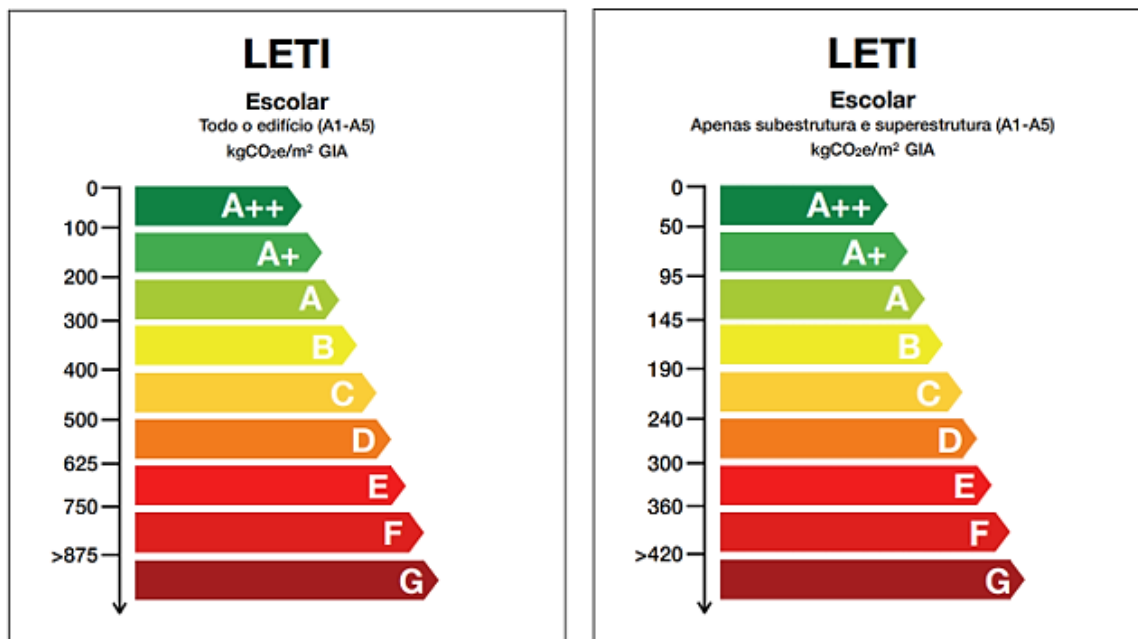


Figura 19 - Sistema de classificação da LETI para todo o edifício (esquerda) e apenas para a subestrutura e superestrutura (direita) de um edifício Escolar para os módulos A1-A5.

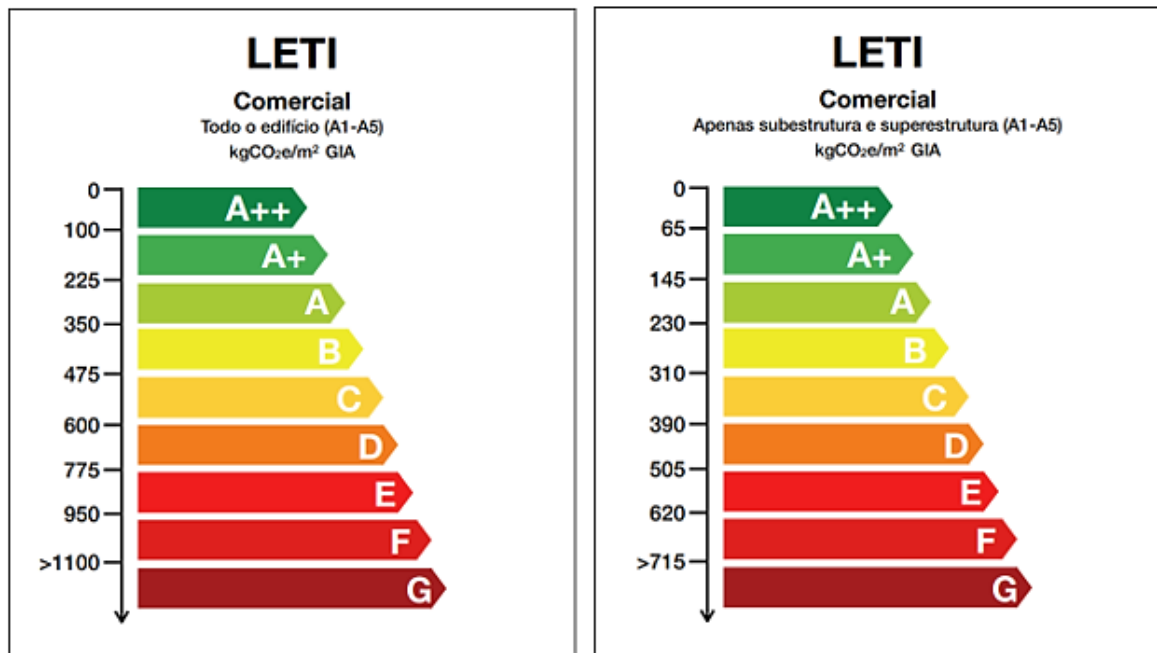


Figura 20 - Sistema de classificação da LETI para todo o edifício (esquerda) e apenas para a subestrutura e superestrutura (direita) de um edifício Escolar para os módulos A1-A5.

Para além de sistemas de classificação dos módulos A1 a A5, LETI publicou também sistemas de classificação para os módulos A1-A5, B1-B5, C1-C4 excluindo o carbono operacional [116]. Na Figura 21 é possível observar o sistema de classificação para residências, já na Figura 22 e Figura 23 observa-se os sistemas de classificações para edifícios escolares e comerciais, respetivamente.

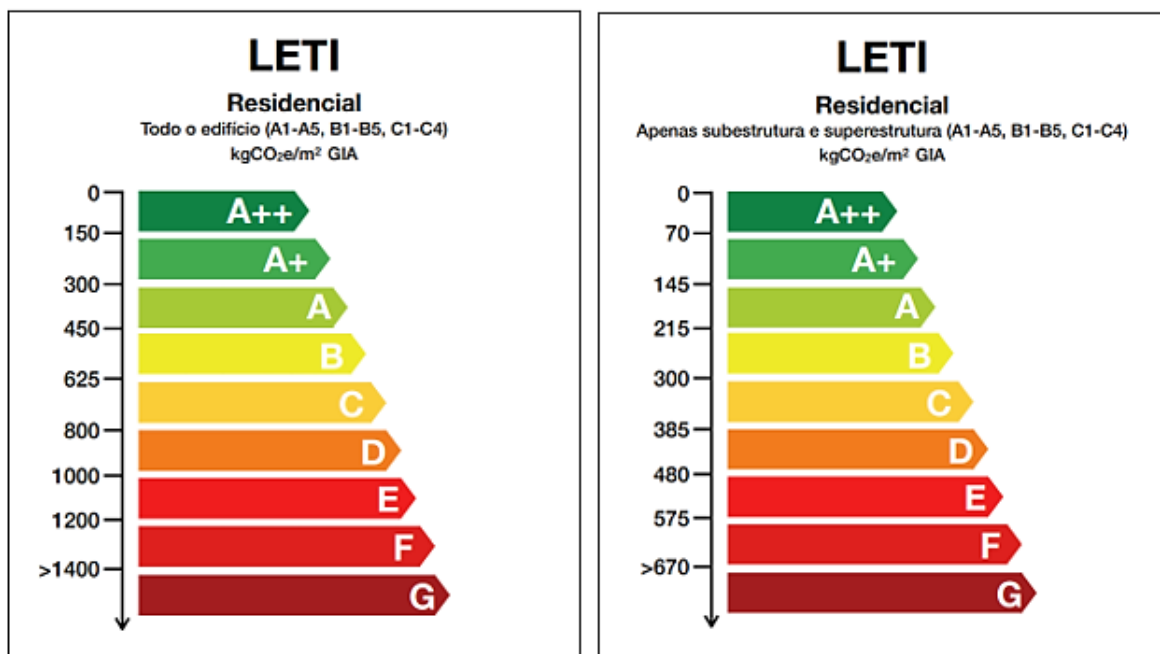


Figura 21 - Sistema de classificação da LETI para todo o edifício (esquerda) e apenas para a subestrutura e superestrutura (direita) de um edifício Residencial para os módulos A1-A5, B1-B4, C1-C4.

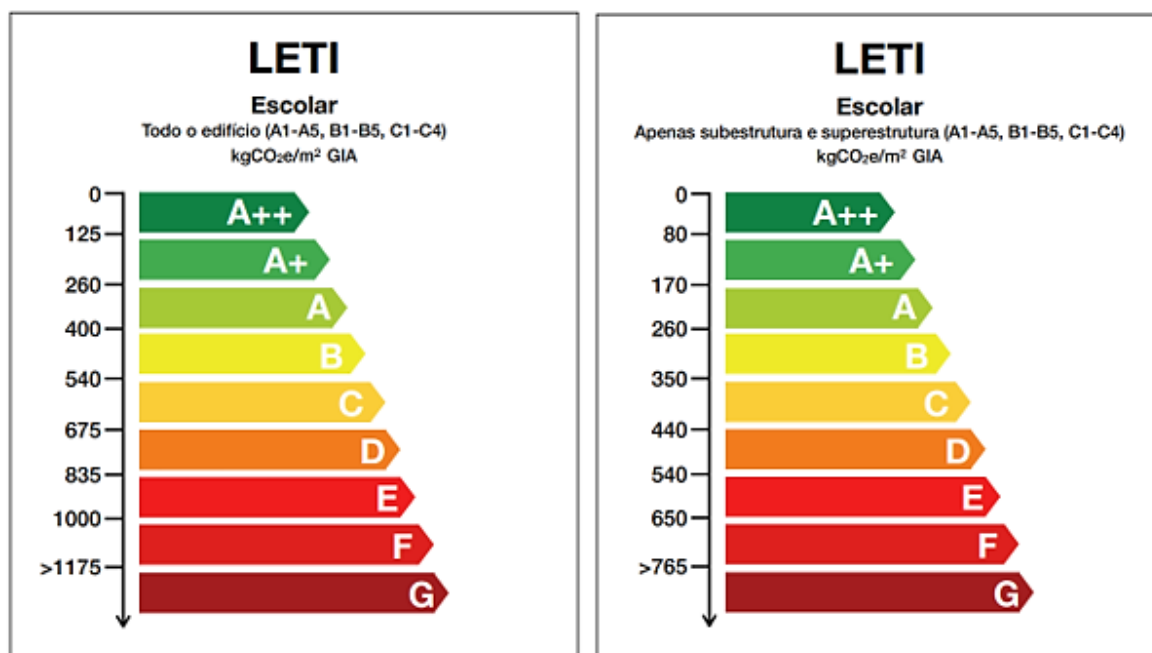


Figura 22 - Sistema de classificação da LETI para todo o edifício (esquerda) e apenas para a subestrutura e superestrutura (direita) de um edifício Escolar para os módulos A1-A5, B1-B4, C1-C4.

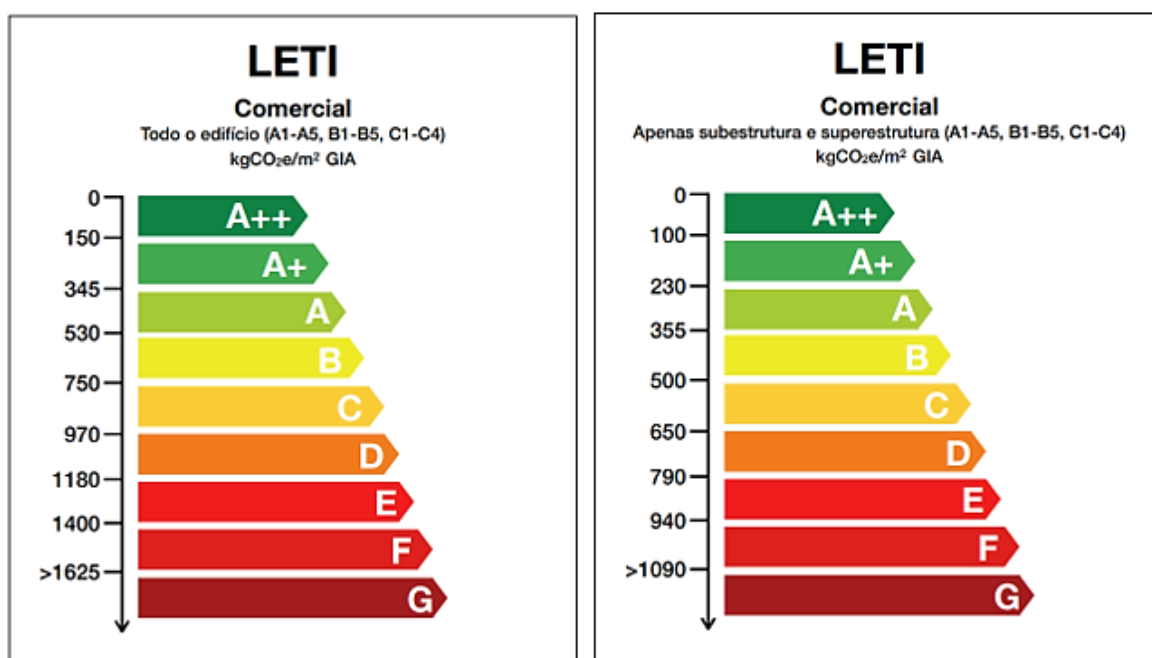


Figura 23 - Sistema de classificação da LETI para todo o edifício (esquerda) e apenas para a subestrutura e superestrutura (direita) de um edifício Comercial para os módulos A1-A5, B1-B4, C1-C4.

Outros autores como *Will Arnold* e *John Orr* [120] propuseram também um sistema de classificação SCORS (*Structural Carbon Rating Scheme*) baseado numa análise de carbono incorporado de 326 projetos partilhados por *Arup*, *Price & Myers* e *Thornton Tomasetti*, para poder comparar decisões e opções de baixo e alto carbono. Na classificação SCORS nenhuma distinção é feita entre o tipo de estrutura, tipo de edifício, número de andares, localização geográfica ou se é referente a uma nova construção ou a uma reabilitação. Através da Figura 24 é possível observar a classificação SCORS e também afirmar que em todos os tipos de estruturas de construção, em qualquer lugar do planeta

e em qualquer configuração, uma classificação A (meta para 2030 dos respetivos autores) significa que a pegada de carbono incorporado estimada para os módulos A1-A5 da superestrutura e da subestrutura está na faixa de valores entre 100-150 kgCO₂e/m² GIA [120].

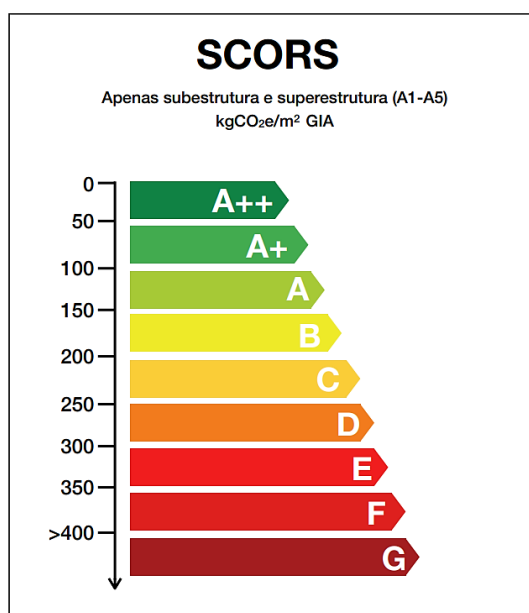


Figura 24 - Sistema de classificação SCORS para a subestrutura e superestrutura de todos os tipos de construção dos módulos A1-A5.

RIBA, como resultado do estudo de *benchmark*, também definiu uma meta para o carbono incorporado em edifícios até 2030 [117]. A meta foi estabelecida para três diferentes tipos de edifícios para os módulos A1-A5, B1-B5, C1-C4. O valor de carbono incorporado para edifícios residenciais é 625 kgCO₂e/m², correspondendo a uma classificação B da LETI. Já para os edifícios escolares e comerciais a meta corresponde a 540 kgCO₂e/m² e 750 kgCO₂e/m², respetivamente, correspondendo também a uma classificação B segundo a LETI. Além do carbono incorporado a RIBA apresenta metas de carbono operacional para 2030. Estes valores correspondem a edifícios em que todos os elementos de construção estão presentes na pegada total de carbono incorporado, segundo os mesmos autores que desenvolveram a classificação SCORS foi possível transformar estes valores. Depois de atribuída a percentagem aos elementos de construção estruturais os valores para a meta de carbono incorporado são 405 kgCO₂e/m² para edifícios residenciais, já para edifícios escolares e comerciais a meta corresponde a 325 kgCO₂e/m² e 450 kgCO₂e/m², respetivamente [120]. Para além dos elementos de construção ainda foi possível apresentar as metas da RIBA apenas para os módulos A1-A5. Depois de atribuída a devida percentagem para esta etapa do ciclo de vida os valores de *upfront carbon* para os edifícios residenciais é 300 kgCO₂e/m² correspondendo a uma classificação C da LETI, para edifícios escolares e comerciais a meta corresponde a 170 kgCO₂e/m² e 235 kgCO₂e/m², respetivamente, ambas correspondendo a uma classificação B da LETI.

A ferramenta de cálculo *One Click LCA* possui também a sua própria pesquisa de *benchmarking* de edifícios da Europa [121]. A pesquisa dividiu a Europa em três principais zonas, Europa Ocidental, Europa do Norte e Europa Oriental. Portugal faz parte dos países da zona Ocidental da Europa e consequentemente os dados relevantes do relatório apenas se centram nos edifícios desta área. No relatório foi realizada uma triagem de 15000 edifícios, dos quais foram utilizados 3737 edifícios

européus reais divididos em cinco tipos de edifícios: comercial, educacional, industrial, escritório e residencial. A pesquisa baseia-se num conjunto de dados consistente calculado de acordo com a norma EN 15978:2011 e a metodologia Level(s) para as fases do ciclo de vida A1-A4, B4-B5 e C1-C4. Na Figura 25 é possível observar o resultado do estudo para a Europa ocidental.

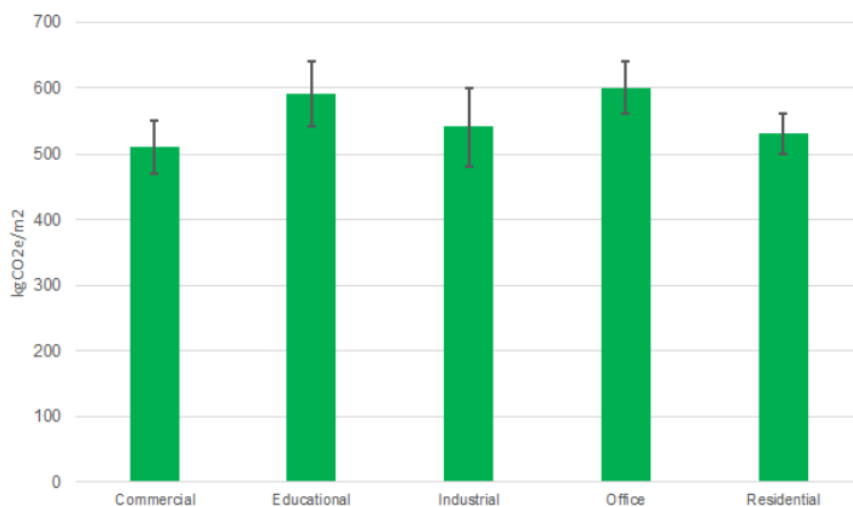


Figura 25 - Resultado do estudo de benchmarking em edifícios europeus no relatório da One Click LCA. Imagem retirada de [121].

A partir dos valores obtidos no estudo a *One Click LCA* fornece um sistema de classificação de A a G para que o projetista ou outro indivíduo que realize a quantificação do carbono equivalente na ferramenta *One Click LCA* consiga compreender como o projeto se posiciona no combate às emissões de dióxido de carbono equivalente. Na Figura 26 é possível observar a classificação *One Click LCA* apenas para os módulos A1-A4, B4-B5, C1-C4 tanto para todos os elementos de um edifício residencial como apenas para a parte estrutural do mesmo.

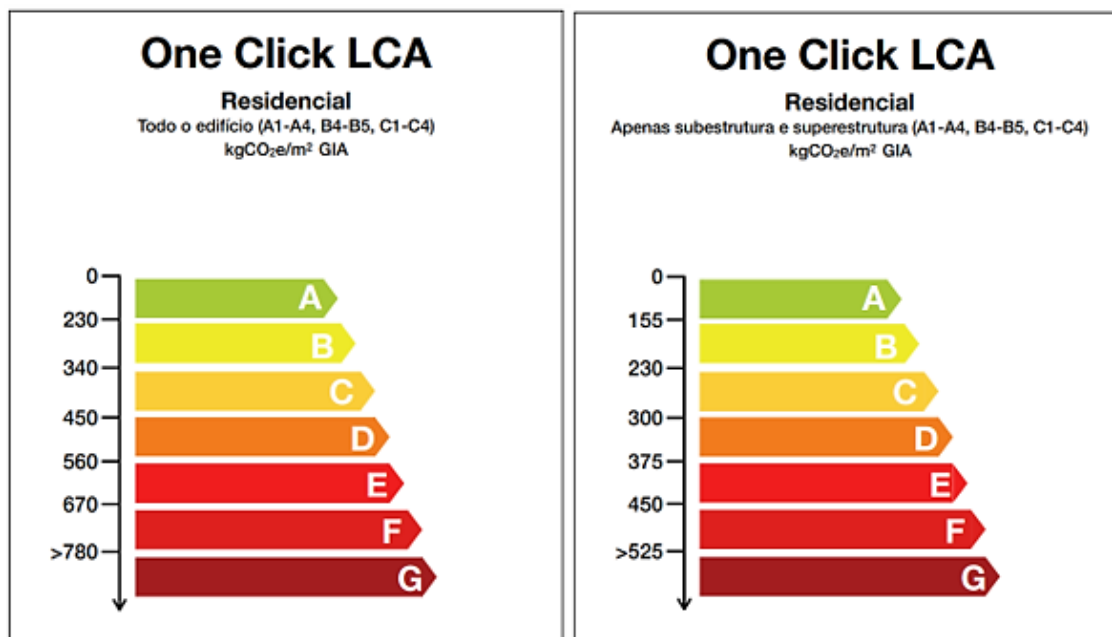


Figura 26 - Classificação *One Click LCA* para os módulos A1-A4, B4-B5, C1-C4 tanto para todo o edifício residencial (esquerda) como apenas para a sua subestrutura e superestrutura (direita).

Do mesmo modo, nesta dissertação é também estudado um pavilhão industrial e como consequência é também apresentada a classificação *One Click LCA* para este tipo de edifício. Na Figura 27 é possível observar a classificação apenas para os módulos A1-A4, B4-B5, C1-C4 tanto para todos os elementos do armazém, como apenas para a parte estrutural do mesmo.

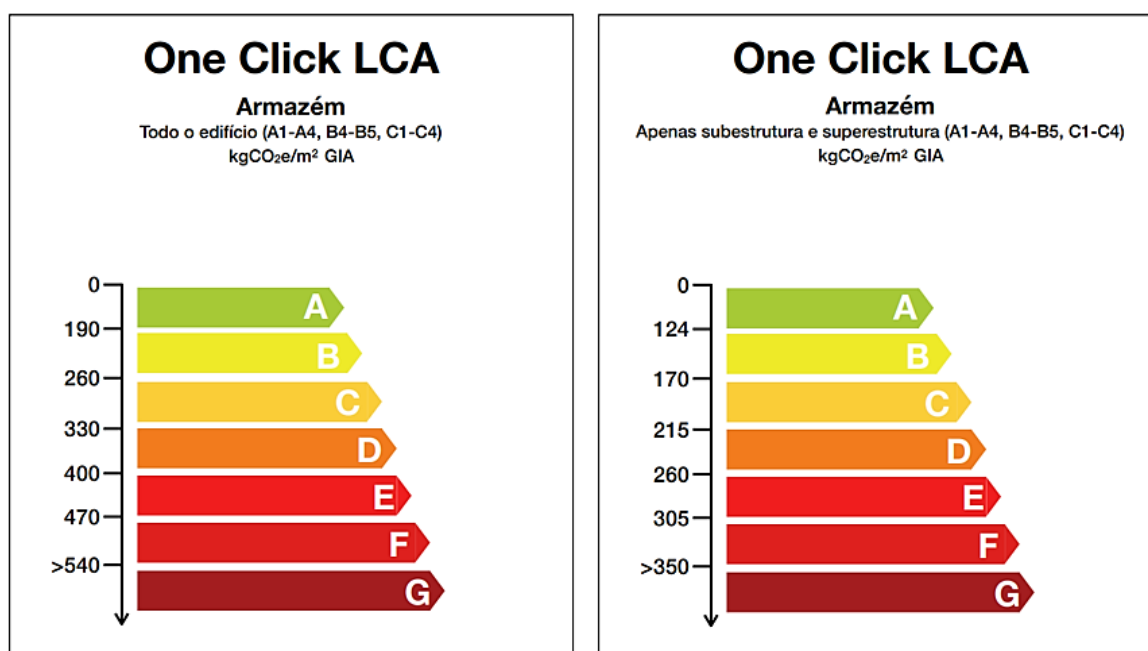


Figura 27 - Classificação *One Click LCA* para os módulos A1-A4, B4-B5, C1-C4 tanto para todo o armazém (esquerda) como apenas para a sua subestrutura e superestrutura (direita).

3.4.1. Regulações de carbono na Europa

O próximo grande desafio, especialmente quando se trata de novas construções, reside na necessidade de desenvolver e aplicar uma estratégia eficaz para alcançar emissões líquidas zero. Até agora, a legislação na Europa tem-se concentrado principalmente em reduzir as emissões de gases de efeito estufa relacionadas com a energia usada para o aquecimento, abastecimento de água quente, refrigeração, ventilação, iluminação, cozinha, instalações de comunicação, equipamentos e elevadores, ou seja, carbono operacional. Embora ainda haja muito trabalho a ser feito para diminuir a quantidade de carbono incorporado nos materiais de construção, essa questão tornou-se uma prioridade tanto para a indústria quanto para os governos. Na União Europeia, três países (Dinamarca, França e Países Baixos) implementaram regulamentações abrangentes que abordam as emissões de carbono em todas as etapas do ciclo de vida de um edifício, abrangendo tanto o carbono operacional como o carbono incorporado. Dois planeiam e já anunciaram a regulamentação (Finlândia e Suécia) [122], [123].

Dinamarca

A Dinamarca implementou a regulamentação de carbono incorporado em 2023, sendo dos primeiros países da Europa a introduzir limites de carbono incorporado. Os valores limites incluem todas as emissões de gases efeito estufa, ou seja, carbono operacional e carbono incorporado. Os valores introduzidos em 2023 são pouco ambiciosos, no entanto, com intervalos de dois anos o limite de carbono é reduzido até 2029. No ano 2023 apenas novas construções com mais de 1000

m² são obrigadas a respeitar estes limites, já as restantes apenas devem calcular a pegada total de carbono equivalente. A partir de 2025 todas as novas construções são obrigadas a respeitar os limites de carbono com um período de 50 anos. Os valores limites são: 12 kg de CO₂e/m²/ano (2023); 10,5 kg de CO₂e/m²/ano (2025); 9 kg de CO₂e/m²/ano (2027) e 7,5 kg de CO₂e/m²/ano (2029). Para além destes valores possui ainda outros valores mais ambiciosos, mas de carácter voluntário [123]–[125].

França

O regulamento RE2020 foi instituído no início de 2022, no qual são definidos valores limite para as emissões de carbono incorporadas e operacionais durante toda a vida. Para residências unifamiliares, os valores de carbono incorporado para toda a vida são fixados em 640 kgCO₂e/m² para 2022, reduzindo a cada três anos para 415 kgCO₂e/m² até 2031. Para apartamentos o valor limite começa em 740 kgCO₂e/m² reduzindo até 490 kgCO₂e/m² em 2031 [124], [126].

Finlândia

A Finlândia está a desenvolver os limites de carbono equivalente e é esperado que sejam introduzidos em janeiro de 2024. A nova lei apresentará uma declaração climática obrigatória para todos os projetos que se candidatarem a uma licença de construção. Contudo existem exceções e certos projetos estarão isentos deste requisito. Nestas exceções estão edifícios com menos de 50 m², edifícios industriais, religiosos, de produção agrícola, edifícios militares e edifícios temporários com um uso não superior a 2 anos [123], [124].

Países baixos

O Decreto Holandês de Construção estabeleceu que todos os edifícios de escritórios com mais de 100 m² e todos os edifícios residenciais devem aderir ao *Milieu Prestatie Berekening* (MPG). O MPG baseia-se numa avaliação do ciclo de vida, mas converte os valores de impacto ambiental (por exemplo, potencial de aquecimento global, destruição da camada de ozono, acidificação dos oceanos, etc.) num preço sombra (por exemplo, 0,05€/kgCO₂e, 30€/kgCFC-11e e 4€/kgSO₄e). O preço sombra total do projeto por área útil está sujeito a um limite de 1,0 €/m²/ano, que para edifícios residenciais foi reduzido para 0,8 €/m²/ano em 2021, e propõe-se que seja reduzido para 0,5€/m²/ano em 2030 [123], [124].

Suécia

A suécia obriga desde 2021 todos os edifícios com mais de 100 m² a apresentarem uma declaração climática para a autorização de ocupação, embora também existam algumas exceções. A declaração ambiental deve apresentar os módulos A1 a A5, cujo objetivo é reduzir o impacto climático na construção dos edifícios. Estas declarações ambientais são tratadas para fornecer informações necessárias à produção de estatísticas, investigação, acompanhamento e avaliação do impacto climático e supervisão. Os valores limite estão a ser desenvolvidos e são esperados até 2027. Atualmente, os valores limite são descritos como reduções percentuais crescentes em relação a valores de referência ainda não definidos [123], [124], [127].

Comissão Europeia

Como referido anteriormente, a europa apenas aplica legislação ao carbono operacional dos edifícios através do pacote Objetivo 55 (Fit for 55) [128]. Através dele a Comissão Europeia obriga todos os novos edifícios detidos por organismos públicos a terem emissões de carbono operacional

nulas a partir de 2028. Já para os restantes edifícios, as emissões nulas apenas se aplicam a partir de 2030. Esse é também o ano em que todos os novos edifícios são obrigados a possuir certificados de desempenho energético. Relativamente aos edifícios existentes, é exigido até 2033 um nível da classe de desempenho energético D; até 2040 um nível definido por cada país que garanta que até 2050 o parque edificado tenha emissões nulas; e a partir de 2050 todos os edifícios necessitam de ter emissões nulas. Neste cenário de descarbonização existem também algumas exceções, como por exemplo, edifícios históricos ou edifícios de propriedade das forças armadas.

A única legislação que implica mudanças no carbono incorporado dos edifícios é o mecanismo de ajuste das emissões de carbono nas fronteiras (CBAM, do inglês *Carbon Border Adjustment Mechanism*) que decorrerá entre 2026 e 2034 [129]. Este mecanismo visa incentivar as empresas, tanto dentro como fora da União Europeia, a reduzirem as suas emissões de carbono. Ele atinge esse objetivo ao estabelecer um preço para o carbono sobre as importações de certos produtos, quando provêm de países com políticas climáticas menos rigorosas. O propósito principal é evitar a chamada "fuga de carbono", que acontece quando as indústrias transferem a sua produção para nações com regulamentações mais folgadas em relação às emissões de gases de efeito estufa. Como parte do pacote Fit for 55, a União Europeia implementará um mecanismo de ajuste de carbono nas fronteiras, que consiste na aplicação de uma taxa de carbono sobre a importação (fora da união europeia) de produtos específicos provenientes de indústrias intensivas em consumo de energia, tais como ferro, aço, cimento, alumínio, fertilizantes e hidrogênio. Os importadores serão responsáveis por pagar a diferença entre o preço do carbono no país de origem e o valor das licenças de carbono sob o sistema de comércio de emissões da União Europeia.

O gráfico na Figura 28 expõe os valores limites de emissões de carbono equivalente de diferentes entidades voluntárias (SCORS, LETI e RIBA) e dos países acima descritos. O gráfico considera apenas o carbono estrutural inicial (módulos de ciclo de vida A1-A5 conforme a norma EN 15978, apenas superestrutura e subestrutura). Através desta comparação observa-se que os limites SCORS possuem os valores mais ambiciosos e também é o único a apresentar limites pós 2035.

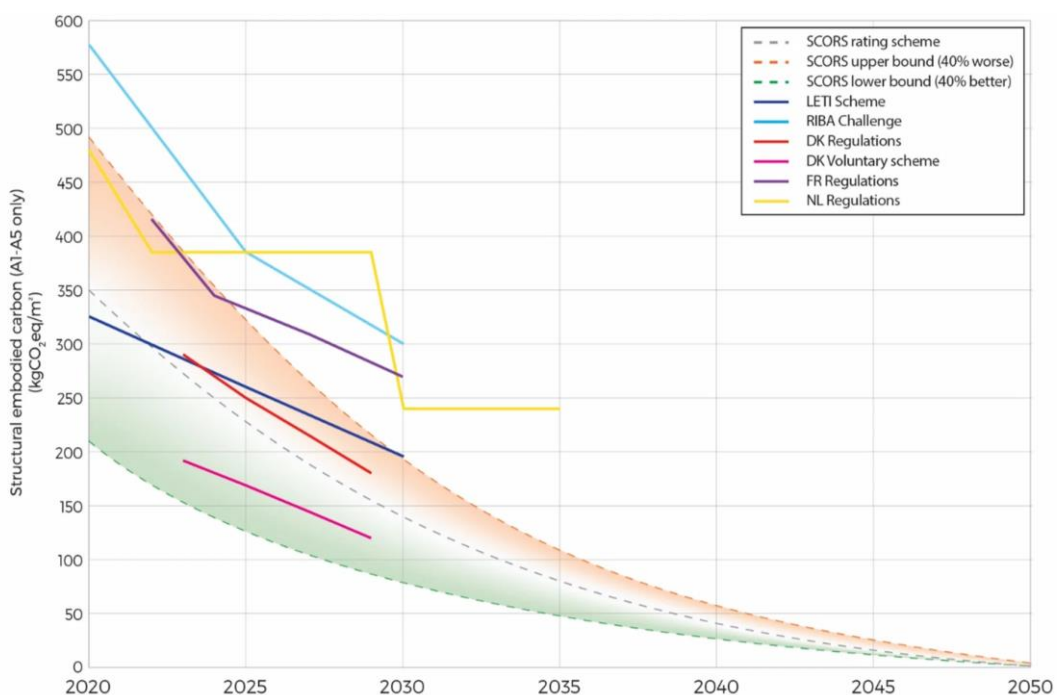


Figura 28 – Metas indicadoras de carbono estrutural para os módulos A1-A5. Imagem adaptada de [124].

3.5. Cálculos dos Módulos ACV

Como referido anteriormente, a quantificação do carbono equivalente deve ser efetuada segundo a metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV) do projeto, tendo como base a norma EN 15978:2011, no caso dos edifícios e baseado na norma EN 17472:2022, no caso das infraestruturas. Nesta metodologia estão presentes várias etapas do ciclo de vida divididas também em vários módulos (ver Figura 5 anteriormente apresentada) na qual devem ser devidamente discutidos e apresentados os seus métodos de cálculo.

Devido à falta de dados nem sempre é possível calcular todos os módulos ACV do projeto. Como exposto anteriormente no capítulo 2.2, são escassos os estudos da literatura que apresentam todos os módulos ACV na sua avaliação ambiental. Porém para o cálculo da pegada de carbono equivalente no projeto deve existir um mínimo de módulos ACV avaliados. Para elementos estruturais o cálculo da pegada de carbono equivalente deve incluir no mínimo os módulos A1–A5, caso seja efetuada uma análise à fachada o módulo B4 deve ser também obrigatório. O motivo de existir este mínimo dos módulos ACV deve-se às emissões A1–A5 serem aquelas que devem ser eliminadas antes de 2050, fazendo delas as emissões mais importantes, já que devem ser mais rapidamente entendidas e minimizadas para manter o aquecimento global dentro dos 1,5°C. São também as emissões com menor incerteza e correspondem normalmente à maioria do carbono incorporado das estruturas. Na certificação Level(s) nenhum módulo é de carácter obrigatório, ou seja, todos os módulos são opcionais não sendo exigido qualquer mínimo de avaliação de ciclo de vida. No entanto, a melhor prática é considerar o carbono incorporado durante toda a vida (módulos A–D), para que não sejam apenas minimizadas as emissões de carbono incorporadas hoje, mas também sejam considerados os impactos das emissões futuras do uso do ativo, assim como a durabilidade, longevidade, cenários de fim de vida, reutilização e reciclabilidade. Desta forma é garantido que futuras emissões e consumo de recursos sejam também reduzidos ao mínimo.

3.5.1. Módulos A1 a A3

A quantificação da pegada de carbono equivalente de qualquer projeto é inaugurada sempre pela determinação das quantidades de materiais envolvidas no projeto. Isto porque as emissões de dióxido de carbono e outros gases com efeito estufa relacionadas ao projeto provêm, em grande parte, do fabrico de materiais de construção correspondente ao conjunto dos módulos A1, A2 e A3. Desta forma, este conjunto de módulos está dependente de materiais, mais precisamente da quantidade de cada material. É necessário perceber de que maneira se deve quantificar os materiais para não causar lapsos no cálculo das emissões de carbono equivalente como consequência da incorreta extração das quantidades dos materiais envolvidos no projeto. Na norma EN 15978; 9.1-9.3 [130] é especificado como as quantidades de materiais são determinadas. As quantidades devem ser usadas e declaradas em toda a pegada de carbono na seguinte ordem de preferência e sujeita à disponibilidade da etapa em que se encontra o projeto [131]:

1. Entrega dos registos dos materiais;
2. Através do modelo BIM;
3. Listas das quantidades ou plano de custos dos materiais;
4. Estimativas obtidas através de desenhos.

As quantidades dos materiais nos casos de estudo abordados nesta dissertação foram determinadas através do modelo BIM do *Revit*, e foram exportadas automaticamente para o Software *One Click LCA* diminuindo a probabilidade de erros no cálculo das quantidades. Para projetos já existentes a obtenção das quantidades dos materiais torna-se um processo mais difícil. As quantidades reais devem ser obtidas, sempre que possível, a partir de desenhos de construção e/ou de registos do empreiteiro envolvido no projeto. Caso estas opções também não sejam possíveis é considerado obrigatório pesquisas e medições no local do projeto.

Depois de determinadas todas as quantidades dos materiais do projeto é necessário atribuir a esses materiais a quantidade de carbono equivalente que eles emitem para a atmosfera. Para chegar a esses valores é necessário recorrer à base de dados que possuam DAPs e é importante também perceber quais as fontes de dados de carbono válidas, já que devem ser declaradas explicitamente as fontes de dados usadas não só nestes módulos, mas em todo o ciclo de vida de avaliação do carbono equivalente. A norma EN 15978; 8.4 e 10.3 determina as fontes de dados de carbono que são permitidas para o uso em ACV. As seguintes fontes devem ser utilizadas por ordem de preferência:

1. Declarações ambientais do tipo III (DAPs e equivalente) e conjuntos de dados de acordo com EN 15804;
2. Declarações ambientais tipo III (DAPs e equivalente) e conjuntos de dados de acordo com ISO 21930;
3. Declarações ambientais tipo III (DAPs e equivalente) e conjuntos de dados de acordo com ISO 14067;
4. DAPs e conjuntos de dados de acordo com ISO 14025, ISO 14040 e 14044;
5. Declarações ambientais tipo III (DAPs e equivalente) e conjuntos de dados de acordo com PAS 2050.

Como referido anteriormente, as declarações ambientais do tipo III devem ser emitidas por um operador de programa designado aderindo ao requisitos da norma ISO 14025 (ver capítulo 2.3). Quando não é possível a utilização de DAPs, os materiais genéricos presentes em algumas base de dados são boas alternativas. Deve-se optar por base de dados mais recentes e geograficamente e tecnologicamente mais próximas da localização do projeto. A base de dados *One Click LCA* possui inúmeras base de dados, principalmente provenientes da europa, e é atualizada semanalmente, fazendo dela a melhor opção como base de dados para a dissertação. A norma EN 15804 - seção 6.3.7 sugere que produtos provenientes de DAPs não devem ter mais de cinco anos (validade habitual nas DAPs) e os dados genéricos não devem ter mais de dez anos. Na Figura 29 é possível observar todas as bases de dados da europa presentes no software *One Click LCA*.



Figura 29 – Base de dados da europa presentes no software *One Click LCA*.

As DAPs geralmente incluem apenas os módulos A1–A3, portanto deve haver um cuidado especial em combinar com outras fontes a fim de preencher as lacunas. Se numa DAP existir dados relativamente aos módulos A4 e A5, deve-se sempre verificar se as suposições dentro destes cálculos se alinham com as circunstâncias específicas do projeto. A norma EN 158044 exige agora que os DAPs de produtos e materiais de construção declarem os módulos A1–A3, C1–C4 e D a fim de facilitar o processo de cálculo nestas etapas, já que aumentará a disponibilidade de dados para estes módulos. A quantidade de carbono emitida pelos materiais de construção deve ser obtida pela Equação (3) [112], [131]–[133].

$$\text{Carbono incorporado [A1-A3]} = \text{Quantidade do material (a)} \times \text{Fator de carbono (b)} \quad (3)$$

No entanto ao efetuar o cálculo é necessário garantir que (a) e (b) estejam na mesma unidade de medida, ou seja, geralmente o fator de carbono é expresso em kg CO₂e/kg e as quantidades dos materiais apresentam-se em m³. Ao surgir esta incompatibilidade deve ser utilizada primeiro a Equação (4), em que a quantidade do material é alterada para kg através da densidade do mesmo. Os dados de densidade devem ser provenientes da DAP utilizada ou da documentação técnica provida pelo fornecedor do material.

$$\text{Quantidade do material (kg)} = \text{Quantidade do material (m}^3\text{)} \times \text{Densidade do material (kg/m}^3\text{)} \quad (4)$$

Quando se procede à utilização de materiais genéricos não locais deve-se ter ainda especial atenção ao cálculo do fator de compensação exposto anteriormente na Equação (1) e Equação (2). Quando num projeto é possível reutilizar um material proveniente da demolição de outro projeto, para essa quantidade de material não é aplicada a Equação (3), uma vez que não foi emitida nenhuma quantidade de carbono equivalente no fabrico do material. Por exemplo, o aproveitamento de uma

treliça ou um perfil com as mesmas dimensões tanto no antigo como no atual projeto são considerados materiais reutilizados.

Betão

A quantidade de carbono emitido para a atmosfera na utilização de betão no projeto é calculada simplesmente pela utilização das Equações (3) e (4). O único fator que varia é a quantidade de carbono que o material emite, o que depende principalmente da quantidade de cimento Portland (CP) como referido anteriormente no capítulo 2.4.1. O fator de carbono também varia consoante a percentagem de produtos reciclados, como a introdução de cinzas volantes ou escória granulada de alto forno em substituição ao CP, mas também com a resistência à compressão do betão solicitada no projeto. A base de dados *One Click LCA* fornece o carbono incorporado de uma variedade de misturas de betão de diferentes graus de resistência e substituições de CP.

Aço

A quantidade de carbono equivalente emitido para atmosfera na utilização de aço no projeto é também calculada simplesmente pela utilização das Equações (3) e (4). A quantidade de carbono emitida nos módulos A1 a A3 do aço varia de acordo com a quantidade de aço reciclado no seu conteúdo e do seu método de produção: processo de alto forno (BF-BOF) ou forno de arco elétrico (EAF) como referido anteriormente no capítulo 2.4.2. A base de dados *One Click LCA* fornece o carbono incorporado de uma variedade de aços com diferentes teores de reciclagem e de diferentes processos.

Madeira

Como já mencionado no capítulo 2.4.3 o dióxido de carbono é absorvido da atmosfera pelas árvores durante o seu crescimento através do processo da fotossíntese. A quantidade de CO₂ absorvido é armazenado temporariamente dentro da madeira até ser libertado no seu final de vida na forma de gás efeito de estufa proveniente da queima (CO₂) ou da decomposição em aterro (CO₂ e CH₄). Este processo, denominado sequestro de carbono, não permite uma quantificação do carbono equivalente nos módulos A1-A3 para a madeira tão simplificada como no caso dos outros materiais de construção. Assim, a madeira além de possuir o seu fator de carbono, geralmente também possui o carbono sequestrado, um número negativo, que se pode subtrair à pegada total de carbono equivalente do projeto.

O carbono sequestrado deve ser apenas considerado quando a madeira é de origem sustentável, ou seja, quando é certificada pela *Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes* (PEFC), *Forest Stewardship Council* (FSC) ou equivalente. Isto garante que todas as árvores cortadas são substituídas pelo mesmo número de árvores plantadas e, portanto, não se contribui para a desflorestação que compromete a capacidade de absorção de carbono pelas florestas. O carbono sequestrado na madeira deve ser calculado com base na Equação (5) fornecida na norma EN 16449 [131].

$$P_{CO_2} = \frac{44}{12} \times cf \times \frac{\rho_{\omega} \times V_{\omega}}{1 + \frac{\omega}{100}} \quad (5)$$

Em que:

P_{CO_2} : Dióxido de carbono sequestrado;

cf : Fração de carbono na madeira (seca);

ρ_{ω} : Densidade da madeira no teor de umidade dado;

V_{ω} : Volume de madeira no teor de umidade dado;

ω : Teor de umidade da madeira.

Na ausência de dados mais específicos para o elemento de madeira em estudo, os valores padrão a serem usados no cálculo do carbono sequestrado de acordo com a EN 16449 são: $cf = 50\%$ e $\omega = 12$ (%). Geralmente as DAPs de produtos de madeira possuem o valor de carbono sequestrado presente no material e não se torna necessário proceder ao cálculo, uma vez que são esses os valores utilizados no projeto. Caso não exista nenhuma informação, o carbono sequestrado em produtos de madeira deve ser baseado na Equação (5). Os autores [133] ainda propõem uma forma mais simplificada (Equação (6)), assumem o valor de carbono $-1,64$ kg CO₂e por kg de madeira derivado da simplificação da Equação (5).

$$P_{CO_2} = \frac{44}{12} \times cf \times \frac{1}{1 + \frac{\omega}{100}} \quad (6)$$

O valor do carbono sequestrado poder ser subtraído ao valor total de carbono incorporado, mas depende dos ciclos de vida que estão incluídos no estudo. Quando se realiza um estudo somente com os módulos A1–A5 o valor de carbono absorvido pela madeira não deve ser incluído, mas deve ser descrito separadamente do valor total. Por outro lado, quando se realiza um estudo A-C o valor de carbono pode ser incluído no valor total, porque nos módulos C1 a C4 as emissões na etapa C representam o carbono sequestrado libertado novamente para a atmosfera no final da vida útil do produto. A menos que a reutilização do componente possa ser garantida, essa emissão de fim de vida irá equilibrar ou exceder (dependendo do cenário de fim de vida) o sequestro de carbono na etapa A. Por isso é extremamente importante implementar medidas de projeto para maximizar a vida útil dos elementos de madeira para garantir o carbono sequestrado pelo maior tempo possível.

Trabalhos temporários

Quando as obras temporárias durante a fase de construção envolvem o fabrico de novos produtos, os impactos devem ser assinalados nos módulos A1-A3. Isso inclui situações em que peças de aço personalizadas são necessárias para trabalhos de escoramento ou quando é necessário fabricar moldes de betão personalizados. Além disso, as emissões geradas pelo transporte desses materiais para o local da obra (módulo A4), seu uso no local e qualquer desperdício que ocorra durante o processo (módulo A5) também devem ser contabilizados nos respetivos módulos de ciclo de vida. No entanto, se as obras temporárias utilizarem materiais já existentes que foram usados em outras construções, como postes de andaimes, as emissões nos módulos A1-A3 podem ser consideradas zero, mas as emissões nos módulos A4 e A5 devem ser contabilizadas. É altamente recomendado o uso de materiais existentes para obras temporárias, como o aluguer de elementos disponíveis [112], [131]–[133].

3.5.2. Módulo A4

Depois de conhecer as localizações dos fabricantes dos materiais é necessário contabilizar as emissões de carbono equivalente derivadas do transporte da fábrica para o local da obra. No

entanto, devem ser também contabilizados eventuais percursos secundários realizados para depósitos de armazenamento ou centros de distribuição. Para além dos materiais de construção necessários para o projeto, é igualmente necessário contabilizar o transporte de equipamentos de construção (guindastes, andaimes, etc.) para o local da obra. O transporte de pessoas e deslocamento de funcionários é excluído dos cálculos, as emissões associadas a esses transportes não são atribuídas ao projeto, mas sim aos trabalhadores individualmente. Este módulo é referido na EN 15978; 7.4.3.2 e 8.5, e na EN 15804; 6.2.3 [112], [130]–[133].

As emissões resultantes do transporte devem ser calculadas pela Equação (8). Todavia, como o fator de carbono de transporte presente no *software One Click LCA* é expresso em kg CO₂e/(ton·km) é necessário primeiro recorrer à transformação da massa do material em ton·km através da Equação (7).

$$\text{Quantidade Material (ton} \cdot \text{km)} = \frac{\text{Quantidade Material (kg)}}{1000} \times \text{Distância (km)} \quad (7)$$

$$\text{Carbono incorporado [A4]} = \text{Quantidade Material (ton} \cdot \text{km)} \times \text{FCT} \quad (8)$$

Em que:

FCT: Fator de carbono no transporte (kg CO₂e/(ton·km)).

A distância de transporte deve ser calculada com base na distância entre o local de fabricação e o local do projeto, quando estas informações não estão disponíveis, os cenários de transporte apresentados na Tabela 10 podem ser utilizados, embora tenham sido desenvolvidos para o Reino Unido.

Tabela 10 - Cenários de transporte desenvolvidos para projetos situados no Reino Unido.

Cenário de Transporte	km em estrada	km por oceano
Fabricante local	50	-
Fabricante nacional	200	-
Fabricante europeu	2000	-
Fabricante global	100	10000

Neste módulo deve-se alocar razoavelmente os produtos previstos e componentes em cada uma das categorias: local, nacional, fabricado na europa ou no mundo, para comunicar a distância de transporte. Para além destes valores, o próprio *software One Click LCA* também atribui valores padrão para as distâncias de transporte em função dos materiais de construção selecionados. Alguns destes valores padrões podem ser observados na Tabela 11.

Tabela 11 - Distâncias padrão do *software One Click LCA*.

Tipo de Material	km em estrada
Betão	60
Aço	370
Madeira	220
Alumínio	470

Algumas viagens consistem em várias etapas com diferentes modos de transporte, o que será necessário incluir no cálculo total. O fator de carbono no transporte (FCT) varia consoante o modo de transporte que é solicitado. Na Tabela 12 são apresentados os principais modos de transporte e o seu respetivo fator de carbono presentes na base de dados do *software One Click LCA*.

Tabela 12 - Fator de carbono no transporte para os diferentes modos de transporte.

Modo de Transporte	FCT (kg CO _{2e} /(ton·km))
Camião Basculante (19 toneladas de capacidade, meia carga)	0,1300
Camião Basculante (19 toneladas de capacidade, carga completa)	0,0732
Van de entrega (1,2 toneladas de capacidade, meia carga)	0,5200
Van de entrega (1,2 toneladas de capacidade, carga completa)	0,2800
Camião Betoneira (8 m ³ de capacidade, meia carga)	0,2300
Camião Betoneira (8 m ³ de capacidade, carga completa)	0,1300
Camião reboque (40 toneladas de capacidade, meia carga)	0,0490
Camião reboque (40 toneladas de capacidade, carga completa)	0,0383
Navio porta-contentor	0,0090
Navio petroleiro químico	0,0587
Navio petroleiro	0,0067
Comboio a diesel	0,0309
Comboio elétrico	0,0275
Avião (voos domésticos)	2,2700
Avião (voos internacionais curtos)	1,6700
Avião (voos internacionais longos)	0,7000

Mais tarde quando for conhecido o local do fabricante e os tipos de transporte utilizados, os valores associados ao módulo A4 devem ser atualizados com os fatores de carbono respetivos a cada transporte de material utilizado. É importante sublinhar que para os transportes utilizados que não efetuam transporte de outra mercadoria no caminho de regresso, a sua distância deve ser duplicada a fim de calcular as emissões envolvidas nesse percurso. Isso é mais comum para camiões betoneiras ou camiões basculantes que efetuam um transporte mais direto para o local da obra e que regressa sem qualquer tipo de material, já nos navios porta-contentor esta preocupação pode ser desprezada, uma vez que qualquer que seja o seu percurso, transporta sempre mercadoria.

3.5.3. Módulo A5

No módulo A5 são contabilizadas as emissões provenientes de todas as atividades relacionadas com a construção do edifício ou infraestrutura. Esta seção refere-se à norma EN 15978; 7.4.3.3 e 8.5, e EN 15804; 6.2.3 [130]. Nas atividades relacionadas a este módulo encontram-se os trabalhos preliminares no terreno da obra para permitir a construção do projeto, o uso de equipamentos, transporte de materiais e equipamentos no local da construção, tratamentos de resíduos de produtos desperdiçados durante as atividades de construção, etc. Como consequência, as emissões de carbono equivalente deste módulo são divididas em quatro subconjuntos. Emissões relacionadas com a demolição de construções existentes no local de obra, definidas com A5-1. Emissões resultantes do transporte de trabalhadores definidas como A5-4. Emissões associadas à quantidade de cada material desperdiçado no local são definidas como as emissões A5-3. Emissões devido a atividades de construção, por exemplo do uso de energia ou uso de máquinas e/ou veículos a diesel, são identificados separadamente como emissões A5-2 [112], [131]–[133].

A5-1

A demolição de construção já existente é essencialmente o mesmo processo que o impacto de fim de vida do módulo C do projeto principal. No entanto, para diferenciar e comparar projetos de melhoramento ou de nova construção, o impacto da demolição deve ser relatado em A5-1 como parte do impacto inicial de carbono.

Para calcular as emissões de carbono associadas à demolição pré-construção, os números reais devem ser usados sempre que possível, incluindo transporte para processamento de resíduos, processamento de resíduos e deposição de resíduos em aterro. As cargas e benefícios da recuperação de qualquer resíduo de pré-demolição devem ser considerados no módulo D1.

A5-2

Neste subconjunto para além das emissões relacionadas à atividade de construção do projeto no local, as atividades relativas à construção fora do local da obra também devem ser consideradas em A5-2. Por exemplo: Quando um edifício ou infraestrutura é projetado numa estrutura em aço é comum a mesma ser primeiramente preparada numa metalomecânica e posteriormente montada no local destinado. Neste caso existem atividades tanto fora da obra (energia consumida na metalomecânica) como no local da obra (energia consumida para a montagem e/ou utilização de combustíveis em máquinas) e ambas devem ser contabilizadas. É importante mencionar que neste caso existem duas distâncias de transporte dos materiais para o módulo A4.

Num cálculo primário, em que o projeto não se encontra em construção e não são adquiridos dados do consumo de energia e combustíveis é necessário recorrer a um cenário destinado a este tipo de

processo, que são basicamente resultantes de estudos. No Reino Unido, RICS propõe contabilizar este tipo de emissões com base no custo do projeto. É fornecido uma taxa de 0,014 kgCO₂e/£ para todo o edifício (retirado de BRE Meeting Construction 2025 Targets). Apenas para superestrutura e subestrutura, um fator deste valor pode ser assumido com base numa proporção prevista de emissões de atividade do local devido à construção destes elementos. Como estimativa preliminar, essa percentagem ronda os 50%, resultando em uma taxa de 0,007 kgCO₂e/£ apenas para a subestrutura e superestrutura. Contudo, este cenário não é o mais indicado para Portugal, principalmente pela diferença na moeda. A base de dados do *software* proporciona alguns cenários para que na fase inicial do projeto seja possível contabilizar o subconjunto A5-2. O carbono incorporado A5-2 é calculado pela Equação (9). Já na

Tabela 13 são apresentados os tipos de cenários possíveis de escolher no software.

$$\text{Carbono incorporado [A5 – 2]} = \text{Área da estrutura (m}^2 \text{ GIA)} \times \text{Cenário de construção (kg CO}_2\text{e/m}^2\text{)} \quad (9)$$

Tabela 13 - Fator de carbono para cenários de atividades de construção (A5-2).

Cenário	Fator de Emissão
Impactos médios na construção num local com clima temperado (Europa – Consumo de 23,58 kWh/ m ² de eletricidade, 1,12 L/m ² de diesel e 0,05 L/m ² de gasolina)	13,91 kg CO ₂ e/m ²
Impactos médios na construção num local com clima temperado (Global – Consumo de 23,58 kWh/ m ² de eletricidade, 1,12 L/m ² de diesel e 0,05 L/m ² de gasolina)	20,22 kg CO ₂ e/m ²
Impactos médios na construção num local com clima polar (Europa – Consumo de 45 kWh/ m ² de eletricidade e 5,5 L/m ² de diesel)	36,94 kg CO ₂ e/m ²

Nota: Nestes cenários não está incluído o processo de escavação.

Mais tarde, no momento da construção, as atividades de construção devem ser monitorizadas para contribuir para um cálculo do carbono incorporado mais preciso. Nestes possíveis dados a serem motorizados está incluída a energia consumida, o consumo de combustível (como gás natural ou diesel) e a quantidade de horas que as máquinas envolvidas na construção operam (escavadoras, empilhadoras, geradores, etc.). Depois de monitorizados todos os dados, estes podem ser futuramente utilizados para outros projeto numa fase embrionária. Se a montagem e métodos de construção previstos coincidirem com aqueles especificados nas respetivas DAPs, então esses dados podem ser utilizados na avaliação.

A5-3

Neste subconjunto são apenas quantificadas as emissões resultantes dos desperdícios dos materiais. Por exemplo, o desperdício de aço é consequência do corte e furação na preparação dos perfis na metalomecânica. Este desperdício deve também ser contabilizado neste módulo para as emissões totais de carbono equivalente do projeto. Geralmente neste tipo de materiais o desperdício acontece fora do local da obra e como consequência o desperdício no local da construção é zero. Para materiais sob medida, por exemplo betão pré-fabricado, as taxas de desperdício no local são também consideradas nulas. Para calcular as emissões no subconjunto A5-3 deve-se recorrer à Equação (10) que aplica a taxa de desperdício dependendo do cenário de tratamento dos resíduos (CTMD) desse desperdício. O CTMD inclui outros módulos dependendo do fim de vida que é atribuído aos materiais (Tabela 14), cujas emissões já estão calculadas. O cálculo

das emissões de carbono equivalente dos módulos A1-A3 e A4 já foi apresentado, para os restantes módulos (C2, C3 e C4) consultar os capítulos seguintes.

$$\text{Carbono incorporado [A5 - 3]} = \text{Taxa de desperdício (\%)} \times \text{CTMD} \quad (10)$$

Em que:

CTMD = Cenários de tratamento de resíduos dos materiais desperdiçados (kg CO₂e).

Tabela 14 – Cenários possíveis para tratamento de resíduos dos materiais desperdiçados.

Cenário de Tratamento de resíduos dos Materiais desperdiçados (CTMD)		
Depositados em aterro	Reciclados no local da obra	Reciclados fora do local da obra
Carbono incorporado de [A1-A3] + [A4] + [C2] + [C4]	Carbono incorporado de [A1-A3] + [A4] + [C3]	Carbono incorporado de [A1-A3] + [A4] + [C2] + [C3]

Quando a contabilização das quantidades dos materiais é efetuada através da entrega dos registos dos materiais (quantidades brutas) e não através de um modelo BIM, é importante sublinhar que a percentagem de desperdício apenas se aplica às emissões de fim de vida do material, uma vez que os módulos A1-A3 e A4 já estão contabilizados juntamente com os possíveis desperdícios. Na Tabela 15 são apresentadas as taxas de desperdício para cada material da base de dados *One Click LCA*, cuja sua utilização é fundamental numa fase inicial da quantificação do carbono equivalente. As taxas de desperdício devem ser apuradas pelo empreiteiro e posteriormente fornecidas para que as taxas admitidas antes da construção do projeto sejam substituídas por valores reais.

Tabela 15 -Taxa de desperdício de cada material da base de dados *One Click LCA*.

Tipo de Material	Taxa de Desperdício
Betão no local	4%
Betão Pré-fabricado	1%
Barras de Aço para reforço de betão	4,85%
Aço estrutural	3,33%
Blocos de betão	5%
Tijolos	5%
Pedra	4,5%
Madeira estrutural	16,7%
Alumínio	7,5%
Vidro	8%

Como referido anteriormente no subcapítulo 3.5.1, quando é necessário fabricar novos materiais para trabalhos temporários, deve-se quantificar as respetivas emissões nos módulos A1-A3. Do mesmo modo, sempre que algum desses materiais não se encontrem mais em condições de uso ou parte deles sejam desperdiçados, é necessário contabilizar aqui no módulo A5-3 as emissões resultantes do tratamento de resíduos desses materiais. Caso os materiais de trabalhos temporários não sejam fabricados neste projeto, nem haja nenhum desperdício dos mesmos, estes materiais apenas emitem carbono equivalente no módulo A4.

A5-4

O transporte de pessoas e deslocamento de funcionários é excluído dos cálculos na seção A4, caso transportem ao mesmo tempo algum tipo de material, as emissões associadas a esse transporte são contabilizadas no módulo A4. A contabilização das emissões relacionadas com o transporte dos trabalhadores para a construção do projeto é opcional, no entanto, se forem quantificadas, podem ser descritas separadamente em A5-4, contabilizando também as viagens de retorno.

3.5.4. Módulo B1

No módulo B1 é quantificada qualquer emissão proveniente dos diversos componentes do edifício durante toda a sua vida útil. Este módulo está descrito na norma EN 15978; 7.4.4.2 e 8.6.2 [130], e na EN 15804; 6.3.4.4.2 e deve-se dividir em três principais fontes: Refrigerantes; Carbonatação e Vegetação [112], [131]–[133]. Este módulo é insignificante para materiais estruturais, contudo é exposta a forma de o quantificar.

Refrigerantes

Os refrigerantes dizem respeito às substâncias líquidas utilizadas nos vários equipamentos mecânicos, elétricos e sistemas de canalização pertencentes aos serviços de construção. O ar condicionado é um tipo de equipamento que utiliza refrigerantes. Neste módulo são contabilizadas as fugas de refrigerante durante a fase de uso do equipamento no edifício. Para conseguir contabilizar estas emissões é necessário conhecer a taxa de fuga anual, a taxa de fuga de fim de vida e o tempo de vida útil do líquido, para além do impacto ambiental do próprio refrigerante. Estes dados devem ser fornecidos pelo consultor/fornecedor destes equipamentos de acordo com os regulamentos relevantes. Na Tabela 16 é possível observar a emissão de carbono de diferentes tipos de refrigerantes. Atenção especial também deve ser dada a quaisquer emissões decorrentes de agentes de expansão de isolamento, tintas, etc. ao longo do ciclo de vida do projeto.

Tabela 16 - Fator de emissão de diferentes tipos de refrigerantes.

Refrigerante	Fator de Emissão
R-134a (Proibido na europa desde 2014)	1430 kg CO ₂ e/kg
R-140a	146 kg CO ₂ e/kg
R152a	124 kg CO ₂ e/kg
R225ca	122 kg CO ₂ e/kg
R32 (Proibido na europa para uso doméstico e A/C portáteis)	675 kg CO ₂ e/kg

Tabela 16 - Continuação

Refrigerante	Fator de Emissão
R454B	466 kg CO ₂ e/kg
R744 (CO ₂)	1 kg CO ₂ e/kg

Na Equação (11) é possível observar o modo de quantificar o carbono emitido por parte dos refrigerantes presentes no projeto.

$$\begin{aligned} & \text{Carbono incorporado [refrigerantes]} \\ & = FE \times QR \times \left(\frac{T_{\text{anual}}}{100} \times PRE + \frac{T_{\text{fvida}}}{100} \times \frac{PRE}{EVR} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Em que:

PRE = Período de referência do estudo (anos);

EVR = Expectativa de vida do refrigerante (anos);

FE = Fator de emissão do refrigerante (kg CO₂e/kg);

QR = Quantidade de refrigerante (kg);

T_{anual} = Taxa de fuga anual do refrigerante (%);

T_{fvida} = Taxa de fuga de fim de vida do refrigerante (%).

Carbonatação

Elementos de construção contendo betão, cimento ou argamassa possuem a capacidade de absorver carbono quando expostos ao ar. Este processo natural é denominado carbonatação e consiste na reversão química da fase da calcinação do processo de produção de cimento. Apesar de resultar em emissões negativas de carbono equivalente, este processo não é desejável em betão armado, pois tem efeitos adversos nomeadamente a corrosão das barras de aço, comprometendo a sua função. As taxas de carbonatação dependem da duração de exposição, quantidade de cimento e das condições da exposição, incluindo quaisquer tratamentos de superfície de betão. A carbonatação apenas afeta elementos de betão cujas superfícies não são tratadas/revestidas. Deve-se notar também que há um máximo de capacidade de absorver CO₂ associada a qualquer quantidade de material cimentício que varia dependendo dos fatores influentes especificados. O carbono incorporado da carbonatação é calculado pela Equação (12).

$$\text{Carbono incorporado [carbonatação]} = QBE \times CC \quad (12)$$

Em que:

QBE = Quantidade de betão exposta ao ar (m³);

CC = Cenário de carbonatação (kg CO₂e/m³).

Vegetação

À semelhança do que acontece com alguns materiais de construção orgânicos, sobretudo a madeira, a vegetação plantada no local do projeto também é capaz de absorver CO₂. Assim a incorporação de vegetação no projeto é um método de conseguir uma diminuição das emissões de carbono equivalente. A vegetação pode ser a plantação de árvores no solo, mas a plantação de outro tipo de vegetação pode também estar presente em telhados ou fachadas. Potencial de absorção de carbono em telhados e fachadas verdes devem ser apoiados por provas relevantes, por exemplo relatórios de consultores paisagistas. A capacidade de absorção da vegetação depende do tipo de vegetação que é plantada no local do projeto, na Tabela 17 é possível observar a capacidade de absorção de diferentes tipos de vegetação.

Tabela 17 - Capacidade de absorção de diferentes tipos de vegetação.

Tipo de Vegetação	Capacidade de absorção
Carvalho, branco, <i>Quercus alba</i>	13,68 kg CO ₂ e/ano
Carvalho, alfinete, <i>Quercus palustris</i>	55,22 kg CO ₂ e/ano
Carvalho, castanheiro, <i>Quercus prinus</i>	13,68 kg CO ₂ e/ano
Algodoeiro, oriental, <i>Populus deltoides</i>	30,51 kg CO ₂ e/ ano
Cedro-branco, norte, <i>Thuja occidentalis</i>	25,34 kg CO ₂ e/ ano
Abeto, branco, <i>Picea glauca</i>	25,34 kg CO ₂ e/ ano
Cereja, alfinete, <i>Prunus pennsylviana</i>	30,51 kg CO ₂ e/ ano
Pinho, preto europeu, <i>Pinus nigra</i>	10,76 kg CO ₂ e/ ano

Depois de conhecer qual o tipo e o número de vegetação presente no local do projeto é possível calcular as emissões de carbono equivalente segundo a Equação (13), que neste caso resulta em valores negativos, durante o tempo de vida útil do projeto

$$\text{Carbono incorporado [vegetação]} = CA \times N^{\circ} \text{Vegetação} \times PRE \quad (13)$$

Em que:

PRE = Período de referência do estudo (anos);

CA = Capacidade de absorção dependendo do tipo de vegetação (kg CO₂e/ano);

N^o Vegetação = Número de vegetação presente no local do projeto.

3.5.5. Módulo B2

Esta seção é referida na norma EN 15978; 7.4.4.3 e 8.6.3 [130] e EN 15804; 6.3.4.4.2 e diz respeito à manutenção regular, cujo objetivo se centra na eficiência contínua, boa aparência e validade de garantias. Como esperado, todas estas atividades emitem para a atmosfera dióxido de carbono

equivalente que deve ser contabilizado neste módulo. O módulo B2 inclui emissões provenientes do consumo de eletricidade, do consumo de água e do consumo de combustíveis utilizados para as atividades de manutenção. Deve-se salientar que as emissões provenientes da energia consumida e do uso de água são quantificadas neste módulo e não nos módulos B6 e B7. As emissões provenientes da substituição de peças como parte da manutenção preventiva ou regular também devem ser contabilizadas neste módulo. O método de quantificação das emissões de materiais substituídos (o que também pode ocorrer em B2) é apresentado no módulo B3 [112], [131]–[133].

Geralmente, telhados e coberturas, paredes externas, janelas e portas externas, acabamentos e serviços do edifício são os elementos de construção que mais recorrem à manutenção e como consequência são alvo da quantificação das emissões neste módulo.

3.5.6. Módulo B3

Este módulo é referido na norma EN 15978; 7.4.4.4 e 8.6.3. [130] e destina-se aos materiais que necessitam de reparação durante o tempo de vida útil do projeto, consequência de danos inesperados ao longo e para além do regime de manutenção. Os elementos que são contabilizados neste módulo são os mesmos que necessitam de manutenção (referidos anteriormente) [112], [131]–[133].

A quantificação das emissões deste módulo pode ser efetuada de duas formas, através de uma percentagem de reparação anual dos elementos (método para uma fase embrionária do projeto e segundo suposições de reparação) ou então através das quantidades dos materiais que substituirão os danificados (método preferencial quando se conhece as reparações a serem efetuadas). A Equação (14) representa o primeiro método e a Equação (15) o segundo método. O módulo B3 contabiliza todas as emissões de carbono emitidas por outros módulos que são necessários para as atividades de reparação. À semelhança do que acontece no módulo A5 os módulos podem depender do tipo de cenário de fim de vida que é atribuído aos materiais danificados. Esses cenários são apresentados na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

$$\text{Carbono incorporado [B3]} = (TR \text{ anual} \times PRE) \times CTMDA \quad (14)$$

Em que:

PRE = Período de referência do estudo (anos);

TR anual = Taxa de reparação anual (%);

CTMDA = Cenário de Tratamento dos resíduos dos Materiais Danificados (kg CO₂e).

$$\text{Carbono incorporado [B3]} = \left(\frac{QMR}{QMI} \times 100 \right) \times CTMDA \quad (15)$$

Em que:

QMR = Quantidade de material reparado (kg);

QMI = Quantidade de material inicial (kg);

CTMDA = Cenário de tratamento dos resíduos dos materiais danificados (kg CO₂e).

Tabela 18 - Cenários possíveis para tratamento de resíduos dos materiais danificados.

Cenário de Tratamento dos resíduos dos Materiais Danificados (CTMDA)		
Depositados em aterro	Reciclados no local da obra	Reciclados fora do local da obra
Carbono incorporado de [A1-A3] + [A4] + [A5] + [C2] + [C4]	Carbono incorporado de [A1-A3] + [A4] + [A5] + [C3]	Carbono incorporado de [A1-A3] + [A4] + [A5] + [C2] + [C3]

Os cenários de tratamento dos materiais danificados variam consoante o fim de vida que lhes é atribuído. Nestes cenários o carbono incorporado de cada módulo é calculado sobre a quantidade inicial do material e mais tarde é multiplicado pela percentagem de material reparado através da Equação (14) e a Equação (15). Nos materiais reparados deve-se também contabilizar a energia e combustível consumidos na reparação, caso tenham sido necessários, e o desperdício de material, caso tenha ocorrido. Estas emissões correspondem ao módulo A5.

Caso não se conheça nenhum tipo de informação que possibilite a quantificação deste módulo através das equações descritas, é possível assumir 25% das emissões resultante do módulo de manutenção B2 ou então 10% das emissões em A1-A3 no caso dos serviços do edifício de acordo com a metodologia CIBSE TM65.

3.5.7. Módulo B4

O módulo B4 é referido na norma EN 15978; 7.4.4.5 e 8.6.3 [130] e diz respeito ao carbono incorporado associado à substituição de elementos de construção, como equipamentos pertencentes aos serviços de construção, fachadas, telhado, acabamentos internos, etc., ao longo da vida útil do projeto. Esta substituição dos materiais é consequência do tempo de vida útil que cada material apresenta. Para elementos estruturais, como a superestrutura e subestrutura, a vida útil dos materiais é igual ao período do estudo, ou seja, eles não são substituídos durante o ciclo de vida do projeto. Por outro lado, para tintas (por exemplo, intumescentes) e outros elementos de construção, como fachadas e serviços do edifício, a vida útil apresenta sempre um valor menor que o período de estudo [112], [131]–[133].

Para quantificar as emissões provenientes deste módulo deve-se utilizar a Equação (16), multiplicando o número de vezes que o material é substituído pelo possível cenário de tratamento dos materiais substituídos (CTMS). O número de vezes que o material é substituído deve ser sempre arredondado para o valor inteiro superior mais próximo, visto que só números inteiros representam o número de substituições. Através da Equação (16) é assumida uma substituição total (100 %) dos elementos abordados, uma vez que o tempo de vida especificado é atingido.

$$\text{Carbono incorporado [B4]} = \left(\frac{PRE}{EVM} - 1 \right) \times CTMS \quad (16)$$

Em que:

PRE = Período de referência do estudo (anos);

EVM = Expectativa de vida do material (anos);

CTMS = Cenários de tratamento de resíduos dos materiais substituídos (kg CO₂e).

Deve-se observar que, num primeiro cálculo, tanto o PRE quanto a EVM são suposições, pois é difícil de prever com precisão as ações futuras. Essas suposições devem ser claramente declaradas e justificadas ao descrever o carbono incorporado. Para obter a vida útil do componente, o projetista pode consultar o fabricante do produto ou usar a experiência da indústria. Idealmente, deve-se apoiar um serviço de manutenção robusto sobre estes elementos a fim de maximizar a vida útil dos mesmos. Na ausência de informações do fabricante os valores padrão de esperança de vida do material fornecida por RICS deve ser usada para a vida útil dos componentes (Tabela 19).

Tabela 19 - Valores padrão de expectativa de vida do material fornecida por RICS.

Elemento de construção	Componente	Expectativa de vida do material (EVM)
Telhado	Coberturas de telhado	30 anos
Superestrutura	Estrutura e revestimento das paredes divisórias	30 anos
	Móveis e acessórios	10 anos
Serviços de construção	Fontes de calor, como caldeiras e aquecedores	20 anos
	Fontes de calor, como bombas de calor	15 anos
	Aquecimento de ambientes e tratamento de ar	20 anos
	Sistemas de arrefecimento central	15 anos
	Conduta	20 anos
	Instalações elétricas	30 anos
	Acessórios de iluminação	15 anos
	Instalações e controles de comunicação	15 anos
	Instalações de água e esgoto	25 anos
	Captação de águas pluviais	30 anos
Fachada	Louça sanitária	20 anos
	Instalações de elevadores e transportadores	20 anos
	Revestimento modular opaco, como telas de chuva, painéis de madeira	30 anos
	Revestimento envidraçado/parede cortina	35 anos
Acabamentos	Janelas e portas externas	30 anos
	Acabamentos em paredes	30/10 anos
	Pintura paredes	30/10 anos
	Acabamentos piso	30 anos
	Acabamentos teto	20 anos
	Pintura teto	10 anos

Os números acima descritos devem ser substituídos por cenários baseados nas expectativas reais de vida de cada elemento de construção a serem usados no projeto à medida que as informações se tornam disponíveis. Esses cenários devem ser específicos ao tipo de edifício ou infraestrutura, e

podem ser baseados em dados de instalações e relatórios de estratégia de manutenção, estratégias de acesso e manutenção de fachadas, relatórios de custo do ciclo de vida, manuais de operação e manutenção, orientação (por exemplo, CIBSE Guide M e BCIS Expectativa de vida de componentes de construção), normas internacionais (por exemplo, ISO 15686-1:2011, ISO 15686-2:2012, ISO 15686-7:2017 e ISO 15686-8:2008 Edifícios e ativos construídos – planeamento da vida útil) e documentação dos fabricantes.

Na Tabela 20 é possível observar os cenários possíveis para tratamento de resíduos dos materiais substituídos, à semelhança do que acontece nos desperdícios e reparações de materiais. Desta forma o módulo B4 contabiliza todas as emissões de carbono equivalente associadas à produção, transporte até o local e instalação dos materiais, cobrindo eventuais perdas durante esses processos, e emissões provenientes da remoção/demolição e tratamentos dos resíduos.

Tabela 20 - Cenários possíveis para tratamento de resíduos dos materiais substituídos.

Cenário de Tratamento dos Materiais Substituídos (CTMS)		
Depositados em aterro	Reciclados no local da obra	Reciclados fora do local da obra
Carbono incorporado de [A1-A3] + [A4] + [A5] + [C1] + [C2] + [C4]	Carbono incorporado de [A1-A3] + [A4] + [A5] + [C1] + [C3]	Carbono incorporado de [A1-A3] + [A4] + [A5] + [C1] + [C2] + [C3]

3.5.8. Módulo B5

Este módulo é referido na norma EN 15978; 7.4.4.6 e 8.6.4 [130], e na norma EN 15804; 6.3.4.4.2 e incide sobre alterações planeadas e sobre alterações que visam a melhoria das características do projeto. Saber se a substituição de material deve ser incluída no módulo B4 ou no módulo B5 dependerá de haver mudança ou melhoria na função ou desempenho do ativo ao longo do período de referência de estudo (B4), ou de fazer parte de uma melhoria planeada do ativo exigida pelo proprietário (B5). Por exemplo, uma grande mudança no layout interno; a alteração dos sistemas técnicos relacionados com aquecimento, arrefecimento ou ar condicionado; modificações para o propósito de uma mudança de uso planeada ou esperada; uma remodelação planeada ou uma alteração no número de andares seriam todos casos considerados no módulo B5. Para a quantificação do carbono equivalente pode-se utilizar a Equação (16) referida no módulo B4. É importante ter em atenção que o cálculo das emissões de carbono equivalente neste módulo deve contabilizar quaisquer adições e variações de materiais de acordo com a remodelação, que poderá resultar em diferentes valores na etapa de produto e a etapa de construção para os novos materiais (etapas referidas no capítulo 3.5.1 ao capítulo 3.5.3) em vez de valores iguais aos materiais a substituir como referido no módulo B4. Assim quando são adicionados novos materiais ao projeto, na quantificação de B5 os módulos A1-A5 dizem respeito a esses novos materiais e a etapa de fim de vida (C1 a C4) dizem respeito aos materiais que são descartados. À semelhança do que acontece em B4 todas as emissões decorrentes da produção, transporte para o local e instalação dos componentes usados para remodelação devem ser incluídos em B5. Isso também inclui quaisquer perdas durante esses processos, bem como o carbono associado a qualquer demolição, remoção e tratamento de fim de vida dos materiais. Qualquer adição ou remoção de carbono sequestrado durante o módulo B5 deve ser relatado separadamente. Por exemplo, se a remodelação incluir a

adição de dois andares adicionais usando uma madeira laminada cruzada (CLT), a adição líquida de carbono sequestrado deve ser relatada separadamente em B5 [112], [131]–[133].

3.5.9. Módulos B6 e B7

Apesar destes módulos não serem incluídos na quantificação do carbono equivalente dos casos de estudo constantes desta dissertação, é realizada uma breve apresentação do modo de cálculo necessário para que estes módulos possam ser quantificados em futuros projetos.

B6

O módulo B6 é referido na norma EN 15978; 7.4.4.7 e 8.6.5 [130] e quantifica todas as emissões decorrentes do consumo de energia operacional utilizada no edifício ao longo da vida do projeto. As emissões operacionais devem incluir toda a energia operacional utilizada no edifício.

As emissões operacionais incluem o aquecimento, abastecimento de água quente, refrigeração, ventilação, iluminação, cozinha, instalações de comunicação, equipamentos e elevadores, quantificadas e descritas separadamente pelo tipo de combustível e uso de energia. As emissões relacionadas com energia proveniente de obras externas (por exemplo, iluminação de estacionamento) são consideradas opcionais e podem não ser quantificadas. No caso dos combustíveis, caso este seja necessário recorrer ao transporte para o local do projeto, por exemplo garrafas de gás, abastecimento de óleo, etc., as emissões associadas ao transporte de combustível devem também ser incluídas no cálculo das emissões operacionais. Para projetos de infraestrutura, o módulo B6 inclui as emissões provenientes da energia utilizada para operar e fornecer sua funcionalidade, por exemplo, a energia utilizada para iluminar uma estrada ou para operar um tratamento de água. Em edifícios e infraestruturas que possuam pontos de carregamento de veículos elétricos, estes devem ser quantificados e descritos separadamente em B8 e não como parte de B6. O mesmo acontece com energia utilizada por operadores das infraestruturas, por não serem emissões relacionadas com a função da infraestrutura, estas emissões devem ser quantificadas no módulo B8, por ex. emissões provenientes da operação de máquinas industriais em uma estação de tratamento de água. O módulo B8 também é utilizado para quantificar emissões dos utilizadores da infraestrutura, por exemplo, veículos numa ponte ou aviões numa pista [112], [131]–[133].

Relativamente aos dispositivos de produção de energias renováveis instalados nos edifícios ou infraestruturas, a energia produzida implica a redução do consumo de energia da rede e resulta em menores emissões de carbono equivalente neste módulo, quer a energia seja consumida na hora quer seja armazenada em baterias. No caso em que o edifício gere mais energia renovável do que utiliza ao longo do tempo de vida útil, essa energia “adicional” não é contabilizada neste módulo, mas sim no módulo D2. No módulo D são contabilizados os benefícios da energia produzida no local e posteriormente exportada para a rede. Ao exportar para a rede para depois reimportar, as emissões de carbono associadas ao uso da rede e as perdas devem ser contabilizadas.

O carbono operacional na norma mais recente EN 15978–1:2021-09 é agrupado em três subconjuntos distintos [134]: Módulo B6.1, B6.2 e B6.3.

Módulo B6.1: A energia utilizada pelos serviços do edifício que são regulados. 'Regulado' neste sentido significa que a energia de sistemas integrados de edifícios (serviços) cobertos pela Diretiva de Desempenho Energético de Edifícios da UE (2018/844/UE) (EPBD) e sua implementação

nacional. Isso diz respeito à energia necessária para aquecimento, refrigeração, ventilação, humidificação, desumidificação, água quente sanitária e iluminação fixa.

Módulo B6.2: O uso de energia de sistemas integrados de edifícios (serviços) que não são regulamentados, ou seja, o uso de energia de outros sistemas técnicos relacionados a edifícios que não são cobertos pela EPBD, mas são necessários para o desempenho técnico e funcional do construção, como meios de transporte (por exemplo, escadas rolantes, elevadores), sistemas de comunicação, instalações de segurança ou serviços prediais.

Módulo B6.3: Outros usos de energia relacionados às atividades do habitante do edifício, como aparelhos plug-in; computadores, máquinas de lavar, refrigeradores, equipamentos audiovisuais, iluminação plug-in e equipamentos relacionados à produção ou processo usados no edifício. A norma estabelece que o Módulo B6.3 pode ser reportado opcionalmente como informação adicional à avaliação.

B7

O módulo B7 é referido na norma EN 15978; 7.4.4.8 e 8.6.6 [130] e diz respeito a todas as emissões relacionadas com o abastecimento de água e tratamento de águas residuais conforme medido e/ou previsto ao longo do ciclo de vida do projeto (excluindo o uso de água durante a manutenção, reparação, substituição e renovação que são apresentadas noutros módulos) devem ser quantificadas neste módulo. Quaisquer emissões associadas ao uso de materiais para qualquer sistema de serviço de água no projeto, por exemplo, filtros, sal e produtos químicos, também devem ser contabilizadas em B7. Por outro lado, quaisquer emissões associadas à energia gasta de sistemas relacionados à água, por exemplo, bombeamento de água, tratamento de águas residuais no local ou o fornecimento de água quente sanitária, devem ser contabilizados no módulo B6 [112], [131]–[133].

O uso operacional de água deve ser descrito como consumo de água em m³ e depois convertidos em emissões de carbono equivalente usando fatores de emissão apropriados tanto para o abastecimento de água como para o tratamento de águas residuais. Caso esses fatores de emissão não sejam fornecidos a ferramenta *One Click LCA* usa o valor 0,0003 kg CO₂e /kg de água e para o tratamento de águas residuais o fator de emissão de 0,39 kg CO₂e /m³ de água.

O consumo de água pode ser também agrupado em três subconjuntos distintos: Módulo B7.1, B7.2 e B7.3.

Módulo B7.1: água utilizada pelos sistemas integrados (água para saneamento, consumo; irrigação de áreas de paisagem associadas, telhados verdes e paredes e para aquecimento, arrefecimento, sistemas de ventilação e humidificação)

Módulo B7.2: água utilizada por outros sistemas integrados (por exemplo, fontes, piscinas e saunas)

Módulo B7.3: água utilizada por sistemas não integrados (por exemplo, lava-louças, máquinas de lavar e lavagem de carros).

3.5.10. Módulo C1

Este módulo é referido na norma EN 15978; 7.4.5.2 e 8.7.2 [130] e diz respeito à demolição ou desconstrução de qualquer elemento de construção ou de todo o projeto quando este chega ao seu fim de vida. As emissões de carbono equivalente de qualquer demolição dentro ou fora do local

da obra deve ser considerado neste módulo. Todos os componentes e materiais do edifício que são demolidos são considerados resíduos, que é posteriormente necessário reciclar ou depositar em aterro. Os valores do módulo C1 podem variar significativamente, dependendo do tipo de estrutura a ser demolida/desconstruída e do cenário de fim de vida que é considerado nos materiais, ou seja, uma desconstrução com reaproveitamento de material tem emissões de carbono equivalente distintas de uma demolição. Na quantificação das emissões deste módulo são quantificadas emissões provenientes das máquinas envolvidas na demolição bem como a energia consumida, dados que na fase inicial do projeto são desconhecidos. Porém, tal como tem acontecido em outros módulos é sempre possível adotar valores a partir de DAPs, no entanto deve-se perceber se é necessário realizar ajustes e quais os tipos de ajustes que é necessário fazer. Quando não é possível utilizar esse tipo de informação existem cenários baseados em estudos que podem ser utilizados [112], [131]–[133]. Na Equação (17) é apresentada o modo de cálculo utilizando os cenários de demolição apresentados na Tabela 21, que dependem do tipo de estrutura do projeto a ser demolido, presentes na base de dados *One Click LCA*.

$$\text{Carbono incorporado [C1]} = \text{Área do edifício} \times CD \quad (17)$$

Em que:

CD = Cenário de demolição (kg CO₂e/m²);

Área do edifício em m².

Tabela 21 - Emissão de carbono equivalente de diferentes cenários de demolição.

Cenário	Fator de Carbono
Demolição de um edifício de estrutura em Aço (Global)	5,39 kg CO ₂ e/m ²
Demolição de um edifício de estrutura em Betão (Global)	5,40 kg CO ₂ e/m ²
Demolição de um edifício de estrutura em Madeira (Global)	5,30 kg CO ₂ e/m ²
Demolição de um edifício de estrutura Mista (betão, madeira e aço - Global)	5,36 kg CO ₂ e/m ²

RICS afirma ainda que, mesmo não existindo dados reais e possíveis cenários para utilizar na quantificação das emissões de carbono equivalente neste módulo é possível quantificar as emissões baseadas em percentagens das emissões geradas no módulo A5-2, provenientes das atividades de construção com mostrado na Tabela 22.

Tabela 22 - Emissão de carbono na demolição baseada em percentagens de A5-2.

Cenário	Impacto no módulo C1	Percentagem de A5-2
Habitualmente	Prática padrão para demolição, tentativa mínima de desconstrução e recuperação.	25%
Boa prática	Desconstrução realizada para recuperar elementos/materiais.	30%
Melhor prática	Desconstruções efetuadas para recuperar da maioria elementos e materiais	+50%

Mais tarde estes cenários devem ser substituídos por dados reais, que podem ser obtidos pelos responsáveis da demolição através da sua monitorização. Nestes possíveis dados a serem motorizados está incluída a energia consumida, o consumo de combustível (como gás natural ou diesel) e a quantidade de horas que as máquinas envolvidas na construção operam (escavadoras, empilhadoras, geradores, etc.). O valor 3,4 kgCO₂e/m² GIA (taxa de estudos de caso de demolição monitorados no centro de Londres) com base em dados agregados também pode ser utilizado na ausência de informações mais específicas [112].

3.5.11. Módulo C2

Este módulo é referido na norma EN 15978; 7.4.5.3 e 8.7.3 [130] e quantifica todas as emissões de carbono equivalente associadas ao transporte dos materiais, resultantes da desconstrução ou demolição, para o local de deposição mais adequado, incluindo quaisquer trajetos intermédios [112], [131]–[133]. Para contabilizar o transporte no norte de Portugal é útil utilizar os dados compilados por Carneiro [135]. As emissões de carbono equivalente relativas ao transporte dos materiais provenientes da demolição devem ser calculadas do mesmo modo que as emissões provenientes do transporte do local da fábrica dos materiais até ao local da construção (módulo A4). Neste caso, a quantificação destas emissões resume-se à aplicação da Equação (8) e Equação (7), anteriormente mencionadas no capítulo 3.5.2. O fator de carbono proveniente das emissões de carbono dos diferentes modos de transporte apresentados na Tabela 12 podem também ser utilizados neste módulo. Geralmente o transporte no módulo C2 é efetuado através de um veículo médio de mercadorias pesadas, camião reboque ou camião basculante, dependendo dos materiais demolidos.

Relativamente à distância de transporte, existe a necessidade de contabilizar a distância de transporte efetuada pelo camião vazio. Ao contrário do que acontecia no módulo A4, em que a distância de volta não era contabilizada porque permitia o transporte de outros materiais, a distância de transporte no módulo C2 deve ser considerada o dobro. Se possível, existe também a possibilidade de assumir um modo de transporte com metade da carga e somente a distância dos locais, com este cenário também são contabilizadas as emissões da distância percorrida pelo camião vazio até ao local da demolição. Sempre que é desconhecido o local de deposição dos materiais, os cenários de transporte padrão fornecidos na Tabela 23 podem ser assumidos. Mais tarde, quando a informação específica estiver disponível, devem ser substituídos.

Tabela 23 - Pressupostos de transporte padrão para diferentes cenários de fim de vida [112], [131]

Cenário Fim de Vida	Fator de Carbono
Reutilizado/reciclado no local da obra	Sem emissões de transporte (C2=0)
Reutilizado/reciclado noutra local	Distância média dos dois locais de processamento de resíduos de construção mais próximos
Energia aproveitada/incineração	Distância média dos dois locais de energia de resíduos mais próximos
Deposição em aterro	Distância média dos dois locais de aterros mais próximos

3.5.12. Módulo C3

Quaisquer materiais que sejam recuperados, reutilizados ou reciclados após o seu fim da vida útil necessitam de tratamentos. As emissões de carbono equivalente associadas aos tratamentos e processamentos antes de se atingir o “fim dos resíduos” deste materiais devem ser contabilizadas neste módulo como referido na norma EN 15978; 7.4.5.4 e 8.7.4 [130].

A recuperação, reutilização e reciclagem de materiais de construção são práticas essenciais para promover a sustentabilidade e reduzir o impacto ambiental da indústria da construção. Em vez de excluir materiais após a demolição ou remodelação de um edifício, a recuperação, reutilização e reciclagem promovem uma economia circular, evitando o desperdício e a necessidade de produção de novos materiais. As vantagens de uma economia circular do ponto de vista das emissões de carbono são bastantes, pois as possibilidades de reduzir as emissões são elevadas e comprovadas (Referidas no capítulo 2.4.1 a 2.4.6). Este módulo torna-se importante na avaliação do ciclo de vida e por isso é necessário saber contabilizá-lo [112], [131]–[133]. Na Tabela 24 encontram-se as possíveis rotas que os materiais podem tomar no seu processo de fim de vida no módulo C3. Este é dos módulos em que a incerteza mais predomina, uma vez que estão a ser considerados processos e emissões provenientes destes sem saber como se posiciona este mercado no futuro (50 anos, como consequência do tempo de vida útil do projeto). Mais incerto fica, uma vez que a demolição e os tratamentos de resíduos provenientes do projeto são efetuados depois de 2050, ano em que se deseja uma neutralidade carbónica.

Tabela 24 – Processos de fim de vida declarados no módulo C3.

Processo de fim de vida	Rota do processo de fim de vida	Fluxo de saída
Reutilização	Reutilizado no local da obra	Material para reutilização
	Reutilizado fora do local da obra sem preparação necessária para a reutilização	
	Reutilizado com preparação necessária para a reutilização	
Recuperação	Reciclado	Material secundário
	Recuperado como combustível secundário	Combustível secundário
	Recuperação de energia	Exportação de energia

De acordo com a Tabela 24 existem determinadas rotas para a reutilização e recuperação dos materiais. Na recuperação os materiais podem ser reutilizados sem uma preparação prévia, mas para alguns é necessário recorrer a um processo de preparação, cujas emissões são contabilizadas neste módulo. Remoção de revestimentos de madeira e de aço, incluindo o seu tratamento enquanto resíduos, remoção da argamassa de tijolos, incluindo a sua recuperação, e remoção de juntas e fixações do aço estrutural, incluindo a sua recuperação, são alguns dos exemplos de processo que são contabilizados neste módulo. Mais tarde, no novo projeto, nos materiais reutilizados os módulos A1-A3 (fabrico do material) e o módulo A5-3 (resultante do desperdício do material em obra) não são contabilizados para a quantificação das emissões de carbono, pois estes

módulos apenas são contabilizados no projeto de que provém o material. Apenas as emissões resultantes do transporte do material recuperado para o local da obra do novo projeto devem ser contabilizadas (módulo A4).

LisbonWood é uma marca da Zircom Engenharia S.A., uma empresa de demolição portuguesa, e apresenta um conceito pioneiro em Portugal, que tem como princípio, a reutilização de madeira e de outros materiais provenientes de demolições [136]. Desta forma, é possível promover a economia circular em Portugal com a reutilização de matérias de construção e diminuição das emissões de carbono equivalente neste módulo.

Para além dos materiais recuperados este módulo contabiliza emissões ligadas aos processos de tratamento de resíduos de materiais reciclados. No entanto, neste momento surge a dúvida sobre a altura em que os materiais deixam de ser resíduos, e, portanto, causas de emissões do módulo C3, e passam a ser materiais reciclados do novo projeto, e, portanto, causas de emissões dos módulos A1-A3. Torna-se claro a importância deste pormenor para que o projetista saiba classificar as emissões e quantificar com mais rigor as emissões do módulo C3. Segundo RICS o estado de fim de resíduo varia em função do tipo de material. Os metais deixam de ser resíduos quando são recolhidos como sucata separada. No caso do betão, alvenaria, pedra e cerâmica deixam de ser resíduos quando são triturados para outro uso. O mesmo acontece no caso do vidro, que deixa de ser resíduo quando é triturado e encontra-se pronto para uma nova utilização. Para os plásticos, é quando eles são granulados, já no caso da madeira esta deixa de ser contabilizada no módulo C3 quando é triturada para a reciclagem ou usada como combustível secundário.

O cálculo das emissões deste módulo é efetuado pela multiplicação da quantidade de material reciclado com a quantidade de emissão de carbono equivalente emitido no processo de aproveitamento do material, dependendo do cenário que lhe é atribuído. O processo de tratamento deve ser baseado em valores reais fornecidos pelas centrais de reciclagem, contudo tal informação nem sempre é disponível. A ferramenta *One Click LCA* apresenta alguns cenários de fim de vida para que o projetista consiga quantificar estas emissões. A Equação (18) demonstra o cálculo destas emissões e a Tabela 25 apresenta os possíveis cenários.

$$\text{Carbono incorporado [C3]} = \text{Quantidade do material (kg)} \times \text{FE (C3)} \quad (18)$$

Em que:

FE (C3) = Fator de emissão dependendo do cenário C3 atribuído ao material (kg CO₂e/kg).

Tabela 25 - Cenários de tratamento de resíduos de cada material.

Cenário Fim de Vida	Fator de emissão (C3)
Betão triturado para reciclagem	0,0003 kg CO ₂ e/kg
Incineração de madeira	0,0129 kg CO ₂ e/kg
Reciclagem de aço	0,0022 kg CO ₂ e/kg
Reciclagem de plástico	0,0087 kg CO ₂ e/kg
Incineração de plástico	2,07 kg CO ₂ e/kg

Os dados de DAPs podem também ser utilizados nos cálculos sempre que essa informação esteja disponível, sem esquecer os devidos ajustes que sejam necessários realizar para os valores se adaptarem ao projeto.

RICS afirma a anulação do cálculo do módulo C3 quando não existe nenhum tipo de informação acima descrita que seja fiável e adaptável ao projeto. Desta forma, a quantificação das emissões em C3 não são consideradas e devem ser aplicadas apenas as emissões padrão desses materiais depositados em aterros (módulo C4). No caso da madeira, que muitas vezes é incinerada para reaproveitamento de energia, deve-se ter uma especial atenção à eficiência do processo, uma vez que apenas incineração com mais de 65% no reaproveitamento da energia deve ser contabilizado em C3. Se a eficiência for inferior, a incineração deixa de ser quantificada em C3 e surge como um tratamento de deposição dos resíduos comum no módulo C4.

3.5.13. Módulo C4

Este módulo é referido na norma EN 15978; 7.4.5.5 e 8.7.5 [130] e quantifica as emissões resultantes de qualquer processo necessário antes da deposição dos materiais em aterro. Este módulo diz respeito, portanto, aos materiais que não são recuperados, reutilizados nem reciclados [112], [131]–[133].

Na quantificação destas emissões deve ser abrangido qualquer processo preparativo para a deposição dos materiais, bem como o impacto que estes provocam em aterro. A incineração com eficiência inferior a 65% deve ser contabilizada também como um processo de tratamento de resíduos em C4 e conseqüentemente as emissões desse processo devem ser contabilizadas neste módulo. O cálculo das emissões deste módulo é efetuado pela multiplicação da quantidade de material depositado em aterro com a quantidade de emissão de carbono equivalente emitido nesse processo. Da mesma forma que para o módulo C3, a ferramenta *One Click LCA* também apresenta alguns cenários de fim de vida para que o projetista consiga quantificar estas emissões. A Equação (19) demonstra o cálculo destas emissões e a Tabela 26 mostra os possíveis cenários.

$$\text{Carbono incorporado [C4]} = \text{Quantidade do material (kg)} \times \text{FE (C4)} \quad (19)$$

Em que:

FE(C4) = Fator de emissão dependendo do cenário C4 atribuído ao material (kg CO₂e/kg).

Tabela 26 – Cenários de aterro de resíduos de cada material.

Cenário Fim de Vida	Fator de emissão (C3)
Betão depositado em aterro	0,0026 kg CO ₂ e/kg
Madeira depositada em aterro	0,0046 kg CO ₂ e/kg
Plástico depositado em aterro	0,0026 kg CO ₂ e/kg

Quando os dados para a deposição de materiais em aterros não estão disponíveis existe uma suposição genérica do Reino Unido para as emissões de materiais não orgânicos deste módulo. O valor padrão sugerido é 0,013 kgCO₂e/kg de resíduos, desenvolvido segundo a *BEIS 2016*

Government GHG conversion factors e Ökobaudat. Relativamente a resíduos orgânicos, quando não existem dados disponíveis em DAPs ou outro tipo de fontes, existe também valores padrão. Este valor depende do tipo de fim de vida da madeira. Para a incineração o valor padrão sugerido é igual ao valor de carbono sequestrado, ou seja, o carbono captado pela madeira é novamente libertado e essas emissões são contabilizadas no módulo C4 (EN 16485: 2014; 6.3.4.2). Quando a madeira é depositada em aterro, sem recuperação de gás, o valor padrão é 2,15 kgCO₂e/kg de madeira. O valor deste cenário é elevado dado que a madeira depositada em aterro para além de libertar dióxido de carbono (CO₂) liberta também metano (CH₄). Este gás de efeito estufa possui um potencial de aquecimento global vinte e cinco vezes maior que o CO₂, o que implica uma maior emissão de CO₂e quando a madeira é depositada em aterro.

Os aterros modernos geralmente utilizam técnicas para capturar os gases provenientes da decomposição da matéria orgânica, o metano e o dióxido de carbono, que resultará num diferente impacto nas emissões de aterro correspondentes, que devem ser ajustadas com base na eficiência da captura de gás no aterro. O potencial de recuperação de energia a partir da incineração de resíduos orgânicos e/ou queima de gás de aterro capturado deve ser relatada dentro do módulo D.

3.5.14. Módulo D

O módulo D é referido na norma EN 15978; 7.4.6 e 8.8 [130] e na EN 15804; 6.3.4.6 e 6.4.3 e incide sobre o potencial ambiental dos benefícios de materiais e componentes além da vida útil do projeto. Como consequência, este módulo deve ser descrito separadamente dos restantes módulos da análise do ciclo de vida do projeto e pode ser dividido em dois subconjuntos: módulo D1 e módulo D2 [112], [131]–[133].

D1

O Módulo D1 diz respeito aos benefícios da reutilização ou reciclagem de materiais e componentes no seu fim de vida, ou de qualquer energia deles recuperada no final do tempo de vida útil (por exemplo, energia proveniente de resíduos, incineração ou utilização de gás de aterro capturado). O tratamento dos resíduos provenientes do desperdício dos materiais na construção (A5-3), manutenção, reparação, substituição e remodelação (módulos B2 a B5) e de tratamento e eliminação de resíduos (módulos C3 e C4) são os módulos que estão relacionados diretamente com o módulo D1 e que podem criar benefícios dependendo do fim de vida que é atribuído aos materiais em cada um destes módulos. Quando um material é fabricado a partir de materiais recuperados, o módulo D quantifica as emissões potencialmente evitadas quando se compara o fabrico de materiais reciclados com o fabrico de materiais primários equivalentes. Portanto, o módulo D contabiliza o benefício de substituir o material primário, bem como qualquer emissões decorrentes do processo de fabrico desse material. O módulo D pode ser usado também para quantificar a circularidade e avaliar o futuro da eficiência de recursos.

Desta forma, os benefícios que são quantificados no módulo D podem ser calculados segundo a Equação (20).

$$\text{Carbono incorporado } [D] = - [A1- A3]_{MPS} + [A1- A3]_{MS} \quad (20)$$

Em que:

$[A1-A3]_{MPS}$ = Emissões provenientes do processo de fabrico dos materiais primários que são substituídos;

$[A1-A3]_{MS}$ = Emissões provenientes do processo de fabrico dos materiais secundários.

O software de cálculo One Click LCA permite quantificar automaticamente todos os benefícios do módulo D, não sendo necessário realizar qualquer ação.

D2

Quando um projeto apresenta a capacidade de gerar energia e ao mesmo tempo consegue superar a quantidade de consumo, a energia adicional gerada é descrita no módulo B6. No caso das infraestruturas, quando geram mais energia que o próprio consumo é descrito no módulo B8. No entanto, para ambas as estruturas qualquer benefício dessa energia exportada para a rede (por exemplo, as emissões evitadas da quantidade de energia limpa transferida para a rede) são declarados no módulo D2. O módulo D2 deve ser comunicado separadamente, pois mostra os benefícios do projeto fora da avaliação do ciclo de vida do projeto.

4. CASOS DE ESTUDO: RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendo descrito o processo de cálculo das emissões de carbono equivalente, urge comprovar a eficiência da sua aplicação, assim como as suas limitações. De modo a compreender estas possíveis barreiras é obrigatório realizar casos de estudo aplicando os princípios e conceitos anteriormente expostos. Nestes estudos são realizadas quantificações de carbono equivalente de dois projetos distintos a fim de atingir uma maior diversidade de soluções. Os resultados do estudo ACV são apresentados e interpretados também com o objetivo de perceber se é necessário e possível alterar o projeto, analisando a possibilidade de repetir todo o processo de cálculo para conseguir uma redução da emissão de carbono equivalente à custa de soluções de projeto alternativas. No **Apêndice A** encontra-se o *template* com todos os dados para futura utilização da empresa.

4.1. Edifício TWINS (Caso de estudo 1)

O primeiro caso de estudo incide num edifício residencial denominado TWINS. O lote de implantação do Edifício TWINS confina a nascente com o Largo Luís de Camões, a Sul e a noroeste com edifícios vizinhos e a poente com a Rua António Marques, em Oliveira de Azeméis. Trata-se de um edifício maioritariamente construído em betão armado e é utilizado nesta dissertação para avaliar o impacto da quantidade de matérias recicladas presentes no betão na pegada total de carbono equivalente.

4.1.1. Apresentação do edifício TWINS

O edifício Twins tem um total de 13 pisos construídos maioritariamente em betão armado, como referido anteriormente. Cinco desses pisos são cave, em que dois deles são cave parcial. Existe, portanto, uma diferença de cota correspondente a dois pisos, entre a entrada (frente do edifício, Figura 30) e traseira do edifício, como observado na Figura 31.

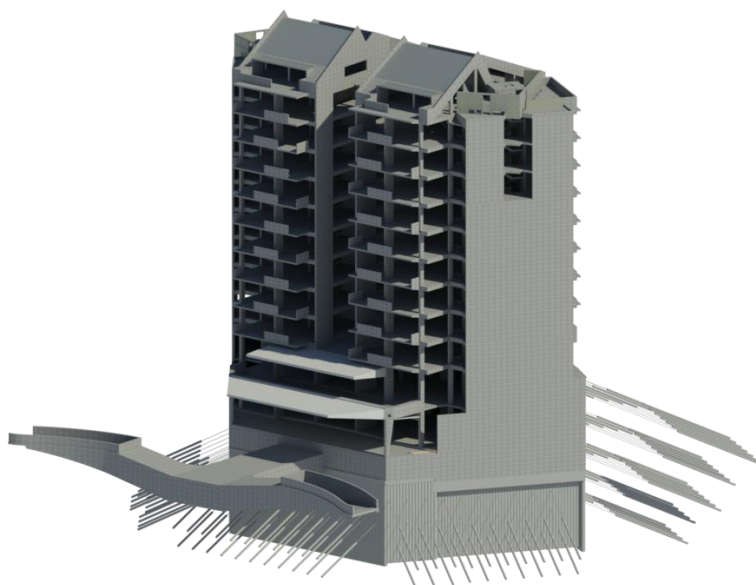


Figura 30 - Frente do edifício TWINS.

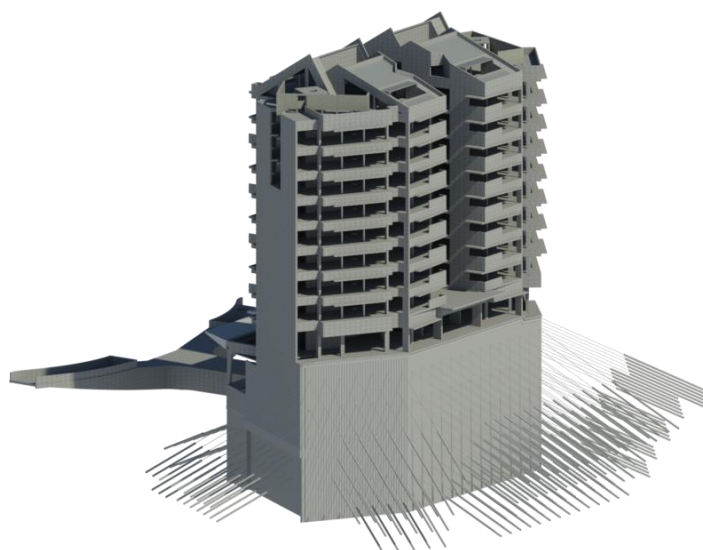


Figura 31 - Traseira do edifício TWINS.

A estrutura é comum e monolítica nos pisos -3, -2, -1, B2, B1, 0 e 1, mas a partir do piso 2 até ao piso 8 a estrutura divide-se em duas torres estruturalmente independentes. As duas torres são aproximadamente simétricas, adaptando-se cada uma ao alinhamento de limite de lote que não é simétrico, o que introduz as pequenas diferenças.

As lajes são maciças fungiformes, com pontual introdução de capiteis, sendo a única exceção a laje do terraço exterior no piso B1. Esta zona é diferente do ponto de vista construtivo, uma vez que contém uma viga pré-fabricada simplesmente apoiada de 24m de vão. Ela é apoiada numa laje pré-fabricada alveolar juntamente com uma estrutura metálica revestida cimento reforçado com fibra de vidro (GRC do inglês *Glass Fiber Reinforced Concrete*). O GRC é um material compósito constituído por uma matriz cimentada reforçada com fibras de vidro resistentes ao meio alcalino. A solução construtiva encontrada para a contenção do terreno periférico durante a realização da escavação das caves e a construção ao mesmo tempo de uma fronteira definitiva relativamente impermeável foi a presença de uma cortina de estacas secantes de betão simples e betão armado (Figura 32, estacas verticais). Como necessidade na escavação e construção são utilizadas também estacas provisórias (Figura 32, estacas inclinadas a 25 graus).

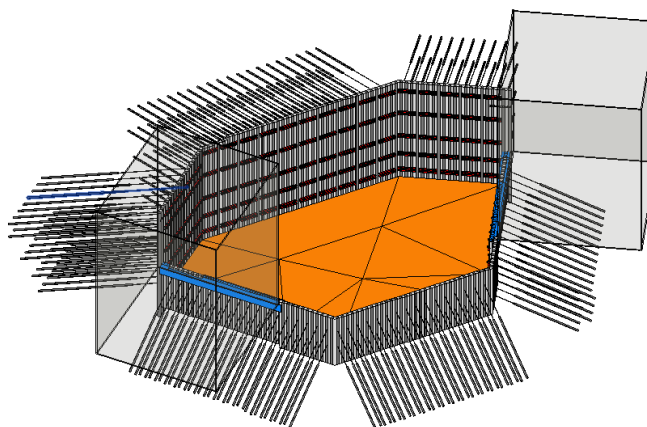


Figura 32 – Vista 3D da estrutura de contenção.

Na Figura 32 é também possível observar que no lado nascente a cortina de estacas tem 5 níveis de ancoragens provisórias para uma profundidade de escavação máxima de 18 m. No lado poente a contenção recorre a 2 níveis de ancoragens provisórias, para uma escavação de 6,5 m, tal como dos lados norte e sul encostados aos edifícios vizinhos. O pavimento térreo do edifício possui uma armadura constituída por pequenos filamentos metálicos misturados no betão (Figura 33). Dada a configuração do pavimento térreo, tipo de solicitação e o tipo de apoio praticamente contínuo, este tipo de armadura é suficiente para evitar as retrações e fissurações do betão.



Figura 33 – Fibras metálicas como reforço do betão armado. Imagem adaptada de [137].

Os principais materiais presentes na estrutura de betão do edifício TWINS, que posteriormente são selecionados no *software* para o respetivo cálculo das emissões são:

- Aço em perfil, chapa, barra e varão laminados a quente - S275JR
- Aço em perfil, chapa, barra e varão laminados a quente - S355JR
- Aço em perfis tubulares laminados a quente - S355J0H
- Aço em perfis tubulares conformados a frio - S355J0H
- Aço em perfis tubulares conformados a frio - S275J0H
- Aço em barão para armadura (diâmetro 6, 8, 10 e 12)
- Estacas, ensoleiramento e fundações diretas - C30/37
- Pavimento térreo - C25/30
- Muros cave e pilares - C30/37
- Muros de suporte e passagem inferior- C35/45
- Paredes - C30/37
- Vigas, lajes maciças e escadas - C30/37
- Viga pré-esforçada - C50/60
- Cimento reforçado com fibra de vidro (GRC)
- Fibras metálicas de reforço
- Manta geotêxtil

4.1.2. Parâmetros admitidos nos casos de estudo

Neste casos de estudo pretende-se avaliar em que medida a quantidade de matérias recicláveis presentes no betão consegue alterar a pegada total de carbono equivalente. Deste modo, nas seguintes variações do caso de estudo, a única variante é o tipo de betão que é utilizado na quantificação das emissões de carbono equivalente. A fim de definir e transmitir os parâmetros

adotados em cada módulo do ciclo de vida do TWINS são apresentados os seguintes casos alternativos.

Caso 1

O caso 1 identifica a situação que normalmente ocorre no setor da construção, a utilização de materiais não recicláveis. Com este caso pretende-se verificar as emissões de carbono equivalente do estudo com betão não reciclado, para futuramente comparar com outros casos que possuam este material reciclável. Na Tabela 27 é possível observar os parâmetros admitidos para cada um dos módulos ACV.

Tabela 27 - Parâmetros admitidos no caso 1 para a quantificação do carbono equivalente do edifício TWINS.

Módulo Analisado	Fontes de dados
Materiais de construção (A1-A3)	Neste módulo são selecionados materiais reciclados, à exceção do betão. Os materiais selecionados são retirados da base de dados <i>One Click LCA</i> e são estritamente materiais genéricos para Portugal.
Transporte dos materiais de construção (A4)	Na distância de transporte foi considerada a distância padrão do <i>software</i> apresentadas anteriormente na Tabela 11. O tipo de transporte utilizado para o betão e o aço foram respetivamente, camião betoneira e camião reboque, apresentados na Tabela 12.
Construção e instalação (A5)	Devido à falta de dados para este módulo, no processo de construção é admitido o cenário de construção europeu presente na Tabela 13, em função da área do edifício TWINS. Relativamente ao desperdício de materiais, são aplicadas as percentagens presentes na Tabela 14 e contabilizadas todas as emissões relacionadas com o seu tratamento de resíduos. Os subconjuntos A5-1 e A5-4 não interferem neste módulo.
Uso (B1)	No uso do TWINS apenas se considera a captura do dióxido de carbono como consequência da carbonatação do betão.
Manutenção dos materiais (B2)	Neste módulo a emissão de carbono equivalente é nula, dado que não é necessário recorrer a nenhuma manutenção dos elementos estruturais.
Reparação dos materiais (B3)	Neste módulo a emissão de carbono equivalente é nula, dado que não se prevê recorrer a nenhuma substituição dos elementos estruturais.
Substituição dos materiais (B4)	Neste módulo a emissão de carbono equivalente é nula, dado que não é necessário recorrer a nenhuma substituição dos elementos estruturais.
Remodelação (B5)	Neste módulo a emissão de carbono equivalente é nula, dado que não se prevê qualquer tipo de remodelação no edifício.
Demolição do edifício (C1)	Para a previsão da emissão de carbono equivalente na demolição do TWINS foi utilizado o cenário de demolição de uma estrutura de betão do <i>software One Click LCA</i> apresentado na Tabela 21.
Transporte dos resíduos (C2)	Para a distância do transporte dos resíduos dos materiais de construção foi considerada a distância média entre os dois centros de tratamento de resíduos mais próximos (situado em Oliveira de Azeméis), cerca de 20 km. O transporte é realizado por um camião basculante e um camião reboque para o aço.
Tratamento de resíduos (C3)	Para o tratamento de resíduos de construção são aplicados os valores apresentados anteriormente na Tabela 25.

Tabela 27 - Continuação.

Módulo Analisado	Fontes de dados
Deposição dos resíduos em aterro (C4)	Neste módulo a emissão de carbono equivalente é nula, dado que nenhum material é depositado em aterro.
Benefícios (D)	Para os benefícios relacionados com tratamento de resíduos de construção e a circularidade dos materiais de construção são aplicados os valores gerados automaticamente pelo <i>software</i> .

Caso 2

Neste caso apenas o módulo A1-A3 sofre alterações relativamente ao caso 1. Estas alterações são apresentadas na Tabela 28.

Tabela 28 - Parâmetros admitidos no caso 2 para a quantificação do carbono equivalente do edifício TWINS.

Módulo Analisado	Fontes de dados
Materiais de construção (A1-A3)	Neste módulo é selecionado betão com matérias recicladas. Os materiais selecionados são retirados da base de dados <i>One Click LCA</i> e são estritamente materiais genéricos para Portugal. No betão, 40% de cimento Portland é substituído por escória granulada de alto-forno e cinzas volantes.

Caso 3

À semelhança do que acontece no caso 2, neste caso apenas o módulo A1-A3 sofre alterações relativamente ao caso 1. Estas alterações são apresentadas na Tabela 29.

Tabela 29 - Parâmetros admitidos no caso 3 para a quantificação do carbono equivalente do edifício TWINS.

Módulo Analisado	Fontes de dados
Materiais de construção (A1-A3)	Neste módulo é selecionado betão com matérias recicladas. Os materiais selecionados são retirados da base de dados <i>One Click LCA</i> e são estritamente materiais genéricos para Portugal. No betão, 40% de cimento Portland é substituído por escória granulada de alto-forno.

Caso 4

Neste caso também o módulo (A1-A3) sofre alterações relativamente ao caso 1, em que a percentagem de matérias recicláveis presente no betão é aumentada. Estas alterações são apresentadas na Tabela 30.

Tabela 30 - Parâmetros admitidos no caso 4 para a quantificação do carbono equivalente do edifício TWINS.

Módulo Analisado	Fontes de dados
Materiais de construção (A1-A3)	Neste módulo é selecionado betão com matérias recicladas. Os materiais selecionados são retirados da base de dados <i>One Click LCA</i> e são estritamente materiais genéricos para Portugal. No betão, 60% de cimento Portland é substituído por escória granulada de alto-forno.

4.1.3. Apresentação dos resultados obtidos nos casos de estudo

Depois de analisar e determinar quais os parâmetros a adotar (descritos anteriormente para cada caso de estudo individualmente) é efetuada a quantificação da pegada de carbono equivalente do edifício residencial Twins recorrendo ao *software One Click LCA*, de acordo com o método de cálculo descrito no Capítulo 3. Os resultados detalhados para cada módulo do ciclo de vida dos diferentes casos estudados podem ser observados na Tabela 31.

Tabela 31- Resultados dos casos alternativos do edifício TWINS.

Módulo Analisado	Caso 1 kg CO ₂ e	Caso 2 kg CO ₂ e	Caso 3 kg CO ₂ e	Caso 4 kg CO ₂ e
(A1-A3)	3,74×10 ⁶	2,42×10 ⁶	2,45×10 ⁶	2,08×10 ⁶
(A4)	2,64×10 ⁵	2,42×10 ⁵	2,64×10 ⁵	2,64×10 ⁵
(A5)	3,76×10 ⁵	2,42×10 ⁵	3,22×10 ⁵	3,08×10 ⁵
(B1)	-1,43×10 ⁴	-1,43×10 ⁴	-1,43×10 ⁴	-1,43×10 ⁴
(B2)	0	0	0	0
(B3)	0	0	0	0
(B4)	0	0	0	0
(B5)	0	0	0	0
(C1)	5×10 ⁴	5×10 ⁴	5×10 ⁴	5×10 ⁴
(C2)	1,2×10 ⁵	1,2×10 ⁵	1,2×10 ⁵	1,2×10 ⁵
(C3)	1,06×10 ⁴	1,06×10 ⁴	1,06×10 ⁴	1,06×10 ⁴
(C4)	0	0	0	0
(D)	-1,04×10 ⁵	-5,79×10 ⁵	-5,79×10 ⁵	-5,67×10 ⁵
Total (D) não incluído	4,55×10⁶	3,18×10⁶	3,20×10⁶	2,82×10⁶

Para uma melhor interpretação dos resultados obtidos, eles são também apresentados em forma de gráfico. Através deles é possível ver a contribuição de cada módulo (em percentagem) para a pegada total de carbono equivalente. É apresentado o total da pegada de carbono equivalente, mas também as emissões relativas aos módulos A1-A5 (análise *upfront embodied carbon*). Na Figura 34 são apresentados os resultados da quantificação do carbono equivalente para o caso 1 e o caso 2. Ambos os casos utilizam materiais genéricos portugueses da ferramenta *One Click LCA*. A diferença entre estes dois casos reside na quantidade de matérias recicláveis que os materiais possuem na sua composição. O caso 1 utiliza betão virgem, embora o aço seja reciclado. O caso 2, pelo contrário, apresenta, no betão, a substituição de 40% de cimento Portland por escória granulada de alto-forno e cinzas volantes. Através da utilização de matérias recicláveis no betão consegue-se obter uma redução de 30% da pegada total de carbono equivalente. Verifica-se claramente a importância de adotar matérias recicláveis no betão para conseguir obter uma redução das emissões e seguir no caminho da neutralidade carbónica dos edifícios. Como consequência desta redução de emissões nos módulos A1-A3, o módulo A5 acaba também por ter uma redução, devido às percentagens de desperdício dos materiais. Na Figura 35 observa-se o caso 3 (esquerda) que tem uma semelhança com o caso 2. No caso 3 também se recorre a matérias recicláveis com a mesma percentagem (40%) no entanto, em vez do cimento Portland ser substituído por escória granulada de alto-forno e cinzas volantes é apenas substituído por escória granulada de alto-forno. A ausência de cinzas volantes provoca um aumento de quase 1% relativamente ao caso 2, aumentando a pegada total de carbono equivalente em 25 toneladas. Relativamente ao resultado da classificação *One Click LCA* o caso 1 obtém uma classificação C e o caso 2 e 3 conseguem obter uma classificação B. Já para a classificação SCORS o caso 1 alcança uma classificação E e os casos 2 e 3 conseguem uma melhor pontuação, uma classificação C.

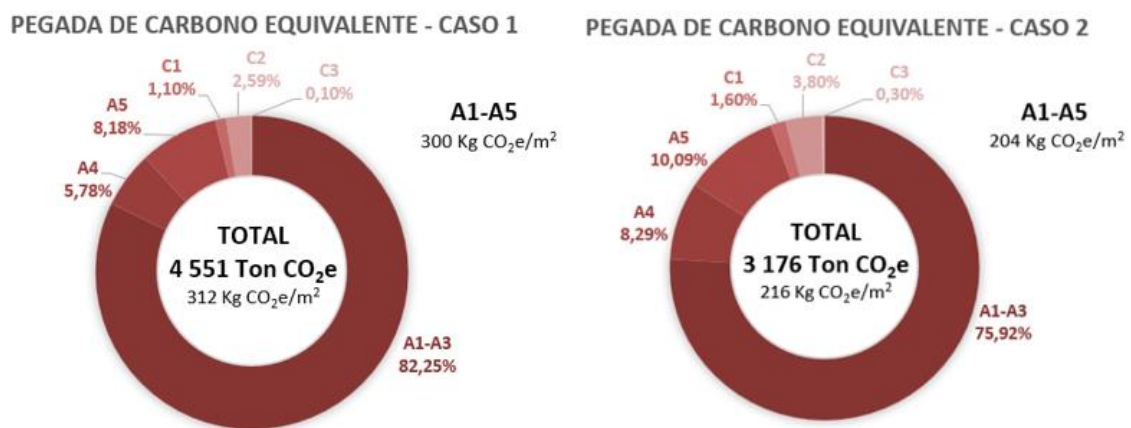


Figura 34 - Resultados do Caso 1 (esquerda) e Caso 2 (direita) sob a forma de percentagens relativas aos módulos ACV do edifício Twins.

Por último, o caso 4 (Figura 35 à direita), apresenta a melhor pegada de carbono equivalente com um total de 2 822 toneladas de carbono equivalente emitido para a atmosfera. Este valor reduzido é conseguido com o aumento da percentagem de matérias recicladas no betão, cerca de 60% de cimento Portland é substituído por escória granulada de alto-forno. Quanto maior a percentagem destes compostos, menor é a emissão de carbono equivalente provocada pelo betão. Neste caso a classificação obtida segundo SCORS e *One Click LCA* é a classificação B.

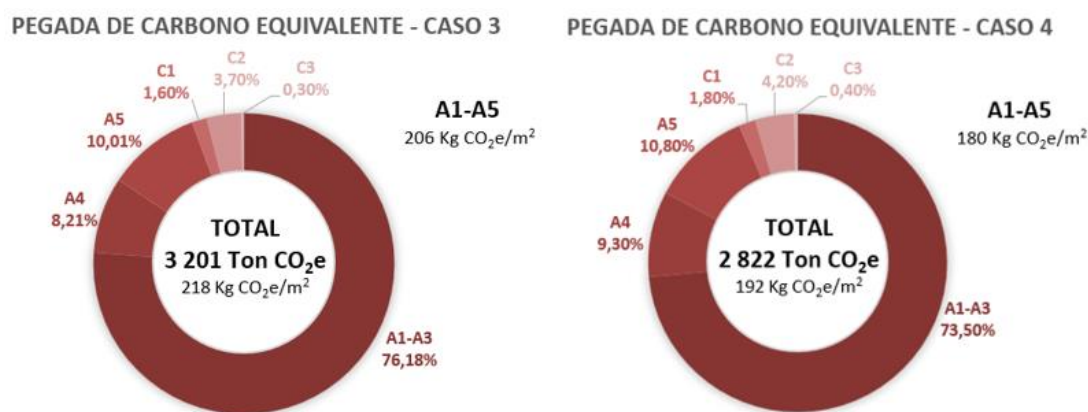


Figura 35 - Resultados do Caso 3 (esquerda) e Caso 4 (direita) sob a forma de percentagens relativas aos módulos ACV do edifício Twins.

Na Tabela 31 é possível observar a quantidade de carbono equivalente absorvido na carbonatação do betão, captura resultante da exposição do betão ao ar. Os resultados expõem que a carbonatação do betão não depende da quantidade de matérias recicláveis presentes no betão.

Depois de analisar os resultados obtidos para os quatro casos de estudo é possível classificar também os resultados segundo as metas estabelecidos por LETI. Como referido anteriormente, LETI possui metas e um sistema de classificação das emissões de carbono equivalente para edifícios residenciais. O caso 1 como esperado apresenta a pior classificação, o projeto construído com materiais não reciclados consegue apenas uma classificação C. O caso 2 e 3, com a utilização de materiais reciclados conseguem uma melhor performance e ambos atingem a classificação B. Porém, o único caso de estudo que consegue cumprir a meta estabelecida por LETI para 2030 é o caso 4. Este caso de estudo obtém uma classificação A, através de uma maior percentagem de materiais reciclados no betão. O caso 4 é a prova de que é possível atingir as metas estabelecidas, neste caso por órgãos voluntários, recorrendo apenas a materiais reciclados.

Relativamente às metas estabelecidas por RIBA, os quatro casos de estudo conseguem cumprir os valores estipulados para 2030.

4.2. Pavilhão Industrial (Caso de estudo 2)

O segundo caso de estudo incide num pavilhão industrial. O pavilhão é originalmente construído por uma estrutura metálica assente numa fundação de betão armado, no entanto neste estudo é realizado outro projeto, pelo autor desta dissertação, cujo objetivo centra-se na redução da pegada total de carbono equivalente do pavilhão. Este segundo projeto substitui a cobertura metálica por uma cobertura em madeira e pretende avaliar de que modo a utilização de materiais orgânicos influenciam a pegada total de carbono equivalente. O pavilhão serve também de exemplo para a utilização do *template*, anteriormente elaborado. Os resultados do pavilhão podem ser também consultados no **Apêndice B** que indica como deve ser feita a descrição do estudo ACV pela empresa.

4.2.1. Apresentação do Pavilhão Industrial

O pavilhão industrial em estudo (Figura 36) situa-se em Vila do Conde e possui área de implantação total de 3000 m². Neste pavilhão são construídas duas naves industriais, uma com cerca de 2000

m² de área e outra com 1000 m² de área. O edifício possui um comprimento de 100 metros e uma largura aproximada de 30 m, como se pode observar na Figura 37. O edifício é constituído por pórticos com um espaçamento equidistante de aproximadamente 5 m. Nas zonas de passagem entre as duas naves industriais, a inexistência de pilares centrais criou a necessidade de colocar treliças longitudinais para vencer os vãos superiores. Ao longo do sentido longitudinal do edifício foram colocadas pontes rolantes, que circulam sobre vigas de caminho situadas a 7,50 metros de altura, apoiadas em consolas curtas que transmitem as cargas aos pilares da estrutura. Em redor ao edifício é também possível observar a existência de uma parede constituída por blocos de betão.

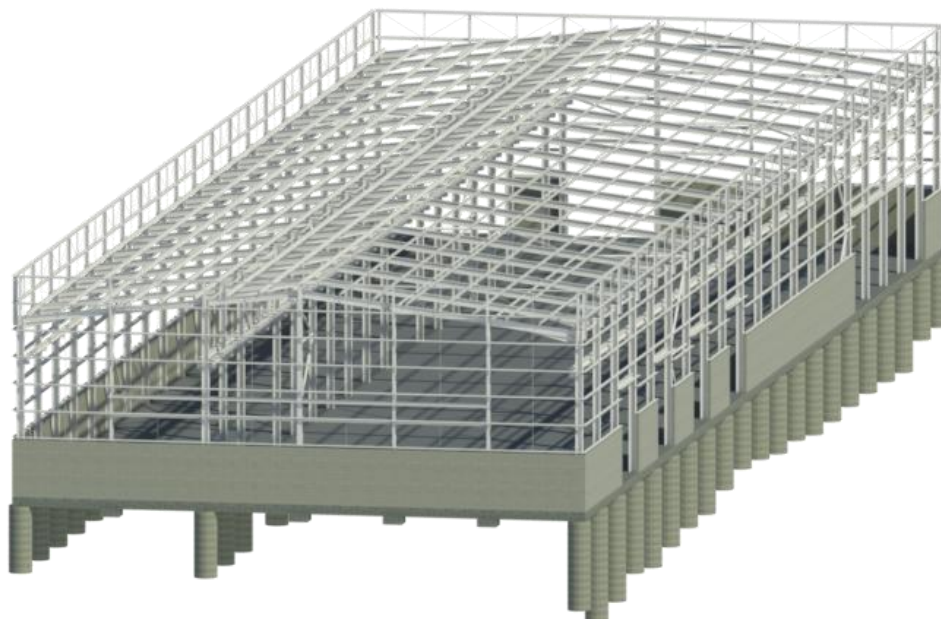


Figura 36 – Estrutura metálica do Pavilhão industrial

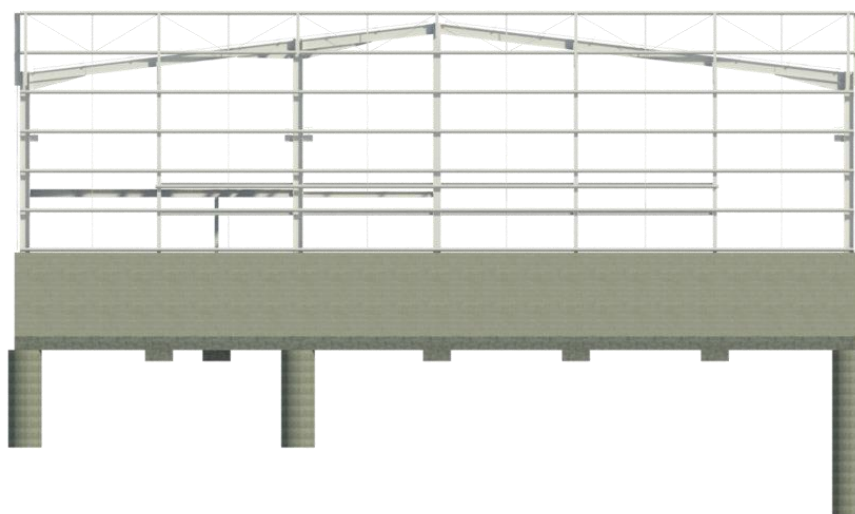


Figura 37 – Alçado norte do pavilhão.

O pavilhão possui um tipo de subestrutura que recorre a uma grande quantidade de betão armado. Para além das sapatas convencionais, nos pilares dos pórticos o pavilhão possui ainda poços de fundação que aumenta a altura da sapata e garante uma maior resistência à rotação (Figura 38). Estes poços de fundação são compostos por argolas de betão pré-fabricado que são enterradas no solo sobre uma superfície de betão ciclópico. Posteriormente o interior destas argolas é preenchido com betão armado.

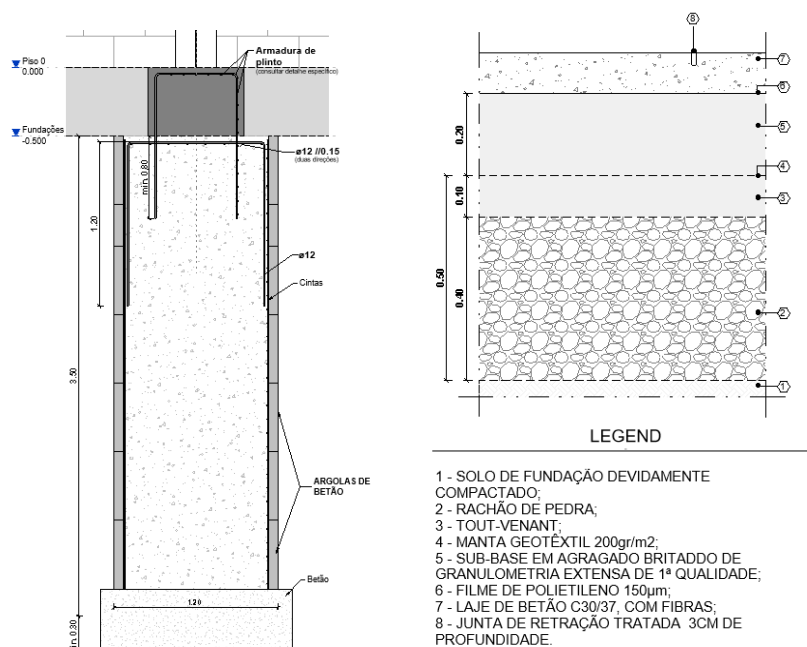


Figura 38 – Estrutura e composição das sapatas (esquerda) e do pavimento (direita) do pavilhão

O pavimento térreo, à semelhança do que acontece no caso de estudo anterior, não possui uma armadura convencional, mas sim pequenos filamentos metálicos misturados no betão (Figura 33). Dada a configuração do pavimento térreo, tipo de solicitação e o tipo de apoio praticamente contínuo, este tipo de armadura é suficiente para evitar as retrações e fissurações do betão.

Relativamente ao segundo projeto do pavilhão, realizado segundo o eurocódigo 5, as vigas metálicas que sustentam as madres e a cobertura são substituídas por treliças de madeira Glulam. A inclinação da cobertura do projeto inicial é mantida no novo projeto. O novo projeto é ilustrado na Figura 39 onde se destaca a nova cobertura pela cor castanha da madeira. No **Apêndice C** encontra-se a memória de cálculo da estrutura treliçada. Nela é possível observar os perfis em madeira que substituíram os perfis metálicos IPE 360.

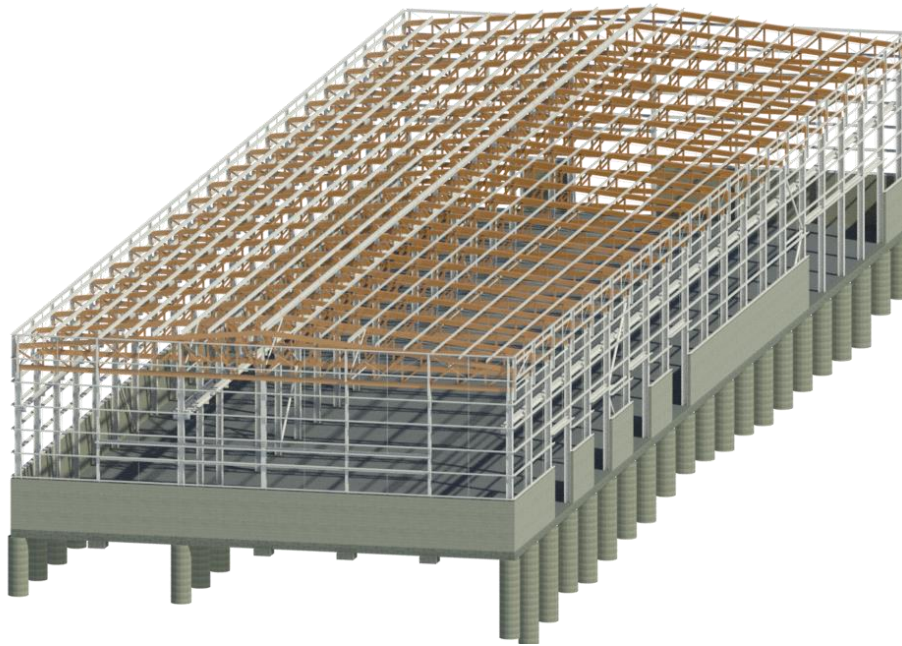


Figura 39 – Estrutura mista do pavilhão.

Os principais materiais presentes na estrutura metálica do pavilhão, que posteriormente são selecionados no *software* para o respetivo cálculo das emissões são:

- Aço em perfil, chapa, barra e varão laminados a quente - S275JR
- Aço em perfis tubulares laminados a frio - S275J0H
- Aço em perfis conformados a frio - S220GD+Z
- Aço em barão para armadura (diâmetro 8, 10 e 12)
- Betão de regularização - C12/15
- Poços, plintos, sapatas, vigas de equilíbrio - C30/37
- Pavimento térreo - C30/3
- Blocos de betão
- Argolas de betão pré-moldado
- Fibras metálicas de reforço
- Manta geotêxtil
- Rachão de pedra
- Filme de polietileno

Os principais materiais presentes na estrutura mista do pavilhão, que posteriormente são selecionados no *software* para o respetivo cálculo das emissões são:

- Aço em perfil, chapa, barra e varão laminados a quente - S275JR
- Aço em perfis tubulares laminados a frio - S275J0H
- Aço em perfis conformados a frio - S220GD+Z
- Aço em barão para armadura (diâmetro 8, 10 e 12)
- Betão de regularização - C12/15
- Poços, plintos, sapatas, vigas de equilíbrio - C30/37
- Pavimento térreo - C30/37
- Blocos de betão

- Argolas de betão pré-moldado
- Fibras metálicas de reforço
- Manta geotêxtil
- Rachão de pedra
- Filme de polietileno
- Madeira Glulam

4.2.2. Parâmetros admitidos nos casos de estudo

Para efetuar a quantificação da emissão de carbono equivalente, tal como acontece no primeiro caso de estudo, é necessário definir e transmitir os parâmetros adotados em cada módulo do ciclo de vida do pavilhão industrial. Neste estudo são abordados 9 casos alternativos que incorrem em algumas variações dos parâmetros para uma melhor análise da quantificação e redução da emissão de carbono equivalente na construção do pavilhão industrial. Do caso 1 ao caso 6 foi estudada a solução da estrutura construída exclusivamente em aço, já do caso 7 ao caso 9 foi estudada a alternativa anteriormente apresentada, uma estrutura mista (aço e madeira).

Caso 1

No caso 1 são admitidos materiais não renováveis onde se pretende verificar as emissões de carbono equivalente do estudo com materiais reciclados, para futuramente comparar com outros casos que possuam materiais recicláveis. Na Tabela 32 é possível observar os parâmetros admitidos para cada um dos módulos ACV.

Tabela 32 - Parâmetros admitidos no caso 1 para a quantificação do carbono equivalente do pavilhão industrial.

Módulo Analisado	Fontes de dados
Materiais de construção (A1-A3)	Neste módulo são selecionados materiais virgens, sem qualquer tipo de matéria reciclável. Os materiais selecionados são retirados da base de dados <i>One Click LCA</i> e são estritamente materiais genéricos para Portugal.
Transporte dos materiais de construção (A4)	Na distância de transporte foi considerada a distância padrão do software apresentados anteriormente na Tabela 11. O tipo de transporte utilizado para o betão e o aço foram respetivamente, camião betoneira e camião reboque, apresentados na Tabela 12. O rachão de pedra é transportado por um camião basculante e os restantes materiais são transportados também por camião reboque.
Construção e instalação (A5)	Devido à falta de dados para este módulo, no processo de construção é admitido o cenário de construção europeu presente na Tabela 13, em função da área do pavilhão. Relativamente ao desperdício de materiais, são aplicadas as percentagens presentes na Tabela 14 e contabilizadas todas as emissões relacionadas com o seu tratamento de resíduos. Os subconjuntos A5-1 e A5-4 não interferem neste módulo.
Uso (B1)	No uso do pavilhão não se considera qualquer emissão.
Manutenção dos materiais (B2)	Neste módulo a emissão de carbono equivalente é nula, dado que não é necessário recorrer a nenhuma manutenção dos elementos estruturais.

Tabela 32 – Continuação.

Módulo Analisado	Fontes de dados
Reparação dos materiais (B3)	Neste módulo a emissão de carbono equivalente é nula, dado que não se prevê recorrer a nenhuma substituição dos elementos estruturais.
Substituição dos materiais (B4)	Neste módulo a emissão de carbono equivalente é nula, dado que não é necessário recorrer a nenhuma substituição dos elementos estruturais.
Remodelação (B5)	Neste módulo a emissão de carbono equivalente é nula, dado que não se prevê qualquer tipo de remodelação no pavilhão.
Demolição do Pavilhão (C1)	Para a previsão da emissão de carbono equivalente na demolição do pavilhão industrial foi utilizado o cenário de demolição de uma estrutura metálica do <i>software One Click LCA</i> apresentado na Tabela 21.
Transporte dos resíduos (C2)	Para a distância do transporte dos resíduos dos materiais de construção foi considerada a distância média entre os dois centros de tratamento de resíduos mais próximos (situados em vila do conde), cerca de 30 km. O transporte é realizado por um camião basculante e um camião reboque para o aço.
Tratamento de resíduos (C3)	Para o tratamento de resíduos de construção são aplicados os valores apresentados anteriormente na Tabela 25.
Deposição dos resíduos em aterro (C4)	Neste módulo a emissão de carbono equivalente é nula, dado que nenhum material é depositado em aterro.
Benefícios (D)	Para os benefícios relacionados com tratamento de resíduos de construção e a circularidade dos materiais de construção são aplicados os valores gerados automaticamente pelo <i>software</i> .

Caso 2

Neste caso apenas o módulo A1-A3 sofre alterações relativamente ao caso 1. Estas alterações são apresentadas na Tabela 33.

Tabela 33 - Parâmetros admitidos no caso 2 para a quantificação do carbono equivalente do pavilhão industrial.

Módulo Analisado	Fontes de dados
Materiais de construção (A1-A3)	Neste módulo são selecionados materiais reciclados, tanto no betão como o aço. Os materiais selecionados são retirados da base de dados <i>One Click LCA</i> e são estritamente materiais genéricos para Portugal. O betão é um CEM III/B com 70% de cimento Portland substituído por escória granulada de alto-forno. No aço, 90% do conteúdo é reciclado.

Caso 3

Neste caso os módulos A1-A3, A4 e C2 sofrem alterações relativamente ao caso 1. Contudo no módulo A1-A3 existe uma complicação para o caso do betão. Neste caso pretende-se avaliar as emissões com dados realistas fruto de DAPs portuguesas ou europeias, no entanto não existe qualquer tipo de DAPs para o betão-pronto registada em Portugal. A alternativa é a utilização de DAPs estrangeiras, porém essa opção torna-se impossível devido à distância de transporte e consequentemente ao tempo de transporte, visto que o betão, uma vez misturado, a sua utilização

não deve ser feita com um intervalo superior a duas horas. Perante estas dificuldades o betão utilizado nos casos de estudo que exigem DAPs são dados de outros países, admitindo-se que Portugal consegue suportar esses valores e produzir também um betão-pronto com o mesmo fator de carbono. A distância de transporte admitida foi 100 km, maior distância que se consegue efetuar com o camião betoneira sem perder as propriedades do material. Estas alterações são apresentadas na Tabela 34.

Tabela 34 - Parâmetros admitidos no caso 3 para a quantificação do carbono equivalente do pavilhão industrial.

Módulo Analisado	Fontes de dados
Materiais de construção (A1-A3)	Neste módulo são selecionados materiais reciclados, tanto no betão como no aço. Os materiais selecionados são retirados da base de dados <i>One Click LCA</i> e são provenientes de DAPs fornecidas pelos produtores de materiais. O betão é um CEM III/A, produzido por moagem fina de cimento Portland, escória granulada de alto-forno e gesso, proveniente da Bélgica. O aço pertence ao grupo CELSA (Espanha) cuja produção é baseada exclusivamente no processo de arco elétrico (EAF) usando sucata como 100% da matéria-prima.
Transporte dos materiais de construção (A4)	O betão apresenta uma distância de transporte de 100 km. Já o aço realiza 1100 km no camião reboque, distância do produtor espanhol a Vila do Conde. As emissões do tipo de transporte são também valores apresentados na Tabela 12.
Transporte dos resíduos (C2)	Para a distância do transporte dos resíduos dos materiais de construção foi considerada a distância média entre os dois centros de tratamento de resíduos mais próximos (situados em Vila do Conde), cerca de 30 km. No entanto, para o aço, como deve retornar ao grupo celsa, foi admitida uma distância de 1100 km. O transporte é realizado por um camião reboque para o aço e um camião basculante para os restantes resíduos.

Caso 4

Neste caso os módulos A1-A3, A4 e C2 sofrem alterações relativamente ao caso 1. Estas alterações são apresentadas na Tabela 35.

Tabela 35 - Parâmetros admitidos no caso 4 para a quantificação do carbono equivalente do pavilhão industrial.

Módulo Analisado	Fontes de dados
Materiais de construção (A1-A3)	Neste módulo são selecionados materiais reciclados, tanto no betão como no aço. Os materiais selecionados são retirados da base de dados <i>One Click LCA</i> e são provenientes de DAPs fornecidas pelos produtores de materiais. O betão é igual ao do caso 3. Para o aço, é escolhido o XCarb da ArcelorMittal, cuja produção é baseada exclusivamente no processo de arco elétrico (EAF) com 100% do consumo de energia provenientes de fontes renováveis.
Transporte dos materiais de construção (A4)	O betão é igual ao do caso 3. O aço realiza um percurso de 520 km no camião reboque, distância do produtor <i>ArcelorMittal</i> (fábrica espanhola) a Vila do Conde.

Tabela 35 - Continuação.

Módulo Analisado	Fontes de dados
Transporte dos resíduos (C2)	Para a distância do transporte dos resíduos dos materiais de construção foi considerada a distância média entre os dois centros de tratamento de resíduos mais próximos (situados em vila do conde), cerca de 30 km. No entanto, para o aço, como deve retornar à fábrica <i>ArcelorMittal</i> , foi admitida uma distância de 520 km. O transporte é realizado por um caminhão reboque para o aço e um caminhão basculante para os restantes resíduos.

Caso 5

Neste caso apenas os módulos C3 e C4 sofrem alterações relativamente ao caso 4. Estas alterações são apresentadas na Tabela 36.

Tabela 36 - Parâmetros admitidos no caso 5 para a quantificação do carbono equivalente do pavilhão industrial.

Módulo Analisado	Fontes de dados
Tratamento de resíduos (C3)	Igual ao caso 4, no entanto, considera-se este módulo em todos os resíduos de construção à exceção do betão.
Deposição dos resíduos em aterro (C4)	Neste módulo a emissão de carbono equivalente é contabilizada apenas para o betão que é depositado em aterro e não é reciclado.

Caso 6

Neste caso de estudo apenas os módulos A1-A3 e A4 sofrem alterações relativamente ao caso 4. Estas alterações são apresentadas na Tabela 37.

Tabela 37 - Parâmetros admitidos no caso 6 para a quantificação do carbono equivalente do pavilhão industrial.

Módulo Analisado	Fontes de dados
Materiais de construção (A1-A3)	Neste módulo são selecionados materiais reciclados, tanto no betão como no aço. Os materiais selecionados são retirados da base de dados <i>One Click LCA</i> e são provenientes de DAPs fornecidas pelos produtores de materiais. O betão é um betão eco CEM III, produzido por moagem fina de cimento Portland, escória granulada de alto-forno e gesso, proveniente da Suécia. O aço é igual ao do caso 4.
Transporte dos materiais de construção (A4)	Transporte de aço e betão igual ao do caso 4.

Caso 7

A partir deste caso é estudada a construção do pavilhão recorrendo a treliças de madeira. Deste modo, os parâmetros adotados em cada módulo são outra vez todos apresentados. Os parâmetros admitidos neste caso de estudo podem ser observados na Tabela 38.

Tabela 38 - Parâmetros admitidos no caso 7 para a quantificação do carbono equivalente do pavilhão industrial.

Módulo Analisado	Fontes de dados
Materiais de construção (A1-A3)	Neste módulo são selecionados materiais virgens, sem qualquer tipo de matéria reciclável. Os materiais selecionados são retirados da base de dados <i>One Click LCA</i> e são estritamente materiais genéricos para Portugal.
Transporte dos materiais de construção (A4)	Na distância de transporte foi considerada a distância padrão do <i>software</i> apresentada anteriormente na Tabela 11. O tipo de transporte utilizado para o betão foi camião betoneira. Para o aço e para a madeira foi utilizado o camião reboque.
Construção e instalação (A5)	Devido à falta de dados para este módulo, no processo de construção é admitido o cenário de construção europeu presente na Tabela 13, em função da área do pavilhão. Relativamente ao desperdício de materiais, são aplicadas as percentagens presentes na Tabela 14 e contabilizadas todas as emissões relacionadas com o seu tratamento de resíduos. Os subconjuntos A5-1 e A5-4 não interferem neste módulo.
Uso (B1)	No uso do pavilhão não se considera qualquer emissão.
Manutenção dos materiais (B2)	Neste módulo a emissão de carbono equivalente é nula, dado que não é necessário recorrer a nenhuma manutenção dos elementos estruturais.
Reparação dos materiais (B3)	Neste módulo a emissão de carbono equivalente é nula, dado que não se prevê recorrer a nenhuma substituição dos elementos estruturais.
Substituição dos materiais (B4)	Neste módulo a emissão de carbono equivalente é nula, dado que não é necessário recorrer a nenhuma substituição dos elementos estruturais.
Remodelação (B5)	Neste módulo a emissão de carbono equivalente é nula, dado que não se prevê qualquer tipo de remodelação no pavilhão.
Uso de energia (B6) e uso de água (B7)	Estes módulos não são abordados neste estudo e não são quantificadas quaisquer emissões de carbono equivalente relacionadas com os mesmos.
Demolição do Pavilhão (C1)	Para a previsão da emissão de carbono equivalente na demolição do pavilhão industrial foi utilizado o cenário de demolição de uma estrutura mista do <i>software One Click LCA</i> apresentado na Tabela 21.
Transporte dos resíduos (C2)	Para a distância do transporte dos resíduos dos materiais de construção foi considerada a distância média entre os dois centros de tratamento de resíduos mais próximos (situados em Vila do Conde), cerca de 30 Km.
Tratamento de resíduos (C3)	Para o tratamento de resíduos de construção são aplicados os valores apresentados anteriormente na Tabela 25.
Deposição dos resíduos em aterro (C4)	Neste módulo a emissão de carbono equivalente é nula, dado que nenhum material é depositado em aterro.
Benefícios (D)	Para os benefícios relacionados com tratamento de resíduos de construção e a circularidade dos materiais de construção são aplicados os valores gerados automaticamente pelo <i>software</i> .

Caso 8

Neste caso apenas o módulo A1-A3 sofre alterações relativamente ao caso 7. Estas alterações são apresentadas na Tabela 39.

Tabela 39 - Parâmetros admitidos no caso 8 para a quantificação do carbono equivalente do pavilhão industrial.

Módulo Analisado	Fontes de dados
Materiais de construção (A1-A3)	Neste módulo são selecionados materiais reciclados, tanto no betão como no aço. Os materiais selecionados são retirados da base de dados <i>One Click LCA</i> e são estritamente materiais genéricos para Portugal. O betão é um CEM III/B com 70% de cimento Portland substituído por escória granulada de alto-forno. 90% do aço é reciclado. No entanto para a madeira o teor de carbono não se altera devido à existência de apenas um material genérico para madeira Glulam em Portugal.

Caso 9

Neste caso apenas os módulos A1-A3, A4 e C2 sofrem alterações relativamente ao caso 7. Estas alterações são apresentadas na Tabela 40.

Tabela 40 - Parâmetros admitidos no caso 9 para a quantificação do carbono equivalente do pavilhão industrial.

Módulo Analisado	Fontes de dados
Materiais de construção (A1-A3)	Neste módulo são selecionados materiais reciclados, tanto no betão como no aço. Os materiais selecionados são retirados da base de dados <i>One Click LCA</i> e são provenientes de DAPs fornecidas pelos produtores de materiais. O betão é um betão eco CEM III, produzido por moagem fina de cimento Portland, escória granulada de alto-forno e gesso, proveniente da Suécia. O aço escolhido é o XCarb da <i>ArcelorMittal</i> , cuja produção é baseada exclusivamente no processo de arco elétrico (EAF) com 100% do consumo de energia proveniente de fontes renováveis. A madeira é proveniente do produtor Holmen, uma fábrica situada na Suécia que apresenta a melhor pontuação no teor de carbono no tipo de madeira Glulam.
Transporte dos materiais de construção (A4)	O betão apresenta uma distância de transporte de 100 km. Já o aço realiza 520 km no camião reboque, distância do produtor espanhol a Vila do Conde. O transporte da madeira foi também dividido em duas distâncias, 50 km em camião reboque e 2600 km no navio contentor. As emissões do tipo de transporte são também valores retirados da Tabela 12.
Transporte dos resíduos (C2)	Para a distância do transporte dos resíduos dos materiais de construção foi considerada a distância média entre os dois centros de tratamento de resíduos mais próximos (situados em Vila do Conde), cerca de 30 km. No entanto, para o aço, como deve retornar ao grupo <i>ArcelorMittal</i> , foi admitida uma distância de 520 km. O transporte é realizado por um camião reboque para o aço e um camião basculante para os restantes resíduos.

4.2.3. Apresentação dos resultados obtidos nos casos de estudo

Depois de analisar e determinar quais os parâmetros a adotar (descritos anteriormente para cada caso individualmente) é efetuada a quantificação da pegada de carbono equivalente do pavilhão industrial recorrendo ao *software One Click LCA*. Os resultados detalhados para cada módulo do ciclo de vida dos diferentes casos estudados podem ser observados na Tabela 41 e na Tabela 42.

Tabela 41 - Resultados dos casos de estudo do pavilhão industrial (caso 1 ao caso 5).

Módulo Analisado	Caso 1 kg CO ₂ e	Caso 2 kg CO ₂ e	Caso 3 kg CO ₂ e	Caso 4 kg CO ₂ e	Caso 5 kg CO ₂ e
(A1-A3)	1,97X10 ⁶	7,27×10 ⁵	6,22×10 ⁵	5,75×10 ⁵	5,75×10 ⁵
(A4)	3,68×10 ⁴	3,68×10 ⁴	9,04×10 ⁴	7,87×10 ⁴	7,87×10 ⁴
(A5)	1,23×10 ⁵	7,28×10 ⁴	6,95×10 ⁴	6,75×10 ⁴	6,77×10 ⁴
(B1)	0	0	0	0	0
(B2)	0	0	0	0	0
(B3)	0	0	0	0	0
(B4)	0	0	0	0	0
(B5)	0	0	0	0	0
(C1)	1,62×10 ⁴	1,62×10 ⁴	1,62×10 ⁴	1,62×10 ⁴	1,62×10 ⁴
(C2)	2,33×10 ⁴	2,33×10 ⁴	2,78×10 ⁴	2,75×10 ⁴	2,75×10 ⁴
(C3)	1,53×10 ³	2,82×10 ³	2,57×10 ³	2,57×10 ³	1,82×10 ³
(C4)	0	0	0	0	5,91×10 ³
(D)	-1,22×10 ⁶	-3,07×10 ⁵	-1,93×10 ⁵	-1,93×10 ⁵	-1,78×10 ⁵
Total (D) não incluído	2,17×10⁶	8,85×10⁵	8,28×10⁵	7,67×10⁵	7,73×10⁵

Tabela 42 - Resultados dos casos de estudo do pavilhão industrial (caso 6 ao caso 9).

Módulo Analisado	Caso 6 kg CO ₂ e	Caso 7 kg CO ₂ e	Caso 8 kg CO ₂ e	Caso 9 kg CO ₂ e
(A1-A3)	5,07×10 ⁵	1,87×10 ⁶	6,67×10 ⁵	5,07×10 ⁵
(A4)	1,04×10 ⁵	3,62×10 ⁴	3,62×10 ⁴	1,04×10 ⁵
(A5)	6,57×10 ⁴	1,23×10 ⁵	7,3×10 ⁴	6,57×10 ⁴

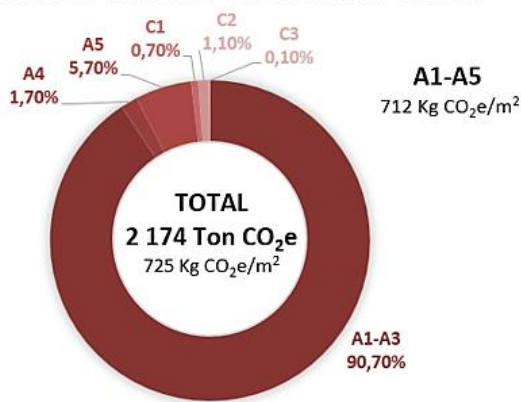
Tabela 42 - Continuação.

Módulo Analisado	Caso 6 kg CO _{2e}	Caso 7 kg CO _{2e}	Caso 8 kg CO _{2e}	Caso 9 kg CO _{2e}
(B1)	0	0	0	0
(B2)	0	0	0	0
(B3)	0	0	0	0
(B4)	0	0	0	0
(B5)	0	0	0	0
(C1)	1,62×10 ⁴	1,61×10 ⁴	1,61×10 ⁴	1,61×10 ⁴
(C2)	2,75×10 ⁴	2,33×10 ⁴	2,33×10 ⁴	2,75×10 ⁴
(C3)	2,56×10 ³	2,78×10 ³	3,42×10 ³	2,56×10 ³
(C4)	0	0	0	0
(D)	-1,92×10 ⁵	-1,22×10 ⁶	-3,09×10 ⁵	-1,92×10 ⁵
Total (D) não incluído	7,23×10⁵	2,07×10⁶	8,24×10⁵	6,87×10⁵

Para uma melhor interpretação, os resultados obtidos são igualmente apresentados sobre a forma de gráfico. Neles é possível ver a contribuição (em percentagem) de cada módulo para a pegada total de carbono equivalente para todos os módulos apresentados anteriormente na Tabela 6, mas também apenas para os módulos A1-A5 (análise *upfront embodied carbon*). Na Figura 40 são apresentados os resultados da quantificação do carbono equivalente para o caso 1 e o caso 2. Ambos os casos são realizados com materiais genéricos que a ferramenta *One Click LCA* possui para Portugal. Conseguindo chegar a um valor da pegada de carbono equivalente caso estes materiais sejam produzidos e adquiridos em Portugal. A diferença reside na quantidade de matérias recicláveis que os materiais possuem na sua composição. O caso 1 utiliza betão e aço virgem, embora atualmente seja difícil encontrar aço fabricado com 0% de material reciclado (consequência da elevada reciclabilidade do aço, mencionado no capítulo 2.4.2). O caso 2, pelo contrário, apresenta, no betão, a substituição de 70% de cimento Portland por escória granulada de alto-forno e 90% da composição do aço provém de material reciclado. A diferença entre os dois casos de estudo na pegada de carbono equivalente é gigantesca, conseguindo uma redução de cerca de 60% do caso 2 face ao caso 1. Neste dois casos de estudo verifica-se claramente a importância de adotar matérias recicláveis nos materiais de construção para encontrar o caminho da neutralidade carbónica dos edifícios, nomeadamente no caso do aço. Dos restantes módulos apenas A4, C1 e C2 permaneceram inalterados, indicando a grande relação do restante ciclo de vida do edifício com a obtenção dos materiais de construção (módulos A1-A3). Relativamente ao resultado da classificação *One Click LCA* o caso 1 obtém uma classificação G, já o caso 2 consegue obter uma classificação E, duas classificações acima do caso 1. Na classificação SCORS é obtida uma

classificação G e D para os casos 1 e 2, respetivamente. Ambos os casos de estudo ficam longe da meta 2030 para se conseguirem alinhar na direção certa da neutralidade carbónica em 2050. A principal dificuldade encontrada nestes casos de estudo está na escolha dos materiais e na distância de transporte. Apenas os materiais mais comuns, como o betão, aço estrutural, barras de reforço em aço possuem bastantes dados genéricos, já os restantes materiais envolvidos no projeto, como blocos de betão, argolas de betão pré-moldado, rachão de pedra e manta geotêxtil apenas possuem reduzido número de DAPs de produtores. Nos dois casos de estudo foi admitido o mesmo produtor para os diferentes tipos de materiais de modo a possibilitar a comparação entre os dois. A distância de transporte, quando se recorre a materiais genéricos, é difícil de medir porque não se conhece a localização da fábrica do produtor do material, impossibilitando atingir um valor real neste módulo. A utilização de distâncias padrão não passa de uma suposição que induz valores não representativos do módulo A4.

PEGADA DE CARBONO EQUIVALENTE - CASO 1



PEGADA DE CARBONO EQUIVALENTE - CASO 2

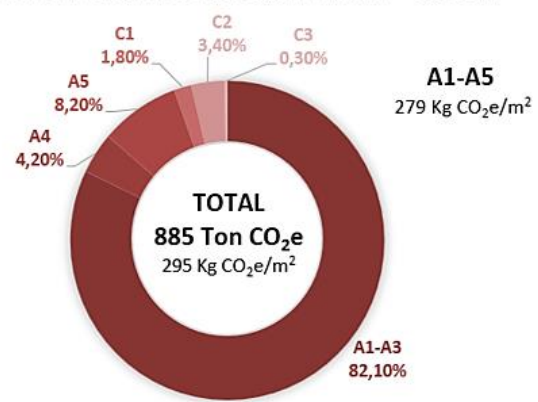


Figura 40 - Resultados do Caso 1 (esquerda) e Caso 2 (direita) sob a forma de percentagens relativas aos módulos ACV do pavilhão industrial.

Os resultados obtidos para os casos de estudo 3 e 4 são expostos na Figura 41. Em contraste com os casos anteriores estes dois casos não envolvem materiais genéricos da base de dados, mas sim materiais de produtores verificados por DAPs. A quantificação do carbono equivalente quando acontece com materiais que tenham o seu fator de carbono provenientes de DAPs dos produtores torna-se mais realista, fornecendo valores exatos e não meras suposições. No caso 3 foi admitido um betão com comportamento ambiental idêntico ao betão encontrado na Bélgica (produtor FEDBETON), composto por cimento Portland, escória granulada de alto-forno e outros compostos. Por outro lado, o aço provém mesmo de um produtor estrangeiro, o grupo espanhol CELSA. A pegada de carbono equivalente obtida no caso 3 é 7% inferior relativamente ao caso 2. Isto mostra que o fator de carbono do aço espanhol consegue sobrepor-se ao aumento da sua distância de transporte, mesmo ocorrendo um aumento de 50% de emissão de carbono derivado do betão. O facto de admitir-se a possibilidade de produzir betão com o mesmo fator de carbono que o betão belga gera um aumento das emissões de carbono equivalente, contudo tem a vantagem de admitirmos valores que são existentes no mercado deste tipo de material. Se for possível assegurar a produção deste tipo de betão e optar por outro produtor de aço mais ecológico, pode-se observar o caso 4. O caso 4 admite o mesmo fator de carbono para o betão, mas o aço provém da fábrica espanhola da *ArcelorMittal*. Este aço trata-se do aço XCarb que é produzido pelo processo EAF com 100% de energia renovável e 100% de material reciclável. Ao utilizar este aço estrutural é possível reduzir 7% da pegada total de dióxido de carbono relativamente ao caso 3. Pode-se afirmar que a

utilização do aço XCarb é muito vantajosa, mesmo com a elevada distância de transporte associada, consegue subir de uma classificação D (caso 3) para uma classificação C (caso 4) segundo o sistema de classificação SCORS. Já no sistema de classificação *One Click LCA*, ambos os casos atingem o nível D.

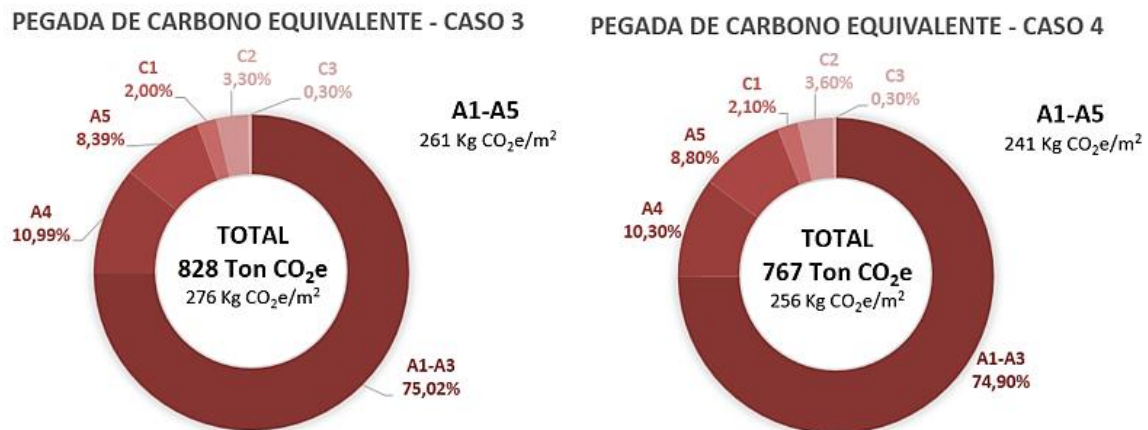


Figura 41 - Resultados do Caso 3 (esquerda) e Caso 4 (direita) sob a forma de percentagens relativas aos módulos ACV do pavilhão industrial.

No caso 4, quando o pavilhão chegar ao fim de vida, é admitido que o betão seja triturado para futura utilização como agregados. Isso faz com que o impacto de fim de vida do betão seja positivo, no entanto, é importante saber o que acontece quando o mesmo não é reciclado e é depositado em aterro. O caso 5 (Figura 42) é precisamente igual ao caso 4, porém o betão é depositado em aterro e não é reciclado. Esta diferença de fim de vida do betão gera um aumento de 6 toneladas na pegada total de carbono equivalente do projeto. Embora corresponda a uma pequena percentagem (cerca de 1%) e não altere a classificação do projeto em nenhum sistema anteriormente mencionado é um aumento que pode e deve ser evitado, contribuindo para uma economia circular. A diferença entre os dois casos de estudo pode ser verificada com maior pormenor na Tabela 41. Por fim, no caso 6 é estudada a possibilidade de Portugal suportar o fator de carbono do betão produzido na Suécia. Trata-se de um betão mais ecológico que o betão da Bélgica, que conseqüentemente origina uma menor pegada de carbono equivalente, cerca de 6,5%. O caso 6 ilustra a diversidade de betão presente por toda a União Europeia, mas que infelizmente, devido às suas propriedades não pode ser transportado por muitos quilómetros, criando uma grande barreira na obtenção deste material de construção. Os casos 5 e 6 tem as mesmas classificações SCORS (C) e *One Click LCA* (D). No caso 6 a declaração ambiental do betão é apresentada em sueco, o que dificulta a leitura da mesma. Já a declaração ambiental do betão da Bélgica (caso 5), apesar de ser elaborada em inglês, não possui qualquer informação sobre as quantidades dos diferentes compostos do betão.

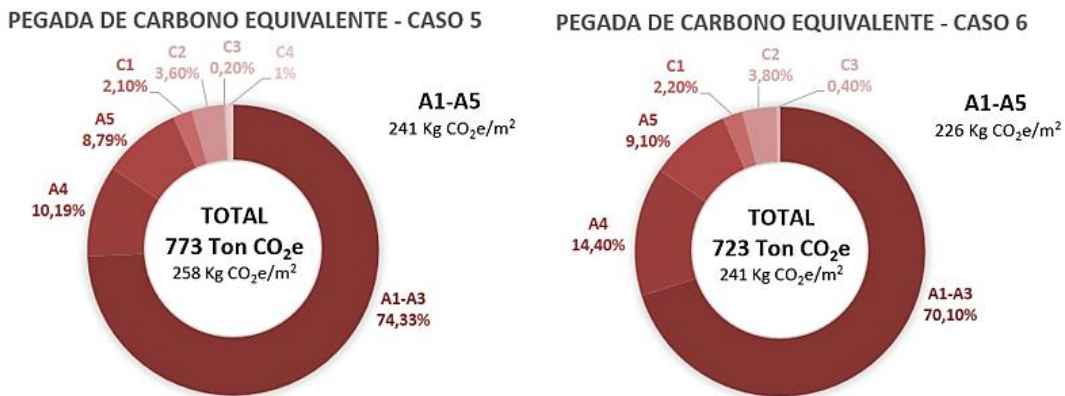


Figura 42 - Resultados do Caso 5 (esquerda) e Caso 6 (direita) sob a forma de percentagens relativas aos módulos ACV do pavilhão industrial.

A partir do caso 7 os resultados apresentados dizem respeito ao projeto alternativo do pavilhão recorrendo às treliças em madeira. Os casos de estudo 7 e 8 (Figura 43) dizem novamente respeito a materiais genéricos da base de dados *One Click LCA*. À semelhança dos casos 1 e 2, a única diferença entre nestes casos reside na quantidade de matérias recicláveis que os materiais possuem na sua composição. O caso 7 utiliza betão e aço virgem. O caso 8, pelo contrário, apresenta no betão a substituição de 70% de cimento Portland por escória granulada de alto-forno e no aço, 90% da sua composição provém de material reciclado. A diferença entre os dois casos alternativos na pegada de carbono equivalente é também gigantesca, conseguindo no caso 8 uma redução também de cerca de 60% face ao caso 7. Contudo, a solução em madeira para o caso 7 apresenta uma redução de 5% das emissões de carbono equivalente comparado ao caso 1 (estrutura apenas metálica) e o caso 8 consegue reduzir em 7% as emissões face ao caso 2. A quantidade de carbono sequestrada para ambos os casos foi 32 kg CO₂/m², mas como foi admitida a incineração da madeira com reaproveitamento de energia, o carbono sequestrado é novamente libertado para a atmosfera, daí a importância deste valor ser apresentado sempre em separado. A única hipótese de o carbono sequestrado fazer parte do valor total é considerar o fim de vida da madeira como reutilizado, ou seja, na demolição do pavilhão as treliças poderem ser reaproveitadas e depositadas no *LisbonWood* para posteriormente serem utilizadas em projetos futuros. Caso aconteça a incineração da madeira a classificação SCORS do pavilhão é a classificação G e D, para o caso 7 e 8, respetivamente. Se as treliças fabricadas em madeira forem reutilizadas a classificação SCORS do caso 8 subiria para a letra C.

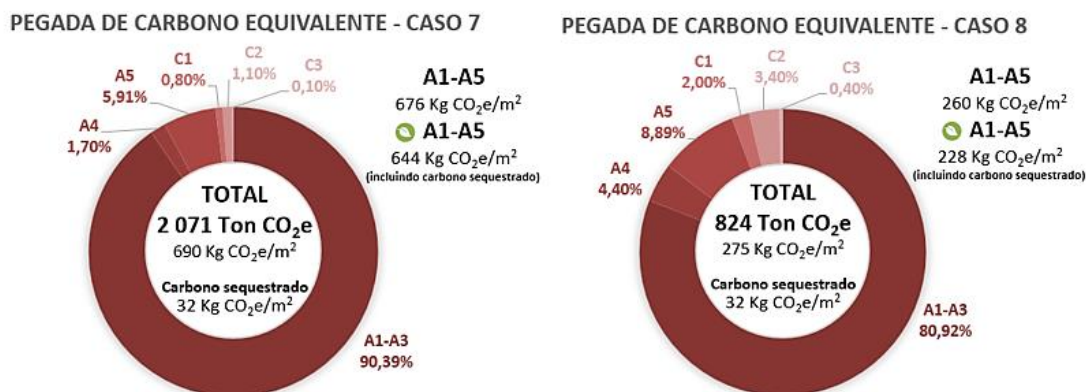


Figura 43 - Resultados do Caso 7 (esquerda) e Caso 8 (direita) sob a forma de percentagens relativas aos módulos ACV do pavilhão industrial.

O último caso (9) relata a pegada de carbono equivalente proveniente de materiais com declarações ambientais dos produtores. Neste caso é também assumido o facto de produtores portugueses assegurarem um fator de carbono igual ao de produtores suecos para o betão, já o aço é fornecido pela *ArcelorMittal* (transporte de camião) e a madeira Glulam é fornecida pelo produtor Holmen, cuja fábrica situa-se na Suécia (transporte de camião e navio). Este caso é importante para observar de que forma a substituição dos perfis metálicos por treliças interfere na pegada de carbono, caso os materiais de construção sejam materiais que existem atualmente no mercado. Através da Figura 44 é possível afirmar que, de todos os casos anteriormente apresentados, este caso possui a pegada de carbono equivalente mais reduzida. A redução das emissões com a utilização de materiais recicláveis europeus consegue ser superior face à utilização de materiais genéricos portugueses. Por consequente, a maior redução visualiza-se no caso 9, com a substituição dos perfis metálicos por treliças em madeira. Este caso consegue atingir uma classificação SCORS C, caso se considere a reutilização das treliças e não a inceneração, a classificação consegue atingir a letra B. Na classificação do software, quando é considerada a reutilização da madeira, consegue-se também subir a classificação de C para B.

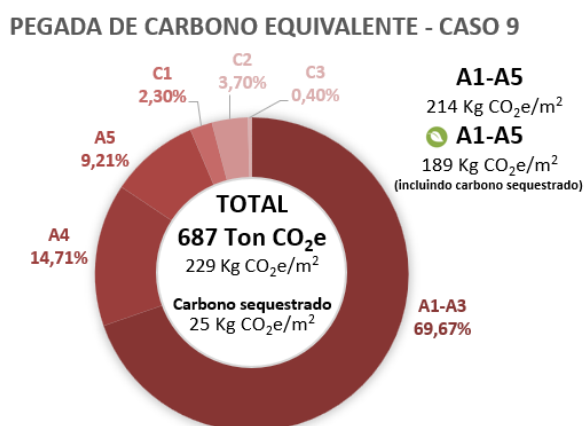


Figura 44 - Resultados do Caso 9 sob a forma de percentagens relativas aos módulos ACV do pavilhão industrial.

A introdução do material orgânico (madeira) no projeto do pavilhão industrial resultou em reduções em todos os casos. Na utilização de materiais genéricos não recicláveis, a madeira conseguiu obter uma redução de 5%, já para os materiais recicláveis a redução é um pouco superior, cerca de 7%. Relativamente aos materiais europeus, a redução encontrada com a solução em madeira foi 5%. Considerando que a reutilização da estrutura treliçada em madeira no fim de vida do projeto seja possível, as reduções das emissões sofrem um aumento. Redução de 15% para os materiais europeus, 10% para materiais genéricos não reciclados e 17,5% para materiais genéricos reciclados. Fica amplamente justificada a procura de soluções de projeto alternativas com o fim de diminuir a pegada de carbono.

5. CONCLUSÃO

Depois de efetuada uma pesquisa sobre a quantificação das emissões de carbono equivalente na literatura, desenvolvido um método de cálculo e realizado a respetiva quantificação das emissões em dois estudos, foi possível retirar algumas conclusões. Neste capítulo são descritas todas as conclusões que foram encontradas nesta dissertação, mas também são apresentadas as dificuldades e limitações que existiram na quantificação das emissões na construção em Portugal.

5.1. Conclusões finais

Método de cálculo

Duma pesquisa bibliográfica aprofundada ressalta que a metodologia mais aceite para a quantificação do carbono equivalente é a avaliação do ciclo de vida baseada na norma EN 15978:2011. É constituída por vários módulos agrupados em etapas: etapa do produto, da construção, do uso, de fim de vida e como suplemento a etapa D que incide sobre o conceito de economia circular, ou seja, a reciclagem. O método de quantificação tem como base as declarações ambientais de produto que são fornecidas pelos fabricantes dos materiais de construção, que informa o projetista sobre a quantidade de carbono incorporado no produto. Apesar da metodologia ACV apresentar várias vantagens ainda é um método que apresenta informações com um grau significativo de imprecisão, nomeadamente no tocante às etapas de uso e fim de vida que são baseadas em meras suposições que podem não corresponder à realidade. Como consequência destas suposições muitas vezes nem todos os módulos são considerados na quantificação das emissões.

Na parte estrutural dos edifícios (subestrutura e superestrutura) os módulos mínimos a incluir na quantificação devem ser os módulos A1-A5, B4 e C1-C4. Já segundo Level(s) nenhum módulo é de carácter obrigatório, o que deveria ser alterado, tornando pelo menos os módulos anteriores obrigatórios a fim de possibilitar futuras comparações entre projetos. A existência de muitas certificações também é um problema e deveria ocorrer a unificação das mesmas.

A procura de materiais certificados ambientalmente (DAPs) em Portugal é ainda bastante difícil. Não existe nenhuma base de dados de materiais genéricos portuguesa ao contrário do que acontece com outros países, como França, Países baixos, Dinamarca, etc. Portugal apenas apresenta a DAP Habitat que possui um número escasso de materiais certificados. Essa escassez levou a uma dificuldade nos casos de estudo realizados. Nos casos relativos a materiais ambientalmente declarados pelos produtores não foi possível selecionar qualquer tipo de betão em Portugal porque não existe nenhuma DAP desse tipo de material, apenas materiais genéricos. O betão pronto é um material que não pode ser transportado por grandes distâncias e por essa razão não podem ser utilizadas DAPs de outros países. Na inexistência de DAPs, como alternativa devem ser utilizados os materiais de base de dados genéricas, como aconteceu nos casos de estudo. E mesmo no caso das DAPs estrangeiras, só materiais mais comuns, como o aço, betão-pronto e madeira apresentam alguma variedade.

A existência de *benchmarks* é necessária para a imposição de metas de carbono incorporado no setor da construção. A quantificações das emissões dos projetos devem ser realizadas para

posteriormente avaliar se o projeto cumpre ou não as metas estabelecidas na redução das emissões. Portugal neste aspeto não apresenta nenhum valor limite ou de valor de referência, mas necessita de os desenvolver para ajudar a situar os projetistas que realizam a quantificação das emissões. Seria benéfico Portugal adotar o sistema implementado na Suécia: obrigar a apresentar uma declaração ambiental (com os vários módulos ACV) para obter a autorização de ocupação. Desta forma Portugal poderia utilizar estes dados para investigar e produzir valores de referência para apoiar os projetista na quantificação de carbono equivalente. Mais tarde poderiam surgir valores limites alinhados com as percentagens de redução das emissões.

Casos de estudo

Um caso de estudo de um edifício residencial em betão permite concluir que:

- Os projetos construídos com materiais não reciclados obtêm classificações bastante abaixo dos limites propostos para 2030.
- Ao substituir materiais não reciclados por materiais reciclados verifica-se uma diminuição considerável da pegada total de carbono equivalente, cerca de 37% o que permite obter uma classificação que cumpra os limites estabelecidos para 2030 segundo LETI.
- Materiais reciclados com substituição de cimento Portland por escória granulada de alto forno e cinzas volantes apresentam melhor pegada de carbono equivalente do que materiais reciclados com apenas escória granulada de alto forno.

Um caso de estudo de um pavilhão industrial permite concluir que:

- Os projetos construídos com materiais não reciclados obtêm classificações muito abaixo dos limites propostos para 2030.
- Ao substituir materiais não reciclados por materiais reciclados verifica-se uma diminuição considerável da pegada total de carbono equivalente, cerca de 60% sem, no entanto, permitir obter uma classificação que cumpra os limites estabelecidos para 2030.
- A combinação de betão reciclado e aço produzido com energia 100% proveniente de fontes renováveis apresenta uma redução suplementar significativa face ao aço não proveniente de energia renovável.
- A colocação dos materiais em aterro no seu fim de vida, em vez da sua trituração para futuras utilizações provoca um aumento das emissões de carbono, embora pouco significativo, o que demonstra que não há desvantagem em triturar os resíduos de betão, promovendo a economia circular.
- A utilização de DAPs específicas de fornecedores de toda a europa escolhidos por possuírem materiais ecologicamente mais performantes leva a melhorias suplementares. Isso mostra que em Portugal deve ser realizado um esforço para igualar a performance dos materiais encontrados noutros países, em particular o betão que não pode ser transportado por longas distâncias.
- A realização da alteração do projeto com objetivo específico na redução da pegada de carbono, por exemplo, a substituição de coberturas de aço por coberturas de madeira é possível reduzir significativamente a pegada total de carbono equivalente do projeto.

- Essa vantagem pode ser anulada por uma escolha errada do tratamento de fim de vida da madeira, se incinerada devolve o carbono sequestrado para a atmosfera. A reutilização é uma estratégia ao alcance para evitar essa libertação de carbono, mas também se encontram outras em desenvolvimento, como a captura de carbono, que poderão ser soluções viáveis. Atualmente esta técnica não se pode aplicar na metodologia ACV, mas com o tempo é algo a reavaliar.

De tudo isso pode-se concluir que uma estratégia para a redução da pegada de carbono do edifício deve passar pela utilização de materiais recicláveis, escolha criteriosa dos fornecedores e adaptação do projeto com fim específico da redução da pega de carbono. Apesar disso só num dos casos foi possível cumprir as metas 2030 desenvolvidas por LETI e em nenhum aquelas desenvolvidas por SCORS. Isso mostra a necessidade de um trabalho adicional na elaboração de projetos sustentáveis que possuam emissões nulas.

5.2. Limitações e trabalhos futuros

Método de cálculo

O uso de cenários de construção (A5), demolição (C1), tratamento de resíduos (C3) e deposição de resíduos em aterro (C4) foi uma das grandes limitações deste estudo. Os cenários são cedidos pelo *software* e tem valor europeu, que representa vários países com mecanismos e mix de eletricidade diferentes. Estes cenários podem induzir em erro com uma maior pegada de carbono, mas também podem provocar um défice nas emissões reais de carbono equivalente praticadas em Portugal nestes módulos. Nesse sentido deve ser desenvolvido um método de cálculo mais próximo da realidade para conseguir uma média de emissões para os módulos de construção e demolição em função da área. Do mesmo modo, deve-se avaliar e quantificar as emissões de carbono em algumas das centrais de tratamento em Portugal, para conseguir dispor de uma média de emissões por quantidade de detritos para os diferentes tipos de materiais. Estes cenários nacionais podem ser organizados de diversas formas e podem aproximar os valores de emissão destes módulos aos valores reais, conseguindo perceber realmente quais são os materiais e as técnicas que praticam uma menor emissão de carbono equivalente em todo o seu ciclo de vida (A1-C4).

Casos de estudo

Quantificar unicamente as emissões de carbono equivalente, que é apenas um dos vários indicadores da avaliação do ciclo de vida, foi uma das limitações deste estudo. Uso de água doce, acidificação, destruição da camada de ozono, potencial de depleção abiótica para recursos fósseis e eutrofização são alguns dos indicadores que não foram contabilizados nesta dissertação.

Nos estudos foram comparados materiais reciclados e não reciclados, mas também materiais de diferentes produtores estrangeiros. Nestas comparações não houve qualquer relação com o custo dos diferentes materiais, impossibilitando identificar se os projetos mais sustentáveis teriam um custo mais elevado. Esta limitação identificada no estudo deve ser explorada em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Cullmann *et al.*, «2020 STATE OF CLIMATE SERVICES RISK INFORMATION AND EARLY WARNING SYSTEMS: Report Editorial Board (WMO)».
- [2] «2022 GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION», 2022. Acedido: 18 de Outubro de 2023. [Online]. Disponível em: www.globalabc.org.
- [3] «2021 GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector». Acedido: 16 de Outubro de 2023. [Online]. Disponível em: www.globalabc.org.
- [4] «SE2P - Empresa». Acedido: 26 de Dezembro de 2022. [Online]. Disponível em: http://www.se2p.pt/web1/zp/tp1/id1/paginas/index.asp?P_cod_pagina=29
- [5] «Climate neutrality - Consilium». Acedido: 17 de Novembro de 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.consilium.europa.eu/en/topics/climate-neutrality/>
- [6] «About - AIA». Acedido: 17 de Novembro de 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.aia.org/about>
- [7] «About | LETI». Acedido: 16 de Novembro de 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.leti.uk/about>
- [8] «RIBA - About the Royal Institute of British Architects». Acedido: 17 de Novembro de 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.architecture.com/about>
- [9] «Welcome to RICS». Acedido: 4 de Abril de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.rics.org/>
- [10] S. Lockie, P. Berebecki, «Methodology to calculate embodied carbon of materials» RICS, 2012.
- [11] P. R. Shukla *et al.*, «Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change.», 2022. Acedido: 24 de Outubro de 2023. [Online]. Disponível em: www.ipcc.ch
- [12] «LETI Embodied Carbon Primer». Acedido: 14 de Dezembro de 2022. [Online]. Disponível em: www.LETI.london
- [13] L. F. Cabeza, C. Barreneche, L. Miró, J. M. Morera, E. Bartolí, e A. Inés Fernández, «Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 536–542, Jul. 2013, doi: 10.1016/J.RSER.2013.03.017.
- [14] S. Chen, Y. Teng, Y. Zhang, C. K. Y. Leung, e W. Pan, «Reducing embodied carbon in concrete materials: A state-of-the-art review», *Resour Conserv Recycl*, vol. 188, p. 106653, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2022.106653.
- [15] MAYOR OF LONDON, «Design for a circular economy primer». Acedido: 21 de Novembro de 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.london.gov.uk/>
- [16] A. Gharizadeh e & F. Sartipi, «The chemical reactor design configuration of CO 2 concrete green solution», *Journal of Construction Materials*, vol. 1, pp. 2–5, 2020, doi: 10.36756/JCM.v1.2.5.
- [17] J. Orr, O. Gibbons, e W. "Arnald, «A brief guide to calculating embodied carbon», *The Structural Engineer*, vol. 98, n. 7, pp. 22–27, Jul. 2020.
- [18] BRE Global, «BRE Global Methodology For The Environmental Assessment Of Buildings Using», 2018. Acedido: 11 de Novembro de 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.greenbooklive.com/>
- [19] H. Gervasio e S. Dimova, «Model for Life Cycle Assessment (LCA) of buildings», EUR 29123 EN, Publications Office of the European Union, 2018. doi: 10.2760/10016.
- [20] M. Bahramian e K. Yetilmezsoy, «Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research (1995–2018)», *Energy Build*, vol. 219, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2020.109917.

- [21] M. P. Drewniok, J. Campbell, e J. Orr, «The Lightest Beam Method – A methodology to find ultimate steel savings and reduce embodied carbon in steel framed buildings», *Structures*, vol. 27, pp. 687–701, Out. 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.06.015.
- [22] Emily Lorenz, «How to read an EPD», *The Structural Engineer*, vol. 99, n. 11, pp. 15–17, Dez. 2021.
- [23] «BASELINE REPORT v2 | Material Baselines ABOUT THE CARBON LEADERSHIP FORUM», 2021. [Online]. Disponível em: <https://carbonleadershipforum.org/material-baselines/>.
- [24] S. Toniolo, A. Mazzi, M. Simonetto, F. Zuliani, e A. Scipioni, «Mapping diffusion of Environmental Product Declarations released by European program operators», *Sustain Prod Consum*, vol. 17, pp. 85–94, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.SPC.2018.09.004.
- [25] «home - DAPHabitat». Acedido: 4 de Janeiro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.daphabitat.pt/>
- [26] «oerco2 - Report-EPD-in-Portugal_PT». Acedido: 21 de Dezembro de 2022. [Online]. Disponível em: <https://oerco2.eu/reports/>
- [27] N. Minkov, L. Schneider, A. Lehmann, e M. Finkbeiner, «Type III Environmental Declaration Programmes and harmonization of product category rules: status quo and practical challenges», *J Clean Prod*, vol. 94, pp. 235–246, Mai. 2015, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2015.02.012.
- [28] W. K. Biswas, Y. Alhorr, K. K. Lawania, P. K. Sarker, e E. Elsarrag, «Life cycle assessment for environmental product declaration of concrete in the Gulf States», *Sustain Cities Soc*, vol. 35, pp. 36–46, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.SCS.2017.07.011.
- [29] S. Toniolo, A. Mazzi, M. Simonetto, F. Zuliani, e A. Scipioni, «Mapping diffusion of Environmental Product Declarations released by European program operators», *Sustain Prod Consum*, vol. 17, pp. 85–94, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.SPC.2018.09.004.
- [30] «EC3 - Find & Compare Materials». Acedido: 26 de Dezembro de 2022. [Online]. Disponível em: <https://buildingtransparency.org/ec3/material-search>
- [31] «Home - building-transparency.org». Acedido: 12 de Dezembro de 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.buildingtransparency.org/>
- [32] «ecoinvent v3.0 - ecoinvent». Acedido: 18 de Fevereiro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/data-releases/ecoinvent-3-0/>
- [33] «Published EPDs | Institut Bauen und Umwelt e.V.». Acedido: 18 de Fevereiro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://ibu-epd.com/en/published-epds/>
- [34] «EPD Library | EPD International». Acedido: 18 de Fevereiro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.environdec.com/library>
- [35] «ICE Database V3 Launched - Circular Ecology». Acedido: 26 de Dezembro de 2022. [Online]. Disponível em: <https://circularecology.com/news/ice-database-v3-launched>
- [36] «EPD Search - Irish Green Building Council». Acedido: 18 de Fevereiro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.igbc.ie/epd-search/>
- [37] «GreenBook Live». Acedido: 18 de Fevereiro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.greenbooklive.com/search/companysearch.jsp?id=260§ionid=0&partid=10028&companyName=&addressPostcode=&productName=&certNo=&certBody=>
- [38] «ECO EPD LIST - Eco Platform en». Acedido: 18 de Fevereiro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.eco-platform.org/list-of-all-eco-epd.html>
- [39] «Product Sustainability (GaBi) Data Search | Sphera». Acedido: 18 de Fevereiro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://sphera.com/product-sustainability-gabi-data-search/>
- [40] «Publications | Athena Sustainable Materials Institute». Acedido: 18 de Fevereiro de 2023. [Online]. Disponível em: <http://www.athenasmi.org/resources/publications/>
- [41] «Transparency Catalog». Acedido: 18 de Fevereiro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://transparencycatalog.com/>
- [42] «Climate Earth | EPDs Made Easy». Acedido: 18 de Fevereiro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://climateearth.com/>

- [43] M. Lewis, M. Huang, S. Carlisle, e K. Simonen, «PART II: Measuring embodied carbon», Acedido: 6 de Janeiro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.aia.org/resources/6445061-aia-clf-embodied-carbon-toolkit-for-archit>
- [44] P. J. M. Monteiro, S. A. Miller, e A. Horvath, «Towards sustainable concrete», *Nature Materials* 2017 16:7, vol. 16, n. 7, pp. 698–699, Jun. 2017, doi: 10.1038/nmat4930.
- [45] L. D. Ellis, A. F. Badel, M. L. Chiang, R. J. Y. Park, e Y. M. Chiang, «Toward electrochemical synthesis of cement—An electrolyzer-based process for decarbonating CaCO₃ while producing useful gas streams», *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 117, n. 23, pp. 12584–12591, Jun. 2020, doi: 10.1073/PNAS.1821673116/SUPPL_FILE/PNAS.1821673116.SM02.MOV.
- [46] S. Chen, Y. Teng, Y. Zhang, C. K. Y. Leung, e W. Pan, «Reducing embodied carbon in concrete materials: A state-of-the-art review», *Resour Conserv Recycl*, vol. 188, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2022.106653.
- [47] J. S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, e E. M. Gartner, «Sustainable development and climate change initiatives», *Cem Concr Res*, vol. 38, n. 2, pp. 115–127, Fev. 2008, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2007.09.008.
- [48] K. H. Yang, E. A. Seo, e S. H. Tae, «Carbonation and CO₂ uptake of concrete», *Environ Impact Assess Rev*, vol. 46, pp. 43–52, Abr. 2014, doi: 10.1016/J.EIAR.2014.01.004.
- [49] S. Chen, Y. Teng, Y. Zhang, C. K. Y. Leung, e W. Pan, «Reducing embodied carbon in concrete materials: A state-of-the-art review», *Resour Conserv Recycl*, vol. 188, p. 106653, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2022.106653.
- [50] M. Hossain, «Mapping the frugal innovation phenomenon», *Technol Soc*, vol. 51, pp. 199–208, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.TECHSOC.2017.09.006.
- [51] D. J. M. Flower e J. G. Sanjayan, «Green house gas emissions due to concrete manufacture», *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 12, n. 5, pp. 282–288, Mai. 2007, doi: 10.1065/LCA2007.05.327/METRICS.
- [52] K. Lawania, P. Sarker, e W. Biswas, «Global Warming Implications of the Use of By-Products and Recycled Materials in Western Australia’s Housing Sector», *Materials* 2015, Vol. 8, Pages 6909-6925, vol. 8, n. 10, pp. 6909–6925, Out. 2015, doi: 10.3390/MA8105347.
- [53] M. W. Tait e W. M. Cheung, «A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of three concrete mix designs», *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, n. 6, pp. 847–860, Jun. 2016, doi: 10.1007/S11367-016-1045-5/TABLES/4.
- [54] J. Vargas e A. Halog, «Effective carbon emission reductions from using upgraded fly ash in the cement industry», *J Clean Prod*, vol. 103, pp. 948–959, Set. 2015, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2015.04.136.
- [55] H. Zhao, W. Sun, X. Wu, e B. Gao, «Sustainable self-compacting concrete containing high-amount industrial by-product fly ash as supplementary cementitious materials», *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, n. 3, pp. 3616–3628, Jan. 2022, doi: 10.1007/S11356-021-15883-2/FIGURES/12.
- [56] E. Crossin, «The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute», *J Clean Prod*, vol. 95, pp. 101–108, Mai. 2015, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2015.02.082.
- [57] B. C. McLellan, R. P. Williams, J. Lay, A. van Riessen, e G. D. Corder, «Costs and carbon emissions for geopolymers in comparison to ordinary portland cement», *J Clean Prod*, vol. 19, n. 9–10, pp. 1080–1090, Jun. 2011, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2011.02.010.
- [58] R. Abbas, M. A. Khereby, H. Y. Ghorab, e N. Elkhoshkhany, «Preparation of geopolymer concrete using Egyptian kaolin clay and the study of its environmental effects and economic cost», *Clean Technol Environ Policy*, vol. 22, n. 3, pp. 669–687, Abr. 2020, doi: 10.1007/S10098-020-01811-4/FIGURES/13.
- [59] E. Batuecas, I. Ramón-Álvarez, S. Sánchez-Delgado, e M. Torres-Carrasco, «Carbon footprint and water use of alkali-activated and hybrid cement mortars», *J Clean Prod*, vol. 319, p. 128653, Out. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.128653.

- [60] A. M. Braga, J. D. Silvestre, e J. de Brito, «Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates», *J Clean Prod*, vol. 162, pp. 529–543, Set. 2017, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.06.057.
- [61] S. W. Choi, B. K. Oh, J. S. Park, e H. S. Park, «Sustainable design model to reduce environmental impact of building construction with composite structures», *J Clean Prod*, vol. 137, pp. 823–832, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2016.07.174.
- [62] Y. Dong, «Performance assessment and design of ultra-high performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts», *Constr Build Mater*, vol. 167, pp. 414–425, Abr. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.02.037.
- [63] E. Gartner, «Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements», *Cem Concr Res*, vol. 34, n. 9, pp. 1489–1498, Set. 2004, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2004.01.021.
- [64] G. Habert e N. Roussel, «Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives», *Cem Concr Compos*, vol. 31, n. 6, pp. 397–402, Jul. 2009, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2009.04.001.
- [65] E. Benhelal, G. Zahedi, E. Shamsaei, e A. Bahadori, «Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry», *J Clean Prod*, vol. 51, pp. 142–161, Jul. 2013, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2012.10.049.
- [66] N. Karali, T. Xu, e J. Sathaye, «Reducing energy consumption and CO₂ emissions by energy efficiency measures and international trading: A bottom-up modeling for the U.S. iron and steel sector», *Appl Energy*, vol. 120, pp. 133–146, Mai. 2014, doi: 10.1016/J.APENERGY.2014.01.055.
- [67] «Sustainability - SteelConstruction.info». Acedido: 12 de Dezembro de 2022. [Online]. Disponível em: https://steelconstruction.info/Sustainability#Recycling_and_reuse
- [68] «By-products, scrap and the circular economy | ArcelorMittal». Acedido: 12 de Dezembro de 2022. [Online]. Disponível em: <https://corporate.arcelormittal.com/sustainability/by-products-scrap-and-the-circular-economy>
- [69] R. An, B. Yu, R. Li, e Y. M. Wei, «Potential of energy savings and CO₂ emission reduction in China’s iron and steel industry», *Appl Energy*, vol. 226, pp. 862–880, Set. 2018, doi: 10.1016/J.APENERGY.2018.06.044.
- [70] X. Wang, B. Yu, R. An, F. Sun, e S. Xu, «An integrated analysis of China’s iron and steel industry towards carbon neutrality», *Appl Energy*, vol. 322, Set. 2022, doi: 10.1016/J.APENERGY.2022.119453.
- [71] S. A. Ates, «Energy efficiency and CO₂ mitigation potential of the Turkish iron and steel industry using the LEAP (long-range energy alternatives planning) system», *Energy*, vol. 90, pp. 417–428, Out. 2015, doi: 10.1016/J.ENERGY.2015.07.059.
- [72] K. Wang, C. Wang, X. Lu, e J. Chen, «Scenario analysis on CO₂ emissions reduction potential in China’s iron and steel industry», *Energy Policy*, vol. 35, n. 4, pp. 2320–2335, Abr. 2007, doi: 10.1016/J.ENPOL.2006.08.007.
- [73] M. Dutta e S. Mukherjee, «An outlook into energy consumption in large scale industries in India: The cases of steel, aluminium and cement», *Energy Policy*, vol. 38, n. 11, pp. 7286–7298, Nov. 2010, doi: 10.1016/J.ENPOL.2010.07.056.
- [74] D. Ma, W. Chen, X. Yin, e L. Wang, «Quantifying the co-benefits of decarbonisation in China’s steel sector: An integrated assessment approach», *Appl Energy*, vol. 162, pp. 1225–1237, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.APENERGY.2015.08.005.
- [75] Y. Chen, Y. Fang, W. Feng, Y. Zhang, e G. X. Zhao, «How to minimise the carbon emission of steel building products from a cradle-to-site perspective: A systematic review of recent global research», *J Clean Prod*, vol. 368, Set. 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.133156.
- [76] B. Sizirici, Y. Fseha, C. S. Cho, I. Yildiz, e Y. J. Byon, «A Review of Carbon Footprint Reduction in Construction Industry, from Design to Operation», *Materials*, vol. 14, n. 20, Out. 2021, doi: 10.3390/MA14206094.

- [77] C. Feng, T. Lin, R. Zhu, G. Wei, e K. Dong, «Key technologies for CO₂ capture and recycling after combustion: CO₂ enrichment in oxygen enriched combustion of converter gas», *J Clean Prod*, vol. 380, p. 135128, Dez. 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.135128.
- [78] G. Wei, R. Zhu, X. Wu, K. Dong, L. Yang, e R. Liu, «Technological Innovations of Carbon Dioxide Injection in EAF-LF Steelmaking», *JOM*, vol. 70, n. 6, pp. 969–976, Jun. 2018, doi: 10.1007/S11837-018-2814-3/FIGURES/7.
- [79] S. Valluri, V. Claremboux, e S. Kawatra, «Opportunities and challenges in CO₂ utilization», *Journal of Environmental Sciences*, vol. 113, pp. 322–344, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.JES.2021.05.043.
- [80] F. Morris, S. Allen, e W. Hawkins, «On the embodied carbon of structural timber versus steel, and the influence of LCA methodology», *Build Environ*, vol. 206, Dez. 2021, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2021.108285.
- [81] Z. Duan, Q. Huang, e Q. Zhang, «Life cycle assessment of mass timber construction: A review», *Build Environ*, vol. 221, Ago. 2022, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2022.109320.
- [82] A. Younis e A. Doodoo, «Cross-laminated timber for building construction: A life-cycle-assessment overview», *Journal of Building Engineering*, vol. 52, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.JOBE.2022.104482.
- [83] A. H. Buchanan e S. B. Levine, «Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions», *Environ Sci Policy*, vol. 2, n. 6, pp. 427–437, Dez. 1999, doi: 10.1016/S1462-9011(99)00038-6.
- [84] J. Nässén, F. Hedenus, S. Karlsson, e J. Holmberg, «Concrete vs. wood in buildings – An energy system approach», *Build Environ*, vol. 51, pp. 361–369, Mai. 2012, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2011.11.011.
- [85] E. Ching e J. v. Carstensen, «Truss topology optimization of timber–steel structures for reduced embodied carbon design», *Eng Struct*, vol. 252, p. 113540, Fev. 2022, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.113540.
- [86] F. Morris, S. Allen, e W. Hawkins, «On the embodied carbon of structural timber versus steel, and the influence of LCA methodology», *Build Environ*, vol. 206, Dez. 2021, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2021.108285.
- [87] W. Hawkins, «Timber and carbon sequestration», *The Structure Engegieer*, vol. 99, n. 1, pp. 18–20, Jan. 2021.
- [88] B. Sizerici, Y. Fseha, C. S. Cho, I. Yildiz, e Y. J. Byon, «A Review of Carbon Footprint Reduction in Construction Industry, from Design to Operation», *Materials*, vol. 14, n. 20, Out. 2021, doi: 10.3390/MA14206094.
- [89] B. v. Venkatarama Reddy, «Sustainable materials for low carbon buildings», *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 4, n. 3, pp. 175–181, Set. 2009, doi: 10.1093/IJLCT/CTP025.
- [90] S. P. Raut, U. S. Patil, e M. v. Madurwar, «Utilization of phosphogypsum and rice husk to develop sustainable bricks», *Mater Today Proc*, vol. 60, pp. 595–601, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.02.122.
- [91] Y. Xin, D. Robert, A. Mohajerani, P. Tran, e B. K. Pramanik, «Transformation of waste-contaminated glass dust in sustainable fired clay bricks», *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, p. e01717, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.CSCM.2022.E01717.
- [92] S. Seo, J. Kim, K. K. Yum, e J. McGregor, «Embodied carbon of building products during their supply chains: Case study of aluminium window in Australia», *Resour Conserv Recycl*, vol. 105, pp. 160–166, Dez. 2015, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2015.10.024.
- [93] F. Orsini e P. Marrone, «Approaches for a low-carbon production of building materials: A review», *J Clean Prod*, vol. 241, p. 118380, Dez. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.118380.
- [94] K. Adalberth, «Energy use during the life cycle of buildings: A method», *Build Environ*, vol. 32, n. 4, pp. 317–320, 1997, doi: 10.1016/S0360-1323(96)00068-6.

- [95] K. Adalberth, «Energy use during the life cycle of single-unit dwellings: Examples», *Build Environ*, vol. 32, n. 4, pp. 321–329, 1997, doi: 10.1016/S0360-1323(96)00069-8.
- [96] B. N. Winther e A. G. Hestnes, «Solar versus green: The analysis of a Norwegian row house», *Solar Energy*, vol. 66, n. 6, pp. 387–393, Set. 1999, doi: 10.1016/S0038-092X(99)00037-7.
- [97] S. Citherlet e T. Defaux, «Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span», *Build Environ*, vol. 42, n. 2, pp. 591–598, Fev. 2007, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2005.09.025.
- [98] H. W. Kua e C. L. Wong, «Analysing the life cycle greenhouse gas emission and energy consumption of a multi-storied commercial building in Singapore from an extended system boundary perspective», *Energy Build*, vol. 51, pp. 6–14, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.03.027.
- [99] J. Bastos, S. A. Batterman, e F. Freire, «Life-cycle energy and greenhouse gas analysis of three building types in a residential area in Lisbon», *Energy Build*, vol. 69, pp. 344–353, Fev. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.11.010.
- [100] A. Feehan, H. Nagpal, A. Marvuglia, e J. Gallagher, «Adopting an integrated building energy simulation and life cycle assessment framework for the optimisation of facades and fenestration in building envelopes», *Journal of Building Engineering*, vol. 43, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.103138.
- [101] Y. Song, H. Zhang, e N. Mithraratne, «Research on influences of wall design on embodied and operating energy consumption: A case study of temporary building in China», *Energy Build*, vol. 278, p. 112628, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112628.
- [102] S. Citherlet e T. Defaux, «Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span», *Build Environ*, vol. 42, n. 2, pp. 591–598, Fev. 2007, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2005.09.025.
- [103] H. Monteiro e F. Freire, «Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods», *Energy Build*, vol. 47, pp. 572–583, Abr. 2012, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2011.12.032.
- [104] J. Bastos, S. A. Batterman, e F. Freire, «Life-cycle energy and greenhouse gas analysis of three building types in a residential area in Lisbon», *Energy Build*, vol. 69, pp. 344–353, Fev. 2014, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2013.11.010.
- [105] T. S. Adebayo, · Seun, D. Oladipupo, I. Adeshola, e H. Rjoub, «Wavelet analysis of impact of renewable energy consumption and technological innovation on CO 2 emissions: evidence from Portugal», *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 1, p. 3, 2022, doi: 10.1007/s11356-021-17708-8.
- [106] «Portugal - Countries & Regions - IEA». Acedido: 28 de Novembro de 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.iea.org/countries/portugal>
- [107] A. Atmaca e N. Atmaca, «Carbon footprint assessment of residential buildings, a review and a case study in Turkey», *J Clean Prod*, vol. 340, p. 130691, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.130691.
- [108] Peter Laidler, «Measuring carbon - a small practice perspective», *The Structural Engineer*, vol. 99, n. 9, pp. 16–18, Set. 2021.
- [109] S. Tae, C. Baek, e S. Shin, «Life cycle CO2 evaluation on reinforced concrete structures with high-strength concrete», *Environ Impact Assess Rev*, vol. 31, n. 3, pp. 253–260, Abr. 2011, doi: 10.1016/J.EIAR.2010.07.002.
- [110] V. M. Taborianski e R. T. A. Prado, «Methodology of CO2 emission evaluation in the life cycle of office building façades», *Environ Impact Assess Rev*, vol. 33, n. 1, pp. 41–47, Fev. 2012, doi: 10.1016/J.EIAR.2011.10.004.
- [111] C. Archer-Jones e D. Green, «Carbon targets for bridges: a proposed SCORS-style rating scheme», 2021, Acedido: 5 de Novembro de 2022. [Online]. Disponível em: [https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-99-\(2021\)/issue-10/carbon-targets-for-bridges-proposed-rating-scheme/](https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-99-(2021)/issue-10/carbon-targets-for-bridges-proposed-rating-scheme/)

- [112] A. Papakosta e S. Sturgis, «Whole life carbon assessment for the built environment», 2017. Acedido: 10 de Fevereiro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.rics.org/profession-standards/rics-standards-and-guidance/sector-standards/construction-standards>
- [113] C. De Wolf, M. Cordella, N. Dodd, B. Byers, e S. Donatello, «Whole life cycle environmental impact assessment of buildings: Developing software tool and database support for the EU framework Level(s)», *Resour Conserv Recycl*, vol. 188, p. 106642, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2022.106642.
- [114] N. Dodd e S. Donatello, «Níveis-Quadro comum da União Europeia para os indicadores principais de sustentabilidade dos edifícios de escritórios e residenciais». Acedido: 21 de Abril de 2023. [Online]. Disponível em: <https://ec.europa.eu/jrc>
- [115] «Level(s)». Acedido: 6 de Setembro de 2023. [Online]. Disponível em: https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/levels_en
- [116] «Carbon Alignment | LETI». Acedido: 6 de Setembro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.leti.uk/carbonalignment>
- [117] «2030 Climate Challenge». Acedido: 6 de Setembro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.architecture.com/about/policy/climate-action/2030-climate-challenge#>
- [118] M. Röck *et al.*, «Towards embodied carbon benchmarks for buildings in Europe - #2 Setting the baseline: A bottom-up approach.», Ramboll, 2022.
- [119] K. Simonen, B. Rodriguez, e C. De Wolf, «Benchmarking the Embodied Carbon of Buildings», *Technology|Architecture + Design*, vol. 1, Set. 2017, doi: 10.1080/24751448.2017.1354623.
- [120] «Setting carbon targets: an introduction to the proposed SCORS rating scheme», Acedido: 6 de Setembro de 2023. [Online]. Disponível em: www.istructe.org/resources/
- [121] One Click LCA, «EMBODIED CARBON BENCHMARKS FOR EUROPEAN BUILDINGS», 2021.
- [122] «How to address the challenges of embodied carbon in 2023? - Deepki». Acedido: 6 de Setembro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.deepki.com/blog/challenges-embodied-carbon/>
- [123] One Click LCA, «CONSTRUCTION CARBON REGULATIONS IN EUROPE REVIEW & BEST PRACTISES OCTOBER 2022 One Click LCA Made possible with support from: EXECUTIVE SUMMARY», 2022.
- [124] «International drivers of low carbon structural design - The Institution of Structural Engineers». Acedido: 6 de Setembro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.istructe.org/resources/guidance/international-drivers-of-low-carbon-structural-des/>
- [125] «How Denmark leads the way in decarbonising construction - Buro Happold». Acedido: 6 de Setembro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.burohappold.com/news/how-denmark-leads-the-way-in-decarbonising-the-construction-industry/>
- [126] «Success Story - Reducing embodied carbon in construction materials: RE2020 in France». Acedido: 6 de Setembro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/re2020-in-france/>
- [127] «Lag (2021:787) om klimatdeklaration för byggnader | Sveriges riksdag». Acedido: 6 de Setembro de 2023. [Online]. Disponível em: https://www.riksdagen.se/sv/dokument-och-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/lag-2021787-om-klimatdeklaration-for-byggnader_sfs-2021-787/
- [128] «Fit for 55: making buildings in the EU greener - Consilium». Acedido: 6 de Setembro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-making-buildings-in-the-eu-greener/>
- [129] «Reducing carbon emissions: EU targets and policies | News | European Parliament». Acedido: 6 de Setembro de 2023. [Online]. Disponível em: https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20180305STO99003/reducing-carbon-emissions-eu-targets-and-policies?&at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=RSA&at_goal=TR_G&a

- t_audience=europe%20carbon%20emission&at_topic=Carbon_Emission&at_location=PT&gclid=CjwKCAjwx_eiBhBGEiwA15gLN8Tdu41H8wVVegN9qN_l0c__bSdc0SOan6ZCQmJINqU6jrRaI7_18hoCVEEQAvD_BwE
- [130] CEN European Committee for Standardization, «Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method», EN 15879:2011, 17 de Novembro de 2011, Acedido: 18 de maio de 2023. Disponível em: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/62c22cef-5666-4719-91f9-c21cb6aa0ab3/en-15978-2011>
- [131] RICS, *Whole-life carbon assessments-2nd edition Contents*. Acedido: 14 de Agosto de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.rics.org/>
- [132] BRE Global, «BRE Global Methodology For The Environmental Assessment Of Buildings Using», 2018, Acedido: 11 de Novembro de 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.greenbooklive.com/>
- [133] O P Gibbons e O P. Orr, J J «How to calculate embodied carbon.», The Institution of Structural Engineers, 2020.
- [134] D. Maierhofer, M. Röck, M. Ruschi Mendes Saade, E. Hoxha, e A. Passer, «Critical life cycle assessment of the innovative passive nZEB building concept 'be 2226' in view of net-zero carbon targets», *Build Environ*, vol. 223, p. 109476, Set. 2022, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2022.109476.
- [135] P. Carneiro, «GESTÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NA ÁREA METROPOLITANA DO PORTO». Acedido: 10 de Agosto de 2023. [Online]. Disponível em: <http://www.fe.up.pt>
- [136] «LisbonWood». Acedido: 11 de Setembro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.lisbonwood.pt/>
- [137] «Fibras Metálicas | Produtos e soluções | Diprotec». Acedido: 11 de Setembro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.diprotec.com.br/produto/aditivos-e-complementares-fibras-metalicas/>
- [138] M. Pathak e R. Slade, «WG III contribution to the Sixth Assessment Report», Dez. 2021. Acedido: 1 de Setembro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>

APÊNDICE A

Template do relatório para exposição da avaliação do ciclo de vida para projetos da empresa SE2P.



Resultados da avaliação do ciclo de vida do projeto de acordo com a norma EN 15978

[Imagem]

Nome do projeto

Morada:

Cliente:

Data:

Avaliação do Ciclo de Vida





Índice

1. Propósito do estudo e descrição do projeto	5
2. Resultados resumidos da avaliação do ciclo de vida.....	6
3. Módulos incluídos do estudo avaliação do ciclo de vida	7
4. Elementos analisados.....	8
5. Fontes de dados e suposições do projeto	9
6. Resultados detalhados	10

Avaliação do Ciclo de Vida





1. Propósito do estudo e descrição do projeto

Informações básicas da avaliação:

Objetivo do estudo: [objetivo do estudo ACV, por exemplo, cálculo de emissões climáticas, certificação...]

Tipo de projeto: [nova construção ou renovação, ponto de avaliação do ciclo de vida do projeto (em projeto, em construção, já construído...)]

Método de avaliação: Segundo a norma EN 15978:2011

Ferramenta de cálculo utilizada: *One Click LCA*

Verificado por: Empresa SE2P

Informações gerais do projeto:

Tipo de edifício: [ex. escritório, edifício residencial]

Ano de construção:

Área de construção: [também deve ser referida a unidade de medida dependendo da finalidade do estudo de ACV, por ex. NFA, GIA ou outro]

Tipo de estrutura: [estrutura metálica, estrutura mista...]

Função(ões) e serviço(s) do edifício: [Descrição do uso/funções do edifício, incluindo áreas de diferentes funções]

Extensão de uso: [número de ocupantes, padrão de uso/ocupação]

Requisitos técnicos e funcionais relevantes: [Uso do edifício e informações técnicas]

Propriedades técnicas, funcionais e qualitativas do projeto tais como:

- forma de construção, por ex. arranha-céus, edifícios baixos, independentes ou separados, número de andares;
- tipo de serviço, por ex. tipo de sistema de aquecimento, refrigeração, ventilação e água quente;
- condições de utilização (de acordo com o método nacional de cálculo do desempenho energético);
- outros requisitos relevantes do cliente ou da certificação]

Vida útil exigida: [Vida útil do projeto exigida pelo cliente; para ACV este é também o período de estudo/período de cálculo de referência para a análise; segundo Level(s) o período de estudo deve ser 50 anos]



2. Resultados resumidos da avaliação do ciclo de vida

Os resultados obtidos no estudo para os vários tipos de indicadores são apresentados na Tabela 1. De modo a contextualizar, a descrição dos indicadores analisados no estudo é apresentada na Tabela 2.

Tabela 1 - Resultados do estudo.

Categoria de impacto	Unidade	Resultados (Total)
Potencial de aquecimento global (gases de efeito estufa)	kgCO ₂ e	
Carbono sequestrado	kgCO ₂ e	
Potencial de acidificação	kgSO ₂ e	
Potencial de eutrofização	kgPO ₄ e	
Potencial de destruição da camada de ozono	kgCFC ₁₁ e	
Formação de ozono na baixa atmosfera	kgC ₂ H ₄ e	
Energia primária	MJ	

Tabela 2 - Descrição dos indicadores analisados no estudo ACV.

Categoria de impacto	Unidade	Descrição
Potencial de aquecimento global (gases de efeito estufa)	kgCO ₂ e	Descreve mudanças nas temperaturas superficiais locais, regionais ou globais causadas por um aumento na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. As emissões de gases com efeito de estufa provenientes da queima de combustíveis fósseis têm sido fortemente correlacionadas com duas outras categorias de impacto: acidificação e poluição atmosférica. Muitas vezes chamada de “pegada de carbono”.
Carbono sequestrado	kgCO ₂ e	Carbono absorvido por árvores através do processo da fotossíntese e que é armazenado em materiais de construção orgânicos, nomeadamente a madeira.
Potencial de acidificação	kgSO ₂ e	Descreve o efeito acidificante de substâncias no ambiente. Substâncias como o dióxido de carbono dissolvem-se facilmente na água, aumentando a acidez, o que contribui para fenómenos globais como a acidificação dos oceanos.
Potencial de eutrofização	kgPO ₄ e	Descreve o efeito da adição de nutrientes minerais ao solo ou à água, o que faz com que certas espécies dominem um ecossistema, comprometendo a sobrevivência de outras espécies e, por vezes, resultando na extinção de populações.



Potencial de destruição da camada de ozono	kgCFC _{11e}	Descreve o efeito de substâncias na atmosfera na degradação da camada de ozono, que absorve e evita que os raios ultravioleta solares nocivos atinjam a superfície da Terra.
Formação de ozono na baixa atmosfera	kgC ₂ H _{4e}	Descreve o efeito de substâncias na atmosfera que criam a poluição fotoquímica. Também conhecida como o <i>summer smog</i> .

3. Módulos incluídos do estudo avaliação do ciclo de vida

Os módulos do ciclo de vida que são incluídos no estudo são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Módulos incluídos nos estudo avaliação do ciclo de vida.

Etapa do produto			Etapa de construção		Etapa de uso							Etapa de fim de vida				Benefícios para além do ciclo
Matéria-prima	Transporte	Manufatura	Transporte para a obra	Processo de construção	Uso	Manutenção	Reparação	Substituição	Renovação	Energia operacional	Uso de água	Demolição	Transporte de resíduos	Tratamento de resíduos	Aterro dos resíduos	Reutilizar, recuperar e reciclar
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

As descrições das etapas do ciclo de vida são apresentadas na Tabela 4:

Tabela 4 - Descrição das etapas do ciclo de vida.

A1-A3	A obtenção das matérias-primas (A1) inclui as emissões produzidas quando as matérias-primas são extraídas da natureza e transportadas para unidades industriais para o devido processamento. Perdas de matéria-prima e energia são também levadas em consideração. Os impactos dos transportes (A2) incluem as emissões resultantes do transporte de todas as matérias-primas dos fornecedores para a unidade de produção do fabricante, bem como os impactos da produção de combustíveis. Os impactos na produção (A3) abrangem o fabrico dos materiais de produção, consumo de energia, combustíveis utilizados pelas máquinas e o tratamento dos resíduos formados nos processos de produção.
--------------	--



A4	A4 inclui as emissões resultantes do transporte de materiais de construção desde a unidade de produção do fabricante até ao local de construção, bem como os impactos ambientais da produção do combustível usado.
A5	A5 abrange as emissões resultantes da utilização de energia durante as operações no local da obra, os impactos ambientais dos processos de produção de combustível, energia e água consumida, bem como o tratamento de resíduos.
B1-B5	Os impactos ambientais da manutenção e substituição de materiais (B1-B5) incluem os impactos ambientais decorrentes da substituição de produtos de construção após atingirem o fim da sua vida útil. As emissões cobrem os impactos da obtenção de matéria-prima, transporte e produção do novo material de substituição, os impactos da fabricação do material de substituição e o tratamento de resíduos do material substituído.
B6	Os impactos considerados no consumo de energia da fase de utilização (B6) incluem todas as emissões decorrentes do consumo de energia operacional utilizada no edifício ao longo do ciclo de vida do projeto.
B7	Os impactos considerados do consumo de água na fase de uso (B7) incluem os impactos ambientais dos processos de abastecimento de água doce e do tratamento de águas residuais ao longo do ciclo de vida do projeto.
C1-C4	Os impactos da demolição (C1) incluem emissões resultantes do uso de máquinas e energia consumida. O tratamento de resíduos para reciclagem (C3) ou os impactos do pré-processamento para aterros dos resíduos (C4) são também considerados. Além disso, o impacto do transporte dos resíduos também é considerado.
D	Os benefícios externos incluem benefícios de emissões resultantes da reciclagem de resíduos de construção. Os benefícios para tipos de materiais reutilizados ou reciclados incluem o impacto positivo da substituição de materiais virgens por materiais reciclados e os benefícios para materiais que podem ser recuperados para recuperação de energia.

4. Elementos analisados

Os elementos do projeto que são incluídos no estudo são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Elementos incluídos no estudo ACV.

Elemento	Incluído	Comentários
Subestrutura		
Fundações	Sim/Não	
Paredes da cave	Sim/Não	
Superestrutura		
Estrutura	Sim/Não	
Andares superiores	Sim/Não	



Telhado	Sim/Não
Escadas	Sim/Não
Paredes externas	Sim/Não
Paredes interna estruturais	Sim/Não
Janelas e portas Externas	Sim/Não
Paredes internas e divisórias	Sim/Não
Portas internas	Sim/Não
Acabamentos internos	
Acabamentos nas paredes	Sim/Não
Acabamentos nas portas	Sim/Não
Acabamentos nos tetos	Sim/Não
Serviços	
Acessórios sanitários	Sim/Não
Equipamentos de Serviços	Sim/Não
Instalações de saneamento	Sim/Não
Instalações de água	Sim/Não
Fonte de calor	Sim/Não
Aquecimento e tratamento de ar	Sim/Não
Sistemas de ventilação	Sim/Não
Instalações elétricas	Sim/Não
Instalações de gás	Sim/Não
Instalações de elevadores	Sim/Não
Instalações de comunicação	Sim/Não
Instalações especializadas	Sim/Não
Trabalhos externos	
Obras no local	Sim/Não
Drenagem	Sim/Não
Serviços externos	Sim/Não

5. Fontes de dados e suposições do projeto

Todas as fontes de dados, bem como as suposições utilizadas no estudo são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Descrição das fontes de dados utilizadas.

Módulo	Base de dados
A1-A3	[Devem descritas as fontes de dados utilizadas para os materiais, obtenção das quantidades dos materiais, etc.]



A4	[Descrever se foram utilizadas distâncias de transporte específicas do projeto ou suposições de distâncias.]
A5	[Definir se foram utilizados dados específicos do projeto ou cenários médios. Por exemplo: A ferramenta de cálculo das emissões médias do processo de construção com base no tamanho do projeto foi utilizada na análise.]
B1-B5	[Descrever como as vidas úteis dos materiais foram estimadas. Por exemplo: As informações de vida útil de cada material foram verificadas. Caso contrário, foram usados valores padrão do banco de dados <i>One Click LCA</i> .]
B6	[Definir a fonte utilizada, por exemplo. modelação energética, certificado energético, etc. Por exemplo: O consumo de energia foi estimado com base na simulação energética da fase de conceção com cenários de utilização específicos do projeto].
B7	[Definir a fonte utilizada. Por exemplo: O consumo de água foi estimado com base no consumo típico de água para edifícios de escritórios].
C1-C4	[Descrever se foram utilizados dados específicos do projeto ou cenários médios.]

Outras suposições (se relevante):

6. Resultados detalhados

Os resultados detalhados para cada módulo do ciclo de vida do projeto são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados detalhados do estudo.

Módulo Analisado	Aquecimento Global kg CO ₂ e	Carbono sequestrado kg CO ₂ e	Eutrofização kgPO ₄ e	Destruição da camada de ozono kgCFC ₁₁ e	Formação de ozono na atmosfera baixa kgC ₂ H ₄ e	Acidificação kgSO ₂ e
(A1-A3)	1,97X10 ⁶	7,27×10 ⁵	6,22×10 ⁵	5,75×10 ⁵	5,75×10 ⁵	7,27×10 ⁵
(A4)	3,68×10 ⁴	0	9,04×10 ⁴	7,87×10 ⁴	7,87×10 ⁴	3,68×10 ⁴
(A5)	1,23×10 ⁵	0	6,95×10 ⁴	6,75×10 ⁴	6,77×10 ⁴	7,28×10 ⁴
(B1)	0	0	0	0	0	0
(B2)	0	0	0	0	0	0
(B3)	0	0	0	0	0	0
(B4)	0	0	0	0	0	0
(B5)	0	0	0	0	0	0
(C1)	1,62×10 ⁴	0	1,62×10 ⁴	1,62×10 ⁴	1,62×10 ⁴	1,62×10 ⁴

Avaliação do Ciclo de Vida



(C2)	$2,33 \times 10^4$	0	$2,78 \times 10^4$	$2,75 \times 10^4$	$2,75 \times 10^4$	$2,33 \times 10^4$
(C3)	$1,53 \times 10^3$	0	$2,57 \times 10^3$	$2,57 \times 10^3$	$1,82 \times 10^3$	$2,82 \times 10^3$
(C4)	0	0	0	0	$5,91 \times 10^3$	0
(D)	$-1,22 \times 10^6$	0	$-1,93 \times 10^5$	$-1,93 \times 10^5$	$-1,78 \times 10^5$	$-3,07 \times 10^5$
Total (D) não incluído	$2,17 \times 10^6$	$8,85 \times 10^5$	$8,28 \times 10^5$	$7,67 \times 10^5$	$7,73 \times 10^5$	$8,85 \times 10^5$

Avaliação do Ciclo de Vida



APÊNDICE B

Exemplo de um relatório da avaliação do ciclo de vida para o caso de estudo 2 (Pavilhão industrial).

**Resultados da avaliação do ciclo de vida do projeto de acordo com a
norma EN 15978**



Pavilhão Industrial

Morada: Vila do conde

Cliente: SE2P

Data: 20 de agosto de 2023

Avaliação do Ciclo de Vida





Índice

1. Propósito do estudo e descrição do projeto	5
2. Resultados resumidos da avaliação do ciclo de vida.....	6
3. Módulos incluídos do estudo avaliação do ciclo de vida	7
4. Elementos analisados.....	8
5. Fontes de dados e suposições do projeto	9
6. Resultados detalhados	10
7. Classificação do projeto.....	12
8. Proposta de redução das emissões de carbono equivalente	13
8.1 Resultados detalhados	13
8.2 Classificação do novo projeto	15

Avaliação do Ciclo de Vida





1. Propósito do estudo e descrição do projeto

Informações básicas da avaliação:

Objetivo do estudo: Quantificação das emissões de carbono com vista na redução.

Tipo de projeto: Avaliação de uma nova construção ainda em fase do projeto.

Método de avaliação: Segundo a norma EN 15978:2011.

Ferramenta de cálculo utilizada: *One Click LCA*.

Verificado por: Empresa SE2P.

Informações gerais do projeto:

Tipo de edifício: Edifício industrial

Ano de construção: 2024

Tipo de estrutura: Subestrutura em betão e superestrutura metálica

Área de construção: 3000 m² GIA

Função(ões) e serviço(s) do edifício: Sem dados

Extensão de uso: Sem dados

Requisitos técnicos e funcionais relevantes: Sem dados

Propriedades técnicas, funcionais e qualitativas do projeto: Sem dados

Vida útil exigida: 50 anos (Baseado na certificação Level(s))



2. Resultados resumidos da avaliação do ciclo de vida

Os resultados obtidos no estudo para os vários tipos de indicadores são apresentados na Tabela 1. De modo a contextualizar, a descrição dos indicadores analisados no estudo é apresentada na Tabela 2.

Tabela 1 - Resultados do estudo.

Categoria de impacto	Unidade	Resultados (Total)
Potencial de aquecimento global (gases de efeito estufa)	kgCO ₂ e	2,17×10 ⁶
Carbono sequestrado	kgCO ₂ e	0
Potencial de acidificação	kgSO ₂ e	8,04×10 ³
Potencial de eutrofização	kgPO ₄ e	1,31×10 ³
Potencial de destruição da camada de ozono	kgCFC ₁₁ e	1,23×10 ⁻¹
Formação de ozono na baixa atmosfera	kgC ₂ H ₄ e	1,03×10 ³

Tabela 2 - Descrição dos indicadores analisados no estudo ACV.

Categoria de impacto	Unidade	Descrição
Potencial de aquecimento global (gases de efeito estufa)	kgCO ₂ e	Descreve mudanças nas temperaturas superficiais locais, regionais ou globais causadas por um aumento na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. As emissões de gases com efeito de estufa provenientes da queima de combustíveis fósseis têm sido fortemente correlacionadas com duas outras categorias de impacto: acidificação e poluição atmosférica. Muitas vezes chamada de “pegada de carbono”.
Carbono sequestrado	kgCO ₂ e	Carbono absorvido por árvores através do processo da fotossíntese e que é armazenado em materiais de construção orgânicos, nomeadamente a madeira.
Potencial de acidificação	kgSO ₂ e	Descreve o efeito acidificante de substâncias no ambiente. Substâncias como o dióxido de carbono dissolvem-se facilmente na água, aumentando a acidez, o que contribui para fenómenos globais como a acidificação dos oceanos.
Potencial de eutrofização	kgPO ₄ e	Descreve o efeito da adição de nutrientes minerais ao solo ou à água, o que faz com que certas espécies dominem um ecossistema, comprometendo a sobrevivência de outras espécies e, por vezes, resultando na extinção de populações.
Potencial de destruição da camada de ozono	kgCFC ₁₁ e	Descreve o efeito de substâncias na atmosfera na degradação da camada de ozono, que absorve e evita que os raios ultravioleta solares nocivos atinjam a superfície da Terra.
Formação de ozono na baixa atmosfera	kgC ₂ H ₄ e	Descreve o efeito de substâncias na atmosfera que criam a poluição fotoquímica. Também conhecida como o <i>summer smog</i> .



3. Módulos incluídos do estudo avaliação do ciclo de vida

Os módulos do ciclo de vida que são incluídos no estudo são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Módulos incluídos nos estudo avaliação do ciclo de vida.

Etapa do produto			Etapa de construção		Etapa de uso							Etapa de fim de vida			Benefícios para além do ciclo	
Matéria-prima	Transporte	Manufatura	Transporte para a obra	Processo de construção	Uso	Manutenção	Reparação	Substituição	Renovação	Energia operacional	Uso de água	Demolição	Transporte de resíduos	Tratamento de resíduos	Aterro dos resíduos	Reutilizar, recuperar e reciclar
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

As descrições das etapas do ciclo de vida são apresentadas na Tabela 4:

Tabela 4 - Descrição das etapas do ciclo de vida.

A1-A3	A obtenção das matérias-primas (A1) inclui as emissões produzidas quando as matérias-primas são extraídas da natureza e transportadas para unidades industriais para o devido processamento. Perdas de matéria-prima e energia são também levadas em consideração. Os impactos dos transportes (A2) incluem as emissões resultantes do transporte de todas as matérias-primas dos fornecedores para a unidade de produção do fabricante, bem como os impactos da produção de combustíveis. Os impactos na produção (A3) abrangem o fabrico dos materiais de produção, consumo de energia, combustíveis utilizados pelas máquinas e o tratamento dos resíduos formados nos processos de produção.
A4	A4 inclui as emissões resultantes do transporte de materiais de construção desde a unidade de produção do fabricante até ao local de construção, bem como os impactos ambientais da produção do combustível usado.
A5	A5 abrange as emissões resultantes da utilização de energia durante as operações no local da obra, os impactos ambientais dos processos de produção de combustível, energia e água consumida, bem como o tratamento de resíduos.



B1-B5	Os impactos ambientais da manutenção e substituição de materiais (B1-B5) incluem os impactos ambientais decorrentes da substituição de produtos de construção após atingirem o fim da sua vida útil. As emissões cobrem os impactos da obtenção de matéria-prima, transporte e produção do novo material de substituição, os impactos da fabricação do material de substituição e o tratamento de resíduos do material substituído.
B6	Os impactos considerados no consumo de energia da fase de utilização (B6) incluem todas as emissões decorrentes do consumo de energia operacional utilizada no edifício ao longo do ciclo de vida do projeto.
B7	Os impactos considerados do consumo de água na fase de uso (B7) incluem os impactos ambientais dos processos de abastecimento de água doce e do tratamento de águas residuais ao longo do ciclo de vida do projeto.
C1-C4	Os impactos da demolição (C1) incluem emissões resultantes do uso de máquinas e energia consumida. O tratamento de resíduos para reciclagem (C3) ou os impactos do pré-processamento para aterros dos resíduos (C4) são também considerados. Além disso, o impacto do transporte dos resíduos também é considerado.
D	Os benefícios externos incluem benefícios de emissões resultantes da reciclagem de resíduos de construção. Os benefícios para tipos de materiais reutilizados ou reciclados incluem o impacto positivo da substituição de materiais virgens por materiais reciclados e os benefícios para materiais que podem ser recuperados para recuperação de energia.

4. Elementos analisados

Os elementos do projeto que são incluídos no estudo são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Elementos incluídos no estudo ACV.

Elemento	Incluído	Comentários
Subestrutura		
Fundações	Sim	
Paredes da cave	Sim	
Superestrutura		
Estrutura	Sim	
Andares superiores	Sim	
Telhado	Sim	
Escadas	Sim	
Paredes externas	Sim	
Paredes internas estruturais	Sim	
Janelas e portas Externas	Não	
Paredes internas e divisórias	Não	



Portas internas	Não
Acabamentos internos	
Acabamentos nas paredes	Não
Acabamentos nas portas	Não
Acabamentos nos tetos	Não
Serviços	
Acessórios sanitários	Não
Equipamentos de Serviços	Não
Instalações de saneamento	Não
Instalações de água	Não
Fonte de calor	Não
Aquecimento e tratamento de ar	Não
Sistemas de ventilação	Não
Instalações elétricas	Não
Instalações de gás	Não
Instalações de elevadores	Não
Instalações de comunicação	Não
Instalações especializadas	Não
Trabalhos externos	
Obras no local	Não
Drenagem	Não
Serviços externos	Não

5. Fontes de dados e suposições do projeto

Todas as fontes de dados, bem como as suposições utilizadas no estudo são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Descrição das fontes de dados utilizadas.

Módulo	Base de dados
A1-A3	Neste módulo são selecionados materiais virgens, sem qualquer tipo de matéria reciclável. Os materiais selecionados são retirados da base de dados <i>One Click LCA</i> e são estritamente materiais genéricos para Portugal. As quantidades dos materiais são extraídas de um modelo BIM.
A4	Na distância de transporte foi considerada a distância padrão do software. O tipo de transporte utilizado para o betão e o aço foram respetivamente, camião betoneira (0,1300 kg CO ₂ e/ton·km) e camião reboque (0,0383 kg CO ₂ e/ton·km).
A5	No processo de construção é admitido o cenário de construção europeu presente no <i>software</i> de cálculo em função da área do pavilhão.



	Relativamente ao desperdício de materiais, são aplicadas as percentagens do <i>software</i> e contabilizados todas as emissões relacionadas com o seu tratamento de resíduos.
B1-B5	Módulos em que não se observa nenhum impacto nas emissões.
B6	Não incluído no estudo
B7	Não incluído no estudo
C1-C4	Para a previsão da emissão de carbono equivalente na demolição do pavilhão industrial foi utilizado o cenário de demolição de uma estrutura metálica do <i>software One Click LCA</i> . Para a distância do transporte dos resíduos dos materiais de construção foi considerada a distância média entre os dois centros de tratamento de resíduos mais próximos (situados em vila do conde), cerca de 30 km. O transporte é realizado por um camião basculante e um camião reboque para o aço. Para o tratamento de resíduos de construção (C3) são aplicados os valores apresentados no <i>software</i> .

6. Resultados detalhados

Os resultados detalhados para cada módulo do ciclo de vida do projeto são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados detalhados do estudo.

Módulo Analisado	Aquecimento Global kg CO ₂ e	Carbono sequestrado kg CO ₂ e	Eutrofização kgPO ₄ e	Destruição da camada de ozono kgCFC ₁₁ e	Formação de ozono na atmosfera baixa kgC ₂ H ₄ e	Acidificação kgSO ₂ e
(A1-A3)	1,97×10 ⁶	0	6,22×10 ³	1,02×10 ⁻¹	9,7×10 ²	7,29×10 ³
(A4)	3,68×10 ⁴	0	9,04×10 ¹	6,59×10 ⁻³	7,87	9,61×10 ¹
(A5)	1,23×10 ⁵	0	6,95×10 ¹	8,04×10 ⁻³	4,83×10 ¹	8,04×10 ⁻³
(B1)	0	0	0	0	0	0
(B2)	0	0	0	0	0	0
(B3)	0	0	0	0	0	0
(B4)	0	0	0	0	0	0
(B5)	0	0	0	0	0	0

Avaliação do Ciclo de Vida



(C1)	$1,62 \times 10^4$	0	$1,62 \times 10^1$	$2,19 \times 10^{-3}$	3,96	$3,51 \times 10^1$
(C2)	$2,33 \times 10^4$	0	$2,33 \times 10^1$	$4,61 \times 10^{-3}$	1,34	$1,07 \times 10^2$
(C3)	$1,53 \times 10^3$	0	1,43	$1,92 \times 10^{-4}$	$1,82 \times 10^{-1}$	1×10^1
(C4)	0	0	0	0	0	0
(D)	$-1,22 \times 10^6$	0	$-7,52 \times 10^2$	$-6,58 \times 10^{-2}$	$-7,15 \times 10^2$	$-5,02 \times 10^3$
Total (D) não incluído	$2,17 \times 10^6$	0	$1,31 \times 10^3$	$1,23 \times 10^{-1}$	$1,03 \times 10^3$	$8,04 \times 10^3$

Na Figura 1 é possível observar as percentagens de cada módulo para contribuição da emissões de carbono equivalente. É também possível observar a emissão de carbono por unidade de área (GIA).

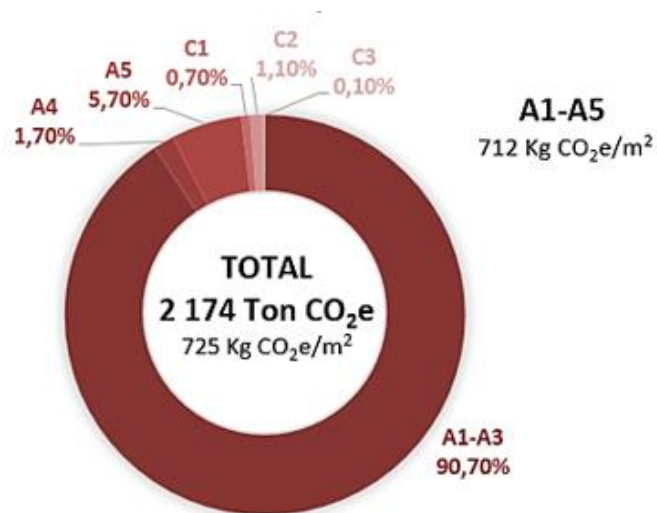


Figura 1 - Emissão de carbono equivalente para cada módulo.



7. Classificação do projeto

Depois de analisar os resultados obtidos no estudo é possível classificar o projeto segundo as metas estabelecidas por SCORS presentes na Figura 2.

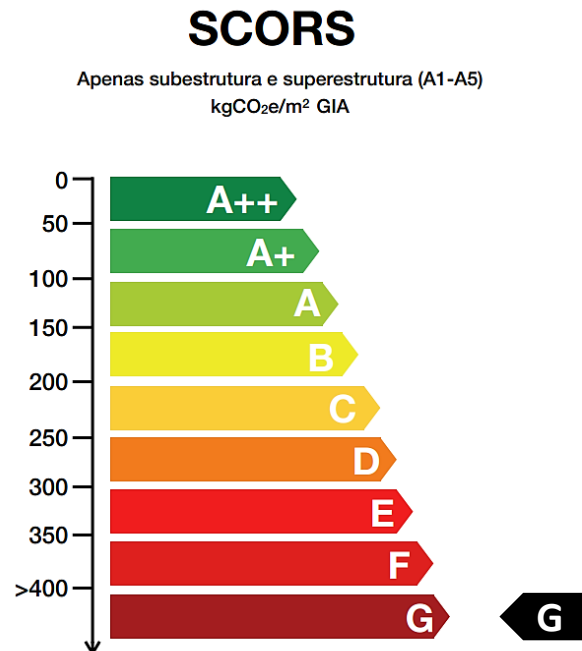


Figura 2 - Sistema de classificação SCORS para a subestrutura e superestrutura de todo o tipos de construção os módulos A1-A5.

8. Proposta de redução das emissões de carbono equivalente

Face à má classificação do projeto anterior foi estudada e desenvolvida uma alternativa para obter uma melhor performance climática. Na otimização, as vigas metálicas que sustentam as madres e a cobertura são substituídas por treliças de madeira. O novo projeto é ilustrado na Figura 3 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** onde se destaca a nova cobertura pela cor castanha da madeira. Neste projeto todos os materiais são materiais recicláveis. Os materiais selecionados são retirados da base de dados *One Click LCA* e são estritamente materiais genéricos para Portugal. O betão é um CEM III/B com 70% de cimento Portland substituído por escória granulada de alto-forno. 90% do aço é reciclado. A madeira considerada é do tipo Glulam. Os restantes parâmetros e suposições manem-se iguais ao projeto metálico. A estrutura de madeira é reutilizada no fim de vida do projeto.

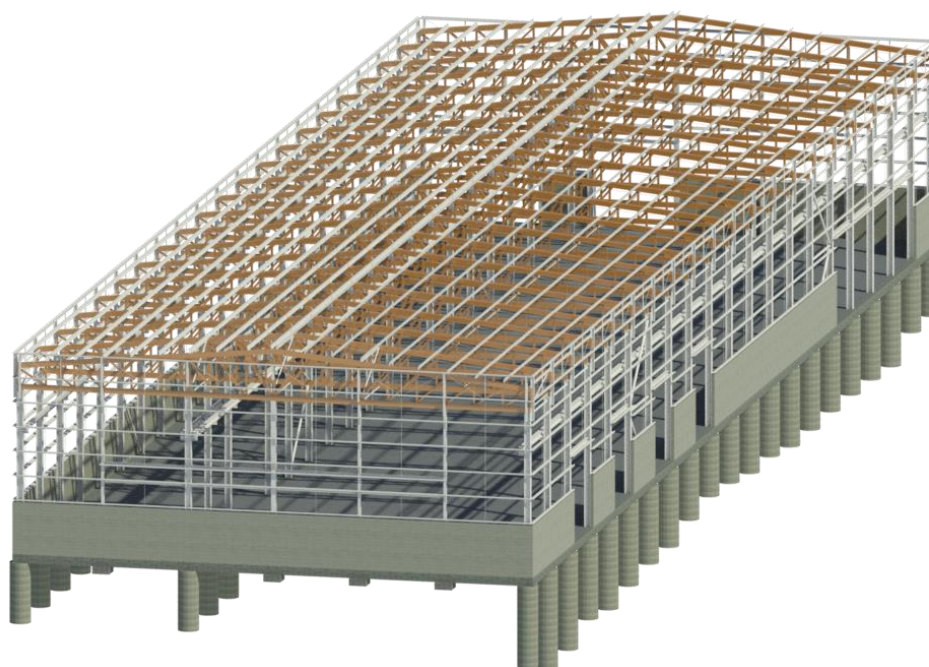


Figura 3 - Estrutura mista do pavilhão.

8.1 Resultados detalhados

Os resultados detalhados para cada módulo do ciclo de vida do projeto otimizado são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados detalhados do estudo (projeto otimizado).

Módulo Analisado	Aquecimento Global kg CO ₂ e	Carbono sequestrado kg CO ₂ e	Eutrofização kgPO ₄ e	Destruição da camada de ozono kgCFC ₁₁ e	Formação de ozono na atmosfera baixa kgC ₂ H ₄ e	Acidificação kgSO ₂ e
------------------	--	---	-------------------------------------	--	---	-------------------------------------

Avaliação do Ciclo de Vida



(A1-A3)	$6,67 \times 10^5$	$9,41 \times 10^4$	$3,62 \times 10^2$	$4,11 \times 10^{-2}$	$2,17 \times 10^2$	$2,38 \times 10^3$
(A4)	$3,62 \times 10^4$	0	$2,03 \times 10^1$	$6,49 \times 10^{-3}$	4,2	$9,51 \times 10^1$
(A5)	$7,3 \times 10^4$	0	$6,18 \times 10^1$	$5,92 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^1$	$3,13 \times 10^2$
(B1)	0	0	0	0	0	0
(B2)	0	0	0	0	0	0
(B3)	0	0	0	0	0	0
(B4)	0	0	0	0	0	0
(B5)	0	0	0	0	0	0
(C1)	$1,61 \times 10^4$	0	$1,29 \times 10^1$	$2,19 \times 10^{-3}$	3,93	$3,51 \times 10^1$
(C2)	$2,84 \times 10^4$	0	$2,83 \times 10^1$	$5,6 \times 10^{-3}$	1,67	$1,3 \times 10^2$
(C3)	$3,42 \times 10^3$	0	4,04	$3,22 \times 10^{-4}$	$8,26 \times 10^{-1}$	$1,97 \times 10^1$
(C4)	0	0	0	0	0	0
(D)	$-3,09 \times 10^5$	0	$-1,13 \times 10^2$	$-1,41 \times 10^{-2}$	$-1,14 \times 10^2$	$-7,81 \times 10^2$
Total (D) não incluído	$8,24 \times 10^5$	$9,41 \times 10^4$	$4,93 \times 10^2$	$6,16 \times 10^{-2}$	$2,46 \times 10^2$	$2,98 \times 10^3$

Na Figura 4 é possível observar as percentagens de cada módulo para contribuição da emissões de carbono equivalente. É também possível observar a emissão de carbono por unidade de área (GIA).

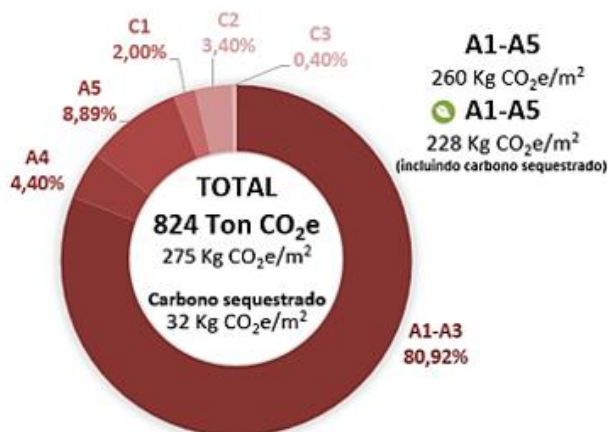


Figura 4 -Emissão de carbono equivalente para cada módulo (projeto otimizado).



8.2 Classificação do novo projeto

Depois de analisar os resultados obtidos no estudo alternativo é possível classificar o projeto segundo as metas estabelecidas por SCORS presentes na Figura 5.

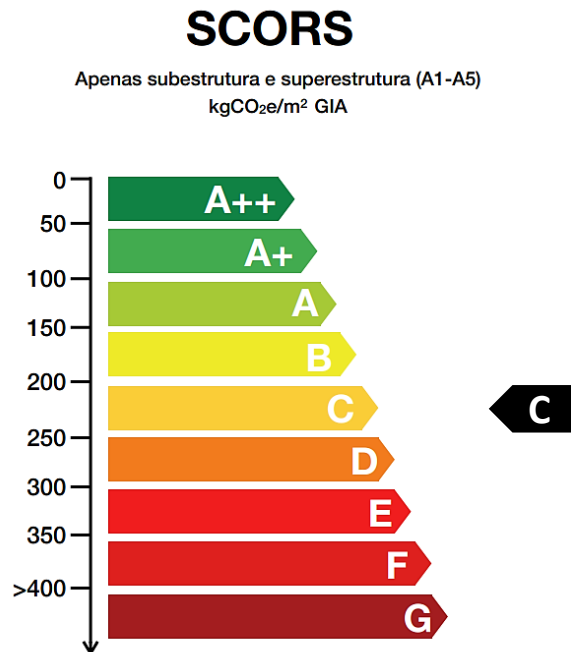


Figura 5 - Sistema de classificação SCORS para a subestrutura e superestrutura de todo o tipos de construção os módulos A1-A5 (projeto otimizado).

Avaliação do Ciclo de Vida



APÊNDICE C

Verificação de segurança dos perfis de madeira pertencentes à treliça.

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: [EN 1995-1:2004/A2:2014](#)
ANALYSIS TYPE: [Member Verification](#)

CODE GROUP:

MEMBER: 1 POINT: 1 COORDINATE: $x = 0.67 L = 6.67 \text{ m}$

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga $(1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90$

MATERIAL GL24h

$g_M = 1.25$	$f_{m,0,k} = 24.00 \text{ MPa}$	$f_{t,0,k} = 19.20 \text{ MPa}$	$f_{c,0,k} = 24.00 \text{ MPa}$
$f_{v,k} = 3.50 \text{ MPa}$	$f_{t,90,k} = 0.50 \text{ MPa}$	$f_{c,90,k} = 2.50 \text{ MPa}$	$E_{0,\text{moyen}} = 11500.00 \text{ MPa}$
$E_{0,05} = 9600.00 \text{ MPa}$	$G_{\text{moyen}} = 650.00 \text{ MPa}$	Service class: 2	Beta c = 0.10



SECTION PARAMETERS: BEAM 200x275

$ht = 27.5 \text{ cm}$			
$bf = 20.0 \text{ cm}$	$A_y = 366.67 \text{ cm}^2$	$A_z = 366.67 \text{ cm}^2$	$A_x = 550.00 \text{ cm}^2$
$tw = 10.0 \text{ cm}$	$I_y = 34661.50 \text{ cm}^4$	$I_z = 18333.30 \text{ cm}^4$	$I_x = 40599.7 \text{ cm}^4$
$tf = 10.0 \text{ cm}$	$W_y = 2520.84 \text{ cm}^3$	$W_z = 1833.33 \text{ cm}^3$	

STRESSES

$\text{Sig}_{t,0,d} = N/A_x = -188.95/550.00 = -3.44 \text{ MPa}$

ALLOWABLE STRESSES

$f_{t,0,d} = 10.14 \text{ MPa}$

Factors and additional parameters

$kh = 1.10$ $k_{\text{mod}} = 0.60$ $K_{\text{sys}} = 1.00$



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:



About Z axis:

VERIFICATION FORMULAS:

$\text{Sig}_{t,0,d}/f_{t,0,d} = 3.44/10.14 = 0.34 < 1.00 \text{ (6.1)}$

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 2 Montantes_2

POINT: 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

f_{v,k} = 3.50 MPa
MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00

E_{0,05} = 9600.00 MPa

G_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 150x140

ht = 14.0 cm

bf = 15.0 cm

tw = 7.0 cm

tf = 7.0 cm

A_y = 140.00 cm²

I_y = 3430.00 cm⁴

W_y = 490.00 cm³

A_z = 140.00 cm²

I_z = 3937.50 cm⁴

W_z = 525.00 cm³

A_x = 210.00 cm²

I_x = 6162.8 cm⁴

STRESSES

Sig_{c,0,d} = N/A_x = 157.66/210.00 = 7.51 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{c,0,d} = 11.52 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10

k_{mod} = 0.60

K_{sys} = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

L_Y = 2.50 m

Lambda_{rel Y} = 0.98

LF_Y = 2.50 m

Lambda_Y = 61.86

k_y = 1.02

k_z = 0.78



About Z axis:

L_Z = 2.50 m

Lambda_{rel Z} = 0.74

LF_Z = 2.00 m

Lambda_Z = 46.19

k_z = 0.79

k_{c,z} = 0.92

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 7.51/11.52 = 0.65 < 1.00 (6.23-4)

Sig_{c,0,d}/(k_c*f_{c,0,d}) = 7.51/(0.78*11.52) = 0.83 < 1.00 (6.23-4)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014
ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:
MEMBER: 3 Diagonais_3 POINT: 1 COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:
Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h
gM = 1.25 f m,0,k = 24.00 MPa f t,0,k = 19.20 MPa f c,0,k = 24.00 MPa
f v,k = 3.50 MPa f t,90,k = 0.50 MPa f c,90,k = 2.50 MPa E 0,moyen = 11500.00 MPa
E 0,05 = 9600.00 MPa G moyen = 650.00 MPa Service class: 2 Beta c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x140

ht=14.0 cm Ay=93.33 cm² Az=93.33 cm² Ax=140.00 cm²
bf=10.0 cm Iy=2286.70 cm⁴ Iz=1166.70 cm⁴ Ix=2616.7 cm⁴
tw=5.0 cm Wy=326.67 cm³ Wz=233.34 cm³
tf=5.0 cm

STRESSES ALLOWABLE STRESSES
Sig_t,0,d = N/Ax = -116.07/140.00 = -8.29 MPa f t,0,d = 10.14 MPa

Factors and additional parameters
kh = 1.10 kmod = 0.60 Ksys = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:



About Z axis:

VERIFICATION FORMULAS:
Sig_t,0,d/f t,0,d = 8.29/10.14 = 0.82 < 1.00 (6.1)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 5 Montantes_5

POINT: 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

f_{v,k} = 3.50 MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00

MPa

E_{0,05} = 9600.00 MPa

G_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm

bf=10.0 cm

tw=5.0 cm

tf=5.0 cm

A_y=66.67 cm²

I_y=833.30 cm⁴

W_y=166.66 cm³

A_z=66.67 cm²

I_z=833.30 cm⁴

W_z=166.66 cm³

A_x=100.00 cm²

I_x=1408.3 cm⁴

STRESSES

Sig_{c,0,d} = N/A_x = 95.90/100.00 = 9.59 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{c,0,d} = 11.52 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10

k_{mod} = 0.60

K_{sys} = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

LY = 1.50 m

Lambda_{rel} Y = 0.83

LFY = 1.50 m

Lambda Y = 51.96

ky = 0.87

kcy = 0.88



About Z axis:

LZ = 1.50 m

Lambda_{rel} Z = 0.66

LFZ = 1.20 m

Lambda Z = 41.57

kz = 0.74

kcZ = 0.94

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 9.59/11.52 = 0.83 < 1.00 (6.23-4)

Sig_{c,0,d}/(k_c*f_{c,0,d}) = 9.59/(0.88*11.52) = 0.94 < 1.00 (6.23-4)

VERIFICATION FORMULAS:

$$\text{Sig}_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 0.61/11.52 = 0.05 < 1.00 \quad (6.23-4)]$$

$$\text{Sig}_{c,0,d}/(k_c * f_{c,0,d}) = 0.61/(0.13 * 11.52) = 0.42 < 1.00 \quad (6.23-4)$$

Section OK !!!**TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS****CODE:** EN 1995-1:2004/A2:2014**ANALYSIS TYPE:** Member Verification**CODE GROUP:****MEMBER:** 7**POINT:** 1**COORDINATE:** x = 0.00 L = 0.00 m**LOADS:***Governing Load Case:* 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90**MATERIAL** GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPaf_{t,0,k} = 19.20 MPaf_{c,0,k} = 24.00 MPaf_{v,k} = 3.50 MPaf_{t,90,k} = 0.50 MPaf_{c,90,k} = 2.50 MPaE_{0,moyen} = 11500.00

MPa

E_{0,05} = 9600.00 MPaG_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10**SECTION PARAMETERS: BEAM 200x275**

ht=27.5 cm

bf=20.0 cm

tw=10.0 cm

tf=10.0 cm

Ay=366.67 cm²Iy=34661.50 cm⁴Wy=2520.84 cm³Az=366.67 cm²Iz=18333.30 cm⁴Wz=1833.33 cm³Ax=550.00 cm²Ix=40599.7 cm⁴**STRESSES**Sig_{c,0,d} = N/Ax = 60.78/550.00 = 1.11 MPa**ALLOWABLE STRESSES**f_{c,0,d} = 11.52 MPa**Factors and additional parameters**k_h = 1.10k_{mod} = 0.60K_{sys} = 1.00**LATERAL BUCKLING PARAMETERS:****BUCKLING PARAMETERS:**

About Y axis:

LY = 1.67 m

Lambda_{rel} Y = 0.30

Lambda Y = 18.93

ky = 0.55

About Z axis:

LZ = 10.00 m

Lambda_{rel} Z = 2.76

Lambda Z = 173.21

kz = 4.42

LFY = 1.50 m

ky = 1.00

LFZ = 10.00 m

kc = 0.13

VERIFICATION FORMULAS:

$\text{Sig}_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 1.11/11.52 = 0.10 < 1.00$ (6.23-4)

$\text{Sig}_{c,0,d}/(k_c * f_{c,0,d}) = 1.11/(0.13 * 11.52) = 0.76 < 1.00$ (6.23-4)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 8

POINT: 1

COORDINATE: x = 0.67 L = 3.35 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

f_{v,k} = 3.50 MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00

MPa

E_{0,05} = 9600.00 MPa

G_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: BEAM 200x200

ht=20.0 cm

bf=20.0 cm

tw=10.0 cm

tf=10.0 cm

A_y=266.67 cm²

I_y=13333.30 cm⁴

W_y=1333.33 cm³

A_z=266.67 cm²

I_z=13333.30 cm⁴

W_z=1333.33 cm³

A_x=400.00 cm²

I_x=22533.3 cm⁴

STRESSES

$\text{Sig}_{c,0,d} = N/A_x = 85.83/400.00 = 2.15$ MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{c,0,d} = 11.52 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10

k_{mod} = 0.60

K_{sys} = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

LY = 1.66 m

Lambda_rel Y = 0.41

LFY = 1.49 m

Lambda Y = 25.85

ky = 0.59

kcy = 0.99

About Z axis:

LZ = 5.02 m

Lambda_rel Z = 1.39

LFZ = 5.02 m

Lambda Z = 87.03

kz = 1.51

kcZ = 0.47

VERIFICATION FORMULAS:

$\text{Sig}_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 2.15/11.52 = 0.19 < 1.00$ (6.23-4)]

$\text{Sig}_{c,0,d}/(k_c * f_{c,0,d}) = 2.15/(0.47 * 11.52) = 0.40 < 1.00$ (6.23-4)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 9

POINT: 1

COORDINATE: x = 0.67 L = 3.35 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

f_{v,k} = 3.50 MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00 MPa

E_{0,05} = 9600.00 MPa

G_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: 275X275

ht=27.5 cm

bf=27.5 cm

tw=13.8 cm

tf=13.8 cm

A_y=504.17 cm²

I_y=47659.51 cm⁴

W_y=3466.15 cm³

A_z=504.17 cm²

I_z=47659.51 cm⁴

W_z=3466.15 cm³

A_x=756.25 cm²

I_x=80401.4 cm⁴

STRESSES

$\text{Sig}_{c,0,d} = N/A_x = 151.40/756.25 = 2.00$ MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{c,0,d} = 11.52 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.08

kmod = 0.60

K_{sys} = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

LY = 1.66 m

Lambda_rel Y = 0.30

LFY = 1.49 m

Lambda Y = 18.80

ky = 0.54

key = 1.00

About Z axis:

LZ = 5.02 m

Lambda_rel Z = 1.01

LFZ = 5.02 m

Lambda Z = 63.30

kz = 1.04

kez = 0.76

VERIFICATION FORMULAS:

$\text{Sig}_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 2.00/11.52 = 0.17 < 1.00$ (6.23-4)]

$\text{Sig}_{c,0,d}/(k_c * f_{c,0,d}) = 2.00/(0.76 * 11.52) = 0.23 < 1.00$ (6.23-4)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: [EN 1995-1:2004/A2:2014](#)

ANALYSIS TYPE: [Member Verification](#)

CODE GROUP:

MEMBER: 10

POINT: 1

COORDINATE: x = 0.33 L = 3.35 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

f_{v,k} = 3.50 MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00

MPa

E_{0,05} = 9600.00 MPa

G_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: 275X275

ht=27.5 cm

bf=27.5 cm

tw=13.8 cm

tf=13.8 cm

A_y=504.17 cm²

I_y=47659.51 cm⁴

W_y=3466.15 cm³

A_z=504.17 cm²

I_z=47659.51 cm⁴

W_z=3466.15 cm³

A_x=756.25 cm²

I_x=80401.4 cm⁴

STRESSES

$\text{Sig}_{c,0,d} = N/A_x = 187.00/756.25 = 2.47$ MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{c,0,d} = 11.52 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.08

k_{mod} = 0.60

K_{sys} = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

LY = 1.68 m

Lambda_rel Y = 0.30

LFY = 1.51 m

Lambda Y = 19.03

ky = 0.55

kcy = 1.00

About Z axis:

LZ = 10.05 m

Lambda_rel Z = 2.01

LFZ = 10.05 m

Lambda Z = 126.60

kz = 2.62

kcZ = 0.23

VERIFICATION FORMULAS:

$\text{Sig}_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 2.47/11.52 = 0.21 < 1.00 \quad (6.23-4)$

$\text{Sig}_{c,0,d}/(k_c \cdot f_{c,0,d}) = 2.47/(0.23 \cdot 11.52) = 0.92 < 1.00 \quad (6.23-4)$

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: [EN 1995-1:2004/A2:2014](#)

ANALYSIS TYPE: [Member Verification](#)

CODE GROUP:

MEMBER: 11

POINT: 1

COORDINATE: $x = 0.83 L = 8.33 \text{ m}$

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga $(1+2+3) \cdot 1.35 + 4 \cdot 1.50 + 8 \cdot 0.90$

MATERIAL GL24h

$g_M = 1.25$

$f_{v,k} = 3.50 \text{ MPa}$

MPa

$E_{0,05} = 9600.00 \text{ MPa}$

$f_{m,0,k} = 24.00 \text{ MPa}$

$f_{t,90,k} = 0.50 \text{ MPa}$

$G_{\text{moyen}} = 650.00 \text{ MPa}$

$f_{t,0,k} = 19.20 \text{ MPa}$

$f_{c,90,k} = 2.50 \text{ MPa}$

Service class: 2

$f_{c,0,k} = 24.00 \text{ MPa}$

$E_{0,\text{moyen}} = 11500.00$

Beta c = 0.10



SECTION PARAMETERS: BEAM 200x275

ht=27.5 cm

bf=20.0 cm

tw=10.0 cm

tf=10.0 cm

Ay=366.67 cm²

Iy=34661.50 cm⁴

Wy=2520.84 cm³

Az=366.67 cm²

Iz=18333.30 cm⁴

Wz=1833.33 cm³

Ax=550.00 cm²

Ix=40599.7 cm⁴

STRESSES

$\text{Sig}_{c,0,d} = N/A_x = 60.78/550.00 = 1.11 \text{ MPa}$

ALLOWABLE STRESSES

$f_{c,0,d} = 11.52 \text{ MPa}$

Factors and additional parameters

kh = 1.10 kmod = 0.60 Ksys = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

LY = 1.67 m

Lambda_rel Y = 0.30

LFY = 1.50 m

Lambda Y = 18.93

ky = 0.55

key = 1.00

About Z axis:

LZ = 10.00 m

Lambda_rel Z = 2.76

LFZ = 10.00 m

Lambda Z = 173.21

kz = 4.42

kez = 0.13

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_c,0,d/f_c,0,d = 1.11/11.52 = 0.10 < 1.00 (6.23-4)]

Sig_c,0,d/(kc*f_c,0,d) = 1.11/(0.13*11.52) = 0.76 < 1.00 (6.23-4)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 28 Montantes_28 **POINT:** 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_v,k = 3.50 MPa

MPa

E 0,05 = 9600.00 MPa

f_m,0,k = 24.00 MPa

f_t,90,k = 0.50 MPa

G moyen = 650.00 MPa

f_t,0,k = 19.20 MPa

f_c,90,k = 2.50 MPa

Service class: 2

f_c,0,k = 24.00 MPa

E 0,moyen = 11500.00

Beta c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm

bf=10.0 cm

tw=5.0 cm

tf=5.0 cm

Ay=66.67 cm²

Iy=833.30 cm⁴

Wy=166.66 cm³

Az=66.67 cm²

Iz=833.30 cm⁴

Wz=166.66 cm³

Ax=100.00 cm²

Ix=1408.3 cm⁴

STRESSES

$\text{Sig}_{c,0,d} = N/A_x = 77.06/100.00 = 7.71 \text{ MPa}$

ALLOWABLE STRESSES

$f_{c,0,d} = 11.52 \text{ MPa}$

Factors and additional parameters

$k_h = 1.10$ $k_{mod} = 0.60$ $K_{sys} = 1.00$

**LATERAL BUCKLING PARAMETERS:****BUCKLING PARAMETERS:**

About Y axis:

$L_Y = 1.67 \text{ m}$

$\text{Lambda}_{rel Y} = 0.92$

$LF_Y = 1.67 \text{ m}$

$\text{Lambda Y} = 57.74$

$k_y = 0.95$

$k_{cy} = 0.83$



About Z axis:

$L_Z = 1.67 \text{ m}$

$\text{Lambda}_{rel Z} = 0.74$

$LF_Z = 1.33 \text{ m}$

$\text{Lambda Z} = 46.19$

$k_z = 0.79$

$k_{cz} = 0.92$

VERIFICATION FORMULAS:

$\text{Sig}_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 7.71/11.52 = 0.67 < 1.00 \text{ (6.23-4)}$

$\text{Sig}_{c,0,d}/(k_c * f_{c,0,d}) = 7.71/(0.83 * 11.52) = 0.81 < 1.00 \text{ (6.23-4)}$

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: [EN 1995-1:2004/A2:2014](#)

ANALYSIS TYPE: [Member Verification](#)

CODE GROUP:

MEMBER: [29 Diagonais_29](#) **POINT:** 1

COORDINATE: $x = 0.00$ $L = 0.00 \text{ m}$

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga $(1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90$

MATERIAL GL24h

$g_M = 1.25$

$f_{v,k} = 3.50 \text{ MPa}$

$E_{0,05} = 9600.00 \text{ MPa}$

$f_{m,0,k} = 24.00 \text{ MPa}$

$f_{t,90,k} = 0.50 \text{ MPa}$

$G_{moyen} = 650.00 \text{ MPa}$

$f_{t,0,k} = 19.20 \text{ MPa}$

$f_{c,90,k} = 2.50 \text{ MPa}$

Service class: 2

$f_{c,0,k} = 24.00 \text{ MPa}$

$E_{0,moyen} = 11500.00$

Beta c = 0.10

**SECTION PARAMETERS: SQR 100x100**

$h_t = 10.0 \text{ cm}$

bf=10.0 cm
tw=5.0 cm
tf=5.0 cm

Ay=66.67 cm²
Iy=833.30 cm⁴
Wy=166.66 cm³

Az=66.67 cm²
Iz=833.30 cm⁴
Wz=166.66 cm³

Ax=100.00 cm²
Ix=1408.3 cm⁴

STRESSES

Sig_{t,0,d} = N/Ax = -77.49/100.00 = -7.75 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{t,0,d} = 10.14 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10 kmod = 0.60 K_{sys} = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:



About Z axis:

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_{t,0,d}/f_{t,0,d} = 7.75/10.14 = 0.76 < 1.00 (6.1)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 30 Montantes_30 **POINT:** 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

f_{v,k} = 3.50 MPa
MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00

E_{0,05} = 9600.00 MPa

G_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm

bf=10.0 cm

Ay=66.67 cm²

Az=66.67 cm²

Ax=100.00 cm²

tw=5.0 cm
tf=5.0 cm

Iy=833.30 cm⁴
Wy=166.66 cm³

Iz=833.30 cm⁴
Wz=166.66 cm³

Ix=1408.3 cm⁴

STRESSES

Sig_c,0,d = N/Ax = 54.22/100.00 = 5.42 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_c,0,d = 11.52 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10 kmod = 0.60 Ksys = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

LY = 1.83 m

Lambda_rel Y = 1.01

LFY = 1.83 m

Lambda Y = 63.51

ky = 1.05

kcy = 0.76



About Z axis:

LZ = 1.83 m

Lambda_rel Z = 0.81

LFZ = 1.47 m

Lambda Z = 50.81

kz = 0.85

kcZ = 0.89

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_c,0,d/f_c,0,d = 5.42/11.52 = 0.47 < 1.00 (6.23-4)

Sig_c,0,d/(kc*f_c,0,d) = 5.42/(0.76*11.52) = 0.62 < 1.00 (6.23-4)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 31 Diagonais_31 **POINT:** 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_v,k = 3.50 MPa

MPa

E_0,05 = 9600.00 MPa

f_m,0,k = 24.00 MPa

f_t,90,k = 0.50 MPa

G_moyen = 650.00 MPa

f_t,0,k = 19.20 MPa

f_c,90,k = 2.50 MPa

Service class: 2

f_c,0,k = 24.00 MPa

E_0,moyen = 11500.00

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm

bf=10.0 cm

tw=5.0 cm

tf=5.0 cm

Ay=66.67 cm²

Iy=833.30 cm⁴

Wy=166.66 cm³

Az=66.67 cm²

Iz=833.30 cm⁴

Wz=166.66 cm³

Ax=100.00 cm²

Ix=1408.3 cm⁴

STRESSES

Sig_{t,0,d} = N/Ax = -46.36/100.00 = -4.64 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{t,0,d} = 10.14 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10

kmod = 0.60

K_{sys} = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:



About Z axis:

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_{t,0,d}/f_{t,0,d} = 4.64/10.14 = 0.46 < 1.00 (6.1)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: [EN 1995-1:2004/A2:2014](#)

ANALYSIS TYPE: [Member Verification](#)

CODE GROUP:

MEMBER: **32 Montantes_32** POINT: **1**

COORDINATE: **x = 0.00 L = 0.00 m**

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

g_M = 1.25

f_{v,k} = 3.50 MPa

MPa

E_{0,05} = 9600.00 MPa

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

G_{moyen} = 650.00 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

Service class: 2

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm
bf=10.0 cm
tw=5.0 cm
tf=5.0 cm

Ay=66.67 cm²
Iy=833.30 cm⁴
Wy=166.66 cm³

Az=66.67 cm²
Iz=833.30 cm⁴
Wz=166.66 cm³

Ax=100.00 cm²
Ix=1408.3 cm⁴

STRESSES

Sig_{c,0,d} = N/Ax = 33.72/100.00 = 3.37 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{c,0,d} = 11.52 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10 kmod = 0.60 Ksys = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

LY = 2.00 m
Lambda_{rel} Y = 1.10
LFY = 2.00 m

Lambda Y = 69.28
ky = 1.15
kcy = 0.68



About Z axis:

LZ = 2.00 m
Lambda_{rel} Z = 0.88
LFZ = 1.60 m

Lambda Z = 55.43
kz = 0.92
kcz = 0.85

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 3.37/11.52 = 0.29 < 1.00 (6.23-4)]

Sig_{c,0,d}/(kc*f_{c,0,d}) = 3.37/(0.68*11.52) = 0.43 < 1.00 (6.23-4)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: [EN 1995-1:2004/A2:2014](#)

ANALYSIS TYPE: [Member Verification](#)

CODE GROUP:

MEMBER: **33 Diagonais_33** POINT: **1**

COORDINATE: **x = 0.00 L = 0.00 m**

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_{v,k} = 3.50 MPa

MPa

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00

E 0,05 = 9600.00 MPa

G moyen = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm

bf=10.0 cm

tw=5.0 cm

tf=5.0 cm

Ay=66.67 cm²

Iy=833.30 cm⁴

Wy=166.66 cm³

Az=66.67 cm²

Iz=833.30 cm⁴

Wz=166.66 cm³

Ax=100.00 cm²

Ix=1408.3 cm⁴

STRESSES

Sig_t,0,d = N/Ax = -20.33/100.00 = -2.03 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f t,0,d = 10.14 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10

kmod = 0.60

Ksys = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:



About Z axis:

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_t,0,d/f t,0,d = 2.03/10.14 = 0.20 < 1.00 (6.1)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 34 Montantes_34 **POINT:** 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f v,k = 3.50 MPa

MPa

E 0,05 = 9600.00 MPa

f m,0,k = 24.00 MPa

f t,90,k = 0.50 MPa

G moyen = 650.00 MPa

f t,0,k = 19.20 MPa

f c,90,k = 2.50 MPa

Service class: 2

f c,0,k = 24.00 MPa

E 0,moyen = 11500.00

Beta c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm
bf=10.0 cm
tw=5.0 cm
tf=5.0 cm

Ay=66.67 cm²
Iy=833.30 cm⁴
Wy=166.66 cm³

Az=66.67 cm²
Iz=833.30 cm⁴
Wz=166.66 cm³

Ax=100.00 cm²
Ix=1408.3 cm⁴

STRESSES

Sig_c,0,d = N/Ax = 15.03/100.00 = 1.50 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_c,0,d = 11.52 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10 kmod = 0.60 Ksys = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

LY = 2.17 m
Lambda_rel Y = 1.19
LFY = 2.17 m

Lambda Y = 75.06
ky = 1.26
kcy = 0.60



About Z axis:

LZ = 2.17 m
Lambda_rel Z = 0.96
LFZ = 1.73 m

Lambda Z = 60.05
kz = 0.99
kcz = 0.80

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_c,0,d/f_c,0,d = 1.50/11.52 = 0.13 < 1.00 (6.23-4)

Sig_c,0,d/(kc*f_c,0,d) = 1.50/(0.60*11.52) = 0.22 < 1.00 (6.23-4)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 35 Diagonais_35 POINT: 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 15 ELU Base W (1+2+3)*1.00+7*1.50

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_m,0,k = 24.00 MPa

f_t,0,k = 19.20 MPa

f_c,0,k = 24.00 MPa

$f_{v,k} = 3.50$ MPa $f_{t,90,k} = 0.50$ MPa $f_{c,90,k} = 2.50$ MPa $E_{0,moyen} = 11500.00$ MPa
 $E_{0,05} = 9600.00$ MPa $G_{moyen} = 650.00$ MPa Service class: 2 $Beta_c = 0.10$



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

$ht = 10.0$ cm $A_y = 66.67$ cm² $A_z = 66.67$ cm² $A_x = 100.00$ cm²
 $bf = 10.0$ cm $I_y = 833.30$ cm⁴ $I_z = 833.30$ cm⁴ $I_x = 1408.3$ cm⁴
 $tw = 5.0$ cm $W_y = 166.66$ cm³ $W_z = 166.66$ cm³
 $tf = 5.0$ cm

STRESSES

$\sigma_{c,0,d} = N/A_x = 2.66/100.00 = 0.27$ MPa

ALLOWABLE STRESSES

$f_{c,0,d} = 11.52$ MPa

Factors and additional parameters

$k_h = 1.10$ $k_{mod} = 0.60$ $K_{sys} = 1.00$



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

$L_Y = 2.73$ m $\lambda_Y = 94.69$
 $\lambda_{rel,Y} = 1.51$ $k_y = 1.70$
 $L_{FY} = 2.73$ m $k_{ey} = 0.40$



About Z axis:

$L_Z = 2.73$ m $\lambda_Z = 75.76$
 $\lambda_{rel,Z} = 1.21$ $k_z = 1.27$
 $L_{FZ} = 2.19$ m $k_{ez} = 0.60$

VERIFICATION FORMULAS:

$\sigma_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 0.27/11.52 = 0.02 < 1.00$ (6.23-4)
 $\sigma_{c,0,d}/(k_c \cdot f_{c,0,d}) = 0.27/(0.40 \cdot 11.52) = 0.06 < 1.00$ (6.23-4)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: [EN 1995-1:2004/A2:2014](#)

ANALYSIS TYPE: [Member Verification](#)

CODE GROUP:

MEMBER: 36 Montantes_36 **POINT:** 1

COORDINATE: $x = 0.00$ $L = 0.00$ m

LOADS:

Governing Load Case: 14 ELU Base W (1+2+3)*1.00+6*1.50

MATERIAL GL24h

gM = 1.25 f_{m,0,k} = 24.00 MPa f_{t,0,k} = 19.20 MPa f_{c,0,k} = 24.00 MPa
f_{v,k} = 3.50 MPa f_{t,90,k} = 0.50 MPa f_{c,90,k} = 2.50 MPa E_{0,moyen} = 11500.00 MPa
E_{0,05} = 9600.00 MPa G_{moyen} = 650.00 MPa Service class: 2 Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm Ay=66.67 cm² Az=66.67 cm² Ax=100.00 cm²
bf=10.0 cm Iy=833.30 cm⁴ Iz=833.30 cm⁴ Ix=1408.3 cm⁴
tw=5.0 cm Wy=166.66 cm³ Wz=166.66 cm³

STRESSES

Sig_{c,0,d} = N/Ax = 2.16/100.00 = 0.22 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{c,0,d} = 11.52 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10 k_{mod} = 0.60 K_{sys} = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

LY = 2.33 m Lambda_Y = 80.83
Lambda_{rel Y} = 1.29 ky = 1.38
LFY = 2.33 m key = 0.54



About Z axis:

LZ = 2.33 m Lambda_Z = 64.66
Lambda_{rel Z} = 1.03 kz = 1.07
LFZ = 1.87 m kcz = 0.74

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 0.22/11.52 = 0.02 < 1.00 (6.23-4)
Sig_{c,0,d}/(k_c*f_{c,0,d}) = 0.22/(0.54*11.52) = 0.04 < 1.00 (6.23-4)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 37 Diagonais_37 **POINT:** 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

$g_M = 1.25$	$f_{m,0,k} = 24.00 \text{ MPa}$	$f_{t,0,k} = 19.20 \text{ MPa}$	$f_{c,0,k} = 24.00 \text{ MPa}$
$f_{v,k} = 3.50 \text{ MPa}$	$f_{t,90,k} = 0.50 \text{ MPa}$	$f_{c,90,k} = 2.50 \text{ MPa}$	$E_{0,\text{moyen}} = 11500.00 \text{ MPa}$
$E_{0,05} = 9600.00 \text{ MPa}$	$G_{\text{moyen}} = 650.00 \text{ MPa}$	Service class: 2	Beta c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

$h_t = 10.0 \text{ cm}$			
$b_f = 10.0 \text{ cm}$	$A_y = 66.67 \text{ cm}^2$	$A_z = 66.67 \text{ cm}^2$	$A_x = 100.00 \text{ cm}^2$
$t_w = 5.0 \text{ cm}$	$I_y = 833.30 \text{ cm}^4$	$I_z = 833.30 \text{ cm}^4$	$I_x = 1408.3 \text{ cm}^4$
$t_f = 5.0 \text{ cm}$	$W_y = 166.66 \text{ cm}^3$	$W_z = 166.66 \text{ cm}^3$	

STRESSES

$\text{Sig}_{c,0,d} = N/A_x = 21.87/100.00 = 2.19 \text{ MPa}$

ALLOWABLE STRESSES

$f_{c,0,d} = 11.52 \text{ MPa}$

Factors and additional parameters

$k_h = 1.10$ $k_{\text{mod}} = 0.60$ $K_{\text{sys}} = 1.00$



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

$L_Y = 2.87 \text{ m}$	$\text{Lambda}_Y = 99.33$
$\text{Lambda}_{\text{rel } Y} = 1.58$	$k_y = 1.81$
$L_{FY} = 2.87 \text{ m}$	$k_{cy} = 0.37$



About Z axis:

$L_Z = 2.87 \text{ m}$	$\text{Lambda}_Z = 79.47$
$\text{Lambda}_{\text{rel } Z} = 1.26$	$k_z = 1.35$
$L_{FZ} = 2.29 \text{ m}$	$k_{cz} = 0.55$

VERIFICATION FORMULAS:

$\text{Sig}_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 2.19/11.52 = 0.19 < 1.00 \quad (6.23-4)$

$\text{Sig}_{c,0,d}/(k_c \cdot f_{c,0,d}) = 2.19/(0.37 \cdot 11.52) = 0.51 < 1.00 \quad (6.23-4)$

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 38 Montantes_38 **POINT:** 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

f_{v,k} = 3.50 MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00

MPa

E_{0,05} = 9600.00 MPa

G_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm

bf=10.0 cm

tw=5.0 cm

tf=5.0 cm

A_y=66.67 cm²

I_y=833.30 cm⁴

W_y=166.66 cm³

A_z=66.67 cm²

I_z=833.30 cm⁴

W_z=166.66 cm³

A_x=100.00 cm²

I_x=1408.3 cm⁴

STRESSES

Sig_{t,0,d} = N/A_x = -18.40/100.00 = -1.84 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{t,0,d} = 10.14 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10

k_{mod} = 0.60

K_{sys} = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:



About Z axis:

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_{t,0,d}/f_{t,0,d} = 1.84/10.14 = 0.18 < 1.00 (6.1)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 40 Diagonais_40 **POINT:** 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

f_{v,k} = 3.50 MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00

MPa

E_{0,05} = 9600.00 MPa

G_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x140

ht=14.0 cm

bf=10.0 cm

tw=5.0 cm

tf=5.0 cm

A_y=93.33 cm²

I_y=2286.70 cm⁴

W_y=326.67 cm³

A_z=93.33 cm²

I_z=1166.70 cm⁴

W_z=233.34 cm³

A_x=140.00 cm²

I_x=2616.7 cm⁴

STRESSES

Sig_{t,0,d} = N/A_x = -115.10/140.00 = -8.22 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{t,0,d} = 10.14 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10

k_{mod} = 0.60

K_{sys} = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:



About Z axis:

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_{t,0,d}/f_{t,0,d} = 8.22/10.14 = 0.81 < 1.00 (6.1)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 41 Montantes_41 **POINT:** 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25	f _{m,0,k} = 24.00 MPa	f _{t,0,k} = 19.20 MPa	f _{c,0,k} = 24.00 MPa
f _{v,k} = 3.50 MPa	f _{t,90,k} = 0.50 MPa	f _{c,90,k} = 2.50 MPa	E _{0,moyen} = 11500.00 MPa
E _{0,05} = 9600.00 MPa	G _{moyen} = 650.00 MPa	Service class: 2	Beta _c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x140

ht=14.0 cm	A _y =93.33 cm ²	A _z =93.33 cm ²	A _x =140.00 cm ²
bf=10.0 cm	I _y =2286.70 cm ⁴	I _z =1166.70 cm ⁴	I _x =2616.7 cm ⁴
tw=5.0 cm	W _y =326.67 cm ³	W _z =233.34 cm ³	
tf=5.0 cm			

STRESSES

Sig_{c,0,d} = N/A_x = 95.10/140.00 = 6.79 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{c,0,d} = 11.52 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10 k_{mod} = 0.60 K_{sys} = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

LY = 2.67 m	Lambda _Y = 65.98
Lambda _{rel Y} = 1.05	ky = 1.09
LFY = 2.67 m	key = 0.73



About Z axis:

LZ = 2.67 m	Lambda _Z = 73.90
Lambda _{rel Z} = 1.18	kz = 1.24
LFZ = 2.13 m	kez = 0.62

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 6.79/11.52 = 0.59 < 1.00 (6.23-4)]

Sig_{c,0,d}/(k_c*f_{c,0,d}) = 6.79/(0.62*11.52) = 0.95 < 1.00 (6.23-4)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: *EN 1995-1:2004/A2:2014*
ANALYSIS TYPE: *Member Verification*

CODE GROUP:

MEMBER: *42 Diagonais_42* **POINT:** *1* **COORDINATE:** *x = 0.00 L = 0.00 m*

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

$g_M = 1.25$	$f_{m,0,k} = 24.00 \text{ MPa}$	$f_{t,0,k} = 19.20 \text{ MPa}$	$f_{c,0,k} = 24.00 \text{ MPa}$
$f_{v,k} = 3.50 \text{ MPa}$	$f_{t,90,k} = 0.50 \text{ MPa}$	$f_{c,90,k} = 2.50 \text{ MPa}$	$E_{0,\text{moyen}} = 11500.00$
MPa			
$E_{0,05} = 9600.00 \text{ MPa}$	$G_{\text{moyen}} = 650.00 \text{ MPa}$	Service class: 2	Beta c = 0.10

-----

SECTION PARAMETERS: SQR 100x140

$ht = 14.0 \text{ cm}$			
$bf = 10.0 \text{ cm}$	$A_y = 93.33 \text{ cm}^2$	$A_z = 93.33 \text{ cm}^2$	$A_x = 140.00 \text{ cm}^2$
$tw = 5.0 \text{ cm}$	$I_y = 2286.70 \text{ cm}^4$	$I_z = 1166.70 \text{ cm}^4$	$I_x = 2616.7 \text{ cm}^4$
$tf = 5.0 \text{ cm}$	$W_y = 326.67 \text{ cm}^3$	$W_z = 233.34 \text{ cm}^3$	

STRESSES

$\text{Sig}_{t,0,d} = N/A_x = -91.27/140.00 = -6.52 \text{ MPa}$

ALLOWABLE STRESSES

$f_{t,0,d} = 10.14 \text{ MPa}$

Factors and additional parameters

$kh = 1.10$ $k_{\text{mod}} = 0.60$ $K_{\text{sys}} = 1.00$



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:



About Z axis:

VERIFICATION FORMULAS:

$\text{Sig}_{t,0,d}/f_{t,0,d} = 6.52/10.14 = 0.64 < 1.00 \text{ (6.1)}$

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014
ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 43 Montantes_43 POINT: 1 COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

$g_M = 1.25$ $f_{m,0,k} = 24.00$ MPa $f_{t,0,k} = 19.20$ MPa $f_{c,0,k} = 24.00$ MPa
 $f_{v,k} = 3.50$ MPa $f_{t,90,k} = 0.50$ MPa $f_{c,90,k} = 2.50$ MPa $E_{0,moyen} = 11500.00$ MPa
 $E_{0,05} = 9600.00$ MPa $G_{moyen} = 650.00$ MPa Service class: 2 Beta c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x140

$ht = 14.0$ cm $A_y = 93.33$ cm² $A_z = 93.33$ cm² $A_x = 140.00$ cm²
 $bf = 10.0$ cm $I_y = 2286.70$ cm⁴ $I_z = 1166.70$ cm⁴ $I_x = 2616.7$ cm⁴
 $tw = 5.0$ cm $W_y = 326.67$ cm³ $W_z = 233.34$ cm³
 $tf = 5.0$ cm

STRESSES

$\text{Sig}_{c,0,d} = N/A_x = 76.72/140.00 = 5.48$ MPa

ALLOWABLE STRESSES

$f_{c,0,d} = 11.52$ MPa

Factors and additional parameters

$k_h = 1.10$ $k_{mod} = 0.60$ $K_{sys} = 1.00$



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

$LY = 2.83$ m $\text{Lambda } Y = 70.11$
 $\text{Lambda}_{rel } Y = 1.12$ $k_y = 1.16$
 $LFY = 2.83$ m $k_{ey} = 0.67$



About Z axis:

$LZ = 2.83$ m $\text{Lambda } Z = 78.52$
 $\text{Lambda}_{rel } Z = 1.25$ $k_z = 1.33$
 $LFZ = 2.27$ m $k_{cz} = 0.56$

VERIFICATION FORMULAS:

$\text{Sig}_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 5.48/11.52 = 0.48 < 1.00$ (6.23-4)

$\text{Sig}_{c,0,d}/(k_c \cdot f_{c,0,d}) = 5.48/(0.56 \cdot 11.52) = 0.85 < 1.00$ (6.23-4)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: *EN 1995-1:2004/A2:2014*
ANALYSIS TYPE: *Member Verification*

CODE GROUP:
MEMBER: *44 Diagonais_44* POINT: *1* COORDINATE: *x = 0.00 L = 0.00 m*

LOADS:
*Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90*

MATERIAL *GL24h*
gM = 1.25 $f_{m,0,k} = 24.00$ MPa $f_{t,0,k} = 19.20$ MPa $f_{c,0,k} = 24.00$ MPa
 $f_{v,k} = 3.50$ MPa $f_{t,90,k} = 0.50$ MPa $f_{c,90,k} = 2.50$ MPa $E_{0,moyen} = 11500.00$
MPa
 $E_{0,05} = 9600.00$ MPa $G_{moyen} = 650.00$ MPa Service class: *2* Beta c = *0.10*



SECTION PARAMETERS: *SQR 100x150*

$ht = 15.0$ cm $A_y = 100.00$ cm² $A_z = 100.00$ cm² $A_x = 150.00$ cm²
 $bf = 10.0$ cm $I_y = 2812.50$ cm⁴ $I_z = 1250.00$ cm⁴ $I_x = 2936.5$ cm⁴
 $tw = 5.0$ cm $W_y = 375.00$ cm³ $W_z = 250.00$ cm³
 $tf = 5.0$ cm

STRESSES

$\text{Sig}_{t,0,d} = N/A_x = -69.95/150.00 = -4.66$ MPa

ALLOWABLE STRESSES

$f_{t,0,d} = 10.14$ MPa

Factors and additional parameters

$kh = 1.10$ $k_{mod} = 0.60$ $K_{sys} = 1.00$



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:



About Z axis:

VERIFICATION FORMULAS:

$\text{Sig}_{t,0,d}/f_{t,0,d} = 4.66/10.14 = 0.46 < 1.00$ (6.1)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: *EN 1995-1:2004/A2:2014*
ANALYSIS TYPE: *Member Verification*

CODE GROUP:

MEMBER: *45 Montantes_45* POINT: *1* COORDINATE: *x = 0.00 L = 0.00 m*

LOADS:

Governing Load Case: *15 ELU Base W (1+2+3)*1.00+7*1.50*

MATERIAL *GL24h*

$g_M = 1.25$	$f_{m,0,k} = 24.00 \text{ MPa}$	$f_{t,0,k} = 19.20 \text{ MPa}$	$f_{c,0,k} = 24.00 \text{ MPa}$
$f_{v,k} = 3.50 \text{ MPa}$	$f_{t,90,k} = 0.50 \text{ MPa}$	$f_{c,90,k} = 2.50 \text{ MPa}$	$E_{0,\text{moyen}} = 11500.00 \text{ MPa}$
$E_{0,05} = 9600.00 \text{ MPa}$	$G_{\text{moyen}} = 650.00 \text{ MPa}$	Service class: <i>2</i>	Beta $c = 0.10$



SECTION PARAMETERS: *SQR 100x100*

$ht = 10.0 \text{ cm}$	$A_y = 66.67 \text{ cm}^2$	$A_z = 66.67 \text{ cm}^2$	$A_x = 100.00 \text{ cm}^2$
$bf = 10.0 \text{ cm}$	$I_y = 833.30 \text{ cm}^4$	$I_z = 833.30 \text{ cm}^4$	$I_x = 1408.3 \text{ cm}^4$
$tw = 5.0 \text{ cm}$	$W_y = 166.66 \text{ cm}^3$	$W_z = 166.66 \text{ cm}^3$	
$tf = 5.0 \text{ cm}$			

STRESSES

$\text{Sig}_{t,0,d} = N/A_x = -5.66/100.00 = -0.57 \text{ MPa}$

ALLOWABLE STRESSES

$f_{t,0,d} = 10.14 \text{ MPa}$

Factors and additional parameters

$kh = 1.10$ $k_{\text{mod}} = 0.60$ $K_{\text{sys}} = 1.00$



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:



About Z axis:

VERIFICATION FORMULAS:

$\text{Sig}_{t,0,d}/f_{t,0,d} = 0.57/10.14 = 0.06 < 1.00 \text{ (6.1)}$

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 46 Diagonais_46 POINT: 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

f_{v,k} = 3.50 MPa
MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00

E_{0,05} = 9600.00 MPa

G_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x150

ht = 15.0 cm

bf = 10.0 cm

tw = 5.0 cm

tf = 5.0 cm

A_y = 100.00 cm²

I_y = 2812.50 cm⁴

W_y = 375.00 cm³

A_z = 100.00 cm²

I_z = 1250.00 cm⁴

W_z = 250.00 cm³

A_x = 150.00 cm²

I_x = 2936.5 cm⁴

STRESSES

Sig_{c,0,d} = N/A_x = 71.48/150.00 = 4.77 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{c,0,d} = 11.52 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10

k_{mod} = 0.60

K_{sys} = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

L_Y = 3.29 m

Lambda_{rel Y} = 1.21

LF_Y = 3.29 m

Lambda_Y = 75.91

k_y = 1.28

k_{ey} = 0.59



About Z axis:

L_Z = 3.29 m

Lambda_{rel Z} = 1.45

LF_Z = 2.63 m

Lambda_Z = 91.10

k_z = 1.61

k_{ez} = 0.43

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 4.77/11.52 = 0.41 < 1.00 (6.23-4)

Sig_{c,0,d}/(k_c*f_{c,0,d}) = 4.77/(0.43*11.52) = 0.95 < 1.00 (6.23-4)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014
ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:
MEMBER: 47 Montantes_47 POINT: 1 COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:
Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h
gM = 1.25 f m,0,k = 24.00 MPa f t,0,k = 19.20 MPa f c,0,k = 24.00 MPa
f v,k = 3.50 MPa f t,90,k = 0.50 MPa f c,90,k = 2.50 MPa E 0,moyen = 11500.00 MPa
E 0,05 = 9600.00 MPa G moyen = 650.00 MPa Service class: 2 Beta c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x140

ht=14.0 cm Ay=93.33 cm² Az=93.33 cm² Ax=140.00 cm²
bf=10.0 cm Iy=2286.70 cm⁴ Iz=1166.70 cm⁴ Ix=2616.7 cm⁴
tw=5.0 cm Wy=326.67 cm³ Wz=233.34 cm³
tf=5.0 cm

STRESSES ALLOWABLE STRESSES
Sig_t,0,d = N/Ax = -48.32/140.00 = -3.45 MPa f t,0,d = 10.14 MPa

Factors and additional parameters
kh = 1.10 kmod = 0.60 Ksys = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:



About Z axis:

VERIFICATION FORMULAS:
Sig_t,0,d/f t,0,d = 3.45/10.14 = 0.34 < 1.00 (6.1)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: *EN 1995-1:2004/A2:2014*
ANALYSIS TYPE: *Member Verification*

CODE GROUP:
MEMBER: *49 Montantes_49* POINT: *1* COORDINATE: *x = 0.00 L = 0.00 m*

LOADS:
*Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90*

MATERIAL *GL24h*
gM = 1.25 $f_{m,0,k} = 24.00$ MPa $f_{t,0,k} = 19.20$ MPa $f_{c,0,k} = 24.00$ MPa
 $f_{v,k} = 3.50$ MPa $f_{t,90,k} = 0.50$ MPa $f_{c,90,k} = 2.50$ MPa $E_{0,moyen} = 11500.00$
MPa
 $E_{0,05} = 9600.00$ MPa $G_{moyen} = 650.00$ MPa Service class: *2* Beta c = 0.10



SECTION PARAMETERS: *SQR 100x140*

$h_t = 14.0$ cm $A_y = 93.33$ cm² $A_z = 93.33$ cm² $A_x = 140.00$ cm²
 $b_f = 10.0$ cm $I_y = 2286.70$ cm⁴ $I_z = 1166.70$ cm⁴ $I_x = 2616.7$ cm⁴
 $t_w = 5.0$ cm $W_y = 326.67$ cm³ $W_z = 233.34$ cm³
 $t_f = 5.0$ cm

STRESSES

$\text{Sig}_{t,0,d} = N/A_x = -33.73/140.00 = -2.41$ MPa

ALLOWABLE STRESSES

$f_{t,0,d} = 10.14$ MPa

Factors and additional parameters

$k_h = 1.10$ $k_{mod} = 0.60$ $K_{sys} = 1.00$



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:



About Z axis:

VERIFICATION FORMULAS:

$\text{Sig}_{t,0,d}/f_{t,0,d} = 2.41/10.14 = 0.24 < 1.00$ (6.1)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 51 Montantes_51 POINT: 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 10 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+6*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

f_{v,k} = 3.50 MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00

MPa

E_{0,05} = 9600.00 MPa

G_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm

bf=10.0 cm

tw=5.0 cm

tf=5.0 cm

A_y=66.67 cm²

I_y=833.30 cm⁴

W_y=166.66 cm³

A_z=66.67 cm²

I_z=833.30 cm⁴

W_z=166.66 cm³

A_x=100.00 cm²

I_x=1408.3 cm⁴

STRESSES

Sig_{c,0,d} = N/A_x = 25.68/100.00 = 2.57 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{c,0,d} = 11.52 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10

k_{mod} = 0.60

K_{sys} = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

LY = 1.50 m

Lambda_{rel} Y = 0.83

LFY = 1.50 m

Lambda Y = 51.96

ky = 0.87

key = 0.88



About Z axis:

LZ = 1.50 m

Lambda_{rel} Z = 0.66

LFZ = 1.20 m

Lambda Z = 41.57

kz = 0.74

kcZ = 0.94

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 2.57/11.52 = 0.22 < 1.00 (6.23-4)

Sig_{c,0,d}/(k_c*f_{c,0,d}) = 2.57/(0.88*11.52) = 0.25 < 1.00 (6.23-4)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014
ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:
MEMBER: 53 Montantes_53 **POINT:** 1 **COORDINATE:** x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:
Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h
gM = 1.25 f m,0,k = 24.00 MPa f t,0,k = 19.20 MPa f c,0,k = 24.00 MPa
f v,k = 3.50 MPa f t,90,k = 0.50 MPa f c,90,k = 2.50 MPa E 0,moyen = 11500.00 MPa
E 0,05 = 9600.00 MPa G moyen = 650.00 MPa Service class: 2 Beta c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm	Ay=66.67 cm ²	Az=66.67 cm ²	Ax=100.00 cm ²
bf=10.0 cm	Iy=833.30 cm ⁴	Iz=833.30 cm ⁴	Ix=1408.3 cm ⁴
tw=5.0 cm	Wy=166.66 cm ³	Wz=166.66 cm ³	
tf=5.0 cm			

STRESSES

Sig_c,0,d = N/Ax = 12.71/100.00 = 1.27 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f c,0,d = 11.52 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10 kmod = 0.60 Ksys = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

LY = 2.00 m	Lambda Y = 69.28
Lambda_rel Y = 1.10	ky = 1.15
LFY = 2.00 m	key = 0.68



About Z axis:

LZ = 2.00 m	Lambda Z = 55.43
Lambda_rel Z = 0.88	kz = 0.92
LFZ = 1.60 m	kez = 0.85

VERIFICATION FORMULAS:

$$\text{Sig}_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 1.27/11.52 = 0.11 < 1.00 \quad (6.23-4)$$

$$\text{Sig}_{c,0,d}/(k_c \cdot f_{c,0,d}) = 1.27/(0.68 \cdot 11.52) = 0.16 < 1.00 \quad (6.23-4)$$

Section OK !!!**TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS****CODE:** EN 1995-1:2004/A2:2014**ANALYSIS TYPE:** Member Verification**CODE GROUP:****MEMBER:** 54 Montantes_54 **POINT:** 1**COORDINATE:** x = 0.00 L = 0.00 m**LOADS:***Governing Load Case:* 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90**MATERIAL** GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPaf_{t,0,k} = 19.20 MPaf_{c,0,k} = 24.00 MPaf_{v,k} = 3.50 MPaf_{t,90,k} = 0.50 MPaf_{c,90,k} = 2.50 MPaE_{0,moyen} = 11500.00

MPa

E_{0,05} = 9600.00 MPaG_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10**SECTION PARAMETERS: SQR 100x100**

ht=10.0 cm

bf=10.0 cm

tw=5.0 cm

tf=5.0 cm

Ay=66.67 cm²Iy=833.30 cm⁴Wy=166.66 cm³Az=66.67 cm²Iz=833.30 cm⁴Wz=166.66 cm³Ax=100.00 cm²Ix=1408.3 cm⁴**STRESSES**Sig_{c,0,d} = N/Ax = 34.07/100.00 = 3.41 MPa**ALLOWABLE STRESSES**f_{c,0,d} = 11.52 MPa**Factors and additional parameters**k_h = 1.10k_{mod} = 0.60K_{sys} = 1.00**LATERAL BUCKLING PARAMETERS:****BUCKLING PARAMETERS:**

About Y axis:

LY = 2.17 m

Lambda_{rel} Y = 1.19

Lambda Y = 75.06

ky = 1.26



About Z axis:

LZ = 2.17 m

Lambda_{rel} Z = 0.96

Lambda Z = 60.05

kz = 0.99

LFY = 2.17 m

ky = 0.60

LFZ = 1.73 m

kcz = 0.80

VERIFICATION FORMULAS:

$$\text{Sig}_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 3.41/11.52 = 0.30 < 1.00 \quad (6.23-4)$$

$$\text{Sig}_{c,0,d}/(k_c * f_{c,0,d}) = 3.41/(0.60 * 11.52) = 0.49 < 1.00 \quad (6.23-4)$$

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 55 Montantes_55 **POINT:** 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

f_{v,k} = 3.50 MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00

MPa

E_{0,05} = 9600.00 MPa

G_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm

bf=10.0 cm

tw=5.0 cm

tf=5.0 cm

A_y=66.67 cm²

I_y=833.30 cm⁴

W_y=166.66 cm³

A_z=66.67 cm²

I_z=833.30 cm⁴

W_z=166.66 cm³

A_x=100.00 cm²

I_x=1408.3 cm⁴

STRESSES

$$\text{Sig}_{c,0,d} = N/A_x = 44.98/100.00 = 4.50 \text{ MPa}$$

ALLOWABLE STRESSES

$$f_{c,0,d} = 11.52 \text{ MPa}$$

Factors and additional parameters

kh = 1.10

k_{mod} = 0.60

K_{sys} = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

LY = 2.33 m

Lambda_rel Y = 1.29

LFY = 2.33 m

Lambda Y = 80.83

ky = 1.38

kcy = 0.54



About Z axis:

LZ = 2.33 m

Lambda_rel Z = 1.03

LFZ = 1.87 m

Lambda Z = 64.66

kz = 1.07

kcZ = 0.74

VERIFICATION FORMULAS:

$\text{Sig}_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 4.50/11.52 = 0.39 < 1.00$ (6.23-4)]

$\text{Sig}_{c,0,d}/(k_c * f_{c,0,d}) = 4.50/(0.54 * 11.52) = 0.73 < 1.00$ (6.23-4)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 56 Montantes_56 **POINT:** 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 10 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+6*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

f_{v,k} = 3.50 MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00 MPa

E_{0,05} = 9600.00 MPa

G_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm

bf=10.0 cm

tw=5.0 cm

tf=5.0 cm

A_y=66.67 cm²

I_y=833.30 cm⁴

W_y=166.66 cm³

A_z=66.67 cm²

I_z=833.30 cm⁴

W_z=166.66 cm³

A_x=100.00 cm²

I_x=1408.3 cm⁴

STRESSES

$\text{Sig}_{c,0,d} = N/A_x = 17.56/100.00 = 1.76$ MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{c,0,d} = 11.52 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10

kmod = 0.60

K_{sys} = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

LY = 1.67 m

Lambda_rel Y = 0.92

LFY = 1.67 m

Lambda Y = 57.74

ky = 0.95

key = 0.83



About Z axis:

LZ = 1.67 m

Lambda_rel Z = 0.74

LFZ = 1.33 m

Lambda Z = 46.19

kz = 0.79

kez = 0.92

VERIFICATION FORMULAS:

$\text{Sig}_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 1.76/11.52 = 0.15 < 1.00$ (6.23-4)]

$\text{Sig}_{c,0,d}/(k_c * f_{c,0,d}) = 1.76/(0.83 * 11.52) = 0.18 < 1.00$ (6.23-4)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: [EN 1995-1:2004/A2:2014](#)

ANALYSIS TYPE: [Member Verification](#)

CODE GROUP:

MEMBER: [57 Montantes_57](#) **POINT:** 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 10 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+6*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

f_{v,k} = 3.50 MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00

MPa

E_{0,05} = 9600.00 MPa

G_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm

bf=10.0 cm

tw=5.0 cm

tf=5.0 cm

A_y=66.67 cm²

I_y=833.30 cm⁴

W_y=166.66 cm³

A_z=66.67 cm²

I_z=833.30 cm⁴

W_z=166.66 cm³

A_x=100.00 cm²

I_x=1408.3 cm⁴

STRESSES

$\text{Sig}_{c,0,d} = N/A_x = 3.96/100.00 = 0.40$ MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{c,0,d} = 11.52 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10

k_{mod} = 0.60

K_{sys} = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

LY = 1.83 m Lambda Y = 63.51
 Lambda_rel Y = 1.01 ky = 1.05
 LFY = 1.83 m kcy = 0.76



About Z axis:

LZ = 1.83 m Lambda Z = 50.81
 Lambda_rel Z = 0.81 kz = 0.85
 LFZ = 1.47 m kcz = 0.89

VERIFICATION FORMULAS:

$\text{Sig}_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 0.40/11.52 = 0.03 < 1.00 \quad (6.23-4)$

$\text{Sig}_{c,0,d}/(k_c * f_{c,0,d}) = 0.40/(0.76 * 11.52) = 0.05 < 1.00 \quad (6.23-4)$

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 58 Diagonais_58 **POINT:** 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25 f_{m,0,k} = 24.00 MPa f_{t,0,k} = 19.20 MPa f_{c,0,k} = 24.00 MPa
 f_{v,k} = 3.50 MPa f_{t,90,k} = 0.50 MPa f_{c,90,k} = 2.50 MPa E_{0,moyen} = 11500.00 MPa
 E_{0,05} = 9600.00 MPa G_{moyen} = 650.00 MPa Service class: 2 Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm Ay=66.67 cm² Az=66.67 cm² Ax=100.00 cm²
 bf=10.0 cm Iy=833.30 cm⁴ Iz=833.30 cm⁴ Ix=1408.3 cm⁴
 tw=5.0 cm Wy=166.66 cm³ Wz=166.66 cm³

STRESSES

$\text{Sig}_{t,0,d} = N/A_x = -54.78/100.00 = -5.48 \text{ MPa}$

ALLOWABLE STRESSES

f_{t,0,d} = 10.14 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10 kmod = 0.60 Ksys = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:



About Z axis:

VERIFICATION FORMULAS:

$\text{Sig}_{t,0,d}/f_{t,0,d} = 5.48/10.14 = 0.54 < 1.00$ (6.1)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 59 Diagonais_59 **POINT:** 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

f_{v,k} = 3.50 MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00

MPa

E_{0,05} = 9600.00 MPa

G_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm

bf=10.0 cm

tw=5.0 cm

tf=5.0 cm

A_y=66.67 cm²

I_y=833.30 cm⁴

W_y=166.66 cm³

A_z=66.67 cm²

I_z=833.30 cm⁴

W_z=166.66 cm³

A_x=100.00 cm²

I_x=1408.3 cm⁴

STRESSES

$\text{Sig}_{t,0,d} = N/A_x = -42.60/100.00 = -4.26$ MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{t,0,d} = 10.14 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10 kmod = 0.60 Ksys = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:



About Z axis:

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_{t,0,d}/f_{t,0,d} = 4.26/10.14 = 0.42 < 1.00 (6.1)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 60 Diagonais_60 **POINT:** 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

f_{v,k} = 3.50 MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00

MPa

E_{0,05} = 9600.00 MPa

G_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm

bf=10.0 cm

tw=5.0 cm

tf=5.0 cm

A_y=66.67 cm²

I_y=833.30 cm⁴

W_y=166.66 cm³

A_z=66.67 cm²

I_z=833.30 cm⁴

W_z=166.66 cm³

A_x=100.00 cm²

I_x=1408.3 cm⁴

STRESSES

Sig_{t,0,d} = N/A_x = -29.09/100.00 = -2.91 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{t,0,d} = 10.14 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10 kmod = 0.60 Ksys = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:



About Z axis:

VERIFICATION FORMULAS:

$\text{Sig}_{t,0,d}/f_{t,0,d} = 2.91/10.14 = 0.29 < 1.00$ (6.1)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 61 Diagonais_61 **POINT:** 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

f_{v,k} = 3.50 MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00

MPa

E_{0,05} = 9600.00 MPa

G_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm

bf=10.0 cm

tw=5.0 cm

tf=5.0 cm

A_y=66.67 cm²

I_y=833.30 cm⁴

W_y=166.66 cm³

A_z=66.67 cm²

I_z=833.30 cm⁴

W_z=166.66 cm³

A_x=100.00 cm²

I_x=1408.3 cm⁴

STRESSES

$\text{Sig}_{c,0,d} = N/A_x = 13.11/100.00 = 1.31$ MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{c,0,d} = 11.52 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10 kmod = 0.60 Ksys = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

LY = 2.48 m

Lambda_rel Y = 1.37

LFY = 2.48 m

Lambda Y = 85.83

ky = 1.49

key = 0.48



About Z axis:

LZ = 2.48 m

Lambda_rel Z = 1.09

LFZ = 1.98 m

Lambda Z = 68.66

kz = 1.14

kez = 0.69

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_c,0,d/fc,0,d = 1.31/11.52 = 0.11 < 1.00 (6.23-4)]

Sig_c,0,d/(kc*fc,0,d) = 1.31/(0.48*11.52) = 0.24 < 1.00 (6.23-4)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 63 Diagonais_63 **POINT:** 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 15 ELU Base W (1+2+3)*1.00+7*1.50

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f v,k = 3.50 MPa

MPa

E 0,05 = 9600.00 MPa

f m,0,k = 24.00 MPa

f t,90,k = 0.50 MPa

G moyen = 650.00 MPa

f t,0,k = 19.20 MPa

f c,90,k = 2.50 MPa

Service class: 2

f c,0,k = 24.00 MPa

E 0,moyen = 11500.00

Beta c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x100

ht=10.0 cm

bf=10.0 cm

tw=5.0 cm

tf=5.0 cm

Ay=66.67 cm²

Iy=833.30 cm⁴

Wy=166.66 cm³

Az=66.67 cm²

Iz=833.30 cm⁴

Wz=166.66 cm³

Ax=100.00 cm²

Ix=1408.3 cm⁴

STRESSES $\text{Sig}_{c,0,d} = N/A_x = 4.38/100.00 = 0.44 \text{ MPa}$ **ALLOWABLE STRESSES** $f_{c,0,d} = 11.52 \text{ MPa}$

Factors and additional parameters $kh = 1.10 \quad k_{mod} = 0.60 \quad K_{sys} = 1.00$

**LATERAL BUCKLING PARAMETERS:**

BUCKLING PARAMETERS:

About Y axis:

 $LY = 2.36 \text{ m}$ $\text{Lambda}_{rel Y} = 1.30$ $LFY = 2.36 \text{ m}$ $\text{Lambda Y} = 81.65$ $k_y = 1.39$ $k_{ey} = 0.53$ 

About Z axis:

 $LZ = 2.36 \text{ m}$ $\text{Lambda}_{rel Z} = 1.04$ $LFZ = 1.89 \text{ m}$ $\text{Lambda Z} = 65.32$ $k_z = 1.08$ $k_{cz} = 0.74$

VERIFICATION FORMULAS: $\text{Sig}_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 0.44/11.52 = 0.04 < 1.00 \quad (6.23-4)$ $\text{Sig}_{c,0,d}/(k_c * f_{c,0,d}) = 0.44/(0.53 * 11.52) = 0.07 < 1.00 \quad (6.23-4)$

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: [EN 1995-1:2004/A2:2014](#)**ANALYSIS TYPE:** [Member Verification](#)

CODE GROUP:**MEMBER:** 65 Diagonais_65 **POINT:** 1**COORDINATE:** x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:*Governing Load Case:* 10 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+6*0.90

MATERIAL GL24h $gM = 1.25$ $f_{v,k} = 3.50 \text{ MPa}$ MPa $E_{0,05} = 9600.00 \text{ MPa}$ $f_{m,0,k} = 24.00 \text{ MPa}$ $f_{t,90,k} = 0.50 \text{ MPa}$ $G_{moyen} = 650.00 \text{ MPa}$ $f_{t,0,k} = 19.20 \text{ MPa}$ $f_{c,90,k} = 2.50 \text{ MPa}$

Service class: 2

 $f_{c,0,k} = 24.00 \text{ MPa}$ $E_{0,moyen} = 11500.00$ Beta c = 0.10

**SECTION PARAMETERS: SQR 100x100** $ht = 10.0 \text{ cm}$

bf=10.0 cm
tw=5.0 cm
tf=5.0 cm

Ay=66.67 cm²
Iy=833.30 cm⁴
Wy=166.66 cm³

Az=66.67 cm²
Iz=833.30 cm⁴
Wz=166.66 cm³

Ax=100.00 cm²
Ix=1408.3 cm⁴

STRESSES

Sig_{t,0,d} = N/Ax = -27.10/100.00 = -2.71 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{t,0,d} = 10.14 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10 kmod = 0.60 K_{sys} = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:



About Z axis:

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_{t,0,d}/f_{t,0,d} = 2.71/10.14 = 0.27 < 1.00 (6.1)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 66 Diagonais_66 **POINT:** 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_{m,0,k} = 24.00 MPa

f_{t,0,k} = 19.20 MPa

f_{c,0,k} = 24.00 MPa

f_{v,k} = 3.50 MPa
MPa

f_{t,90,k} = 0.50 MPa

f_{c,90,k} = 2.50 MPa

E_{0,moyen} = 11500.00

E_{0,05} = 9600.00 MPa

G_{moyen} = 650.00 MPa

Service class: 2

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x140

ht=14.0 cm
bf=10.0 cm

Ay=93.33 cm²

Az=93.33 cm²

Ax=140.00 cm²

tw=5.0 cm
tf=5.0 cm

Iy=2286.70 cm⁴
Wy=326.67 cm³

Iz=1166.70 cm⁴
Wz=233.34 cm³

Ix=2616.7 cm⁴

STRESSES

Sig_c,0,d = N/Ax = 39.73/140.00 = 2.84 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_c,0,d = 11.52 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10 kmod = 0.60 Ksys = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

LY = 3.00 m

Lambda_rel Y = 1.18

LFY = 3.00 m

Lambda Y = 74.34

ky = 1.24

kcy = 0.61



About Z axis:

LZ = 3.00 m

Lambda_rel Z = 1.33

LFZ = 2.40 m

Lambda Z = 83.27

kz = 1.43

kcZ = 0.51

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_c,0,d/f_c,0,d = 2.84/11.52 = 0.25 < 1.00 (6.23-4)

Sig_c,0,d/(kc*f_c,0,d) = 2.84/(0.51*11.52) = 0.48 < 1.00 (6.23-4)

Section OK !!!

TIMBER STRUCTURE CALCULATIONS

CODE: EN 1995-1:2004/A2:2014

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 67 Diagonais_67 **POINT:** 1

COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 12 ELU Base Sobrecarga (1+2+3)*1.35+4*1.50+8*0.90

MATERIAL GL24h

gM = 1.25

f_v,k = 3.50 MPa

MPa

E_0,05 = 9600.00 MPa

f_m,0,k = 24.00 MPa

f_t,90,k = 0.50 MPa

G_moyen = 650.00 MPa

f_t,0,k = 19.20 MPa

f_c,90,k = 2.50 MPa

Service class: 2

f_c,0,k = 24.00 MPa

E_0,moyen = 11500.00

Beta_c = 0.10



SECTION PARAMETERS: SQR 100x140

ht=14.0 cm
bf=10.0 cm
tw=5.0 cm
tf=5.0 cm

Ay=93.33 cm²
Iy=2286.70 cm⁴
Wy=326.67 cm³

Az=93.33 cm²
Iz=1166.70 cm⁴
Wz=233.34 cm³

Ax=140.00 cm²
Ix=2616.7 cm⁴

STRESSES

Sig_{c,0,d} = N/Ax = 56.18/140.00 = 4.01 MPa

ALLOWABLE STRESSES

f_{c,0,d} = 11.52 MPa

Factors and additional parameters

kh = 1.10 kmod = 0.60 K_{sys} = 1.00



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About Y axis:

LY = 3.14 m
Lambda_{rel} Y = 1.24
LFY = 3.14 m

Lambda Y = 77.81
ky = 1.31
kcy = 0.57



About Z axis:

LZ = 3.14 m
Lambda_{rel} Z = 1.39
LFZ = 2.52 m

Lambda Z = 87.15
kz = 1.52
kcz = 0.47

VERIFICATION FORMULAS:

Sig_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 4.01/11.52 = 0.35 < 1.00 (6.23-4)]

Sig_{c,0,d}/(kc*f_{c,0,d}) = 4.01/(0.47*11.52) = 0.74 < 1.00 (6.23-4)

Section OK !!!

ANEXO A

Declaração ambiental do produto de aço estrutural do grupo CELSA.

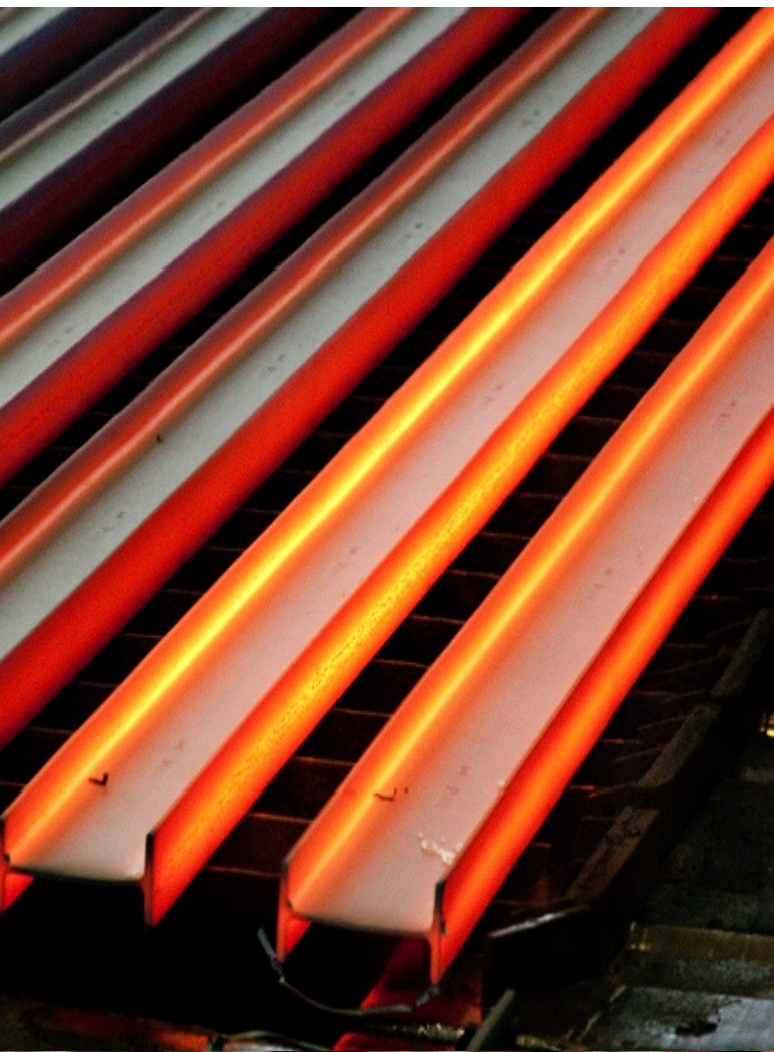
ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION

as per ISO 14025 and EN 15804+A1




Owner of the Declaration	CELSA Group
Programme holder	Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU)
Publisher	Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU)
Declaration number	EPD-CEL-20200277-IBD1-EN
Issue date	05/07/2021
Valid to	04/07/2026

Structural section steel
CELSA Group

www.ibu-epd.com | <https://epd-online.com>



1. General Information

<p>CELSA Group</p> <hr/> <p>Programme holder IBU – Institut Bauen und Umwelt e.V. Panoramastr. 1 10178 Berlin Germany</p> <hr/> <p>Declaration number EPD-CEL-20200277-IBD1-EN</p> <hr/> <p>This declaration is based on the product category rules: Structural steels, 11.2017 (PCR checked and approved by the SVR)</p> <hr/> <p>Issue date 05/07/2021</p> <hr/> <p>Valid to 04/07/2026</p> <hr/> <p></p> <hr/> <p>Dipl. Ing. Hans Peters (chairman of Institut Bauen und Umwelt e.V.)</p> <hr/> <p></p> <hr/> <p>Dr. Alexander Röder (Managing Director Institut Bauen und Umwelt e.V.)</p>	<p>Structural section steel</p> <hr/> <p>Owner of the declaration CELSA Barcelona, S.L. Carrer de la Ferralla, 2, Poligono Industrial San Vicente 08755 Castelbisbal Barcelona (Spain)</p> <p>CELSA HUTA OSTROWIEC SP. Z.O.O. ul. Samsonowicza 2 27400 OSTROWIEC SWIETOKRZYSKI POLAND</p> <hr/> <p>Declared product / declared unit Structural steel section/ 1 ton</p> <hr/> <p>Scope: This EPD represents a weighted average of the production of structural steel sections by the CELSA Group at the 2 sites: Huta Ostrowiec, Poland and Barcelona, Spain.</p> <p>The owner of the declaration shall be liable for the underlying information and evidence; the IBU shall not be liable with respect to manufacturer information, life cycle assessment data and evidences. The EPD was created according to the specifications of <i>EN 15804+A1</i>. In the following, the standard will be simplified as <i>EN 15804</i>.</p> <hr/> <p>Verification</p> <table border="1"> <tr> <td colspan="2">The standard <i>EN 15804</i> serves as the core PCR</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Independent verification of the declaration and data according to <i>ISO 14025:2010</i></td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> internally</td> <td><input checked="" type="checkbox"/> externally</td> </tr> </table> <hr/> <p></p> <hr/> <p>Dr.-Ing. Andreas Ciroth (Independent verifier)</p>	The standard <i>EN 15804</i> serves as the core PCR		Independent verification of the declaration and data according to <i>ISO 14025:2010</i>		<input type="checkbox"/> internally	<input checked="" type="checkbox"/> externally
The standard <i>EN 15804</i> serves as the core PCR							
Independent verification of the declaration and data according to <i>ISO 14025:2010</i>							
<input type="checkbox"/> internally	<input checked="" type="checkbox"/> externally						

2. Product

2.1 Information about the enterprise

CELSA Group™ is one of the leading European multinationals in long steel products, the most diversified and vertically integrated. It currently operates in 11 countries and has six large business groups with steel mills, rolling mills, transformation plants, distribution companies, service centres and recycling companies.

CELSA Group™ production is based exclusively in electric arc furnaces, using scrap as raw material in 100% of products. Thanks to vertical integration, it covers the complete cycle of steel recycling; from the separation and recovery of scrap to its transformation into new steel products.

CELSA Huta Ostrowiec (Poland) and CELSA Barcelona (Spain) belong to this group. Both are large scrap-recycling companies. Their production process involves Electric Arc Furnaces (EAF), Ladle Furnaces (LF), continuous casting and hot rolling mills in order to provide various finished products, such as wire rod, smooth rods, corrugated rods, structural profiles, flats and mini flats.

In this case, the product declared is structural section steel. This product is used mostly in the construction of steel structures and the manufacturing of steel structural components of buildings, civil work and industry.

2.2 Product description/Product definition

The product declared is 'structural section steel'. The production process used is the Electric Arc Furnace (EAF). This route, used by CELSA for the production of structural steel, is based on the direct melting of scrap with an Electric Arc Furnace, which is subsequently processed in rolling mills in order to obtain the finished products.

The steel section is hot rolled into structural steel in various shapes (I, H, L, U, T, flats, etc.)

Technical properties (strength level) are: from quality S235 to S960. No metallic or organic coating.

For the placing on the market of the product in the European Union/European Free Trade Association (EU/EFTA) (with the exception of Switzerland) Regulation (EU) No. 305/2011 (CPR) applies. The products need a Declaration of Performance taking into consideration the harmonised European standard EN 10025 and the CE-marking. Related to EN10025, applies the following standards:

- EN 10025-1:2004: Hot rolled products of structural steels. Part 1: General technical delivery conditions.
- EN 10025-2:2019: Hot rolled products of structural steels. Part 2 Technical delivery conditions for non-alloy structural steels.

See further product standards in section "2.4 Technical Data".

For the application and use, the respective national provisions apply.

2.3 Application

Steel products are used in the majority of buildings and civil works, mainly in reinforced structural concrete and structural steel constructions. In addition to the construction sector there are numerous applications in very diverse sectors, such as transport, agriculture, automotive, livestock farming, electricity pylons and cranes, etc.

Examples:

- Bridges (railway bridge, road bridge, pedestrian bridge, etc.)
- Multi-storey buildings (offices, residential, shops, car parks, high rise, etc.)
- Single-storey buildings (industrial and storage halls, etc.)
- Other structures (warehouses, industrial and commercial buildings)

2.4 Technical Data

Constructional data

Basic product characteristics according to relevant product standards: EN 10025, ASTM A29, A36, A529, A572 and A992, etc.

Name	Value	Unit
Thermal conductivity at 20°	52	W/(mK)
Melting point	1495	°C
Minimum elongation	17	%
Density	7,86	gr/cm ³
Modulus of elasticity	30	Psi x 10 ⁶
Coefficient of thermal expansion	11,7	(°C-1) x 10 ⁻⁶
Electrical conductivity at 20 °C	5,9	[(Ω.m)-1x10 ⁶]
Minimum yield strength	235	MPa
Minimum tensile strength	360	MPa
Tensile strength	57	Ksi

Performance data of the product in accordance with the declaration of performance with respect to its essential characteristics according to:

- EN 10365:2017 Hot rolled steel channels, I and H sections. Dimensions and masses.
- EN 10056-1:2017 Structural steel equal and unequal leg angles. Dimensions.
- EN 10056-2:1993 Structural steel equal and unequal leg angles. Part 2: Tolerances on shape and dimensions.
- EN 10058:2008 Hot rolled flat steel bars for general purposes. Dimensions and tolerances on shape and dimensions.
- EN 10059:2003 Hot rolled square steel bars for general purposes. Dimensions and tolerances on shape and dimensions.
- EN 10060:2003 Hot rolled round steel bars for general purposes. Dimensions and tolerances on shape and dimensions.
- EN 10024:1995 Hot rolled taper flange I sections. Tolerances on shape and dimensions.
- EN 10034:1993 Structural steel I and H sections. Tolerances on shape and dimensions.
- EN 10279:2000 Hot rolled steel channels. Tolerances on shape, dimension and mass.

2.5 Delivery status

Delivery conditions in accordance with customer requirements, intended use, and possible technical regulations and certification requirements, when applicable. The dimensions/ quantities of the products covered in this EPD are as follows:

- The packages are made from 1 to 36 units.
- The packages have a weight from 1500 kg to 5500 kg.

The supply lengths are between 6,0 m and 22,1 m.

2.6 Base materials/Ancillary materials

Structural steels produced by the CELSA Group are low-alloy steel products. The typical content of carbon is between 0.08 and 0.1%. The share of other elements besides iron is typically below 1%.

Auxiliary substances / additives

Calcium oxide, anthracite, HBI (hot briquetted Iron), coke from coal, and ferroalloys (ferrosilicon silicomanganese, calcium fluoride, ferroniobium, ferrovanadium, ferrotitanium, ferroboron and silicocalcium)

Percentages in weight of these additives depend on the required quality of the finished product.

Material explanation

Steel scrap is a secondary raw material, defined in different qualities, depending on the composition (Fe content) and certain characteristics (plate, section steel, galvanized sheets, etc.).

Anthracite and calcium oxide are natural raw materials, in different qualities, depending of course on their composition and structure available. The various alloys and coke from coal are natural resources, partially treated for use in steel production.

Alloys are, among other things made from recycled material.

Raw material extraction and origin

Scrap metal and, in part, the alloys are compiled following the dismantling and crushing plants, other ultimate consumers (post-consumer), steel production and manufacturing process of steel products (pre-consumer) and the internal preparation of scrap for steelmaking. Calcium oxide, carbon and ferroalloys are usually extracted from the soil as natural raw materials.

Availability of raw materials

Recycling of steel scrap saves primary material. Steel scrap is available and traded globally. Europe is in fact net exporter of steel scrap.

2.7 Manufacture

The product declared is structural section steel, produced by two sites: CELSA Huta Ostrowiec located in Poland and CELSA Barcelona located in Spain. Both are head companies of CELSA Group™.

In both cases, the plants melt ferrous scrap in an Electric Arc Furnace to obtain liquid steel. The chemical adjustment of molten steel is performed in Ladle Furnaces (LF), where the steel is alloyed (e.g. approx. 1% Mn, 0.2% Si) and micro alloyed (e.g., 0.01% V) to achieve the appropriate chemical composition for the product and to give the steel specific properties (quality, etc.).

At the end phase of steel mill, molten steel casted into a semi-finished product in a continuous casting machine. The semi-finished product (billet) is then hot rolled in order to obtain the structural steel in various shapes (I, H, L, U, T, flats, etc.). The final performance characteristics are reached by thermo-mechanical process.

The two sites, CELSA Huta Ostrowiec and CELSA Barcelona, operates under a Quality Management Systems in accordance with *ISO9001* (independent third party certification).

Manufacturing the building product

Scrap metal is melted in an electric arc furnace to obtain liquid steel. Refinement is used (reduction of sulphur and phosphorus) and can be alloyed (e.g. approx. 1% Mn, 0.2% Si) and micro alloyed (e.g., 0.01% V) to give the steel specific properties. At the end of the production of steel, molten steel is transformed into a semi-finished product with a continuous casting system. The semi-finished product (billet) is hot rolled to obtain the final product.

2.8 Environment and health during manufacturing

The production sites are firmly committed to the safety of their workers and to the preservation of the environment in the areas where they operate. This is evidenced by the implementation and maintenance of management systems in accordance with international standards certified by third parties.

In terms of safety, both plants have implemented and certified safety management systems in accordance with *ISO 45001:2018*.

In terms of the environment, both plants have implemented and certified environmental management systems based on *ISO 14001:2015*.

In addition to the above, the extended commitment to sustainability is reflected in the certification of both facilities to the SustSteel scheme (www.steel-sustainability.org/esust), which is a private marks and certification systems related to sustainability and corporate responsibility within the steel construction products sector.

Health protection Production

Sostenibilidad Siderúrgica Management System: independent third party certification scheme which covers health and safety aspects, among other sustainability aspects beyond national regulations (<http://sostenibilidadsiderurgica.com>).

Environmental protection Production

Environmental management (EM) in accordance with *ISO 14001* and Sostenibilidad Siderúrgica Management System (<http://sostenibilidadsiderurgica.com>).

2.9 Product processing/Installation

Noise reduction

In the fabrication process, we identify the noise sources adopting all the technical measures in order to reduce their environmental impact, prioritizing the source encapsulation.

Occupational Safety/Environmental Protection

When handling and using the products, no additional means to protect health are required beyond the usual occupational safety measures.

No environmental impacts occur when working with or using these products under normal conditions of use. No special measures are necessary for the protection of the environment.

Residual material

Residual materials are separated for in-house recycling. The steel scrap can be recycled almost completely.

2.10 Packaging

The product packaging is the minimum according to safety criteria, in order to handling and transport the product with security and for its identification until the customer delivery. The packaging is based on wooden pallets, labels and metal strips to tie the product. Most of the packaging is mono-material to facilitate their recycling, once they become waste.

2.11 Condition of use

The main constituent of structural steel sections is iron. Carbon steel, which is an alloy that consists mostly of iron, has carbon as alloying element in a percentage by weight depending on the required steel grade of the finished product. In minor quantities other alloying elements are used, such as manganese, chromium and vanadium.

The constituents are those referred to in Chapter 2.6.

2.12 Environment and health during use

Health aspects:

Steel products, under normal conditions of use, do not cause adverse health effects.

Environmental aspects:

If the steel products are used according to their intended use, under normal conditions, there are no significant environmental impacts known to water, air/ atmosphere and soil.

2.13 Reference service life

The use and maintenance requirements are not based on the steel products but on the specific design and application.

Design of construction elements using steel products usually considers the specific atmospheric and corrosive environment, and provides the necessary corrosion protection for the desired useful life.

2.14 Extraordinary effects

Fire

The product meets the requirements of building material safety class A1 (non-flammable according to *DIN EN 13501*).

Fire protection

Name	Value
Classification according to DIN EN 13501-1	A1

Water

Steel is stable, insoluble and does not emit substances into water. In the presence of oxygen in the water, steel is corroded (= slow oxidation).

Mechanical destruction

No relevant information.

2.15 Re-use phase

Structural steel can be reused after its recovery. In particular when steel constructions are properly designed to facilitate disassembly and re-use at the end of their useful lives.

Currently, around 14% of the considered steel products are re-used after dismantling *EU COMMISSION, LCA STEEL CONSTRUCTION*.

Recycling:

Steel is 100% recyclable and scrap can be converted to the same (or higher or lower) quality of steel depending upon the metallurgy and processing of the recycling route.

Currently, around 83% of the products are recycled *EU COMMISSION, LCA STEEL CONSTRUCTION*.

2.16 Disposal

Due to its high value as a resource, steel scrap is not disposed of, but instead in a well-established cycle fed to reuse or recycling. However, in case of disposal (disposal code: 17 04 03 *ECW*) no environmental impacts are expected.

2.17 Further information

Additional information on structural steel and can be obtained from CELSA GROUP™. (www.celsagroup.com).

3. LCA: Calculation rules

3.1 Declared Unit

The declaration refers to the functional unit of 1 metric ton of structural section steel as specified in Part B requirements on the EPD for structural steels.

Declared unit

Name	Value	Unit
Declared unit	1	t
Density	7850	kg/m ³
Conversion factor to 1 kg (mass in kg per declared unit)	1000	-

3.2 System boundary

Type of the EPD: cradle-to-gate - with options. Module A1-A3 were considered.

Modules A1-A3 of the production include the following:

- The provision of resources, additives, and energy
- Transport of resources and additives to the production site
- Production processes on-site including energy, production of additives, disposal of production residues, and consideration of related emissions
- Recycling of production/manufacturing scrap. Steel scrap is assumed to reach the end-of-waste status once it is shredded and sorted, thus becomes an input to the product system in the inventory.

3.3 Estimates and assumptions

There are no assumptions and approximations important for the interpretation.

3.4 Cut-off criteria

All information from the data collection process has been considered, covering used materials, thermal energy, electrical energy and diesel consumption that are known to make a significant contribution to the environmental impact of the products studied. Measurement of on-site emissions took place and those emissions were considered. The specific emissions that are linked to the provision of thermal and electrical energy are considered in the specific processes.

All reported data were incorporated and modelled using the best available LCI data. Data for the sites were cross-checked with one another to identify potential data gaps. No processes, materials or emissions that are known to make a significant contribution to the environmental impact of the products studied have been omitted. On this basis, there is no evidence to suggest that input or outputs contributing more than 1% to the overall mass or energy of the system or that are environmentally significant have been omitted. It can be assumed, that all excluded flows contribute less than 5% to the impact assessment categories.

Packaging materials and its transportation are neglected due to low contribution to the overall life cycle results.

3.5 Background data

For life cycle modelling of the considered products, the GaBi Software System for Life Cycle Engineering, developed by Sphera Solutions GmbH, is used (*GaBi 2020*). The GaBi database contains consistent and

documented datasets which can be viewed in the online GaBi documentation (*GaBi 2020 Documentation*). To ensure comparability of results in the LCA, the basic data of *GaBi 2020* database were used for energy, transportation and auxiliary materials. All relevant background datasets are taken from the GaBi database, content version 2020.2.

3.6 Data quality

Results are based on annual production data collected for the fiscal year 2018 for the CELSA sites under study (Barcelona, Spain and Ostrowiec Swietokrzyski, Poland). Weighting was applied according to production volume.

3.7 Period under review

This study is based on high-quality primary data, collected by CELSA for the period of 2018. Data were delivered in form of excel tables and manually integrated into the GaBi Software (*GaBi 2020*) with two iterations of data quality check, based on raw manufacturing data as well as based on cradle-to-gate data.

3.8 Allocation

The allocation method used here was developed by the World Steel Association and EUROFER to be in line with *EN 15804*. The methodology is based on physical allocation and takes account of the manner in which changes in inputs and outputs affect the production of co-products. The method also takes account of material flows that carry specific inherent properties. This method is deemed to provide the most representative partitioning of the processes involved. Economic allocation was not considered, as slag is considered a low-value co-product under *EN 15804*, however, as neither hot metal nor slag are tradable products, economic allocation would most likely be based on estimates. *Worldsteel & EUROFER 2013* also highlight those companies purchasing and processing slag work on long-term contracts which do not follow regular market dynamics of supply and demand. This approach deviates from the standard procedure in *EN 15804* but represents a conservative approach.

3.9 Comparability

Basically, a comparison or an evaluation of EPD data is only possible if all the data sets to be compared were created according to *EN 15804* and the building context, respectively the product-specific characteristics of performance, are taken into account.

4. LCA: Scenarios and additional technical information

Since no scenarios are declared, no additional technical information is required.

5. LCA: Results

DESCRIPTION OF THE SYSTEM BOUNDARY (X = INCLUDED IN LCA; MND = MODULE NOT DECLARED; MNR = MODULE NOT RELEVANT)

PRODUCT STAGE			CONSTRUCTION PROCESS STAGE		USE STAGE							END OF LIFE STAGE				BENEFITS AND LOADS BEYOND THE SYSTEM BOUNDARIES
Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport from the gate to the site	Assembly	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	De-construction demolition	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse-Recovery-Recycling-potential
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	MND	MND	MND	MND	MNR	MNR	MNR	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND

RESULTS OF THE LCA - ENVIRONMENTAL IMPACT according to EN 15804+A1: 1 ton structural section steel

Parameter	Unit	A1-A3
Global warming potential	[kg CO ₂ -Eq.]	5.58E+2
Depletion potential of the stratospheric ozone layer	[kg CFC11-Eq.]	4.05E-12
Acidification potential of land and water	[kg SO ₂ -Eq.]	1.60E+0
Eutrophication potential	[kg (PO ₄) ³ -Eq.]	1.34E-1
Formation potential of tropospheric ozone photochemical oxidants	[kg ethene-Eq.]	1.16E-1
Abiotic depletion potential for non-fossil resources	[kg Sb-Eq.]	1.29E-4
Abiotic depletion potential for fossil resources	[MJ]	6.16E+3

RESULTS OF THE LCA - INDICATORS TO DESCRIBE RESOURCE USE according to EN 15804+A1: 1 ton structural section steel

Parameter	Unit	A1-A3
Renewable primary energy as energy carrier	[MJ]	1.93E+3
Renewable primary energy resources as material utilization	[MJ]	0.00E+0
Total use of renewable primary energy resources	[MJ]	1.93E+3
Non-renewable primary energy as energy carrier	[MJ]	7.26E+3
Non-renewable primary energy as material utilization	[MJ]	0.00E+0
Total use of non-renewable primary energy resources	[MJ]	7.26E+3
Use of secondary material	[kg]	1.11E+3
Use of renewable secondary fuels	[MJ]	0.00E+0
Use of non-renewable secondary fuels	[MJ]	0.00E+0
Use of net fresh water	[m ³]	3.32E+0

RESULTS OF THE LCA – WASTE CATEGORIES AND OUTPUT FLOWS according to EN 15804+A1: 1 ton structural section steel

Parameter	Unit	A1-A3
Hazardous waste disposed	[kg]	1.46E-5
Non-hazardous waste disposed	[kg]	2.91E+0
Radioactive waste disposed	[kg]	4.25E-1
Components for re-use	[kg]	0.00E+0
Materials for recycling	[kg]	0.00E+0
Materials for energy recovery	[kg]	0.00E+0
Exported electrical energy	[MJ]	0.00E+0
Exported thermal energy	[MJ]	0.00E+0

6. LCA: Interpretation

This chapter contains an interpretation of the Impact Assessment categories with regards to the functional unit. It focuses on the dominant contributions during the production stage.

The interpretation presented is subject to data quality, representativeness, completeness, limitations and assumptions made during the study. Some of the key elements that may have a potential impact on the results are listed below:

- Data quality: Primary data was used to model all on-site processes. This data was cross-checked to identify and eliminate data gaps. High quality secondary data from the *GaBi 2020* database was used to model upstream material and energy flows.
- Representativeness: Primary data was gathered to ensure maximum technological and temporal representativeness for the

product studied. Secondary data was as technologically and geographically representative as possible.

- Completeness: No processes, materials or emissions known to contribute significantly to the environmental impact of the product were omitted.
- Limitations and assumptions: None of the given assumptions and approximations are in contradiction to *ISO 14025*, *14040* or *EN 15804*, nor do they affect the described data quality and representativeness.

Materials and energy upstream have a high share to the environmental impact across all the selected impact categories. Looking at the details of this stage, the contribution to the environmental burdens are dominated by the resource depletion and emissions caused by the generation of electricity. This is explained by the fact that steel production is an energy-intensive industry. Regarding the impacts coming from transportation, a significant part of transportation is already included under raw material LCI data. The impact from the transport of raw material from local distributors to steel making plant or internal transport is relatively small compared to the impacts from the other stages or components of the system under consideration. The impacts coming from onsite operations are mostly related to the consumption of energy. The most relevant and significant emissions on steel production:

- for GWP are CO₂, CH₄
- for AP are SO₂ and NO_x;
- for EP are NO_x
- for POCP are CO, SO₂, NO_x, and NMVOC

Global Warming Potential (GWP), Acidification Potential (AP), Eutrophication Potential (EP) and Photochemical Ozone Creation Potential (POCP) are mostly caused by onsite emissions and the generation of electricity, as the steel production is an energy intensive process (A1-A3), followed by the extraction and processing of raw materials and the generation of steam and heat.

Ozone Depletion Potential (ODP) is mostly caused by emissions from the pre-chains of the power generation processes, in particular nuclear power generation. For the product system under study, the nuclear power share in the electricity generation for module A1-A3 is very little, resulting in a low ODP impact for Module A1-A3.

Abiotic Depletion (elements) relates to the use of non-renewable elements in the production of ancillary materials/pre-products e.g. molybdenum (A1-A3). Abiotic Depletion Potential (fossil) is strongly dominated by the extraction and processing of raw materials and the generation of electricity, steam and heat from primary energy resources, including extraction, refining and transport.

Total use of renewable primary energy carrier (PERT) and total use of non-renewable primary energy (PENRT) are dominated by the extraction and processing of raw materials and the generation of electricity, steam and heat from primary energy resources, including extraction, refining and transport.

Radioactive waste comes from the provision of electrical energy, especially from the share of nuclear power in the grid mix. Non-hazardous wastes include overburden and tailings. Hazardous waste for deposition is produced in small amounts during production.

7. Requisite evidence

This EPD covers semi-finished structural steel of hot-rolled construction products. Further processing and

fabrication depend on the intended application. Therefore further documentation is not applicable.

8. References

ASTM A29/A29M

ASTM A29/A29M:2020, General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought

ASTM A36/A36M

ASTM A36/A36M:2019, Standard Specification for Carbon Structural Steel

ASTM A529/A529M

ASTM A529/A529M:2019, Standard Specification for High-Strength Carbon-Manganese Steel of Structural Quality

ASTM A572/A572M

ASTM A572/A572M:2021, Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel

ASTM A992/A992M

ASTM A992/A992M:2011, Standard Specification for Structural Steel Shapes

CPR

Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC

DIN EN 13501-1

DIN EN 13501-1:2019, Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests

EN 10025:

- EN 10025-1:2004, Hot rolled products of

structural steels. Part 1: General technical delivery conditions.

- **EN 10025-2:2019**, Hot rolled products of structural steels. Part 2 Technical delivery conditions for non-alloy structural steels.

EN 10056-1

EN 10056-1:2017, Structural steel equal and unequal leg angles. Dimensions.

EN 10056-2

EN 10056-2:1993, Structural steel equal and unequal leg angles. Part 2: Tolerances on shape and dimensions.

EN 10058:2008

EN 10058:2008, Hot rolled flat steel bars for general purposes. Dimensions and tolerances on shape and dimensions.

EN 10059

EN 10059:2003, Hot rolled square steel bars for general purposes. Dimensions and tolerances on shape and dimensions.

EN 10060

EN 10060:2003, Hot rolled round steel bars for general purposes. Dimensions and tolerances on shape and dimensions.

EN 10024

EN 10024:1995, Hot rolled taper flange I sections. Tolerances on shape and dimensions.

EN 10034

EN 10034:1993, Structural steel I and H sections. Tolerances on shape and dimensions.

EN 10279

EN 10279:2000, Hot rolled steel channels. Tolerances on shape, dimension, and mass.

EN 10365

EN 10365:2017, Hot rolled steel channels, I and H sections. Dimensions and masses.

EN 15804,

EN 15804:2012-04 Sustainability of construction works — Environmental Product Declarations — Core rules for the product category of construction products.

EU COMMISSION, LCA STEEL CONSTRUCTION,

Life-cycle assessment (LCA) for steel construction, Science Research Dev, European Commission, EUR 20570 EN; Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen, Texte 93/2015, Umwelt Bundesamt

EWC

European Waste Catalogue, 2000/532/EC

GaBi 2020

Sphera Solutions GmbH; GaBi 10: Software-System and Database for Life Cycle Engineering. Stuttgart, Leinfelden-Echterdingen, 1992-2020.

GaBi 2020 Documentation

Documentation of GaBi 10: Software-System and Database for Life Cycle Engineering. Stuttgart, Leinfelden-Echterdingen, 1992-2020.
<http://documentation.gabi-software.com/>

IBU 2016

IBU (2016): General Programme Instructions for the Preparation of EPDs at the Institut Bauen und Umwelt e.V., Version 1.1 Institut Bauen und Umwelt e.V., Berlin, www.ibu-epd.de

ISO 9001

ISO 9001:2015, Quality Management System

ISO 45001

ISO 45001:2018, Occupational Health and Safety

ISO 14001

ISO 14001:2015, Environment Management System

ISO 14025

DIN EN ISO 14025:2011-10: Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures

ISO 14040

EN ISO 14040:2006, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework

ISO 14044

EN ISO 14044:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines

PCR 2016, Part A

Product category rules for building-related products and services. Part: Calculation rules for the life cycle assessment and requirements on the project report, Version 1.8. Berlin: Institut Bauen und Umwelt e.V. (Hrsg.), 2019.

PCR 2017, Part B

Institut Bauen und Umwelt e.V., Königswinter (pub.): Product Category Rules for Construction Products from the range of Environmental Product Declarations of Institut Bauen und Umwelt (IBU), Part B: Calculation Rules for the Life Cycle Assessment of structural steel products. November 2017.

Worldsteel & EUROFER 2013

A methodology to determine the LCI of steel industry co-products (February 2013)

**Publisher**

Institut Bauen und Umwelt e.V.
Panoramastr. 1
10178 Berlin
Germany

Tel +49 (0)30 3087748- 0
Fax +49 (0)30 3087748- 29
Mail info@ibu-epd.com
Web www.ibu-epd.com

**Programme holder**

Institut Bauen und Umwelt e.V.
Panoramastr 1
10178 Berlin
Germany

Tel +49 (0)30 - 3087748- 0
Fax +49 (0)30 – 3087748 - 29
Mail info@ibu-epd.com
Web www.ibu-epd.com

**Author of the Life Cycle Assessment**

Sphera Solutions GmbH
Hauptstraße 111- 113
70771 Leinfelden-Echterdingen
Germany

Tel +49 711 341817-0
Fax +49 711 341817-25
Mail info@sphera.com
Web www.sphera.com

**Owner of the Declaration**

Celsa Huta Ostrowiec Sp. z o.o.
Jana Samsonowicza 2
27-400 Ostrowiec
Poland

Tel +48 41 249 23 02
Fax +48 41 249 22 22
Mail celsaho@celsaho.com
Web <http://www.celsaho.com/>



CELSA Barcelona. Compañía
Española de Laminación, S.L.
Calle Ferralla 12
08755 Castellbisbal
Spain

Tel 937730400
Fax 937720276
Mail jbarrero@gcelsa.com
Web www.celsabarcelona.com