



Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Avaliação do impacto ambiental do transporte de betão em Portugal e estratégias de mitigação

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Cidades
Sustentáveis e Inteligentes

Autor

Gustavo Alexandre Meco Ferreira da Silva

Orientador

Ricardo do Carmo



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, maio 2026

RESUMO

O presente trabalho tem como principal objetivo avaliar o impacto ambiental associado ao transporte de betão, com foco particular nas emissões de gases com efeito de estufa expressas em termos de Global Warming Potential (GWP). Embora a produção de cimento seja amplamente reconhecida como a principal fonte de emissões no ciclo de vida do betão, o contributo do transporte tem vindo a assumir uma relevância crescente, especialmente em contextos de longas distâncias de distribuição e baixa eficiência logística.

Com base em dados operacionais reais recolhidos em Portugal ao longo de seis meses, foi realizada uma análise detalhada do transporte de betão em sete mercados regionais, 31 centrais de betão e um total de 188 mil m³ de betão transportados. A avaliação permitiu determinar um fator médio nacional de emissões de aproximadamente 13 kg CO₂eq/m³ de betão transportado. Os resultados evidenciam uma variabilidade significativa entre regiões, diretamente associada a fatores como distância média de transporte, volume distribuído e eficiência da utilização da frota.

O estudo demonstra que, embora o transporte represente uma fração pequena do GWP total quando comparado com a produção, o seu impacto não é negligenciável, podendo atingir valores até cerca de 18 kg CO₂eq/m³ em cenários menos eficientes. Este valor ganha mais peso relativo quando são usadas composições de betão eco-eficientes. A integração deste contributo em análises de ciclo de vida das construções em betão permite uma avaliação mais realista do carbono incorporado no betão. Adicionalmente, foi realizada uma extrapolação à escala global, com base na produção mundial de cimento, estimando-se que as emissões associadas ao transporte de betão possam atingir aproximadamente 180 milhões de toneladas de CO₂eq por ano. Este valor reforça a importância da otimização logística como componente essencial das estratégias de descarbonização do setor da construção.

Por fim, são propostas medidas de mitigação que incluem a reorganização espacial das centrais de produção, a otimização de rotas, a melhoria da eficiência de carga e a adoção de tecnologias de transporte de baixas emissões, como combustíveis alternativos e eletrificação da frota.

Palavras-chave

Betão; Transporte de betão; Impacto ambiental; Global Warming Potential (GWP); Emissões de CO₂eq; Logística; Descarbonização

ABSTRACT

The main objective of this study is to assess the environmental impact associated with the transport of concrete, with a particular focus on greenhouse gas emissions expressed in terms of Global Warming Potential (GWP). Although cement production is widely recognised as the main source of emissions in the concrete life cycle, the contribution of transport has been gaining increasing significance, particularly in contexts of long distribution distances and low logistical efficiency.

Based on real operational data collected in Portugal over a six-month period, a detailed analysis of concrete transport was carried out across seven regional markets, 31 concrete plants and a total of 188 thousand m³ of concrete transported. The assessment enabled the determination of a national average emissions factor of approximately 13 kg CO₂eq/m³ of concrete transported. The results highlight significant variability between regions, directly linked to factors such as average transport distance, volume distributed and fleet utilisation efficiency.

The study demonstrates that, although transport accounts for a small fraction of the total GWP when compared to production, its impact is not negligible, potentially reaching values of up to around 18 kg CO₂eq/m³ in less efficient scenarios. This figure gains relative importance when eco-efficient concrete mixes are used. Incorporating this contribution into life-cycle analyses of concrete structures allows for a more realistic assessment of the carbon embedded in concrete. Additionally, an extrapolation was carried out on a global scale, based on worldwide cement production, estimating that emissions associated with concrete transport could reach approximately 180 million tonnes of CO₂eq per year. This figure reinforces the importance of logistics optimisation as an essential component of decarbonisation strategies in the construction sector.

Finally, mitigation measures are proposed, including the spatial reorganisation of production plants, route optimisation, improved load efficiency and the adoption of low-emission transport technologies, such as alternative fuels and fleet electrification.

Keywords

Concrete; Concrete transport; Environmental impact; Global Warming Potential (GWP); CO₂eq emissions; Logistics; Decarbonisation

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho marca o fim de uma etapa exigente, mas profundamente enriquecedora, que não teria sido possível sem o apoio de várias pessoas fundamentais ao longo deste percurso.

Em primeiro lugar, aos meus pais, a quem devo tudo. Pelo apoio incondicional, pelos sacrifícios silenciosos, pela confiança constante e por nunca me deixarem desistir, mesmo nos momentos mais difíceis. Se hoje aqui chego, é porque sempre caminharam ao meu lado. Este trabalho é tanto meu como vosso.

Ao Professor Ricardo do Carmo, meu orientador, deixo um agradecimento especial e sincero. Pela disponibilidade, pela orientação, pela exigência e, acima de tudo, pelo apoio constante ao longo de todo este processo. A sua presença foi determinante não só para a concretização desta tese, mas também para que eu nunca perdesse o rumo. Sem ele, este trabalho muito provavelmente não teria sido possível.

Quero ainda deixar uma palavra de profundo agradecimento ao Eng. Aníbal Ferreira, ao Paulo Silva, ao Hélder Capela, ao Eng. David Martins, ao José Carlos Ferreira, ao José Dias, ao Hakan Ozkan e ao João Corvo. Cada um, à sua maneira, contribuiu diretamente para a realização deste trabalho e para o meu crescimento, tanto a nível pessoal como profissional. Pelos ensinamentos, pela partilha de conhecimento, pela disponibilidade e pelo exemplo, o meu sincero obrigado.

A todos, o meu mais profundo reconhecimento.

ÍNDICE

Resumo	i
Abstract.....	ii
Agradecimentos	iii
Índice.....	iv
Índice de figuras.....	vi
Índice de Tabelas	xi
Lista de abreviaturas.....	xii
1 Introdução	15
2 Importância do betão na sociedade: Uma visão histórica e o seu impacto na qualidade de vida	19
2.1.1 Uma breve história do betão.....	19
2.1.2 O papel do betão durante as guerras e catástrofes naturais	25
2.1.3 Vantagens e desvantagens do betão.....	31
2.2 Tipos de betões	32
3 Transporte de betão: história e logística	43
3.1 Considerações gerais.....	43
3.2 Breves notas históricas	43
3.3 Utilização de autobetoneiras de menor capacidade e as centrais móveis..	49
4 Descarbonização do setor da construção em betão e indicadores de impacto ambiental.....	55
4.1 Iniciativas da indústria do cimento para reduzir o impacto ambiental.....	55
4.2 Avanços nas técnicas de construção: O papel da pré-fabricação na descarbonização	57
4.3 Composição do betão: Menos Cimento e Agregados Reciclados.....	60
4.4 Definição do GWP e de outros indicadores de impacto ambiental	62
4.5 Impacto ambiental dos constituintes do betão.....	62
5 Avaliação do impacto ambiental do transporte de betão.....	65
5.1 Descrição do estudo e pressupostos assumidos.....	65
5.2 Análise regional do impacto ambiental relacionado com os transportes ..	69
5.2.1 Mercado Norte I – Análise dos Resultados	70

Avaliação do impacto ambiental do transporte de betão em Portugal e estratégias de mitigação

5.2.2	Mercado Norte II – Análise dos Resultados.....	73
5.2.3	Mercado Centro Norte – Análise dos Resultados.....	75
5.2.4	Mercado Centro – Análise dos Resultados	77
5.2.5	Mercado Centro Sul – Análise dos Resultados.....	80
5.2.6	Mercado Sul I – Análise dos Resultados	82
5.2.7	Mercado Sul II – Análise dos Resultados.....	83
5.3	Resumo dos resultados obtidos.....	85
5.4	Medidas para reduzir o impacto ambiental do transporte de betão	87
5.5	Comparação do GWP do transporte e da produção de betão	90
5.6	Análise Global e classificação do betão em termos ambientais	93
6	Conclusões.....	103
7	Referências Bibliográficas	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fotografias de argamassa e locais de análise de clastos agregados e microestruturas de cimento: a) Portus Claudius (POR.2002.PO2), b) Portus Traianus (PTR.2001.01) [8].....	20
Figura 2 Santuário de Júpiter Anxur (primeira metade do século I a.C.). Vista da plataforma abobadada de betão com vista para o Mar Tirreno em Terracina. Fototeca Unione c/o American Academy in Rome, neg. #5139 [9].....	20
Figura 3 Vista da «Terrazza degli emicicli» do Santuário de Fortuna Primigenia em Palestrina (segunda metade do século II a.C.) [9].....	21
Figura 4 “Atravessando o sudoeste dos Estados Unidos, uma região predominantemente árida, o rio Colorado foi outrora considerado a via navegável mais perigosa da América.” - Barragem Hoover, concluída em 1936 [15].....	22
Figura 5 “O teleférico da Barragem de Hoover, com capacidade para 150 toneladas e ainda hoje em funcionamento, desce um molde para o revestimento do túnel de entrada da conduta forçada até ao desfiladeiro, em 1933” [15].....	22
Figura 6 “Em 1934, os trabalhadores deslocam-se num teleférico inclinado desde a margem do Black Canyon, no Nevada, até ao topo da barragem” [15].	23
Figura 7 “A Ponte Vasco da Gama, um marco histórico em Portugal, revolucionou a mobilidade local e ligou as cidades situadas em ambas as margens do rio Tejo” [16].	23
Figura 8 A Ponte Vasco da Gama continua a ser a ponte mais longa da Europa. [16].	24
Figura 9 A ponte de Plougastel em 1928. Graças a Eugène Freyssinet, o betão armado tornou-se realidade. Coleção e fotografia da ENPC Paris [18].	24
Figura 10 Local de amostragem: bunker n.º T-S-20 [22].....	25
Figura 11 Mapa de intensidade do sismo de magnitude 9,0 ocorrido em 11 de março de 2011 (aqui é utilizada a escala de intensidade japonesa, pelo que estes valores não correspondem às intensidades EMS ou Mercalli, mas refletem a distribuição da aceleração sísmica medida) [28].	26
Figura 12 Um tsunami devastador atinge a costa do nordeste do Japão a 11 de março de 2011 [29].....	26
Figura 13 Fotografia, tirada por Hiroshi Kawahara, funcionário da cidade de Sendai, a 11 de março de 2011 [29].	27
Figura 14 Pessoas retidas no topo de um edifício em Minami Sanriku, Miyagi, Japão, na sequência do catastrófico terramoto e tsunami [29].	27
Figura 15 Um dique costeiro reforçado no nordeste do Japão, construído na sequência do tsunami de 2011. Ravindra Jayaratne [32].....	28

Figura 16 Diques marítimos que protegem o aeroporto de Sendai, a sul da aldeia de Yuriage, na cidade de Natori: (a) vista ao longo do topo da estrutura em direção a sul; e (b) detalhes das unidades de revestimento interligadas no lado marítimo da estrutura [30].	28
Figura 17 O sismo de Mw 6,2 em Christchurch (estrela vermelha) no contexto do sismo principal de Darfield (estrela verde) e da sequência de réplicas até 4 de setembro de 2011 [34].	29
Figura 18 Danos em edifícios de betão armado no centro de Christchurch. A, Colapso de um edifício de estacionamento com laje plana. B, Fissuras, desagregação e danos na armadura de uma viga. C, Danos causados pela ação nas ondas no edifício à esquerda [34].	29
Figura 19 Extensa queda de rochas em Redcliffs após o terramoto de Christchurch de 2011 [35].	30
Figura 20 Fissuras no betão causadas por um deslocamento permanente das encostas, desencadeado pelo terramoto de 2011 em Christchurch [35].	30
Figura 21 Agregados artificiais leves simples (S-LWAs) e agregados artificiais leves duplos (D-LWAs) [49].	33
Figura 22 Betões leves: (a) betão leve simples; (b) betão leve simples com PET; (c) betão leve duplo; (d) betão leve duplo com PET (Polietileno tereftalato) no betão leve refere-se a resíduos plásticos reciclados) [49].	33
Figura 23 O âmbito de aplicação dos agregados leves [50].	33
Figura 24 Aspeto de algumas fibras utilizadas no betão: (a). Fibras de aço, (b). Fibras de vidro, (c). Fibras de polipropileno, (d). Fibras de carbono, (e). Fibras de plástico, (f). Palha de trigo, (g). Fibras de cana-de-açúcar, (h). Fibras de sisal, (i). Fibra de juta, (j). Fibras de bambu [52].	35
Figura 25 Aspeto de betão reforçado com fibras [53].	36
Figura 26 Ensaio ao betão auto-compactável fresco: a) fluxo de assentamento, b) funil em V e c) caixa em L [56].	37
Figura 27 Agregados de betão reciclado (RCA) e agregados de alvenaria reciclada (RMA) nas faixas granulométricas de 0–4, 4–8 e 8–16 mm [58].	38
Figura 28 Blocos de betão com agregado de tijolo demolido e agregados reciclados [59].	39
Figura 29 (a) Betão antigo demolido, (b) Agregado grosso reciclado, (c) Agregado fino reciclado, (d) Mistura de betão reciclado, (e) Cilindro de betão (ensaio de compressão), (f) Amostra para análise microscopia eletrónica de varrimento [60].	39
Figura 30 Várias aplicações do betão de ultra elevado desempenho (UHPC) em projetos de infraestruturas reais, incluindo pontes, barragens, parques de estacionamento de vários andares e estações de tratamento de águas [62].	40

Figura 31 Fotografia de uma das primeiras tentativas para assegurar a mistura contínua durante o transporte, em Atlantic City 1910 [65].	44
Figura 32 Misturadora horizontal Rex Chain Belt de 1922 com capacidade para 1 m ³ , montado num camião G.M.C. [64].	45
Figura 33 Concebida e construída pela Chain Belt Company em 1930, esta autobetoneira tinha uma capacidade de 3 m ³ [64].	45
Figura 34 Agitador do tipo “tumble bug”, datado da década de 1930, equipado com um tambor cilíndrico horizontal e um mecanismo hidráulico de elevação para a descarga do betão. [64].	46
Figura 35 Autobetoneira móvel modelo “Rex”, com capacidade de aproximadamente 3 m ³ , da Melocco’s Mobile Mixers, montada sobre um veículo Ford Thorntons [64].	46
Figura 36 Betoneira Rex Motomixer. Nota: Tentativa de camuflar o tambor inclinado [64].	47
Figura 37 Segregação do betão causada por uma mistura irregular [67].	47
Figura 38 Primeira betoneira fabricada pela Fowler Wood Engineering, uma betoneira de 3 m ³ (1946-7) [64].	47
Figura 39 Load Master Transit Mixer, Cesco Australia [69].	48
Figura 40 Ficha Técnica Load Master Transit Mixer, Cesco Australia [69].	49
Figura 41 SANY apresenta autobetoneiras elétricas, 2020 [78].	51
Figura 42 Primeira autobetoneira 100% elétrica em Portugal [80].	52
Figura 43 Primeira autobetoneira 100% elétrica em Portugal [80].	52
Figura 44 Primeira autobetoneira 100% elétrica em Portugal [80].	53
Figura 45 Processo de reciclagem de resíduos de betão [84].	56
Figura 46 Detritos de betão provenientes de aterros [84].	56
Figura 47 Exemplos de construções de sistemas de paredes [86].	57
Figura 48 Produção pré-fabricada de paredes de betão: (a) cofragem e armadura de aço/rede; (b) vazamento do betão; (c) camada de isolamento e aberturas; (d) mesa giratória; (e) acabamento final da superfície; (f) armazenamento [86].	57
Figura 49 Manuseamento de paredes pré-fabricadas: (1) transporte vertical; (2) armazenamento; (3) manuseamento e instalação [86].	58
Figura 50 Montagem de parede sanduíche em obra [86].	59
Figura 51 Exemplos de construção em betão pré-fabricado: (a) ponte com vigas em caixa de betão pré-esforçado e (b) torre eólica [89].	59
Figura 52 Comparação das emissões dos camiões a diesel com o valor de referência de 0,1 kg CO ₂ eq/t·km (GWP).	66

Avaliação do impacto ambiental do transporte de betão em Portugal e estratégias de mitigação

Figura 53 - Resultados Mercado Norte I.....	70
Figura 54 Resultados Mercado Norte I – Análise total de kms percorridos vs m ³ de betão transportados.....	71
Figura 55 Resultados Mercado Norte I – Análise GWP total (kg CO ₂ eq) vs GWP médio (kg CO ₂ eq/m ³).	72
Figura 56 Resultados Mercado Norte II.....	73
Figura 57 Resultados Mercado Norte II – Análise total de kms percorridos vs m ³ de betão transportados.....	74
Figura 58 Resultados Mercado Norte II – Análise GWP total (kg CO ₂ eq) vs GWP médio (kg CO ₂ eq/ m ³).	74
Figura 59 Resultados Mercado Centro Norte.....	75
Figura 60 Resultados Mercado Centro Norte – Análise total de kms percorridos vs m ³ de betão transportados.....	76
Figura 61 Resultados Mercado Centro Norte – Análise GWP total (kg CO ₂ eq) vs GWP médio (kg CO ₂ eq/ m ³).	77
Figura 62 Resultados Mercado Centro.	78
Figura 63 Resultados Mercado Centro – Análise total de kms percorridos vs m ³ de betão transportados.....	79
Figura 64 Resultados Mercado Centro – Análise GWP total (kg CO ₂ eq) vs GWP médio (kg CO ₂ eq/m ³).	79
Figura 65 Resultados Mercado Centro Sul.....	80
Figura 66 Resultados Mercado Centro Sul – Análise total de kms percorridos vs m ³ de betão transportados.....	81
Figura 67 Resultados Mercado Centro Sul – Análise GWP total (kg CO ₂ eq) vs GWP médio (kg CO ₂ eq/m ³).	81
Figura 68 Resultados Mercado Sul I.	82
Figura 69 Resultados Mercado Sul I – Análise total de kms percorridos vs m ³ de betão transportados.....	82
Figura 70 Resultados Mercado Sul I – Análise GWP total (kg CO ₂ eq) vs GWP médio (kg CO ₂ eq/m ³).	83
Figura 71 Resultados Mercado Sul II.....	83
Figura 72 Resultados Mercado Sul II – Análise total de kms percorridos vs m ³ de betão transportados.....	84
Figura 73 Resultados Mercado Sul II – Análise GWP total (kg CO ₂ eq) vs GWP médio (kg CO ₂ eq/m ³).	85

Figura 74 Síntese dos indicadores de transporte de betão e GWP por mercado regional.....	86
Figura 75 Implicação ambiental do transporte de betão: distribuição do GWP médio.	87
Figura 76 GWP por 1 m ³ de betão [5].....	91
Figura 77 GWP para a produção de 1 kg dos vários constituintes dos betões formulados (não inclui o impacto do transporte do fornecedor até à central de produção de betão) [5].	91
Figura 78 Contributo de cada um dos constituintes dos betões no valor de GWP/m ³ [5].....	92
Figura 79 Análise GWP total (Produção + Transporte).	92
Figura 80 Percentagem do GWP do transporte face ao GWP da produção.	93
Figura 81 Produção mundial de cimento de 1995 a 2022 (mil milhões de toneladas) [115].....	94
Figura 82 Principais países na produção mundial de cimento em 2022 [115].	95
Figura 83 Perspetivas de crescimento da procura de cimento [117].....	95
Figura 84 Classificações globais da GCCA para o betão [118].....	97
Figura 85 Escala de classificação de betão da GCCA [118].....	98
Figura 86 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas (ONU) [119].....	104

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Classes de resistência à compressão [46].	32
Tabela 2 - Tipos de cimento e as reduções de CO ₂ estimadas em comparação com o CEM I.....	55
Tabela 3 Impacto comparativo dos métodos de construção tradicionais e pré-fabricados.....	58
Tabela 4 Desempenho ambiental e mecânico de misturas de betão com baixo teor de carbono. (baseado nos estudos de Bennett <i>et al.</i> (2022) [93], Bampanis <i>et al.</i> (2023) [94] e <i>fib</i> Bulletin 67 [83]).....	61
Tabela 5 Indicadores comuns de impacto ambiental na LCA.....	62
Tabela 6 Contribuição estimada dos vários constituintes do betão no GWP (por m ³). Baseado em Robalo (2022) [5], <i>fib</i> Bulletin 67 (2012) [83] e Mehta & Monteiro (2014) [20].....	63
Tabela 7 Desempenho ambiental de betões padrão vs. betões ecológicos. (baseado no estudo da Keila Robalo (2022) [5] e Boletim <i>fib</i> 67 (2012) [83]).....	63
Tabela 8 Emissões de CO ₂ de camiões a diesel por tipo de categoria.	66
Tabela 9 GWP total por tipo de betão.....	99
Tabela 10 Classificações Globais segundo a GCCA dos betões analisados.....	100

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Designação
ADP	Abiotic Depletion Potential (Potencial de Depleção Abiótica)
AP	Acidification Potential (Potencial de Acidificação)
CC	Conventional Concrete (Betão Convencional)
CCUS	Carbon Capture, Utilisation and Storage
CDW	Construction and Demolition Waste (Resíduos de Construção e Demolição)
CEM I, II, III, IV	Tipos de cimento segundo a norma europeia
CO₂	Dióxido de carbono
CO₂eq / CO₂e	Dióxido de carbono equivalente
DEFRA	Department for Environment, Food & Rural Affairs
EEA	European Environment Agency (Agência Europeia do Ambiente)
EN	European Norm (Norma Europeia)
EN 206	Norma europeia para betão
EN 15804	Norma para Declarações Ambientais de Produto
EP	Eutrophication Potential (Potencial de Eutrofização)
EPD	Environmental Product Declaration (Declaração Ambiental de Produto)
FRC	Fiber-Reinforced Concrete (Betão reforçado com fibras)
f_{ck,cube}	Resistência característica à compressão em cubos
f_{ck,cyl}	Resistência característica à compressão em cilindros
GHG / GEE	Greenhouse Gases (Gases com Efeito de Estufa)
GGBFS / GGBS	Ground Granulated Blast Furnace Slag (Escória de alto-forno moída)
GPS	Global Positioning System
GWP	Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global)
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil
ICCT	International Council on Clean Transportation
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
kg/m³	Quilograma por metro cúbico
LCA	Life Cycle Assessment (Avaliação do Ciclo de Vida)
LCC	Low Cement Content Concrete (Betão com baixo teor de cimento)

Avaliação do impacto ambiental do transporte de betão em Portugal e estratégias de mitigação

Abreviatura	Designação
LCRAC	Low Carbon Recycled Aggregate Concrete (Betão de baixo carbono com agregados reciclados)
LNG	Liquefied Natural Gas
LWC	Lightweight Concrete (Betão leve)
MPa	Megapascal
MRA	Mixed Recycled Aggregates (Agregados reciclados mistos)
NA	Natural Aggregates (Agregados naturais)
ODP	Ozone Depletion Potential (Potencial de depleção da camada de ozono)
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PCR	Product Category Rules
PET	Polietileno tereftalato
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential (Potencial de formação de ozono fotoquímico)
RA / RCA	Recycled Aggregates / Recycled Concrete Aggregates (Agregados reciclados / agregados reciclados de betão)
SCC	Self-Compacting Concrete (Betão auto-compactável)
SCM	Supplementary Cementitious Materials (Materiais cimentícios suplementares)
t·km	Tonelada-quilómetro
TTW	Tank-to-Wheel
UHDC	Ultra-High Durability Concrete (Betão de ultra elevada durabilidade)
UHPC	Ultra-High Performance Concrete
VMA	Viscosity-Modifying Agent (Agente modificador de viscosidade)
eco-UHDC	Ecological Ultra-High Durability Concrete
eco-UHDCpf	eco-UHDC com fibras poliméricas
eco-UHDCsf	eco-UHDC com fibras de aço

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O betão é o material fabricado mais utilizado no mundo, desempenhando um papel central no desenvolvimento das infraestruturas modernas, incluindo edifícios, redes de transporte e sistemas urbanos. Estima-se que a produção global de betão ultrapasse as 30 mil milhões de toneladas por ano, refletindo a sua importância estrutural no desenvolvimento das sociedades contemporâneas [1] [2]. A procura por betão continua a crescer, impulsionada pela urbanização acelerada, pelo crescimento populacional e pela necessidade de renovação e expansão de infraestruturas, especialmente em economias emergentes.

Neste contexto, o setor do betão assume uma relevância estratégica não apenas do ponto de vista económico e social, mas também ambiental. A produção de cimento Portland, principal constituinte do betão, é responsável por cerca de 7 a 8% das emissões globais de CO₂, tornando-se um dos principais focos das estratégias de descarbonização do setor da construção [3] [4]. Como resposta, têm sido desenvolvidas diversas soluções para diminuir o efeito ambiental, incluindo a utilização de materiais cimentícios suplementares (SCM), a incorporação de agregados reciclados e a otimização das composições. Estudos recentes demonstram que estas abordagens podem minimizar o Global Warming Potential (GWP) em mais de 30% quando comparadas com betões convencionais, dependendo da composição e aplicação [5].

Apesar deste foco vital na fase de produção, outras componentes do ciclo de vida do betão têm recebido menor atenção. Entre estas, destaca-se o transporte de betão, que apresenta características operacionais específicas e potencial influência ambiental relevante. O transporte é realizado através de autobetoneiras, veículos especializados que operam sob restrições rigorosas, nomeadamente limitações de tempo associadas à trabalhabilidade do betão e necessidade de garantir a homogeneidade da mistura durante o percurso.

Adicionalmente, a operação logística envolve um elevado número de deslocações diárias, frequentemente em contexto urbano, com condições de tráfego variáveis, paragens frequentes e ciclos de carga e descarga intensivos. Um aspeto particularmente fundamental é o facto de as autobetoneiras realizarem o percurso de retorno em vazio, o que reduz a eficiência do transporte em termos de tonelada útil por quilómetro percorrido. Estes fatores contribuem para um consumo significativo de combustível e para emissões associadas que, embora frequentemente negligenciadas, podem representar uma parcela determinante do desempenho ambiental total do betão.

Assim sendo, torna-se pertinente analisar de forma mais detalhada o contributo do transporte para a carga ambiental do betão, permitindo uma abordagem integrada e realista do seu ciclo de vida.

1.2 Objetivos

Neste contexto, o presente trabalho tem como principal objetivo avaliar a pressão ambiental associada ao transporte de betão em Portugal, com especial foco nas emissões de gases com efeito de estufa expressas em Global Warming Potential (GWP).

Para tal, o estudo baseia-se na análise de dados operacionais reais provenientes de várias centrais de betão distribuídas por diferentes regiões do território nacional. A abordagem metodológica consiste na avaliação do desempenho ambiental ao nível do camião autobetoneira, considerando variáveis como a distância percorrida, o peso do veículo com e sem carga e o volume de betão transportado. O período de análise corresponde a seis meses de operação, proporcionando capturar variações associadas a diferentes condições operacionais.

Com base nestes dados, pretende-se:

- Determinar um fator médio de emissão associado ao transporte de betão.
- Analisar a variabilidade regional da pegada ambiental.
- Avaliar a relevância das emissões de CO₂ do transporte no contexto das implicações ambientais nacionais do betão.
- Identificar e propor medidas de mitigação que permitam reduzir as emissões associadas.

Com base nos resultados obtidos para a análise nacional, será estimada a magnitude das emissões de CO₂ associadas ao transporte de betão no contexto mundial, usando o valor médio de GWP/m³ determinado neste estudo.

1.3 Estrutura da tese

A presente dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos.

O Capítulo 1 apresenta o enquadramento do tema, define os objetivos do estudo e descreve a estrutura da dissertação. O Capítulo 2 analisa a importância do betão na sociedade, incluindo a sua evolução histórica e o seu contributo para a qualidade de vida das pessoas. O Capítulo 3 aborda o transporte de betão, explorando a sua evolução tecnológica, enquadramento logístico e integração em contextos urbanos. No Capítulo 4 são discutidas as principais estratégias de descarbonização aplicáveis ao setor da construção em betão. O Capítulo 5 apresenta os fundamentos da avaliação dos efeitos sobre o ambiente, dando particular atenção ao indicador Global Warming Potential (GWP) e à sua aplicação ao setor da construção. Este capítulo

Avaliação do impacto ambiental do transporte de betão em Portugal e estratégias de mitigação

constitui o núcleo central da tese, em que é apresentado o estudo relativo ao transporte de betão em Portugal, incluindo a análise de dados por região, a determinação de fatores de emissão e a identificação de oportunidades de melhoria. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as principais conclusões do estudo, bem como recomendações e possíveis desenvolvimentos futuros.

2 IMPORTÂNCIA DO BETÃO NA SOCIEDADE: UMA VISÃO HISTÓRICA E O SEU IMPACTO NA QUALIDADE DE VIDA

O betão é um dos materiais de construção mais influentes na história da civilização humana. A sua durabilidade, versatilidade e capacidade de produção local em grande escala tornaram-no essencial para o desenvolvimento das sociedades modernas. Pontes, túneis, edifícios, portos, sistemas de água e infraestruturas públicas dependem fortemente do betão, que é reconhecido como o segundo material mais consumido no planeta, depois da água [6] [7].

Ao longo da história, o betão permitiu a expansão urbana, melhorou a mobilidade, melhorou a resiliência a catástrofes e alavancou o crescimento económico dos Países. Conhecer a evolução do betão ao longo do tempo é essencial para compreender a sua importância no desenvolvimento de uma construção mais sustentável.

Resumindo, o betão é um material essencial na construção moderna e moldou significativamente o desenvolvimento das sociedades. Ao longo dos anos, o betão tem sido fundamental para a criação de estruturas duradouras, desde grandes edifícios a pontes e estradas, muitas das quais sobreviveram a guerras e catástrofes naturais. A capacidade do betão para manter a integridade estrutural durante longos períodos de tempo é uma das razões pelas quais continua a ser o material preferido na construção.

2.1.1 Uma breve história do betão

A utilização do betão como material de construção pode ser encontrada em alguns dos períodos mais antigos da história da humanidade, com a primeira utilização conhecida de um material semelhante ao betão na construção do Panteão Romano. Os romanos foram pioneiros no desenvolvimento do betão romano (*opus caementicium*), uma mistura de cal, cinzas vulcânicas, agregados e água, que lhes permitiu construir estruturas como aquedutos, termas e anfiteatros que se mantiveram de pé durante séculos [8], ver Figuras 1, 2 e 3. O Santuário de Fortuna Primigenia e Jupiter Anxur (Figuras 2 e 3) são bons exemplos de construção abobadada em betão romano [9].

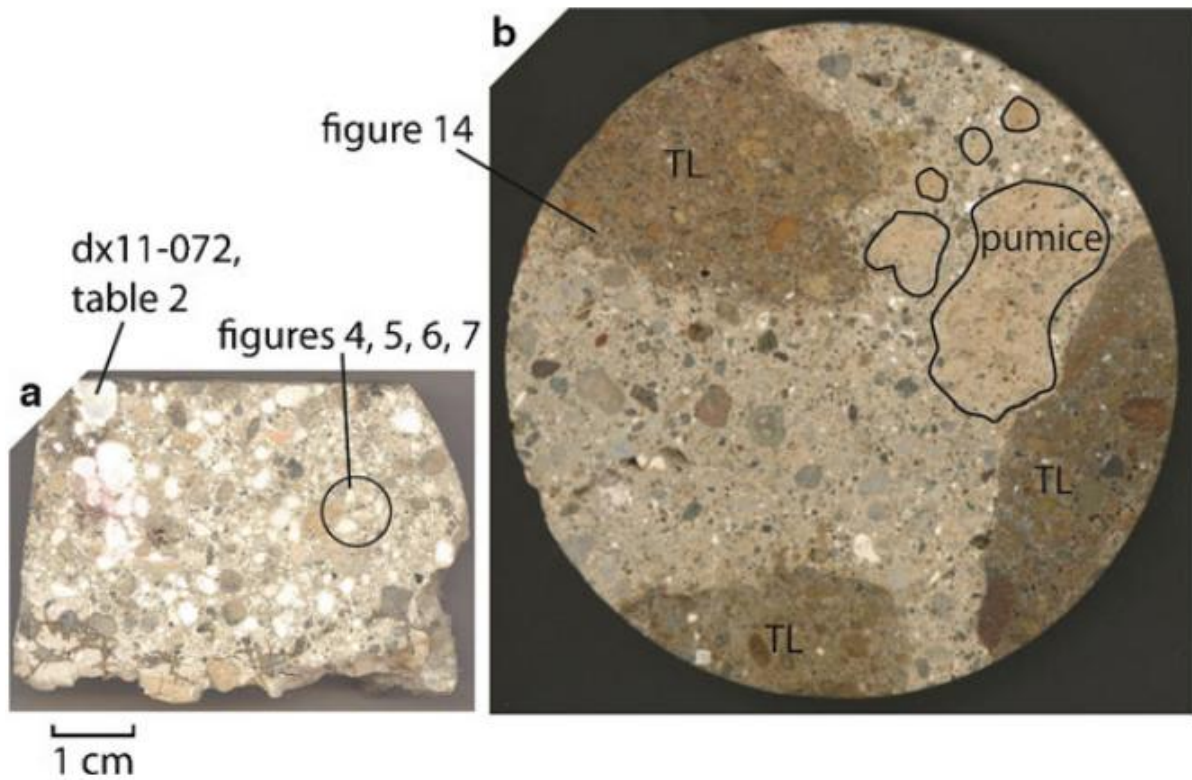


Figura 1 Fotografias de argamassa e locais de análise de clastos agregados e microestruturas de cimento: a) Portus Claudius (POR.2002.PO2), b) Portus Traianus (P'IR.2001.01) [8].



Figura 2 Santuário de Júpiter Anxur (primeira metade do século I a.C.). Vista da plataforma abobadada de betão com vista para o Mar Tirreno em Terracina. Fototeca Unione c/o American Academy in Rome, neg. #5139 [9].



Figura 3 Vista da «Terrazza degli emicicli» do Santuário de Fortuna Primigenia em Palestrina (segunda metade do século II a.C.) [9].

No entanto, foi apenas no século XIX que nasceu o betão moderno tal como o conhecemos, com a invenção do cimento Portland por Joseph Aspdin em 1824. Esta invenção marcou um passo notável no desenvolvimento do betão, uma vez que viabilizou a produção de um material que não só era durável como podia ser produzido em grandes quantidades [10].

A introdução do betão armado por François Hennebique e Joseph Monier revolucionou a indústria, tornando possível a construção de pontes, edifícios altos e instalações industriais [11] [12]. Os avanços científicos contínuos ao longo do século XX, incluindo aditivos, betões de alto desempenho e reforço com fibras nas composições, aperfeiçoaram ainda mais o material e expandiram as suas aplicações [13] [14].

Após estes desenvolvimentos, o betão moderno consolidou-se como o principal material estrutural do século XX e XXI, viabilizando a execução de obras de grande escala e elevada complexidade técnica. A combinação entre betão e armaduras de aço garantiu o controlo eficaz dos esforços de tração, tornando viável a construção de edifícios em altura, pontes e infraestruturas hidráulicas de elevada capacidade [6].

Entre os exemplos mais representativos da aplicação do betão armado moderno destacam-se as grandes barragens, como a Barragem Hoover (ver Figuras 4, 5 e 6), concluída em 1936, que demonstrou a capacidade do betão para responder a exigências estruturais e hidráulicas extremas [15].

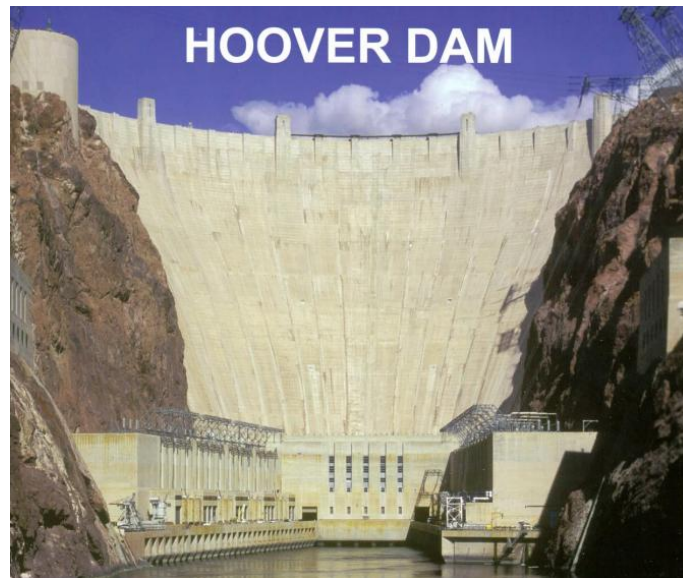


Figura 4 “Atravessando o sudoeste dos Estados Unidos, uma região predominantemente árida, o rio Colorado foi outrora considerado a via navegável mais perigosa da América.” - Barragem Hoover, concluída em 1936 [15].

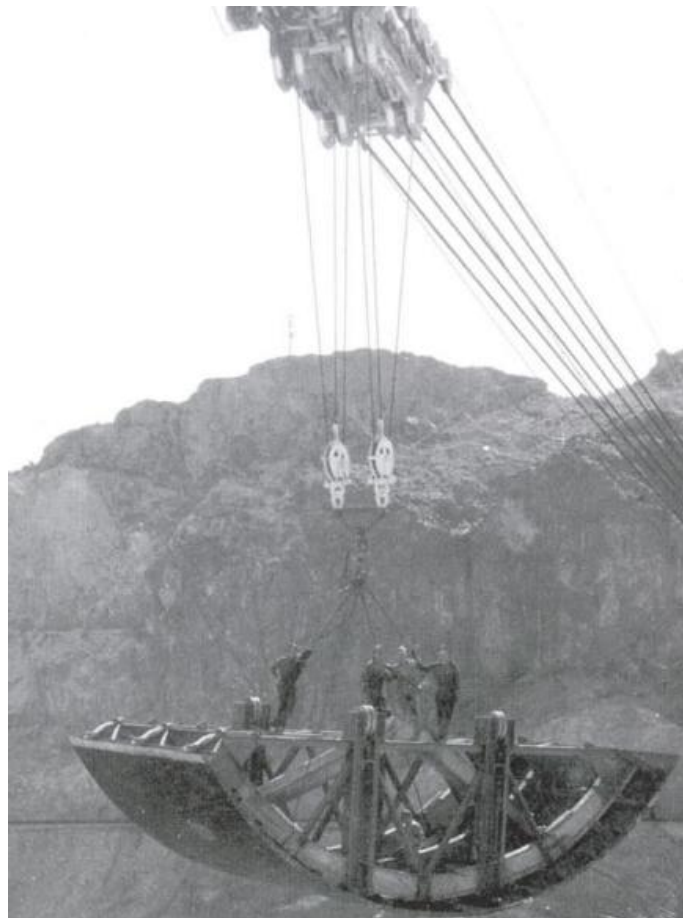


Figura 5 “O teleférico da Barragem de Hoover, com capacidade para 150 toneladas e ainda hoje em funcionamento, desce um molde para o revestimento do túnel de entrada da conduta forçada até ao desfiladeiro, em 1933” [15].



Figura 6 “Em 1934, os trabalhadores deslocam-se num teleférico inclinado desde a margem do Black Canyon, no Nevada, até ao topo da barragem” [15].

No domínio das pontes, estruturas como a Ponte Vasco da Gama (ver Figuras 7 e 8) evidenciam o potencial do betão na execução de vãos extensos e na durabilidade em ambientes agressivos, nomeadamente marítimos [16]. Em contexto urbano, o betão armado tornou-se essencial na construção de edifícios de grande altura, assegurando soluções estruturais eficientes e economicamente viáveis [17].



Figura 7 “A Ponte Vasco da Gama, um marco histórico em Portugal, revolucionou a mobilidade local e ligou as cidades situadas em ambas as margens do rio Tejo” [16].



Figura 8 A Ponte Vasco da Gama continua a ser a ponte mais longa da Europa. [16].

Posteriormente, o desenvolvimento do betão pré-esforçado constituiu uma evolução significativa. Introduzido por Eugène Freyssinet na primeira metade do século XX, este sistema baseia-se na introdução de tensões de compressão no betão antes da aplicação das cargas de serviço, contribuindo para atenuar fissuração e deformações, bem como aumentar a capacidade resistente e a durabilidade das estruturas [18]. O betão pré-esforçado é atualmente amplamente utilizado em pontes ver Figura 9, viadutos e elementos pré-fabricados, sendo particularmente pertinente em estruturas que exigem grandes vãos e elevada eficiência estrutural [19].



Figura 9 A ponte de Plougastel em 1928. Graças a Eugène Freyssinet, o betão armado tornou-se realidade. Coleção e fotografia da ENPC Paris [18].

Estes avanços consolidaram o betão como um material altamente adaptável, capaz de responder a diferentes exigências estruturais e funcionais. A evolução contínua das técnicas de produção e aplicação, aliada à investigação em novos materiais e soluções construtivas, tem permitido melhorar o desempenho do betão [20].

2.1.2 O papel do betão durante as guerras e catástrofes naturais

A excecional resiliência do betão tornou-o particularmente valioso durante eventos extremos. Durante a II Guerra Mundial, foi utilizado em bunkers e fortificações militares concebidas para resistir a explosões e condições adversas. Muitas dessas estruturas construídas em betão mantêm-se intactas mesmo 70-80 anos depois, com ensaios de resistência à compressão ainda na ordem dos 40–50 MPa [21]. Ensaios em fortificações da Boémia (República Checa) demonstram que o betão resistiu à corrosão química e biológica ao longo de décadas, mantendo a sua integridade funcional e estrutural [22], ver Figura 10.



Figura 10 Local de amostragem: bunker n.º T-S-20 [22].

Após as guerras, o betão tornou-se fundamental para a rápida reconstrução de cidades devastadas, principalmente na Europa. A versatilidade do betão armado, possibilitou a criação de infraestruturas urbanas modernas adequadas para a recuperação após a guerra. O betão também desempenha um papel crucial na resiliência, em países propensos a sismos, como o Japão, as estruturas de betão foram projetadas ou adaptadas para resistir a sismos severos por meio de isolamento sísmico, amortecimento e outras técnicas antissísmicas, garantindo a integridade estrutural mesmo sob desastres naturais extremos [23] [24] [25].

Para além do seu papel em contextos de guerra, o betão tem demonstrado uma relevância crítica na mitigação dos efeitos de catástrofes naturais, particularmente em cenários de sismos e tsunamis.

Um dos exemplos mais críticos ocorreu durante o Grande Terramoto do Leste do Japão em 2011 (magnitude 9,0) seguido de um tsunami devastador, ver Figuras 11, 12, 13 e 14. Diversas estruturas em betão armado, nomeadamente edifícios com sistemas de isolamento sísmico e núcleos estruturais rígidos, mantiveram a sua integridade estrutural mesmo após o evento, possibilitando salvar vidas e servir como pontos de abrigo temporário [26]. Estudos conduzidos após o evento

demonstraram que edifícios projetados segundo normas sísmicas modernas apresentaram desempenhos significativamente superiores face a estruturas mais antigas ou não reforçadas [27].

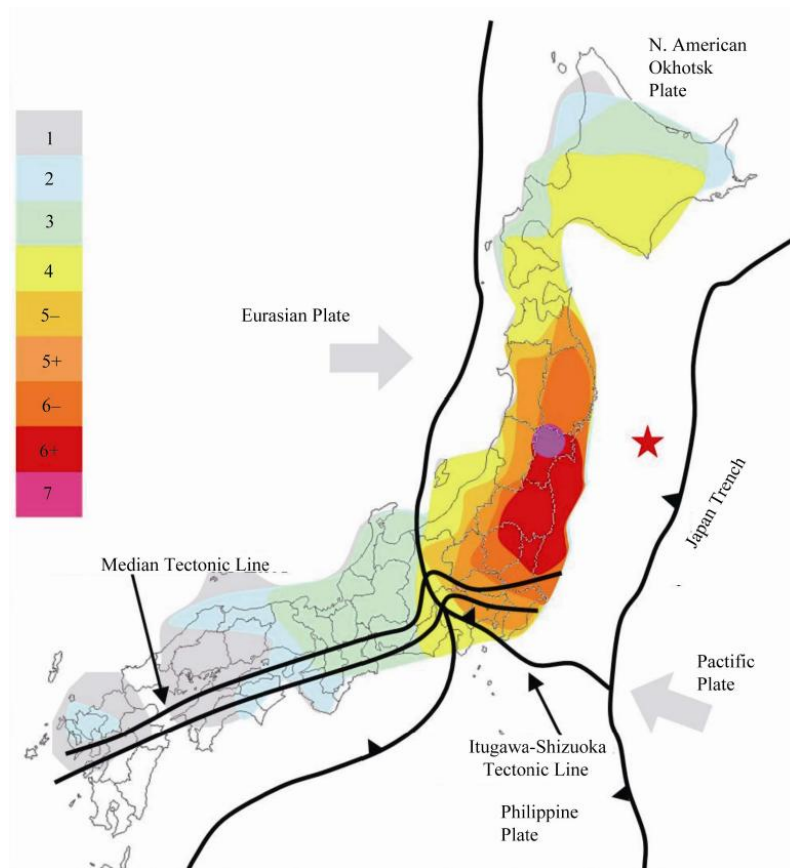


Figura 11 Mapa de intensidade do sismo de magnitude 9,0 ocorrido em 11 de março de 2011 (aqui é utilizada a escala de intensidade japonesa, pelo que estes valores não correspondem às intensidades EMS ou Mercalli, mas refletem a distribuição da aceleração sísmica medida) [28].



Figura 12 Um tsunami devastador atinge a costa do nordeste do Japão a 11 de março de 2011 [29].



Figura 13 Fotografia, tirada por Hiroshi Kawahara, funcionário da cidade de Sendai, a 11 de março de 2011 [29].

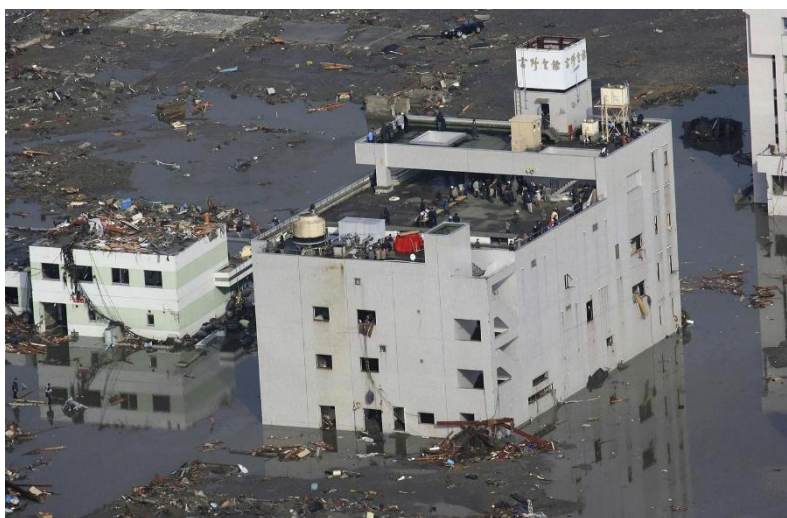


Figura 14 Pessoas retidas no topo de um edifício em Minami Sanriku, Miyagi, Japão, na sequência do catastrófico terramoto e tsunami [29].

Adicionalmente, infraestruturas de proteção costeira em betão, como diques (ver Figuras 15 e 16) e quebra-mares, desempenharam um papel importante na redução do efeito do tsunami em determinadas zonas costeiras. Apesar de algumas estruturas terem sido ultrapassadas pela magnitude excecional do evento, muitas contribuíram para a dissipação de energia das ondas e mitigação de danos em áreas urbanas [30] [31].



Figura 15 Um dique costeiro reforçado no nordeste do Japão, construído na sequência do tsunami de 2011. Ravindra Jayaratne [32].

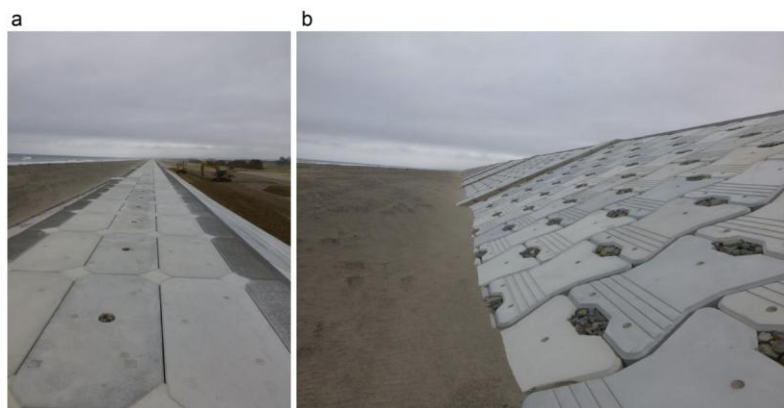


Figura 16 Diques marítimos que protegem o aeroporto de Sendai, a sul da aldeia de Yuriage, na cidade de Natori: (a) vista ao longo do topo da estrutura em direção a sul; e (b) detalhes das unidades de revestimento interligadas no lado marítimo da estrutura [30].

Outro exemplo crucial pode ser observado no sismo de Christchurch, Nova Zelândia, em 2011, ver Figuras 17, 18, 19 e 20 onde edifícios modernos em betão armado com adequada conceção sísmica demonstraram capacidade de dissipação de energia e evitaram colapsos catastróficos. Em contraste, edifícios mais antigos ou com deficiências estruturais sofreram danos severos ou colapsaram, evidenciando a importância do dimensionamento sísmico adequado [33] [34] [35].

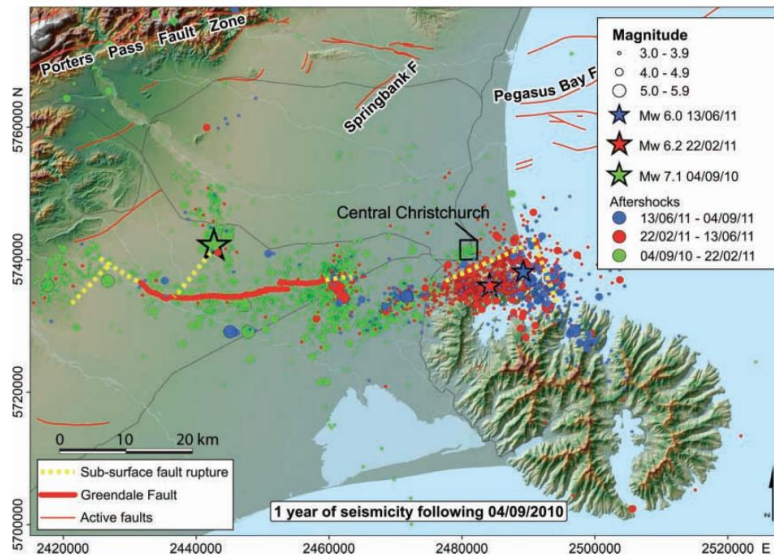


Figura 17 O sismo de Mw 6,2 em Christchurch (estrela vermelha) no contexto do sismo principal de Darfield (estrela verde) e da sequência de réplicas até 4 de setembro de 2011 [34].

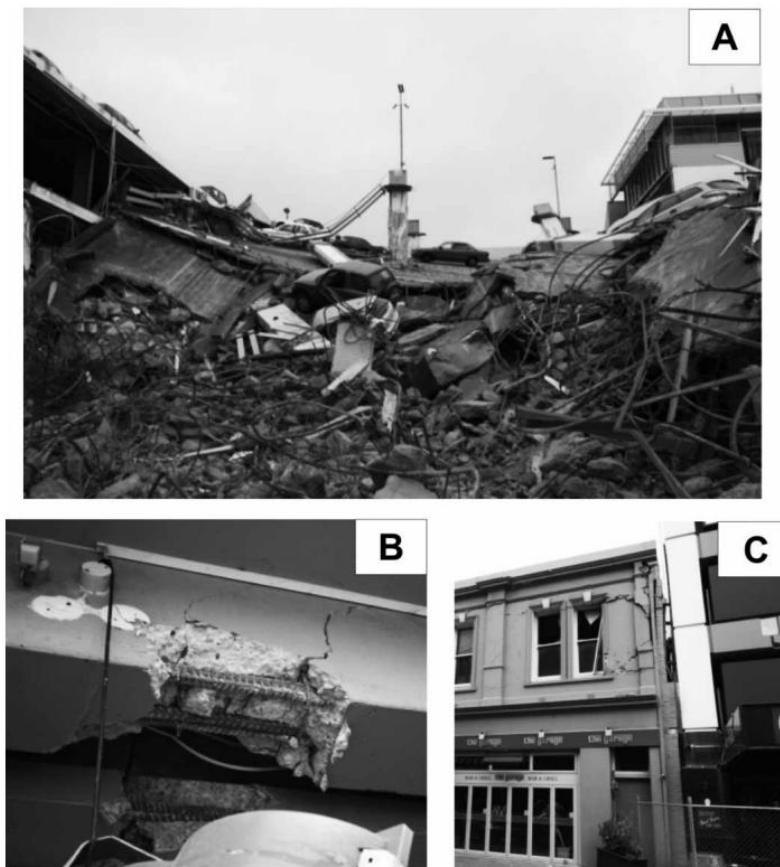


Figura 18 Danos em edifícios de betão armado no centro de Christchurch. A, Colapso de um edifício de estacionamento com laje plana. B, Fissuras, desagregação e danos na armadura de uma viga. C, Danos causados pela ação das ondas no edifício à esquerda [34].



Figura 19 Extensa queda de rochas em Redcliffs após o terramoto de Christchurch de 2011 [35].



Figura 20 Fissuras no betão causadas por um deslocamento permanente das encostas, desencadeado pelo terramoto de 2011 em Christchurch [35].

Estes casos demonstram que o betão, quando corretamente projetado e executado, constitui um material fundamental para a resiliência estrutural em cenários de catástrofes naturais, contribuindo não só para a proteção de vidas humanas, mas também para a redução de perdas económicas e para a recuperação mais rápida das regiões afetadas.

2.1.3 Vantagens e desvantagens do betão

O betão influenciou diretamente a saúde pública, a segurança, a mobilidade e o desenvolvimento económico, com a construção de habitações, hospitais, escolas, pontes, sistemas de metro, aeroportos e outras estruturas essenciais para a vida quotidiana.

A utilização do betão na construção resulta de uma combinação de vantagens práticas e económicas:

1. **Durabilidade:** Quando bem projetadas e executadas, as estruturas de betão podem durar décadas ou séculos [36] [6].
2. **Custo-eficácia:** O betão é relativamente barato em comparação com o aço ou a madeira [20].
3. **Disponibilidade de recursos:** Os principais constituintes utilizados no betão são naturais e abundantes. Ao contrário da madeira, que contribui para a desflorestação, ou do aço, que requer uma extração e transformação intensivo em energia. Os componentes do betão são mais acessíveis do ponto de vista ambiental: calcário, areia, brita e água são abundantes na maioria das regiões [36] [37].
4. **Elevada resistência à compressão:** O betão possui uma excelente resistência à compressão, o que o torna ideal para suportar cargas elevadas em estruturas como pontes e fundações [6] [38].
5. **Versatilidade:** No seu estado fresco, o betão pode ser moldado em praticamente qualquer forma [20].
6. **Resistência ao fogo:** O betão apresenta um desempenho superior na resistência ao fogo quando comparado com materiais como a madeira e o aço [39].

O betão também tem limitações que devem ser reconhecidas e resolvidas:

1. **Peso elevado:** O betão é um material pesado, o que aumenta o peso das estruturas. Esta limitação requer frequentemente apoio estrutural adicional ou fundações, particularmente em grandes projetos [6] [38].
2. **Baixa resistência à tração:** Embora o betão seja excelente na compressão, tem uma resistência muito limitada à tração. Para resolver este problema, é frequentemente adicionado reforço de aço para compensar a sua baixa capacidade de tração [40].
3. **Preocupações ambientais:** A produção de betão, em particular o fabrico de cimento, contribui significativamente para as emissões de dióxido de carbono (CO₂). A produção de cimento é responsável por cerca de 7-8% das emissões globais de CO₂ [41].

4. **Produção intensiva em energia:** O fabrico de cimento requer temperaturas elevadas, que consomem uma quantidade significativa de energia e emitem gases com efeito de estufa. A melhoria da eficiência dos fornos e a integração de combustíveis alternativos deve ser uma prioridade [41] [42].
5. **Fendilhação e retração:** Ao longo do tempo, o betão é suscetível a fendilhar devido à expansão térmica, retração ou métodos de cura inadequados. Estas fendas podem afetar a durabilidade se não forem devidamente controladas [43] [44].

2.2 Tipos de betões

Betões com diferentes resistências e durabilidade

A versatilidade do betão é uma das suas características fundamentais. A sua capacidade de ser adaptado a vários requisitos estruturais decorre, em grande parte, da possibilidade de ter resistência distintas. A classificação do betão em termos de resistência à compressão tem uma notação «C» representa a classe, seguida de dois números (por exemplo, C25/30) referentes à resistência à compressão característica em MPa medida em cilindros ($f_{ck,cyl}$) e em cubos ($f_{ck,cube}$), respetivamente. Esta classificação é amplamente adotada na prática europeia e especificada nas normas europeias [45]. A Tabela 1 resume as classes de resistência mais utilizadas em Portugal.

Tabela 1 Classes de resistência à compressão [46].

Classe de resistência à compressão	Resistência característica mínima em cilindros $f_{ck,cyl}$ (N/mm ²)	Resistência característica mínima em cubos $f_{ck,cube}$ (N/mm ²)
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60

Estas classes são definidas pela norma europeia EN 206:2013, que inclui classes adicionais de C8/10 a C100/115, incluindo, portanto, betões de baixa resistência e de elevada resistência [45]. Em Portugal, as classes mais baixas (abaixo de C20/25) são normalmente utilizadas para elementos não reforçados devido ao seu desempenho mecânico inferior. As classes mais elevadas, como C40/50 e superiores, são utilizadas em edifícios altos, pontes e infraestruturas que exigem maior durabilidade [47].

Betões com agregados leves

O betão tradicional feito com agregados de peso normal resulta numa massa estrutural pesada na ordem dos 2400 kg/m³. O betão com agregados leves (LWC), ver Figuras 21, 22 e 23, foi concebido para limitar o peso total da estrutura, sem comprometer significativamente a resistência. Os agregados leves são normalmente de argila expandida, xisto, ardósia ou pedra-pomes natural. A sua natureza porosa reduz a densidade do betão e melhora as propriedades de isolamento térmico e acústico [48] [49] [50].



Figura 21 Agregados artificiais leves simples (S-LWAs) e agregados artificiais leves duplos (D-LWAs) [49].

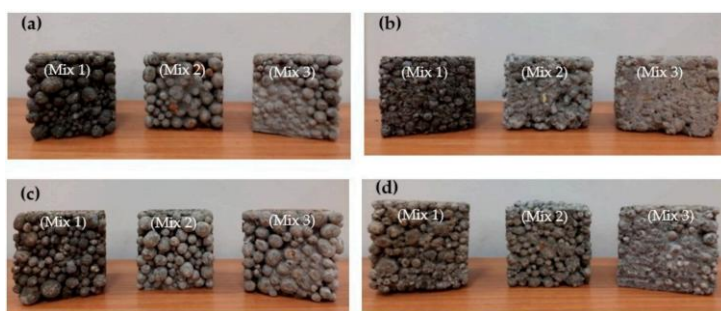


Figura 22 Betões leves: (a) betão leve simples; (b) betão leve simples com PET; (c) betão leve duplo; (d) betão leve duplo com PET (Polietileno tereftalato) no betão leve refere-se a resíduos plásticos reciclados) [49].



Figura 23 O âmbito de aplicação dos agregados leves [50].

Vantagens:

1. **Diminui o peso da estrutura:** A menor densidade diminui as cargas devido ao peso próprio da estrutura, permitindo criar estruturas com maiores vãos [48] [49] [50].
2. **Isolamento térmico:** A porosidade aumenta a resistência térmica, reduzindo o consumo de energia do edifício [47] [49] [50].
3. **Resistência ao fogo melhorada:** A presença de agregados leves de natureza porosa contribui para um melhor desempenho em situação de incêndio, uma vez que a sua estrutura interna permite acomodar as pressões de vapor geradas pelo aquecimento, reduzindo o risco de fendilhação explosiva (spalling) e favorecendo a integridade do betão a temperaturas elevadas [48].

Desvantagens:

1. **Menor resistência à compressão:** A introdução de agregados leves pode resultar numa resistência inferior à do betão de peso normal, mas com o estudo da composição adequada é possível produzir betões leves com resistências elevadas [48] [49] [50].
2. **Custo mais elevado de agregados:** A produção e o transporte de agregados leves são mais caros [48].

O betão com agregados leves é normalmente utilizado em edifícios de grande altura para baixar o peso próprio das lajes e paredes, em pontes para diminuir as cargas permanentes do tabuleiro e das estruturas de suporte, em estruturas offshore devido à sua menor densidade, melhor desempenho térmico e em componentes pré-fabricados, como painéis e blocos térmicos, constituindo uma solução técnica eficiente para desafios estruturais e funcionais [48] [49] [50].

Betões com fibras

O Fiber-reinforced concrete (FRC) integra fibras de aço, vidro, sintéticas ou naturais nas composições de betão, ver Figuras 24 e 25, para melhorar o desempenho à tração e a resistência à fendilhação. O FRC melhora o comportamento pós-fendilhação em comparação com um betão corrente, sem fibras [51] [52] [53].

As fibras atuam como reforço distribuído, retardando a propagação de microfissuras e aumentando a resistência, particularmente necessário em condições de incidência ou de cargas pesadas [51] [52] [53].

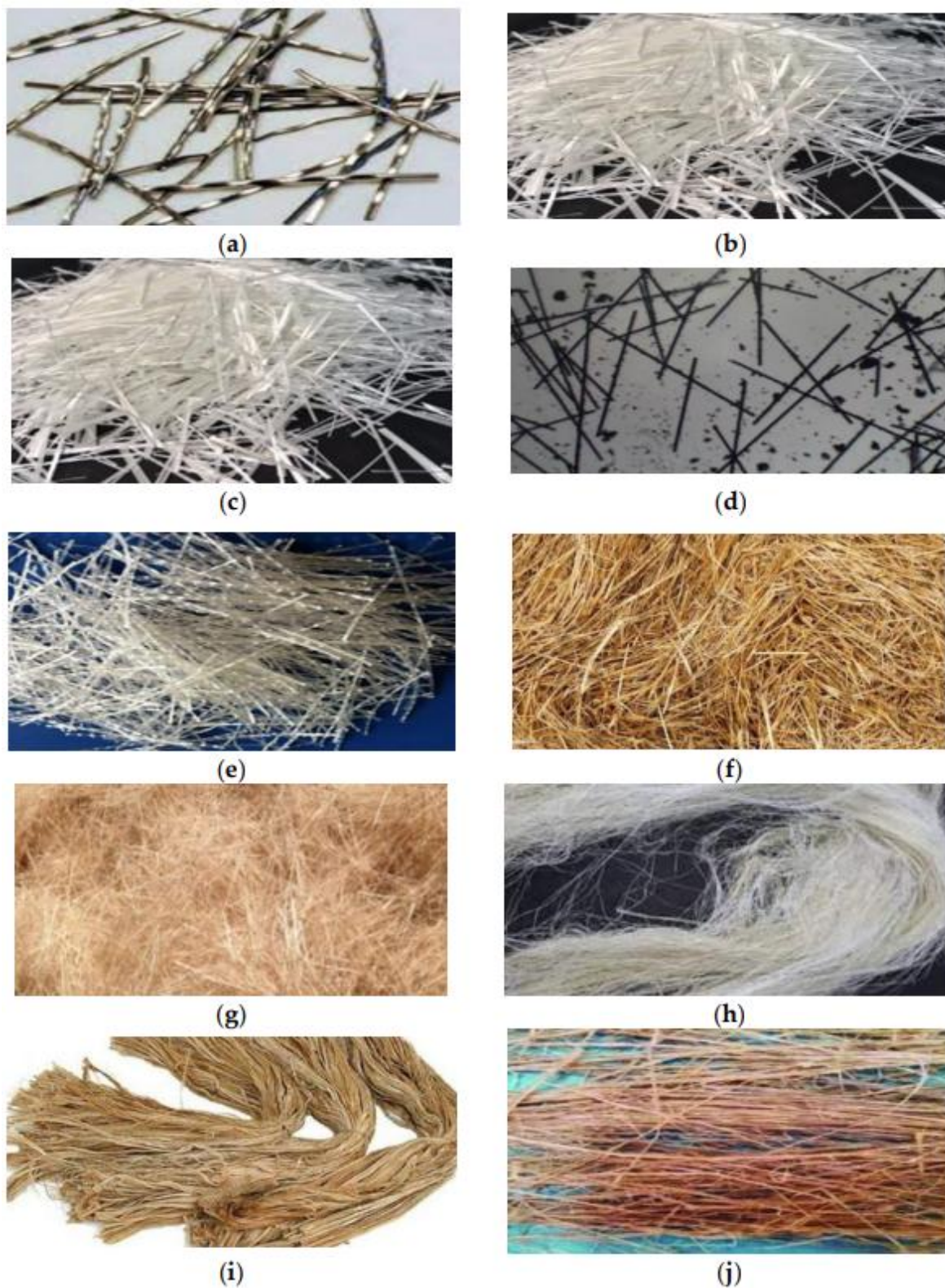


Figura 24 Aspeto de algumas fibras utilizadas no betão: (a). Fibras de aço, (b). Fibras de vidro, (c). Fibras de polipropileno, (d). Fibras de carbono, (e). Fibras de plástico, (f). Palha de trigo, (g). Fibras de cana-de-açúcar, (h). Fibras de sisal, (i). Fibra de juta, (j). Fibras de bambu [52].



Figura 25 Aspeto de betão reforçado com fibras [53].

Tipos de fibras e aplicações

1. **Fibras de aço:** Aumentam a capacidade de carga e o controlo de fissuras em elementos estruturais pesados, pisos industriais e túneis [54] [52] [53].
2. **Fibras sintéticas (por exemplo, polipropileno):** Melhoram o desempenho à flexão e o controlo da retração [54] [52].
3. **Fibras de vidro:** Proporcionam resistência à corrosão e um aumento moderado da resistência à tração [54] [52].
4. **Fibras naturais:** Materiais como a juta, o coco ou as fibras de madeira são opções sustentáveis que melhoram a compatibilidade ecológica, embora com durabilidade variável [14] [52].
5. **Fibras de carbono:** Alto desempenho, mas alto custo, utilizadas em aplicações especializadas [54] [52].

A trabalhabilidade e a distribuição uniforme das fibras podem complicar as amassaduras e a aplicação do betão, exigindo um cuidado adicional na mistura e o controlo de qualidade. O custo do betão por metro cúbico também aumenta significativamente, especialmente para fibras de alto desempenho [54] [52].

Betões auto-compactáveis

Self-compacting concrete (SCC), introduzido no final da década de 1980 no Japão, o betão auto-compactável, ver Figura 26, foi desenvolvido para responder aos desafios das de elementos com elevada densidade de armaduras, onde os métodos convencionais de vibração para compactar o betão se revelaram impraticáveis ou ineficientes. O betão auto-compactável é um tipo de betão muito fluído que pode preencher os vazios sem necessidade de vibração, garantindo uma densidade uniforme e um bom acabamento superficial [55] [56].

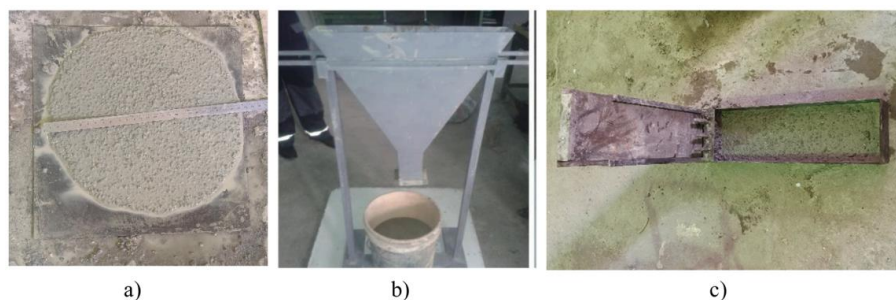


Figura 26 Ensaio ao betão auto-compactável fresco: a) fluxo de assentamento, b) funil em V e c) caixa em L [56].

Principais características do SCC:

1. **Alta fluidez:** Permite o enchimento de cofragens complexas [55] [56].
2. **Estabilidade:** É resistente à segregação [55] [56].
3. **Construção pouco ruidosa:** Elimina o ruído de vibração na obra, tornando o SCC uma opção amiga do ambiente, especialmente em ambientes urbanos [55].

Composição do SCC:

Os principais componentes que diferenciam o SCC do betão convencional incluem:

1. **Superplastificantes:** Redutores de água de alto alcance para obter fluidez [55].
2. **Viscosity-Modifying Agents (VMAs):** Melhoram a estabilidade e reduzem a segregação [55].
3. **Escolha otimizada de agregados:** Uma distribuição adequada dos diferentes tamanhos dos agregados, reduzindo os vazios, é fundamental para garantir um fluxo suave [55].
4. **Dosagem de cimento:** Dosagem mais elevada de cimento e de partículas finas do que o betão convencional para obter a consistência e a resistência desejada, o que aumenta bastante o preço [55].

Vantagens do SCC

1. **Maior eficiência na construção:** Descarga do betão mais rápida, sem necessidade de vibração [55] [56].
2. **Acabamento de superfície superior:** As suas propriedades de auto-nivelamento proporcionam um acabamento suave, liso e uniforme [55].
3. **Maior durabilidade:** Betão homogéneo, com redução de vazios e porosidade reduzida, melhora a sua resistência à degradação ambiental [55] [56].

4. **Adaptabilidade em estruturas complexas:** O SCC flui facilmente em cofragens complexas e altamente reforçadas com aço, onde o betão tradicional tem dificuldades, pois os acessos para vibração são difíceis [55] [56].

Betões com agregados reciclados e com dosagens reduzidas de cimento

O betão que incorpora agregados reciclados (ver Figuras 27, 28 e 29) e menor teor de cimento aborda dois grandes desafios de sustentabilidade: a gestão dos resíduos de construção e demolição e a pegada de carbono da produção de cimento [57]. Os Recycled Concrete Aggregates (RCA) e os Mixed Recycled Aggregates (MRA) reduzem a dependência dos recursos naturais e evitam resíduos extras para os aterros [57] [58] [59] [60].

A redução da dosagem de cimento, muitas vezes através de materiais cimentícios suplementares, como cinzas volantes ou escórias, podem diminuir significativamente as emissões de CO₂ associadas ao betão [41].

É necessário prestar atenção à qualidade dos agregados reciclados e ao desenvolvimento da resistência inicial, o que pode exigir aditivos para compensar o ganho de resistência mais lento [57] [58] [59].

Este tipo de betão sustentável é cada vez mais especificado em aplicações com exigências estruturais moderadas, como pavimentos e camadas de base em infraestruturas rodoviárias, bem como em elementos não estruturais, particularmente em empreendimentos com enfoque ambiental [57] [58] [59].

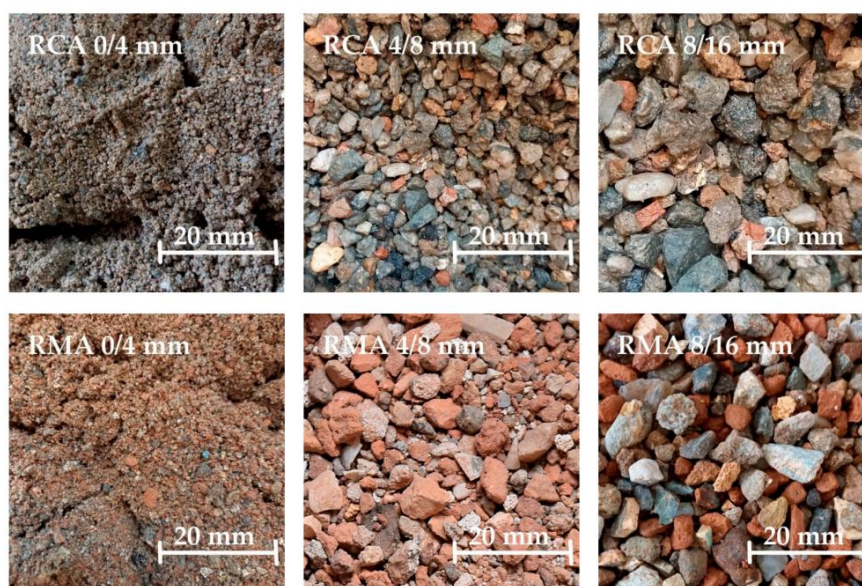


Figura 27 Agregados de betão reciclado (RCA) e agregados de alvenaria reciclada (RMA) nas faixas granulométricas de 0–4, 4–8 e 8–16 mm [58].



Figura 28 Blocos de betão com agregado de tijolo demolido e agregados reciclados [59].

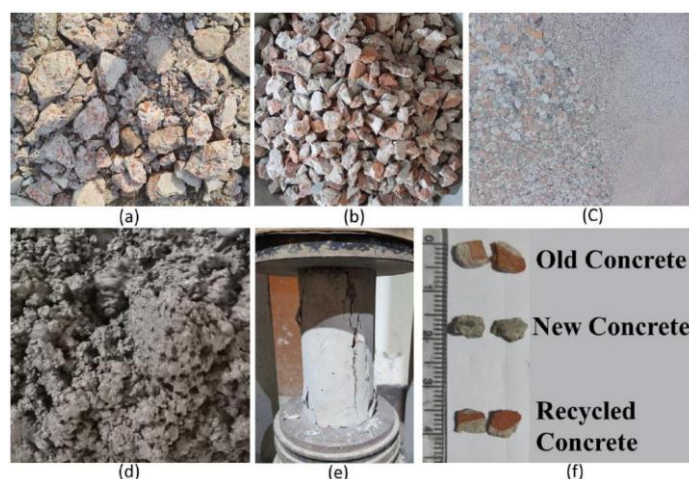


Figura 29 (a) Betão antigo demolido, (b) Agregado grosso reciclado, (c) Agregado fino reciclado, (d) Mistura de betão reciclado, (e) Cilindro de betão (ensaio de compressão), (f) Amostra para análise microscopia eletrónica de varrimento [60].

Betões de ultra elevado desempenho (UHPC)

Os betões de ultra elevado desempenho (Ultra-High Performance Concrete – UHPC) representam uma evolução significativa face aos betões convencionais, caracterizando-se por resistências mecânicas muito elevadas (tipicamente superiores a 150 MPa), ver Figura 30, elevada durabilidade e uma microestrutura extremamente densa [13] [61]. Estes materiais são obtidos através de uma otimização rigorosa da composição, incluindo a utilização de elevadas quantidades de ligantes, materiais cimentícios suplementares (como sílica ativa), agregados de granulometria fina e, frequentemente, fibras metálicas para reforço estrutural.

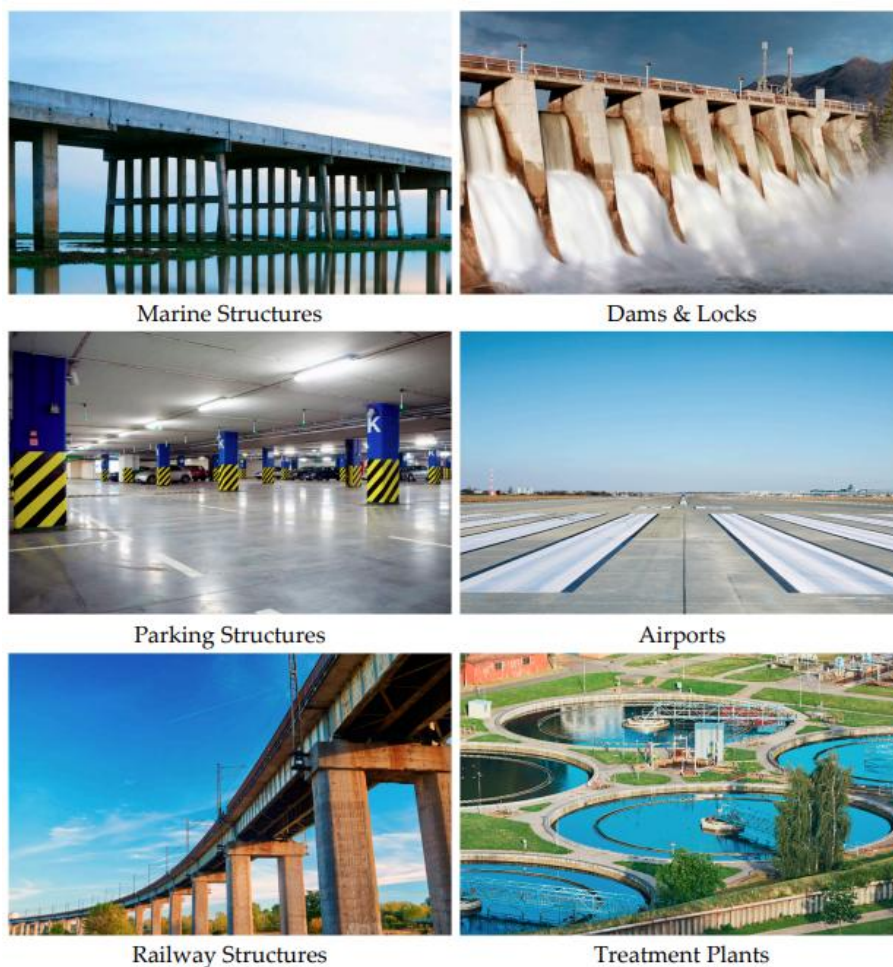


Figura 30 Várias aplicações do betão de ultra elevado desempenho (UHPC) em projetos de infraestruturas reais, incluindo pontes, barragens, parques de estacionamento de vários andares e estações de tratamento de águas [62].

A matriz cimentícia tem uma porosidade muito reduzida e uma permeabilidade extremamente baixa, o que confere ao UHPC uma resistência excecional à penetração de agentes agressivos, como cloretos e dióxido de carbono, aumentando significativamente a durabilidade das estruturas [13] [63]. Esta característica torna estes betões particularmente adequados para ambientes agressivos, como zonas marítimas ou estruturas expostas a saís de degelo.

Do ponto de vista estrutural, a incorporação de fibras (geralmente de aço) permite melhorar o comportamento pós-fissuração, conferindo ductilidade a um material que, de outra forma, seria frágil. Este comportamento permite restringir ou, em alguns casos, eliminar armaduras convencionais, conduzindo a soluções estruturais mais esbeltas e eficientes [61] [62].

Apesar das suas vantagens técnicas, o UHPC apresenta desafios com importância do ponto de vista ambiental e económico. O elevado teor de cimento incorporado pode resultar num aumento da consequência ambiental. No entanto, quando analisado ao nível da estrutura ou do ciclo de vida, esta influência pode ser

compensado pelo aumento da durabilidade e diminuição das necessidades de manutenção [63].

Atualmente, o UHPC é utilizado em aplicações exigentes, como pontes, elementos pré-fabricados de elevada durabilidade, reabilitação estrutural e infraestruturas sujeitas a condições severas de exposição, constituindo uma solução tecnológica avançada que alia desempenho mecânico e durabilidade a longo prazo [13] [61].

3 TRANSPORTE DE BETÃO: HISTÓRIA E LOGÍSTICA

3.1 Considerações gerais

O transporte de betão tem um papel fundamental no desempenho ambiental, económico e operacional do setor da construção. O betão é um material intrinsecamente pesado, o betão fresco apresenta normalmente uma densidade de aproximadamente 2400 kg/m^3 , o que torna o transporte um fator marcante no consumo de energia, nos custos operacionais e nas emissões de gases com efeito de estufa ao longo do ciclo de vida do betão [14]. Como resultado, a logística de transporte influencia fortemente a sustentabilidade geral da construção em betão, particularmente em ambientes urbanos.

O betão é transportado principalmente por autobetoneiras, que são dimensionadas para manter o material no estado fresco desde a central de betão até à obra. As restrições operacionais associadas a esses veículos, onde se incluem o tempo de entrega limitado devido ao início do endurecimento do betão, restrições ao limite da carga máxima, o congestionamento de trânsito e as viagens de retorno sem carga, tornam o transporte de betão uma das etapas mais complexas no processo de fabrico e distribuição de betão [13]. Há estudos que indicam que as emissões relacionadas com o transporte podem representar uma parte substancial do GWP total do betão, especialmente quando as distâncias de entrega são grandes ou a utilização dos veículos é ineficiente [44].

3.2 Breves notas históricas

Historicamente, a organização do transporte de betão evoluiu juntamente com o crescimento urbano e a industrialização. Nos processos iniciais da produção de betão pré-misturado, as centrais de betão eram frequentemente localizadas perto dos locais de construção, minimizando as distâncias de transporte. No entanto, a rápida expansão urbana e as pressões sobre o uso do solo deslocaram progressivamente as centrais de betão para áreas periféricas, aumentando as distâncias de entrega e a exposição ao congestionamento [11].

O início da Segunda Guerra Mundial marcou o nascimento da indústria australiana de betão pré-misturado. Desde a sua origem em 1939, o desenvolvimento do Transit Mixer na Austrália evoluiu de um agitador de tambor giratório primitivo para uma betoneira de mistura de betão cientificamente projetada com elevada eficiência, produzindo mais de 12 milhões de metros cúbicos de betão por ano na Austrália [64].

A maior parte da tecnologia original do betão pré-misturado na Austrália teve origem nos Estados Unidos no início da década de 1920, principalmente com a construção de grandes barragens de betão no oeste do continente americano. As centrais de

betão utilizadas na construção dessas barragens eram geralmente equipadas com grandes tambores horizontais ou misturadores basculantes que produziam uma mistura homogênea [64].

No entanto, o transporte de betão em carrinhos basculantes e caçambas desfazia grande parte das misturas porque criava segregação entre a pasta e os agregados, uma vez que nos veículos usados não havia agitação da mistura. As primeiras soluções desenvolvidas nos Estados Unidos consistiram na utilização de misturadoras a vapor no local, sendo os materiais fornecidos sob a forma seca e a granel, ver Figura 31 [64].



Figura 31 Fotografia de uma das primeiras tentativas para assegurar a mistura contínua durante o transporte, em Atlantic City 1910 [65].

Com o desenvolvimento dos camiões motorizados no início do século XX, surgiram rapidamente soluções que integravam equipamentos de mistura diretamente nos veículos, resultando em melhores condições de transporte do betão. Entre os primeiros exemplos destacam-se as misturadoras horizontais montadas em camiões, como a Rex Chain Belt de 1922, com capacidade de cerca de 1 m³, visível na Figura 32. Posteriormente, surgiram versões mais evoluídas, como a de 1930, já com uma capacidade próxima dos 3 m³, apresentada na Figura 33 [64].

Estes equipamentos introduziram melhorias valiosas ao nível dos sistemas de descarga e elevação, contribuindo para uma maior eficiência operacional. Ainda assim, as limitações tecnológicas da época, aliadas à menor dimensão das obras e às curtas distâncias de transporte, justificavam as reduzidas capacidades destas primeiras autobetoneiras [64] [66].

Um marco de destaque na evolução do transporte de betão ocorreu na Austrália, com a entrada em funcionamento, em 1939, da central de Glebe Island, em Sydney. Esta instalação, operada pela Ready Mixed Concrete Limited, utilizava uma misturadora central estacionária e uma frota de veículos do tipo “Tumblebug”, conforme ilustrado na Figura 34. Estes equipamentos, apesar de não realizarem

Avaliação do impacto ambiental do transporte de betão em Portugal e estratégias de mitigação

mistura ativa, asseguravam a agitação do betão durante o transporte, reduzindo significativamente o risco de segregação [64].



Figura 32 Misturadora horizontal Rex Chain Belt de 1922 com capacidade para 1 m³, montado num camião G.M.C. [64].

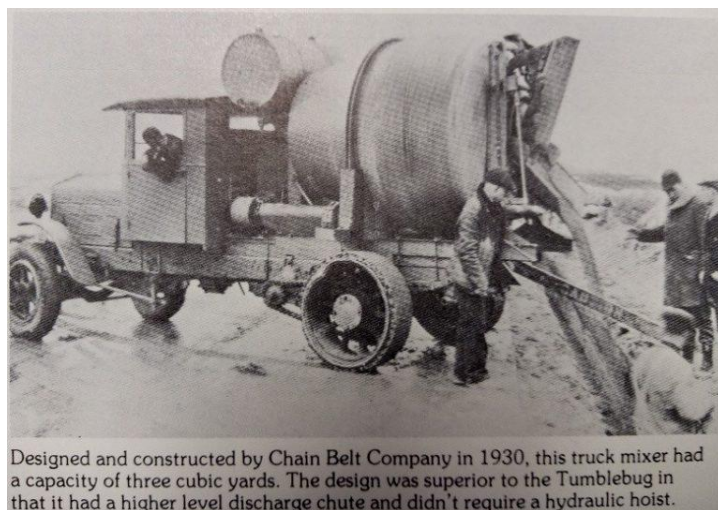


Figura 33 Concebida e construída pela Chain Belt Company em 1930, esta autobetoneira tinha uma capacidade de 3 m³ [64].



Figura 34 Agitador do tipo “tumble bug”, datado da década de 1930, equipado com um tambor cilíndrico horizontal e um mecanismo hidráulico de elevação para a descarga do betão. [64].

Do ponto de vista construtivo, estes sistemas baseavam-se em tambores horizontais com mecanismos relativamente simples, onde o carregamento e a descarga eram efetuados por gravidade e com recurso a sistemas mecânicos de elevação. No entanto, apresentavam limitações operacionais, nomeadamente na descarga completa do material e na segurança dos operadores, refletindo o estágio inicial de desenvolvimento tecnológico [64] [66].

A evolução seguinte foi marcada pela introdução de betoneiras de tambor inclinado, inicialmente desenvolvidas nos Estados Unidos na década de 1940, com o objetivo de melhorar o processo de descarga. Um exemplo deste tipo de equipamento pode ser observado na Figura 35. Esta configuração permitia uma melhor gestão do escoamento do betão, embora ainda recorresse a soluções relativamente rudimentares quando comparadas com os sistemas atuais [64].

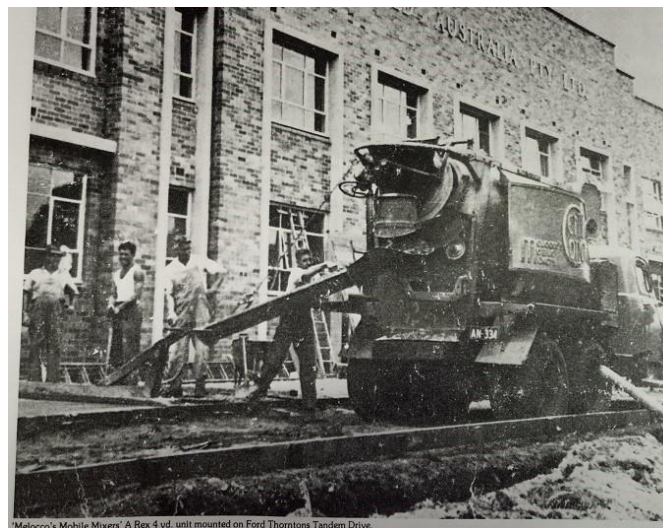


Figura 35 Autobetoneira móvel modelo “Rex”, com capacidade de aproximadamente 3 m³, da Melocco’s Mobile Mixers, montada sobre um veículo Ford Thorntons [64].

Apesar da qualidade construtiva de alguns destes modelos, o seu custo elevado levou ao desenvolvimento de alternativas locais, nomeadamente na Austrália.

Avaliação do impacto ambiental do transporte de betão em Portugal e estratégias de mitigação

Paralelamente, surgiram outros fabricantes que introduziram variações no design, algumas das quais menos eficazes na prevenção da segregação, ver Figuras 36 e 37 [64] [66] [67].



Figura 36 Betoneira Rex Motomixer. Nota: Tentativa de camuflar o tambor inclinado [64].



Figura 37 Segregação do betão causada por uma mistura irregular [67].

A partir da década de 1950, verificou-se um aumento substancial da capacidade das autobetoneiras, acompanhando a evolução das necessidades da indústria da construção. Modelos com capacidade de cerca de 6 m³ começaram a ser introduzidos, incorporando motores mais potentes e sistemas de transmissão mais robustos, favorecendo uma mistura mais homogênea e uma descarga mais eficiente, mesmo para betões de menor consistência. Exemplos destes desenvolvimentos podem ser observados na Figura 38 [64].



Figura 38 Primeira betoneira fabricada pela Fowler Wood Engineering, uma betoneira de 3 m³ (1946-7) [64].

Com o amadurecimento do setor, fabricantes como a Fowler Wood Engineering e a Marlak Engineering desempenharam um papel de elevada relevância na evolução tecnológica das autobetoneiras, beneficiando de uma estreita colaboração com os utilizadores. Este processo contribuiu para a melhoria contínua do desempenho dos equipamentos e para a adaptação às exigências reais da indústria [64].

A evolução culmina nas autobetoneiras modernas, como as apresentadas nas Figuras 39 e 40, que integram avanços expressivos ao nível da geometria do tambor, sistemas de transmissão e controlo operacional. Estes desenvolvimentos permitiram elevar a capacidade, melhorar a qualidade da mistura e garantir maior fiabilidade no transporte do betão [64] [6] [68].



Figura 39 Load Master Transit Mixer, Cesco Australia [69].

Destaques das inovações australianas no transporte de betão [64]:

- Primeiro país no mundo a conseguir o manuseamento eficiente de betão de baixa consistência.
- Primeiro país no mundo a alargar a boca do tambor para carregamentos e descarregamentos rápidos.
- Líder mundial na mistura uniforme de betão em toda a carga e no cumprimento de testes rigorosos para garantir o desempenho adequado da mistura.
- Primeiro país no mundo a utilizar betoneiras como misturadoras centrais em grandes obras de construção civil - barragens, túneis, aeroportos que exigiam betão de elevado desempenho.

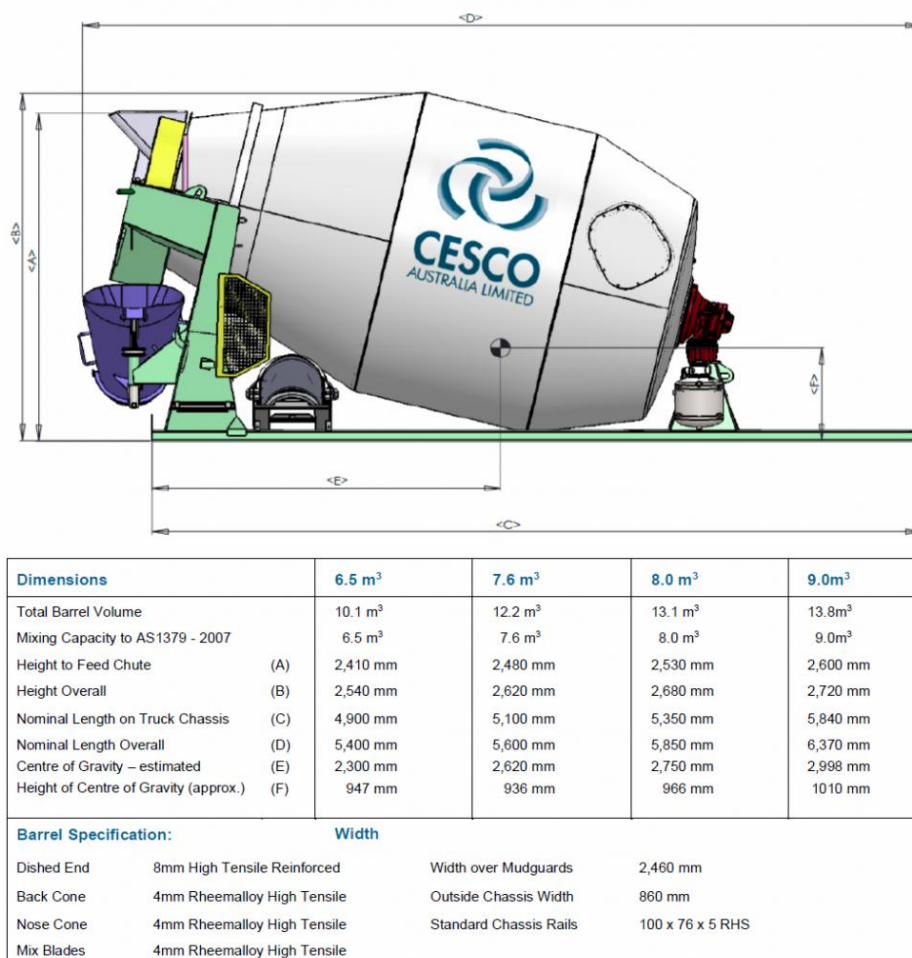


Figura 40 Ficha Técnica Load Master Transit Mixer, Cesco Australia [69].

De forma geral, a evolução das autobetoneiras reflete um processo contínuo de inovação tecnológica, impulsionado pela necessidade de intensificar a produtividade, assegurar a qualidade do betão e melhorar a eficiência operacional ao longo de toda a cadeia de transporte [70] [68] [71].

3.3 Utilização de autobetoneiras de menor capacidade e as centrais móveis

Apesar da adoção de autobetoneiras de grande capacidade, o uso de autobetoneiras de menor capacidade, normalmente com capacidades em torno de 3 a 4 m³, continua a ser de relevo em ambientes urbanos densos. Ruas estreitas, zonas de acesso restrito, raios de viragem limitados e restrições de peso impedem muitas vezes o uso eficiente de veículos grandes nos centros das cidades. Além disso, do ponto de vista ambiental e económico, é fundamental adequar a capacidade do veículo à procura real. Transportar 3 m³ de betão numa autobetoneira com capacidade para 7 m³ resulta numa má utilização do veículo, consumo desnecessário de combustível e emissões mais elevadas por metro cúbico entregue, além de custos de transporte adicionais para o cliente [72]. O dimensionamento adequado dos veículos e a melhoria da

utilização da carga estão entre as medidas mais eficazes para conter as consequências ambientais associados ao transporte [73].

Além das vantagens já enunciadas, as autobetoneiras de pequena capacidade (por exemplo 3 m³) podem representar uma solução mais otimizada entre a procura e a carga. Nas operações convencionais de betão pronto, as autobetoneiras normalmente operam perto do limite legal de carga útil, muitas vezes em torno de 7 m³ por viagem, dependendo da densidade do betão e da configuração do veículo [70]. Para encomendas de média a grande dimensão, isto pode levar a ineficiências sistemáticas. Por exemplo, uma encomenda de 80 m³ de betão corresponde a aproximadamente 11,4 cargas completas. Embora onze autobetoneiras possam entregar cerca de 77 m³, ainda é necessária uma viagem final para fornecer os 3 m³ restantes. Nesses casos, uma betoneira de tamanho normal é enviada com uma carga muito abaixo da sua capacidade, resultando num consumo desnecessário de combustível, que se reflete num maior custo do transporte e numa maior emissão de CO₂ por metro cúbico de betão.

A disponibilidade de uma autobetoneira de 3 m³ na frota permite atender a essa procura residual de forma eficiente, garantindo a utilização total da capacidade do veículo e evitando viagens com carga parcial. Do ponto de vista operacional, pode esperar-se que este tipo de veículo tenha taxas de utilização consistentemente elevadas, uma vez que volumes residuais, obras de pequena escala, obras de reparação e clientes particulares requerem frequentemente entregas de 1 a 3 m³. Melhorar a taxa de uso dos veículos em termos de carga é uma das estratégias mais eficazes para cortar o consumo de combustível e as emissões de gases com efeito de estufa [72], [73]. Portanto, a integração de betoneiras de pequena capacidade nas frotas de betão pronto contribui não só para melhorar o serviço ao cliente e a eficiência de custos, mas também para reduções mensuráveis nos contributos ambientais relacionados com o transporte, alinhando a logística do betão com os princípios da mobilidade urbana sustentável e inteligente.

As estratégias de logística urbana tornaram-se cada vez mais predominantes para garantir um fornecimento eficiente de betão, reduzindo simultaneamente as implicações ambientais. Conceitos como entregas fora do horário de pico, otimização de rotas e programação coordenada são agora amplamente reconhecidos como medidas fundamentais para melhorar a eficiência do transporte de betão nas zonas urbanas [73].

Quando a procura de betão é particularmente alta, por exemplo durante grandes projetos de infraestruturas ou grandes operações de reabilitação urbana, o uso de centrais móveis ou temporárias surgiu como uma solução viável. As centrais de betão móveis permitem que a produção seja transferida para locais mais próximos dos estaleiros de construção, reduzindo significativamente as distâncias de transporte, o consumo de combustível e as emissões associadas [74].

Ferramentas digitais, como monitorização da frota em tempo real, otimização de rotas com base em GPS, programação da viagem considerando o tráfego e a previsão

Avaliação do impacto ambiental do transporte de betão em Portugal e estratégias de mitigação

da procura com base em dados, permitem uma coordenação mais eficiente entre centrais de betão, autobetoneiras e estaleiros de construção [75].

Do ponto de vista tecnológico, a transição para autobetoneiras híbridas e elétricas (ver Figura 41) é o futuro para moderar ainda mais os efeitos sobre o ambiente do transporte de betão. As autobetoneiras híbridas, que combinam motores de combustão interna com transmissões elétricas, já demonstram uma redução significativa no consumo de combustível e nos níveis de ruído durante a operação urbana em baixa velocidade. As autobetoneiras totalmente elétricas, embora ainda limitadas por restrições de autonomia e carga útil, estão a ser cada vez mais testadas para entregas urbanas de curta distância [76]. Estes desenvolvimentos permitem uma melhoria da qualidade do ar, redução do ruído e é um contributo para se atingir a neutralidade carbónica [77].



Figura 41 SANY apresenta autobetoneiras elétricas, 2020 [78].

O transporte de betão deve ser visto como parte de um sistema mais amplo de mobilidade e logística, dado o papel essencial do betão no desenvolvimento urbano e nas infraestruturas, melhorar a eficiência e a sustentabilidade do seu transporte é fundamental para aliviar a pegada ambiental associada ao setor da construção. [79].

A Betão Liz, subsidiária da Cimpor, teve recentemente um desenvolvimento notável na área do transporte de betão ao ser a primeira produtora de betão em Portugal a utilizar uma autobetoneira totalmente elétrica, ver Figuras 42, 43 e 44. O uso deste tipo de autobetoneiras, uma PUTZMEISTER P9G e Mixer iONtron [80], representa um avanço útil na implementação de práticas de construção sustentáveis no mercado nacional, ao contribuir para a redução significativa das emissões de CO₂ no transporte betão. A autobetoneira é descrita como 100 % elétrica e livre de emissões diretas, alinhando-se com os esforços mais amplos da indústria para diminuir a pegada de carbono [80].

Esta iniciativa também destaca a crescente disponibilidade comercial e viabilidade operacional de veículos elétricos pesados em aplicações de infraestrutura convencionais.



Figura 42 Primeira autobetoneira 100% elétrica em Portugal [80].



Figura 43 Primeira autobetoneira 100% elétrica em Portugal [80].

Avaliação do impacto ambiental do transporte de betão em Portugal e estratégias de mitigação



Figura 44 Primeira autobetoneira 100% eléctrica em Portugal [80].

4 DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR DA CONSTRUÇÃO EM BETÃO E INDICADORES DE IMPACTO AMBIENTAL

4.1 Iniciativas da indústria do cimento para reduzir o impacto ambiental

Embora a produção de betão, especialmente o processo de fabrico de cimento, tenha efeitos ambientais notáveis, a sua extraordinária durabilidade distribui essas emissões ao longo da sua vida útil, muitas vezes excedendo 50 a 100 anos. Essa longevidade pode tornar o betão mais sustentável do que materiais que exigem substituição frequente.

A indústria do cimento, há muito reconhecida como um dos maiores contribuintes para as emissões globais de CO₂, sofreu uma transformação substancial nas últimas décadas para minimizar a sua pegada ambiental. Globalmente, a produção de cimento é responsável por aproximadamente 7-8% do total das emissões de CO₂, principalmente devido à calcinação do calcário e à natureza intensiva em energia da produção de clínquer [81].

Uma das estratégias que tem sido usada é a redução do teor de clínquer através da utilização de materiais ligantes mistos. O clínquer, o principal componente aglutinante do cimento, é responsável pela maioria das emissões de CO₂ durante o fabrico do cimento. Ao substituir parte do clínquer por materiais cimentícios suplementares (SCMs), tais como cinzas volantes, escória granulada de alto-forno moída (GGBS), sílica ativa ou pozolanas naturais, os produtores de cimento conseguiram reduções significativas no carbono incorporado. Por exemplo, a utilização de cimentos CEM III/A ou CEM IV, que contêm elevadas percentagens de escórias ou materiais pozolânicos, pode atenuar as emissões em mais de 40% em comparação com o tradicional cimento CEM I [41], ver Tabela 2.

Tabela 2 - Tipos de cimento e as reduções de CO₂ estimadas em comparação com o CEM I.
(adaptado do CEMBUREAU [82] & fib Bulletin 67 [83])

Tipo de cimento	Teor de Clínquer (%)	Redução estimada de CO₂ (%)
CEM I	95–100	Linha de Base (0%)
CEM II/A	80–94	10–20%
CEM II/B	65–79	20–25%
CEM III/A	35–64	35–45%
CEM III/B	20–34	45–55%
CEM IV	45–64	30–40%

Outro desenvolvimento chave é a utilização de combustíveis alternativos derivados da biomassa, dos resíduos industriais ou dos resíduos urbanos, nas fábricas de cimento, onde as temperaturas podem atingir os 1400°C. Estes substitutos reduzem a dependência dos combustíveis fósseis e contribuem para uma economia circular. De acordo com a Associação Europeia do Cimento (CEMBUREAU), a taxa média de substituição térmica na UE ultrapassou os 50%, com países como a Alemanha a

atingir mais de 70% [82]. Esta mudança contribuiu para a descarbonização do sector do cimento/betão, reduzindo simultaneamente os resíduos destinados a aterros, ver Figuras 45 e 46.



Figura 45 Processo de reciclagem de resíduos de betão [84].



Figura 46 Detritos de betão provenientes de aterros [84].

As tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) também estão a ser desenvolvidas como estratégias de longo prazo. Projetos como a fábrica Brevik da Norcem na Noruega ou a iniciativa “Carbon2Business” da HeidelbergCement são exemplos do investimento da indústria na captura de CO₂ relacionado com o processo e têm a ambição de escalar estas tecnologias na próxima década [85].

A nível nacional, as cimenteiras portuguesas, como a Cimpor, têm vindo a alinhar-se com as diretivas europeias de sustentabilidade. A integração do LC3 (cimento argiloso calcinado com calcário), a otimização dos processos térmicos e a eletrificação dos fornos com recurso a fontes renováveis são algumas das principais medidas que estão a ser testadas e implementadas em Portugal para garantir o cumprimento dos objetivos “Fit for 55” da UE e do Pacto Ecológico Europeu [83].

A redução das emissões na produção de cimento não é, portanto, uma ambição teórica, mas uma transição real e contínua, assente na inovação técnica, na substituição de materiais e na pressão legislativa.

4.2 Avanços nas técnicas de construção: O papel da pré-fabricação na descarbonização

Na tentativa de mitigar as emissões de gases com efeito de estufa e a ineficiência no setor da construção, a construção pré-fabricada, ver Figuras 47, 48 e 49, tornou-se uma estratégia fundamental. Ao transferir grande parte do trabalho do local de construção para um ambiente controlado de fábrica, a pré-fabricação pode melhorar a qualidade e limitar a carga ambiental porque em fábrica a linha de produção está otimizada e tira vantagem da repetição [86].



Figura 47 Exemplos de construções de sistemas de paredes [86].

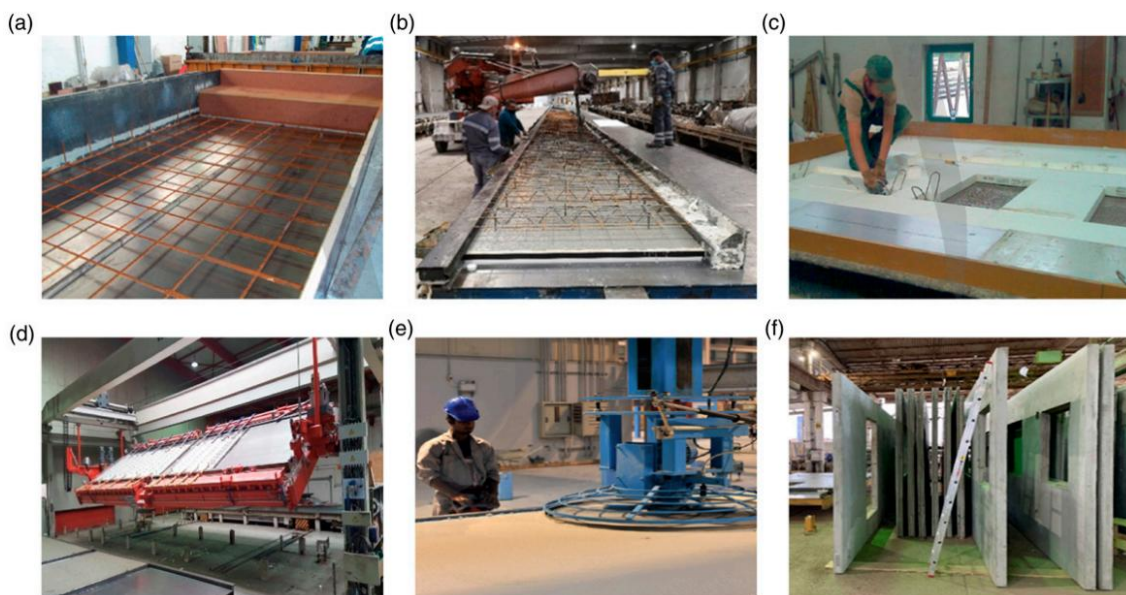


Figura 48 Produção pré-fabricada de paredes de betão: (a) cofragem e armadura de aço/rede; (b) vazamento do betão; (c) camada de isolamento e aberturas; (d) mesa giratória; (e) acabamento final da superfície; (f) armazenamento [86].

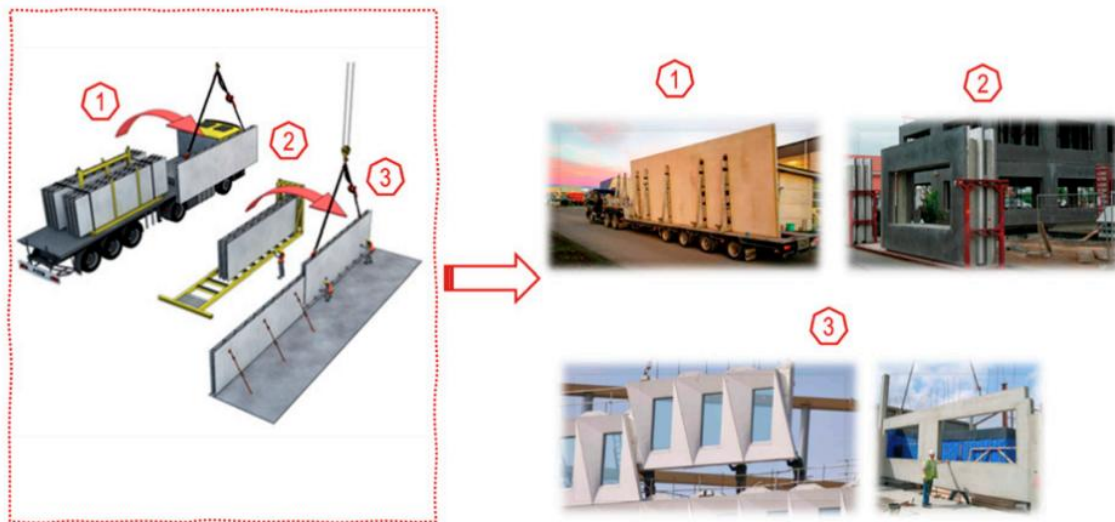


Figura 49 Manuseamento de paredes pré-fabricadas: (1) transporte vertical; (2) armazenamento; (3) manuseamento e instalação [86].

A pré-fabricação permite assegurar, em geral, melhor qualidade na produção do betão, controlo de cura rigoroso e uma utilização reduzida de água, o que contribui para um menor desperdício de recursos e emissões de CO₂ mais baixas. De acordo com o *fib* Bulletin 67, os ambientes controlados em fábrica podem alcançar reduções de resíduos de materiais até 80% e elevar a eficiência energética até 30% em comparação com os métodos de construção no local [83]. Além disso, os sistemas pré-fabricados integram frequentemente misturas de betão eco-eficientes, como as que incorporam agregados reciclados ou ligantes com baixo teor de clínquer, que são mais difíceis de controlar no local. Estas misturas são cruciais para alcançar valores mais baixos do Global Warming Potential (GWP) por metro cúbico de betão (o significado de GWP e como se determina será desenvolvido na Secção 4.4 e 5.1). A Tabela 3 resume as principais diferenças entre a construção tradicional *in-situ* e os sistemas pré-fabricados no que respeita ao efeito no ambiente.

Tabela 3 Impacto comparativo dos métodos de construção tradicionais e pré-fabricados.

Critérios	Construção tradicional	Construção pré-fabricada
Resíduos de materiais	20–30%	< 5% [83]
Emissões de CO ₂ (kg CO ₂ e/m ³ de betão)	Mais elevadas devido a uma logística ineficiente	Reduzidas (até 15-25%) [83] [57]
Utilização de água	Variável e frequentemente excessiva	Controlada e minimizada [57]
Emissões no local de trabalho (poeiras, ruído)	Elevadas	Reduzidas significativamente [87]
Tempo de construção	Mais longo	Até 50% mais rápido [57] [87]
Utilização de eco betões	Limitada pela variabilidade no local	Facilitada pelas condições da fábrica [83]
Potencial de reutilização modular	Baixo	Elevado (alinhado com a economia circular) [88]

Avaliação do impacto ambiental do transporte de betão em Portugal e estratégias de mitigação

O transporte de elementos pré-fabricados pode parecer intensivo em termos de emissões de carbono, mas os estudos demonstraram que o GWP pode ainda ser inferior devido à logística simplificada e aos tempos de montagem mais rápidos. Em Portugal, esta transição tem vindo a ganhar terreno, especialmente em projetos industriais, residenciais e de infraestruturas, como refere a Construção Magazine (n.º 90) [87], que destaca a forma como os intervenientes da indústria local estão a adotar a construção pré-fabricada como uma estratégia central de descarbonização [87].

Esta abordagem também contribui para a segurança dos trabalhadores, reduz os riscos relacionados com as condições climáticas e melhora a previsibilidade da construção. Do ponto de vista do ciclo de vida, os elementos pré-fabricados, ver Figuras 50 e 51, concebidos tendo em mente a desconstrução e a reutilização também contribuem para baixar a pegada ambiental de uma estrutura ao longo do tempo [88] [86] [89].



Figura 50 Montagem de parede sanduíche em obra [86].

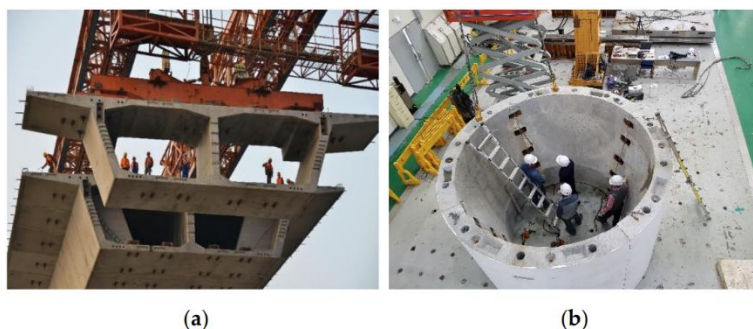


Figura 51 Exemplos de construção em betão pré-fabricado: (a) ponte com vigas em caixa de betão pré-esforçado e (b) torre eólica [89].

4.3 Composição do betão: Menos Cimento e Agregados Reciclados

Atualmente alguns esforços para descarbonizar o sector do betão centram-se na otimização da composição das misturas, especificamente, na redução do teor de cimento e na incorporação de agregados reciclados.

O cimento é o principal responsável pelas emissões de CO₂ incorporadas no betão. Conforme destacado no *fib* Bulletin 67 [83], projetos de mistura otimizados que substituem o cimento rico em clínquer (CEM I) por materiais cimentícios suplementares (SCMs), como escória de alto-forno granulada moída (GGBFS), cinzas volantes ou argilas calcinadas, podem restringir o carbono incorporado em 30-56%, dependendo do nível de substituição e do tipo de SCM [83]. Um caso recente realizado em Singapura revelou uma redução de até 56% ao usar GGBFS e 21-16% ao usar SCMs alternativos, como argila marinha calcinada ou pó de vidro [90].

Estes cimentos com baixo teor de clínquer ou misturados não só reduzem as emissões de CO₂, como também podem melhorar a durabilidade a longo prazo e o desempenho relacionado com a durabilidade, devido a uma estrutura de poros refinada e a reações de hidratação mais lentas [6] [13] [41].

Os agregados de betão reciclados (RCAs) e os agregados derivados de resíduos de construção e demolição (CDW) apresentam uma alternativa mais sustentável aos agregados naturais. Os estudos sugerem que a substituição de até 50% do agregado natural por RCA resulta num GWP cerca de 20% inferior ao dos agregados isolados, mantendo um desempenho mecânico semelhante [91]. Os rácios máximos de substituição variam tipicamente entre 30% e 50% para equilibrar os benefícios ambientais com a fiabilidade estrutural.

Os estudos sobre as propriedades mecânicas mostram que a resistência à compressão pode diminuir à medida que o teor de RCA aumenta, muitas vezes entre 10-30%, mas o desempenho permanece aceitável [92]. É preciso salientar que esta possível redução da resistência à compressão depende da qualidade dos agregados reciclados.

Avaliação do impacto ambiental do transporte de betão em Portugal e estratégias de mitigação

Tabela 4 Desempenho ambiental e mecânico de misturas de betão com baixo teor de carbono. (baseado nos estudos de Bennett *et al.* (2022) [93], Bampanis *et al.* (2023) [94] e *fib* Bulletin 67 [83])

Tipo de mistura de betão	% de substituição de cimento	% de substituição de RCA	Resistência à compressão típica (28 d)	Redução estimada de GWP
Referência (CEM I + Agregados Naturais (NA))	0%	0%	~35 MPa	Base de referência
Mistura SCM (GGBFS ou Cinzas volantes)	30–50%	0%	~33–37 MPa	30–56%
Mistura com RCA (Cimento natural)	0%	30–50%	~28–32 MPa	~20%
Combinação SCM + RCA	30%	30%	~30–35 MPa	~40–60%

- **Resistência vs Emissões de CO₂:** Embora a redução do teor de cimento possa influenciar a resistência do betão no início da idade, as SCM contribuem normalmente para o aumento da resistência a longo prazo. A utilização de RCA pode conter ligeiramente a resistência, mas a substituição até 50% é amplamente aceite para aplicações estruturais.
- **Durabilidade:** Os RCAs podem intensificar a porosidade e as taxas de carbonatação, afetando potencialmente a durabilidade. No entanto, esses efeitos podem ser compensados pelo uso de SCM e pela definição adequada da mistura, de acordo com diretrizes como a EN 206 e recomendadas pelo *fib* Bulletin 67 [83].
- **Absorção de CO₂ através da carbonatação:** O betão com agregados reciclados pode apresentar uma maior carbonatação durante a vida útil, contribuindo para uma absorção adicional de 10-22 kg de CO₂ por m³ ao longo de décadas, dependendo do teor de RCA (30-100%) [91]. Embora estes valores sejam relativamente pequenos em comparação com as emissões de cimento, ajudam a diminuir a pegada ambiental originado inicialmente com a construção em betão.

Resumidamente, a redução do teor de cimento na mistura de betão, reduz o GWP até 56% na fase de produção do betão. A introdução de RCAs reduz ainda mais o GWP, em cerca de 20%, valorizando simultaneamente os CDW, o que contribui para criação de uma economia circular.

4.4 Definição do GWP e de outros indicadores de impacto ambiental

Num mundo cada vez mais consciente das consequências ambientais da atividade industrial, a avaliação da pegada ecológica de materiais de construção como o betão tornou-se indispensável. O betão desempenha um papel fundamental nas emissões globais de CO₂, devido ao seu elevado consumo em todo o mundo e ao elevado teor de cimento. Para quantificar este resultado, são utilizadas metodologias de Life Cycle Assessment (LCA), utilizando indicadores ambientais específicos que medem as várias dimensões da degradação ambiental causada pela indústria em geral.

Um dos indicadores mais utilizado é o Global Warming Potential (GWP). Este parâmetro reflete o efeito cumulativo das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) envolvido na produção, transformação ou transporte de produtos. É expresso em quilogramas de CO₂-equivalente (kg CO₂eq) por unidade funcional (por exemplo, por m³ de betão) [95]. No caso do betão o GWP engloba as emissões diretas da combustão de combustíveis fósseis e da calcinação do cimento, bem como as emissões indiretas, como a utilização de eletricidade e o transporte. No entanto, o GWP não é o único indicador com efeito no ambiente. Também podem ser consideradas outras métricas baseadas na LCA para avaliar o desempenho dos betões ecoeficientes (ver Tabela 5).

Tabela 5 Indicadores comuns de impacto ambiental na LCA.
(Adaptado de Robalo (2022) [5] e *fib* Bulletin 67 (2012) [83])

Indicador	Unidade	Descrição
GWP	kg CO ₂ e	Impacto das alterações climáticas
ODP	kg CFC-11e	Depleção do ozono estratosférico
AP	kg SO ₂ e	Acidificação do solo e da água
EP	kg PO ₄ ³⁻ eq.	Poluição por nutrientes em massas de água
ADP	kg Sb eq.	Depleção de recursos minerais finitos
POCP	kg etileno eq.	Formação de ozono ao nível do solo (smog)

4.5 Impacto ambiental dos constituintes do betão

É consensual que o cimento é o constituinte com o maior contributo para as implicações ambientais na produção de betão, responsável por cerca de 85-90% do seu GWP total [81]. Isto deve-se principalmente a dois fatores: a combustão de combustíveis fósseis nos fornos e a decomposição química do calcário (CaCO₃) durante a produção de clínquer. O efeito causado pelos agregados e outros constituintes é comparativamente menor (ver Tabela 6).

Avaliação do impacto ambiental do transporte de betão em Portugal e estratégias de mitigação

Tabela 6 Contribuição estimada dos vários constituintes do betão no GWP (por m³).
Baseado em Robalo (2022) [5], fib Bulletin 67 (2012) [83] e Mehta & Monteiro (2014) [20]

Material	% Total do GWP
Cimento (CEM I 42.5R)	~85%
Agregados (natural)	~10%
Água de amassadura	~0.5%
Superplastificante	~0.5%
Adições e/ou fibras	~4%
Total	100%

A investigação sobre ligantes alternativos e a utilização de agregados reciclados mostrou que é possível produzir betões com uma pressão ambiental significativamente menor, muitas vezes designado betão eco eficiente. Por exemplo, uma análise comparativa de desempenho ambiental de vários tipos de betões realizada por Robalo (2022) revelou que as misturas que incorporam SCM combinadas com agregados reciclados podem cortar o GWP em mais de 30% em relação aos betões tradicionais [5].

Tabela 7 Desempenho ambiental de betões padrão vs. betões ecológicos.
(baseado no estudo da Keila Robalo (2022) [5] e Boletim fib 67 (2012) [83])

Indicador	Betão corrente	Eco Betão A (SCM + RA)	Eco Betão B (SCM+RA)
GWP (kg CO ₂ eq/m ³)	337.0	273.6	231.5
AP (kg SO ₂ eq/m ³)	0.672	0.527	0.482
EP (kg PO ₄ ³⁻ /m ³)	0.154	0.131	0.110
ADP (kg Sb eq.)	2.87×10^{-5}	2.33×10^{-5}	1.94×10^{-5}
Teor de clínquer %	~75%	~50%	~35%

Estes resultados mostram o potencial transformador dos eco-betões na redução das emissões de carbono, da acidificação e do esgotamento dos recursos. Embora subsistam preocupações de desempenho em aplicações estruturais específicas, a inovação contínua na conceção de misturas, combinada com incentivos regulamentares, pode acelerar a sua implementação generalizada no mercado. O GWP e os indicadores relacionados fornecem uma base estruturada e transparente para comparar o desempenho ambiental do betão e orientar a tomada de decisões para práticas sustentáveis [20].

5 AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DO TRANSPORTE DE BETÃO

5.1 Descrição do estudo e pressupostos assumidos

O transporte de betão pronto das centrais de betão para as obras constitui uma parte expressiva da pegada ambiental das estruturas de betão. Embora a produção de cimento seja amplamente reconhecida como o principal contribuinte para as emissões de gases com efeito de estufa no ciclo de vida do betão [81], a logística de entrega também pode representar uma proporção considerável do GWP, particularmente em regiões onde são necessárias longas distâncias de transporte ou onde as condições de tráfego aumentam o consumo de combustível [74]. Por este motivo, torna-se essencial quantificar e analisar a influência ambiental associado especificamente ao transporte de betão.

No presente estudo, a consequência ambiental do transporte de betão foi avaliada utilizando dados operacionais reais de uma empresa de Portugal, recolhidos ao longo de um período de seis meses. Para cumprir os requisitos de confidencialidade e os regulamentos de proteção de dados, a identidade da empresa e a localização específica das centrais de betão permanecem confidenciais. Para realizar este estudo o território português foi dividido em sete regiões geográficas.

Uma premissa fundamental nesta análise é que os camiões autobetoneiras operam totalmente carregados desde a central de produção até ao local da obra e regressam vazios. Este modelo operacional reflete a realidade prática da logística do betão pronto. Os camiões autobetoneiras são veículos especializados que devem girar continuamente a sua cuba (ou seja, tem uma carga móvel) isto para evitar que o betão endureça, portanto, não podem ser reutilizados para transportar mercadorias alternativas durante a viagem de regresso. Este princípio é crítico para a determinação do GWP porque esse cálculo vai depender do peso do camião e esse valor é bastante diferente quando está cheio ou vazio. Portanto, a autobetoneira é considerada cheia de betão durante metade da distância e na outra metade está vazia. Claro que ambos trajetos de ida e de regresso contribuem para o consumo de combustível e para as emissões de CO₂, mas não de igual forma [96].

O GWP para camiões a diesel foi considerado cerca de 0,1 kg CO₂eq por tonelada-quilómetro (t·km) [97]. Este valor representa uma referência média amplamente adotada em avaliações do ciclo de vida (LCA) e bases de dados internacionais. No entanto, as emissões reais variam consideravelmente dependendo de fatores como o tipo de veículo, a eficiência da carga, as condições de condução e o consumo de combustível. Análises realizadas pelo Conselho Internacional de Transporte Limpo (ICCT) mostram que as emissões de veículos pesados podem variar de 0,07 a 0,15 kg CO₂eq/t·km [96]. Por exemplo, os camiões de entrega urbana com configuração de eixo 4×2 emitem normalmente cerca de 307 g CO₂/t·km, enquanto os camiões

com reboque de longo curso emitem em média apenas 57 g CO₂/t·km, o que representa uma diferença de cinco vezes entre as subcategorias [96].

Dada essa variabilidade, representada na Tabela 8 e na Figura 52, optou-se por considerar o 0,1 kg CO₂eq/t·km como valor de referência. Representa um valor equilibrado frequentemente recomendado por bases de dados internacionais de LCA, como Ecoinvent, diretrizes de conversão publicadas pelo DEFRA e avaliações da European Environment Agency (EEA) [98]. Adicionalmente, as diretrizes do IPCC para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa fornecem a base metodológica para o cálculo das emissões com base no consumo de combustível, que sustenta os valores mencionados [97]. Esta combinação de fontes garante tanto o rigor metodológico quanto a consistência com os conjuntos de dados europeus existentes.

Tabela 8 Emissões de CO₂ de camiões a diesel por tipo de categoria.

Tipo de camião / operação	Emissões médias (g CO ₂ /t·km)	Equivalente (kg CO ₂ eq/t·km)	Fonte
Camião de entrega urbana (4×2 eixos, 4-UD)	307	0.307	ICCT (2021) [96]
Distribuição regional	120 – 160	0.12 – 0.16	DEFRA (2020) [98]
Reboque de longo curso (5-LH)	57	0.057	ICCT (2021) [96]
Média para um Camião pesado (autobetoneira)	100	0.1	EcoInvent / EEA (2020) [98]

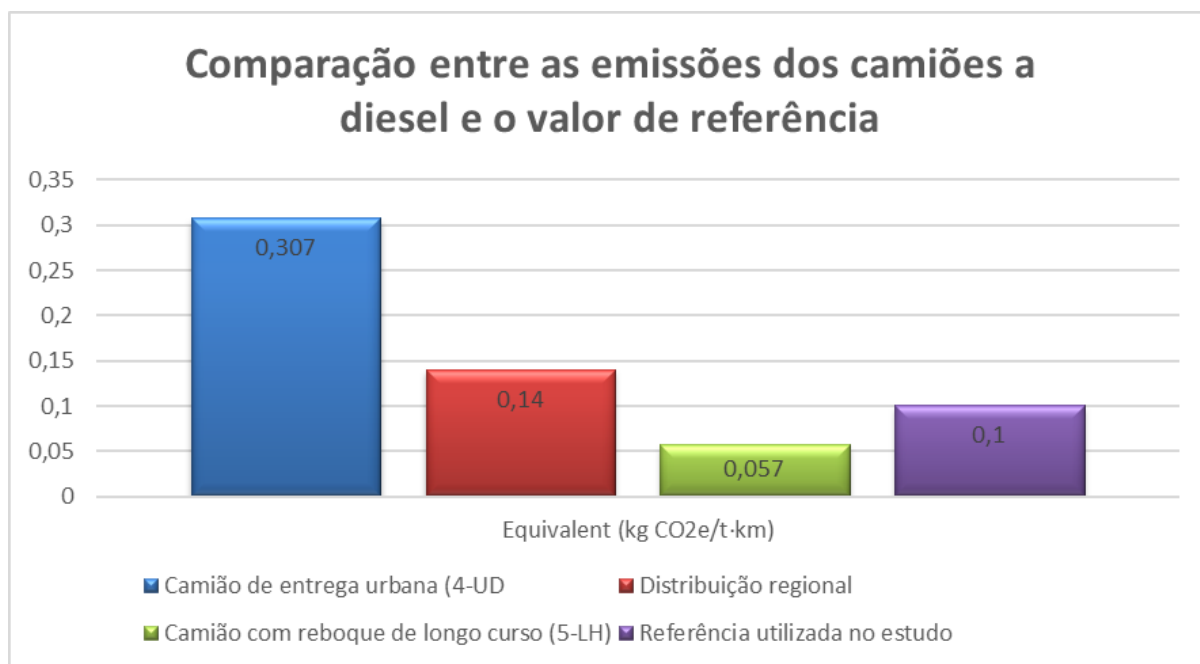


Figura 52 Comparação das emissões dos camiões a diesel com o valor de referência de 0,1 kg CO₂eq/t·km (GWP).

Para justificar a utilização de 0,1 kg CO₂eq por tonelada por km como referência para o transporte de betão pronto, o estudo utiliza dados realistas de camiões autobetoneiras e o que está na lei portuguesa mais especificamente no Decreto-Lei n.º 99/2005, de 21 de junho. De acordo com esse documento, os veículos com 4 ou mais eixos podem ter um peso bruto máximo de 32 toneladas. O raciocínio é intencionalmente simples e transparente, para que os resultados possam ser facilmente interpretados. Dados de casos reais e de acordo com a lei:

- Densidade do betão fresco: 2,3 t/m³ (valor médio; intervalo 2,2–2,4 t/m³) (dependendo do tipo de betão) [6].
- Carga média na cuba: 7 a 8 m³ [6] [96] [99].
- Peso vazio (tara) do camião autobetoneira: 14 t [99].
- Peso bruto máximo legal do veículo: 32 t (camião + carga ≤ 32 t) [99].
- Consumo de combustível representativo para um camião autobetoneira: poder variar entre 40 L/90L por 100 km dependendo da carga total e do tipo de trajeto [98].
- Fator de combustão de CO₂ do diesel TTW (tank to wheel emissions) (do tanque às rodas): 2,68 kg de CO₂ por L [97].
- Realidade operacional: os camiões autobetoneiras voltam vazios até a central de betão após a entrega.

Valor de referência para o transporte

Neste estudo, adota-se um valor médio de 0,1 kg CO₂eq por tonelada-quilómetro (t·km) para o transporte rodoviário de betão pronto. Este valor não resulta de um cálculo específico único, mas sim de uma síntese de valores de referência encontrados na literatura e relatórios internacionais, sendo reconhecido que pode variar em função de múltiplos fatores operacionais, já referido acima.

Valores médios na União Europeia tendem a ser inferiores ($\approx$ 50–60 g CO₂/t·km), enquanto em contextos menos eficientes podem ultrapassar os 100 g CO₂/t·km. Mas alguns estudos sobre transporte rodoviário de mercadorias indicam que as emissões típicas se situam aproximadamente entre 80 e 110 g CO₂/t·km (0,08–0,11 kg CO₂/t·km) à escala global, dependendo da eficiência da frota, tipo de combustível, condições de operação e características da carga [97] [100] [101] [102] [103]. [100] [101] [102].

Este intervalo de 80 e 110 g CO₂/t·km (0,08–0,11 kg CO₂/t·km), encontra-se alinhado com a realidade do transporte de betão, uma vez que se trata de um material com elevada densidade, implicando o transporte de cargas muito pesadas. De facto, uma autobetoneira totalmente carregada pode atingir o limite legal de aproximadamente 32 toneladas [99], operando frequentemente em contexto urbano,

caracterizado por tráfego intenso e ciclos constantes de arranque e paragem. Estas condições contribuem para o aumento considerável do consumo de combustível e, consequentemente, das emissões associadas ao transporte.

Importa ainda salientar que, no presente estudo, foram analisados dados reais de consumo de combustível (L/100 km) provenientes da empresa analisada no caso de estudo. Estes dados evidenciam valores relativamente elevados de consumo na zona centro e sul, frequentemente superiores a 60–70 L/100 km e em alguns casos no norte, próximos de 80–90 L/100 km, o que é consistente com operações em contexto urbano, caracterizadas por tráfego intenso, arranques e paragens frequentes e transporte de cargas elevadas.

Assim, o valor de 0,1 kg CO₂eq/t·km adotado neste trabalho:

- enquadra-se dentro dos intervalos reportados internacionalmente.
- representa um cenário conservador e realista para transporte rodoviário pesado.
- permite garantir comparabilidade com outros estudos.

Importa ainda referir que este valor deve ser interpretado como uma aproximação média, sendo sensível a fatores como carga transportada, perfil de condução, condições urbanas e topografia [97] [100] [101] [102] [103].

Metodologia de cálculo

O cálculo da carga ambiental no presente estudo não segue diretamente a abordagem clássica de tonelada de carga transportada (t·km), mas sim uma abordagem baseada na massa total do veículo em operação, refletindo melhor o consumo real de combustível.

Considera-se que:

- o camião percorre metade da distância com carga e metade em vazio.
- o consumo de combustível (e respetivas emissões) depende do peso total do veículo e não apenas da carga útil transportada.

Assim, o GWP total é calculado da seguinte forma:

$$GWP_{total} = (M_{vazio} \times km_{vazio} \times EF) + (M_{cheio} \times km_{cheio} \times EF)$$

Onde:

- M_{vazio} = massa do camião sem carga (t).
- M_{cheio} = massa do camião com carga (t).
- km_{vazio} e km_{cheio} = distância percorrida em cada condição (assumindo 50% cada).

- EF = fator de emissão ($0,1 \text{ kg CO}_2\text{eq/t}\cdot\text{km}$).

Na metodologia adotada, o GWP foi determinado da seguinte forma:

$$GWP = (Peso_{vazio} \times 0,5 \times km + Peso_{cheio} \times 0,5 \times km) \times EF$$

Ou seja:

- calcula-se primeiro o impacto total associado ao movimento do veículo (considerando o seu peso em ambas as fases do ciclo).
- só posteriormente esse valor é normalizado pelo volume de betão transportado (m^3), permitindo obter um indicador funcional:

$$GWP_{(kgCO_2eq/m^3)} = \frac{GWP_{total}}{m^3 \text{ de betão}}$$

Resumindo, o fator de $0,1 \text{ kg CO}_2/\text{t}\cdot\text{km}$ é adotado com base na literatura. O cálculo desenvolvido considera a massa total do veículo em circulação, uma vez que o consumo real de combustível depende do peso total (camião com e sem carga), o que permite incorporar explicitamente o retorno em vazio e evita a subestimação das emissões.

Neste contexto, a adoção do valor de $0,1 \text{ kg CO}_2\text{eq/t}\cdot\text{km}$ revela-se coerente com a realidade observada, posicionando-se no intervalo reportado a nível internacional. Embora este valor não resulte de um cálculo direto, é suportado pela evidência dos consumos elevados registados, funcionando como uma aproximação conservadora e realista. Deste modo, tanto o fator de emissão adotado ($0,1 \text{ kg CO}_2\text{eq/t}\cdot\text{km}$) como os valores de consumo associados devem ser interpretados como estimativas representativas, adequadas para a análise desenvolvida, mas não como valores absolutos. O objetivo principal reside na obtenção de uma ordem de grandeza realista da pressão ambiental do transporte de betão, possibilitando comparações e fundamentar propostas de mitigação.

5.2 Análise regional do impacto ambiental relacionado com os transportes

Neste subcapítulo apresenta-se uma análise detalhada da avaliação do transporte de betão em Portugal. O estudo está estruturado por áreas de mercado, sete ao todo, cobrindo o território nacional de norte a sul. Cada área compreende várias centrais de produção de betão, cujos dados operacionais foram analisados em termos de distância total percorrida, volume de betão transportado e Global Warming Potential (GWP) correspondente. Ao avaliar estes indicadores por região, torna-se possível identificar tendências de desempenho, ineficiências logísticas e potenciais estratégias de mitigação para moderar a influência ambiental do transporte de betão.

5.2.1 Mercado Norte I – Análise dos Resultados

A análise do mercado Norte I, que abrange cinco centrais de produção (A a E), revela um desempenho heterogêneo em termos de emissões relacionadas com o transporte, conforme refletido pelo GWP total e pelo GWP por metro cúbico de betão transportado ($\text{kg CO}_2\text{eq/m}^3$), ver Figura 53.

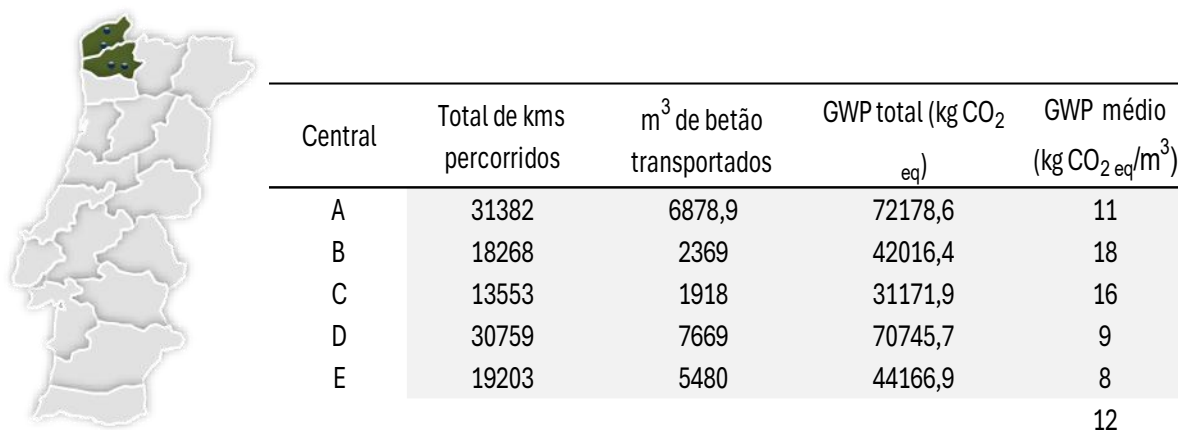


Figura 53 - Resultados Mercado Norte I.

A **Central A** apresenta o maior GWP total, atingindo 72178,6 $\text{kg CO}_2\text{eq}$, principalmente devido ao seu grande volume de transporte, 6.879 m^3 de betão e uma extensa distância percorrida de 31.382 km. Apesar do total não negligenciável de emissões, o GWP específico para esta central (11 $\text{kg CO}_2\text{eq/m}^3$) permanece moderado, o que sugere uma logística de transporte eficiente e rotas de entrega relativamente otimizadas. A eficiência está provavelmente associada a horários de expedição bem planeados e a uma elevada relação entre o volume transportado e os quilómetros percorridos, o que reduz a intensidade das emissões por unidade funcional

Por outro lado, a Central B, com o menor volume de betão transportado, de 2.369 m^3 e uma distância total percorrida de 18.268 km, apresenta uma das médias mais altas de GWP, 18 $\text{kg CO}_2\text{eq/m}^3$. Isso indica que baixos fatores de carga e rotas de entrega curtas e fragmentadas aumentam substancialmente a intensidade de carbono por cada metro cúbico entregue. Essa ineficiência é comum em padrões de entrega urbanos ou dispersos

A **Central A** apresenta um perfil relativamente equilibrado, com 31.382 km percorridos e 6.878,9 m^3 transportados, resultando num GWP de 72.178,6 $\text{kg CO}_2\text{eq}$ e uma média de 11 $\text{kg CO}_2\text{eq/m}^3$. Isto reflete uma operação típica de média escala, na qual a procura de transporte está alinhada com a capacidade de produção.

A **Central C** regista o menor total de GWP (31.719,9 $\text{kg CO}_2\text{eq}$) e a menor distância percorrida (13.553 km), mas também apresenta um GWP relativamente alto por metro cúbico (16 $\text{kg CO}_2\text{eq/m}^3$). O baixo volume transportado (1.918 m^3) sugere

uma subutilização operacional da frota. Nesses casos, mesmo emissões absolutas modestas podem produzir valores elevados quando normalizados por unidade funcional, um reflexo direto da redução da eficiência.

A **Central E** representa um caso intermédio, com 19.203 km percorridos, 5.480 m³ transportados e um GWP total de 44.166,9 kg CO₂eq, correspondendo a 8 kg CO₂eq/m³, o valor mais baixo entre todas as centrais. Isso é indicativo de uma logística de entrega otimizada, possivelmente devido à proximidade favorável entre as centrais de betão e os locais de obra ou a operações consistentes de alta carga (ver Figuras 54 e 55).

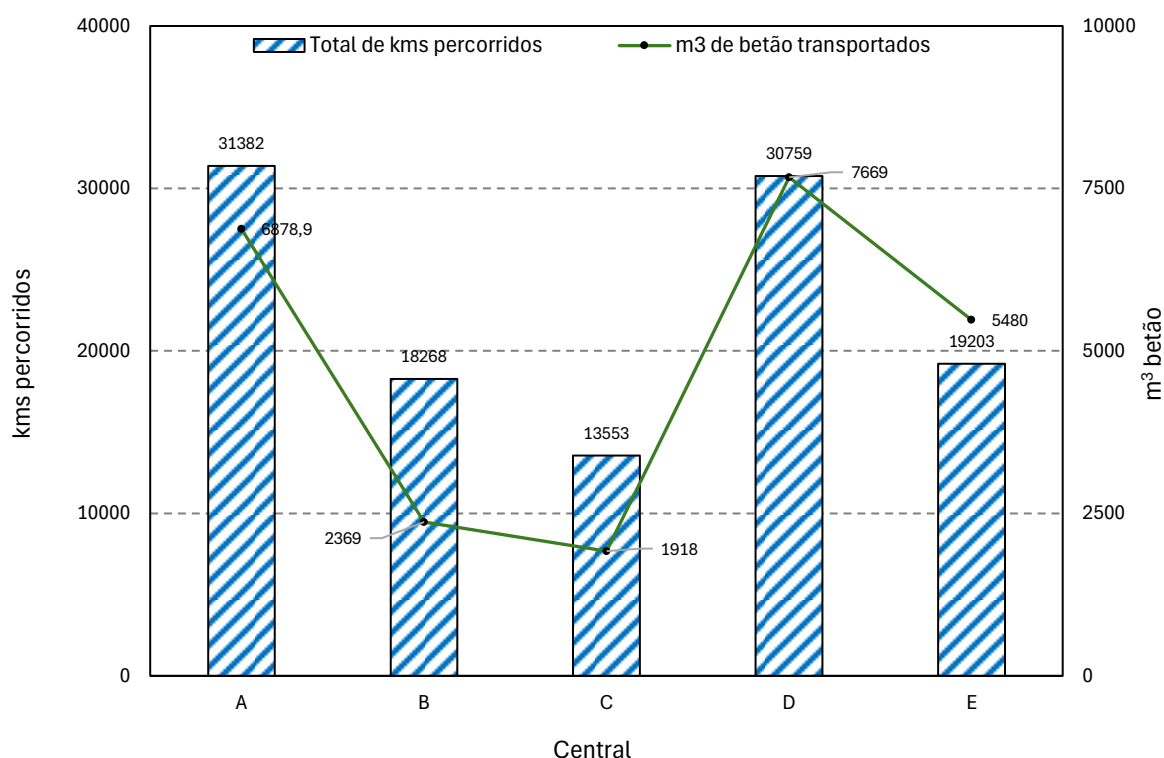


Figura 54 Resultados Mercado Norte I – Análise total de kms percorridos vs m³ de betão transportados.

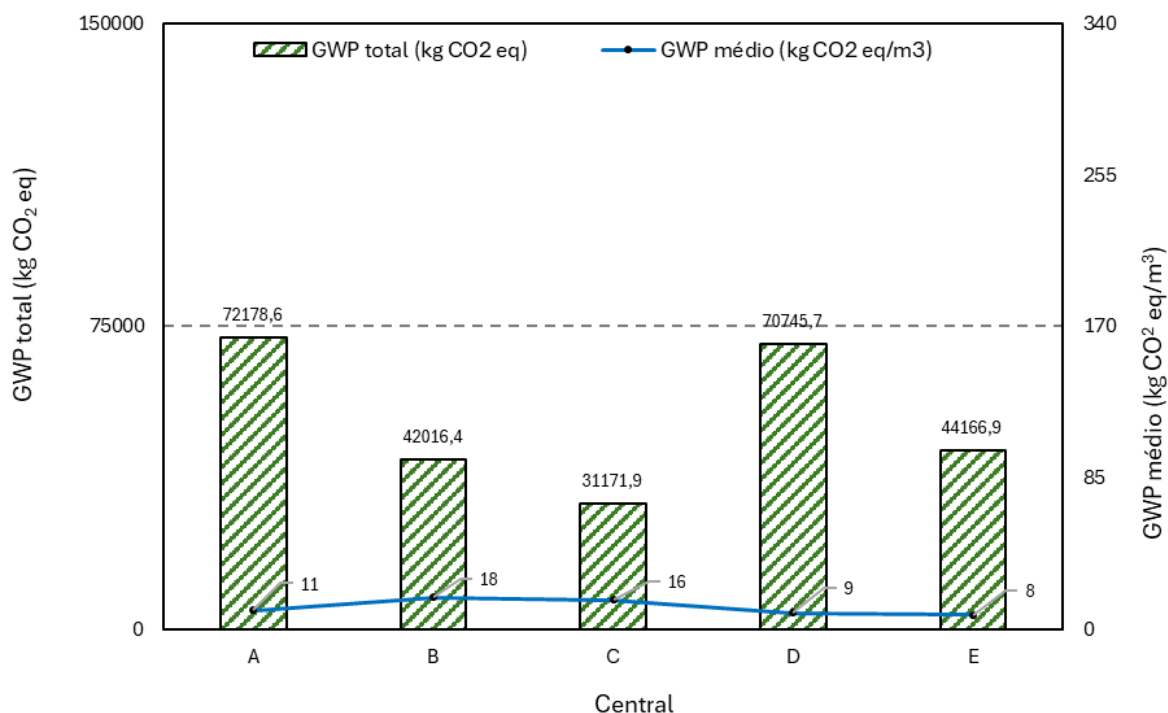


Figura 55 Resultados Mercado Norte I – Análise GWP total (kg CO₂eq) vs GWP médio (kg CO₂eq/m³).

O GWP médio para a Região Norte I foi de 12 kg CO₂eq/m³, este valor confirma que, embora o transporte de betão contribua significativamente para a pegada ambiental total, o seu efeito relativo continua a ser menor do que o da produção (num betão corrente é da ordem do 340 kg CO₂eq/m³, ver Tabela 7), onde a fabricação de cimento domina as emissões.

Os resultados também demonstram a proporcionalidade direta entre o volume transportado e as emissões totais, mas uma relação inversa entre o volume e a o GWP por metro cúbico. As centrais que transportam volumes maiores geralmente alcançam emissões mais baixas por metro cúbico, reforçando a importância de manter uma alta eficiência de carga e minimizar as distâncias de retorno em vazio.

Em suma a análise do Mercado Norte I mostra diferenças claras no desempenho operacional entre as centrais. A Central A demonstra uma logística equilibrada e eficiente, refletindo operações típicas e bem otimizadas. A Central B regista valores mais elevados de GWP devido à menor eficiência de carga e aos volumes transportados reduzidos, enquanto a Central C mostra sinais de subutilização da capacidade da frota. A Central D, apesar das suas emissões totais mais elevadas, opera de forma eficiente, com um forte equilíbrio entre a distância percorrida e o volume transportado. Por fim, a central E alcança o melhor desempenho geral, combinando logística otimizada e alta eficiência de carga, resultando no menor GWP por metro cúbico de betão transportado.

5.2.2 Mercado Norte II – Análise dos Resultados

O Mercado Norte II (Figura 56) demonstra um equilíbrio moderado entre o total de quilómetros percorridos e os volumes de betão transportados, embora certos indicadores revelem um potencial para melhoria logística.



Central	Total de kms percorridos	m ³ de betão transportados	GWP total (kg CO ₂ eq)	GWP médio (kg CO ₂ eq/m ³)
A	25886	3944,5	59537,8	15
B	27838	3552	64027,4	18
C	15027	5788,5	34562,1	6
D	13662	6579	31422,6	5
E	13457	4867	30951,1	6
				10

Figura 56 Resultados Mercado Norte II.

A Central A mostra um desempenho geral sólido, mas apresenta um GWP acima da média (15 kg CO₂eq/m³), provavelmente devido à eficiência sub-ótima das rotas ou à utilização parcial da carga. A Central B, com o valor GWP mais alto (18 kg CO₂eq/m³), indica uma eficiência operacional reduzida, possivelmente relacionada com transportes mais longos ou lotes de entrega menores. Em contrapartida, as Centrais C, D e E mantêm médias de GWP significativamente mais baixas (≈ 6 kg CO₂eq/m³), refletindo uma utilização eficaz da frota e a proximidade entre as centrais e os locais de construção. Apesar de a Central D e a Central E registarem distâncias de transporte mais curtas, o seu desempenho destaca uma otimização das rotas e uma distribuição adequada da procura.

Resumidamente, o Mercado Norte II atinge um GWP médio de 10 kg CO₂eq/m³, sugerindo uma logística geralmente eficiente (Figuras 57 e 58).

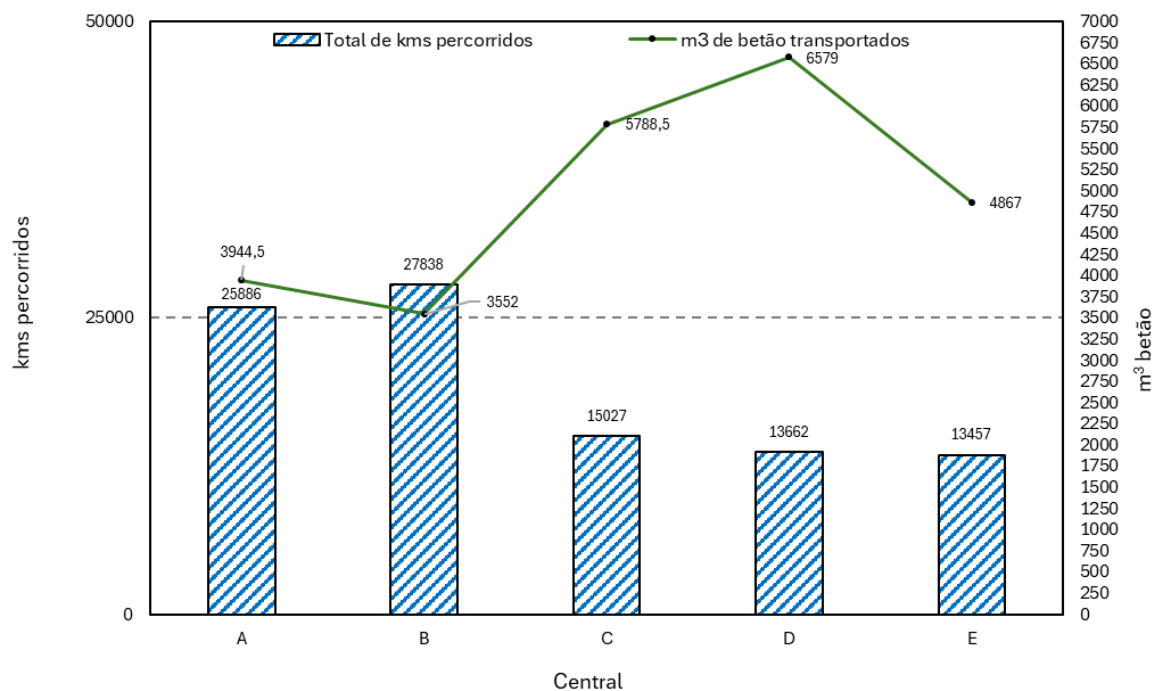


Figura 57 Resultados Mercado Norte II – Análise total de kms percorridos vs m³ de betão transportados.

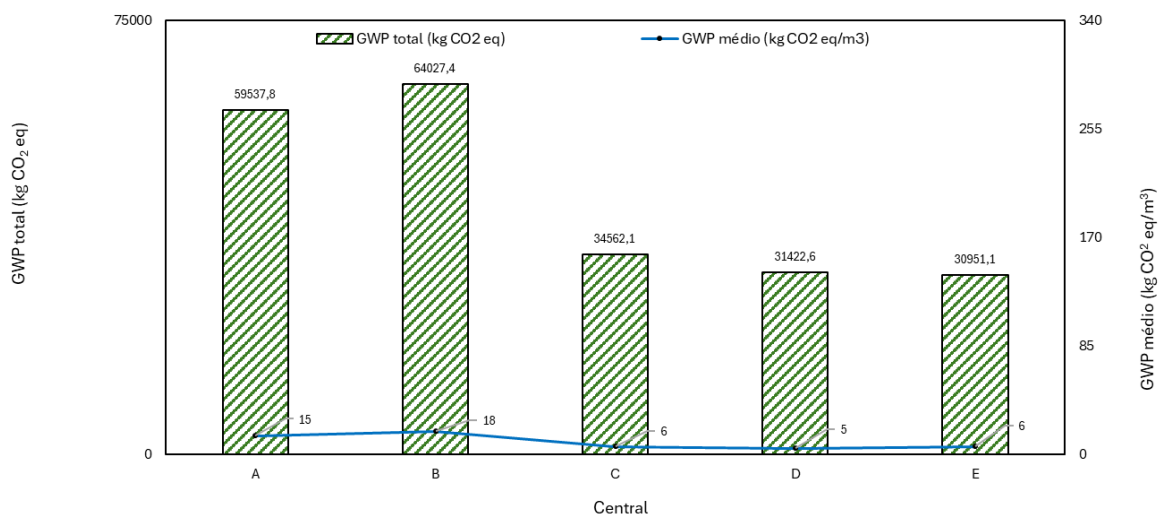


Figura 58 Resultados Mercado Norte II – Análise GWP total (kg CO₂eq) vs GWP médio (kg CO₂eq/ m³).

Para melhorar o desempenho ambiental do transporte de betão na região do Mercado Norte II, as intervenções específicas devem concentrar-se na otimização da logística e da gestão da frota. Os dados sugerem que as Centrais A e B, com maior GWP por metro cúbico, beneficiariam de um software de otimização de rotas e planeamento dinâmico de expedição para evitar consumo desnecessário de combustível. A implementação de sistemas de programação centralizados poderia equilibrar ainda mais os volumes de entrega entre as centrais, melhorando a eficiência da carga e minimizando as cargas parciais.

Além disso, a modernização gradual da frota, através da integração de veículos Euro VI ou de baixas emissões e a utilização de combustíveis alternativos, como biodiesel ou HVO (Hydrotreated Vegetable Oil), poderiam aliviar substancialmente as emissões de CO₂ por quilómetro. Programas regulares de formação de motoristas com foco em práticas de condução ecológica, como aceleração mais suave e redução da marcha lenta, também podem resultar em reduções mensuráveis no consumo de combustível e nas emissões.

Por fim, a monitorização contínua através de ferramentas telemáticas e de rastreamento baseadas na Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) permitiria que cada central avaliasse o seu desempenho em termos de carbono em tempo real e estabelecesse referências para a redução de emissões. Coletivamente, estas medidas podem garantir que o Mercado Norte II se alinhe com as estratégias mais amplas de descarbonização delineadas para o setor europeu do betão [83].

5.2.3 Mercado Centro Norte – Análise dos Resultados

Na Figura 59 podemos verificar que a área do mercado Centro-Norte demonstra uma variabilidade significativa entre os centros de produção, tanto em quilómetros totais percorridos como em betão total transportado, indicando um claro desequilíbrio na distribuição logística e na escala de produção.



Central	Total de kms percorridos	m ³ de betão transportados	GWP total (kg CO ₂ eq)	GWP médio (kg CO ₂ eq/m ³)
A	60807	17207	139856,1	8
B	19256	6094,5	44288,8	7
C	53518	8489	123091,4	15
D	58615	7854,5	134814,5	17
E	11768	3615	27066,4	7

11

Figura 59 Resultados Mercado Centro Norte.

A Central A domina tanto em distância total (≈ 60.000 km) como em volume transportado (≈ 17.200 m³), representando a maior parte das emissões relacionadas com o transporte. No entanto, o seu GWP médio por metro cúbico (8 kg CO₂eq/m³) permanece moderado, sugerindo uma utilização relativamente eficiente do transporte, apesar do grande âmbito operacional.

Em contrapartida, a Central D apresenta um GWP total notavelmente elevado (≈ 134.800 kg CO₂eq) e um dos GWP médios mais elevados (17 kg CO₂eq/m³), o que aponta para potenciais ineficiências na gestão de rotas ou fatores de carga mais baixos. As Centrais B e E, por outro lado, apresentam emissões totais muito mais

baixas (≈ 44.000 kg CO₂eq e ≈ 27.000 kg CO₂eq, respectivamente), mas estes resultados devem ser contextualizados pela sua menor escala operacional e não por uma maior eficiência. A Central C, com emissões próximas de 123 000 kg CO₂eq, apresenta o desafio das operações de média escala, onde a produtividade das autobetoneiras é suficiente, mas a otimização logística continua limitada, ver Figuras 60 e 61.

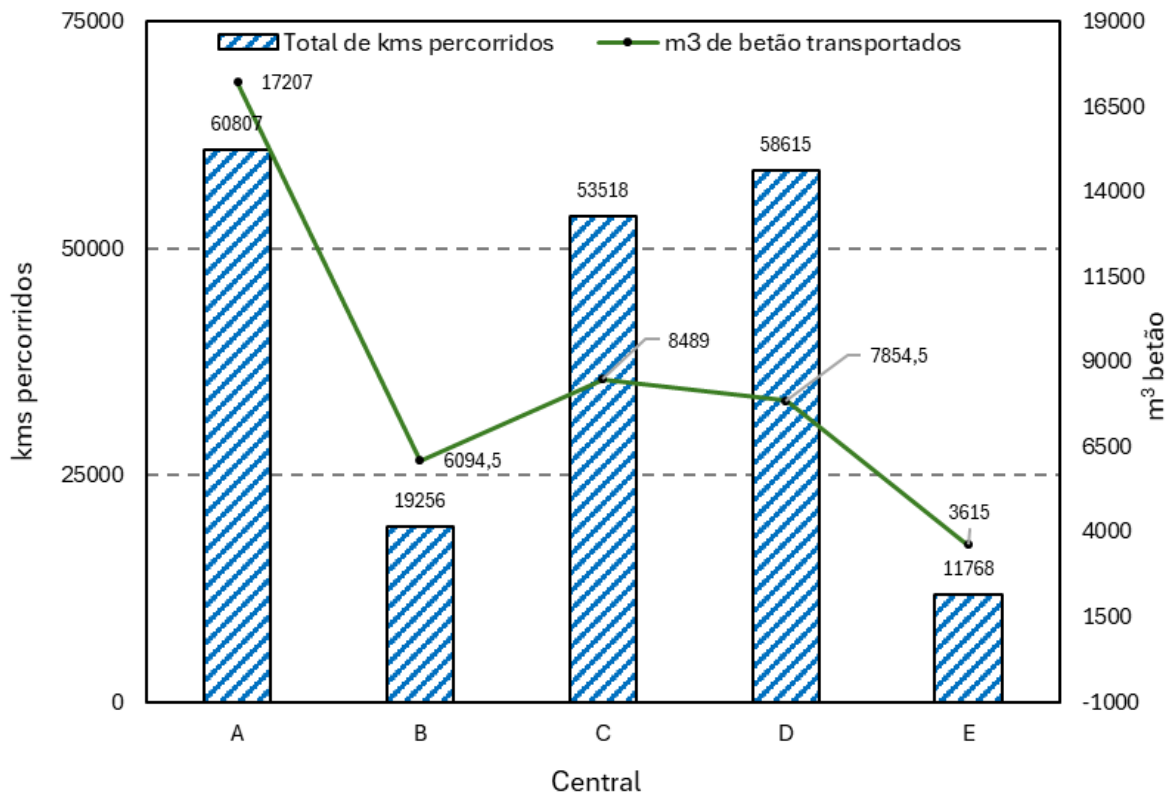


Figura 60 Resultados Mercado Centro Norte – Análise total de kms percorridos vs m³ de betão transportados.

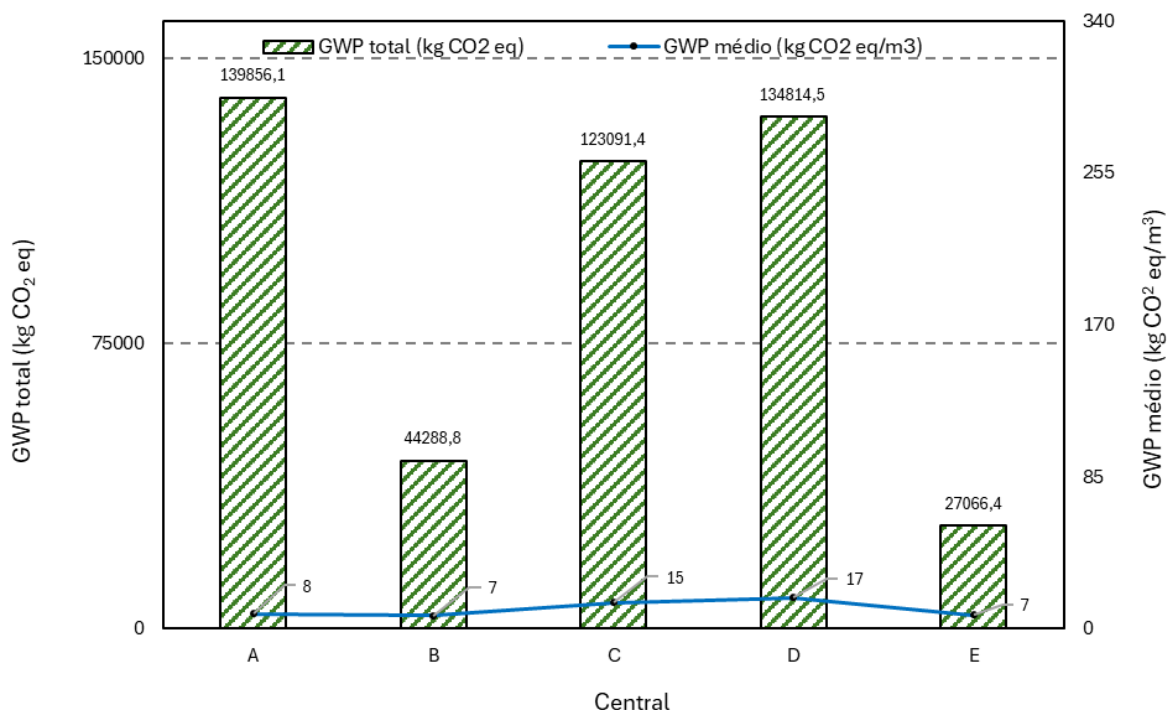


Figura 61 Resultados Mercado Centro Norte – Análise GWP total (kg CO₂eq) vs GWP médio (kg CO₂ eq/ m³).

No geral, o mercado Centro-Norte revela um perfil misto de eficiência operacional. As Centrais com produção em grande escala (A e C) apresentam os melhores índices de emissão por volume devido à utilização eficiente das autobetoneiras e ao agendamento consistente de entregas e distâncias mais curtas até às obras, enquanto outras parecem limitadas pela procura fragmentada ou por rotas mais prolongadas. Essas diferenças ressaltam a importância da coordenação logística regional, como agrupamento de rotas e estratégias de expedição partilhadas, para equilibrar as cargas de trabalho das Centrais.

Além disso, considerando as grandes distâncias de transporte nesta região, a introdução de combustíveis alternativos (por exemplo, biodiesel, HVO) e práticas de condução ecológica poderia resultar em melhorias mensuráveis no desempenho das emissões. Estudos anteriores confirmam que a logística otimizada e a integração de combustíveis de baixo carbono podem enfraquecer o GWP do transporte pesado em até 15-25% [83], [96] [98] alinhando-se com os objetivos europeus de descarbonização para o setor do betão.

5.2.4 Mercado Centro – Análise dos Resultados

Na Figura 62 podemos observar que o Mercado Centro apresenta um cenário operacional diversificado, com contrastes significativos tanto no volume transportado quanto no GWP associado. As seis Centrais analisadas (A–F) revelam

um padrão de desempenho heterogêneo, sugerindo que o planejamento logístico e a distribuição da procura do mercado variam amplamente dentro desta região.



Central	Total de kms percorridos	m ³ de betão transportados	GWP total (kg CO ₂ eq)	GWP médio (kg CO ₂ eq/m ³)
A	27602	5347	63484,6	12
B	10983	2434	25260,9	10
C	16069	2539,5	36958,7	15
D	14431	2629	33191,3	13
E	6281	2015	14446,3	7
F	26067	1753	59954,1	34
				15

Figura 62 Resultados Mercado Centro.

A Central A apresenta as maiores emissões totais (≈ 63.485 kg CO₂eq), impulsionadas por longas distâncias de transporte combinadas com volumes médios de entrega. Quando as emissões são normalizadas por volume, isso resulta num valor moderado (12 kg CO₂eq/m³), indicando uma utilização aceitável da capacidade de transporte.

A Central F apresenta a maior média de emissões (≈ 34 kg CO₂eq/m³), o que é sintomático de baixas cargas, viagens curtas e fragmentadas ou despacho irregular, que reduzem a eficiência em toneladas-quilómetro e aumentam os contributos por unidade. Esses padrões operacionais são associados a uma maior intensidade de carbono nas redes de distribuição [98] [104]. Em contrapartida, as Centrais B, C e D mantêm valores de GWP/m³ próximos da média regional (~ 15 kg CO₂eq/m³), refletindo um loteamento relativamente consistente e rotas mais favoráveis que melhoram o rendimento dos camiões. A Central E atinge uma das médias mais baixas (≈ 7 kg CO₂eq/m³), um resultado plausivelmente ligado a entregas urbanas curtas, condições que reduzem as emissões por metro cúbico entregue, ver Figuras 63 e 64.

Avaliação do impacto ambiental do transporte de betão em Portugal e estratégias de mitigação

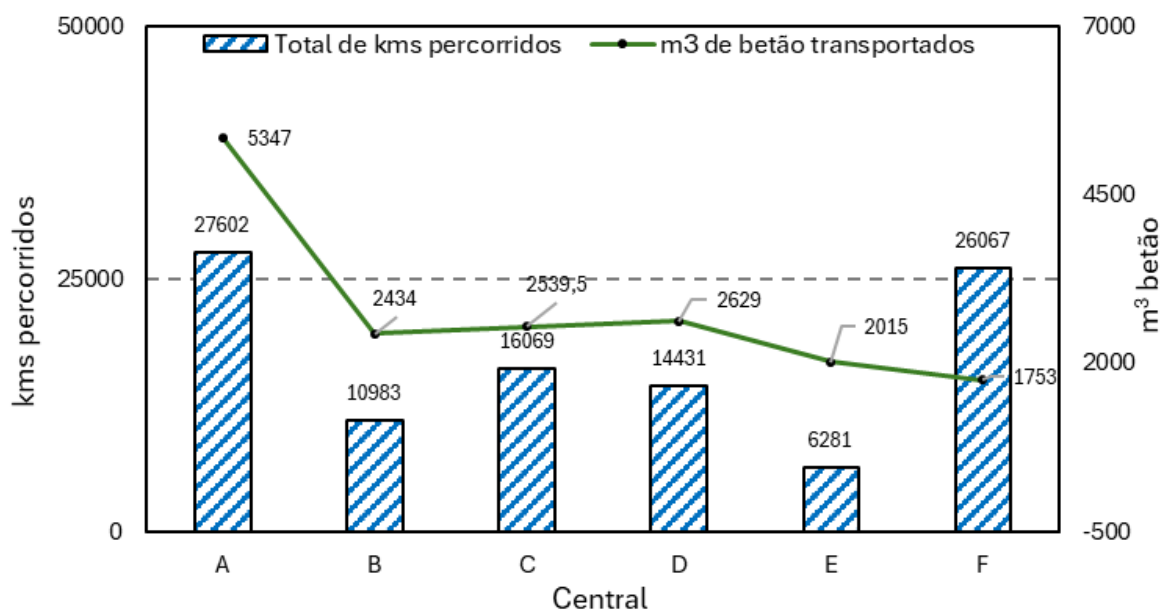


Figura 63 Resultados Mercado Centro – Análise total de kms percorridos vs m³ de betão transportados.

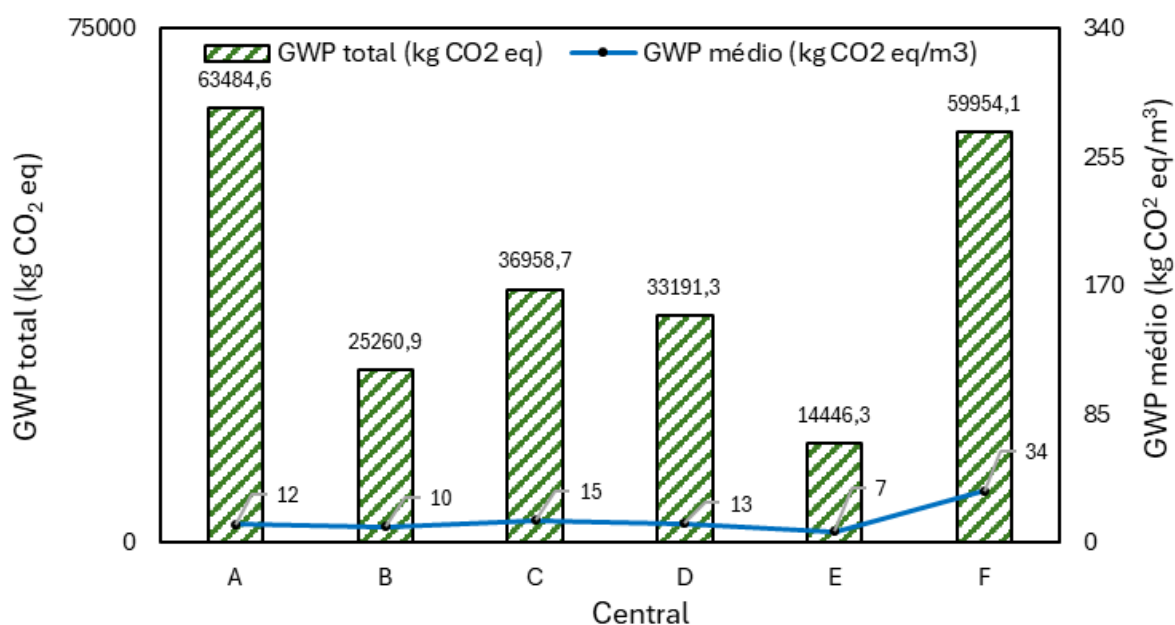


Figura 64 Resultados Mercado Centro – Análise GWP total (kg CO₂eq) vs GWP médio (kg CO₂eq/m³).

Em conjunto, o Mercado Central evidencia o efeito direto da logística e da eficiência de carga no GWP do transporte: fluxos maiores e bem utilizados reduzem as emissões por unidade, enquanto entregas pequenas e dispersas as aumentam. Essas conclusões são consistentes com estudos europeus que mostram que medidas operacionais, otimização de rotas, consolidação de cargas e tecnologia veicular afetam substancialmente o GWP do transporte e devem ser consideradas nas medidas de mitigação [96] [104] [83].

5.2.5 Mercado Centro Sul – Análise dos Resultados

O Mercado Centro-Sul revela um conjunto de contrastes operacionais marcados por baixos volumes totais de transporte e intensidades de emissão relativamente altas. Com apenas quatro Centrais ativas (A–D), esta região apresenta cobertura de distribuição limitada e escalas de entrega menores em comparação com os mercados do Norte. A intensidade média de GWP de aproximadamente 18 kg CO₂e/m³ reflete uma logística menos eficiente e uma proporção maior de viagens pequenas e dispersas e muitas frentes de trabalho, ver Figura 65.



Central	Total de kms percorridos	m ³ de betão transportados	GWP total (kg CO ₂ eq)	GWP médio (kg CO ₂ eq/m ³)
A	10897	1951,5	25063,1	13
B	22109	3790	50850,7	13
C	8510	948,5	19573	21
D	6720	618	15456	25
				18

Figura 65 Resultados Mercado Centro Sul.

A Central B regista as emissões totais mais elevadas (≈ 50.851 kg CO₂eq), resultado de o volume total de betão consumido ser maior. Em contrapartida, a Central A apresenta um desempenho equilibrado, com emissões totais de ≈ 25.063 kg CO₂eq e uma média de GWP de 13 kg CO₂eq/m³, indicando um roteamento relativamente eficiente para a sua escala operacional. As Centrais C e D apresentam maiores níveis de emissões de carbono, com o GWP atingindo 21 e 25 kg CO₂eq/m³, respetivamente. Esses valores elevados decorrem de volumes de transporte muito baixos uma consequência típica da subutilização da capacidade da frota e muitas frentes de obra (vários clientes diferentes, m³ estão dispersos em várias obras e não tudo numa obra grande), ver Figuras 66 e 67.

Avaliação do impacto ambiental do transporte de betão em Portugal e estratégias de mitigação

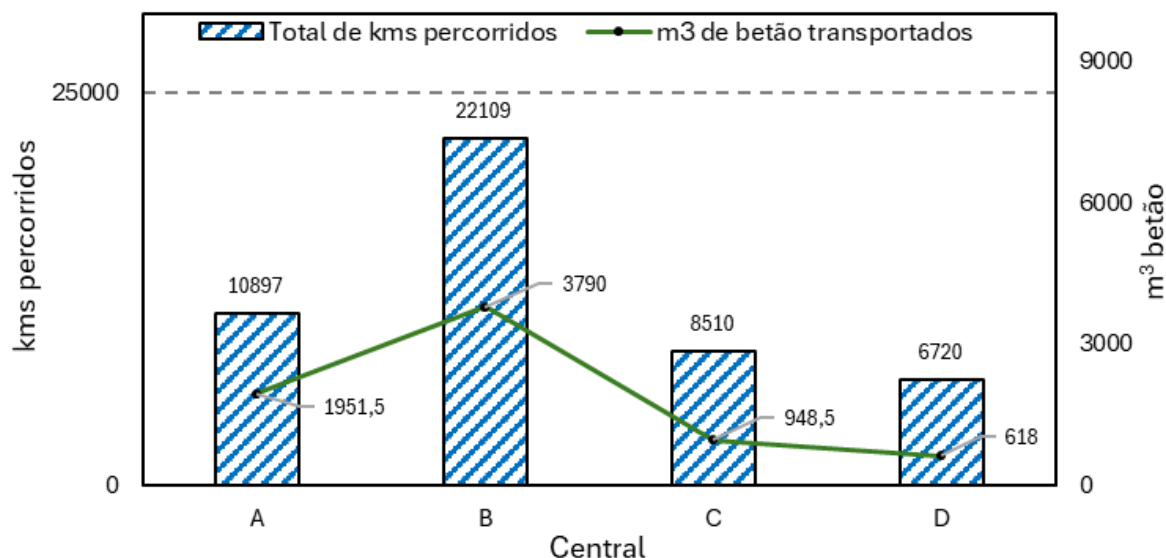


Figura 66 Resultados Mercado Centro Sul – Análise total de kms percorridos vs m³ de betão transportados.

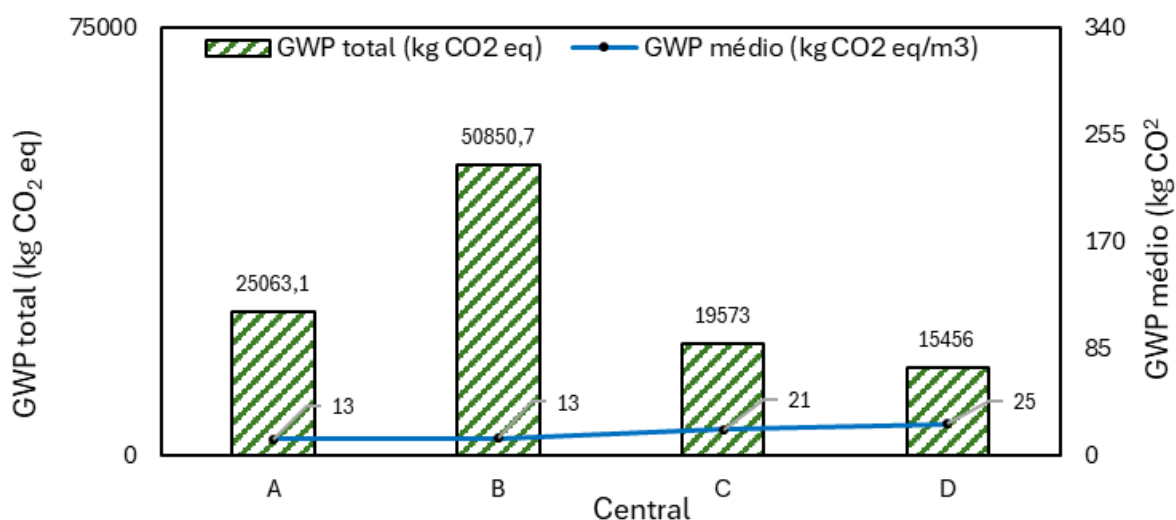


Figura 67 Resultados Mercado Centro Sul – Análise GWP total (kg CO₂eq) vs GWP médio (kg CO₂eq/m³).

Estas ineficiências são consistentes com conclusões estabelecidas em avaliações do ciclo de vida do transporte, onde a utilização da carga útil e a densidade das rotas exercem a maior influência sobre o CO₂ por tonelada-quilómetro [104] [105]. Os dados sugerem que a racionalização da frota ou a redistribuição regional das expedições poderiam melhorar substancialmente o desempenho. Ao concentrar as entregas ou introduzir instalações de armazenamento intermediárias, as emissões médias por metro cúbico poderiam ser reduzidas sem aumentar a distância total percorrida [83].

De modo geral, o Mercado Centro-Sul exemplifica as implicações da baixa densidade operacional nas emissões relacionadas com o transporte: distâncias de retorno mais

longas e menor ocupação dos caminhões contribuem para potencializar a pegada de carbono por unidade de betão entregue.

5.2.6 Mercado Sul I – Análise dos Resultados

O Mercado Sul I apresenta uma estrutura operacional compacta, com apenas duas Centrais ativas (A e B), ambas com distâncias de deslocamento relativamente curtas e desempenho de transporte eficiente. Apesar do tamanho modesto da região, o total de quilómetros percorridos, aproximadamente 11.600 km por central, revela uma logística de distribuição consistente e adaptada à procura local, ver Figura 68.

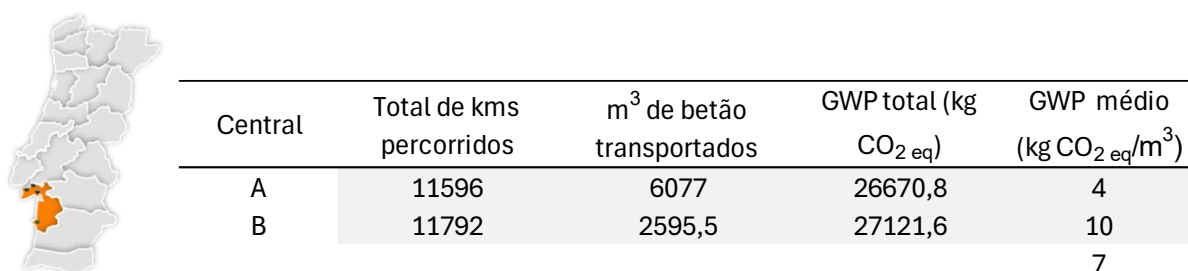


Figura 68 Resultados Mercado Sul I.

A Central A apresenta o melhor desempenho geral, com um GWP total de 26.670,8 kg CO₂eq e uma média de GWP notavelmente baixa de 4 kg CO₂eq/m³. Este valor indica um encaminhamento altamente otimizado e uma elevada eficiência de carga, refletindo provavelmente distâncias de entrega curtas e uma boa sincronização entre as operações de entrega. A Central B, embora apresente emissões totais ligeiramente superiores (27121,6 kg CO₂eq) e uma média de GWP de 10 kg CO₂eq/m³, continua a apresentar um desempenho dentro dos padrões operacionais eficientes para os sistemas de entrega regionais, ver Figuras 69 e 70.

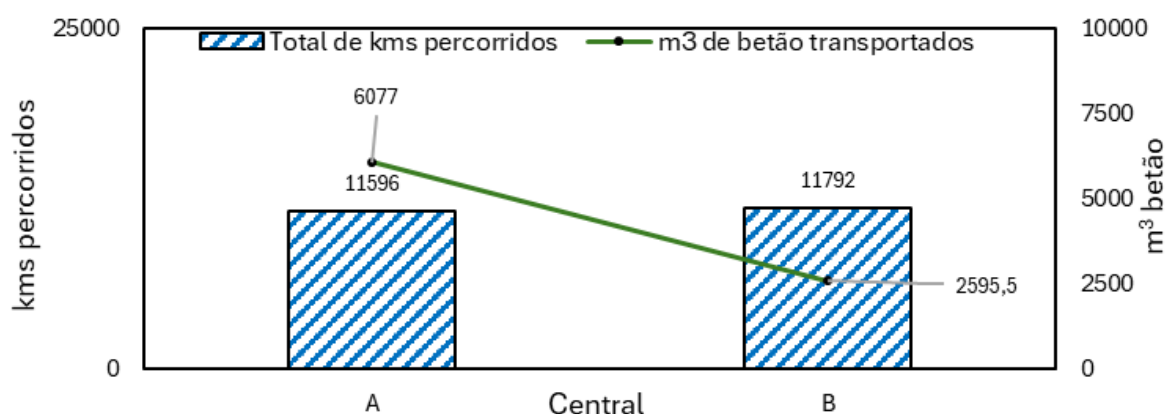


Figura 69 Resultados Mercado Sul I – Análise total de kms percorridos vs m³ de betão transportados.

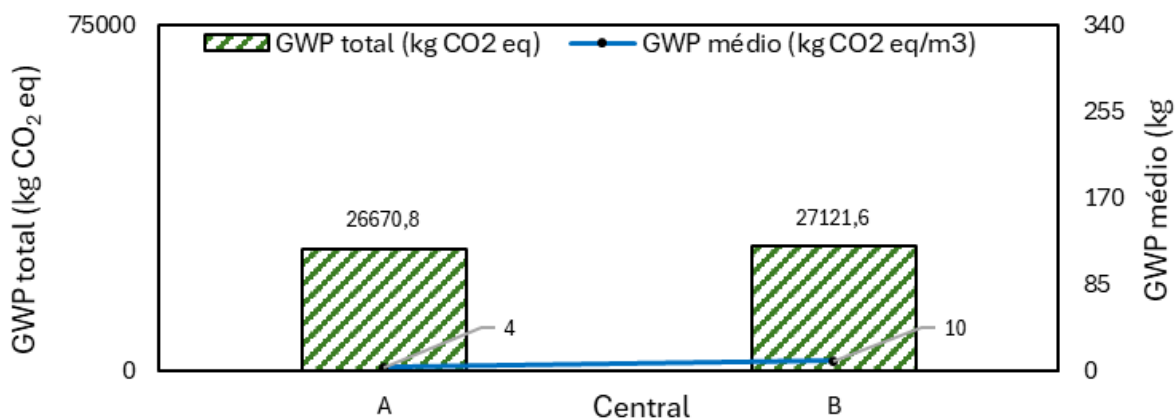


Figura 70 Resultados Mercado Sul I – Análise GWP total (kg CO₂eq) vs GWP médio (kg CO₂eq/m³).

Quando comparado aos mercados do Norte e do Centro, o Mercado Sul I destaca-se pela sua baixa densidade de emissões e utilização consistente de transporte, refletindo uma base de clientes bem distribuída dentro de uma área geográfica limitada. Os resultados confirmam a relação proporcional entre distância de viagem, utilização de camiões e GWP por metro cúbico de betão. Distâncias de transporte mais curtas e tempos de inatividade reduzidos levam a menos emissões por unidade funcional, um efeito ainda mais reforçado por práticas ótimas de gestão de frotas [96] [98]. No geral, este mercado representa uma referência de eficiência dentro do sistema nacional, com operações equilibradas e um raio de entrega compacto que minimiza emissões desnecessárias.

5.2.7 Mercado Sul II – Análise dos Resultados

O Mercado Sul II revela uma ampla área operacional com volumes de transporte mais elevados e distâncias de viagem mais longas em comparação com outras regiões. Isso reflete-se nos valores totais significativamente elevados do GWP, com emissões que variam de 48541,5 kg CO₂eq na Central D a 271397,7 kg CO₂eq na Central C. O GWP médio de 14 kg CO₂eq/m³ coloca este mercado na faixa média-alta do espectro de desempenho nacional, sugerindo operações relativamente eficientes, apesar das longas distâncias de transporte, ver Figura 71.



Central	Total de kms percorridos	m ³ de betão transportados	GWP total (kg CO ₂ eq)	GWP médio (kg CO ₂ eq/m ³)
A	98192	17079	225841,6	15
B	106846	19011,5	245745,8	14
C	117999	24168	271397,7	12
D	21105	2982	48541,5	16

Figura 71 Resultados Mercado Sul II.

A Central C surge como a mais produtiva e consistente, transportando 24168 m³ de betão, maior volume da região, mantendo um GWP médio de 12 kg CO₂eq/m³. Este resultado indica uma logística eficaz e uma utilização otimizada das autobetoneiras, em consonância com calendários de entrega bem geridos e uma elevada eficiência de dosagem. As Centrais A e B também apresentam perfis operacionais sólidos, com GWP médio de 15 e 14 kg CO₂eq/m³, respetivamente, ambas mostrando relações equilibradas entre a distância percorrida e o volume transportado.

A Central D, no entanto, destaca-se como um caso ineficiente, apresentando o menor volume de produção (2982 m³), mas um GWP médio de 16 kg CO₂eq/m³, uma das mais altas da região. Isso sugere uma subutilização da capacidade da frota, possivelmente causada pela localização da central e falta de utilização das centrais em simultâneo. Padrões semelhantes foram documentados em estudos regionais, onde operações de pequena escala ou esporádicas tendem a incrementar o GWP por unidade funcional devido ao consumo fixo com o combustível [105] ver Figuras 72 e 73.

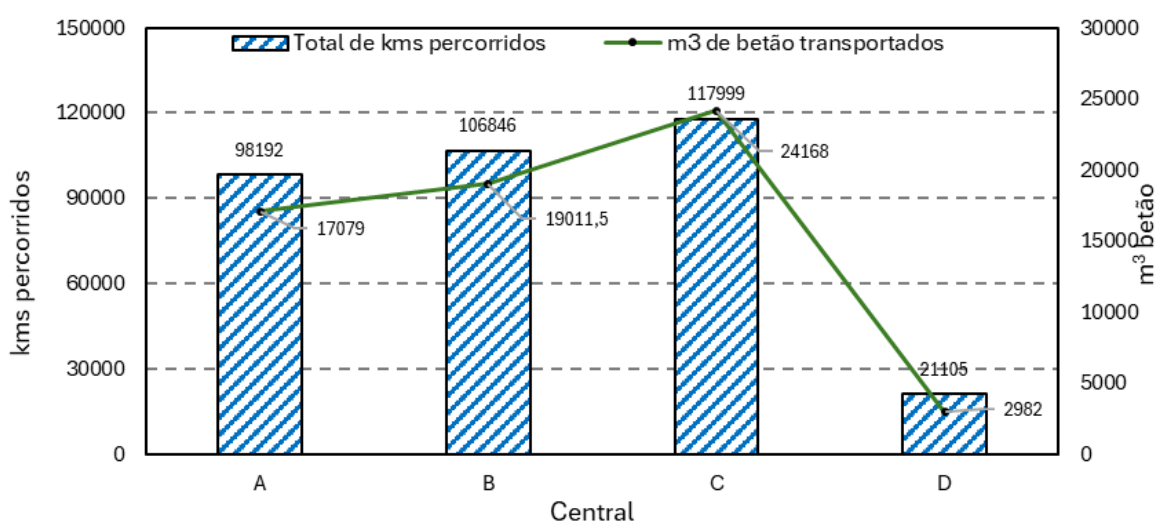


Figura 72 Resultados Mercado Sul II – Análise total de kms percorridos vs m³ de betão transportados.

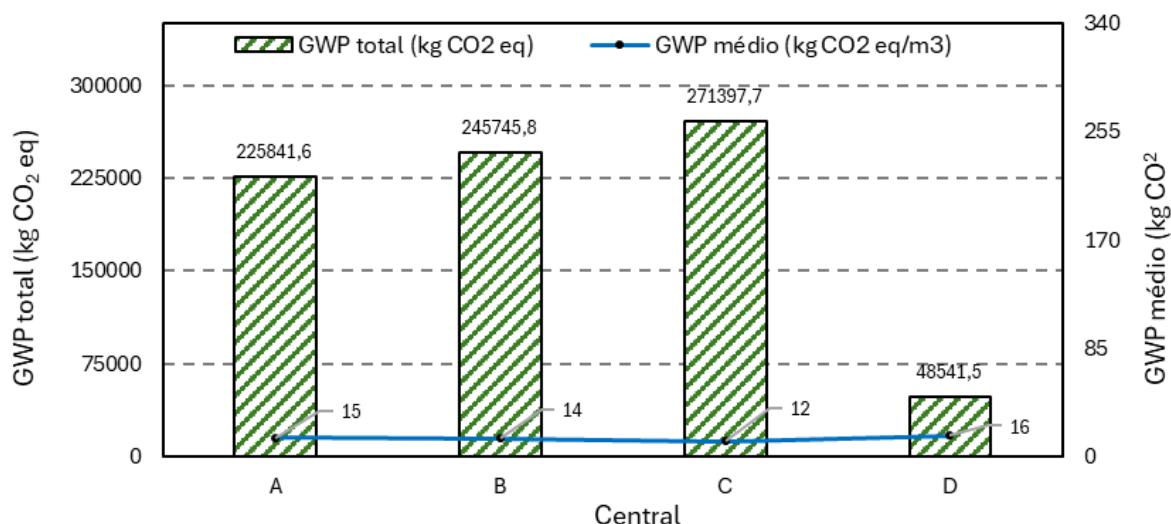


Figura 73 Resultados Mercado Sul II – Análise GWP total (kg CO₂eq) vs GWP médio (kg CO₂eq/m³).

No geral, o Mercado Sul II reflete uma rede logística bem desenvolvida com ineficiências localizadas. Os dados demonstram que o GWP médio está inversamente correlacionado com a relação entre o volume transportado e a distância, reafirmando que a utilização da frota é um fator decisivo nas emissões relacionadas com o transporte. O forte desempenho das Centrais B e C indica que a região é capaz de alcançar alta produtividade com emissões de CO₂ moderadas, desde que unidades menos ativas, como a Central D, passem por uma otimização operacional.

5.3 Resumo dos resultados obtidos

Antes de apresentar as medidas para diminuir as emissões relacionadas com o transporte, é pertinente resumir brevemente os resultados obtidos nos sete mercados regionais analisados. O estudo revela uma variabilidade substancial nas médias de GWP, refletindo diferenças geográficas, organização logística e padrões de utilização das instalações.

- O Mercado Norte I registou uma média de GWP de 12 kg CO₂eq/m³, representando um desempenho equilibrado resultando de distâncias moderadas.
- O Mercado Norte II apresentou uma média mais baixa de 10 kg CO₂eq/m³, influenciada em grande parte por rotas de entrega mais pequenas.
- O Mercado Centro-Norte apresentou uma média de 11 kg CO₂eq/m³, mostrando um transporte relativamente eficiente, mas ainda afetado por volumes de betão produzidos desiguais (Central C e D).

- O Mercado Centro apresentou uma média ligeiramente superior, de 15 kg CO₂eq/m³, com fortes contrastes entre Centrais, com alta quilometragem e baixo volume de betão transportado.
- O Mercado Centro-Sul apresentou uma média de 18 kg CO₂eq/m³, a mais alta entre todas as regiões centrais, devido às longas distâncias e baixo volume transportado (Central C e D).
- O Mercado Sul I atingiu uma média de 7 kg CO₂eq/m³, o melhor resultado a nível nacional, impulsionado por operações de curta distância e utilização consistente da carga.
- O Mercado Sul II, em contrapartida, registou uma média de 14 kg CO₂eq/m³, refletindo o efeito combinado de distâncias de transporte muito grandes, distribuição de procura altamente desigual e subutilização da Central D.

A Figura 74 apresenta uma síntese comparativa dos principais indicadores do transporte de betão nos sete mercados regionais, incluindo o total de quilómetros percorridos, o volume de betão transportado, o GWP total e o GWP médio. Esta visualização permite relacionar diretamente a intensidade do transporte com o desempenho ambiental médio de cada mercado.

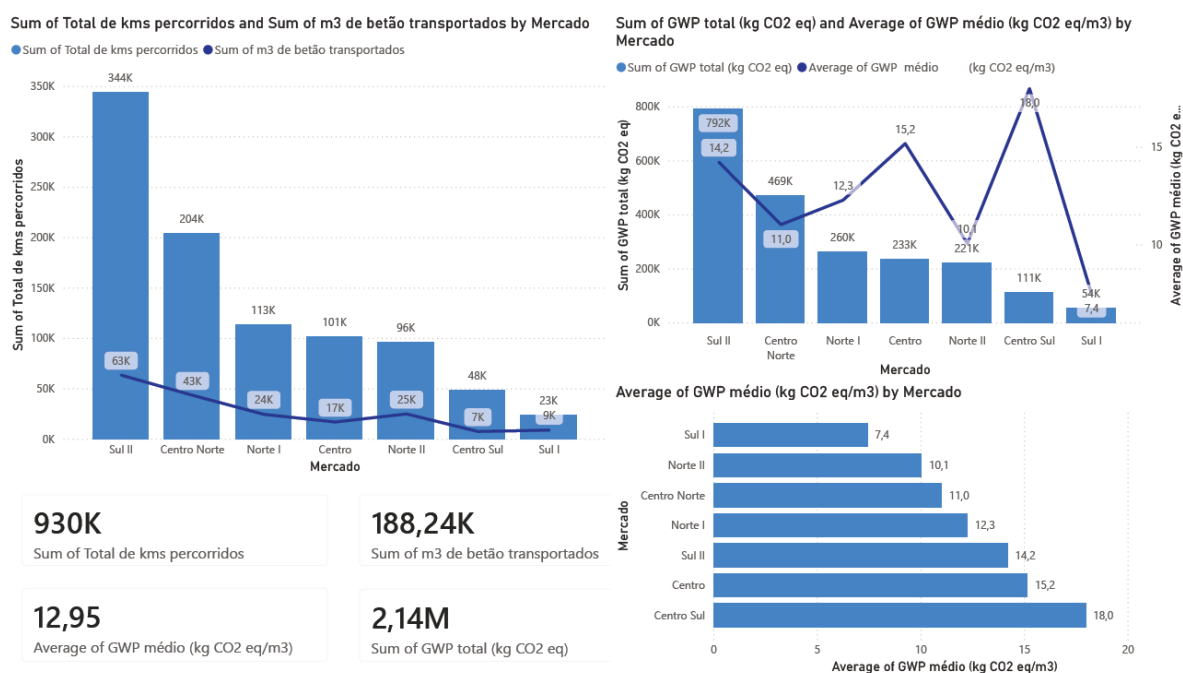


Figura 74 Síntese dos indicadores de transporte de betão e GWP por mercado regional.

A distribuição espacial destes resultados é sintetizada na Figura 75, que apresenta o mapa nacional do GWP médio associado ao transporte de betão por central. A representação cartográfica permite visualizar de forma imediata os contrastes regionais identificados na análise quantitativa, evidenciando a concentração de desempenhos mais favoráveis nas zonas com maior proximidade entre centrais e

Avaliação do impacto ambiental do transporte de betão em Portugal e estratégias de mitigação

áreas de consumo, bem como os valores mais elevados associados a longas distâncias de transporte e menor eficiência logística.

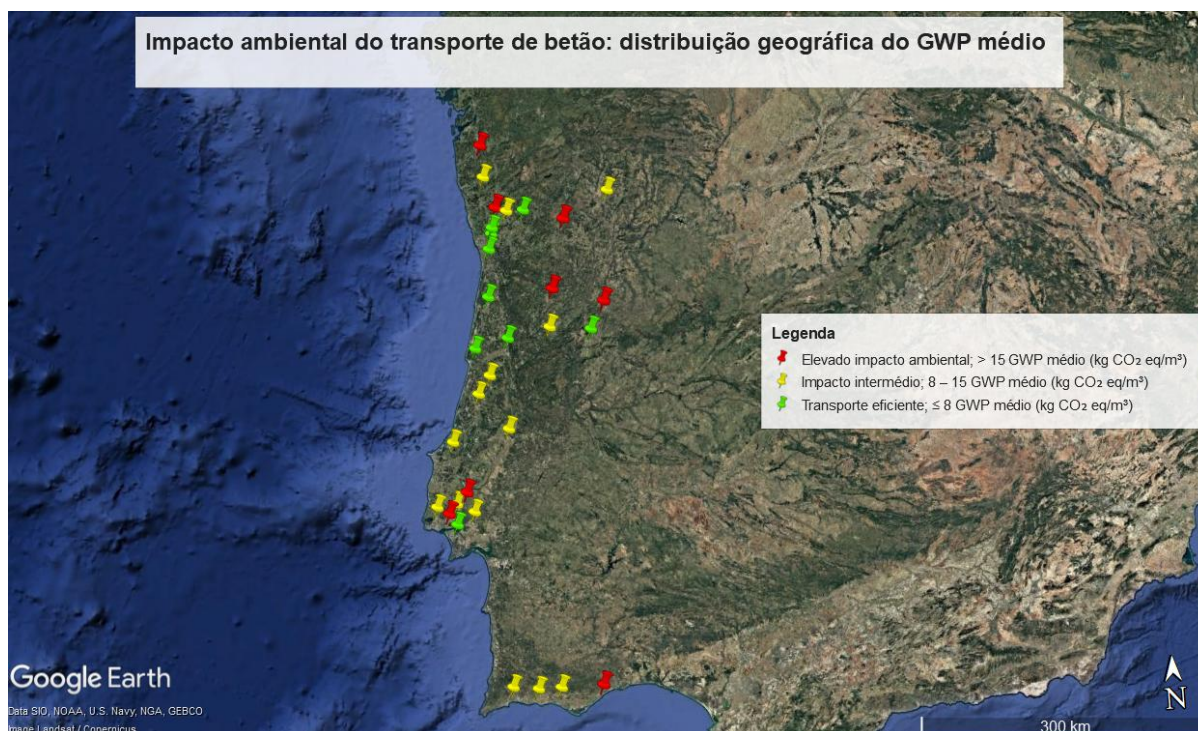


Figura 75 Implicação ambiental do transporte de betão: distribuição do GWP médio.

Em conjunto, estes contrastes regionais destacam que as emissões dos transportes não são uniformes em toda a rede nacional e dependem fortemente da interação entre a geografia, a localização das instalações e a eficiência operacional. Esta variabilidade reforça a necessidade de uma estratégia de mudança, mas coerente, capaz de abordar as ineficiências estruturais.

5.4 Medidas para reduzir o impacto ambiental do transporte de betão

1 - Medidas estruturais: repensar a distribuição espacial da produção

Em vários mercados, particularmente nos mercados Norte II, Centro-Norte e Sul II médias elevadas de GWP estão correlacionadas com distâncias grandes de transporte entre as centrais e os pontos de entrega. Isso indica um desalinhamento estrutural entre os nós de produção e os centros de procura. Corrigir esse desalinhamento pode envolver:

- Relocalizar ou reconstruir centrais mais próximas de áreas de alta densidade de demanda.
- Consolidar centrais com utilização persistentemente baixa.

- Reabrir locais anteriormente inativos para minimizar as distâncias radiais de transporte.

Os mercados com centrais geograficamente bem localizadas, como partes do Norte I e do Centro, apresentam consistentemente um melhor desempenho em termos de GWP, validando a importância da reestruturação espacial.

As centrais de betão móveis oferecem uma solução altamente eficaz para projetos temporários, distantes ou de grande escala. As suas vantagens incluem:

- Redução significativa da distância de transporte e das emissões de CO₂ por t/km.
- Maior eficiência de carga para autobetoneiras.

Esta medida é especialmente relevante nos mercados Centro-Sul e Sul II, onde os raios de expedição são grandes e os picos sazonais de procura intensificam as restrições logísticas.

2 - Medidas tecnológicas: modernização da frota e transição para combustíveis alternativos

Os camiões autobetoneiras elétricos, cada vez mais adotados nos mercados europeus, oferecem:

- Emissões zero do tubo de escape, eliminando o CO₂ do TTW.
- Menos ruído, menos perdas em marcha lenta e compatibilidade com eletricidade renovável.

Estes veículos têm melhor desempenho em mercados de alta densidade com ciclos de entrega mais curtos, como o Centro ou o Norte I. LCA indicam que os camiões elétricos podem mitigar as emissões de gases com efeito de estufa em 40-70% [96].

Onde a eletrificação é menos viável, as seguintes alternativas proporcionam reduções imediatas:

- HVO (Hydrotreated Vegetable Oil), com redução de 60 a 90% nas emissões de GHG [106] [107].
- Bio-LNG ou biogás, onde existe infraestrutura.
- Hidrogénio verde.

Estes combustíveis oferecem reduções significativas de gases com efeito de estufa sem exigir uma revisão completa da frota.

3 - Medidas operacionais: melhoria do despacho, do encaminhamento e da utilização

Vários mercados (nomeadamente Centro-Norte e Sul I) apresentaram ineficiências devido aos baixos volumes transportados em relação aos quilómetros percorridos. As sugestões para melhoria podem incluir:

- Algoritmos avançados para a definição das rotas e expedição.
- Agrupamento de entregas para minimizar viagens individuais longas.

Estas medidas estão em conformidade com [98] [104].

O tempo de espera aumenta significativamente o consumo real de combustível e leva ao atraso dos trabalhos na central de produção. As melhorias podem envolver:

- Coordenação digital das janelas de entrega com os locais de construção.
- Gestão ativa das filas.
- Monitorização baseada em telemetria do tempo de inatividade.
- Começar a cobrar aos clientes o tempo de espera nas obras.

Essas medidas são especialmente relevantes em regiões urbanas congestionadas.

4 - Medidas organizacionais: monitorização, formação e integração de dados

Um sistema digital de monitorização de emissões permite o acompanhamento contínuo do desempenho ambiental da frota, sendo tipicamente baseado na integração de dados provenientes de sistemas de telemetria instalados nos veículos, a partir destes dados, é possível estimar as emissões de CO₂.

A informação recolhida pode ser posteriormente tratada e visualizada através de plataformas de análise de dados, como o Power BI, garantindo:

- Acompanhamento contínuo das emissões ao longo do percurso.
- Identificação de ineficiências ao nível da central ou da frota.
- Comparação entre diferentes regiões e padrões operacionais.

Este tipo de abordagem é atualmente já utilizado em sistemas de gestão de frotas, sendo tecnicamente viável e de implementação relativamente acessível, não constituindo uma solução teórica, mas sim uma prática alinhada com a digitalização do setor dos transportes.

O comportamento do condutor afeta o consumo de combustível em 5 a 12% [108] [109]. A formação pode concentrar-se em:

- Modulação suave da velocidade.
- Minimizar travagens bruscas.
- Evitar a marcha lenta desnecessária.

Esta medida de baixo custo pode proporcionar benefícios imediatos em todos os mercados.

Perspetiva estratégica geral

Esta avaliação nacional demonstra que as emissões de CO₂ dos transportes são significativas e podem ser substancialmente reduzidas através de uma estratégia estrutural e operacional combinada. As medidas mais centrais são:

1. Realinhamento estrutural da localização das instalações e implantação de centrais de produção móveis.
2. Descarbonização da frota através da eletrificação e de combustíveis com baixo teor de carbono.
3. Excelência operacional, incluindo otimização do despacho e melhoria da eficiência de carga.
4. Monitorização contínua apoiada por práticas de condução ecológica.

Em conjunto, estas intervenções poderiam atenuar o GWP, dependendo dos níveis de adoção e das restrições regionais.

5.5 Comparação do GWP do transporte e da produção de betão

Neste capítulo pretende-se comparar a média nacional do GWP associado ao transporte de betão com o GWP associado à produção de betão. Para isso utilizou-se o trabalho de doutoramento da Keila Robalo (2022) [5], que fornece valores detalhados do GWP na fase de produção de vários tipos de betões, incluindo os mais convencionais, os de baixo teor de cimento e os de ultraelevada durabilidade.

A avaliação de Robalo [5] centra-se na fase de produção, excluindo a contribuição ambiental associada ao transporte de betão fresco da central de betão para o local de construção. Ao incorporar o GWP nacional de transporte, este capítulo amplia os resultados do estudo para um GWP mais realista de “produção + entrega”, facultando uma compreensão abrangente de como o transporte influencia o carbono incorporado final de diferentes tipos de betão. Ao longo deste capítulo, todos os cálculos utilizam o valor médio nacional de transporte (13 kg CO₂eq/m³), obtido nos capítulos anteriores, garantindo a consistência metodológica.

Robalo (2022) [5] avaliou seis tipos de betão, desde composições correntes até misturas avançadas de eco-UHDC. Os seus valores de GWP apenas de produção são apresentados abaixo, ver Figuras 76, 77 e 78.

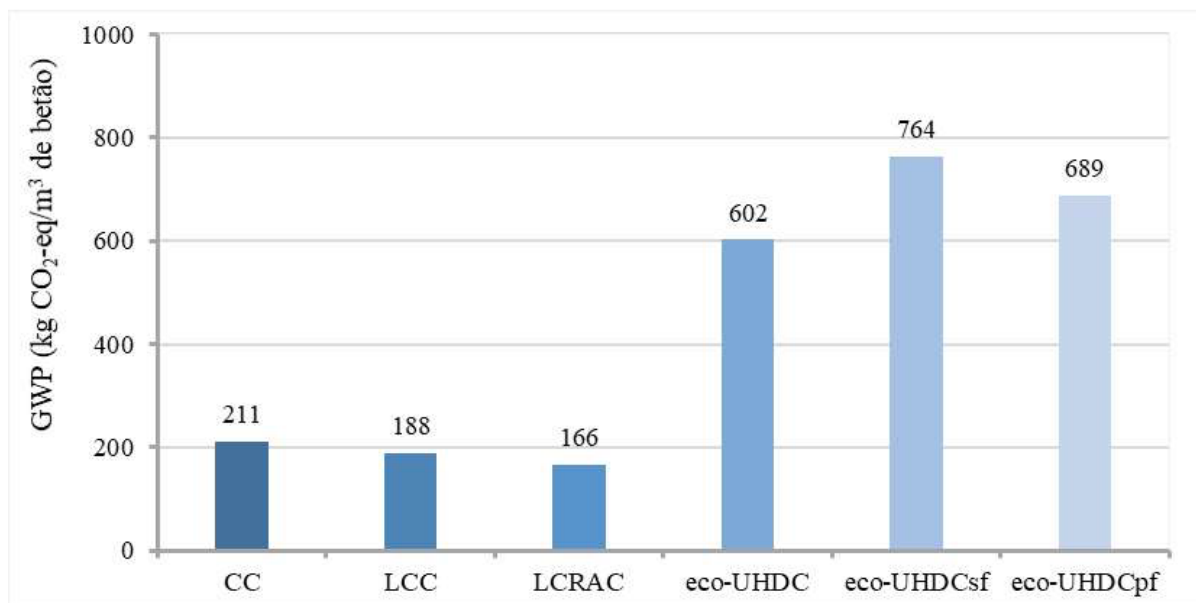


Figura 76 GWP por 1 m³ de betão [5].

Constituintes	GWP (kg CO ₂ -eq)
Cem I 52,5R (ECRA (European Cement Research Academy), 2015)	0,8980
Filer calcário	0,0232
Cinzas volantes (Kurda <i>et al.</i> , 2018)	0,0040
Superplastificante(EFCA (European Federation of Concrete Admixtures Associations), 2017)	0,0019
Água (Kurda <i>et al.</i> , 2018)	0,00013
Areia (Kurda <i>et al.</i> , 2018)	0,0023
Brita (Kurda <i>et al.</i> , 2018)	0,0290
RCD (Kurda <i>et al.</i> , 2018)	0,0050
Fibras de aço (sf)	1,0300
Fibras poliméricas (pf)	2,3600

Figura 77 GWP para a produção de 1 kg dos vários constituintes dos betões formulados (não inclui o impacto do transporte do fornecedor até à central de produção de betão) [5].

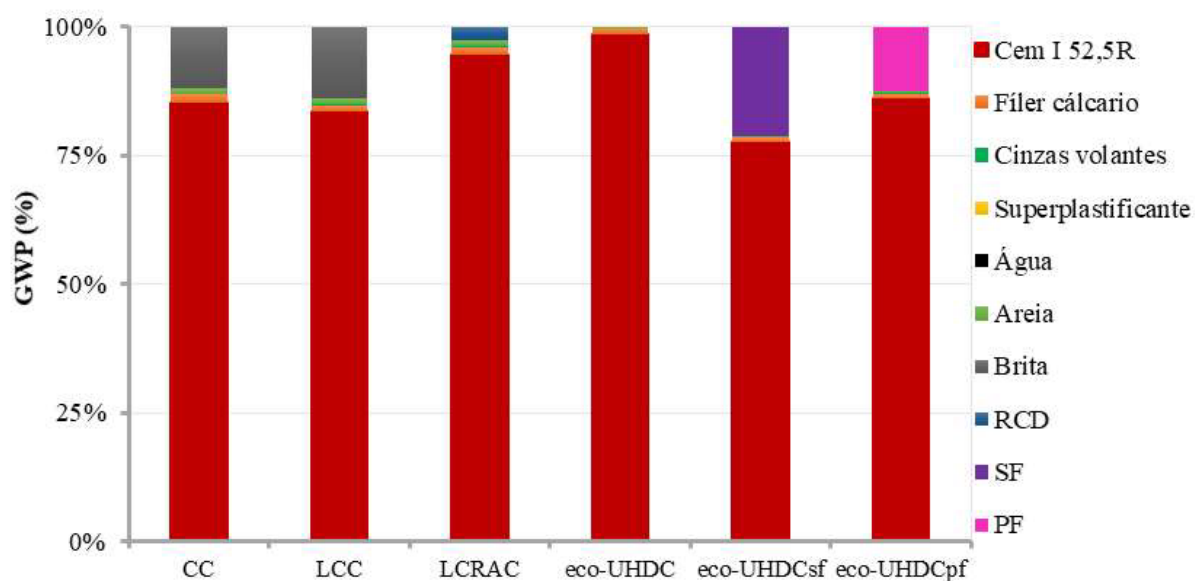


Figura 78 Contributo de cada um dos constituintes dos betões no valor de GWP/m³ [5].

Na Figura 79 apresenta-se o valor total do GWP por metro cúbico (produção mais transporte) para os vários tipos de betão desenvolvidos pela Robalo [5]. O peso relativo do transporte em relação à produção varia com o tipo de betão e pode ser visualizado na Figura 80.

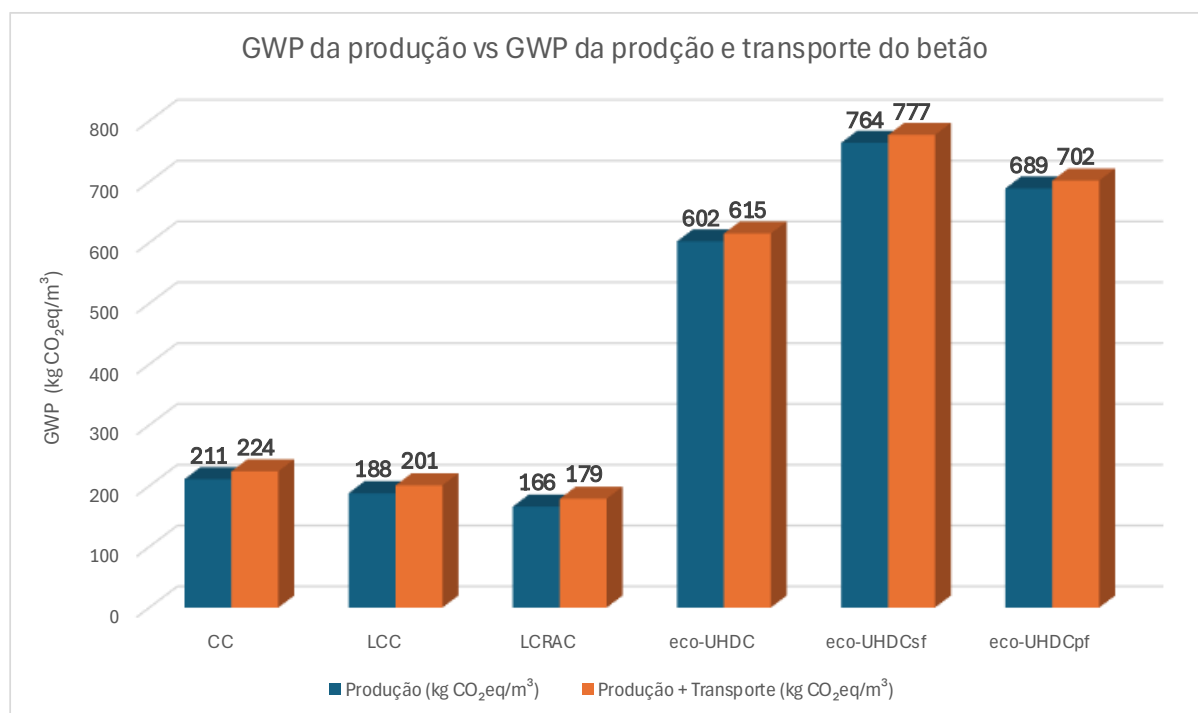


Figura 79 Análise GWP total (Produção + Transporte).

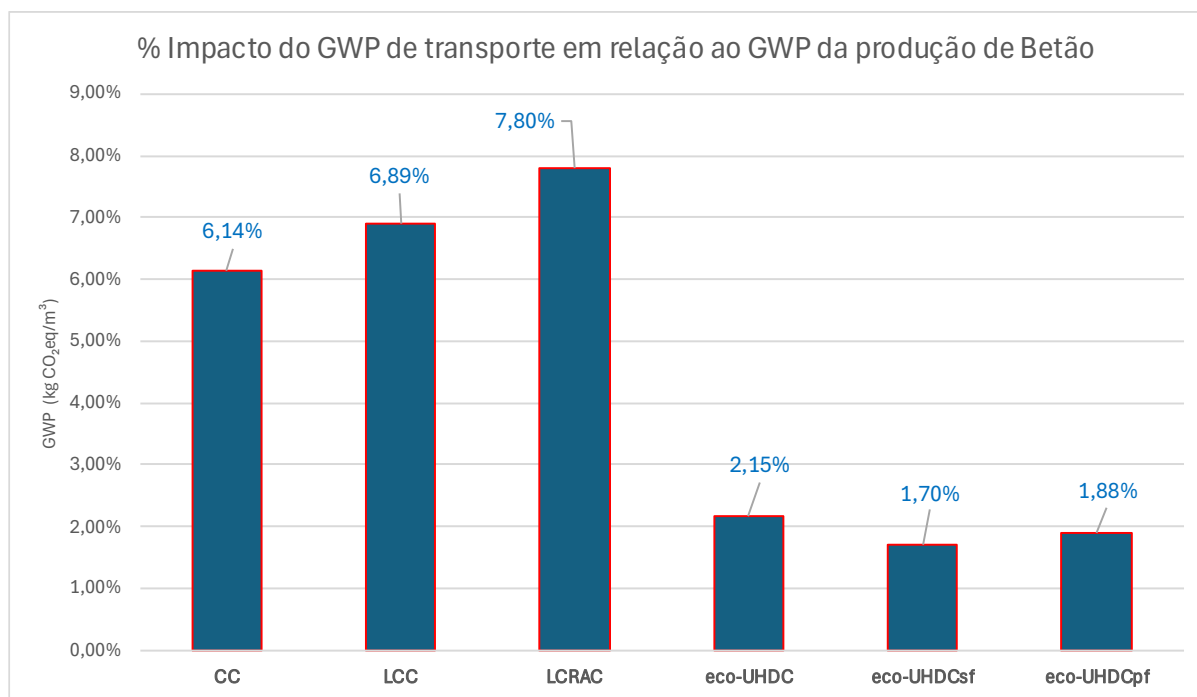


Figura 80 Percentagem do GWP do transporte face ao GWP da produção.

Verifica-se que o transporte tem um peso proporcionalmente maior nos betões de baixo carbono. Composições como LCC e LCRAC têm baixo GWP na fase de produção, o transporte contribui entre 6,89% e 7,80% para a pegada ambiental total. Isto reforça a importância de incluir o transporte em estudos sobre betões com baixo carbono.

O transporte tem um peso menor nas misturas UHDC de elevado desempenho. Devido ao elevado carbono incorporado associado ao cimento e ao teor de fibras, o transporte contribui apenas com 1,6–2,1% face ao do GWP da fase de produção. Para estes betões, as reduções nas emissões de produção (particularmente a otimização do cimento) geram benefícios muito maiores.

Os resultados confirmam que a influência do transporte varia significativamente dependendo do teor de cimento e do reforço de fibras de cada composição de betão. A conclusão final é que o peso do transporte no GWP total depende do tipo de betão.

5.6 Análise Global e classificação do betão em termos ambientais

O betão é o material de construção mais utilizado em todo o mundo e constitui a base estrutural da maioria das infraestruturas modernas. É essencial para edifícios, pontes, redes de transporte, sistemas de água e infraestruturas energéticas. Devido à sua escala de utilização, o betão é frequentemente descrito como a segunda substância mais consumida na Terra, depois da água [110], [111].

As estatísticas de produção de cimento são muitas vezes utilizadas como um indicador para estimar os volumes globais de produção de betão em todo o mundo. O cimento é o principal componente do betão e o seu volume de produção está intrinsecamente relacionado com a produção de betão [112], [113]. Estatísticas globais recentes indicam que a produção de cimento permaneceu acima de 4 mil milhões de toneladas anuais na última década. Os números consolidados apontam para aproximadamente 4,1 mil milhões de toneladas em 2022, ver Figura 81, com projeções de médio prazo sugerindo valores próximos de 4,2 mil milhões de toneladas em meados da década de 2020, em cenários de crescimento moderado [112], [113], [114], [115].

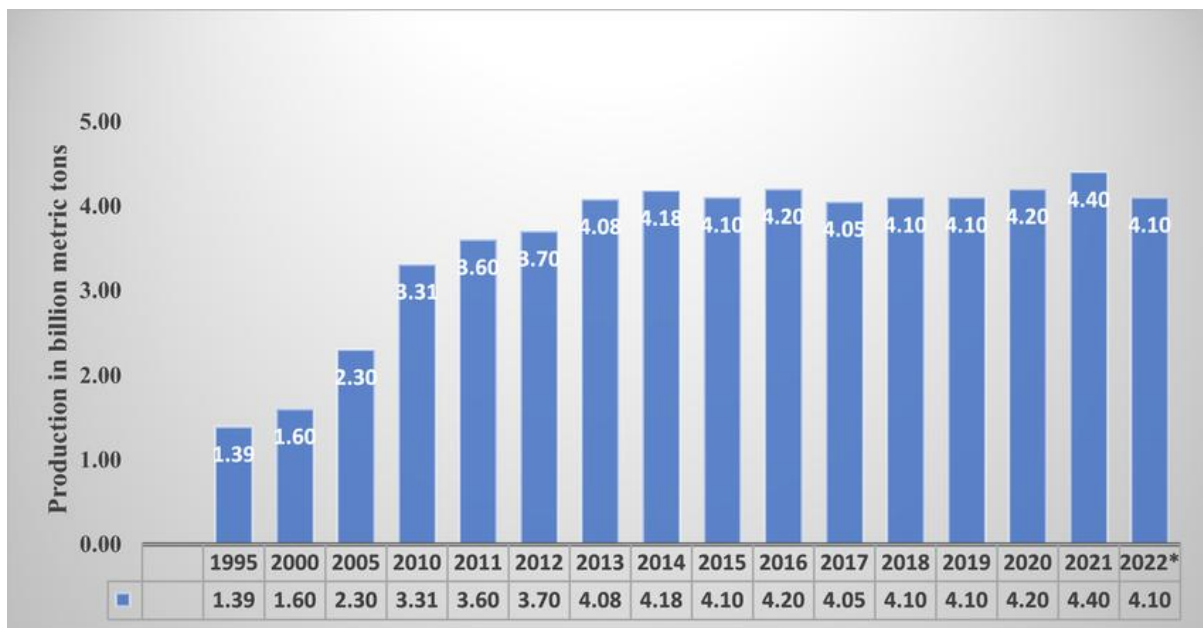


Figura 81 Produção mundial de cimento de 1995 a 2022 (mil milhões de toneladas) [115].

Pode observar-se na Figura 82 que os países com maior produção de cimento estão concentrados principalmente na Ásia, Índia e partes do Médio Oriente, sendo a América do Norte um interveniente relevante também influente de mencionar [115], [113], [116].

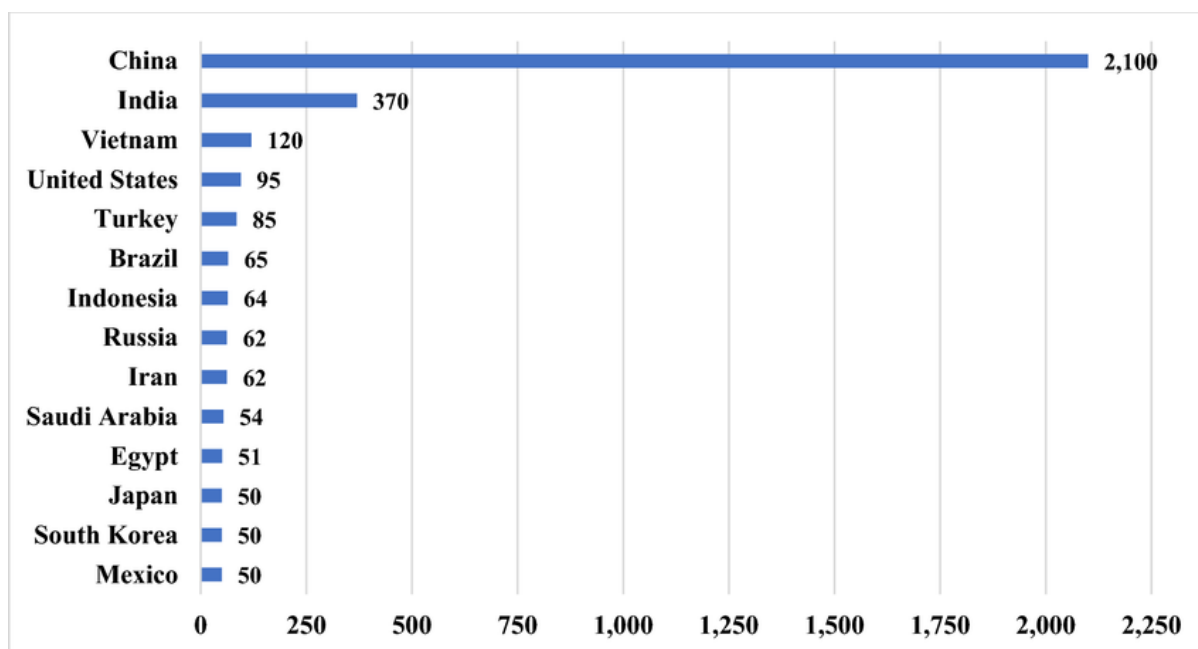


Figura 82 Principais países na produção mundial de cimento em 2022 [115].

Na Figura 83 pode-se observar que de acordo com a On Field Investment Research, a procura global de cimento deverá permanecer estável no período de 2024 a 2030, mesmo considerando o aumento previsto para o Médio Oriente, Índia e África. Os mercados de cimento mais fracos deverão ser a Turquia, a China e a Europa, enquanto os melhores mercados de cimento do mundo serão a África Subsaariana (com um crescimento previsto de +77% até 2030), a Índia (com um crescimento previsto de +42%) e a América do Norte (+20%) num futuro previsível [76].

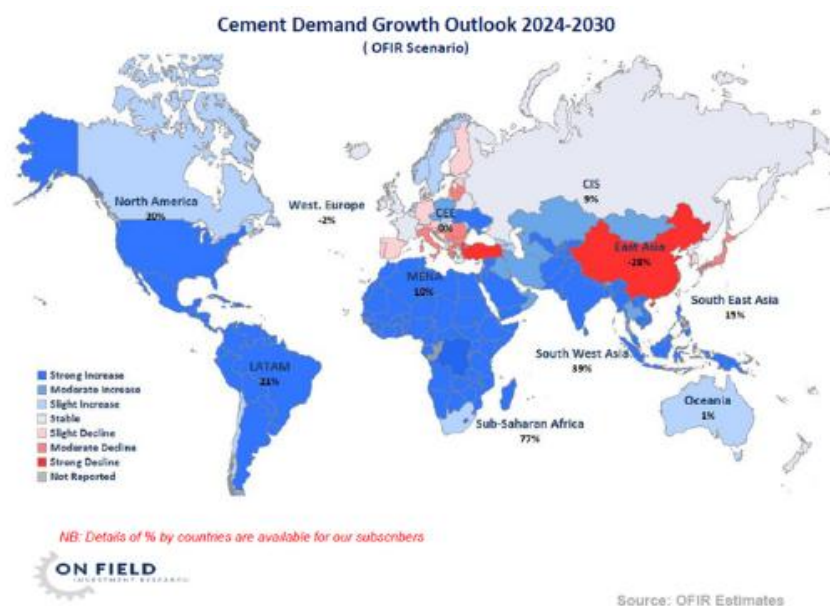


Figura 83 Perspetivas de crescimento da procura de cimento [117].

Para estimar a produção global de betão em termos de volume, pode ser aplicada uma abordagem de conversão baseada na dosagem média de cimento necessária para produzir um metro cúbico de betão. Uma composição típica de betão contém aproximadamente 300 kg de cimento por m³, o que corresponde a 0,3 toneladas de cimento por m³, assumindo um nível de produção global de cimento de 4,2 mil milhões de toneladas. Portanto, o volume global de betão produzido é estimado da seguinte forma:

$$\frac{4,2 \times 10^9 \text{ tonnes}}{0.3 \text{ tonnes/m}^3} \approx 14 \times 10^9 \text{ m}^3$$

O volume estimado de produção global de betão é de aproximadamente 14 mil milhões de m³ por ano. Este cálculo fornece uma explicação transparente sobre como é possível inferir os volumes globais de betão a partir das estatísticas de produção de cimento. Embora o teor de cimento varie consoante a composição de betão e os requisitos estruturais, 300 kg/m³ representa uma média global [112], [20].

Utilizando o volume global de betão calculado (14 mil milhões de m³), é possível calcular uma estimativa das emissões de gases com efeito de estufa relacionadas com os transportes, com base no GWP médio nacional dos transportes obtido neste trabalho, admitindo que as condições nas outras regiões do planeta são semelhantes às consideradas neste estudo. Como já foi referido, a média do GWP associada ao transporte de betão foi 13 kg CO₂ eq/m³. Aplicando este valor a todo o mundo, pode-se determinar o volume total de CO₂ associado ao transporte de betão em todo o mundo por ano:

$$14 \times 10^9 \text{ m}^3 \times 12,95 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3 = 181,3 \times 10^9 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \\ \approx 181 \text{ million tonnes CO}_2 \text{ eq/year}$$

Este resultado constitui um ponto de referência destinado a contextualizar a dimensão das emissões do setor dos transportes do betão. As emissões reais variam significativamente em função de:

- Distâncias médias de transporte.
- Composição da frota e tipo de combustível.
- Densidade urbana.
- Eficiência logística.

No entanto, mesmo com base em estimativas, as emissões relacionadas com o transporte decorrentes apenas da entrega de betão podem muito bem exceder 180 milhões de toneladas de CO₂eq/por ano à escala global.

Em resposta às crescentes pressões para a descarbonização, o setor do cimento e do betão introduziu quadros de classificação do carbono incorporado no betão. A Associação Global do Cimento e do Betão (GCCA) desenvolveu um sistema de classificação Low Carbon Concrete Rating (LCCR), que funciona de forma idêntica

aos rótulos de eficiência energética utilizados em eletrodomésticos ou edifícios. Assim sendo, os produtos de betão são classificados de acordo com o carbono incorporado ($\text{kg CO}_2\text{eq/m}^3$), originando numa comparação transparente entre composições de betões. Este sistema “Global Ratings for Concrete” da GCCA foi apresentado pela primeira vez na COP29 em novembro de 2024 [118].

Uma característica fundamental do sistema da GCCA é que tem em conta não só a pegada de carbono (GWP), mas também o desempenho mecânico do betão, especificamente a sua resistência à compressão (MPa). Esta abordagem dupla é essencial, uma vez que o betão de maior resistência requer normalmente um maior teor de cimento, o que aumenta diretamente a sua pegada de carbono. Como tal, este sistema de classificação tem conta no só a sua pegada carbónica, mas também o seu desempenho, para assim a classificação e as comparações serem mais justas [118].

A GCCA define oito níveis de classificação, ver Figura 84, que vão desde AA (Emissões Quase Nulas) até G (maior intensidade de carbono). As classificações baseiam-se em valores limite de GWP que variam de acordo com as classes de resistência do betão [118].

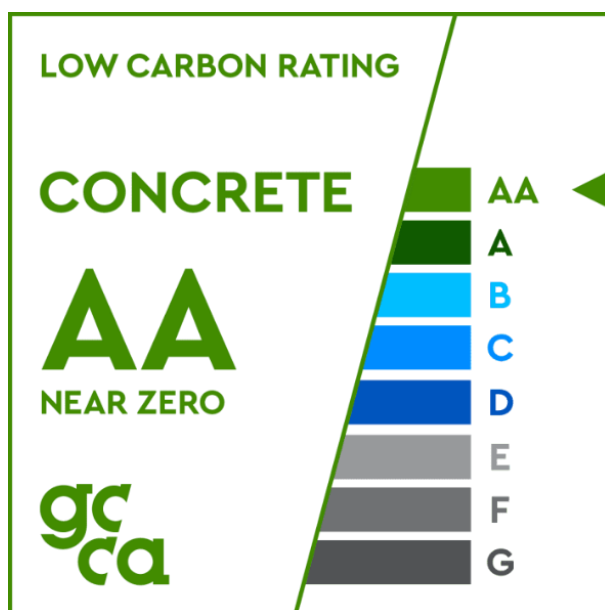


Figura 84 Classificações globais da GCCA para o betão [118].

Para cada classe de resistência (por exemplo, 20 MPa a 50 MPa), limites específicos de GWP definem as fronteiras entre as classificações. Isto garante que uma determinada classificação reflete um desempenho ambiental comparável, independentemente da aplicação estrutural [118].

Um dos principais pontos fortes do sistema de classificação da GCCA é a sua comparabilidade global. Uma determinada classificação (por exemplo, «C» ou «D») representa o mesmo nível de desempenho em termos de carbono em diferentes

países, mesmo que os valores absolutos do GWP possam variar devido a metodologias ou conjuntos de dados nacionais [118]. Ao mesmo tempo, o sistema permite adaptações específicas a cada país, garantindo a compatibilidade com as práticas locais de Declaração Ambiental de Produtos, mantendo simultaneamente o alinhamento com o quadro global [118]. A Figura 85 ilustra a escala de classificação de betão para diferentes níveis de desempenho.

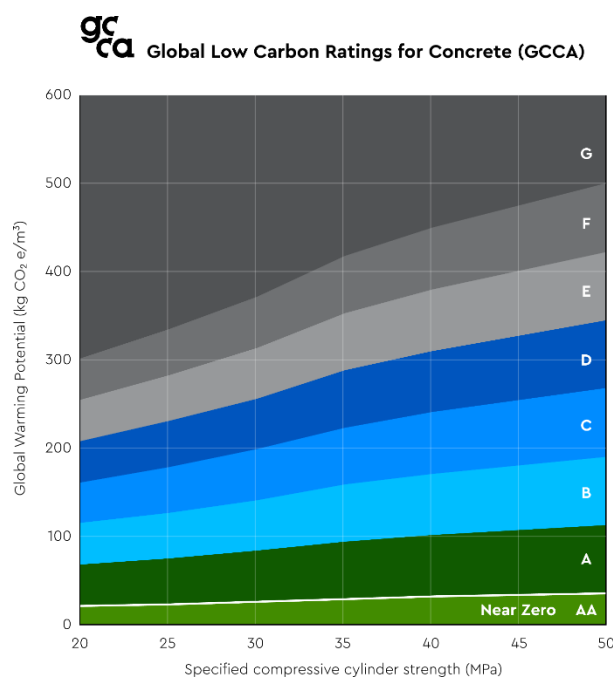


Figura 85 Escala de classificação de betão da GCCA [118].

Observa-se o seguinte:

- Os níveis mais baixos (AA–A, tons de verde) representam um betão com emissões de carbono baixas ou próximas de zero, em consonância com as metas de descarbonização a longo prazo [118].
- Os níveis intermédios (B–D, tons de azul) correspondem a emissões moderadas, refletindo práticas típicas da indústria com vários graus de otimização [118].
- Os níveis mais elevados (E–G, tons de cinzento) indicam maior carbono incorporado, geralmente associada a composições de betão com maior teor de cimento [118].

A categoria «Quase Zero» está claramente posicionada na parte inferior, enfatizando o seu papel como futura referência para o setor. Portanto, se produzirem betões com valores mais baixos de carbono incorporado é preciso:

- Baixar o teor de clínquer utilizado.
- Utilizar materiais cimentícios suplementares.
- Formular composições otimizadas.

Avaliação do impacto ambiental do transporte de betão em Portugal e estratégias de mitigação

➤ Melhor a eficiência de produção.

Embora a produção de clínquer continue a ser o principal contribuinte para as emissões incorporadas no betão, as emissões de transporte afetam diretamente o valor de carbono final por metro cúbico. Consequentemente, a otimização logística, a eletrificação da frota e os combustíveis alternativos podem contribuir para melhores classificações de desempenho em termos de carbono [77].

O valor médio de GWP de 13 kg de CO₂eq por m³ de betão pode ser aplicado às várias composições de betão estudadas por Robalo [5]. O doutoramento, como já referido, fornece valores detalhados do GWP na fase de produção para uma variedade de tipos de betão, incluindo betão convencional (CC), betão de baixo carbono (LCC), betão de agregado reciclado com baixo teor de cimento (LCRAC) e betões de durabilidade ultra-elevada (eco-UHDC) [5], [118].

A avaliação de Robalo [5] centra-se exclusivamente na fase de produção, excluindo as emissões associadas ao transporte de betão para o local de obra. Ao incorporar o GWP médio nacional de transporte, este estudo alarga a análise a uma perspetiva mais abrangente de «produção + entrega», permitindo uma avaliação mais realista do carbono incorporado total [118]. Todos os cálculos apresentados nesta secção utilizam o valor de transporte previamente determinado, 13 kg CO₂eq/m³.

Os valores de GWP de produção e totais (produção+transporte) e importância relativa do transporte em relação à produção, para os betões analisados estão indicados na Tabela 9.

Tabela 9 GWP total por tipo de betão.

Tipo de Betão	GWP de Produção (kg CO₂eq/m³)	GWP de Transporte (kg CO₂eq/m³)	% relativa do GWP do transporte	GWP Total (kg CO₂eq/m³)
CC	211	13	6.1	223.95
LCC	188		6.9	200.95
LCRAC	166		7.8	178.95
eco-UHDC	602		2.1	614.95
eco-UHDCsf	764		1.7	776.95
eco-UHDCpf	689		1.9	701.95

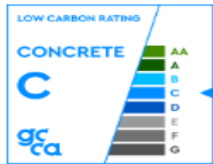
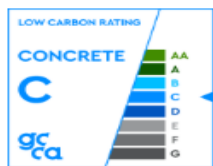
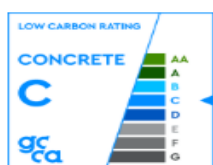
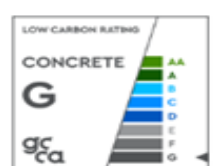
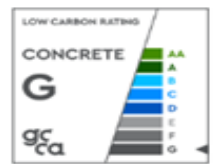
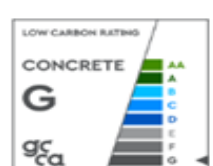
Estes resultados demonstram que o transporte contribui com um valor absoluto constante, mas a sua importância relativa varia significativamente consoante o tipo de betão.

Para aprofundar a análise, os valores totais do GWP (produção + transporte) podem ser interpretados no âmbito das Classificações globais da GCCA para o betão, que classificam o betão com base no GWP (kg CO₂eq/m³) e na classe de resistência [118]. Assumindo intervalos típicos de resistência estrutural (30–50 MPa), os intervalos aproximados da GCCA indicam:

- Classificações A/B: ~70–170 kg CO₂eq/m³
- Classificação C: ~170–250 kg CO₂eq/m³
- Classificação D: ~250–350 kg CO₂eq/m³
- Classificações E–F: >350 kg CO₂eq/m³
- Classificações G: >415 kg CO₂eq/m³

Com base nestes intervalos, os betões analisados foram classificados (ver Tabela 10).

Tabela 10 Classificações Globais segundo a GCCA dos betões analisados.

Tipo de Betão	GWP Total (kg CO ₂ eq/m ³)	Classificação GCCA
LCRAC	178.95	
LCC	200.95	
CC	223.95	
eco-UHDC	614.95	
eco-UHDCsf	776.95	
eco-UHDCpf	701.95	

Na classificação da GCCA não está claro que se o transporte deve ou não estar incluído na determinação do GWP/m³. Numa análise rigorosa dos efeitos sobre o ambiente, não há dúvida que deve estar. Por isso, a classificação e os valores indicados na Tabela 10 referem ao betão colocado na obra e não ao betão na central de produção.

A integração das emissões CO₂ de transporte na análise de GWP conduz a várias conclusões decisivas:

- O transporte não é negligenciável: mesmo com um valor absoluto modesto, pode representar até cerca de 8% das emissões totais em betões de baixo carbono.
- Maior relevância em composições sustentáveis: à medida que as emissões CO₂ de produção diminuem, o transporte torna-se proporcionalmente mais significativo.
- Efeito limitado em betões com elevado carbono incorporado: nas composições UHDC, as emissões são dominadas pelos materiais constituintes do betão.
- O transporte pode influenciar o posicionamento em enquadramentos como o sistema de classificação GCCA, particularmente quando os valores estão próximos dos intervalos [118].

Esta análise reforça a prioridade de adotar uma perspetiva de ciclo de vida completo na avaliação do desempenho ambiental do betão. Embora as emissões da fase de produção continuem a ser o principal contributo, o transporte representa uma componente muito substancial.

6 CONCLUSÕES

6.1 Considerações finais

O presente trabalho teve como principal objetivo avaliar o efeito no ambiente associado ao transporte de betão, com especial foco nas emissões de gases com efeito de estufa expressas em Global Warming Potential (GWP). Com base na análise de dados operacionais reais em Portugal, foi possível determinar uma emissão média de aproximadamente 13 kg CO₂eq por metro cúbico de betão transportado, evidenciando simultaneamente a existência de variações regionais associadas a fatores como a distância de transporte, o volume distribuído e a eficiência logística.

Os resultados demonstram que o transporte representa uma fração inferior do impacto ambiental total do betão quando comparado com a fase de produção, tendo um peso de 1,7% a 7,8% do GWP total, dependendo das condições logísticas e do tipo de betão considerado. Para um betão normal representa cerca de 6%. No entanto, o seu contributo não é negligenciável, tornando-se particularmente relevante no contexto de betões de baixo carbono, onde o peso relativo das emissões de transporte aumenta de forma significativa. Estes resultados reforçam a necessidade de integrar o transporte nas análises de ciclo de vida do betão, de forma a garantir uma avaliação mais completa e representativa do carbono incorporado.

Com base nos valores obtidos na análise nacional, foi ainda realizada uma estimativa das emissões de CO₂ associadas ao transporte de betão no contexto global do setor, utilizando o valor médio de GWP determinado neste estudo. Os resultados indicam que estas emissões podem atingir aproximadamente 180 milhões de toneladas de CO₂eq por ano, evidenciando a relevância desta componente à escala global.

À medida que o setor da construção evolui para soluções de baixo carbono e para referenciais ambientais mais exigentes, incluindo os definidos pelo sistema de classificação da GCCA, a otimização da logística de transporte assume um papel crescente. Em particular, a redução das distâncias de transporte, a melhoria da eficiência operacional das frotas e a adoção de tecnologias de baixas emissões, como autobetoneiras elétricas, serão determinantes para a redução do GWP global do transporte de betão.

A integração do impacto do transporte nos quadros de contabilização de emissões reforça a necessidade de abordagens sistémicas de descarbonização e enquadra-se diretamente nas políticas de construção sustentável. Neste contexto, destacam-se os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (ver Figura 86), nomeadamente o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), o ODS 13 (Ação Climática), o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestruturas) e o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), sublinhando a importância da gestão eficiente das cadeias logísticas no setor da construção.



Figura 86 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas (ONU) [119].

É necessário ter sempre presente as limitações das estimativas realizadas neste estudo, para que os resultados possam ser bem interpretados e para que as medidas que possam surgir sejam bem compreendidas e aplicadas:

1. Os volumes globais de produção de betão foram calculados indiretamente a partir das estatísticas de produção de cimento, o que introduz alguma incerteza quanto ao volume total de emissões de CO₂ associadas ao transporte de betão. O teor médio de cimento considerado (300 kg/m³) pode variar consoante os requisitos estruturais e as normas locais.
2. O valor do GWP do transporte (13 kg CO₂eq/m³) provém de um estudo nacional e pode não refletir a variabilidade logística global.
3. A eletrificação regional, as características locais das várias regiões do planeta e a adoção de combustíveis alternativos podem alterar significativamente os valores das emissões de CO₂ do transporte.

Portanto, a estimativa apresentada deve ser interpretada como uma referência para a escala e deve ser contextualizada, não deve ser interpretada como uma quantificação global precisa. As emissões relacionadas com o transporte de betão podem aproximar-se dos 180 milhões de toneladas de CO₂eq por ano. A magnitude das emissões globais decorrentes do transporte de betão reforça a importância de integrar a otimização logística nas estratégias de descarbonização, como:

- A importância de minimizar as distâncias de transporte. O valor estratégico da localização das centrais de betão.
- Os benefícios da otimização logística digital.
- O potencial da eletrificação da frota e uso de combustíveis alternativos.
- A integração das emissões do transporte na classificação do betão em termos de carbono incorporado.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Trabalhos futuros poderão aprofundar esta investigação através da aplicação da metodologia a diferentes contextos geográficos, permitindo comparar modelos logísticos e identificar boas práticas à escala internacional. A incorporação de dados mais detalhados relativos às características das frotas, aos tipos de combustível utilizados e às condições operacionais permitirá melhorar a precisão das estimativas.

Adicionalmente, será importante analisar a evolução dos danos ambientais do transporte de betão no contexto da transição energética, nomeadamente através da eletrificação das frotas e da utilização de combustíveis alternativos. A integração de ferramentas digitais de monitorização e gestão logística constitui também uma área promissora para a redução das emissões.

Por fim, o desenvolvimento de estudos baseados em conjuntos de dados regionalizados e em metodologias mais detalhadas de avaliação do ciclo de vida será fundamental para refinar as estimativas do impacto global do transporte de betão e apoiar a definição de estratégias eficazes de descarbonização no setor da construção.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] United Nations Environment Programme, “Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry,” United Nations Environment Programme, 2017.
- [2] International Energy Agency, “Cement – Analysis and Forecast to 2030,” International Energy Agency, 2023.
- [3] International Energy Agency, “Global CO₂ emissions from cement production,” International Energy Agency, 2022.
- [4] Global Cement and Concrete Association, “Concrete Future – The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete,” Global Cement and Concrete Association, 2021.
- [5] K. S. G. Robalo, Contributo para a Sustentabilidade das Estruturas de Betão: Desenvolvimento de Elementos Estruturais em Betão Ecoeficiente com Recobrimento em Betão de Ultraelevada Durabilidade, Universidade de Coimbra: Tese de Doutoramento , 2022.
- [6] A. M. Neville, “Properties of Concrete (5th ed.),” Pearson, 2011.
- [7] G. C. a. C. A. (GCCA), “Concrete revolution: how the world’s most consumed material is tackling its emissions,” *Chemistry & Industry (C&I)*, nº 7-8, pp. 12-18, 2023.
- [8] M. Jackson, G. Vola, D. Všíanský, J. Oleson, B. Scheetz, C. Brandon e R. Hohlfelder, “Cement Microstructures and Durability in Ancient Roman Seawater Concretes,” Sustainable Construction Materials and Technologies Conference, 2012.
- [9] L. Lancaster, Concrete Vaulted Construction in Imperial Rome: Innovations in Context, Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [10] O. Benestad, “Portland Cement: Its Manufacture and Use,” em *Lea’s Chemistry of Cement and Concrete*, 4th edition ed., P. Hewlett, Ed., Oxford, Elsevier, 2004, p. 1–25.
- [11] P. Collins, Concrete: The Vision of a New Architecture, Montreal / Kingston: McGill-Queen’s University Press, 2004.
- [12] S. Güner e D. Zhang, “The invention and development of reinforced concrete,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 39, nº 12, p. 1235–1244, 2012.
- [13] P.-C. Aïtcin, High-Performance Concrete, Boca Raton : CRC Press, 2000.

- [14] S. Mindess, J. F. Young e D. Darwin, *Concrete*, 2nd ed., Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.
- [15] United States Bureau of Reclamation, "Hoover Dam: 70th Anniversary History Symposium Proceedings," United States Bureau of Reclamation, Denver, 2006.
- [16] A. Nuno, "European Investment Bank Group," EIB, 8 Maio 2024. [Online]. Available: https://www.eib.org/en/stories/ponte-vasco-da-gama-construcao-portugal#:~:text=The%20bridge's%20design%20includes:%20*%20A%2017.2,%20Raising%20the%20region's%20per%20capita%20income. [Acedido em 21 Abril 2026].
- [17] W. F. Chen e L. Duan, *Bridge Engineering Handbook*, Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [18] J. A. Fernandez Ordonez, *Du béton armé au béton précontraint*.
- [19] T. Y. Lin, *Design of Prestressed Concrete Structures*, P. S. JAYASINGHE, ASIA PUBLISHING HOUSE, BOMBAY, 1962.
- [20] P. K. & M. P. J. M. Mehta, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.), McGraw-Hill Education, 2014.
- [21] O. Holcapek, P. Daněk e J. Kolísko, "Properties of Czech WW2 Concrete Fortifications after 80 Years," *SciPap*, 2020.
- [22] R. Šulc, J. Němeček e M. Polák, "Analysis of corrosion products from WW2 concrete bunkers in Czechia," *Acta Polytechnica*, vol. 59, nº 1, p. 55–62, 2019.
- [23] H. Fukuyama e S. Sugano, "Japanese seismic rehabilitation of concrete buildings after the Hyogoken-Nambu Earthquake," *Cement and Concrete Composites*, vol. 22, nº 1, p. 59–79, 2000.
- [24] S. Sugano, "Seismic strengthening of existing reinforced concrete buildings in Japan," *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, vol. 14, 1981.
- [25] Y. Nakamura e K. Okada, "Review on seismic isolation and response control methods of buildings in Japan," *Geoenviromental Disasters*, vol. 6, 2019.
- [26] A. I. o. J. (AIJ), "Preliminary Reconnaissance Report of the 2011 Tohoku Earthquake," Architectural Institute of Japan, Tokyo, 2012.
- [27] E. E. R. I. (EERI), "Learning from Earthquakes: The Mw 9.0 Tohoku, Japan Earthquake of March 11, 2011," Earthquake Engineering Research Institute, 2011.
- [28] E. Lekkas, "Critical Factors for Run-up and Impact of the Tohoku Earthquake Tsunami," *International Journal of Geosciences*, vol. 2, 2011.

- [29] A. Taylor, "The Atlantic," 10 Março 2016. [Online]. Available: <https://www.theatlantic.com/photo/2016/03/5-years-since-the-2011-great-east-japan-earthquake/473211/>. [Acedido em 21 Abril 2026].
- [30] A. Raby, J. Macabuag, A. Pomonis, S. Wilkinson e T. Rossetto, "Implications of the 2011 Great East Japan Tsunami on Sea Defence Design," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 14, 2015.
- [31] A. Suppasri, E. Mas e I. Charvet, "Damage characteristics of the 2011 Tohoku tsunami," *Coastal Engineering Journal*, vol. 55, nº 1, 2013.
- [32] M. Shutterstock, "The Conversation," 22 Março 2022. [Online]. Available: <https://theconversation.com/concrete-fuels-climate-change-but-theres-a-nature-friendly-way-to-defend-coasts-from-rising-seas-179044>. [Acedido em 21 Abril 2026].
- [33] B. A. Bradley e M. Cubrinovski, "Near-source strong ground motions observed in the 22 February 2011 Christchurch earthquake," *Seismological Research Letters*, vol. 82, nº 6, 2011.
- [34] A. Kaiser, C. Francois-Holden, J. Beavan, D. Beetham, R. Benites e A. Celentano, "The Mw 6.2 Christchurch earthquake of February 2011: Preliminary report," *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, vol. 55, 2012.
- [35] W. Saunders, J. Beban, T. Taig, B. Morris, D. Meiler e C. Massey, Case studies on national and international approaches to risk reduction through land use planning, Lower Hutt, New Zealand: GNS Science, 2014.
- [36] F. Branco e P. Mendes, Betões Estruturais – Propriedades, Produção e Controlo, Lisboa: IST Press, 2012.
- [37] J. Brito e F. Agrela, New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete, Cambridge: Woodhead Publishing, 2018.
- [38] J. Bogas, A. Gomes e S. Real, "Capillary absorption of structural lightweight aggregate concrete," *Materials and Structures*, vol. 47, pp. 1605-1616, 2014.
- [39] P. Piloto e J. Rodrigues, "Fire resistance of concrete elements," *Fire Safety Journal*, vol. 38, nº 4, pp. 343-356, 2003.
- [40] P. Lourenço e J. Barros, "Cracking behavior of reinforced concrete: modeling and experimental validation," *Engineering Structures*, vol. 32, nº 3, pp. 946-957, 2010.
- [41] K. L. Scrivener, V. M. John e E. Gartner, "Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO2 world," *Cement and Concrete Research*, vol. 114, pp. 2-26, 2018.

- [42] B. Jordão e A. Silva, "Energy efficiency and CO2 emissions of the Portuguese cement industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 230, p. 1344–1357, 2019.
- [43] M. Carvalho, *Patologia, Reabilitação e Desempenho de Estruturas de Betão*, FEUP Edições, 2011.
- [44] P. L. Gaspar e J. d. Brito, "Quantification of the environmental impact of construction materials," *Building and Environment*, vol. 43, n^o 4, p. 610–617, 2008.
- [45] E. C. f. Standardization, *Concrete — Specification, performance, production and conformity*, Bruxelas, Bélgica: European Committee for Standardization, 2013.
- [46] A. -. A. P. d. E. d. B. Pronto, *Guia do Betão*, 2022, 1^a Edição, Jan.
- [47] A. Neville e J. Brooks, *Concrete Technology*, Harlow, UK: Pearson Education, 2010, 2nd Ed..
- [48] A. C. 213, *Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete*, American Concrete Institute, 2003.
- [49] I. Farina, I. Moccia, C. Salzano, N. Singh, P. Sadrolodabae e F. Colangelo, "Compressive and Thermal Properties of Non-Structural Lightweight Concrete Containing Industrial Byproduct Aggregates," *Materials*, vol. 15, n^o 11, 2022.
- [50] M. Piechaczek, K. Ostrowski e K. Furtak, "Lightweight Aggregate Concrete with Regard to Bridge Structures—State of the Art," *Materials*, vol. 18, n^o 16, 2025.
- [51] A. Bentur e S. Mindess, *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, Abingdon, UK: 2nd Edition - Taylor & Francis, 2007.
- [52] M. Anas, M. Khan, H. Bilal, S. Jadoon e M. Khan, "Fiber Reinforced Concrete: A Review," *Engineering Proceedings*, vol. 22, 2022.
- [53] A. Ischenko e A. Borisova, "Application of fiber-reinforced concrete in high-rise construction," *E3S Web of Conferences*, vol. 164, 2020.
- [54] ACI Committee 544, *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*, Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, 2002.
- [55] H. Okamura e M. Ouchi, "Self-Compacting Concrete," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 1, n^o 1, 2003.
- [56] M. Elsayed, B. Tayeh, Y. Abu Aisheh e N. El-Nasser, "Shear Strength of Eco-Friendly Self-compacting Concrete Beams Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag and Fly Ash as Cement Replacement," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, 2022.

- [57] F. & J. S. Pacheco-Torgal, *Eco-efficient Construction and Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA), Eco-labeling and Case Studies*, Woodhead Publishing, 2014.
- [58] T. Pavlů, J. Pazderka, K. Fořtová, J. Řepka, D. Mariaková e V. Tomáš, “The Structural Use of Recycled Aggregate Concrete for Renovation of Massive External Walls of Czech Fortification,” *Buildings*, vol. 12, 2022.
- [59] T. Mohammed, A. Khan e A. Mahmood, *Recycling of Demolished Brick Aggregate Concrete as Coarse and Fine Aggregate*, 2015.
- [60] M. Alim e K. Mohiuddin, “Micro-Characterization of Recycled Concrete Aggregate,” *Journal of Engineering Science*, vol. 14, nº 2, 2024.
- [61] B. A. Graybeal, “Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete,” Federal Highway Administration (FHWA), Federal Highway Administration (FHWA), 2006.
- [62] H. Heraiz, Z. Pan, D. Zhang, Y. Hu, X. Mu, A. Baras, J. Liu, W. Ni e M. Hitch, “The Utilization of Slag, Steel Slag, and Desulfurization Gypsum as Binder Systems in UHPC with Iron Tailings and Steel Fibers—A Review,” *Minerals*, vol. 15, 2025.
- [63] P. Richard e M. Cheyrezy, “Composition of reactive powder concretes,” *Cement and Concrete Research*, vol. 25, nº 7, 1995.
- [64] T. H. o. t. T. M. i. A. -. I. 1. t. WWII, “cescoaustralia,” CESCO, [Online]. Available: <https://www.cescoaustralia.com/origins-to-wwii/>.
- [65] D. P. LIBRARY, “DIGITAL COLLECTIONS - Motorists in Frayer-Miller truck owned by J. Jacob Shannon & Co., Atlantic City, New Jersey, 1910 North American Run,” [Online]. Available: <https://digitalcollections.detroitpubliclibrary.org/islandora/object/islandora%3A197259>. [Acedido em 30 Janeiro 2026].
- [66] J. Newman e B. S. Choo, *Advanced Concrete Technology: Processes*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003.
- [67] Y. Guo, J. Wu, C. Wang e F. Zhang, “Study on the influence of the shape and size of coarse aggregate on the strength of concrete,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 780, 2020.
- [68] CEMBUREAU, “The Role of Cement in the 2050 Low Carbon Economy,” European Cement Association, Brussels, 2013.
- [69] C. AUSTRALIA, “CESCO,” [Online]. Available: <https://www.cescoaustralia.com/concrete-mixers/7-5m3-hydraulic-transit-mixer/>. [Acedido em 06 02 2026].

- [70] A. C. 304, "Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete - ACI 304R-00," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2000.
- [71] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff e W. C. Panarese, Design and Control of Concrete Mixtures, Skokie, Illinois: Portland Cement Association, 2002.
- [72] J. A. T. C. a. M. M. M. Browne, "Analyzing the environmental impacts of urban freight transport," *Journal of Transport Geography*, vol. 18, n° 1, p. 25–33, 2010.
- [73] M. B. a. T. C. J. Allen, "Investigating relationships between road freight transport, facility location, logistics management and urban form," *Journal of Transport Geography*, vol. 1, n° 10.1016/j.jtrangeo.2011.09.004, pp. 1-12, 2012.
- [74] A. P. M. E. H. A. & S. A. Gursel, "Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review.," *Cement and Concrete Composites*, vol. 51, p. 38–48, 2014.
- [75] R. T. a. D. V. M. Perboli, "The two-echelon capacitated vehicle routing problem: Models and math-based heuristics," *Transportation Science*, vol. 45, n° 3, pp. 364-380, 2011.
- [76] I. C. o. C. T. (ICCT), "Zero-emission construction equipment: Technology pathways and policy options," International Council on Clean Transportation (ICCT), 2021.
- [77] T. & Environment, "Electrifying heavy-duty vehicles in Europe," Transport & Environment, 2020.
- [78] D. Ravichandran, "EV TECH NEWS - MOTORINDA," 24 Setembro 2020. [Online]. Available: <https://evtechnews.in/sany-fully-electric-concrete-mixer-trucks-details/>. [Acedido em 30 Janeiro 2026].
- [79] C. D. B. a. P. N. A. Caragliu, "Smart cities in Europe," *Journal of Urban Technology*, vol. 18, n° 2, pp. 65-82, 2011.
- [80] J. Gouveia, "Linkedin," 02 2026. [Online]. Available: https://www.linkedin.com/posts/joao-gouveia-8083495_a-maquinter-forneceu-ao-seu-parceiro-bet%C3%A3o-activity-7428045250838949890-sjPB/?originalSubdomain=pt. [Acedido em 03 03 2026].
- [81] R. M. Andrew, "Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2017.," *Earth System Science Data*, vol. 11, n° 4, pp. 221-236, 2018.
- [82] CEMBUREAU, "Activity Report 2020–2021," European Cement Association, 2021.
- [83] F. I. d. B. (fib), fib Bulletin No. 67: Guidelines for Green Concrete Structures, Lausanne, Switzerland: fib, 2012.

- [84] T. Ganiron Jr, "Recycling Concrete Debris from Construction and Demolition Waste," *International Journal of Advanced Science and Technology*, vol. 77, 2015.
- [85] E. & S. T. Gartner, "Alternative cement clinkers," *Cement and Concrete Research*, vol. 114, p. 27–39, 2018.
- [86] R. Martins, R. Carmo, H. Costa e E. Júlio, "A review on precast structural concrete walls and connections," *Advances in Structural Engineering*, vol. 26, 2023.
- [87] n. 9. Construção Magazine, Rumo à descarbonização do setor da construção, Edições Técnicas, março/abril 2019.
- [88] M. Gorgolewski, "Designing with Reused Building Components," *Building Research & Information*, vol. 36, nº 2, p. 175–188, 2008.
- [89] Y.-J. Kim, W.-J. Chin e S.-J. Jeon, "Interface Shear Strength at Various Joint Types in High-Strength Precast Concrete Structures," *Materials*, vol. 13, nº 19, 2020.
- [90] Z. Zhang, Embodied carbon saving potential of GGBFS and alternative SCMs — up to 56% CO₂ reduction tested in LCA studies, 2024.
- [91] Linares-Lu, Optimal RCA replacement ratios — mechanical and environmental evaluations across global contexts, 2024.
- [92] M. P. Ferreira, Effect of Recycled Concrete Aggregates on Concrete Breakout Strength — construction and strength performance of recycled mixtures, 2024.
- [93] B. Bennett, Global warming potential of recycled aggregate concrete with supplementary cementitious materials — LCA analysis of hundreds of mixes showing environmental benefits, 2022.
- [94] I. Bampanis, Recycling Concrete to Aggregates: Implications on CO₂ Emissions — optimal 50% RCA replacement reduces carbon footprint by ~20%, 2023.
- [95] IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report. Cambridge University Press., 2013.
- [96] P.-L. & R. F. Ragon, "ICCT CO₂ emissions from trucks in the EU: An analysis of the heavy-duty CO₂ standards baseline data," International Council on Clean Transportation (ICCT), 2021.
- [97] "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2 CHAPTER 3 (MOBILE COMBUSTION): Energy. Institute for Global Environmental Strategies (IGES)," IPCC, Japan, 2006.
- [98] DEFRA, "UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting. Department for Environment, Food & Rural Affairs; Ecoinvent Database v3.7; European Environment Agency (EEA), Greenhouse gas emission intensities," DEFRA, 2020.

- [99] Diário da República, *Decreto-Lei n.º 99/2005, de 21 de Junho. Regulamento dos pesos e dimensões máximos autorizados para veículos em circulação. Diário da República.*, Lisboa: Diário da República, 2005.
- [100] European Environment Agency (EEA), “EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook,” European Environment Agency, Copenhagen, 2019.
- [101] International Energy Agency (IEA), “Road Transport Report,” International Energy Agency, Paris, 2023.
- [102] International Council on Clean Transportation (ICCT), “CO₂ Emissions from Heavy-Duty Vehicles in the EU,” International Council on Clean Transportation, Washington, DC, 2021.
- [103] MIT Climate Portal, “Freight Transportation Emissions,” 03 Fevereiro 2023. [Online]. Available: <https://climate.mit.edu/explainers/freight-transportation>. [Acedido em 27 Abril 2026].
- [104] EcoInvent, “Ecoinvent Database v3.7 – Life Cycle Inventory Data,” EcoInvent, Zürich, Switzerland, 2020.
- [105] European Environment Agency (EEA), “Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2018. EEA Report No. 06/2020,” European Environment Agency (EEA), 2020.
- [106] I. C. o. C. T. (ICCT), “Lifecycle Greenhouse Gas Emissions from Renewable Diesel (HVO),” International Council on Clean Transportation, Washington, DC, 2020.
- [107] E. Commission, “Renewable Energy Progress Report under the Renewable Energy Directive (RED II),” European Commission, Brussels, 2021.
- [108] International Council on Clean Transportation (ICCT), “Fuel Efficiency Technology in European Heavy-Duty Vehicles: Baseline and Potential,” International Council on Clean Transportation, Washington, DC, 2017.
- [109] European Environment Agency (EEA), “Monitoring CO₂ emissions from passenger cars and vans in 2015,” European Environment Agency, Copenhagen, 2016.
- [110] W. B. C. f. S. Development, “Cement Sustainability Initiative (CSI): Technology Roadmap – Low-Carbon Transition in the Cement Industry,” World Business Council for Sustainable Development, Geneva, Switzerland, 2018.
- [111] U. G. Survey, “Mineral Commodity Summaries 2023: Cement,” U.S. Geological Survey, Reston, VA - United States, 2023.
- [112] I. E. A. (IEA), “Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry,” OECD/IEA, Paris, 2018.

- [113] J. R. C. (. European Commission, “Global CO₂ emissions from cement production,” European Commission, Brussels, 2022.
- [114] Statista, “Global cement production worldwide from 1995 to 2024,” Statista, Hamburg, 2023.
- [115] O. E. Ige, D. V. Von Kallon e D. A. Desai, “ResearchGate - Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model,” 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Cement-production-worldwide-from-1995-to-2022-Billion-metric-tons-Garside-2022b_fig1_377268099. [Acedido em 08 03 2026].
- [116] United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN DESA), “World Urbanization Prospects,” United Nations, New York, 2022.
- [117] D. Emir Adiguzel, “World Cement Association,” 19 03 2024. [Online]. Available: <https://www.worldcementassociation.org/blog/news/global-cement-industry-outlook-trends-and-forecasts>. [Acedido em 08 03 2026].
- [118] G. C. a. C. Association, “GCCA Global Ratings for Concrete,” [Online]. Available: <https://gccassociation.org/lcr-concrete/>. [Acedido em 15 03 2026].
- [119] ONU, “Objetivos de Desenvolvimento Sustentável,” [Online]. Available: <https://www.eca.europa.eu/pt/sustainable-development-goals>. [Acedido em 2026 03 15].