



**Inês Maria da  
Conceição Almeida**

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS  
RODOVIÁRIOS**





**Inês Maria da  
Conceição Almeida**

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS  
RODOVIÁRIOS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro



Ao meu avô



## **o júri**

Presidente

Prof. Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Arguente

Doutor Luís Francisco Amaral Silva  
Supervisor de Infraestruturas da Egis Road Operation Portugal

Orientador

Prof. Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro



## palavras-chave

Avaliação do ciclo de vida de pavimentos rodoviários (LCA); Inventário do ciclo de vida (LCI); Avaliação de impacto (LCIA); Categorias de impacto

## resumo

Qualquer pavimento tem encargos ambientais significativos ao longo do seu tempo de vida. Portanto, tecnologias inovadoras para melhorar a eficiência energética dos pavimentos são necessárias.

A avaliação do ciclo de vida (LCA), que tem como objetivo quantificar e comparar todos os impactos ambientais do tempo de vida do produto ou processo, está a ser aceite pela indústria rodoviária para esse fim.

Para os objetivos deste estudo, foi realizada uma Análise do Ciclo de Vida numa infraestrutura rodoviária com características representativas da generalidade dos pavimentos rodoviários flexíveis.

Um modelo de avaliação do ciclo de vida é usado para quantificar os impactos ambientais para as fases de extração de materiais e produção de misturas, construção, utilização e manutenção de uma estrutura de pavimento com camadas em mistura betuminosa a quente (HMA).

Cada fase do ciclo de vida do pavimento de HMA foi quantificada em oito categorias de impacto e uma comparação fornecida entre as fases para compreender a contribuição percentual para o ambiente. O resultado de cada categoria de impacto é o total de todos os dados de inventário caracterizados individualmente em cada categoria.

A fim de quantificar as pegadas ambientais e orientar efetivamente os esforços de sustentabilidade, as unidades funcionais precisam ser padronizadas, os limites dos sistemas expandidos, a qualidade e a fiabilidade dos dados melhorados, e os objetivos de estudo ampliados.

A identificação de pontos fracos nos campos que apoiam a Avaliação de Ciclo de Vida do pavimento origina uma estrutura de avaliação transparente e cria uma direção de pesquisa orientada para o futuro.

Essas melhorias possibilitarão o detalhe da estrutura de pesquisa de LCA do pavimento de modo a conduzir com confiança os responsáveis da administração de estradas na direção certa rumo aos objetivos de sustentabilidade.



**keywords**

Life Cycle Assessment (LCA); Life Cycle Inventory Analysis (LCI); Life Cycle Impact Assessment (LCIA); Impact Category

**abstract**

Any pavement has significant environmental burdens throughout its life cycle. Therefore, innovative technologies to improve energy efficiency of pavement constructions are necessary.

Life cycle assessment (LCA), which aims to quantify and collate all the environmental impacts from the life time of the product or process, is being accepted by the road industry for such purpose.

For the aims of this study, a Life Cycle Analysis has been carried out on a road infrastructure with the most representative geometrical characteristics.

A life cycle assessment model is used to quantify the environmental burdens for material, construction, use and maintenance phases of hot mix asphalt (HMA) pavement.

Each life cycle phase of HMA pavement has been quantified on eight impact categories and a comparison provided among the phases to understand the percentage contribution to the environment. The result of each impact category is the total of all the individually characterized inventory loadings in each category.

In order to quantify environmental footprints and effectively guide sustainability efforts, functional units need to be standardized, systems boundaries expanded, data quality and reliability improved, and study scopes broadened.

Identifying weaknesses in the fields that support pavement LCA provides a transparent assessment framework and generates a focused research direction moving forward.

These improvements will put the body of pavement LCA research in a better position to confidently lead private industry and government agencies on successful paths towards sustainability goals.



## ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Enquadramento temático .....	1
1.2. Objetivos e metodologia .....	2
1.3. Organização dos conteúdos.....	3
2. ESTADO DA ARTE.....	4
2.1. Ciclo de vida dos pavimentos rodoviários .....	4
2.1.1. Extração de matérias-primas e produção de misturas .....	4
2.1.2. Construção .....	5
2.1.3. Utilização.....	7
2.1.3.1. Iluminação da via .....	8
2.1.3.2. Carbonatação do betão .....	9
2.1.3.3. Albedo .....	9
2.1.3.3.1. Ilha de calor urbano (UHI – <i>Urban Heat Island</i> ).....	9
2.1.3.3.2. <i>Radiative forcing</i> .....	10
2.1.3.4. Lixiviação.....	11
2.1.3.5. Resistência ao rolamento.....	11
2.1.3.5.1. Estrutura do pavimento .....	12
2.1.3.5.2. Regularidade/ rugosidade do pavimento .....	12
2.1.4. Manutenção .....	13
2.1.4.1. Atraso de tráfego .....	14
2.1.5. Fim de vida .....	14
2.1.5.1. Deposição de materiais em aterro .....	15
2.1.5.2. Utilização de materiais para reciclagem.....	15
2.1.5.3. Abandono .....	15
2.2. Avaliação do ciclo de vida dos pavimentos rodoviários (LCA).....	16
2.2.1. Fases de um LCA .....	17

2.2.1.1.	Definição do objetivo e âmbito .....	17
2.2.1.2.	Análise do inventário (LCI) .....	18
2.2.1.3.	Avaliação de impacto (LCIA) .....	19
2.2.1.4.	Interpretação .....	23
2.3.	Considerações finais .....	23
3.	CASO DE ESTUDO .....	25
3.1.	Definição do objetivo e âmbito .....	25
3.1.1.	Definição do objetivo .....	25
3.1.2.	Âmbito .....	26
3.1.3.	Estrutura do pavimento .....	26
3.2.	Inventário do ciclo de vida (LCI) .....	28
3.2.1.	Principais poluentes atmosféricos .....	29
3.2.1.1.	Óxidos de carbono .....	30
3.2.1.2.	Óxidos de azoto (NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> ) .....	31
3.2.1.3.	Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O) .....	32
3.2.1.4.	Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> ) .....	32
3.2.1.5.	Hidrocarbonetos (HC) .....	33
3.2.1.6.	Metano (CH <sub>4</sub> ) .....	33
3.2.1.7.	Composto orgânico volátil não metano (NMVOC) .....	33
3.2.1.8.	Material particulado (PM <sub>10</sub> ) .....	34
3.2.2.	Principais poluentes aquáticos .....	34
3.2.2.1.	Chemical Oxygen Demand (COD) .....	35
3.2.2.2.	Fósforo (P) e Nitrogénio (N) .....	35
3.2.3.	Sub-fases .....	36
3.2.3.1.	Produção de agregados britados .....	36
3.2.3.2.	Produção de betume .....	39
3.2.3.3.	Produção de mistura betuminosa a quente em central (HMA) .....	42

3.2.3.4.	Transporte de material por caminhão.....	45
3.2.3.5.	Carregadora de rodas na operação de carregamento de caminhões .....	46
3.2.3.5.1.	Classes de escavação e condições de peso/volume .....	47
3.2.3.6.	Escavadoras .....	49
3.2.3.7.	Cilindros de compactação .....	51
3.2.3.8.	Pavimentadora.....	53
3.2.3.9.	Iluminação da via .....	53
3.2.3.10.	Tráfego .....	54
3.2.3.11.	Estratégia de manutenção.....	55
3.2.3.12.	Atraso de tráfego .....	57
3.3.	Avaliação de impacto (LCIA).....	59
3.3.1.	Seleção.....	59
3.3.1.1.	Acidificação .....	59
3.3.1.2.	Eutrofização .....	60
3.3.1.3.	Aquecimento global .....	61
3.3.1.4.	Toxicidade humana .....	63
3.3.1.5.	Formação foto-oxidante .....	63
3.3.1.6.	Ecotoxicidade.....	64
3.3.1.7.	Depleção dos materiais e de combustíveis fósseis.....	64
3.3.2.	Classificação.....	64
3.3.3.	Caracterização .....	66
3.3.3.1.	Fase 1 - Extração de matérias-primas e produção de misturas .....	68
3.3.3.2.	Fase 2 - Construção .....	71
3.3.3.3.	Fase 3 - Utilização.....	79
3.3.3.4.	Fase 4 - Manutenção .....	81
3.3.3.5.	Discussão de resultados.....	82
4.	CONCLUSÃO .....	87

4.1. Discussão .....	87
4.2. Trabalhos futuros .....	89
BIBLIOGRAFIA .....	90

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo de Vida do Pavimento .....	4
Figura 2 – Estrutura de um pavimento flexível (adaptado de Antunes et al, 2006) .....	5
Figura 3 – Estrutura de um pavimento rígido (adaptado de Antunes et al, 2006).....	5
Figura 4 – Exemplos da relevância da iluminação noturna na deteção da envolvente (Mayeur, Brémond, & Christian Bastien, 2010) .....	8
Figura 5 – Causas de formação de ilhas de calor urbanas (Pivetta, 2012) .....	10
Figura 6 – Composição da fricção de superfície: força de atrito e de histerese (Chen, Zhang, Yu, & Wang, 2017) .....	13
Figura 7 – Interação das fases de LCA [adaptado da Norma ISO14040 (ISO14040, 2006)] .....	17
Figura 8 – Exemplo do faseamento dos elementos obrigatórios de LCIA [adaptado da Norma ISO14044 (ISO14044, 2006)] .....	19
Figura 9 – Estrutura da LCIA [adaptado da Norma ISO14040 (ISO14040, 2006) & Norma ISO14044 (ISO14044, 2006) & Inti <i>et al.</i> (2016)].....	20
Figura 10 – Representação esquemática do quilómetro de estrada sujeito a análise .....	27
Figura 11 – Estrutura do pavimento adotada.....	27
Figura 12 – Exemplos de ecossistemas terrestres e instalações experimentais criadas para investigar os efeitos da poluição do ar e alterações climáticas na Bacia do Mediterrâneo (Ochoa-Hueso et al., 2017).....	29
Figura 13 – Diferentes fases do processo produtivo (adaptado de Saraiva, 2009).....	37
Figura 14 – Refinaria da Nynäs em Nynäshamn (Montin & Manager, 2012) .....	40
Figura 15 – Volvo BM L180 (Volvo, 1994b) .....	47
Figura 16 – Åkerman EC620 (Volvo, 1994a) .....	51
Figura 17 – Processo de pavimentação durante reabilitação (Vázquez, Terán, Huertas, & Paje, 2018).....	56
Figura 18 – Metodologia exemplificativa: inventário, <i>midpoints</i> , <i>endpoints</i> e áreas de proteção. (adptado de Anthonissen, Braet, & Van den bergh, 2015 e Pennington et al., 2004).....	59

Figura 19 – Proliferação da flora aquática (van der Lee, Verdonschot, Kraak, & Verdonschot, 2018) .....	61
Figura 20 – Emissões dos principais GHG em 2011 por setor de atividade (APA, 2013) .....	62
Figura 21 – Pavimentadora com tanque de emulsão betuminosa e barra de pulverização (Wang, Xiao, Chen, Li, & Amirkhanian, 2017) .....	75
Figura 22 – Quantificação da categoria de impacto aquecimento global (kg CO <sub>2</sub> -eq) ..	82
Figura 23 – Quantificação da categoria de impacto depleção dos combustíveis fósseis (GJ).....	82
Figura 24 – Quantificação da categoria de impacto toxicidade humana: emissões atmosféricas (kg 1,4-dichlorobenzene-eq) .....	83
Figura 25 – Quantificação da categoria de impacto toxicidade humana: emissões para a água (kg 1,4-dichlorobenzene-eq) .....	83
Figura 26 – Quantificação da categoria de impacto acidificação (kg SO <sub>2</sub> -eq).....	83
Figura 27 – Quantificação da categoria de impacto formação foto-oxidante (kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq) .....	84
Figura 28 – Quantificação da categoria de impacto eco-toxicidade: emissões atmosféricas (kg 1,4-dichlorobenzene-eq).....	84
Figura 29 – Quantificação da categoria de impacto eco-toxicidade: emissões para a água (kg 1,4-dichlorobenzene-eq).....	84
Figura 30 – Quantificação da categoria de impacto eutrofização (kg PO <sub>4</sub> -eq) .....	85
Figura 31 – Agrupamento e ponderação de categorias de impacto (adaptado de Huang, Bird, & Heidrich, 2009).....	86
Figura 32 – Sistema de suporte de tomada de decisão (adaptado de Santos, Bressi, Cerezo, & Lo Presti, 2019) .....	88

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Uso total de energia por produto (Chappat & Bilal, 2003) .....	6
Tabela 2 – Emissões totais de GHG por produto (Chappat & Bilal, 2003) .....	7
Tabela 3 – Fatores de caracterização (Inti et al., 2016).....	21
Tabela 4 – Poluentes atmosféricos contemplados no presente estudo .....	30
Tabela 5 – Poluentes aquáticos contemplados no presente estudo.....	35
Tabela 6 – Encargos ambientais da produção de agregados britados (Häkkinen & Mäkelä, 1996).....	38
Tabela 7 – Dados de análise de inventário da produção de agregados britados (Stripple, 2001).....	38
Tabela 8 – Dados de análise de inventário da produção de betume (Stripple, 2001).....	41
Tabela 9 – Encargos ambientais da produção betume (Häkkinen & Mäkelä, 1996) ....	42
Tabela 10 – Dados de operação do consumo de material e energia em central (Stripple, 2001).....	44
Tabela 11 – Dados de análise de inventário para mistura betuminosa produzida em central e misturada a quente, sem incluir o transporte da mistura para obra (Stripple, 2001) ...	44
Tabela 12 – Transporte com recurso a camião de distribuição fora da área urbana (carga de 14 toneladas), carga total, vazio no retorno (Stripple, 2001).....	45
Tabela 13 – Dados de análise de inventário para carregadora de rodas, tipo Volvo BM L180, para diferentes classes de escavação no carregamento de veículos (Stripple, 2001). .....	46
Tabela 14 – Classes de escavação (adaptado de Stripple, 2001).....	48
Tabela 15 – Valores indicativos das densidades de materiais manuseados em trabalho rodoviário (adaptado de Stripple, 2001) .....	49
Tabela 16 – Dados de emissão e energia para cada classe de escavação por volume de produção .....	50
Tabela 17 – Resultados da análise do ciclo de vida da compactação de uma camada de betuminosa (adaptado de Stripple, 2001) .....	51

Tabela 18 – Resultados da análise do ciclo de vida da compactação de uma camada de solo/cascalho (adaptado de Stripple, 2001) .....	52
Tabela 19 – Resultados do inventário do ciclo de vida de duas pavimentadoras para a pavimentação de uma camada (adaptado de Stripple, 2001) .....	53
Tabela 20 – Cálculo da energia despendida na iluminação da via (Häkkinen & Mäkelä, 1996).....	54
Tabela 21 – Encargos ambientais da iluminação do pavimento betuminoso ao longo de 50 anos (Häkkinen & Mäkelä, 1996) .....	54
Tabela 22 – Encargos ambientais do tráfego durante 50 anos (Häkkinen & Mäkelä, 1996) .....	55
Tabela 23 – Estratégia de manutenção (adaptado de Häkkinen & Mäkelä, 1996).....	56
Tabela 24 – Encargos ambientais da estratégia de manutenção (Häkkinen & Mäkelä, 1996).....	57
Tabela 25 – Cálculo do consumo de combustível durante os períodos de manutenção (Häkkinen & Mäkelä, 1996).....	58
Tabela 26 – Encargos ambientais do distúrbio de tráfego para a estratégia de manutenção escolhida (Häkkinen & Mäkelä, 1996).....	58
Tabela 27 – Classificação e caracterização (adaptado de Huang, Bird, & Heidrich, 2009) .....	65
Tabela 28 – Fatores de caracterização (Huang et al., 2009; Mazumder et al., 2016).....	66
Tabela 29 – Volume de material por camada .....	68
Tabela 30 – Quantidade de material por camada .....	69
Tabela 31 – Impacto total por categoria de impacto para a Fase 1 .....	69
Tabela 32 – Impacto por km da escavação de valas na estrada.....	72
Tabela 33 – Impacto por km da escavação da sub-base e da camada base .....	72
Tabela 34 – Impacto por km do carregamento de rocha .....	73
Tabela 35 – Impacto por km na construção da sub-base .....	74
Tabela 36 – Impacto por km na aplicação da camada de adesão .....	75
Tabela 37 – Impacto por km na pavimentação das camadas betuminosas.....	76

Tabela 38 – Impacto por km do recurso ao cilindro de compactação .....	77
Tabela 39 – Impacto por km na compactação .....	78
Tabela 40 – Impacto total por categoria de impacto para a Fase 2 .....	78
Tabela 41 – Impacto total por categoria de impacto para a Fase 3 .....	79
Tabela 42 – Impacto total por categoria de impacto para a Fase 4 .....	81



## SIMBOLOGIA

ACID	Acidificação
As	Arsénio
BD	Camada de desgaste
BG	Camada base granular
C	Carbono
Cd	Cádmio
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Etileno
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benzeno
CH <sub>4</sub>	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
COD	<i>Chemical Oxygen Demand</i>
VOCs	<i>Volatile organic compounds</i>
EUT	Eutrofização
GHG	<i>Greenhouse Gases</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
H	Hidrogénio
HC	Hidrocarbonetos
Hg	Mercúrio
HMA	Mistura betuminosa a quente
HHCR	<i>Human Health Criteria Air Pollutants</i>
IRI	<i>International Roughness Index</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
LCCA	<i>Life-Cycle Cost Analysis</i>
LCI	<i>Life Cycle Inventory Analysis</i>
LCIA	<i>Life Cycle Impact Assessment</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MACOPAV	Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional
MBD	Mistura betuminosa densa (em camada de regularização)
N	Nitrogénio

N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
NH <sub>3</sub>	Amoníaco
NMVOCs	<i>Non-methane volatile organic compounds</i>
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrogénio
O <sub>3</sub>	Ozono
OMS	Organização Mundial da Saúde
P	Fósforo
PAH	<i>Polycyclic Aromatic Hydrocarbons</i>
PAN	Nitrato de peroxiacetila
Pb	Chumbo
PM	Material particulado
PM <sub>10</sub>	Material particulado com diâmetro igual ou inferior a 10 µm
PO <sub>4</sub>	Fosfato
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
SbG	Sub-base granular
SMA	<i>Stone Mastic Asphalt</i>
SMOG	<i>Smog</i>
SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre
UHI	<i>Urban Heat Island</i>
UV	Radiação ultravioleta
(TMDA) <sub>p</sub>	Tráfego médio diário

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Enquadramento temático

*“A rede rodoviária constitui sem dúvida a infraestrutura de transportes mais importante para o desenvolvimento global de qualquer país.”* (Branco, Pereira, & Picado-Santos, 2011) A facilidade de utilização para o movimento de pessoas e bens entre locais distanciados é a principal razão da importância da mesma. Apesar de no passado ser a vertente económica e de durabilidade de uma determinada solução ou produto, o critério que prevalecia, assegurando sempre a capacidade estrutural e a segurança, atualmente as questões ambientais desempenham um papel importante de ponderação na tomada de decisão, tornando-se oportuna a avaliação dos impactos a longo prazo a nível económico, social e ambiental.

A atividade da construção, incluindo a construção de infraestruturas rodoviárias, provoca um impacto significativo no meio ambiente. Segundo Araújo, Oliveira, & Silva (2014), inicialmente, o compromisso ambiental prendia-se na resolução dos fenómenos visíveis decorrentes da atividade humana, no entanto com o decorrer do tempo fatores que se traduzem em impactos a longo prazo, como o consumo de energia e a emissão de gases de efeito de estufa (GHG – *greenhouse gases*), começaram a ganhar relevo. Os impactos do meio ambiente estendem-se, portanto, muito além da extração, produção e manuseamento de materiais.

Devido aos inúmeros elementos e indústrias direta e indiretamente associadas ao setor da construção, este passou a ser um setor chave para a implementação de estratégias de mitigação no combate ao aquecimento global. Segundo Araújo, Oliveira, & Silva (2014), os impactos diretos inerentes à atividade da construção provêm do consumo de energia e recursos naturais e da emissão de gases de efeito de estufa para a atmosfera. A perceção de que os recursos naturais são limitados e não renováveis levou à procura de soluções para diminuir a dependência da sua utilização. *“No entanto, os impactos no meio ambiente prolongam-se também durante a fase de utilização, aumentando nos períodos de manutenção, de reconstrução e de demolição.”* (Araújo et al., 2014) Para a obtenção, processamento, transporte, fabrico e colocação de grandes quantidades de materiais torna-se necessário utilizar quantidades consideráveis de energia que por sua vez geram gases de efeito de estufa. Quantidades de energia completamente diferentes são consumidas consoante a técnica de construção, reabilitação e manutenção escolhida. Os impactos

indiretos provêm da necessidade do consumo de eletricidade e combustível, prendendo-se com a produção destes recursos. Por exemplo, um equipamento gera impactos diretos através da combustão de combustível, mas também indiretos, nomeadamente a produção de combustível em refinarias e o fabrico de equipamento, ou seja, atividades que não se prendem com as fases de obra (Santero, Masanet, & Horvath, 2011a). Torna-se, portanto, pertinente avaliar todos os impactos diretos e indiretos das diferentes fases.

Nesse sentido, a avaliação do ciclo de vida (LCA – *Life Cycle Assessment*) está a ser aceite e aplicada pela indústria rodoviária, para avaliar e comparar os impactos ambientais decorrentes de projetos de pavimentos. No entanto, uma quantificação minuciosa dos impactos ambientais dos pavimentos requer informações de diferentes fontes de acordo com as diferentes fases do ciclo de vida. Essas informações nem sempre estão disponíveis, o que leva a que os estudos sejam sujeitos a hipóteses e simplificações, por sua vez levando a incertezas nas avaliações (Noshadravan, Wildnauer, Gregory, & Kirchain, 2013).

Resumindo, a planificação do cenário é uma metodologia útil para a implementação de estratégias que visem reduzir as emissões de GHG permitindo abordar a incerteza e ampliar as opções de escolha a serem tomadas pelos responsáveis, devendo ser aplicada na fase de projeto, onde as características técnicas e os métodos de construção são definidos (Fernández-Sánchez, Berzosa, Barandica, Cornejo, & Serrano, 2015).

## **1.2. Objetivos e metodologia**

Como uma parte crucial do sistema de transporte, a rede rodoviária oferece mobilidade, que é vital para a economia. No entanto, o seu contributo é significativo para a pegada ambiental durante a construção, operação e manutenção. Neste sentido, uma avaliação ambiental de impactos torna-se indispensável para a análise do consumo de energia e recursos e de emissões de CO<sub>2</sub>.

A avaliação do ciclo de vida está a ser aplicada no setor rodoviário para quantificar e agrupar todos os impactos ambientais da vida útil do pavimento. A LCA é uma metodologia intensiva de recolha de dados que requer a entrada de parâmetros e modelos de uma variedade de campos científicos. Deste modo, considerando a importância de LCA, este estudo pretende obter um modelo de análise de ciclo de vida que considere todas as fases do ciclo de vida do pavimento, de modo a avaliar o seu contributo para o

impacto ambiental e por sua vez guiar os responsáveis na tomada de uma decisão consciente.

### **1.3. Organização dos conteúdos**

O presente trabalho divide-se em quatro capítulos. O primeiro, introdução, encontra-se dividido em enquadramento temático, onde se resume o tema em estudo e a importância do mesmo, objetivos e metodologia, onde se apresenta o que se pretende desenvolver com a elaboração deste estudo, e o atual capítulo, organização dos conteúdos.

O segundo capítulo, estado da arte, apresenta as temáticas que serão abordadas ao longo deste estudo detalhando as fases que compõem o ciclo de vida do pavimento e apresentando o procedimento de avaliação do ciclo de vida dos pavimentos rodoviários.

No terceiro capítulo, desenvolve-se um caso de estudo LCA, onde se discriminam os elementos obrigatórios de um estudo LCA, nomeadamente, definição do objetivo e âmbito do estudo, inventário do ciclo de vida (LCI) e avaliação de impacto (LCIA).

Nesse capítulo, no subtópico LCI detalham-se os compostos inventariados para este estudo e apresenta-se a compilação de todos os dados necessários à elaboração deste estudo.

Na avaliação de impacto procede-se à seleção das categorias de impacto, à classificação e à caracterização das mesmas para as fases de ciclo de vida, extração de materiais e produção de misturas, construção, utilização e manutenção.

No último capítulo apresenta-se as conclusões e considerações finais, e os trabalhos a desenvolver no futuro.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. Ciclo de vida dos pavimentos rodoviários

A pegada ambiental de um pavimento é avaliada pela agregação dos vários impactos ao longo do seu ciclo de vida. Com o intuito de melhor compreender e caracterizar o ciclo de vida de um pavimento este encontra-se dividido em cinco fases, como apresentado na Figura 1, (1) extração de matérias-primas e produção de misturas, (2) construção, (3) utilização, (4) manutenção e reabilitação, e finalmente, (5) fim de vida. Cada fase é composta por vários componentes que reproduzem uma interação única entre o pavimento e o meio ambiente (Santero et al., 2011a). Esses componentes representam os impactos diretos produzidos pelo pavimento sobre o meio ambiente.

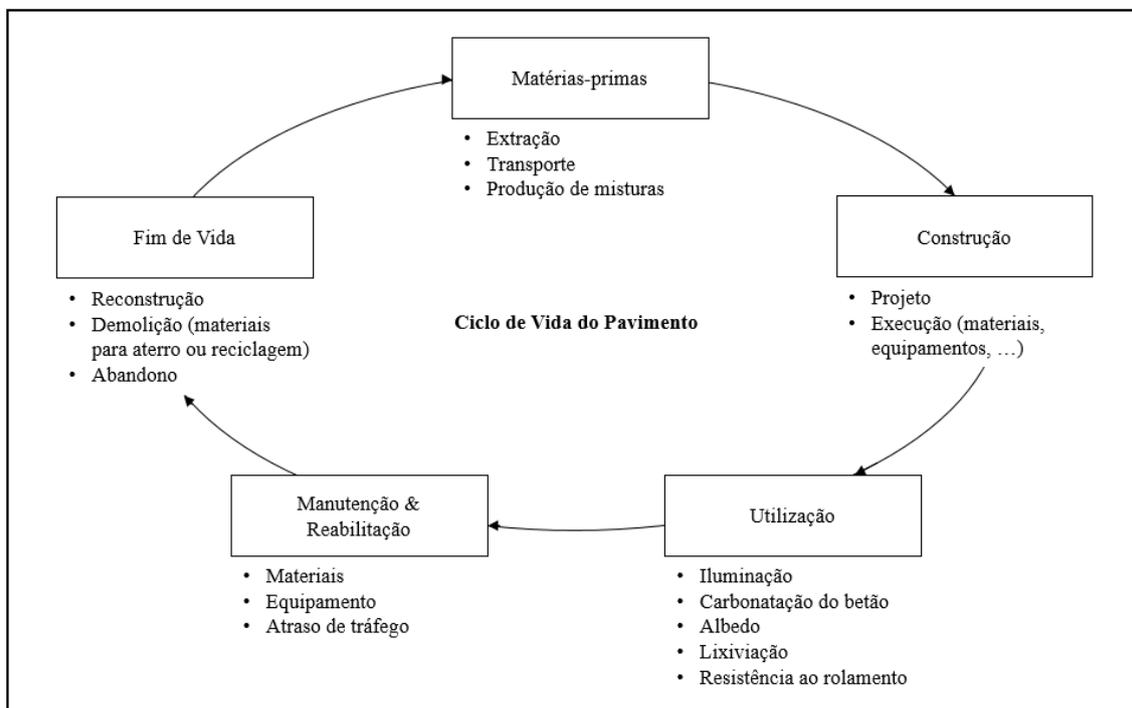


Figura 1 – Ciclo de Vida do Pavimento

#### 2.1.1. Extração de matérias-primas e produção de misturas

Nesta fase todas as entradas e saídas do sistema são consideradas, nomeadamente extração e processamento de agregados, produção de aglutinantes (cimento, betume ou emulsão betuminosa), produção de misturas (betuminosas ou hidráulicas), transporte e equipamento. O transporte de materiais e misturas engloba o transporte desde o local de extração até à unidade de produção e o transporte dentro das instalações de produção. É

relevante também considerar o equipamento utilizado e as atividades inerentes ao carregamento dos meios de transporte (Araújo *et al.*, 2014).

### 2.1.2. Construção

Antes de iniciar concretamente a fase de construção, num tópico prévio é necessário estipular as características do pavimento referentes ao projeto do mesmo, que dependem do tráfego requerido. Na fase de construção são realizadas todas as atividades inerentes ao processo construtivo. Aqui são contempladas as operações de terraplenagem, o reforço de fundação, a drenagem interna, a aplicação de camadas de pavimento, tendo em conta as atividades específicas de cada tipo de pavimento, Figuras 2 e 3 e todo o equipamento utilizado.

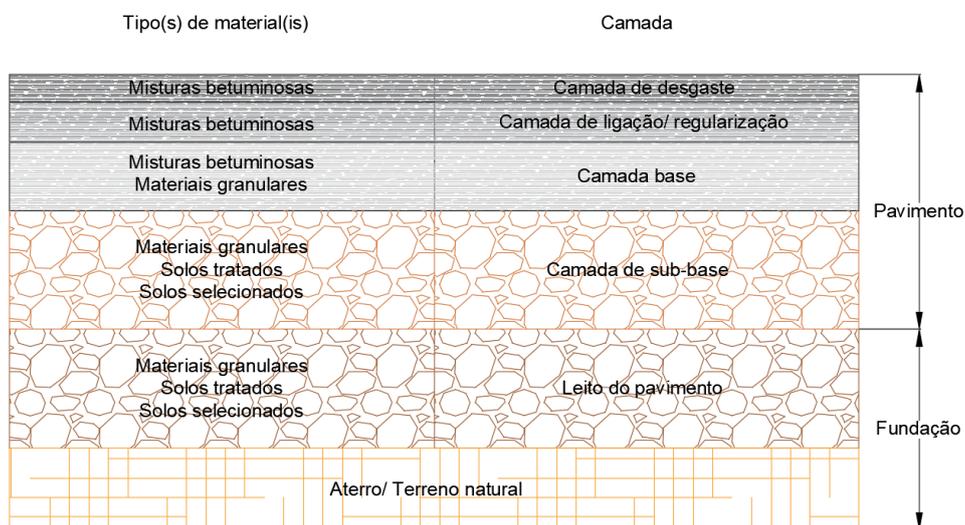


Figura 2 – Estrutura de um pavimento flexível (adaptado de Antunes et al, 2006)

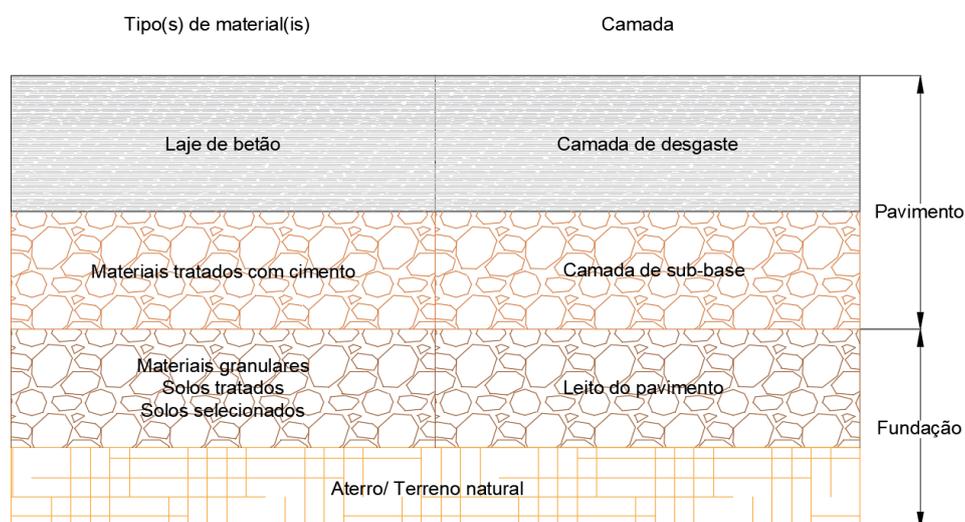


Figura 3 – Estrutura de um pavimento rígido (adaptado de Antunes et al, 2006)

As Tabela 1 e Tabela 2 resumem, a título de exemplo, o total de consumo de energia e de emissões de gases de efeito de estufa (GHG) para matérias-primas, fabrico, transporte e colocação de vários produtos de construção de pavimentos. É de realçar que os pavimentos de betão apresentam um maior consumo de energia relativamente aos betuminosos e, que os processos que utilizam agregados não aquecidos e aglutinantes aplicados a frio utilizam menor quantidade de energia por tonelada (Chehovits & Galehouse, 2010).

Tabela 1 – Uso total de energia por produto (Chappat &amp; Bilal, 2003)

Produto	Energia Consumida (MJ/t)					
	Ligantes	Agregados	Fabrico	Transporte	Colocação	Total
<b>Mistura betuminosa (densa)</b>	279	38	275	79	9	680
<b>Mistura betuminosa alto modulo</b>	284	38	289	79	9	699
<b>Mistura betuminosa temperada</b>	294	38	234	80	9	654
<b>Mistura betuminosa a frio</b>	314	36	14	86	6	457
<b>Betão hidráulico (sem armadura e barras de transferência)</b>	598	40	14	84	2,2	738
<b>Betão hidráulico com armadura continua</b>	1100	29	14	81	2,2	1226
<b>Agregado britado</b>	0	40	-	68	6	113
<b>Solo tratado com cimento ou cal</b>	63	0	-	7	12	81
<b>Mistura betuminosa com incorporação de pavimento betuminoso reciclado (10%RAP)</b>	250	35	275	73	9	642

Tabela 2 – Emissões totais de GHG por produto (Chappat &amp; Bilal, 2003)

Produto	Emissões de gases de efeito de estufa (GHG) (kg/t)					
	Ligantes	Agregados	Fabrico	Transporte	Colocação	Total
<b>Mistura betuminosa (densa)</b>	16	9,4	22	5,3	0,6	54
<b>Mistura betuminosa alto modulo</b>	17	9,4	23,1	5	0,6	55
<b>Mistura betuminosa temperada</b>	17	9,4	20,5	5,3	0,6	53
<b>Mistura betuminosa a frio</b>	20	9,1	1	5,7	0,4	36
<b>Betão hidráulico (sem armadura e barras de transferência)</b>	118	9,6	1	5,6	0,2	134
<b>Betão hidráulico com armadura contínua</b>	188	5,1	1,0	5,4	0,2	200
<b>Agregado britado</b>	0	9,6	-	4,5	0,4	15
<b>Solo tratado com cimento ou cal</b>	12	-	-	0,5	1,1	14
<b>Mistura betuminosa com incorporação de pavimento betuminoso reciclado (10%RAP)</b>	15	8,6	22	4,9	0,6	51

### 2.1.3. Utilização

Do ponto de vista temporal, a fase de utilização é a fase que ocupa um maior período do ciclo de vida de um pavimento. Os pavimentos levam semanas para construir e permanecem em serviço durante décadas.

Na fase de utilização é pertinente a contemplação de fatores como a energia despendida na iluminação da via, a carbonatação do betão no caso de pavimentos rígidos, o albedo (coeficiente de reflexão), o processo de lixiviação e a resistência ao rolamento.

### 2.1.3.1. Iluminação da via

A iluminação elétrica é relevante no ciclo de vida de um pavimento uma vez que, o próprio pavimento afeta a exigência de energia necessária para iluminar adequadamente a via. A idade, o tipo de pavimento (rígido, semi-rígido ou flexível) e a escolha de agregados influenciam a refletividade da estrada, influenciando a quantidade de iluminação necessária para uma iluminação apropriada. A classificação funcional da própria via também afeta os requisitos de iluminação.

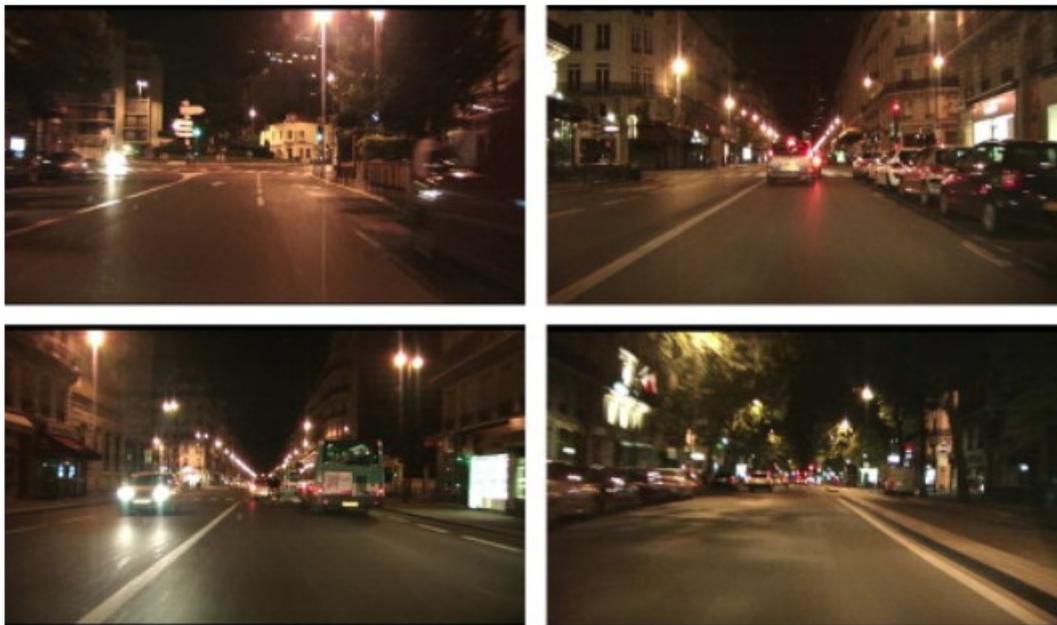


Figura 4 – Exemplos da relevância da iluminação noturna na detecção da envolvente (Mayeur, Brémond, & Christian Bastien, 2010)

A medida da intensidade de uma luz refletida numa dada direção é chamada de luminância. Maiores valores de luminância estão associados a superfícies mais brilhantes. Segundo Adrian & Jobanputra (2005), a luminância média de um pavimento de betão é cerca e 1,77 vezes maior que a de um pavimento betuminoso. Logo, a iluminação requerida para cada tipo de pavimento é diferente para garantir as mesmas condições visuais. Através do estudo realizado por Adrian & Jobanputra (2005), os autores concluíram que no início de vida, os pavimentos flexíveis utilizam mais 57% de energia elétrica na iluminação que pavimentos de betão para alcançar a iluminação apropriada. No entanto, à medida que os pavimentos vão envelhecendo, a diferença de gasto de energia na iluminação tende a esbater-se, uma vez que os pavimentos betuminosos

tendem a clarear enquanto que os de betão tendem a escurecer (Santero, Masanet, & Horvath, 2011b).

Häkkinen & Mäkelä (1996) calcularam que um quilómetro de pavimento betuminoso requer 2,6GJ de eletricidade a mais que um de betão durante um período de análise de 50 anos. No entanto, atualmente, com as novas tecnologias de iluminação mais eficientes (LEDs) o impacto que advém da iluminação é menor. Assim sendo, num estudo de ciclo de vida é pertinente explicar o tipo de tecnologia de iluminação utilizada, para que os resultados sejam interpretados num contexto adequado, e ter em conta que estas tendem a tornar-se mais eficientes ao longo do tempo.

### **2.1.3.2. Carbonatação do betão**

A carbonatação do betão em pavimentos rígidos corresponde à captura de carbono pelo betão. É um processo lento, com a taxa de absorção de CO<sub>2</sub> dependente da porosidade do betão, do teor de cimento, da humidade relativa e da temperatura do ambiente (Santero et al., 2011b). É um processo que pode levar anos a concluir. Durante o período inicial da vida útil, as taxas de carbonatação sugerem que apenas os primeiros centímetros de um pavimento “*in situ*” serão afetados.

### **2.1.3.3. Albedo**

Quando a radiação proveniente do sol atinge um pavimento, esta pode ser absorvida por este ou ser refletida como radiação a longa distância para a atmosfera. A quantidade de energia refletida designa-se albedo, que pode variar de 0 (absorção total) a 1 (total reflexão). Os valores expectáveis para pavimentos flexíveis são entre 0,05 e 0,2, enquanto que para pavimentos rígidos são 0,25 e 0,4. No entanto, a idade do pavimento também influencia os valores de albedo. Com a idade os pavimentos flexíveis tendem a clarear e, conseqüentemente, o albedo a aumentar e os pavimentos rígidos a escurecer provocando uma diminuição do albedo.

#### **2.1.3.3.1. Ilha de calor urbano (UHI – *Urban Heat Island*)**

Uma consequência da cobertura de estradas com superfícies escuras de pavimento betuminoso é o aumento da temperatura na cidade pela radiação solar. Uma superfície escura absorve a luz e, portanto, fica mais quente. Assim, os pavimentos aquecem o ar e ajudam a criar a "ilha de calor urbano". Tratando-se de um efeito indireto, compreender

esses efeitos e incorporá-los na contabilização de energia e qualidade do ar é essencial dado que, este aumento de temperatura traduz-se num aumento de equipamentos de refrigeração, o que por sua vez aumenta a poluição fotoquímica (H. Akbari, Pomerantz, & Taha, 2001). Logo, a diminuição da temperatura tem dois efeitos diretos: a redução do recurso à eletricidade para o ar condicionado e a diminuição da produção de poluição atmosférica (ozono). Por outro lado, permite aumentar a expectativa de vida dos pavimentos e melhorar a visibilidade. Segundo Akbari *et al.* (2001), a aplicação de medidas de mitigação de UHI, como a implementação de árvores em espaço urbano, poder-se-á traduzir numa diminuição significativa de temperatura.

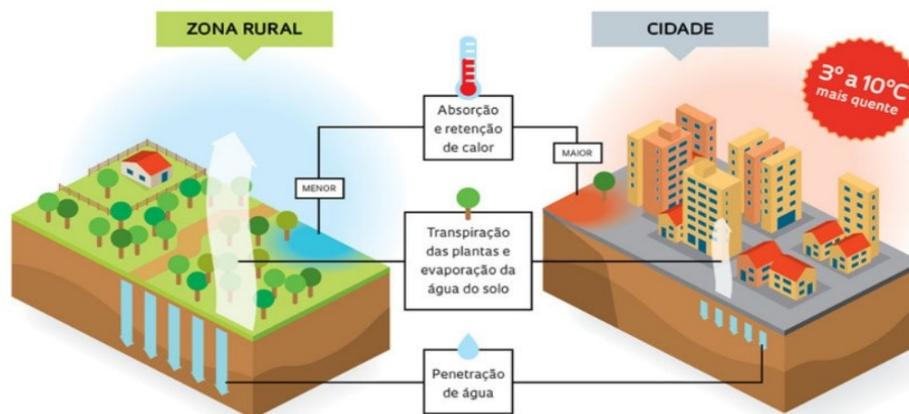


Figura 5 – Causas de formação de ilhas de calor urbanas (Pivetta, 2012)

#### 2.1.3.3.2. *Radiative forcing*

O albedo contribui, também, diretamente para a diminuição da temperatura global, uma vez que, permite a reflexão de uma parte da radiação solar recebida de novo para o espaço (*radiative forcing*), ajustando assim o balanço energético global (Santero, Masanet, & Horvath, 2011b). Segundo Akbari *et al.* (2009) estima-se que por cada aumento de 0,01 no albedo da superfície sejam emitidos 2,55 kg de CO<sub>2</sub> por metro quadrado de superfície urbana. O que demonstra o potencial da “*radiative forcing*” e sua importância no ciclo de vida do pavimento.

#### **2.1.3.4. Lixiviação**

A aplicação principal do betume asfáltico é na pavimentação de vias, mais precisamente nas camadas de revestimento da superfície. Decorrente do contacto do pavimento com água pode ocorrer o processo de lixiviação de alguns materiais de pavimentação que contêm substâncias que representam uma ameaça para a água potável e ecossistemas aquosos durante o ciclo de vida do pavimento. Muitas dessas substâncias são potencialmente prejudiciais para o homem ou para o ambiente, como tal, em vários países foram definidos limites nas concentrações dessas substâncias em águas superficiais e/ou água potável. Brandt & De Groot (2001) identificaram que uma grande parte da contaminação por hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH – *polycyclic aromatic hydrocarbons*) é atribuída à dispersão de partículas de pavimento betuminoso desgastadas. No entanto, também concluíram que a concentração de PAH provocada pelos materiais de pavimentação encontra-se geralmente dentro dos limites estipulados. Assim sendo, atribui-se a principal origem da presença de contaminantes encontrados no escoamento de águas à atividade dos veículos.

Embora não seja conclusivo, uma possível exceção é o risco de lixiviação em pavimentos contendo materiais reciclados (Santero et al., 2011b). Por exemplo, segundo Legret, Odie, Demare, & Jullien (2005) o pavimento betuminoso reciclado (RAP) promove a lixiviação de uma maior concentração de PAH relativamente a um pavimento com agregados virgens, dada a sua sensibilidade à exposição aos gases libertados pelo veículo, a óleos lubrificantes, a combustível e a partículas de pneu durante a sua vida inicial.

#### **2.1.3.5. Resistência ao rolamento**

A resistência ao rolamento descreve a perda de energia do veículo associada à interação pavimento-veículo. Apesar de grande parte da resistência ao rolamento provir das características dos pneus e do ambiente onde está inserida a via, as características do pavimento, estrutura e rugosidade, também influenciam o deslocamento do veículo. Uma diminuição da resistência ao rolamento resulta numa redução proporcional de combustível gasto, uma vez que será requerida uma menor força ao motor para proporcionar o deslocamento do veículo. Deste modo, um projeto de pavimento cuidadosamente elaborado traduzir-se-á na maximização da economia de combustível do veículo, diminuindo o consumo de energia, as emissões de carbono e outros impactos ambientais.

O impacto da resistência ao rolamento depende dos níveis de tráfego. O contributo da resistência ao rolamento para o impacto ambiental é maior para estradas com grande volume de tráfego.

#### **2.1.3.5.1. Estrutura do pavimento**

Uma das principais fontes de perda de combustível provém da deflexão do pavimento, ou seja, da sua propriedade viscoelástica. Esta conclusão, provém do conhecimento de que os pavimentos flexíveis deformam sob a ação dos veículos, absorvendo a energia que de outra forma seria utilizada para acelerar o veículo. No caso dos pavimentos rígidos, uma vez que estes não deformam, o consumo de combustível será comparativamente menor (Araújo, Oliveira, & Silva, 2014). Tais diferenças são essencialmente mensuráveis para veículos pesados que viagem a velocidades reduzidas.

É de realçar que, a influência da estrutura do pavimento sobre a resistência ao rolamento engloba toda a estrutura, não apenas o tipo de material presente na camada superficial. As propriedades dos materiais (rigidez) e as espessuras das restantes camadas influenciam a resposta do pavimento à solicitação de uma determinada carga (Santero et al., 2011b).

#### **2.1.3.5.2. Regularidade/ rugosidade do pavimento**

No respeitante à rugosidade, é difícil isolar o efeito da rugosidade no consumo de combustível, uma vez que, a resistência ao rolamento é apenas uma de quatro forças que fazem parte do equilíbrio global de forças do veículo. As restantes forças que influenciam o movimento do veículo são: a força de inércia, a força gravítica e a resistência ao ar. Outro inconveniente na análise da rugosidade é que esta representa apenas uma fração da resistência ao rolamento, que também é influenciada pelas propriedades da estrutura do pavimento e dos pneus, Figura 6. Em cada rotação, a zona do pneu que trabalha e entra em contacto com o piso, abate, deforma-se e aquece, consumindo energia em forma de calor. Este fenómeno chama-se histerese e é a origem de 90% da "resistência ao rolamento" dos pneus. Como tal, é difícil isolar o impacto da rugosidade e quantificar o seu efeito no consumo de combustível.

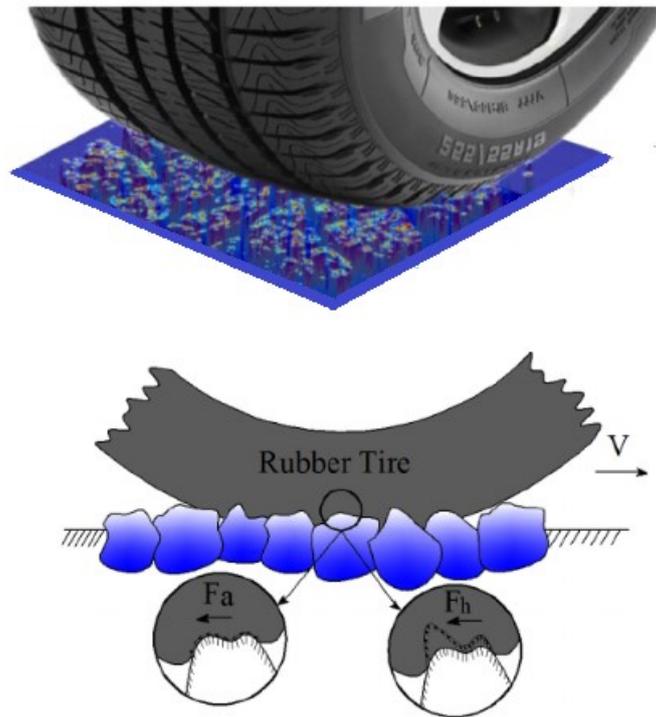


Figura 6 – Composição da fricção de superfície: força de atrito e de histerese (Chen, Zhang, Yu, & Wang, 2017)

A regularidade do pavimento é caracterizada pelo Índice Internacional de Regularidade (IRI – *International Roughness Index*), que determina e afere a qualidade (níveis de conforto e de segurança) dos pavimentos através da observação das irregularidades presentes na superfície do pavimento.

Segundo Santero, Masanet, & Horvath (2011) ao longo do ciclo de vida, um pavimento típico pode ter um IRI a variar de menos 1m/km a mais de 4m/km, levando à hipótese que a regularidade tem um efeito significativo no consumo de combustível. Assim sendo, as secções de pavimento que forem sujeitas a estratégias de manutenção preventiva ao longo do seu ciclo de vida permitirão a permanência de valores de IRI em níveis mínimos, levando a otimizar a economia de combustível.

#### 2.1.4. Manutenção

Tal como a construção, a manutenção e a reabilitação de pavimentos rodoviários exige a obtenção, processamento, transporte, fabrico e colocação de grandes quantidades de materiais, que por sua vez implicam um gasto de energia e geram gases de efeito de estufa. Os métodos variam desde permitir que o pavimento se deteriore, para depois se proceder

à sua reconstrução, até à inclusão de tratamentos de preservação no ciclo de vida do pavimento para minimizar os efeitos do envelhecimento e aumentar o tempo de vida útil.

Consoante a técnica de preservação ou reabilitação diferentes quantidades de energia são consumidas e diferentes extensões de vida útil são alcançadas (Chehovits & Galehouse, 2010).

O uso de energia e as emissões de gases por tonelada de produto fornecem uma comparação relativa. A estrutura do pavimento e o tipo de trabalho, juntamente com as quantidades reais dos materiais, devem ser analisados.

#### **2.1.4.1. Atraso de tráfego**

O atraso de tráfego ocorre quando filas e constantes desacelerações se desenvolvem em consequência de os pavimentos estarem em manutenção ou reconstrução. Os impactos associados ao atraso de tráfego dependem dos projetos e das características do local. No caso de estradas de baixo tráfego, o atraso de tráfego será de importância mínima em relação a outros componentes do ciclo de vida. No entanto, para estradas com grande volume de tráfego, os impactos que advêm do consumo extra de combustível e as consequentes emissões dos veículos em marcha lenta tomam um valor preponderante na análise do ciclo de vida.

O custo do atraso é medido pelo número de carros atrasados, a quantidade de tempo gasto nas filas e o valor do tempo (Santero et al., 2011b). A principal dificuldade em calcular os impactos do atraso de tráfego reside na precisão da previsão dos níveis futuros de tráfego. Para atividades de manutenção a curto prazo, a combinação do nível de tráfego com a taxa de crescimento histórico pode ser suficiente, mas consoante o tempo de vida do pavimento for decorrendo é pertinente avaliar, entre outros aspetos, as mudanças de rotas, as flutuações de procura e as práticas de construção. Assim sendo, para cada projeto de LCA deve ser analisado o atraso de tráfego para determinar a sua relevância.

#### **2.1.5. Fim de vida**

Os impactos que advêm do fim de vida de um pavimento dependem do tipo e constituição do pavimento e do destino final que se pretende dar. Quando chega ao fim a vida útil do pavimento, ou seja, o fim para o qual foi projetado, dependendo da estratégia adotada pela administração de estradas, o pavimento pode encontrar um dos seguintes destinos:

recuperação através da reconstrução; demolição com a remoção de materiais para reciclagem; demolição com depósito de materiais em aterro ou simplesmente; abandono da estrada. Em que, o processo de reconstrução terá um impacto ambiental semelhante ao de construção. Deve-se, portanto, ter em consideração que cada opção de fim de vida requer uma abordagem única para quantificar o impacto ambiental.

#### **2.1.5.1. Deposição de materiais em aterro**

O valor económico dos materiais provenientes da remoção de um pavimento em final de vida torna pouco apelativa a sua deposição em aterro. À medida que os recursos naturais se tornam escassos, o preço dos materiais virgens tende a aumentar. Como alternativa, o recurso aos materiais reciclados tem vindo a ganhar terreno.

Por essas razões, o recurso a aterro como cenário de fim de vida de um ciclo vida de pavimento é geralmente uma escolha inadequada, a menos que estejamos perante um pavimento em que na sua constituição predominem materiais que não possam ser reciclados. Nestes casos, é necessário proceder ao cálculo do impacto ambiental proveniente da deposição dos mesmos em aterro. Independentemente do destino final, devem ser sempre contemplados os impactos decorrentes do processo de demolição e do transporte de materiais.

#### **2.1.5.2. Utilização de materiais para reciclagem**

A reciclagem surge como um processo de reaproveitamento de materiais provenientes de pavimentos degradados, através da sua incorporação em novas camadas de pavimentos. O recurso a esta técnica apresenta vantagens ambientais na diminuição/eliminação de zonas de vazadoiro e na redução da utilização de novos materiais, o que se traduz num menor consumo de energia e em vantagens económicas. O incremento nos custos das matérias-primas, dos equipamentos, dos combustíveis e dos transportes leva a que a reciclagem dos materiais já presentes no pavimento seja naturalmente encorajada. Podem ainda obter-se vantagens técnicas, com as melhorias estruturais ou de regularidade do pavimento (mantendo a rasante) (Cunha, 2010).

#### **2.1.5.3. Abandono**

A última alternativa de fim de vida é considerar que os materiais dos pavimentos permanecem nas estruturas indefinidamente. Tal consideração não é descabida, uma vez

que muitos pavimentos permanecem “*in situ*”, parcial ou totalmente, após terminar a sua vida útil. O abandono completo de um pavimento representará um abandono completo da estrada, situação que é muito rara. Em alternativa, são construídos muitas vezes novos pavimentos para manter a funcionalidade da via, usando o pavimento existente e danificado como suporte subjacente. Nesta situação específica, torna-se difícil de calcular o impacto ambiental, uma vez que o pavimento antigo confere ainda alguma capacidade de suporte estrutural ao novo. Uma análise de fim de vida nesta situação deve abater nos impactos ambientais o contributo do pavimento antigo.

## **2.2. Avaliação do ciclo de vida dos pavimentos rodoviários (LCA)**

O objetivo do recurso à abordagem de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) é quantificar de forma abrangente as emissões e fluxos de energia de um produto durante o seu tempo de vida, permitindo medir e comparar os impactos ambientais dos produtos utilizados e processos executados. Quando combinado com a Análise de Custo de Ciclo de Vida (LCCA), a LCA permitirá aumentar a capacidade dos decisores de alcançar os objetivos económicos e ambientais mais favoráveis.

A Norma ISO14040: *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework* (ISO14040, 2006) divide o processo de Avaliação do Ciclo de Vida em 4 fases: definição do objetivo e âmbito, análise do inventário (LCI), avaliação de impacto (LCIA ) e interpretação. A Avaliação do Ciclo de Vida inicia-se com a definição do objetivo e âmbito do estudo. O detalhe e a amplitude da LCA variam de acordo com o objetivo de cada LCA específico. E o seu propósito inicial reside no desenvolvimento de um inventário (LCI), no qual todos os encargos ambientais significativos do tempo de vida do produto ou processo serão quantificados e compilados (Huang, Bird, & Heidrich, 2009). Posteriormente, segue-se a avaliação de impacto que calcula e apresenta o resultado com base num sistema predefinido que permitirá comparação ou análise posterior. De modo a entender melhor a sua importância ambiental, a LCIA atribui os resultados da análise do inventário às categorias de impacto. Para cada categoria de impacto, um indicador de categoria de impacto do ciclo de vida é selecionado e o resultado do indicador de categoria é calculado (ISO14040, 2006). Por último, procede-se à interpretação dos resultados, nesta os resultados de LCI ou de LCIA, ou ambos, são resumidos e discutidos de modo a produzirem-se recomendações para o auxílio da tomada de decisão de acordo com a definição do objetivo e âmbito.

### 2.2.1. Fases de um LCA

Como mencionado anteriormente, a Norma ISO14040 (ISO14040, 2006) compreende o estudo de LCA em quatro fases. A relação entre as fases está ilustrada na Figura 7.

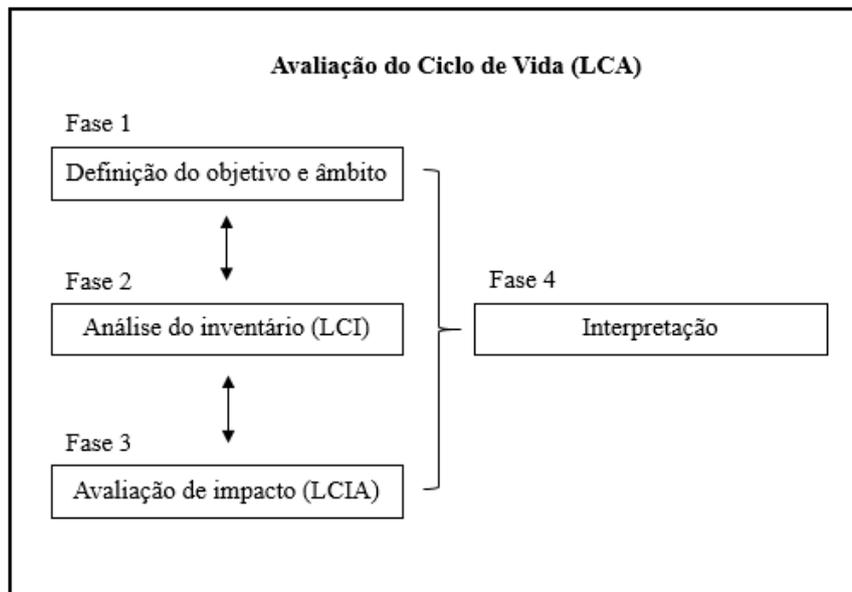


Figura 7 – Interação das fases de LCA [adaptado da Norma ISO14040 (ISO14040, 2006)]

No entanto, a Norma ISO14044: *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines* (ISO14044, 2006) destaca que o objetivo de um estudo LCA algumas vezes pode ser satisfeito apenas através da execução de uma análise de inventário e de uma interpretação final. A estes estudos simplificados designam-se estudos de inventário de ciclo de vida ou estudos LCI. Os estudos LCI são semelhantes aos estudos LCA, com a exceção de excluírem a fase de LCIA (fase 3). É de destacar que um estudo LCI não deve ser confundido com a fase LCI (fase 2) de um estudo LCA.

As fases da avaliação do ciclo de vida dos pavimentos rodoviários (LCA) são pormenorizadas nos tópicos que se seguem.

#### 2.2.1.1. Definição do objetivo e âmbito

O objetivo de um estudo LCA é auxiliar os decisores na seleção do projeto estrutural do pavimento que conduza a um impacto ambiental mínimo. Um estudo completo de LCA deve incluir as emissões provenientes de todas as fases do ciclo de vida de um pavimento, nomeadamente, extração de matérias-primas e produção de matérias-primas,

construção, manutenção, utilização e fim de vida. Nesta etapa, o âmbito deve estar suficientemente definido para garantir que a amplitude, profundidade e detalhes do estudo sejam compatíveis e suficientes para atender o objetivo declarado. No entanto, como a LCA é uma técnica iterativa, à medida que os dados e a informação são recolhidos, vários aspetos definidos no âmbito podem sofrer modificações para atingir o objetivo inicial do estudo.

#### **2.2.1.2. Análise do inventário (LCI)**

Segundo a Norma ISO14040 (ISO14040, 2006), a análise do inventário envolve procedimentos de colheita de dados e cálculo para quantificar as entradas e saídas do processo em análise. À medida que os dados forem obtidos e que se conheça melhor o processo em análise, novos requisitos ou limitações de dados podem requerer uma alteração nos processos de recolha de elementos para que o objetivo do estudo possa ser atingido. Assim sendo, a realização de uma análise de inventário é um processo iterativo. Cada conjunto de dados deve apresentar referenciada a fonte e a precisão dos mesmos. Para diminuir o risco de equívocos, como por exemplo dupla contagem, uma descrição de cada processo de unidade deve ser registada (ISO14044, 2006). Segundo a Norma ISO14044 (ISO14044, 2006), essas medidas devem incluir:

- O desenho de diagramas de fluxo de processos gerais que descrevem todos os processos de unidade a serem modelados e suas inter-relações;
- A descrição detalhada de cada processo unitário relativamente aos fatores que influenciam as entradas e os resultados;
- O desenvolvimento de uma lista que especifique as unidades usadas;
- A descrição dos dados e das técnicas de cálculo;
- O fornecimento de instruções para documentar claramente quaisquer casos especiais e ou irregularidades dos dados.

O Inventário do Ciclo de Vida (LCI) inclui diferentes subfases como a extração de matérias-primas, transporte, produção, consumo e deposição de resíduos.

### 2.2.1.3. Avaliação de impacto (LCIA)

Na fase de avaliação de impacto, os dados de inventário (LCI) devem ser modelados em impactos. Em geral, esse processo associa os dados de inventário a categorias específicas de impacto ambiental e indicadores de categoria. Questões como escolha, delimitação e avaliação de categorias de impacto podem introduzir subjetividade na fase LCIA. Portanto, a transparência é fundamental na avaliação de impacto para garantir que os pressupostos sejam claramente descritos e relatados.

Tendo por base a Norma ISO14040 (ISO14040, 2006), a avaliação de impacto consiste na elaboração das seguintes etapas obrigatórias: seleção, classificação e caracterização, Figura 8.

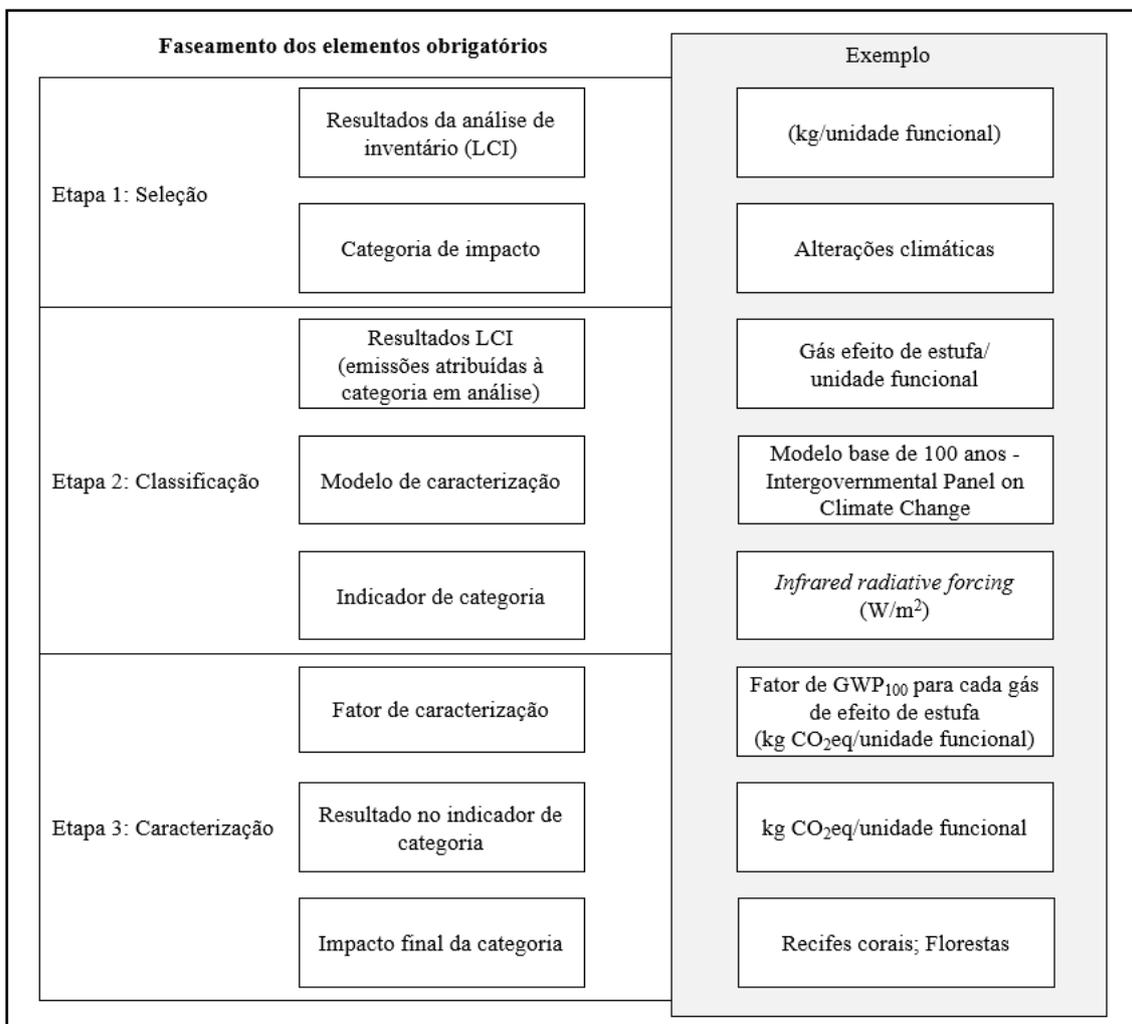


Figura 8 – Exemplo do faseamento dos elementos obrigatórios de LCIA [adaptado da Norma ISO14044 (ISO14044, 2006)]

Opcionalmente, poder-se-ão elaborar as etapas: normalização, agrupamento, ponderação e análise de qualidade de dados, que são pormenorizadas pela Norma e ISO14044 (ISO14044, 2006). Na Figura 9 apresentam-se as etapas que podem constar na LCIA.

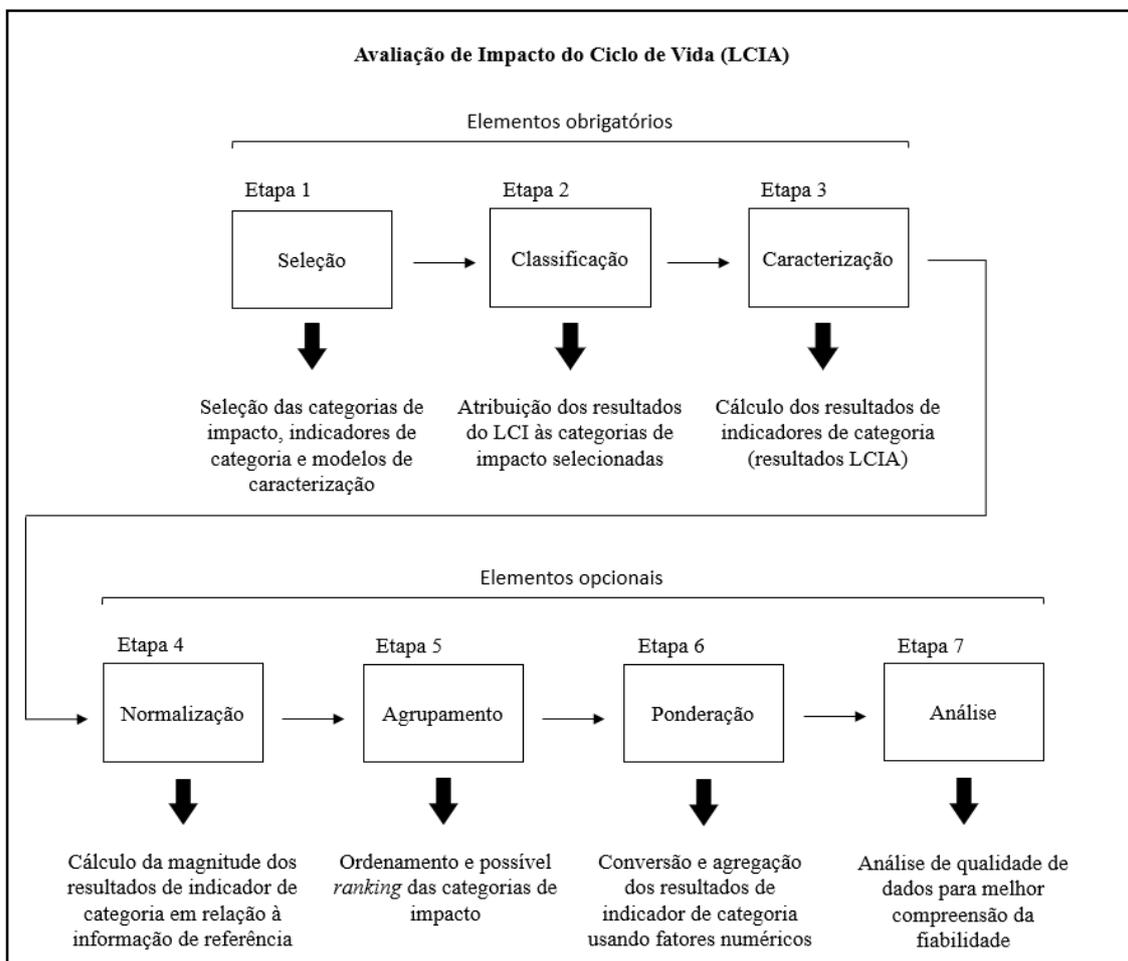


Figura 9 – Estrutura da LCIA [adaptado da Norma ISO14040 (ISO14040, 2006) & Norma ISO14044 (ISO14044, 2006) & Inti *et al.* (2016)]

#### a) Etapa 1: Seleção

A seleção de categorias de impacto deve refletir um conjunto abrangente de questões ambientais consistentes com o objetivo e âmbito do estudo LCA. Nesta etapa, o modelo de mecanismo e caracterização ambiental que relaciona os resultados LCI com o indicador de categoria é descrito. Conforme a seleção das categorias de impacto, dos indicadores de categoria e dos modelos de caracterização de um estudo LCA, todas as informações e fontes utilizadas devem ser devidamente referenciadas.

## b) Etapa 2: Classificação

Nesta etapa os resultados do inventário são atribuídos a categorias de impacto onde é relevante a sua contribuição. Por exemplo, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o metano (CH<sub>4</sub>), o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) entre outros indicadores de impacto, contribuem para a categoria de impacto Potencial de Aquecimento Global (GWP).

## c) Etapa 3: Caracterização

Na etapa caracterização o objetivo é converter cada indicador de impacto presente numa dada categoria de impacto numa escala equivalente, por exemplo, dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e). Os fatores necessários para transformar as emissões numa escala equivalente designam-se fatores de caracterização. A Tabela 3 mostra fatores de caracterização para algumas categorias de impacto, nomeadamente, Potencial de Aquecimento Global (GWP – *Global Warming Potential*), Eutrofização (EUT – *Eutrophication*), Gases Poluentes (SMOG – *Smog*), Acidificação (ACID – *Acidification*) e Critério de Saúde Humana Relativo a Poluentes Atmosféricos (HHCR – *Human Health Criteria Air Pollutants*). Os dados de inventário determinam as categorias de impacto que aparecerão no estudo.

Tabela 3 – Fatores de caraterização (Inti et al., 2016)

	GWP kg CO <sub>2</sub> -eq/kg	EUT kg N-eq/kg	SMOG Kg NO <sub>x</sub> -eq/kg	ACID kg H-eq/kg	HHCR kg milli- DALYS/kg
VOC	-	-	3.595	-	-
CO	-	-	0.055	-	0.0003
NO <sub>x</sub>	-	0.044	24.794	0.7	0.007
PM10	-	-	-	-	0.228
PM2.5	-	-	-	-	1
SO <sub>x</sub>	-	-	-	1	-
CH <sub>4</sub>	25	-	0.014	-	-
N <sub>2</sub> O	298	-	-	-	-
CO <sub>2</sub>	1	-	-	-	-
SO <sub>2</sub>	-	-	-	1	0.061

d) Etapa 4: Normalização

A quarta etapa, normalização, pretende associar os impactos caracterizados de um projeto a um conjunto de valores de referência reconhecível e facilmente compreensível pelos responsáveis pela tomada de decisão. Deste modo, a seleção de um sistema de referência deve estar em harmonia com o objetivo e âmbito anteriormente estipulados, uma vez que, diferentes sistemas de referência traduzir-se-ão em diferentes valores obtidos para a mesma categoria de impacto. Os resultados normalizados serão úteis para diferenciar as alternativas na mesma categoria de impacto, no entanto, não podem ser comparados os valores obtidos entre diferentes categorias de impacto. Considerando a subjetividade envolvida no sistema de referência, é pertinente o desenvolvimento de um sistema de referência específico do setor dos pavimentos. A este processo de análise através de um sistema de referência designa-se normalização externa.

A alternativa ao sistema de referência é a normalização interna, isto é, a comparação de um projeto com o outro. A principal vantagem da normalização interna é não haver necessidade de fatores de normalização. Esta análise também permite a normalização de dados que não estão bem definidos. No entanto, não consegue retratar o impacto real no ambiente.

Em resumo, a normalização externa ajuda na compreensão da magnitude dos resultados caracterizados e na diferenciação dos projetos e a normalização interna ajuda na comparação de projetos alternativos (soluções alternativas).

e) Etapa 5: Agrupamento

O agrupamento é a segunda etapa opcional e tem como objetivo a atribuição de categorias de impacto em um ou mais conjuntos tendo por base o estipulado no objetivo e âmbito, de modo a se proceder a um ordenamento de categorias de acordo com a sua relevância. A Norma ISO14044 (ISO14044, 2006) estabelece dois procedimentos possíveis: a classificação de categorias numa base nominal, por características como entradas e saídas ou por escalas regionais globais, ou a classificação de categorias de impacto em uma determinada hierarquia. O ranking será dependente das escolhas de relevância.

#### f) Etapa 6: Ponderação

A ponderação é o processo de conversão de resultados de indicador de diferentes categorias de impacto usando fatores numéricos com base em opções de valor (ISO14044, 2006). As etapas de ponderação são baseadas em escolhas, portanto diferentes entidades podem obter diferentes resultados com os mesmos resultados de indicador ou resultados de indicador normalizados. Torna-se pertinente, portanto, a realização de análises de sensibilidade

#### g) Etapa 7: Análise

Na última etapa, deve-se proceder a uma análise de qualidade de dados de modo a obter-se uma melhor compreensão da fiabilidade dos resultados de indicador. De acordo com a Norma ISO14044 (ISO14044, 2006), técnicas e informações adicionais podem ser requeridas para se melhor entender a relevância, a incerteza e a sensibilidade dos resultados de LCIA.

### **2.2.1.4. Interpretação**

Segundo indicado na Norma ISO14040 (ISO14040, 2006), a interpretação é a fase da LCA em que os valores da análise de inventário (LCI) e da avaliação de impacto (LCIA) são considerados em conjunto ou, no caso de estudos LCI, apenas os resultados da análise de inventário.

A fase de interpretação deve fornecer resultados consistentes com o objetivo e âmbito definidos e permite a conclusão da análise através da explicação das limitações e da apresentação de recomendações.

### **2.3. Considerações finais**

O modelo LCA para pavimentos rodoviários depende de uma variedade de parâmetros de entrada para definir as características do modelo, tais como, especificações de projeto de pavimento, fluxos de materiais e energia, impactos ambientais, entre outros. A precisão dos resultados de LCA depende da fiabilidade dos dados utilizados na caracterização das entradas para os modelos (Noshadravan, Wildnauer, Gregory, & Kirchain, 2013). Quando componentes individuais ou fases inteiras do ciclo de vida são omitidas no modelo de

avaliação do ciclo de vida (LCA), as conclusões obtidas correm o risco de serem irreais, uma vez que advêm de informações incompletas.

Como destacado na Figura 9, a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) sugere uma Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (LCIA) para a contabilização das emissões de todas as fases do ciclo de vida do pavimento. No entanto, os estudos atualmente elaborados concentram-se na obtenção de dados de diferentes fontes para a estimativa do inventário de emissões (LCI), descurando a importância da avaliação de impacto (LCIA). O descurar do passo de normalização na LCIA poderá traduzir-se numa escolha errada por parte dos responsáveis, uma vez que, a etapa de normalização permite que categorias de impacto agregadas ou inventários de emissões possam ser interpretados num contexto adequado. A omissão desta etapa pode traduzir-se na colocação de uma importância desnecessária em dados insignificantes.

Para melhorar o desempenho ambiental, é fundamental que o ciclo de vida seja avaliado usando uma abordagem abrangente que responda a todas as interações entre pavimentos e meio ambiente (Santero, Masanet, & Horvath, 2011b).

Por último, é de realçar que o objetivo da realização de LCA será infrutífero se os responsáveis pelo projeto escolherem um projeto inadequado (Inti, Sharma, & Tandon, 2016).

### **3. CASO DE ESTUDO**

#### **3.1. Definição do objetivo e âmbito**

O processo de construção de estradas difere de outros processos de construção na medida em que é notoriamente dependente de condicionantes externas, como por exemplo as condições climáticas aquando a execução da obra.

Em obra, as diferentes condições, traduzem-se em relevantes variações entre diferentes locais ao longo da mesma faixa de rodagem.

Um terreno mais ou menos montanhoso exigirá um cuidado acrescido no traçado da via tanto ao nível das condições de circulação, com primazia para um traçado o mais regular, cómodo e seguro, quanto ao nível dos movimentos de terra. Um traçado menos concordante com a topografia leva a um aumento da quantidade de transportes internos para a execução de terraplenagem da estrada.

Assim sendo, o presente estudo pretende fornecer informações do ponto de vista ambiental sobre a importância de vários fatores relacionados com as infraestruturas rodoviárias, sabendo que a composição técnica de uma estrada varia de acordo com as características do solo de fundação, do fluxo de tráfego estimado e do tempo de vida útil pretendido.

##### **3.1.1. Definição do objetivo**

Geralmente, o impacto ambiental causado pelos pavimentos rodoviários deve-se às contribuições cumulativas das fases de extração de matérias-primas, produção de misturas, construção rodoviária, transporte, uso, manutenção e fim de vida. Neste estudo pretende-se quantificar os encargos ambientais das várias fases pelo qual um pavimento flexível rodoviário atravessa. Para atingir esse objetivo, foi compilado um que quantifica a energia e as entradas relativas às fases de ciclo de vida, tais como, emissões durante a extração de agregados, produção de betume e produção de HMA relativamente à fase 1.

Para tornar os cálculos possíveis foi assumida uma composição simplificada de um pavimento HMA.

### **3.1.2. Âmbito**

Qualquer avaliação do ciclo de vida abrange etapas desde a produção de matérias primas até ao produto final consumido. Deste modo, para se proceder à análise de qualquer avaliação de ciclo de vida é indispensável o estabelecimento de limites que permitam “acelerar” o processo e por sua vez torná-lo viável a nível prático. Um exemplo de limite estabelecido é a omissão de emissões produzidas aquando a produção de maquinaria utilizada em obra, uma vez que estes veículos não serão exclusivos a apenas um projeto. Uma viatura apresenta o seu próprio ciclo de vida. No entanto, só o consumo de combustível desses equipamentos, durante a utilização em obra, construção e manutenção, é contemplado na análise de ciclo de vida do pavimento.

Além das limitações estabelecidas, aparecerão limitações que advêm da falta de dados.

Enquanto a necessidade de acessibilidade entre dois pontos permanecer, a estrada permanece indefinidamente ao longo do tempo, não apresentando um final definitivo. No entanto as constantes mudanças a que estará sujeita após o término do período de tempo inicial de vida útil para o qual foi estabelecida uma estrutura, sujeitará a via a mudanças mais ou menos significativas em termos físicos. Assim sendo, torna-se difícil limitar o fim de vida a estruturas rodoviárias.

### **3.1.3. Estrutura do pavimento**

Para que se possam comparar diferentes soluções de pavimento é necessário estabelecer uma unidade funcional em qualquer avaliação de ciclo de vida. No presente estudo o perfil tipo da via e o período de vida útil do pavimento são parâmetros pré-estabelecidos. A espessura das diferentes camadas e as distâncias médias de transporte são parâmetros variáveis.

A unidade funcional considerada é 1km de pavimento, numa escala de tempo de 50 anos. A secção transversal da estrada considerada é composta por uma única faixa de rodagem com duas vias de 3,75m de largura cada, uma em cada sentido, e 1m de berma pavimentada.

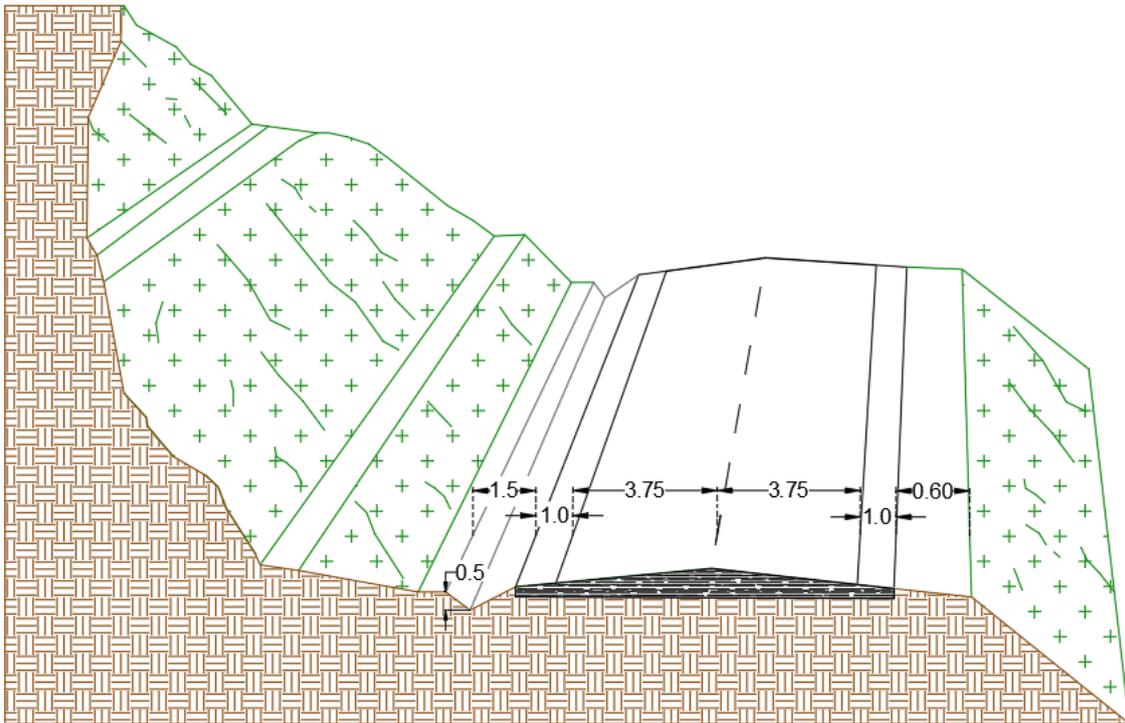


Figura 10 – Representação esquemática do quilômetro de estrada sujeito a análise

A estrutura de pavimento flexível adotada é composta por três camadas de misturas betuminosas: camada de desgaste, camada de regularização e camada base.

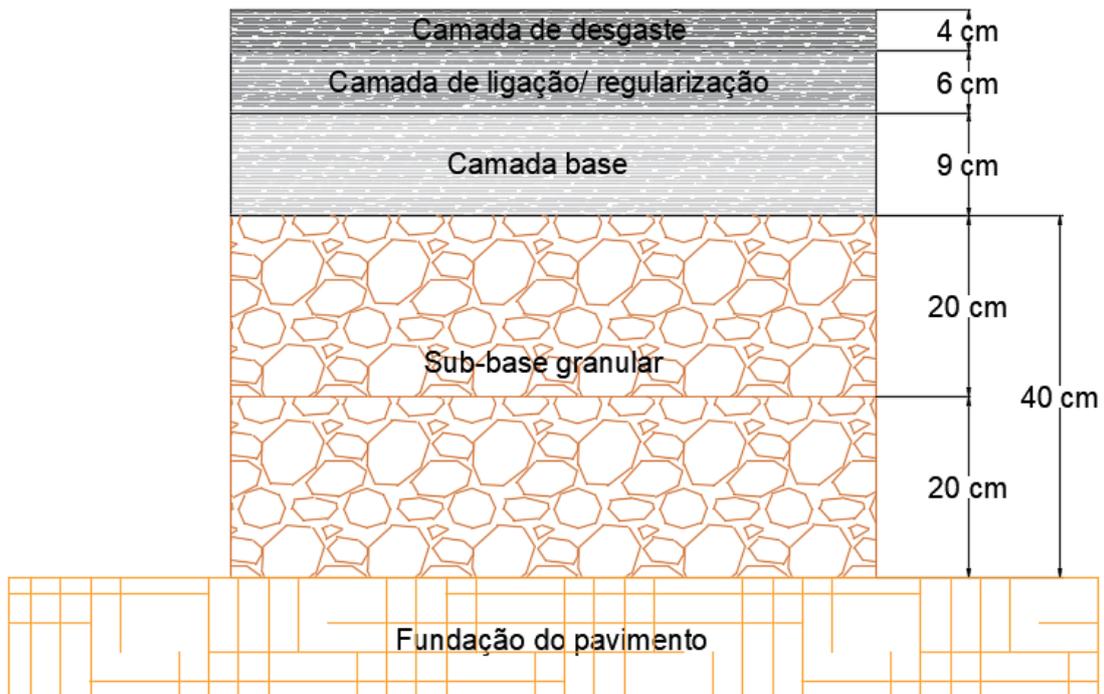


Figura 11 – Estrutura do pavimento adotada

Tendo como base o MACOPAV - Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional (1995), a estrutura que se considera no caso em estudo é a composta por betão betuminoso em camada de desgaste (BD), mistura betuminosa densa em camada de regularização (MBD) e material britado aplicado nas camadas base (BG) e sub-base (SbG). Assim sendo, existindo uma classe de plataforma F3 e uma classe de tráfego T4 (que se traduz num tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura na via mais solicitada,  $(TMDA)_p$  entre 300 e 500 veículos), a estrutura de pavimento adotada, admite, para o período de dimensionamento de 20 anos, um tráfego acumulado de eixos padrão de 80kN de  $2 \times 10^7$  e um número de pesados na via de projeto de  $5,4 \times 10^6$ .

### **3.2. Inventário do ciclo de vida (LCI)**

No inventário do ciclo de vida para se proceder a um modelo de cálculo exequível recorreu-se a parâmetros de processo que apresentam emissões, consumo de energia e/ou consumo de recursos expressos por unidades funcionais, como por exemplo, no caso do uso de energia por parte dos veículos de transporte, MJ/vkm. Estas unidades são escolhidas com base na aplicabilidade prática.

Para alcançar o objetivo do estudo, foi compilado um inventário do ciclo de vida (LCI) que quantifica a energia, as entradas de materiais e as emissões durante a extração de agregados, produção de betume, produção de HMA e pavimentação, utilização e manutenção da via.

Uma grande variedade de artigos publicados e bases de dados foram analisados para quantificar os dados de energia e emissões para cada processo e atividade definida como parte do sistema.

Os dados de inventário para as emissões durante a produção de agregados, betume e HMA foram coletados tanto do relatório de estudo piloto, Stripple (2001) como do estudo elaborado por Häkkinen & Mäkelä (1996). Os dados referentes à fase de construção foram retirados apenas do estudo de Stripple (2001) e os dados para as fases de uso e manutenção foram retirados do estudo de pesquisa elaborado por Häkkinen & Mäkelä (1996). O resultado da análise de inventário é um resumo de todas as entradas e saídas relacionadas à "unidade funcional". O resultado de cada categoria de impacto é o total de todos os dados de inventário individualmente caracterizados em cada categoria.

### 3.2.1. Principais poluentes atmosféricos

O desenvolvimento urbano e industrial e a elevada utilização de veículos motorizados têm contribuído em larga escala para a elevada concentração de poluentes atmosféricos causando sobrecarga nos ecossistemas e impactos negativos na saúde humana. Por conseguinte, o desenvolvimento de uma estratégia de redução da poluição atmosférica implica a identificação das fontes de poluição e a quantificação das suas emissões.



Figura 12 – Exemplos de ecossistemas terrestres e instalações experimentais criadas para investigar os efeitos da poluição do ar e alterações climáticas na Bacia do Mediterrâneo (Ochoa-Hueso et al., 2017)

Dependendo da sua formação, direta ou indireta, os poluentes atmosféricos podem ser classificados em poluentes primários ou poluentes secundários. Os chamados poluentes primários são os componentes emitidos diretamente pelas fontes para a atmosfera, como é o caso do monóxido de carbono (CO), óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>) e dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>). Por sua vez, poluentes secundários são os gases que resultam de reações químicas e físicas na atmosfera, como é o caso do ozono troposférico (O<sub>3</sub>) que resulta de reações fotoquímicas que se estabelecem entre os óxidos de azoto e os compostos voláteis (VOC) (Câmara Municipal do Seixal, 2010).

Tabela 4 – Poluentes atmosféricos contemplados no presente estudo

Monóxido de carbono	CO
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>
Óxidos de nitrogénio	NO <sub>x</sub>
Óxido nítrico	N <sub>2</sub> O
Dióxido de enxofre	SO <sub>2</sub>
Hidrocarbonetos	HC
Metano	CH <sub>4</sub>
Partículas materiais	PM10
Composto orgânico volátil não metano	NMVOC

### 3.2.1.1. Óxidos de carbono

- **Monóxido de carbono (CO)**

O monóxido de carbono é um gás incolor, insípido, inodoro e tóxico, produzido pela oxidação incompleta do carbono quando não é fornecida quantidade suficiente de ar. Quando em elevada quantidade no ar circundante, este gás pode provocar intoxicações e até morte consoante o tempo de exposição.

Maiores níveis de CO são frequentemente encontrados onde há maior intensidade de tráfego dado que o maior contribuinte para a emissão deste gás é a combustão interna dos motores que existem nos automóveis. As emissões a partir do gás natural estão dependentes da eficiência da combustão (United States Environmental Protection Agency - EPA, 2012).

- **Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

O dióxido de carbono, principal causador do efeito estufa, não é um gás tóxico embora tenha um efeito asfixiante. Este é um produto da reação da combustão que ocorre na presença de oxigénio em abundância. A combustão de petróleo, gás natural e essencialmente carvão, são as principais formas de emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, aquando da necessidade para produção de eletricidade, uso industrial e transportes.

A quantidade de CO<sub>2</sub> que uma ação produz ao longo de um determinado tempo é designada pegada ambiental. No caso específico de uma pessoa, há várias formas de se medir a pegada ambiental, no entanto, em geral, três fatores compõem a pegada ambiental de uma pessoa: o consumo doméstico de energia, o uso de transporte e o consumo de bens.

#### **3.2.1.2. Óxidos de azoto (NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>)**

Os óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>) são compostos muito reativos, que englobam o óxido de azoto (NO) e o dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>), entre outros. A principal fonte de NO<sub>x</sub> é de origem antropogénica e encontra-se associada à queima de combustíveis fósseis nos veículos e nos processos industriais. Os óxidos de azoto formam-se no ar quando o combustível é queimado a altas temperaturas. No entanto, a formação de NO é afetada por inúmeros fatores, entre os quais predominam as características do processo de combustão, tipo de combustível e sua composição química assim como a carga de equipamento de combustão.

O NO é um gás incolor e inodoro, não tóxico para as concentrações habitualmente presentes na atmosfera. Já o NO<sub>2</sub> é um gás facilmente detetável pelo odor característico, é um gás castanho avermelhado, corrosivo e extremamente oxidante. O NO<sub>x</sub> é o termo genérico para um grupo de gases altamente reativos, todos contendo azoto e oxigénio em quantidades variáveis. Estes compostos formam-se por combinação dos átomos de azoto e de oxigénio na atmosfera, em condições de alta temperatura e alta pressão, existentes nos motores dos automóveis. À saída do tubo de escape, o principal óxido de azoto existente é o NO. No entanto, este combina-se rapidamente com o oxigénio atmosférico, transformando-se em dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>). (United States Environmental Protection Agency - EPA, 2012)

Estes óxidos de azoto podem permanecer na atmosfera durante vários dias, sendo que, durante este período, induzidos pela radiação solar, são gerados nitratos, sulfatos e aerossóis orgânicos, que contribuem significativamente para a fração de matéria particulada. Tal fato, leva a considerar o NO<sub>2</sub> como um precursor de uma vasta gama de poluentes secundários.

O dióxido de azoto nas suas reações na atmosfera pode dar origem a substâncias que contribuem para fenómenos com elevado impacto ambiental, como as chuvas ácidas que levam à acidificação de lagos e rios.

### **3.2.1.3. Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)**

O óxido nitroso é um gás inodoro, não inflamável à temperatura ambiente e importante para o balanço climático.

Apesar das emissões de N<sub>2</sub>O serem, em termos percentuais, inferiores às emissões de CO<sub>2</sub>, o contínuo aumento das suas emissões e conseqüentemente a variação da sua concentração na atmosfera terrestre, conjuntamente com o papel que o N<sub>2</sub>O desempenha na destruição da camada de ozono estratosférico, classificam-no como um poderoso GHG com impacto significativo nas alterações climáticas (Nevison, Lueker, & Weiss, 2004).

O tempo de vida do N<sub>2</sub>O na atmosfera é bastante longo, cerca de 120 anos, devido principalmente à velocidade dos processos de remoção estratosféricos, que são relativamente lentos.

### **3.2.1.4. Dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>)**

O SO<sub>2</sub> é um gás incolor, denso, de odor forte, solúvel em água, tóxico e não inflamável, que se dissolve na água, formando ácido sulfúrico, que é altamente perigoso para materiais, plantas e tecidos animais. A combustão de substâncias que contêm enxofre, como é o caso dos combustíveis fósseis por veículos e indústrias emite este gás para a atmosfera. Devido à sua propriedade de solubilidade em água, este gás reage com as gotículas presentes no ar formando o ácido sulfuroso que precipita sob a forma de chuva ácida. Esta chuva é nociva ao meio ambiente, causando malefícios como a morte de espécies aquáticas devido à diminuição do pH da água. Nos solos interfere na solubilidade de alguns compostos indispensáveis ao desenvolvimento vegetal. Monumentos e edificações são degradados pela corrosão da chuva ácida. O SO<sub>2</sub> está na lista dos gases que contribuem para o efeito estufa.

### 3.2.1.5. Hidrocarbonetos (HC)

Os hidrocarbonetos são compostos que apenas são constituídos por átomos de carbono (C) e de hidrogénio (H). Há dois grandes grupos destas moléculas: hidrocarbonetos alifáticos (não aromáticos) e os hidrocarbonetos aromáticos.

Os HC provêm de uma grande variedade de processos industriais e naturais. Nos centros urbanos as principais fontes emissoras são os veículos de transporte, nos processos de queima de combustível, uma vez que o petróleo é constituído essencialmente por hidrocarbonetos que através da combustão produzem energia. Um exemplo de hidrocarboneto classificado aromático é o benzeno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>).

Os Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (PAHs) são poluentes orgânicos, classificados pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como carcinogénicos, mutagénicos e desreguladores endócrinos. Estes compostos resultam de processos de combustão incompleta de compostos de carbono e, devido à sua elevada toxicidade, existem medidas de controlo para a sua presença nomeadamente em águas de consumo humano (José, S. Silva; Mestre, Ana S.; Silva, Susana P.; Cardoso, Ana S.; Rebelo, Helena; Carvalho, 2016).

### 3.2.1.6. Metano (CH<sub>4</sub>)

O metano é o mais simples dos hidrocarbonetos e o principal constituinte do gás natural. O seu contributo para o efeito de estufa é cerca de vinte e uma vezes superior ao do dióxido de carbono. Um dos processos responsáveis pela libertação deste gás é a queima incompleta quando existe deficiência de oxigénio no processo de combustão. Na Terra, o metano encontra-se no estado gasoso, e é um dos gases que alarma os cientistas por reforçar o efeito de estufa e potenciar as alterações climáticas (Ferreira, 2016).

É um gás inodoro, inflamável e incolor, e de pouca solubilidade em água, e está contido em quase todos os gases naturais.

### 3.2.1.7. Composto orgânico volátil não metano (NMVOC)

O termo composto orgânico volátil (VOC) refere-se a compostos orgânicos que aparecem na atmosfera na forma de gases, mas que em condições de pressão e temperatura ambiente podem existir nas fases líquida ou mesmo sólida (Nunes, 1996). O uso do termo VOC engloba os compostos carbono-oxigénio.

Para a distinguir a classe de compostos que contêm grupos de substituição de oxigênio, cloro, enxofre, entre outros atribui-se o termo composto orgânico volátil não metano (NMVOC).

Os compostos orgânicos voláteis não metano (NMVOCs) traduzem uma grande quantidade de compostos quimicamente diferentes, como a título de exemplo o benzeno e o etanol.

Essencialmente, os NMVOCs são idênticos aos compostos orgânicos voláteis (VOCs), mas com metano excluído. Um subconjunto importante de NMVOCs são os hidrocarbonetos não metano (NMHCs).

#### **3.2.1.8. Material particulado (PM<sub>10</sub>)**

O material particulado (PM) é o termo geral usado para uma mistura de partículas (sólidas e líquidas) suspensas no ar, com uma vasta gama e composição química. PM<sub>10</sub> inclui as partículas designadas “grosseiras” com um diâmetro igual ou inferior a 10 µm.

Designam-se por partículas primárias as que entram diretamente na atmosfera, por exemplo as libertadas pelas chaminés, e por partículas secundárias as partículas que são formadas na atmosfera a partir da oxidação e transformação de emissões gasosas primárias. Os gases percursores, ou seja, as emissões gasosas que contribuem para a formação de partículas, mais importantes para as partículas secundárias são SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> e VOCs. (United States Environmental Protection Agency - EPA, 2012)

As PM<sub>10</sub> resultantes do tráfego automóvel não provêm apenas dos processos de combustão do combustível, mas também da erosão dos pavimentos bem como do desgaste dos travões e pneus e suspensão de partículas pela turbulência mecânica criada pela circulação.

#### **3.2.2. Principais poluentes aquáticos**

O problema da introdução de poluentes no ambiente põe-se com igual relevância tanto nos ecossistemas terrestres como nos aquáticos (Carapeto, 1999). De acordo GESAMP (1984), a contaminação da água é definida como a presença de concentrações elevadas de substâncias na água, nos sedimentos ou nos organismos e a poluição como a introdução de substâncias em ambiente aquático que resultam em efeitos nocivos aos seres vivos.

Tabela 5 – Poluentes aquáticos contemplados no presente estudo

Chemical Oxygen Demand	COD
Fósforo	P
Nitrogénio	N

### 3.2.2.1. Chemical Oxygen Demand (COD)

A carência de oxigénio da água é o parâmetro que avalia a presença de substâncias oxidáveis, orgânicas ou inorgânicas numa água. Este parâmetro reflete a poluição que um sistema aquático exhibe, dado que traduz a capacidade da água de consumir oxigênio durante a decomposição da matéria orgânica e a oxidação de substâncias químicas inorgânicas, como amônia e nitrito. Uma diminuição de oxigênio dissolvido pode levar a condições anaeróbicas prejudiciais às formas de vida aquáticas. Medições de COD são comumente feitas em amostras de águas residuais ou de águas naturais contaminadas por resíduos domésticos ou industriais.

### 3.2.2.2. Fósforo (P) e Nitrogénio (N)

O excesso de nutrientes é uma importante causa da eutrofização de massas de água superficiais na Europa.

O nitrogénio (azoto) é um nutriente essencial à vida na Terra e é um elemento essencial para a nutrição das plantas (sob a forma amoniacal e de nitrato). No entanto, este torna-se um problema a partir do momento em que as suas formas reativas (iões e gases) são libertadas em doses excessivas para o ambiente, gerando impactos negativos no solo, água, ar e na biodiversidade.

Tal como o nitrogénio, o fósforo é um elemento de grande importância em toda a atividade de crescimento de algas e outros organismos biológicos. Dado o efeito nocivo do crescimento anormal de algas em massas de água, presentemente tem sido dada grande importância no controle dos compostos de fósforo rejeitados pelos efluentes domésticos e industriais, e provenientes do escoamento superficial.

### 3.2.3. Sub-fases

#### 3.2.3.1. Produção de agregados britados

Na formulação das misturas betuminosas para pavimentação rodoviária, o material agregado constitui cerca de 90 a 95% do seu peso e 75% a 85% do seu volume (Branco, Pereira, & Picado-Santos, 2011). Nesta aplicação os agregados não devem ser muito porosos, de modo a não ser necessária uma quantidade muito elevada de betume, nem totalmente impermeáveis, para que a adesividade do betume aos agregados não seja reduzida.

As camadas inferiores de um pavimento flexível são constituídas por agregados britados a partir rocha, escórias britadas ou outros materiais, sendo o agregado de granulometria extensa, o material mais recorrente nestas camadas.

No caso de agregados obtidos por fratura mecânica, a produção de agregados britados inicia-se com o desmonte da massa rochosa que é posteriormente transportada para a central de britagem. O grau de fragmentação da rocha desmontada é controlado pelo consumo de explosivos. A posterior movimentação da massa rochosa é realizada com recurso a dois tipos de equipamentos: unidades de carga, pás carregadoras e escavadoras, e unidades de transporte, *dumpers*.

Dando-se início ao ciclo de produção de agregados, na central de britagem a rocha é então fragmentada e peneirada até os agregados apresentarem as dimensões entre os valores pré-estabelecidos. Por último, o produto final é armazenado em pinha ou em silos montados em estrutura metálica até à expedição do produto, que contempla a carga, pesagem, expedição administrativa e transporte do produto. Cada silo recebe material com granulometria distinta.





Tabela 6 – Encargos ambientais da produção de agregados britados (Häkkinen &amp; Mäkelä, 1996)

<b>Emissões</b>	<b>g/kg</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	2
<b>SO<sub>2</sub></b>	6,5 x10 <sup>-3</sup>
<b>NO<sub>x</sub></b>	1,2 x10 <sup>-2</sup>
<b>CO</b>	2,5 x10 <sup>-3</sup>
<b>VOC total</b>	4,7 x10 <sup>-3</sup>
<b>CH<sub>4</sub></b>	4,3 x10 <sup>-3</sup>
<b>As</b>	1,8 x10 <sup>-8</sup>
<b>Hg</b>	2,7 x10 <sup>-10</sup>
<b>Cd</b>	2,7 x10 <sup>-9</sup>
<b>Cr</b>	9 x10 <sup>-9</sup>
<b>Pb</b>	1,8 x10 <sup>-7</sup>
<b>Partículas</b>	1,9 x10 <sup>-3</sup>
<b>Energia</b>	<b>MJ/kg</b>
<b>Combustível fóssil</b>	1,1 x10 <sup>-2</sup>
<b>Eletricidade</b>	4,1 x10 <sup>-2</sup>

Os valores apresentados na Tabela 7 provêm de Stripple (2001) e são baseados em valores totais reais de consumo de energia para todo o processo de fabrico incluindo a energia consumida no local, sendo que o consumo de eletricidade é baseado no consumo médio de eletricidade Sueco. A produção do material de detonação foi omitida.

Tabela 7 – Dados de análise de inventário da produção de agregados britados (Stripple, 2001)

<b>Tipo de recurso/ Tipo de emissão</b>		<b>Consumos energéticos/ Emissões (por tonelada de agregados produzidos)</b>	
<b>Material/ Recursos energéticos</b>	<b>Energia, Eletricidade</b>	(MJ)	21,2
	<b>Gás Natural</b>	(MJ)	1,97 x10 <sup>-1</sup>
	<b>Diesel</b>	(MJ)	20
	<b>Carvão</b>	(MJ)	8,48 x10 <sup>-1</sup>
	<b>Combustível de biomassa</b>	(MJ)	9,54 x10 <sup>-1</sup>

Tipo de recurso/ Tipo de emissão		Consumos energéticos/ Emissões (por tonelada de agregados produzidos)	
	<b>Turfa</b>	(MJ)	$9,54 \times 10^{-2}$
	<b>Urânio</b>	(MJ)	33,9
	<b>Energia hidroelétrica</b>	(MJ)	9,96
	<b>Rocha</b>	(g)	1000000
<b>Emissões Atmosféricas</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	(g)	$7,88 \times 10^{-1}$
	<b>NO<sub>x</sub></b>	(g)	12,3
	<b>CO</b>	(g)	1,49
	<b>CO<sub>2</sub></b>	(g)	1420
	<b>HC</b>	(g)	$8,73 \times 10^{-1}$
	<b>CH<sub>4</sub></b>	(g)	$3,82 \times 10^{-3}$
	<b>VOC</b>	(g)	$2,33 \times 10^{-2}$
	<b>N<sub>2</sub>O</b>	(g)	$3,61 \times 10^{-2}$
	<b>Partículas</b>	(g)	$4,85 \times 10^{-1}$
	<b>COD</b>	(g)	$2,04 \times 10^{-2}$
	<b>Nitrogénio total</b>	(g)	$3,23 \times 10^{-3}$
	<b>Petróleo</b>	(g)	$6,8 \times 10^{-3}$
	<b>Fenol</b>	(g)	$9,68 \times 10^{-3}$

No presente caso de estudo recorreu-se maioritariamente aos valores provenientes de Häkkinen & Mäkelä (1996) sendo completados quando necessário com os dados provenientes de Stripple (2001).

### 3.2.3.2. Produção de betume

Para a produção de betume asfáltico, atualmente, recorre-se essencialmente a produtos derivados da destilação do petróleo bruto, mistura complexa de hidrocarbonetos.

Os dados relativos à produção de betume, utilizados neste trabalho, que provêm de Stripple (2001) traduzem a situação em que o petróleo bruto provém da Venezuela e é transportado via marítima para a Suécia, mais precisamente Nynäshamn, onde em refinaria, após destilação, a fração que fica no fundo da torre é submetida a elevadas

temperaturas e pressões negativas para a obtenção do aglutinante betuminoso. A restante parte, fração mais leve, que permanece no estado de vapor, é utilizada para a produção de combustível. A análise da transformação de petróleo bruto na produção de betume é baseada em dados da refinaria da Nynäs em Nynäshamn. Os dados para o consumo de energia e as emissões foram retirados dos dados de operação da refinaria. Este cenário é, salvo as diferenças inerentes ao posicionamento geográfico, em tudo semelhante a outros que se verificam em várias partes do globo, por exemplo em Portugal, onde o crude provém da essencialmente da Venezuela, do Brasil ou do médio-oriente e é refinado localmente até à obtenção do betume.



Figura 14 – Refinaria da Nynäs em Nynäshamn (Montin & Manager, 2012)

Na atribuição de emissões e consumo de energia na refinação do petróleo bruto, a fração de betume recebeu uma parte de 40% do consumo total de energia e das emissões da refinaria.

Tabela 8 – Dados de análise de inventário da produção de betume (Stripple, 2001)

Tipo de recurso/ Tipo de emissão		Consumos energéticos/ Emissões (por tonelada de betume)	
<b>Material / Recursos energéticos</b>	<b>Energia, Eletricidade</b>	(MJ)	114
	<b>Gás Natural</b>	(MJ)	1780
	<b>Diesel</b>	(MJ)	1060
	<b>Carvão</b>	(MJ)	10,1
	<b>Combustível de biomassa</b>	(MJ)	11,3
	<b>Turfa</b>	(MJ)	1,13
	<b>Urânio</b>	(MJ)	403
	<b>Energia hidroelétrica</b>	(MJ)	118
<b>Emissões Atmosféricas</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	(g)	612
	<b>NO<sub>x</sub></b>	(g)	1020
	<b>CO</b>	(g)	111
	<b>CO<sub>2</sub></b>	(g)	173000
	<b>HC</b>	(g)	30,7
	<b>CH<sub>4</sub></b>	(g)	3,53x10 <sup>-2</sup>
	<b>VOC</b>	(g)	200
	<b>N<sub>2</sub>O</b>	(g)	1,06x10 <sup>-1</sup>
	<b>Partículas</b>	(g)	8,1
	<b>Emissões para a água</b>	<b>BOD</b>	(g)
<b>COD</b>		(g)	344
<b>Fósforo total</b>		(g)	2
<b>Nitrogénio total</b>		(g)	5,03
<b>HC</b>		(g)	2
<b>Petróleo</b>		(g)	6,52x10 <sup>-2</sup>
<b>Fenol</b>		(g)	8,37 x10 <sup>-2</sup>

Relativamente ao armazenamento, Stripple (2001) menciona que o betume é armazenado em depósitos locais em cisternas mantidas pelo calor. O consumo de energia para a manutenção do calor de uma cisterna corresponde a 50 kWh por tonelada de betume entregue a partir do depósito, sendo o aquecimento feito essencialmente com recurso a

eletricidade (90%). Além das emissões de hidrocarbonetos (HC) provenientes da combustão do óleo de aquecimento, restantes 10%, os hidrocarbonetos são também emitidos pelas próprias cisternas de betume (1,6 g/tonelada de betume) e pelo carregamento dos petroleiros no momento da entrega (0,3 g/tonelada de betume).

Por alternativa, os dados apresentados na Tabela 9 provêm de Häkkinen & Mäkelä (1996) e descrevem valores de emissão da produção de betume da refinaria finlandesa de Neste. Estes dados incluem a produção, o transporte e a refinação do petróleo bruto.

Tabela 9 – Encargos ambientais da produção betume (Häkkinen & Mäkelä, 1996)

<b>Emissões</b>	<b>g/kg</b>
CO <sub>2</sub>	330
SO <sub>2</sub>	8 x10 <sup>-1</sup>
NO <sub>x</sub>	2,9
CO	1 x10 <sup>-1</sup>
VOC+CH <sub>4</sub>	2
Partículas	3 x10 <sup>-1</sup>
<b>Água</b>	<b>g/kg</b>
Consumo de água	370
Energia	MJ/kg
Consumo de energia	6
<b>Emissões para a água</b>	<b>MJ/kg</b>
Petróleo	3 x10 <sup>-2</sup>
Nitrogénio	5 x10 <sup>-3</sup>
COD	0,1
Matéria sólida	6x10 <sup>-2</sup>

### 3.2.3.3. Produção de mistura betuminosa a quente em central (HMA)

No âmbito rodoviário, as misturas betuminosas são constituídas geralmente por um conjunto de materiais granulares doseados e misturados numa central com uma quantidade de ligante previamente determinada (Branco, Pereira, & Picado-Santos, 2011).

A função do ligante betuminoso é proporcionar uma ligação tenaz e flexível aos materiais com ele tratados. Tal advém da resposta visco-elástica do betume, cujo comportamento varia com a velocidade de aplicação das cargas, o que lhe permite comportar-se como um material flexível, com baixo módulo de rigidez, que se adapta às deformações e assentamentos das camadas do pavimento e que absorve as tensões devidas à retração térmica das camadas do pavimento e da fundação sem se fendilhar.

As misturas betuminosas para camada de base têm essencialmente uma função estrutural, absorvendo as tensões induzidas pelas ações do tráfego e transmitindo-as de forma atenuada à fundação. Devem ser resistentes à fadiga, à propagação de fendas e à ação da água (Cepssa, 2007). Para se conseguir uma adequada regularidade e compactação a mistura deve ser espalhada e compactada a temperaturas adequadas. Esta temperatura deve ser controlada de acordo com as características da mistura durante a compactação (Cepssa, 2007).

As misturas betuminosas para camadas de regularização, colocadas entre as camadas de base e de desgaste, devem contribuir para garantir uma boa regularidade superficial do pavimento e impermeabilizar as camadas inferiores.

As misturas betuminosas aplicadas em camadas de desgaste (betão betuminoso), tais como as misturas drenantes ou as misturas rugosas, de elevada textura e excelente comportamento em vias rápidas na presença da água, desempenham funções principalmente funcionais.

Os dados de inventário utilizados no presente estudo relativos à produção de HMA provêm de Stripple (2001) e incluem as emissões de transporte da produção de agregados e de betume. Estes traduzem a produção de mistura betuminosa pelo método quente (Hot Mixed Asphalt), onde os agregados previamente aquecidos, com recurso a combustível (fuel oil) com 0,1% de enxofre, são envolvidos em betume. O consumo de material e energia, bem como os dados de análise de inventário para a central de mistura betuminosa, são mostrados nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – Dados de operação do consumo de material e energia em central (Stripple, 2001)

<b>Material</b>	<b>Consumo</b>	<b>Unidade</b>
Betume	$6 \times 10^{-2}$	Tonelada/tonelada de mistura
Agregados britados	$9,4 \times 10^{-1}$	Tonelada/tonelada de mistura
Energia elétrica	36	MJ/tonelada de mistura
Combustível (Fuel oil)	285	MJ/tonelada de mistura

Tabela 11 – Dados de análise de inventário para mistura betuminosa produzida em central e misturada a quente, sem incluir o transporte da mistura para obra (Stripple, 2001)

<b>Tipo de recurso/ Tipo de emissão</b>		<b>Consumos energéticos/ Emissões (por tonelada de HMA)</b>	
<b>Material / Recursos energéticos</b>	<b>Energia, Eletricidade</b>	(MJ)	80,8
	<b>Gás Natural</b>	(MJ)	107
	<b>Diesel</b>	(MJ)	369
	<b>Carvão</b>	(MJ)	2,84
	<b>Combustível de biomassa</b>	(MJ)	3,2
	<b>Turfa</b>	(MJ)	$3,2 \times 10^{-1}$
	<b>Urânio</b>	(MJ)	114
	<b>Energia hidroelétrica</b>	(MJ)	33,4
	<b>Betume</b>	(g)	60000
	<b>Rocha</b>	(g)	940000
<b>Emissões Atmosféricas</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	(g)	52
	<b>NO<sub>x</sub></b>	(g)	118
	<b>CO</b>	(g)	11,8
	<b>CO<sub>2</sub></b>	(g)	34400
	<b>HC</b>	(g)	2,67
	<b>CH<sub>4</sub></b>	(g)	$1,07 \times 10^{-2}$
	<b>VOC</b>	(g)	12,1
	<b>N<sub>2</sub>O</b>	(g)	$5,54 \times 10^{-2}$
<b>Partículas</b>	(g)	3,79	

Tipo de recurso/ Tipo de emissão		Consumos energéticos/ Emissões (por tonelada de HMA)	
Emissões para a água	BOD	(g)	1,14
	COD	(g)	20,7
	Fósforo total	(g)	$1,2 \times 10^{-1}$
	Nitrogénio total	(g)	$3,05 \times 10^{-1}$
	HC	(g)	$1,2 \times 10^{-1}$
	Petróleo	(g)	$1,03 \times 10^{-2}$
	Fenol	(g)	$1,41 \times 10^{-2}$

#### 3.2.3.4. Transporte de material por camião

Os dados relativos ao transporte de material por camiões foram retirados de Stripple (2001). Os camiões são considerados no estudo como os veículos representativos para os diferentes tipos de transporte utilizados durante a construção e manutenção rodoviária. Neste estudo, foram disponibilizados consumos e emissões para camião de transporte fora da área urbana com carga máxima de 14 toneladas transportada num sentido e camião vazio no retorno, considerando que o peso seja o fator limitante para a capacidade de carga. Os dados de inventário disponibilizados são apresentados por veículo quilómetro (vkm).

Tabela 12 – Transporte com recurso a camião de distribuição fora da área urbana (carga de 14 toneladas), carga total, vazio no retorno (Stripple, 2001)

Tipo de recurso/ Tipo de emissão		Consumos energéticos/ Emissões (por veículo por km)	
Recurso energético	Diesel	(MJ)	13,1
Emissões Atmosféricas	SO <sub>2</sub>	(g)	$4,53 \times 10^{-1}$
	NO <sub>x</sub>	(g)	6,02
	CO	(g)	$9,56 \times 10^{-1}$
	CO <sub>2</sub>	(g)	943
	HC	(g)	$4,58 \times 10^{-1}$

Tipo de recurso/ Tipo de emissão		Consumos energéticos/ Emissões (por veículo por km)	
<b>CH<sub>4</sub></b>	(g)	5,97 x10 <sup>-4</sup>	
<b>N<sub>2</sub>O</b>	(g)	1,91 x10 <sup>-2</sup>	
<b>Partículas</b>	(g)	1,01 x10 <sup>-1</sup>	
<b>COD</b>	(g)	1,43 x10 <sup>-2</sup>	
<b>Nitrogénio total</b>	(g)	2,27 x10 <sup>-3</sup>	
<b>Petróleo</b>	(g)	4,77 x10 <sup>-3</sup>	
<b>Fenol</b>	(g)	6,8 x10 <sup>-3</sup>	

### 3.2.3.5. Carregadora de rodas na operação de carregamento de camiões

Os dados de inventário de ciclo de vida para a carregadora de rodas provêm de Stripple (2001), Tabela 13. Estes contemplam apenas a operação do veículo, nomeadamente o consumo e produção de diesel, sendo expressos por volume produzido de solo (m<sup>3</sup>).

Nesta situação é necessário conhecer o material que está a ser manuseado e as condições do local, para além da capacidade da carregadora.

Tabela 13 – Dados de análise de inventário para carregadora de rodas, tipo Volvo BM L180, para diferentes classes de escavação no carregamento de veículos (Stripple, 2001).

Tipo de recurso/ Tipo de emissão			Consumos energéticos/ Emissões (por m <sup>3</sup> de material carregado)			
			Classe de escavação			
			Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
<b>Recurso energético</b>	<b>Diesel</b>	(MJ)	1,71	1,89	3,3	3,65
<b>Emissões Atmosféricas</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	(g)	5,90x10 <sup>-2</sup>	6,53x10 <sup>-2</sup>	1,14x10 <sup>-1</sup>	1,26x10 <sup>-1</sup>
	<b>NO<sub>x</sub></b>	(g)	1,11	1,23	2,14	2,37
	<b>CO</b>	(g)	1,32x10 <sup>-1</sup>	1,46x10 <sup>-1</sup>	2,55x10 <sup>-1</sup>	2,83x10 <sup>-1</sup>
	<b>CO<sub>2</sub></b>	(g)	123	136	237	262
	<b>HC</b>	(g)	7,98x10 <sup>-2</sup>	8,83x10 <sup>-2</sup>	1,54x10 <sup>-1</sup>	1,71x10 <sup>-1</sup>

Tipo de recurso/ Tipo de emissão	Consumos energéticos/ Emissões (por m <sup>3</sup> de material carregado)			
	Classe de escavação			
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
<b>CH<sub>4</sub></b>	(g) 7,76x10 <sup>-5</sup>	8,59x10 <sup>-5</sup>	1,5x10 <sup>-4</sup>	1,66x10 <sup>-4</sup>
<b>N<sub>2</sub>O</b>	(g) 2,48x10 <sup>-3</sup>	2,75x10 <sup>-3</sup>	4,79x10 <sup>-3</sup>	5,31x10 <sup>-3</sup>
<b>Partículas</b>	(g) 4,42x10 <sup>-2</sup>	4,89x10 <sup>-2</sup>	8,54x10 <sup>-2</sup>	9,46x10 <sup>-2</sup>
<b>COD</b>	(g) 1,86x10 <sup>-3</sup>	2,06x10 <sup>-3</sup>	3,6x10 <sup>-3</sup>	3,98x10 <sup>-3</sup>
<b>Nitrogénio total</b>	(g) 2,95x10 <sup>-4</sup>	3,26x10 <sup>-4</sup>	5,69x10 <sup>-4</sup>	6,31x10 <sup>-4</sup>
<b>Petróleo</b>	(g) 6,21x10 <sup>-4</sup>	6,87x10 <sup>-4</sup>	1,20x10 <sup>-3</sup>	1,33x10 <sup>-3</sup>
<b>Fenol</b>	(g) 8,85x10 <sup>-4</sup>	9,79x10 <sup>-4</sup>	1,71x10 <sup>-3</sup>	1,89x10 <sup>-3</sup>



Figura 15 – Volvo BM L180 (Volvo, 1994b)

### 3.2.3.5.1. Classes de escavação e condições de peso/volume

Sabendo que a energia despendida, juntamente com as emissões libertadas, dependem do material que está a ser movido, Stripple (2001) apresenta classes de escavação consoante a composição do material a ser manipulado, Tabela 14.

Tabela 14 – Classes de escavação (adaptado de Stripple, 2001)

Classe de escavação	Trabalhabilidade	Exemplos de materiais
1	Fácil	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solo pouco compacto</li> <li>- Escavação até 40% da profundidade máxima da máquina</li> <li>- Ângulo de rotação menor que 30°</li> <li>- Descarga em pilha ou camião a um nível mais baixo</li> <li>- Ausência de obstruções</li> </ul>
2	Mediana	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solo compacto de argila dura com rocha fragmentada &lt;25%</li> <li>- Escavação até 50% da profundidade máxima da máquina</li> <li>- Ângulo de rotação menor que 60°</li> <li>- Poucas obstruções</li> </ul>
3	Média a Difícil	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solo compacto com 50% de fragmentos de rocha</li> <li>- Escavação até 70% da profundidade máxima da máquina</li> <li>- Ângulo de rotação menor que 90°</li> <li>- Carregamento de camião muito perto da escavadora</li> </ul>
4	Difícil	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solo compacto com 75% de fragmentos de rocha</li> <li>- Escavação até 90% da profundidade máxima da máquina</li> <li>- Ângulo de rotação menor que 120°</li> <li>- Escavação com entivações e escoramentos</li> <li>- Presença de pessoas na área de trabalho</li> </ul>
5	Muito difícil	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rocha alterada: arenitos, calcários, xistos, etc</li> <li>- Escavação acima dos 90% da profundidade máxima da máquina</li> <li>- Presença de obstruções</li> <li>- Presença de pessoas na área de trabalho</li> <li>- Área de despejo limitada</li> </ul>

O volume é frequentemente usado para medir a quantidade de material a movimentar, no entanto o peso é muitas vezes o fator limitante para o veículo de carga.

É pertinente a distinção entre volume “*in situ*” e volume solto, dado que o volume “*in situ*” representa o material compactado como está no terreno, enquanto o volume solto representa o volume do material depois de ter sido revolvido.

Tabela 15 – Valores indicativos das densidades de materiais manuseados em trabalho rodoviário (adaptado de Stripple, 2001)

Material	Volume “ <i>in situ</i> ” (kg/m <sup>3</sup> )	Volume solto (kg/m <sup>3</sup> )	Fator de Aumento
<b>Areia</b>			
seca	1600	1420	1,13
molhada	2070	1840	1,12
seca com seixo	1930	1720	1,12
húmida com seixo	2230	2020	1,10
<b>Seixo/ Gravel</b>			
seco	1470	1330	1,10-1,15
molhado	2340	2130	1,10-1,15
<b>Rocha</b>			
granito	2970	1980	1,5
calcário	2640	1590	1,66
rocha explodida	2670	1620	1,65

### 3.2.3.6. Escavadoras

Para a análise de emissões relativas ao recurso a escavadoras durante a fase de construção recorreu-se a dados de inventário relativos à máquina do modelo Åkerman EC620 disponibilizados por Stripple (2001).

Tabela 16 – Dados de emissão e energia para cada classe de escavação por volume de produção

Tipo de recurso/ Tipo de emissão			Consumos energéticos/ Emissões (por m <sup>3</sup> de material carregado)			
			Classe de escavação			
			Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
<b>Recurso energético</b>	<b>Diesel</b>	(MJ)	2,92	3,05	3,65	4,38
<b>Emissões Atmosféricas</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	(g)	1,10x10 <sup>-1</sup>	1,05x10 <sup>-1</sup>	1,26x10 <sup>-1</sup>	1,51x10 <sup>-1</sup>
	<b>NO<sub>x</sub></b>	(g)	1,89	1,98	2,37	2,84
	<b>CO</b>	(g)	2,26x10 <sup>-1</sup>	2,36x10 <sup>-1</sup>	2,82x10 <sup>-1</sup>	3,39x10 <sup>-1</sup>
	<b>CO<sub>2</sub></b>	(g)	2,10x10 <sup>2</sup>	2,19x10 <sup>2</sup>	2,62x10 <sup>2</sup>	3,14x10 <sup>2</sup>
	<b>HC</b>	(g)	1,35x10 <sup>-1</sup>	1,43x10 <sup>-1</sup>	1,70x10 <sup>-1</sup>	2,04x10 <sup>-1</sup>
	<b>CH<sub>4</sub></b>	(g)	1,33x10 <sup>-4</sup>	1,39x10 <sup>-4</sup>	1,66x10 <sup>-4</sup>	1,99x10 <sup>-4</sup>
	<b>N<sub>2</sub>O</b>	(g)	4,24x10 <sup>-3</sup>	4,44x10 <sup>-3</sup>	5,30x10 <sup>-3</sup>	6,36x10 <sup>-3</sup>
	<b>Partículas</b>	(g)	7,55x10 <sup>-2</sup>	7,90x10 <sup>-2</sup>	9,44x10 <sup>-2</sup>	1,13x10 <sup>-1</sup>
	<b>COD</b>	(g)	3,18x10 <sup>-3</sup>	3,33x10 <sup>-3</sup>	3,98x10 <sup>-3</sup>	4,77x10 <sup>-3</sup>
	<b>Nitrogénio total</b>	(g)	5,04x10 <sup>-4</sup>	5,27x10 <sup>-4</sup>	6,30x10 <sup>-4</sup>	7,56x10 <sup>-4</sup>
	<b>Petróleo</b>	(g)	1,06x10 <sup>-3</sup>	1,11x10 <sup>-3</sup>	1,33x10 <sup>-3</sup>	1,59x10 <sup>-3</sup>
<b>Fenol</b>	(g)	1,51x10 <sup>-3</sup>	1,5 x10 <sup>-3</sup>	1,89x10 <sup>-3</sup>	2,27x10 <sup>-3</sup>	

Estes dados traduzem emissões e consumos para condições normais de trabalho, ou seja, não devem ser aplicados para condições climatéricas extremas que provocam o congelamento do solo, por exemplo. O equipamento tem uma capacidade de balde entre 2,3 a 3,06 m<sup>3</sup> e um alcance máximo de 13,4 m. O volume de material considerado para descrever a movimentação de terras no presente caso estudo é o volume fixo.



Figura 16 – Åkerman EC620 (Volvo, 1994a)

### 3.2.3.7. Cilindros de compactação

Os dados de inventário relativos à utilização de rolos de compactação provêm Stripple (2001). Estes consideram o consumo direto de combustível de equipamentos de compactação produzidos pela Dynapac. Os dados apresentados para os Dynapac CA 301D e CC 421 traduzem emissões libertadas por 6 passagens de rolo. Para o modelo Dynapac CA 251D, o número de passagens por camada é definido para 8.

Tabela 17 – Resultados da análise do ciclo de vida da compactação de uma camada de betuminosa (adaptado de Stripple, 2001)

Tipo de recurso/ Tipo de emissão			Consumos energéticos/ Emissões (por m <sup>2</sup> de superfície compactada)	
			Dynapac CA 251D	Dynapac CC 421
<b>Recurso energético</b>	<b>Diesel</b>	(MJ)	6,53x10 <sup>-1</sup>	8,79x10 <sup>-1</sup>
<b>Emissões Atmosféricas</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	(g)	2,25x10 <sup>-2</sup>	3,04x10 <sup>-2</sup>
	<b>NO<sub>x</sub></b>	(g)	4,24x10 <sup>-1</sup>	5,70x10 <sup>-1</sup>
	<b>CO</b>	(g)	5,05x10 <sup>-2</sup>	6,80x10 <sup>-2</sup>
	<b>CO<sub>2</sub></b>	(g)	46,9	63,1
	<b>HC</b>	(g)	3,05x10 <sup>-2</sup>	4,11x10 <sup>-2</sup>
	<b>CH<sub>4</sub></b>	(g)	2,97x10 <sup>-5</sup>	3,99x10 <sup>-5</sup>
	<b>N<sub>2</sub>O</b>	(g)	9,49x10 <sup>-4</sup>	1,28x10 <sup>-3</sup>

Tipo de recurso/ Tipo de emissão		Consumos energéticos/ Emissões (por m <sup>2</sup> de superfície compactada)	
		Dynapac CA 251D	Dynapac CC 421
<b>Partículas</b>	(g)	1,69x10 <sup>-2</sup>	2,27x10 <sup>-2</sup>
<b>COD</b>	(g)	7,12x10 <sup>-4</sup>	9,59x10 <sup>-4</sup>
<b>Nitrogénio total</b>	(g)	1,13x10 <sup>-4</sup>	1,52x10 <sup>-4</sup>
<b>Petróleo</b>	(g)	2,37x10 <sup>-4</sup>	3,20x10 <sup>-4</sup>
<b>Fenol</b>	(g)	3,38x10 <sup>-4</sup>	4,55x10 <sup>-4</sup>

Tabela 18 – Resultados da análise do ciclo de vida da compactação de uma camada de solo/cascalho (adaptado de Stripple, 2001)

Tipo de recurso/ Tipo de emissão		Consumos energéticos/ Emissões (por m <sup>2</sup> de superfície compactada)	
		Dynapac CA 301D	
<b>Recurso energético</b>	<b>Diesel</b>	(MJ)	6,91x10 <sup>-1</sup>
<b>Emissões Atmosféricas</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	(g)	2,39x10 <sup>-2</sup>
	<b>NO<sub>x</sub></b>	(g)	4,49x10 <sup>-1</sup>
	<b>CO</b>	(g)	5,35x10 <sup>-2</sup>
	<b>CO<sub>2</sub></b>	(g)	49,6
	<b>HC</b>	(g)	3,23x10 <sup>-2</sup>
	<b>CH<sub>4</sub></b>	(g)	3,14x10 <sup>-5</sup>
	<b>N<sub>2</sub>O</b>	(g)	1,01x10 <sup>-3</sup>
	<b>Partículas</b>	(g)	1,79x10 <sup>-2</sup>
	<b>COD</b>	(g)	7,54x10 <sup>-4</sup>
	<b>Nitrogénio total</b>	(g)	1,19x10 <sup>-4</sup>
	<b>Petróleo</b>	(g)	2,51x10 <sup>-4</sup>
	<b>Fenol</b>	(g)	3,58x10 <sup>-4</sup>

### 3.2.3.8. Pavimentadora

Nos cálculos de inventário de ciclo de vida de pavimentadoras de aplicação de camadas betuminosas, apenas o consumo de combustível direto e a produção da quantidade correspondente de combustível são considerados. Os resultados de inventário para a colocação de uma camada betuminosa são apresentados na Tabela 19 e provêm de Stripple (2001).

Tabela 19 – Resultados do inventário do ciclo de vida de duas pavimentadoras para a pavimentação de uma camada (adaptado de Stripple, 2001)

Tipo de recurso/ Tipo de emissão			Consumos energéticos/ Emissões (por m <sup>2</sup> de superfície pavimentada)	
			Dynapac F12	Dynapac F16
<b>Recurso energético</b>	<b>Diesel</b>	(MJ)	7,72x10 <sup>-1</sup>	6,53x10 <sup>-1</sup>
<b>Emissões Atmosféricas</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	(g)	2,67x10 <sup>-2</sup>	2,26x10 <sup>-2</sup>
	<b>NO<sub>x</sub></b>	(g)	5,01x10 <sup>-1</sup>	4,24x10 <sup>-1</sup>
	<b>CO</b>	(g)	5,98x10 <sup>-2</sup>	5,06x10 <sup>-2</sup>
	<b>CO<sub>2</sub></b>	(g)	55,5	46,9
	<b>HC</b>	(g)	3,61x10 <sup>-2</sup>	3,05x10 <sup>-2</sup>
	<b>CH<sub>4</sub></b>	(g)	3,51x10 <sup>-5</sup>	2,97x10 <sup>-5</sup>
	<b>N<sub>2</sub>O</b>	(g)	1,12x10 <sup>-3</sup>	9,50x10 <sup>-4</sup>
	<b>Partículas</b>	(g)	2x10 <sup>-2</sup>	1,69x10 <sup>-2</sup>
	<b>COD</b>	(g)	8,42x10 <sup>-4</sup>	7,13x10 <sup>-4</sup>
	<b>Nitrogénio total</b>	(g)	1,33x10 <sup>-4</sup>	1,13x10 <sup>-4</sup>
	<b>Petróleo</b>	(g)	2,81x10 <sup>-4</sup>	2,38x10 <sup>-4</sup>
	<b>Fenol</b>	(g)	4x10 <sup>-4</sup>	3,39x10 <sup>-4</sup>

### 3.2.3.9. Iluminação da via

Os encargos ambientais produzidos pela iluminação da estrada de betuminoso ao longo de 50 anos de vida útil são retirados do estudo de Häkkinen & Mäkelä (1996). Esses são avaliados com base no consumo estimado de eletricidade sabendo que a iluminação é condicionada 20% pelo betume e 80% pelo agregado.

Tabela 20 – Cálculo da energia despendida na iluminação da via (Häkkinen &amp; Mäkelä, 1996)

<b>Tempo de iluminação</b>	<b>Potência das lâmpadas</b>	<b>Postes de iluminação</b>	<b>Energia</b>	<b>Tempo</b>	<b>Energia total</b>
(h/ano)	(W)	(nº/km)	(kWh/km/ano)	(ano)	(kWh/km)
4000	250	36	36000	50	1800000

Tabela 21 – Encargos ambientais da iluminação do pavimento betuminoso ao longo de 50 anos (Häkkinen &amp; Mäkelä, 1996)

<b>Emissões</b>	<b>g/kg</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	400000
<b>SO<sub>2</sub></b>	1900
<b>NO<sub>x</sub></b>	1600
<b>CO</b>	450
<b>VOC total</b>	1200
<b>CH<sub>4</sub></b>	1200
<b>As</b>	8,8x10 <sup>-2</sup>
<b>Hg</b>	2,2
<b>Cd</b>	220
<b>Cr</b>	400000
<b>Pb</b>	1900
<b>Partículas</b>	1600
<b>Energia</b>	<b>MJ/kg</b>
<b>Combustível fóssil</b>	14000

### 3.2.3.10. Tráfego

Os dados de tráfego para 1km de estrada durante a fase de utilização da via provêm de Häkkinen & Mäkelä (1996). Estes abrangem um tempo de vida útil da via de 50 anos.

Tabela 22 – Encargos ambientais do tráfego durante 50 anos (Häkkinen &amp; Mäkelä, 1996)

<b>Emissões</b>	<b>g/kg</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	100000000
<b>SO<sub>2</sub></b>	110000
<b>NO<sub>x</sub></b>	2300000
<b>CO</b>	390000
<b>VOC total</b>	240000
<b>CH<sub>4</sub></b>	94000
<b>As</b>	1,2x10 <sup>-1</sup>
<b>Hg</b>	4,3x10 <sup>-3</sup>
<b>Cd</b>	1,4x10 <sup>-2</sup>
<b>Cr</b>	5,8x10 <sup>-2</sup>
<b>Pb</b>	1,2
<b>Partículas</b>	130000
<b>Energia</b>	<b>MJ/kg</b>
<b>Combustível fóssil</b>	1500000

### 3.2.3.11. Estratégia de manutenção

Neste estudo foi considerada para análise a estratégia de manutenção apresentada por Häkkinen & Mäkelä (1996) – Manutenção A, Apêndice 4, que consiste num total de seis atividades de manutenção ao longo do período de vida de 50 anos do pavimento:

- \* M-I/ M-VI = Reciclagem a quente, nova mistura SMA 80 kg/m<sup>2</sup>
- M-II = Reciclagem (aquecimento, fresagem, aplicação, mistura nova 15 kg/m<sup>2</sup>)
- M-III = Fresagem fina (a frio), transporte de fresado, sem nova mistura
- M-IV = Reciclagem (aquecimento, moagem, aplicação, mistura nova 15 kg/m<sup>2</sup>)
- M-V = Fresagem (a frio), transporte de fresados, nova mistura 100 kg/m<sup>2</sup>

Os valores de energia apresentados na Tabela 23 excluem a energia que advém da produção de mistura betuminosa.

Tabela 23 – Estratégia de manutenção (adaptado de Häkkinen &amp; Mäkelä, 1996)

Ações de manutenção*	Período de manutenção	Largura	Volume de mistura betuminosa	Energia – gasolina	Energia – Fuel de aquecimento
	(anos)	(m)	(t/km)	(kg/km)	(kg/km)
<b>1 M-I</b> SMA 80 kg/m <sup>2</sup>	7	8,5	680	1700	85
<b>2 M-II</b> SMA 15kg/m <sup>2</sup>	16	4	60	2800	40
<b>3 M-III</b>	25	5	-100	-	150
<b>4 M-IV</b> SMA 15kg/m <sup>2</sup>	27	4	60	2800	40
<b>5 M-IV</b> SMA 100 kg/m <sup>2</sup>	34	6,6	360 (-288)	-	144
<b>6 M-V</b>	42	8,5	(-170)	-	255
<b>7 M-VI</b> SMA 80 kg/m <sup>2</sup>	50	8,5	680	1700	85



Figura 17 – Processo de pavimentação durante reabilitação (Vázquez, Terán, Huertas, &amp; Paje, 2018)

Tabela 24 – Encargos ambientais da estratégia de manutenção (Häkkinen &amp; Mäkelä, 1996)

<b>Emissões</b>	<b>g/kg</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	24000
<b>SO<sub>2</sub></b>	2,9
<b>NO<sub>x</sub></b>	100
<b>CO</b>	14
<b>VOC total</b>	150
<b>CH<sub>4</sub></b>	150
<b>As</b>	$6,1 \times 10^{-5}$
<b>Hg</b>	$9,2 \times 10^{-7}$
<b>Cd</b>	$9,2 \times 10^{-6}$
<b>Cr</b>	$3,1 \times 10^{-5}$
<b>Pb</b>	$6,1 \times 10^{-4}$
<b>Partículas</b>	4,7
<b>Energia</b>	<b>MJ/kg</b>
<b>Combustível fóssil</b>	470

### 3.2.3.12. Atraso de tráfego

Aquando obras de manutenção da via os distúrbios de tráfego, que provocam frequentemente um consumo de energia adicional dependem essencialmente do tipo de manutenção, de como o processo de trabalho é gerido, das condições da estrada e do volume de tráfego da via. As obras rodoviárias são organizadas sempre que possível de modo a causar o mínimo de perturbações de tráfego, deste modo a totalidade da faixa de rodagem é raramente fechada, sendo o tráfego desviado para uma faixa de rodagem adjacente impedindo a imobilização do tráfego na via, mas condicionando a velocidade do mesmo.

Häkkinen & Mäkelä (1996) pela falta de dados adequados sobre as perturbações de tráfego durante obras rodoviárias desenvolveram um cálculo hipotético para demonstrar a ordem de magnitude da quantidade de combustível distendido em tal situação.

Tabela 25 – Cálculo do consumo de combustível durante os períodos de manutenção (Häkkinen &amp; Mäkelä, 1996)

<b>Veículos</b>	<b>Tráfego total</b>	<b>Tráfego condicionado</b>	<b>Consumo</b>	<b>Duração dos trabalhos</b>	<b>Nº de manutenções</b>	<b>Consumo total</b>
	(veículos por dia)	(veículos por dia)	(l/km)	(dia/km)	(ciclo de vida de 50 anos)	(kg de combustível)
<b>Ligeiros</b>	18000	4500	0.01	1	6	203
<b>Pesados</b>	2000	400	0.2	1	6	507
<b>Total</b>	20000	5000	-	-	-	710

Tabela 26 – Encargos ambientais do distúrbio de tráfego para a estratégia de manutenção escolhida (Häkkinen &amp; Mäkelä, 1996)

<b>Emissões</b>	<b>g/kg</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	3200
<b>SO<sub>2</sub></b>	3,4
<b>NO<sub>x</sub></b>	72
<b>CO</b>	13
<b>VOC total</b>	7,6
<b>CH<sub>4</sub></b>	3
<b>As</b>	$3,7 \times 10^{-6}$
<b>Hg</b>	$1,4 \times 10^{-7}$
<b>Cd</b>	$4,6 \times 10^{-7}$
<b>Cr</b>	$1,8 \times 10^{-6}$
<b>Pb</b>	$3,7 \times 10^{-5}$
<b>Partículas</b>	4
<b>Energia</b>	<b>MJ/kg</b>
<b>Combustível fóssil</b>	46

### 3.3. Avaliação de impacto (LCIA)

#### 3.3.1. Seleção

Nesta fase procede-se à seleção das categorias de impacto para posteriormente se proceder à atribuição dos dados do inventário às respetivas categorias. As decisões sobre quais categorias de impacto devem ser incluídas em um estudo específico dependem do objetivo do estudo.

Na análise do ciclo de vida, evidencia-se uma hierarquia de causa efeito, baseada nos dados de inventário compilados requeridos para a quantificação de uma determinada categoria de impacto.

A escolha das categorias deve, portanto, ser realizada em função do objetivo da análise.

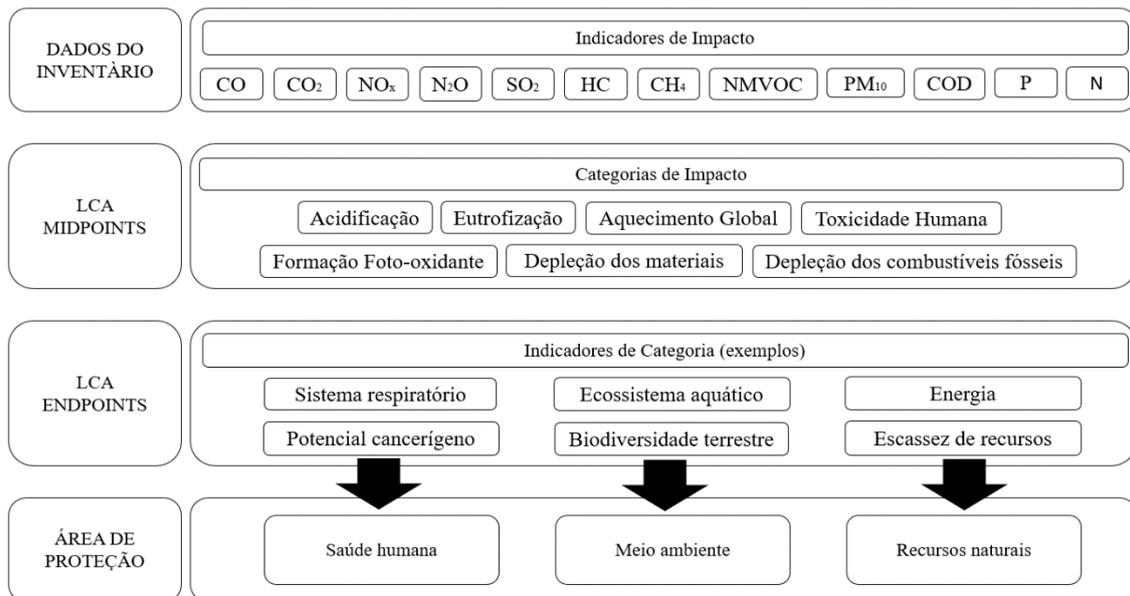


Figura 18 – Metodologia exemplificativa: inventário, *midpoints*, *endpoints* e áreas de proteção. (adptado de Anthonissen, Braet, & Van den bergh, 2015 e Pennington et al., 2004)

##### 3.3.1.1. Acidificação

Os poluentes atmosféricos primários que contribuem para a acidificação são o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), os óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>) e a amónia (NH<sub>3</sub>). As emissões atmosféricas de substâncias acidificantes como o SO<sub>2</sub> e os NO<sub>x</sub>, provenientes sobretudo da queima de combustíveis fósseis, podem, após a sua deposição, conduzir a alterações na composição química do solo e da água de superfície.

No final da década de 1970, a acidificação era já amplamente reconhecida como uma grande ameaça para o ambiente (APA, 2013). Deste pressuposto, investigações desde a quantidade de emissões emitidas até aos efeitos das substâncias acidificantes levou a uma melhor compreensão dos processos envolvidos, que por sua vez, permitiu formular acordos internacionais com metas e objetivos explícitos para a redução dos poluentes que contribuem para a acidificação, nomeadamente, através do Decreto-Lei n.º 193/2003, de 22 de agosto, que estabelece a obrigação de desenvolver um programa para a redução destes poluentes.

O fenómeno de acidificação é quantificado através da conversão dos vários poluentes para SO<sub>2</sub> equivalente.

### **3.3.1.2. Eutrofização**

Os compostos NO<sub>x</sub> e NH<sub>3</sub> são também responsáveis pela categoria de impacto eutrofização.

A eutrofização consiste num processo caracterizado pelo enriquecimento excessivo das águas em elementos nutritivos, principalmente nitrogénio (N), nas formas de nitrato ou azoto amoniacal, e fósforo (P), na forma de fosfato, causando um crescimento anormal das espécies vegetais aquáticas para níveis que põem em causa a utilização normal e desejável da água.

Os efeitos da eutrofização podem ser de natureza biológica, química ou física, mas sempre com importantes consequências socioeconómicas.

Como consequência da proliferação anormal da flora aquática, os principais efeitos são a redução progressiva da biodiversidade, enquanto que os efeitos secundários têm impacto ao nível da concentração de oxigénio dissolvido na água. A diminuição do oxigénio e o aumento de dióxido de carbono, impossibilitam a capacidade de manutenção da fauna e da flora.

Em termos físicos, o crescimento excessivo de microalgas em suspensão diminui a limpidez da água podendo originar a formação de espumas. Por sua vez, a consequente diminuição da luz promove a colonização do fundo por macroalgas.

A recuperação das áreas afetadas pela eutrofização é morosa e por vezes pode ser irreversível, verificando-se sempre, como sequela, o empobrecimento das comunidades biológicas.

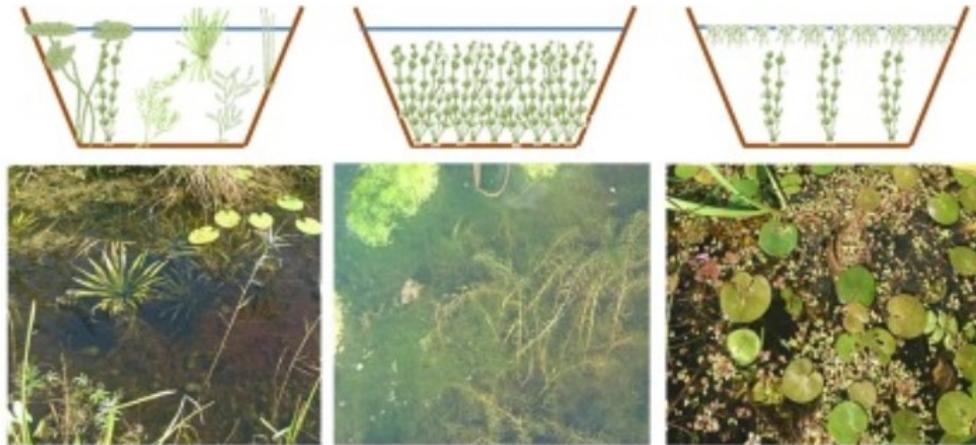


Figura 19 – Proliferação da flora aquática (van der Lee, Verdonschot, Kraak, & Verdonschot, 2018)

### 3.3.1.3. Aquecimento global

As alterações climáticas têm vindo a ser identificadas como uma das maiores ameaças ambientais, sociais e económicas que o planeta e a humanidade enfrentam na atualidade. Como tal, a preocupação face a este incremento tem-se traduzido na elaboração e aprovação de cada vez mais instrumentos de política, a nível internacional e nacional.

Em Portugal, no ano de 2011, o total das emissões de gases com efeito de estufa (GHG), excluindo o sector florestal e alteração de uso do solo foi estimado em cerca de 70 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>equivalente, que representa um aumento de 14,8% face a 1990, sendo o CO<sub>2</sub> o principal responsável, 73,6%, seguido do CH<sub>4</sub>, 17,8%, e do N<sub>2</sub>O, 6,4% (APA, 2013). O setor energético foi o que mais contribuiu para as emissões, nomeadamente os transportes e a transformação de energia.

Do estudo realizado pela APA (2013), retira-se que a evolução das emissões atmosféricas são o reflexo do comportamento da economia portuguesa, como tal, com o findar progressivo da crise económica, o decréscimo de emissões que se vem a registar de 2005, tem vindo a ser contrariado.

Assim sendo, a necessidade de prever o grau de cumprimento das metas nacionais no âmbito do Protocolo de Quioto de forma a permitir o reforço atempado das políticas e medidas de combate às alterações climáticas é de extrema importância.

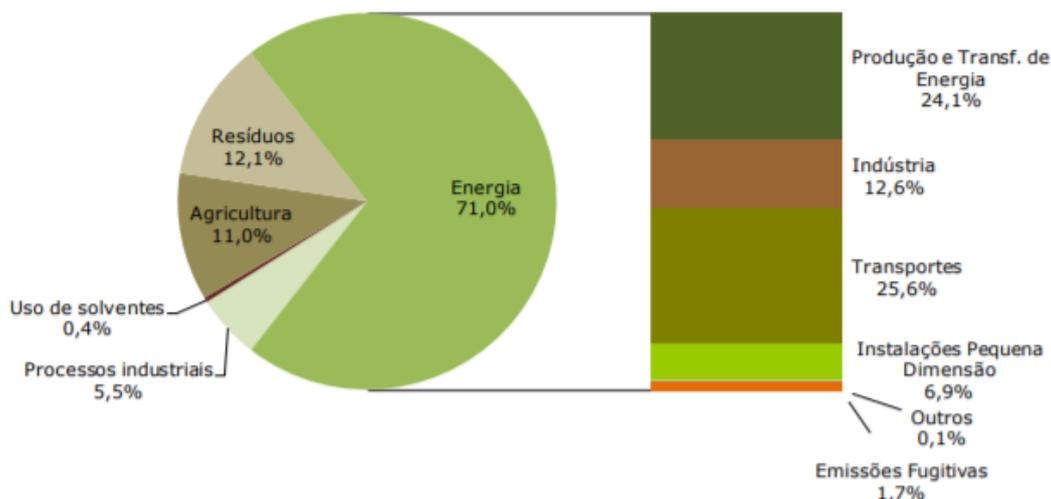


Figura 20 – Emissões dos principais GHG em 2011 por setor de atividade (APA, 2013)

O dióxido de carbono, o metano e o vapor de água existem naturalmente na atmosfera, absorvendo a radiação proveniente do Sol e sobretudo a que é refletida pela superfície da Terra. Sendo bons absorventes de radiação, aumentam a temperatura da baixa atmosfera aproximadamente mais 33°C do que se não existissem estes gases e nuvens, permitindo a existência de vida no planeta. O crescente aumento de emissões de gases com efeito de estufa (GHG) como o dióxido de carbono, o metano, mas também o óxido de nitroso, entre outros, tem vindo a aumentar a capacidade da atmosfera de absorver radiação, amplificando o efeito de estufa natural já existente e, conseqüentemente, aumentando as temperaturas globais.

As conseqüências específicas das mudanças climáticas globais e regionais devido ao aumento da temperatura são incertas. Ultimamente, modelos de computador foram desenvolvidos, demonstrando maior intensidade, assim como frequência de tempestades.

O potencial aquecimento global ou efeito estufa é quantificado pelo uso de potenciais de aquecimento global (GWP) para substâncias com o mesmo efeito que o CO<sub>2</sub>. Os GWP são normalmente baseados em modelagem e são quantificados para horizontes temporais de 20, 100 ou 500 anos para vários gases de efeito estufa conhecidos.

O potencial efeito estufa de um produto/processo pode ser estimado pelo cálculo do produto da quantidade de gás de efeito estufa emitido por unidade funcional e o potencial de efeito estufa fornecido em kg CO<sub>2</sub>-eq.

#### **3.3.1.4. Toxicidade humana**

A categoria de impacto toxicidade humana aborda os impactos sobre a saúde humana, ocasionados por substâncias tóxicas presentes no meio ambiente. A avaliação dos riscos ambientais ou para a saúde humana associados à presença de uma substância química ou produtos químicos no meio ambiente é uma questão delicada, uma vez que o risco é determinado pela relação combinada entre exposição e toxicidade. Na prática, os níveis devem ser estimados para trabalhos e ambientes específicos para avaliar a exposição sustentada a toxinas ou toxicidade crônica, precisando ser adaptados a diferentes condições. Para substâncias identificadas como potenciais substâncias tóxicas persistentes, deve-se proceder ao desenvolvimento de uma avaliação rápida de toxicidade: produção, potenciais rotas de exposição, transporte, destino e ocorrência, ou seja, uma caracterização qualitativa de risco (UNEP Chemicals - United Nations Environment Programme, 2002).

#### **3.3.1.5. Formação foto-oxidante**

A formação de oxidantes fotoquímicos (ou smog fotoquímico) refere-se a um fenômeno que ocorre sob certas condições atmosféricas quando emissões primárias estão presentes na atmosfera, mais precisamente, refere-se à mistura de ozono e produtos intermediários de reação, como por exemplo, o nitrato de peroxiacetila (PAN), que são formados na atmosfera inferior sob a influência da radiação solar nas faixas espectrais visíveis e próximas do UV (Pennington et al., 2004). É particularmente comum em ar relativamente estagnado quando há luz solar e baixa umidade, e na presença de óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis (VOCs, excluindo o metano). Quando VOCs também estão presentes, os radicais peróxidos podem ser produzidos. Tratando-se de compostos altamente reativos e tóxicos, a presença de radicais peróxi pode resultar em um aumento da concentração de ozono através de um padrão de reação complexo. O ozono troposférico, ou ozono ao nível do solo, foi reconhecido como uma das mais importantes ameaças ambientais à escala regional. Em altas concentrações, é perigoso para a saúde humana, mas já em concentrações mais baixas, causa danos à vegetação.

A unidade de potencial de formação foto-oxidante é gramas de etileno equivalente por g de gás ( $\text{g C}_2\text{H}_4$ ). O etileno foi escolhido como o gás de referência, uma vez que é um dos mais potentes precursores de ozono de todos os VOCs.

### **3.3.1.6. Ecotoxicidade**

Um efeito ecotoxicológico é uma alteração adversa na estrutura ou função de um ecossistema como resultado da exposição a um produto químico (Pennington et al., 2004). A avaliação da ecotoxicidade é conseguida através da análise de respostas específicas de determinadas espécies a produtos tóxicos ou de impactos. Específica e relativamente à ecotoxicidade aquática, a descarga de efluentes líquidos, mesmo que tratados, de forma contínua no ambiente aquático, pode causar efeitos crónicos. Tal advém de os organismos apesar de expostos a baixas concentrações de determinados poluentes, estas decorrem durante longos períodos de tempo. Se estes poluentes forem degradáveis, ocorrerá equilíbrio a uma certa distância do ponto de lançamento, mas na área circundante os organismos poderão ter dificuldades em manterem-se no ambiente, levando a alterações na estrutura e funcionamento do ecossistema.

### **3.3.1.7. Depleção dos materiais e de combustíveis fósseis**

Com os crescentes hábitos de consumo das sociedades modernas, questões como a escassez de recursos naturais tornaram-se temas preocupantes que exigem uma resolução urgente. Por outro lado, o número reduzido de locais adequados para a deposição dos resíduos obriga a que se tomem medidas para diminuir a quantidade de resíduos que têm como fim o aterro.

Para promover a dissociação entre o crescimento económico e o aumento no consumo de recursos inspirando-se nos mecanismos dos ecossistemas naturais, que geram os recursos a longo prazo num processo contínuo de reabsorção e reciclagem, é necessário inventariar o impacto da depleção dos sistemas de produção e consumo, com o intuito de minimizar a extração de recursos, maximizar a reutilização e aumentar da eficiência.

## **3.3.2. Classificação**

No presente estudo, os indicadores de impacto considerados para cada categoria estão compilados na tabela que se segue. É de notar que a unidade funcional depende da atividade, podendo não ser, portanto, igual para a mesma categoria de impacto em duas fases/sub-fases de análise distintas. Por exemplo, para a categoria aquecimento global na Fase 1 relativamente à produção de agregados, a unidade funcional é kg/tonelada de agregado, em contrapartida para a Fase 3 a unidade funcional é kg/km.

Tabela 27 – Classificação e caracterização (adaptado de Huang, Bird, &amp; Heidrich, 2009)

Categoria de impacto		Resultados do inventário: Indicadores de categoria
<b>Aquecimento global (GWP)</b>		Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )
		Metano (CH <sub>4</sub> )
		Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)
<b>Acidificação</b>		Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> )
		Óxidos de nitrogénio (NO <sub>x</sub> )
<b>Depleção dos materiais</b>		Material (ton)
<b>Depleção dos combustíveis fósseis</b>		Energia (GJ)
<b>Formação de foto-oxidante (ozono ao nível do solo ou nevoeiro)</b>		Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> )
		Óxidos de nitrogénio (NO <sub>x</sub> )
		Monóxido de carbono (CO)
		Metano (CH <sub>4</sub> )
		Composto orgânico volátil não metano (NMVOC)
<b>Toxicidade humana</b>	Emissões atmosféricas (HHCR)	Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> )
		Óxidos de nitrogénio (NO <sub>x</sub> )
		Monóxido de carbono (CO)
		HC [PAH cancerígenos (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos)]
		Composto orgânico volátil não metano (NMVOC)
		Partículas materiais (PM10)
	Emissões para a água	Metais pesados: Arsénio (As), Cádmio (Cd), Mercúrio (Hg) e Chumbo (Pb)
		HC [PAH cancerígenos (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos)]
		Metais pesados: Arsénio (As), Cádmio (Cd), Mercúrio (Hg) e Chumbo (Pb)
<b>Eco-toxicidade</b>	Emissões atmosféricas (SMOG)	Composto orgânico volátil não metano (NMVOC)
		HC [PAH cancerígenos (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos)]

Categoria de impacto	Resultados do inventário: Indicadores de categoria	
		Metais pesados [Arsénio (As), Cádmio (Cd), Mercúrio (Hg) e Chumbo (Pb)]
Emissões para a água	HC [PAH cancerígenos (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos)]	
	Metais pesados [Arsénio (As), Cádmio (Cd), Mercúrio (Hg) e Chumbo (Pb)]	
<b>Eutrofização</b>	Óxidos de nitrogénio (NO <sub>x</sub> )	
	Amoníaco (NH <sub>3</sub> )	
	Chemical Oxygen Demand (COD)	
	Fósforo (P)	
	Nitrogénio (N)	

### 3.3.3. Caracterização

Após a enumeração dos fluxos que contribuem para cada categoria de impacto, as contribuições de cada fluxo são agregadas através da conversão de cada indicador de categoria numa escala equivalente. Para tal recorre-se a fatores de caracterização. A agregação baseia-se numa análise científica tradicional dos processos ambientais relevantes.

Tabela 28 – Fatores de caracterização (Huang et al., 2009; Mazumder et al., 2016)

Categoria de impacto	Indicadores de categoria	Fator de caracterização
<b>Aquecimento global (GWP)</b>	CO <sub>2</sub>	1
	CH <sub>4</sub>	23
	N <sub>2</sub> O	296
<b>Acidificação</b>	SO <sub>2</sub>	1
	NO <sub>x</sub>	0,7
<b>Depleção dos materiais</b>	ton	1
<b>Depleção dos combustíveis fósseis</b>	GJ	1

Categoria de impacto		Indicadores de categoria	Fator de caracterização		
<b>Formação de foto-oxidante (ozono ao nível do solo ou nevoeiro)</b>		SO <sub>2</sub>	0,048		
		NO <sub>x</sub>	0,028		
		CO	0,027		
		CH <sub>4</sub>	0,006		
		NMVOC	1		
<b>Toxicidade humana</b>	Emissões atmosféricas	SO <sub>2</sub>	0,096		
		NO <sub>x</sub>	1,2		
		CO	2,4		
		HC	570000		
		NMVOC	0,64		
		PM10	0,82		
		Metais pesados: As, Cd, Hg e Pb	510000		
	Emissões para a água	HC	280000		
		Metais pesados	As	950,6	
			Cd	22,9	
			Hg	1426	
			Pb	12,3	
		<b>Eco-toxicidade</b>	Emissões atmosféricas	NMVOC	3,2x10 <sup>-11</sup>
				HC	1480
Metais pesados	As			78000	
	Cd			370000	
	Hg			410000	
	Pb		2400		
Emissões para a água	HC		11000		
	Metais pesados		As	40000	
			Cd	74000	
			Hg	72000	
		Pb	370		

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Indicadores de categoria</b>	<b>Fator de caracterização</b>
<b>Eutrofização</b>	NO <sub>x</sub>	0,13
	NH <sub>3</sub>	0,35
	COD	0,022
	P	3,07
	N	0,42

### 3.3.3.1. Fase 1 - Extração de matérias-primas e produção de misturas

Em primeira análise, com base na estrutura pré-estabelecida, para a categoria de impacto depleção dos materiais, é necessário chegar à quantidade de material presente em cada camada de pavimento. Relativamente às camadas betuminosas, camadas de desgaste, regularização e base, foi considerado que para 1000 toneladas de HMA são necessárias 60 toneladas de betume e 940 toneladas de agregado. Posteriormente, com o estipular do parâmetro “peso específico” do material e sabendo o volume que cada camada ocupa num km de estrada foi possível chegar à quantidade de material utilizada. As etapas para chegar à quantidade de material em toneladas estão detalhadas nas Tabelas 29 e 30.

Tabela 29 – Volume de material por camada

<b>Estrutura</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	<b>Largura (m)</b>	<b>Volume de material (m<sup>3</sup>)</b>
	Camada de desgaste	0,04		340
<b>Camadas betuminosas</b>	Camada de regularização/ ligação	0,06	1000	8,5
	Camada base	0,09		765
<b>Sub-base</b>	0,4			3400

Tabela 30 – Quantidade de material por camada

Estrutura	Material	Volume total (m <sup>3</sup> )	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Quantidade (%)	Quantidade (ton)
Camadas betuminosas	Agregado	1615	2650	94	4022,97
	Betume		1025	6	99,32
	HMA		2552,5	100	4122,29
Sub-base	Agregado	3400	2650	100	9010

É de realçar que no presente estudo não se considera o impacto da movimentação de solo.

Tabela 31 – Impacto total por categoria de impacto para a Fase 1

Categoria de Impacto		Valores finais da análise de inventário (por ton.)	Impacto por km dos vários componentes	Impacto total por km para cada categoria	Escala equivalente
Depleção dos materiais	Agregados (camadas betuminosas)	-	4023,0	13132,3	toneladas
	Betume	-	99,3		
	HMA	-	4122,3		
	Agregados (sub-base)	-	9010,0		
Aquecimento global	Agregados (camadas betuminosas)	2,1	8486,8	202149,1	kg CO <sub>2</sub> -eq.
	Betume	330,0	32779,6		
	HMA	34,4	141875,3		
	Agregados (sub-base)	2,1	19007,4		
Depleção dos combustíveis fósseis	Agregados (camadas betuminosas)	52	209194,2	2596,9	GJ
	Betume	6000	595935,0		
	HMA	321	1323254,3		
	Agregados (sub-base)	52	468520,0		

Categoria de Impacto		Valores finais da análise de inventário (por ton.)	Impacto por km dos vários componentes	Impacto total por km para cada categoria	Escala equivalente	
Toxicidade humana	Emissões atmosféricas	Agregados (camadas betuminosas)	497,7	2002390,6	14499925,0	kg 1,4-dichlorobenzene-eq
		Betume	17503,0	1738445,7		
		HMA	1522,1	6274451,4		
		Agregados (sub-base)	497,7	4484637,4		
	Emissões para a água	Agregados (camadas betuminosas)	$2 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-1}$	194129,7	kg 1,4-dichlorobenzene-eq
		Betume	560	55620,6		
		HMA	33,6	138508,9		
		Agregados (sub-base)	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-1}$		
Acidificação	Agregados (camadas betuminosas)	$1,49 \times 10^{-2}$	59,9	1030,1	kg SO <sub>2</sub> -eq	
	Betume	2,83	281,1			
	HMA	$1,35 \times 10^{-1}$	554,9			
	Agregados (sub-base)	$1,49 \times 10^{-2}$	134,2			
Formação foto-oxidante	Agregados (camadas betuminosas)	$1 \times 10^{-3}$	4,0	49,9	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq	
	Betume	$1,22 \times 10^{-1}$	12,1			
	HMA	$6 \times 10^{-3}$	24,7			
	Agregados (sub-base)	$1 \times 10^{-3}$	9,0			
Eco toxicidade	Emissões atmosféricas	Agregados (camadas betuminosas)	1,3	5209,7	37679,9	kg 1,4-dichlorobenzene-eq
		Betume	45,4	4512,8		
		HMA	3,9	16289,6		
		Agregados (sub-base)	1,3	11667,8		

Categoria de Impacto		Valores finais da análise de inventário (por ton.)	Impacto por km dos vários componentes	Impacto total por km para cada categoria	Escala equivalente
Emissões para a água	Agregados (camadas betuminosas)	$1,01 \times 10^{-3}$	4,0	7639,6	kg 1,4-dichlorobenzene-eq
	Betume	22	2185,1		
	HMA	1,32	5441,4		
	Agregados (sub-base)	$1,01 \times 10^{-3}$	9,1		
Eutrofização	Agregados (camadas betuminosas)	$1,56 \times 10^{-3}$	6,3	126,5	kg PO4-eq
	Betume	$3,93 \times 10^{-1}$	39,0		
	HMA	$1,63 \times 10^{-2}$	67,2		
	Agregados (sub-base)	$1,56 \times 10^{-3}$	14,1		

### 3.3.3.2. Fase 2 - Construção

A fase de construção é composta pela compilação dos impactos que advêm de vários processos construtivos específicos desenvolvidos nesta fase. Deste modo, no presente estudo apresentam-se os impactos por categoria de impacto para cada sub-fase. Após a determinação da totalidade dos impactos, estes são compilados numa tabela geral representativa da fase 2.

- **Escavação de valas na estrada**

A unidade de inventário da sub-fase: escavação de valas na estrada é metro de vala escavada, assim sendo para 1 km de estrada analisa-se o impacto provocado pela escavação de 1000 metros de vala.

Tabela 32 – Impacto por km da escavação de valas na estrada

Categoria de Impacto		Valores finais da análise de inventário (por m de vala escavada)	Impacto por km dos vários componentes
<b>Depleção dos materiais</b>		-	1000
<b>Aquecimento global</b>		1,41	1408,40
<b>Depleção dos combustíveis fósseis</b>		19,4	19400
<b>Toxicidade humana</b>	Emissões atmosféricas	581,99	581995,13
	Emissões para a água	0	0
<b>Acidificação</b>		$9,49 \times 10^{-3}$	9,49
<b>Formação foto-oxidante</b>		$4,26 \times 10^{-4}$	$4,26 \times 10^{-1}$
<b>Eco toxicidade</b>	Emissões atmosféricas	1,34	1343,84
	Emissões para a água	0	0
<b>Eutrofização</b>		$1,64 \times 10^{-3}$	1,64

- **Escavação da sub-base e da camada base com escavadora de classe 4**

Sabendo que as camadas base e sub-base têm espessuras de 9cm e 40cm, respetivamente, e considerado que a largura de escavação é de 9,5m, o volume de movimentações para 1km de estrada resulta da multiplicação da espessura das duas camadas por a largura da estrada e por o comprimento da mesma em análise.

Tabela 33 – Impacto por km da escavação da sub-base e da camada base

Categoria de Impacto	Valores finais da análise de inventário (por m <sup>3</sup> )	Impacto por km dos vários componentes
<b>Depleção dos materiais</b>	-	4655
<b>Aquecimento global</b>	$3,16 \times 10^{-1}$	1470,47
<b>Depleção dos combustíveis fósseis</b>	4,38	20388,9

Categoria de Impacto		Valores finais da análise de inventário (por m <sup>3</sup> )	Impacto por km dos vários componentes
<b>Toxicidade humana</b>	Emissões atmosféricas	116,85	543956,90
	Emissões para a água	0	0
<b>Acidificação</b>		2,14x10 <sup>-3</sup>	9,96
<b>Formação foto-oxidante</b>		9,59x10 <sup>-5</sup>	4,47x10 <sup>-1</sup>
<b>Eco toxicidade</b>	Emissões atmosféricas	3,03x10 <sup>-1</sup>	1412,33
	Emissões para a água	0	0
<b>Eutrofização</b>		3,70x10 <sup>-4</sup>	1,72

- **Sub-base: Carregamento de rocha explodida com escavadora**

Para calcular a quantidade de material a movimentar, em toneladas, aquando a escavação da sub-base, à semelhança do tópico anterior, calculou-se o volume de material presente na camada sub-base. Por sua vez, com recurso à Tabela 15 – Valores indicativos das densidades de materiais manuseados em trabalho rodoviário (adaptado de Stripple, 2001), retirou-se o volume “*in situ*” que a rocha explodida representa, 2670 kg/m<sup>3</sup>, o que permitiu conhecer o impacto de depleção de material.

Tabela 34 – Impacto por km do carregamento de rocha

Categoria de Impacto		Valores finais da análise de inventário (por ton. de rocha explodida)	Impacto por km dos vários componentes
<b>Depleção dos materiais</b>		-	10146
<b>Aquecimento global</b>		1,63x10 <sup>-1</sup>	1653,53
<b>Depleção dos combustíveis fósseis</b>		2,26	22929,96
<b>Toxicidade humana</b>	Emissões atmosféricas	59,85	607260,7
	Emissões para a água	0	0
<b>Acidificação</b>		1,10x10 <sup>-3</sup>	11,16

Categoria de Impacto		Valores finais da análise de inventário (por ton. de rocha explodida)	Impacto por km dos vários componentes
<b>Formação foto-oxidante</b>		4,93x10 <sup>-5</sup>	5,01x10 <sup>-1</sup>
<b>Eco toxicidade</b>	Emissões atmosféricas	1,55x10 <sup>-1</sup>	1576,69
	Emissões para a água	0	0
<b>Eutrofização</b>		1,90x10 <sup>-4</sup>	1,93

- **Construção da sub-base**

Sabendo o volume que a camada ocupa no km de estrada em análise e que esta será construída com recurso a agregado britado, através da Tabela 15 – Valores indicativos das densidades de materiais manuseados em trabalho rodoviário (adaptado de Stripple, 2001), retira-se o volume “*in situ*” do agregado seco, 1470 kg/m<sup>3</sup>, que à semelhança do tópico anteriormente descrito, permite conhecer as toneladas de material necessárias para a construção da camada.

Tabela 35 – Impacto por km na construção da sub-base

Categoria de Impacto		Valores finais da análise de inventário (por ton.)	Impacto por km dos vários componentes
<b>Depleção dos materiais</b>		-	5586
<b>Aquecimento global</b>		5,58x10 <sup>-1</sup>	3118,79
<b>Depleção dos combustíveis fósseis</b>		7,72	43123,92
<b>Toxicidade humana</b>	Emissões atmosféricas	205,78	1149473,88
	Emissões para a água	0	0
<b>Acidificação</b>		3,77x10 <sup>-3</sup>	21,08
<b>Formação foto-oxidante</b>		1,69244x10 <sup>-4</sup>	9,45x10 <sup>-1</sup>
<b>Eco toxicidade</b>	Emissões atmosféricas	5,34x10 <sup>-1</sup>	2984,48
	Emissões para a água	0	0
<b>Eutrofização</b>		6,52x10 <sup>-4</sup>	3,64

- **Aplicação da rega de colagem**

A fim de melhorar o desempenho de um pavimento rodoviário recorre-se à aplicação de ligante, geralmente emulsão betuminosa, para garantir que as camadas de pavimento se comportem como um sistema único no suporte de cargas provenientes do tráfego rodoviário.



Figura 21 – Pavimentadora com tanque de emulsão betuminosa e barra de pulverização (Wang, Xiao, Chen, Li, & Amirkhanian, 2017)

Na determinação do impacto que provém da aplicação das camadas de adesão sobre cada categoria de impacto teve-se em atenção que estamos a analisar uma estrutura de pavimento constituída por três camadas betuminosas. Assim sendo, para o km em análise é considerada a aplicação de duas camadas de emulsão betuminosa.

Uma vez que a unidade de inventário é “m<sup>2</sup> de superfície aplicada” então para o cálculo multiplicara-se duas vezes a área da superfície do pavimento do troço de 1 km em análise.

Tabela 36 – Impacto por km na aplicação da camada de adesão

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Valores finais da análise de inventário (por m<sup>2</sup>)</b>	<b>Impacto por km dos vários componentes</b>
<b>Depleção dos materiais</b>	-	19000
<b>Aquecimento global</b>	8,93x10 <sup>-3</sup>	169,73

Categoria de Impacto		Valores finais da análise de inventário (por m <sup>2</sup> )	Impacto por km dos vários componentes
<b>Depleção dos combustíveis fósseis</b>		1,94x10 <sup>-1</sup>	3683,11
<b>Toxicidade humana</b>	Emissões atmosféricas	9,86x10 <sup>-1</sup>	18737,45
	Emissões para a água	2,8x10 <sup>-2</sup>	532
<b>Acidificação</b>		6,818x10 <sup>-5</sup>	1,30
<b>Formação foto-oxidante</b>		3,13x10 <sup>-6</sup>	5,95x10 <sup>-2</sup>
<b>Eco toxicidade</b>	Emissões atmosféricas	2,56x10 <sup>-3</sup>	48,65
	Emissões para a água	1,1x10 <sup>-3</sup>	20,9
<b>Eutrofização</b>		7,73x10 <sup>-6</sup>	1,47 x10 <sup>-1</sup>

- **Pavimentação das camadas de mistura betuminosa**

Na presente sub-fase sabendo que a estrutura de pavimento é composta por 3 camadas betuminosas, para a análise de impacto que advém do processo de pavimentação considerou-se o impacto multiplicado três vezes.

Tabela 37 – Impacto por km na pavimentação das camadas betuminosas

Categoria de Impacto		Valores finais da análise de inventário (por m <sup>2</sup> )	Impacto por km dos vários componentes
<b>Depleção dos materiais</b>		-	28500
<b>Aquecimento global</b>		4,72x10 <sup>-2</sup>	1344,68
<b>Depleção dos combustíveis fósseis</b>		6,53x10 <sup>-1</sup>	18610,5
<b>Toxicidade humana</b>	Emissões atmosféricas	17,39	495490,92
	Emissões para a água	0	0
<b>Acidificação</b>		3,19x10 <sup>-4</sup>	9,10
<b>Formação foto-oxidante</b>		1,43x10 <sup>-5</sup>	4,08x10 <sup>-1</sup>

Categoria de Impacto		Valores finais da análise de inventário (por m <sup>2</sup> )	Impacto por km dos vários componentes
<b>Eco toxicidade</b>	Emissões atmosféricas	4,51x10 <sup>-2</sup>	1286,49
	Emissões para a água	0	0
<b>Eutrofização</b>		5,52x10 <sup>-5</sup>	1,57

- **Cilindro de compactação de misturas betuminosas**

De igual modo, o recurso ao cilindro de compactação foi contabilizado três vezes sobre o km de estrada em análise.

Tabela 38 – Impacto por km do recurso ao cilindro de compactação

Categoria de Impacto		Valores finais da análise de inventário (por m <sup>2</sup> )	Impacto por km dos vários componentes
<b>Depleção dos materiais</b>		-	28500
<b>Aquecimento global</b>		6,35x10 <sup>-2</sup>	1809,17
<b>Depleção dos combustíveis fósseis</b>		8,79x10 <sup>-1</sup>	25051,50
<b>Toxicidade humana</b>	Emissões atmosféricas	23,43	667694,26
	Emissões para a água	0	0
<b>Acidificação</b>		4,294x10 <sup>-4</sup>	12,24
<b>Formação foto-oxidante</b>		1,93x10 <sup>-5</sup>	5,49x10 <sup>-1</sup>
<b>Eco toxicidade</b>	Emissões atmosféricas	6,08x10 <sup>-2</sup>	1733,60
	Emissões para a água	0	0
<b>Eutrofização</b>		7,42x10 <sup>-5</sup>	2,11

- **Compactação**

Os impactos que provêm da compactação foram considerados para as quatro camadas que compõem a estrutura do pavimento.

Tabela 39 – Impacto por km na compactação

Categoria de Impacto		Valores finais da análise de inventário (por m <sup>2</sup> )	Impacto por km dos vários componentes
<b>Depleção dos materiais</b>		-	38000
<b>Aquecimento global</b>		4,99x10 <sup>-2</sup>	1896,08
<b>Depleção dos combustíveis fósseis</b>		6,91x10 <sup>-1</sup>	26258
<b>Toxicidade humana</b>	Emissões atmosféricas	18,41	699644
	Emissões para a água	0	0
<b>Acidificação</b>		3,38x10 <sup>-4</sup>	12,85
<b>Formação foto-oxidante</b>		1,52x10 <sup>-5</sup>	5,76x10 <sup>-1</sup>
<b>Eco toxicidade</b>	Emissões atmosféricas	4,78x10 <sup>-2</sup>	1816,55
	Emissões para a água	0	0
<b>Eutrofização</b>		5,84x10 <sup>-5</sup>	2,22

Os impactos calculados para cada sub-fase do processo de construção do pavimento considerado são de seguida compilados na Tabela 40.

Tabela 40 – Impacto total por categoria de impacto para a Fase 2

Categoria de Impacto		Impacto total por km para cada categoria	Escala equivalente
<b>Depleção dos materiais</b>		-	toneladas
<b>Aquecimento global</b>		12870,85	kg CO <sub>2</sub> -eq.
<b>Depleção dos combustíveis fósseis</b>		179,45	GJ
<b>Toxicidade humana</b>	Emissões atmosféricas	4764253,24	kg 1,4-dichlorobenzene-eq
	Emissões para a água	532	kg 1,4-dichlorobenzene-eq
<b>Acidificação</b>		87,18	kg SO <sub>2</sub> -eq
<b>Formação foto-oxidante</b>		3,91	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq

Categoria de Impacto		Impacto total por km para cada categoria	Escala equivalente
<b>Eco toxicidade</b>	Emissões atmosféricas	12202,63	kg 1,4-dichlorobenzene-eq
	Emissões para a água	20,90	kg 1,4-dichlorobenzene-eq
<b>Eutrofização</b>		14,99	kg PO4-eq

### 3.3.3.3. Fase 3 - Utilização

Os encargos ambientais utilizados para a fase de utilização do troço de estrada em estudo provêm apenas de Häkkinen & Mäkelä (1996). Nestes dados de inventário estão contemplados os impactos da iluminação da estrada ao longo de 50 anos com base no consumo estimado de eletricidade durante esse período e os encargos ambientais que advêm das emissões libertadas pelo tráfego rodoviário e as emissões para perturbação do mesmo ao longo dos 50 anos. É de destacar que o impacto das sub-fases é por km de estrada assim sendo os valores de inventário traduzem o impacto final por km.

Tabela 41 – Impacto total por categoria de impacto para a Fase 3

Categoria de Impacto		Impacto por km dos vários componentes	Impacto total por km para cada categoria	Escala equivalente
<b>Depleção dos materiais</b>	Iluminação	-	-	toneladas
	Perturbação do tráfego	-		
	Tráfego	-		
<b>Aquecimento global</b>	Iluminação	427600	102592869	kg CO2-eq.
	Perturbação do tráfego	3269		
	Tráfego	102162000		
<b>Depleção dos combustíveis fósseis</b>	Iluminação	14000	1514,046	GJ
	Perturbação do tráfego	46		
	Tráfego	1500000		

Categoria de Impacto		Impacto por km dos vários componentes	Impacto total por km para cada categoria	Escala equivalente	
Toxicidade humana	Emissões atmosféricas	Iluminação	1257182,4	kg 1,4-dichlorobenzene-eq	
		Perturbação do tráfego	138,99		
		Tráfego	4389093		
	Emissões para a água	Iluminação	0		
		Perturbação do tráfego	$4,18 \times 10^{-3}$		135,29
		Tráfego	135,28		
Acidificação	Iluminação	3020	1723073,8	kg SO <sub>2</sub> -eq	
	Perturbação do tráfego	53,8			
	Tráfego	1720000			
Formação foto-oxidante	Iluminação	155,35	80931,90	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq	
	Perturbação do tráfego	2,5482			
	Tráfego	80774			
Eco toxicidade	Emissões atmosféricas	Iluminação	0	kg 1,4-dichlorobenzene-eq	
		Perturbação do tráfego	0,61		
		Tráfego	19183		
	Emissões para a água	Iluminação	0		
		Perturbação do tráfego	0,21		6589,81
		Tráfego	6589,6		
Eutrofização	Iluminação	208	299217,36	kg PO <sub>4</sub> -eq	
	Perturbação do tráfego	9,36			
	Tráfego	299000			

### 3.3.3.4. Fase 4 - Manutenção

Tendo como base os valores da fase: estratégia de manutenção expostos no tópico inventário do ciclo de vida 3.2.3.11 provenientes de Häkkinen & Mäkelä (1996), procede-se na Tabela 42 à catalogação das emissões por categoria de impacto. É de destacar que o impacto das sub-fases é por km de estrada, assim sendo, os valores de inventário traduzem o impacto final por km.

Tabela 42 – Impacto total por categoria de impacto para a Fase 4

Categoria de Impacto		Impacto total por km para cada categoria	Escala equivalente
<b>Depleção dos materiais</b>		-	toneladas
<b>Aquecimento global</b>		27450,00	kg CO2-eq.
<b>Depleção dos combustíveis fósseis</b>		470,00	GJ
<b>Toxicidade humana</b>	Emissões atmosféricas	597,25	kg 1,4-dichlorobenzene-eq
	Emissões para a água	$7 \times 10^{-2}$	kg 1,4-dichlorobenzene-eq
<b>Acidificação</b>		72,90	kg SO2-eq
<b>Formação foto-oxidante</b>		154,22	kg C2H4-eq
<b>Eco toxicidade</b>	Emissões atmosféricas	10,00	kg 1,4-dichlorobenzene-eq
	Emissões para a água	3,41	kg 1,4-dichlorobenzene-eq
<b>Eutrofização</b>		13,00	kg PO4-eq

### 3.3.3.5. Discussão de resultados

Nos gráficos que se seguem apresentam-se quantificadas as cargas de cada fase do ciclo de vida do pavimento por categoria de impacto.

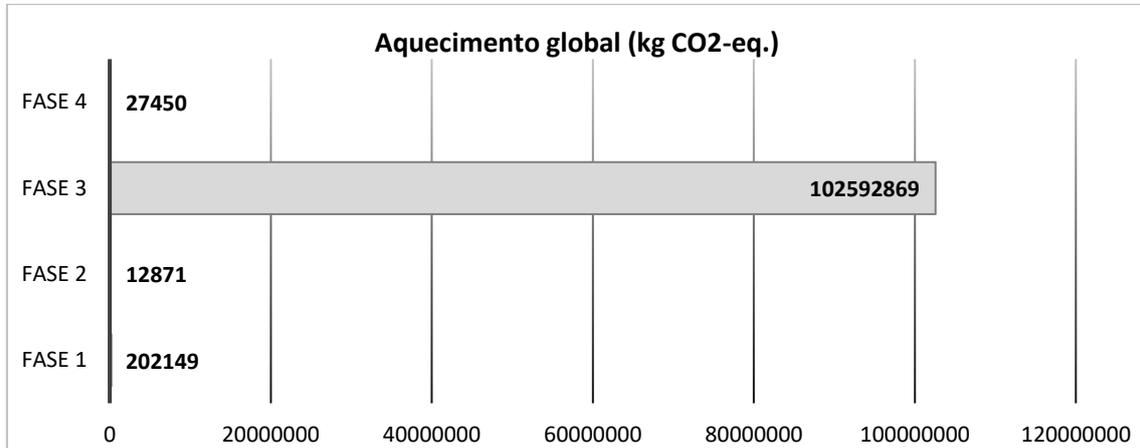


Figura 22 – Quantificação da categoria de impacto aquecimento global (kg CO<sub>2</sub>-eq)

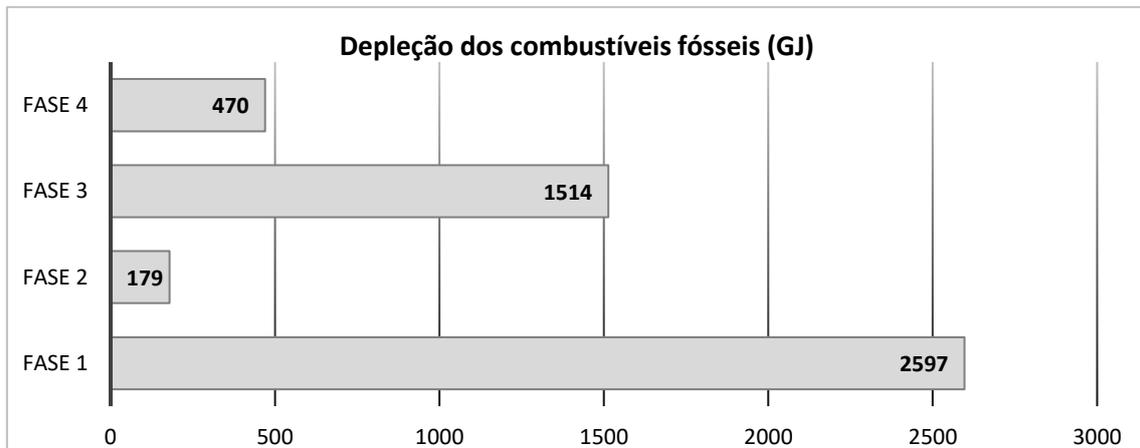


Figura 23 – Quantificação da categoria de impacto depleção dos combustíveis fósseis (GJ)

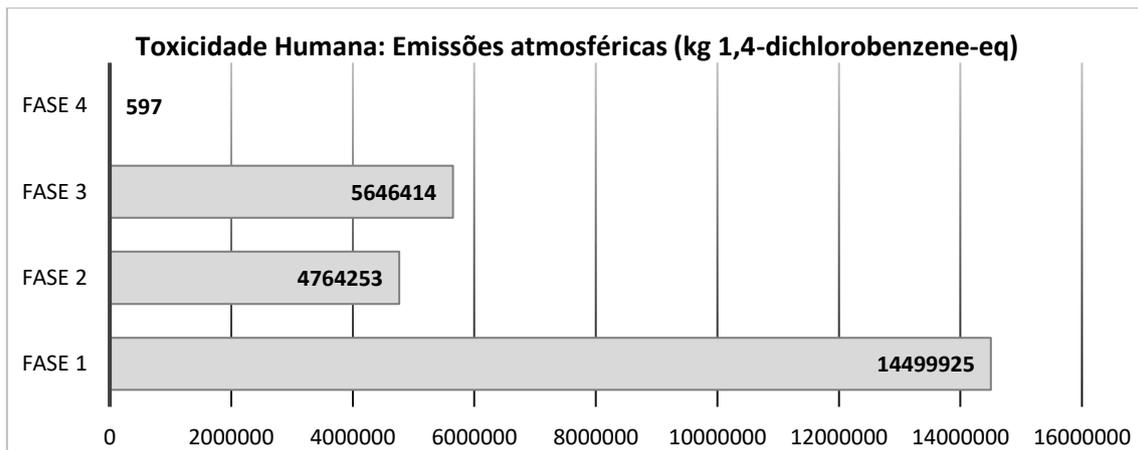


Figura 24 – Quantificação da categoria de impacto toxicidade humana: emissões atmosféricas (kg 1,4-dichlorobenzene-eq)

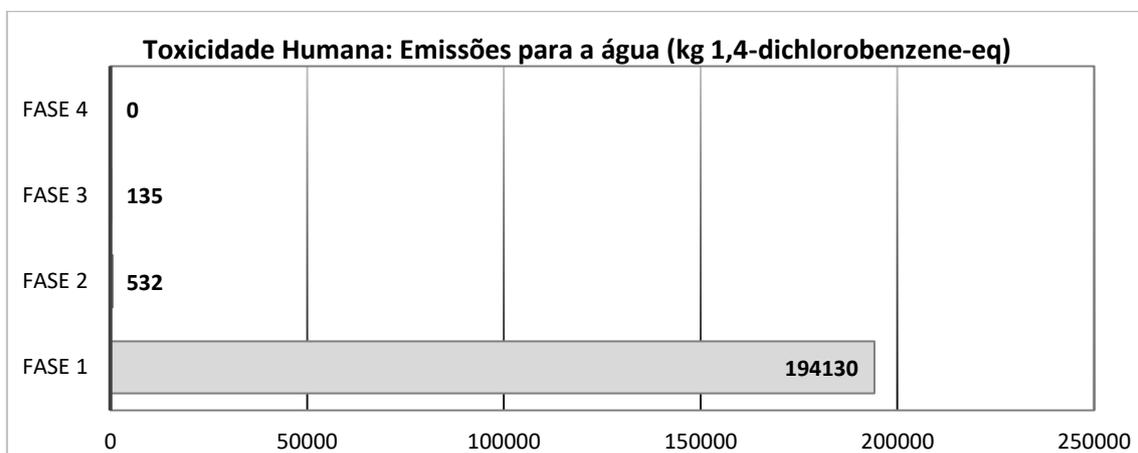


Figura 25 – Quantificação da categoria de impacto toxicidade humana: emissões para a água (kg 1,4-dichlorobenzene-eq)

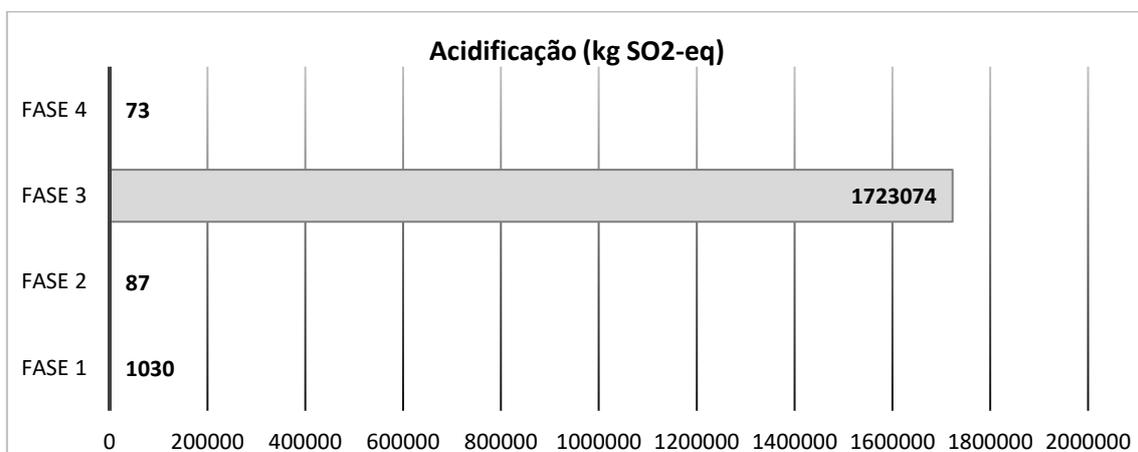


Figura 26 – Quantificação da categoria de impacto acidificação (kg SO<sub>2</sub>-eq)

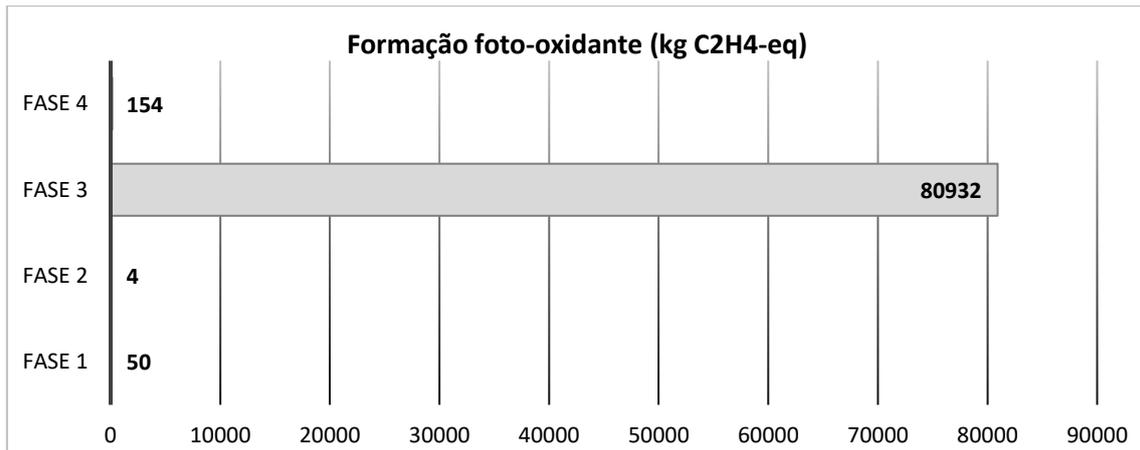


Figura 27 – Quantificação da categoria de impacto formação foto-oxidante (kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq)

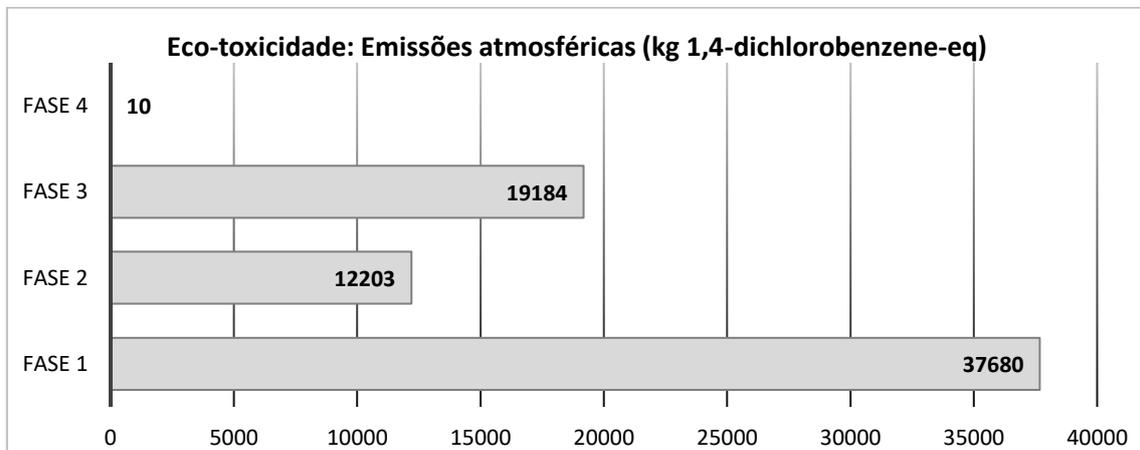


Figura 28 – Quantificação da categoria de impacto eco-toxicidade: emissões atmosféricas (kg 1,4-dichlorobenzene-eq)

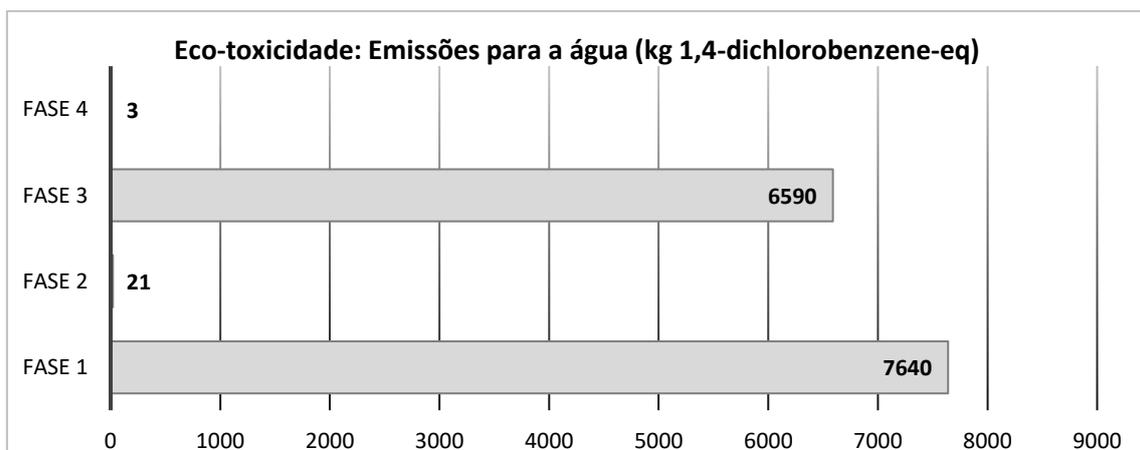


Figura 29 – Quantificação da categoria de impacto eco-toxicidade: emissões para a água (kg 1,4-dichlorobenzene-eq)

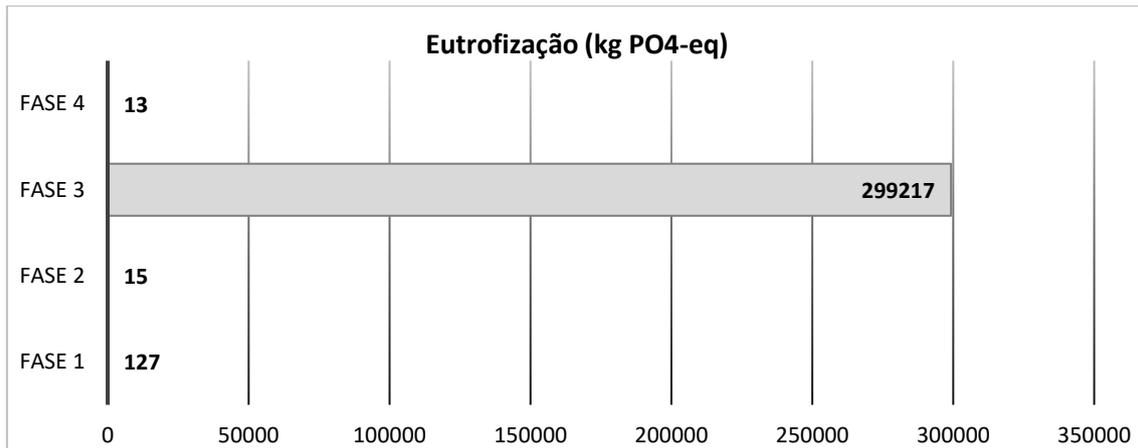


Figura 30 – Quantificação da categoria de impacto eutrofização (kg PO<sub>4</sub>-eq)

Entre estas quatro fases do ciclo de vida, a fase da extração de matérias primas e produção de mistura betuminosa, Fase 1, é a principal fonte de poluentes nocivos em termos de toxicidade humana e toxicidade ecológica. Além disso, esta fase consome uma maior quantidade de matérias primas que por sua vez provoca a depleção/ esgotamento de materiais. Esta fase é responsável por aproximadamente 60% da toxicidade humana atmosférica e quase a totalidade da toxicidade humana na água.

De igual modo, apresenta um papel preponderante na categoria de impacto eco-toxicidade, representando cerca de 55% das emissões atmosféricas e 54% das emissões para a água.

A fase de utilização, Fase 3, que combina o tráfego ao longo do tempo de vida útil da via, a interrupção do mesmo durante atividades de manutenção e a iluminação pública, tem um impacto mais significativo em termos de aquecimento global, acidificação, formação foto-oxidante e eutrofização. Esta fase é responsável por cerca de 23% dos impactos da toxicidade humana atmosférica e de 28% dos impactos da eco-toxicidade atmosférica.

A fase de manutenção é responsável por cerca de 10% dos encargos ambientais provocados pela depleção dos combustíveis fósseis.

Resumidamente, as fases de construção e manutenção apresentam emissões mais baixas, em geral, relativamente às fases de material e utilização.

A Figura 31 apresenta as categorias de impacto por áreas de impacto e prioridade. Desta análise rudimentar, retira-se que categorias de impacto como toxicidade humana,

depleção dos combustíveis fósseis e aquecimento global são mais impactantes para as respectivas áreas de impacto, local, regional e global, respetivamente.

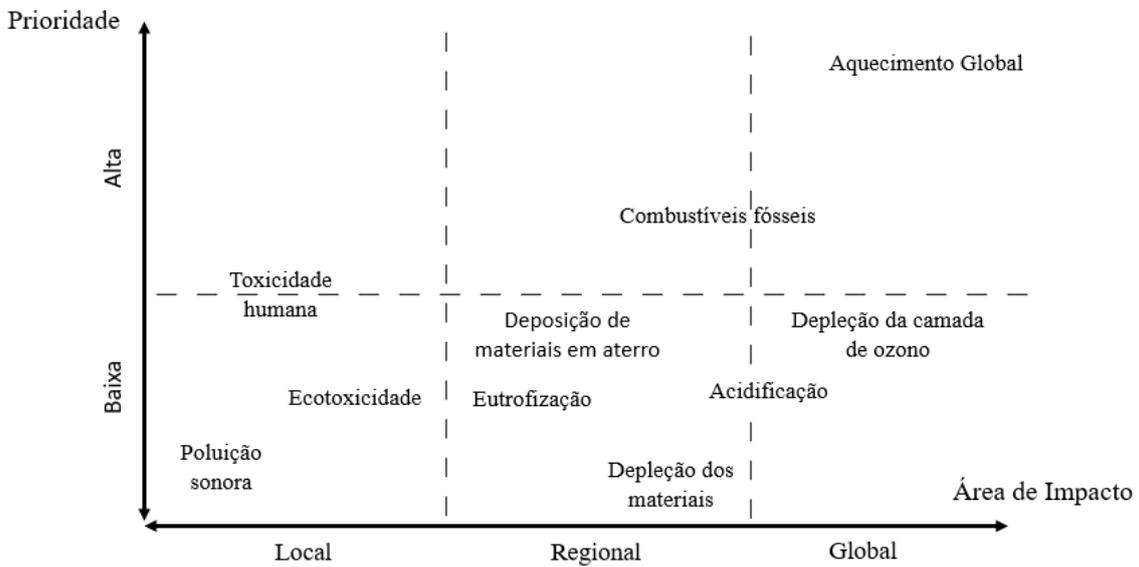


Figura 31 – Agrupamento e ponderação de categorias de impacto (adaptado de Huang, Bird, & Heidrich, 2009)

Deste estudo retira-se que a fase da produção da matéria-prima e misturas é a principal responsável pela categoria de impacto toxicidade humana, as fases da produção matérias-primas e utilização são as mais preponderantes na depleção dos combustíveis fósseis e a fase de utilização é a principal responsável pelo aquecimento global.

## 4. CONCLUSÃO

### 4.1. Discussão

Pavimentos e mudanças climáticas estão intimamente ligados. O aumento da população global e a rápida urbanização continuarão a impor crescentes demandas por infraestrutura de transporte, exigindo construção adicional vias de transporte.

Há uma grande quantidade de fatores a serem considerados ao comparar o consumo de energia e emissões de diferentes processos do ciclo de vida rodoviário. Entretanto, avaliações limitadas podem ser realizadas para as fases de construção e manutenção do pavimento, uma vez que todos os processos são relativamente simples e baseados no mesmo tipo de máquinas, equipamentos e materiais.

No entanto, é necessário um bom conhecimento da influência dos elementos rodoviários nas emissões para abordar os impactos ambientais inerentes à administração do trabalho rodoviário.

A contextualização dos resultados possibilitará uma estrutura adequada para avaliar a contribuição de diferentes elementos envolvidos e possíveis alternativas dentro de um projeto de infraestrutura de transporte rodoviário.

Este estudo ao apresentar os dados originais compilados, que neste momento são a base da maioria dos estudos já elaborados, contribui para uma análise sistemática e direcionada de um conjunto diverso e de uma ampla gama de cenários de avaliação de impacto rodoviário. No entanto, a seleção de opções neste estudo não se destina a ser exaustiva. O objetivo é constituir um primeiro passo e fornecer algumas diretrizes para uma linha de pesquisa na avaliação de propostas presentes e futuras para redução de emissões.

A recolha de dados efetuada neste trabalho fornece uma visão geral do conhecimento, e por sua vez, da limitação de dados do ciclo de vida dos pavimentos sobre o meio ambiente.

Este campo de pesquisa está a ser mais explorado, mas existem tópicos como, a título de exemplo, o albedo e a resistência ao rolamento cujos dados de inventário ainda precisam de ser explorados.

Por alternativa, tópicos como a manutenção, são áreas de pesquisa mais exploradas que oferecem oportunidades de comparação imediata entre várias técnicas para uma só estrutura de pavimento.

Um sistema de suporte de tomada de decisão baseado na sustentabilidade é proposto no diagrama apresentado na Figura 32. Este compreende as seguintes etapas:

1. Seleção dos indicadores ambientais, econômicos e sociais a serem adotados para avaliação de sustentabilidade;
2. Definição das alternativas a serem comparadas com consequente especificação dos pesos a serem atribuídos a cada categoria de impacto;
3. Formulação de um ranking de sustentabilidade para a interpretação de resultados e apresentação de alternativas.

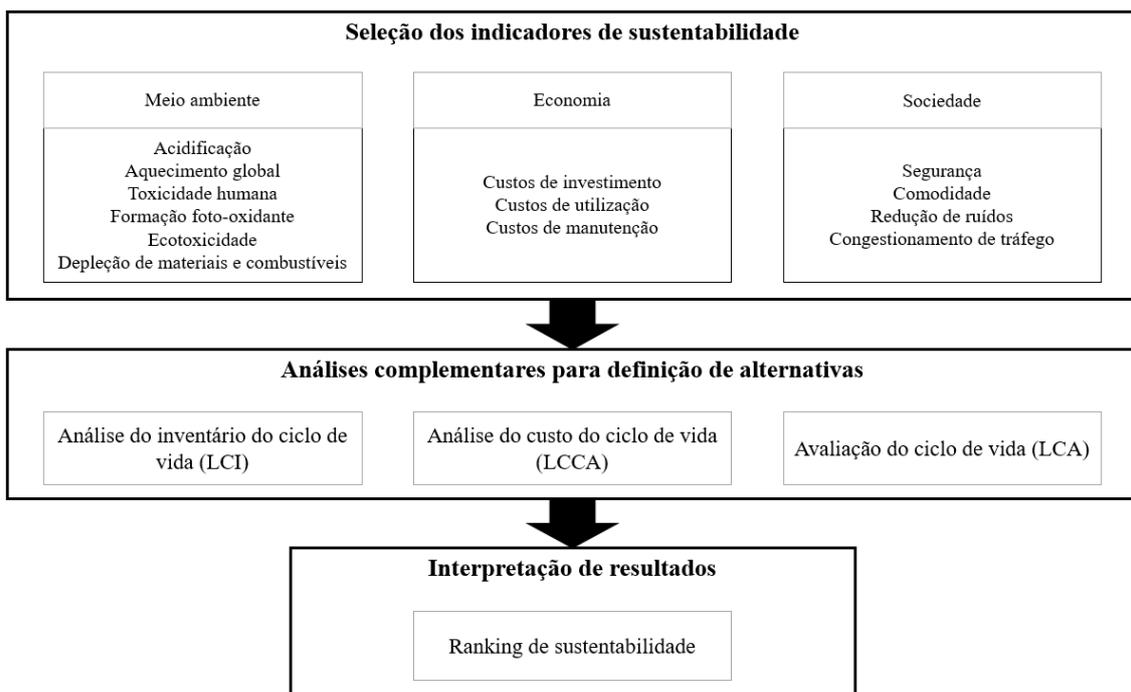


Figura 32 – Sistema de suporte de tomada de decisão (adaptado de Santos, Bressi, Cerezo, & Lo Presti, 2019)

Ao ajustar os parâmetros do modelo, os projetistas podem otimizar um projeto de estrutura de pavimento com base nas necessidades organizacionais, bem como nas condições climáticas regionais, volumes de tráfego, manutenção de estradas e necessidades de energia.

## 4.2. Trabalhos futuros

Os elementos opcionais da LCIA, especificamente a normalização, que é a primeira etapa que se segue, são essenciais para a compreensão dos resultados. Como tal, o desenvolvimento de sistemas de referência, tanto externos, que permitem a diferenciação dos projetos, como internos, que permitem a comparação entre projetos, desempenham um papel fundamental na etapa da normalização.

A identificação de áreas significativas com base nas cargas de inventário e análise de dados (incluindo verificação de integridade, verificação de sensibilidade e verificação de consistência) deve ser realizada para um projeto de pavimento.

A etapa de ponderação é outra potencial área para futuras pesquisas através da análise de decisão de multicritérios.

No entanto, primeiramente, melhorar as deficiências de um estudo LCA passa pela recolha de dados através do apoio a campos de pesquisa específicos em cada sub-fase.

A fim de tirar conclusões amplas e defensáveis sobre o desempenho ambiental dos pavimentos é essencial padronizar a unidade funcional (na medida do possível), ampliar os limites do sistema, melhorar a qualidade dos dados e examinar um conjunto maior de indicadores ambientais, avaliações e comparações equitativas podem ser realizadas com maior fiabilidade.

Um conhecimento mais aprofundado e detalhado ajudará a orientar a administração de estradas e outras partes interessadas em direção a soluções de sustentabilidade.

## BIBLIOGRAFIA

- Adrian, W., & Jobanputra, R. (2005). Influence of Pavement Reflectance on Lighting for Parking Lots. *PCA R&D Serial No. 2458. Portland Cement Association, Skokie, IL.,* (2458).
- Akbari, H., Menon, S., & Rosenfeld, A. (2009). Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO<sub>2</sub>. *Climatic Change, 94*(3–4), 275–286.  
Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9515-9>
- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy, 70*(3), 295–310.  
Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Anthonissen, J., Braet, J., & Van den bergh, W. (2015). Life cycle assessment of bituminous pavements produced at various temperatures in the Belgium context. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 41*, 306–317.  
Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.10.011>
- APA. (2013). Rea 2013, 204.
- Araújo, J. P. C., Oliveira, J. R. M., & Silva, H. M. R. D. (2014). The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 32*, 97–110.  
Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.07.006>
- Branco, F., Pereira, P., & Picado-Santos, L. (2011). *Pavimentos Rodoviários*. Edições Almedina S.A.
- Brandt, H. C. A., & De Groot, P. C. (2001). Aqueous leaching of polycyclic aromatic hydrocarbons from bitumen and asphalt. *Water Research, 35*(17), 4200–4207.  
Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00216-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00216-0)
- Carapeto, C. (1999). *Poluição das águas*. Universidade Aberta.
- Chappat, M., & Bilal, J. (2003). The Environmental Road of the Future: Life Cycle Analysis. *Colas SA, Paris, 9*, 1–34.
- Chehovits, J., & Galehouse, L. (2010). Energy usage and greenhouse gas emissions of

- pavement preservation processes for asphalt concrete pavements. *First International Conference on Pavement Preservation*, 27–42.  
Disponível em: [https://doi.org/http://www.techtransfer.berkeley.edu/icpp/papers/65\\_2010.pdf](https://doi.org/http://www.techtransfer.berkeley.edu/icpp/papers/65_2010.pdf)
- Chen, B., Zhang, X., Yu, J., & Wang, Y. (2017). Impact of contact stress distribution on skid resistance of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 133, 330–339.  
Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.078>
- Cunha, C. M. (2010). *Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis: Diferentes Tipos de Reciclagem*.  
Disponível em: <http://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/425/1/Dissertação.pdf>
- Fernández-Sánchez, G., Berzosa, Á., Barandica, J. M., Cornejo, E., & Serrano, J. M. (2015). Opportunities for GHG emissions reduction in road projects: A comparative evaluation of emissions scenarios using CO2NSTRUCT. *Journal of Cleaner Production*, 104, 156–167.  
Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.032>
- Ferreira, N. (2016). Um dos mares de Titã está mesmo cheio de metano.  
Disponível em: <https://www.publico.pt/2016/05/04/ciencia/noticia/um-dos-mares-de-tita-esta-mesmo-cheio-de-metano-1730893>
- GESAMP, G. of experts on the S. A. of M. P. (1984). Thermal Discharges in the Marine Environment.
- Häkkinen, T., & Mäkelä, K. (1996). *Environmental adaption of concrete. Environmental impact of concrete and asphalt pavements. VTT Tiedotteita - Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus*.
- Huang, Y., Bird, R., & Heidrich, O. (2009). Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 17(2), 283–296.  
Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.06.005>
- Inti, S., Sharma, M., & Tandon, V. (2016). An Approach for Performing Life Cycle Impact Assessment of Pavements for Evaluating Alternative Pavement Designs. *Procedia Engineering*, 145, 964–971.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.125>

ISO14040. (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. *The International Standards Organisation*, 1–20.

Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmj.332.7550.1107>

ISO14044. (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. *The International Organization for Standardization*, 1–46.

Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0297-3>

José, S. Silva; Mestre, Ana S.; Silva, Susana P.; Cardoso, Ana S.; Rebelo, Helena; Carvalho, A. P. (2016). Remoção de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos em águas utilizando subprodutos da indústria da cortiça. *Instituto Doutor Ricardo Jorge*, 44–48.

Legret, M., Odie, L., Demare, D., & Jullien, A. (2005). Leaching of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons from reclaimed asphalt pavement. *Water Research*, 39(15), 3675–3685.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.06.017>

MACOPAV - Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional. (1995).

Mayeur, A., Brémond, R., & Christian Bastien, J. M. (2010). Effects of the viewing context on target detection. Implications for road lighting design. *Applied Ergonomics*, 41(3), 461–468.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.10.002>

Mazumder, M., Sriraman, V., Kim, H. H., & Lee, S. J. (2016). Quantifying the environmental burdens of the hot mix asphalt (HMA) pavements and the production of warm mix asphalt (WMA). *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(3), 190–201.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.06.001>

Montin, T., & Manager, P. E. (2012). Use of PI to increase refinery margin.

Nevison, C. D., Lueker, T. J., & Weiss, R. F. (2004). Quantifying the nitrous oxide source from coastal upwelling. *Global Biogeochemical Cycles*, 18(1), n/a-n/a.

Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2003GB002110>

Noshadravan, A., Wildnauer, M., Gregory, J., & Kirchain, R. (2013). Comparative pavement life cycle assessment with parameter uncertainty. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 25, 131–138.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.10.002>

Nunes, T. (1996). Emissões Biogénicas de Hidrocarbonetos Não Metano.

Ochoa-Hueso, R., Munzi, S., Alonso, R., Arróniz-Crespo, M., Avila, A., Bermejo, V., ... Theobald, M. R. (2017). Ecological impacts of atmospheric pollution and interactions with climate change in terrestrial ecosystems of the Mediterranean Basin: Current research and future directions. *Environmental Pollution*, 227, 194–206.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.062>

Pennington, D. W., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Jolliet, O., Rydberg, T., & Rebitzer, G. (2004). Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. *Environment International*, 30(5), 721–739.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.12.009>

Pivetta, M. (2012). Ilha de calor na Amazônia. *Pesquisa Fapesp, Edição 200*.

Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2012/10/11/ilha-de-calor-na-amazonia/>

Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9–10), 801–809.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>

Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011). Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9–10), 810–818.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.009>

Santos, J., Bressi, S., Cerezo, V., & Lo Presti, D. (2019). SUP&R DSS: A sustainability-based decision support system for road pavements. *Journal of Cleaner Production*, 206, 524–540.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.08.308>

Saraiva, M. I. E. (2009). *Controlo de Qualidade: Agregados e Obra Rodoviária*. Universidade de Aveiro.

Stripple, H. (2001). Life cycle assessment of road - a pilot study for inventory analysis. *A Pilot Study for Inventory Analysis. Rapport IVL*, (March).

Disponível em: <http://www.ivl.se/download/18.343dc99d14e8bb0f58b734e/1445515385608/B1210E.pdf>

UNEP Chemicals - United Nations Environment Programme. (2002). Global Report 2003 - Regionally based assessment of persistent toxic substances. *Global Environment Facility*.

United States Environmental Protection Agency - EPA. (2012). Criteria Air Pollutants: Six Common Air Pollutants.

Disponível em: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>

van der Lee, G. H., Verdonschot, R. C. M., Kraak, M. H. S., & Verdonschot, P. F. M. (2018). Dissolved oxygen dynamics in drainage ditches along a eutrophication gradient. *Limnologia*, 72(October), 28–31.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.limno.2018.08.003>

Vázquez, V. F., Terán, F., Huertas, P., & Paje, S. E. (2018). Field assessment of a Cold-In place-recycled pavement: Influence on rolling noise. *Journal of Cleaner Production*, 197, 154–162.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.192>

Volvo, C. E. (1994a). Åkerman EC620.

Disponível em: <https://www.volvoce.com/global/en/product-archive/crawler-excavators/kerman-ec-series/ec620/>

Volvo, C. E. (1994b). Volvo BM L180.

Disponível em: <https://www.volvoce.com/global/en/product-archive/wheel-loaders/volvo-bm-l-series/l180/>

Wang, J., Xiao, F., Chen, Z., Li, X., & Amirhanian, S. (2017). Application of tack coat in pavement engineering. *Construction and Building Materials*, 152, 856–871.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.056>