



Diniz da Silva Avaliação da sustentabilidade de diferentes soluções de reabilitação de pavimentos urbanos betuminosos

UMinho | 2014



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Diniz da Silva

Avaliação da sustentabilidade de diferentes
soluções de reabilitação de pavimentos
urbanos betuminosos

outubro de 2014



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Diniz da Silva

Avaliação da sustentabilidade de diferentes
soluções de reabilitação de pavimentos
urbanos betuminosos

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Urbana

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Joel Ricardo Martins Oliveira

AGRADECIMENTOS

Os meus profundos e ardentes agradecimentos vão para pessoas e instituições, que de uma forma direta ou indireta contribuíram para a concretização deste trabalho. Pelo que registo nesta página o meu profundo reconhecimento e gratidão:

- Ao meu orientador, o Professor Doutor Joel Ricardo Martins Oliveira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, pela capacidade didática e ajuda preciosa na orientação e condução dos trabalhos e pela disponibilidade desmonstrada;
- Ao Técnico do Laboratório de Engenharia Civil, Engenheiro Carlos Palha, pelo apoio prestado na realização dos ensaios de campo e em laboratório;
- À Câmara Municipal de Guimarães pela prontidão e atribuição dos trechos para o estudo bem como agilização dos procedimentos burocráticos;
- À Polícia Municipal do concelho pelo apoio prestado no condicionamento de tráfego para a realização dos trabalhos do campo.

Finalmente, agradeço à minha família pela relativa compreensão neste regresso à universidade para a concretização deste objetivo pessoal, aos meus amigos e colegas de curso.

Avaliação da sustentabilidade de diferentes soluções de reabilitação de pavimentos urbanos betuminosos

RESUMO

Nos últimos anos a conservação de pavimentos rodoviários tem assumido um papel mais importante do que a construção de novas estradas. No entanto, dadas as condicionantes económicas do País, nem sempre se utilizam as técnicas de reabilitação que garantem o melhor desempenho dos pavimentos a médio ou longo prazo. Nesse sentido, este trabalho pretende dar um contributo para uma nova abordagem mais abrangente de avaliação de diferentes alternativas de reabilitação de pavimentos, que considerem não apenas a componente económica, mas também a componente ambiental, que começa a ser levada em conta de forma mais séria a nível internacional, assim como a avaliação económica.

Assim, com o objetivo principal de avaliar a sustentabilidade de diferentes soluções de reabilitação de pavimentos urbanos betuminosos, realizou-se em estudo de caso aplicado a duas vias urbanas da cidade de Guimarães, tendo sido analisadas três soluções de reabilitação que se julgou serem as mais adequadas para a reabilitação dos pavimentos, em estudo, tendo em conta a função que estes desempenham dentro da rede viária municipal. As soluções estudadas foram: (1) Execução de reforço tradicional; (2) Fresagem das camadas betuminosas existentes e construção das novas camadas; (3) Reciclagem *in situ* com espuma de betume das camadas betuminosas existentes e aplicação de nova camada de desgaste. Por conseguinte, na referida avaliação da sustentabilidade consideraram-se as fases do ciclo de vida dos pavimentos correspondentes à extração de matérias-primas/produção de misturas e a conservação/reabilitação, para aferição de custos económicos e ambientais inerentes à execução de cada solução de reabilitação.

Os resultados obtidos mostraram que, pela simplicidade do seu método construtivo, a solução reforço tradicional é aquela que apresenta os custos mais baixos entre as soluções de reabilitação propostas neste trabalho. Porém, a sua durabilidade poderá estar comprometida, devida à propagação das fendas existentes para as novas camadas ao fim de um período de tempo relativamente reduzido. A reciclagem *in situ* com espuma de betume torna-se viável do ponto de vista ambiental em trechos com maior extensão, devido o custo que representa a mobilização de equipamentos específicos para esse tipo de trabalho.

Palavras-Chave

Vias urbanas; Pavimentos rodoviários flexíveis; Reabilitação;
Avaliação da sustentabilidade; Consumo de energia; Emissão de gases

Sustainability assessment of different solutions for rehabilitation of urban asphalt pavements

ABSTRACT

In recent years the maintenance of road pavements has assumed a more important role than building new roads. However, given the economic conditions of the country, not all rehabilitation techniques that can ensure the best performance of pavements in the medium to long term are used. Taking that into account, this work aims to contribute to a more comprehensive new approach of evaluating different alternatives for pavement rehabilitation that consider not only the economic component, but also the environmental component, which starts to be more seriously taken into account internationally, as well as the economic evaluation.

Thus, with the primary objective of assessing the sustainability of different solutions for rehabilitation of urban asphalt pavements, a case study was carried out applied to two urban roads of Guimarães, involving three rehabilitation solutions that have been judged to be the most suitable for the rehabilitation of the pavements in the study, taking into account the role they play within the municipal road network. The solutions studied were: (1) Traditional asphalt overlay; (2) Milling of existing asphalt layers and application of new asphalt layers; (3) In situ recycling of existing bituminous layers with foamed bitumen and application of a new surface course. Therefore, in this sustainability assessment, the life-cycle phases of extraction of raw materials/production of mixtures, and conservation/rehabilitation were considered for evaluating the economic and environmental costs associated with implementing each pavement rehabilitation solution.

The results showed that, due to their construction method simplicity, the traditional asphalt overlay solution is one that has the lowest cost among rehabilitation solutions proposed in this work. However, its durability may be compromised due to the crack propagation from the existing layers to the overlay after a relatively short period of time. In situ recycling with foamed bitumen becomes feasible from an environmental point of view in roads with higher length due to the cost of mobilizing specific equipment that is necessary for this type of work.

Keywords

Urban roads; Flexible road pavements; rehabilitation;
Sustainability assessment; Energy consumption; Emission of gases.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABELAS	xvi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Conteúdo da dissertação	1
CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE	3
2.1. Pavimentos rodoviários	3
2.1.1. Introdução	3
2.1.2. Pavimentos urbanos	6
2.1.3. Patologias dos pavimentos flexíveis	7
2.1.4. Conservação/reabilitação de pavimentos flexíveis	9
2.1.5. Dimensionamento de pavimentos rodoviários	17
2.2. Desenvolvimento sustentável/sustentabilidade	21
2.2.1. Avaliação económica de alternativas	26
2.2.2. Indicadores ambientais	28
2.2.3. Indicadores sociais	29
CAPÍTULO 3 – CASOS DE ESTUDO E METODOLOGIAS	31
3.1. Introdução	31
3.2. Descrição dos casos de estudo	31
3.2.1. Rua Cônego Dr. Manuel Faria	31
3.2.2. Rua Associação Artística Vimaranesse	32
3.3. Metodologia para a caracterização do estado superficial e estrutural dos pavimentos	33
3.3.1. Avaliação do estado superficial	34
3.3.2. Avaliação da capacidade de carga	36
3.3.3. Avaliação das estruturas dos pavimentos	38
3.4. Alternativas de reabilitação propostas	40

3.4.1. Alternativas propostas	40
3.4.2. Avaliação do tráfego	41
3.5. Metodologia para a avaliação da Sustentabilidade de soluções de reabilitação	42
Capítulo 4 – RESULTADO E DISCUSSÃO	45
4.1. Caracterização do estado superficial	45
4.2. Caracterização da capacidade de carga	46
4.3. Caracterização das estruturas dos pavimentos existentes	51
4.4. Dimensionamento das alternativas de reabilitação	54
4.4.1. Execução de reforço	56
4.4.2. Fresagem das camadas betuminosas existentes e reposição com novas camadas	58
4.4.3. Reciclagem <i>in situ</i> com espuma de betume	61
4.4.4. Análise comparativa de espessuras das soluções propostas	64
4.5. Análise da sustentabilidade das soluções de reabilitação propostas	66
4.5.1. Pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria	67
4.5.2. Pavimento da Rua Associação Artística Vimaranense	71
CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
5.1. Conclusões	77
5.2. Trabalhos futuros	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática das solicitações e do comportamento dum pavimento rodoviário flexível (Branco <i>et al.</i> , 2011, Minhoto, 2005)	4
Figura 2 - Exemplos de interferências das infraestruturas urbanas na via pública (adaptada de Al-Swailmi, 1994) apud (Stuchi, 2005)	6
Figura 3 - Sequência e interação das degradações (Pereira e Miranda, 1999)	8
Figura 4 - Intervenções possíveis de realizar num pavimento rodoviário com base no seu índice de condição adaptado de (Caltrans, 2008)	9
Figura 5 - Esquema de membrana impermeabilizante de pavimentos fendilhados - SAM adaptado de (Clemson, 2014)	12
Figura 6 - Estratégias normalmente adotadas na reabilitação estrutural de pavimentos fendilhados (Minhoto, 2005)	13
Figura 7 - Esquema de SAMI simples adaptado de (Clemson, 2014)	16
Figura 8 - Fases e componentes do ciclo de vida do pavimento (Santero <i>et al.</i> , 2011a)	24
Figura 9 - Quadro de avaliação do ciclo de vida de acordo com a ISO 14040 adaptado de (Chiu <i>et al.</i> , 2008).....	25
Figura 10 - Questões de sustentabilidade a considerar nos sistemas de gestão de pavimentos (Santos <i>et al.</i> , 2013)	26
Figura 11 - Desenvolvimento de um plano apropriado de conservação adaptado de (Ding <i>et al.</i> , 2013)	27
Figura 12 - Determinação da relação custo-benefício de uma estratégia de conservação adaptado de (Ding <i>et al.</i> , 2013).....	27
Figura 13 - Impacto das infraestruturas rodoviárias na sociedade e população local (Antunes e Marecos, 2013).....	28
Figura 14 - Localização do trecho, rua Cónego Dr. Manuel Faria	32
Figura 15 - Perfil transversal tipo de uma via distribuidora local (Seco <i>et al.</i> , 2008).....	32
Figura 16 - Localização do trecho, rua associação artística vimaranense.....	33
Figura 17 - Perfil transversal tipo de uma via de acesso local (Seco <i>et al.</i> , 2008).....	33
Figura 18 - Fendas isoladas (Rua Cónego Dr. Manuel Faria)	34
Figura 19 - Ninhos (Rua Cónego Dr. Manuel Faria).....	35
Figura 20 - Pele de crocodilo (Rua Cónego Dr. Manuel Faria).....	35
Figura 21 - Rodeiras (Rua Associação Artística Vimaranense).....	35
Figura 22 - Pelada (Rua Associação Artística Vimaranense).....	36
Figura 23 - Degradação da reparação (Rua Associação Artística Vimaranense).....	36
Figura 24 - Defletómetro de impacto.....	38

Figura 25 - Medição das espessuras por abertura de poço	39
Figura 26 - Sondagens à rotação (carotagem)	39
Figura 27- Carote extraído para a determinação das espessuras das camadas ligadas.....	39
Figura 28 - Caracterização do estado superficial do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria	45
Figura 29 - Caracterização do estado superficial do pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesa	46
Figura 30 - Relação entre as deflexões normalizadas para cada ponto ensaiado da Rua Cónego Dr. Manuel Faria (Sentido 1)	47
Figura 31 - Relação entre as deflexões normalizadas para cada ponto ensaiado da Rua Cónego Dr. Manuel Faria (Sentido 2)	48
Figura 32 - Relação entre as deflexões normalizadas para cada ponto ensaiado da Rua Associação Artística Vimaranesa (Sentido 1).....	49
Figura 33 - Relação entre as deflexões normalizadas para cada ponto ensaiado da Rua Associação Artística Vimaranesa (Sentido 2).....	49
Figura 34 - Deflexões representativas do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria.....	50
Figura 35 - Deflexões representativas do pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesa	50
Figura 36 - Geometria do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria	51
Figura 37- Geometria do pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesa	52
Figura 38 - Aproximação das bacias de deflexão (Rua Cónego Dr. Manuel Faria).....	53
Figura 39 - Aproximação das deformadas (Associação Artística Vimaranesa)	53
Figura 40 - Estrutura do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria para a alternativa de reforço.....	57
Figura 41 - Estrutura do pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesa para a alternativa de reforço.....	58
Figura 42- Estrutura do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria para a alternativa de fresagem e reposição.....	60
Figura 43- Estrutura do pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesa para a alternativa de fresagem e reposição.....	60
Figura 44 - Esquema de produção de espuma de betume (PIARC, 2003)	62
Figura 45 - Estrutura do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria para a alternativa de reciclagem <i>in situ</i> com espuma de betume.....	63

Figura 46 - Estrutura do pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesse para a alternativa de reciclagem <i>in situ</i> com espuma de betume	64
Figura 47 - Espessuras das novas camadas betuminosas, pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria.....	65
Figura 48- Espessuras de reforço obtidas para o pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesse.....	66
Figura 49 - Contribuição de cada atividade para o consumo de energia por solução de reabilitação	68
Figura 50 - Contribuição de cada atividade para a emissão de CO ₂ -eq (GWP) por cada solução de reabilitação	69
Figura 51 - Relação da emissão de CO ₂ -eq (GWP) entre a solução “reforço tradicional” e as restantes soluções.....	70
Figura 52 - Comparação de custos das restantes alternativas em relação à solução de reforço tradicional	71
Figura 53 - Contribuição de cada atividade para o consumo de energia por solução de reabilitação	72
Figura 54 - Contribuição de cada atividade para a emissão de CO ₂ -eq (GWP) por cada solução de reabilitação	73
Figura 55- Relação da emissão de CO ₂ -eq (GWP) entre a solução “reforço tradicional” e as restantes soluções.....	74
Figura 56 - Comparação de custos das restantes alternativas em relação à solução de reforço tradicional	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de pavimentos em função dos materiais e deformabilidade (Branco <i>et al.</i> , 2011)	4
Tabela 2 - Famílias e tipos de degradações (Pereira e Miranda, 1999)	8
Tabela 3 - Metodologia para a determinação de módulos de deformabilidade das camadas dos pavimentos	40
Tabela 4 - Projeção do NAEP (Rua Cónego Dr. Manuel Faria)	41
Tabela 5 - Projeção do NAEP (Rua Associação Artística Vimaranesense)	41
Tabela 6 - Módulos de deformabilidade do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria (MPa)	54
Tabela 7 - Módulos de deformabilidade do pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesense (MPa)	54
Tabela 8 - Temperatura de projeto ao longo de Portugal continental (Pais e Silva, 2012)	55
Tabela 9 - Verificação dos critérios de dimensionamento do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria na alternativa de reforço	56
Tabela 10 - Verificação dos critérios de dimensionamento do pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesense na alternativa de reforço	57
Tabela 11 - Verificação dos critérios de dimensionamento do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria na alternativa de fresagem e reposição	59
Tabela 12 - Verificação dos critérios de dimensionamento do pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesense na alternativa de fresagem e reposição	59
Tabela 13 - Verificação dos critérios de dimensionamento do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria na alternativa de reciclagem <i>in situ</i> com espuma de betume	63
Tabela 14 - Verificação dos critérios de dimensionamento do pavimento da R. Associação Artística Vimaranesense na alternativa de reciclagem <i>in situ</i> com espuma de betume	63
Tabela 15 - Relação de espessuras das camadas betuminosas	65
Tabela 16 - Relação de espessuras das camadas betuminosas	66
Tabela 17 - Consumos e emissões totais das operações da reabilitação	67
Tabela 18 - Relação entre a energia consumida e potencial de aquecimento global (GWP) de cada solução de reabilitação	68
Tabela 19 - Custo de execução de soluções de reabilitação	70

Tabela 20 - Consumos e emissões totais das operações da reabilitação.	71
Tabela 21 - Relação entre a energia consumida e potencial de aquecimento global (GWP) de cada solução de reabilitação.....	72
Tabela 22 - Custo de execução de soluções de reabilitação.....	74

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Tendo em conta a escassez de recursos financeiros existente atualmente, assiste-se a uma evidente estagnação do investimento na construção de novas infraestruturas rodoviárias devido aos elevados custos que normalmente implica. A conservação e reabilitação das infraestruturas existentes associadas às preocupações com a sustentabilidade das soluções adotadas, tendo por base as soluções que visem a mitigação dos impactes ambientais, exigem a necessidade imperiosa em otimizar os escassos recursos financeiros disponíveis e racionalizar o emprego de recursos naturais. Nessa perspetiva, é vital a utilização de soluções que visem minimizar os custos nas três vertentes (económica, social e ambiental), ao longo do ciclo de vida dos pavimentos rodoviários, sem comprometer a qualidade do serviço.

É neste contexto que se insere o presente trabalho, no qual se pretende avaliar a sustentabilidade de diferentes soluções de reabilitação utilizadas para a reabilitação de pavimentos urbanos betuminosos, tendo em conta as situações específicas dos pavimentos em estudo.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho consiste na avaliação da sustentabilidade de diferentes soluções de reabilitação de pavimentos urbanos betuminosos. Sendo que para a concretização desse principal objetivo, torna-se indispensável recorrer à pesquisa bibliográfica, de modo a reunir informações relevantes para o alcance de outros objetivos tais como: conhecimento da essência do desenvolvimento sustentável e das variáveis da avaliação da sustentabilidade dos pavimentos rodoviários; as particularidades dos pavimentos urbanos; as patologias dos pavimentos e as técnicas de reabilitação de pavimentos flexíveis (características funcionais e estruturais). Com base no estudo de campo, determinar as soluções que se entende serem adequadas aos pavimentos em estudo em função das suas especificidades, e por fim, avaliar a sustentabilidade das mesmas soluções.

1.3. Conteúdo da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, incluindo este primeiro de considerações iniciais.

No presente capítulo procura-se enquadrar o tema no contexto das infraestruturas de rodoviárias e define-se o objetivos em prol da dissertação, além de se apresentar de forma sucinta os conteúdos dos capítulos.

O Capítulo 2 é dedicado na íntegra ao estado de arte ou seja a análise bibliográfica sobre o tema, com informações sobre os três tipos de estruturas de pavimentos rodoviários, dando uma maior relevância aos pavimentos rodoviários flexíveis e respetivas patologias associadas a este tipo de estrutura. Contempla de uma forma geral, as técnicas disponíveis de reabilitação estrutural e funcional e resume os procedimentos basilares de dimensionamento no âmbito de construção nova e reabilitação de pavimentos. Por fim, aborda o conceito de desenvolvimento sustentável e os indicadores da sustentabilidade no âmbito dos pavimentos rodoviários.

No Capítulo 3 são apresentados os casos de estudo e nele é descrita a metodologia para a caracterização do estado superficial e estrutural, centrando-se na avaliação do estado superficial e da capacidade de carga e na avaliação da estrutura dos pavimentos. E essa avaliação por sua vez centra-se na observação visual das patologias existentes; na obtenção das deflexões com recurso ao defletómetro de impacto (FWD), na abertura de poços e carotagem. Fecha-se o capítulo com o estudo do tráfego.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados da caracterização do estado superficial e estrutural, bem com as estruturas dos pavimentos existentes; apresenta-se o dimensionamento das soluções propostas para cada pavimento e discute-se as espessuras de reforço resultantes e por fim, faz-se a análise da sustentabilidade das mesmas soluções.

Por último, no Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões do trabalho desenvolvido, sendo também indicadas algumas sugestões para desenvolvimentos futuros no âmbito do tema.

CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE

2.1. Pavimentos rodoviários

2.1.1. Introdução

A partir da Segunda Grande Guerra a rede rodoviária sofreu, na generalidade, uma enorme evolução, quer ao nível da sua extensão, quer ao nível do volume de tráfego quer das respetivas cargas. Em Portugal esta evolução verificou-se numa forma mais notória com o Plano Rodoviário Nacional 85 (DL 380/85) e com a adesão à CEE em 1986, e posteriormente com a definição do Plano Rodoviário Nacional 2000 (DL 222/98). Com a implementação destes planos verificou-se um grande aumento de extensão da rede rodoviária construída em Portugal (Freitas e Pereira, 2001).

No Livro Branco da Comissão Europeia estimava-se em 2000 (C.E., 2001) que o aumento de tráfego rodoviário de passageiros e de mercadorias (50% de tráfego pesado) entre 2000 e 2010 se situaria à volta de 24 e 38%, respetivamente.

Atualmente verifica-se também um aumento da necessidade de realização de ações de conservação para repor a qualidade, quer estrutural, quer funcional dos pavimentos rodoviários. A estas ações de conservação estão associados custos, quer para a administração da rede rodoviária, quer para os utentes (Freitas e Pereira, 2001).

É verdade que os pavimentos rodoviários são projetados para um dado período de vida, durante o qual deverão ser alvo de medidas de conservação e findo o qual se procederá à sua reabilitação. Facto que atualmente obriga “implicitamente” a que aquando da tomada de decisão na sua construção ou reabilitação, sejam utilizadas técnicas e materiais que não comprometam a sua reabilitação sustentável no futuro, ou seja que os materiais utilizados sejam economicamente recicláveis (Batista, 2004).

Por outro lado é imperativo que a conservação e reabilitação de pavimentos atenda às questões ambientais, favorecendo a economia de matérias-primas a utilizar na construção rodoviária e o aproveitamento de materiais alternativos (Batista, 2004). Por conseguinte, as crescentes preocupações ambientais têm levado a um incentivo, por parte de diversos organismos internacionais, no sentido da adoção de técnicas que possibilitem a economia de matérias-primas e a reutilização ou reciclagem dos materiais já existentes nas estradas a reabilitar (OCDE, 1997).

Para a concretização deste imperativo há que se privilegiar as práticas de reabilitação que visem reduzir cada vez mais os impactes ambientais, até porque o orçamento disponível para afetar em projetos deste âmbito tende a ser cada vez mais limitado.

Segundo Pereira *et al.* (2007) os pavimentos rodoviários são dimensionados para responderem às solicitações do tráfego e do clima durante um determinado período de vida, de modo a oferecerem condições de circulação confortáveis e seguras. Na Figura 1 apresenta-se a constituição de um pavimento rodoviário, com a indicação das principais ações, solicitações e respetiva resposta do pavimento.

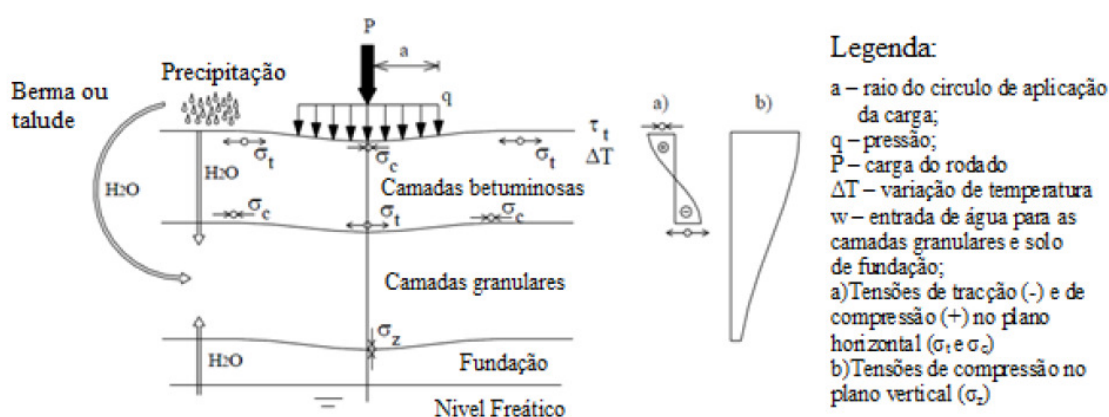


Figura 1 - Representação esquemática das solicitações e do comportamento dum pavimento rodoviário flexível (Branco *et al.*, 2011, Minhoto, 2005)

Da associação de camadas constituídas por diferentes materiais resultam de diferentes tipos de pavimentos, a que correspondem comportamentos diferentes quando solicitados pelas cargas de veículos, em combinação com determinadas condições climáticas. Na Tabela 1 apresenta-se os principais tipos de pavimentos.

Tabela 1 - Tipos de pavimentos em função dos materiais e deformabilidade (Branco *et al.*, 2011)

Tipo de Pavimento	Materiais	Deformabilidade
Flexível	Hidrocarbonados e granulares	Elevada
Rígido	Hidráulicos e granulares	Muito reduzida
Semi-rígido	Hidrocarbonados, hidráulicos e granulares	Reduzida

Os pavimentos flexíveis apresentam as camadas superiores formadas por misturas betuminosas, ou seja, por materiais estabilizados com ligantes hidrocarbonados,

geralmente o betume asfáltico, seguidas inferiormente de uma ou duas camadas constituídas por material granular.

Já os pavimentos rígidos têm uma camada superior constituída por betão de cimento, ou seja por material granular estabilizado com ligantes hidráulicos, geralmente o cimento Portland, seguida de uma ou duas camadas inferiores constituídas também por material granular estabilizado com ligante hidráulico e/ou apenas constituído por material granular.

Por fim, os pavimentos semirrígidos apresentam características comuns aos dois tipos de pavimentos anteriores, tendo uma ou duas camadas superiores constituídas por misturas betuminosas, seguidas de uma camada constituída por agregado estabilizado com ligante hidráulico, podendo ainda dispor de uma camada granular na sub-base.

Quanto à deformabilidade, cada um destes três tipos de pavimentos, sob a ação de uma determinada carga, apresenta diferentes valores de deformação vertical da sua superfície, sendo considerada elevada para pavimentos flexíveis, muito reduzida para pavimentos rígidos e reduzida para pavimentos semirrígidos.

Relativamente ao comportamento de um pavimento rodoviário, de acordo com a Figura 1 considera-se as seguintes aspetos: as ações do tráfego e do clima; os materiais constituintes, os quais apresentam um determinado tipo de comportamento perante aquelas ações; o estado de tensão gerado nas diferentes camadas do pavimento e o estado de deformação correspondente.

Quanto às ações do tráfego são resultantes da aplicação das cargas dos veículos que podem ser expressas basicamente por uma pressão vertical (considerada uniforme e aplicada numa área circular) e uma ação tangencial aplicada entre pneu e pavimento.

No que se refere às ações do clima, a temperatura, e particularmente a sua variação, influencia o desempenho das misturas betuminosas. A ação da água influencia de forma determinante o comportamento das misturas betuminosas, das camadas granulares e do solo de fundação.

Na constituição de pavimentos distinguem-se dois tipos de camadas: camadas ligadas, que apresentam coesão e suportam os esforços de compressão, tração e corte e as camadas não ligadas, sem coesão, que suportam apenas esforços de compressão e de corte.

2.1.2. Pavimentos urbanos

O Plano Rodoviário Nacional 2000 (PRN2000) instituído pelo Decreto-Lei nº 222/98, de 17 de Julho, alterado pela Lei nº98/99, de 26 de Julho, pela declaração de rectificação nº 19-D/98 e pelo Decreto-Lei nº 182/2003, de 16 de Agosto, estabelece as necessidades de comunicações rodoviárias em Portugal, tratando-se de um desenvolvimento do plano rodoviário de 1985, que por sua vez tinha substituído o de 1945.

Segundo este plano a rede rodoviária no território português é dividida em três níveis: rede nacional, rede regional e rede municipal. E é nesta última rede que se enquadram os pavimentos em estudo.

Os pavimentos urbanos têm como principal função assegurar a estrutura base da rede rodoviária municipal em espaço urbano, permitindo a ligação entre espaços importantes da malha urbana. Podem também ser classificados em função dos materiais e deformabilidade dos mesmos, de acordo com a Tabela 1. Porém, distingue-se essencialmente dos pavimentos rodoviários por evidenciar seguintes aspetos:

- Pela existência de redes de infraestruturas sob os pavimentos, cujas obras de cariz de manutenção ou do aumento da capacidade das mesmas exigem muitas vezes intervenção no pavimento;
- Por evidenciar velocidade de circulação mais baixa e com fluxo descontínuo;
- Pela evidência de uma reduzida percentagem de veículos pesados, maior frequência de travagens e acelerações;
- Grande interferência de tráfego pedestre.

Na Figura 2 apresenta-se as interferências das principais infraestruturas urbanas nos pavimentos urbanos.

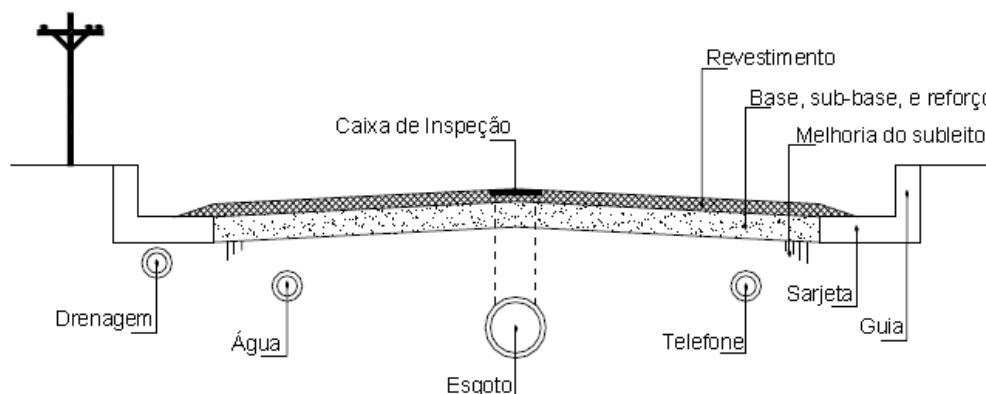


Figura 2 - Exemplos de interferências das infraestruturas urbanas na via pública (adaptada de Al-Swailmi, 1994) apud (Stuchi, 2005)

2.1.3. Patologias dos pavimentos flexíveis

Ao longo da vida dos pavimentos flexíveis o aparecimento das degradações contribui para a perda da sua qualidade. Estas degradações podem agravar-se devido a vários factores, tais como: as solicitações do tráfego e da temperatura; as características das camadas granulares e de fundação; as deficiências resultantes de projecto e/ou do processo construtivo; o deficiente sistema de drenagem e a evolução das degradações. A evolução do comportamento de um pavimento é bastante complexa pois cada acção provoca uma alteração específica sobre as propriedades dos materiais constituintes dos pavimentos (Minhoto, 2005).

As degradações podem ser do tipo estrutural ou funcional. As degradações do tipo estrutural são aquelas que estão relacionadas com fenómenos de rotura da estrutura do pavimento ou com fenómenos de fadiga, que tornam o pavimento incapaz de suportar as cargas impostas. As degradações do tipo funcional são aquelas que estão directamente relacionadas com as degradações superficiais, mais precisamente com a camada de desgaste, e que contribuem para a perda da capacidade de proporcionar uma circulação suficientemente segura e cómoda (Pinto, 2003).

De acordo com Pereira e Miranda (1999) nos pavimentos rodoviários flexíveis a diversidade de degradações pode ser mais vasta, podendo verificar-se o desenvolvimento de parte ou do conjunto das seguintes degradações:

- Deformações;
- Fendilhamento;
- Desagregação da camada de desgaste;
- Movimento de materiais.

Cada uma das famílias de degradações atrás indicadas contém vários tipos de degradações, conforme a Tabela 2.

Estas famílias têm uma localização no pavimento, e uma sequência e uma interação entre as várias famílias: a evolução do fendilhamento e/ou deformações provoca a desagregação da camada de desgaste e movimento de materiais, conforme a Figura 3

Quanto a localização das diferentes degradações, ainda de acordo com Pereira e Miranda (1999), verifica-se que as deformações observadas na superfície da camada de

desgaste resultam da contribuição preponderante do solo da fundação e das camadas granulares e também das camadas betuminosas.

Tabela 2 - Famílias e tipos de degradações (Pereira e Miranda, 1999)

Família de degradações	Tipos de degradações		
Deformações	Abatimento	Longitudinal	Berma
			Eixo
		Transversal	
	Deformações localizadas		
	Ondulação		
	Rodeiras	Grande raio	
	Pequeno raio		
Fendilhamento	Fendas	Fadiga	
		Longitudinais	Eixo
			Berma
		Transversais	
		Parabólicas	
	Pele de crocodilo	Malha fina	
Malha larga			
Desagregação da camada de desgaste	Desagregação superficial		
	Cabeça de gato		
	Pelada		
	Ninhos ou covas		
Movimentação de materiais	Exsudação		
	Subida de finos		



Figura 3 - Sequência e interação das degradações (Pereira e Miranda, 1999)

O adequado conhecimento dos complexos mecanismos que regem o processo de degradação de um pavimento impõe como uma condição essencial o estudo das degradações e causas mais prováveis, fatores vitais na definição de estratégias de conservação/manutenção ou reabilitação que melhor se adapta a cada realidade específica. Na Figura 4 ilustra-se o tipo de intervenções possíveis de realizar com base no índice de condição do pavimento existente.

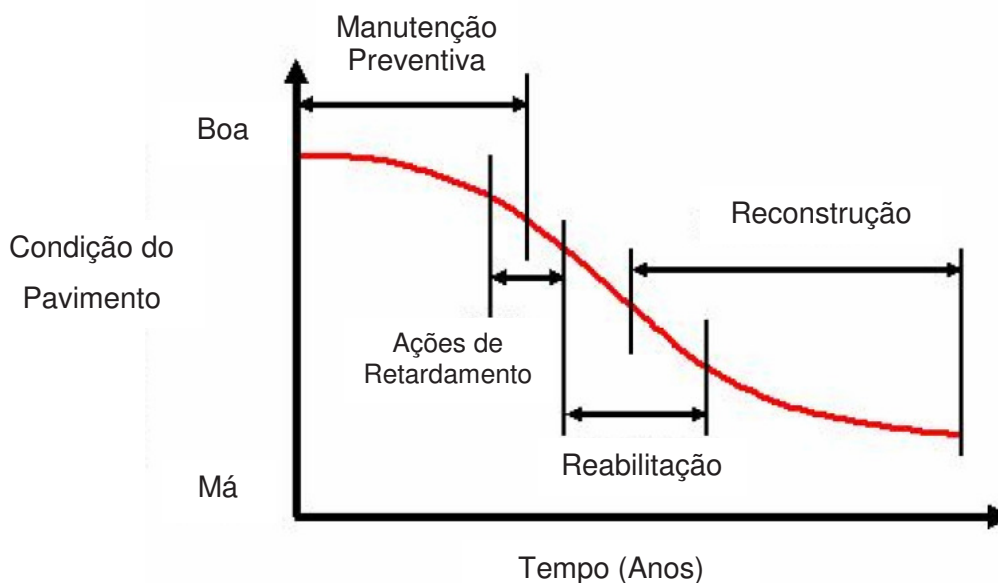


Figura 4 - Intervenções possíveis de realizar num pavimento rodoviário com base no seu índice de condição adaptado de (Caltrans, 2008)

2.1.4. Conservação/reabilitação de pavimentos flexíveis

Uma vez construído um pavimento, torna-se fundamental estabelecer um programa de acompanhamento da sua evolução, para apoiar a decisão de intervir, em determinada altura, de modo a repor a sua qualidade (Branco *et al.*, 2011). Essa reposição é realizada atuando de diversas formas, em função do seu estado estrutural e funcional, considerando os níveis de qualidade que se pretendem manter ou atingir (Pais *et al.*, 2000).

A adoção da medida mais adequada a cada caso requer o diagnóstico prévio das causas das degradações atuais ou previsíveis e o conhecimento tanto da estrutura do pavimento existente como das características dos seus materiais, do tráfego, do clima e de outros parâmetros da estrada, além dos diferentes procedimentos de reabilitação disponíveis (Azevedo, 1999).

Portanto a reabilitação de um pavimento com o objetivo em manter ou atingir níveis de qualidade implica a adoção de várias técnicas de conservação/reabilitação.

Segundo Batista (2004), embora a técnica utilizada mais frequentemente na reabilitação dos pavimentos flexíveis seja a execução de reforços com misturas betuminosas a quente, diversos fatores como sejam os aspetos económicos, as crescentes exigências de qualidade e as cada vez maiores preocupações ambientais, tem conduzido ao

aparecimento de novas técnicas de reabilitação de pavimentos rodoviários, que poderão nalguns casos, constituir alternativas interessantes às técnicas tradicionais. Torna-se pois indispensável conhecer em cada caso, quais as técnicas de reabilitação (correntes/inovadoras), passíveis de serem utilizadas bem como as respetivas vantagens e desvantagens, por forma a otimizar-se a escolha da solução a implementar.

Para Branco *et al.* (2011), a classificação da conservação relacionada com o domínio da qualidade do pavimento que se pretende melhorar, pode-se considerar por um lado, a conservação da qualidade ou da característica funcional, por outro a conservação da qualidade ou da característica estrutural.

2.1.4.1. Técnicas de reabilitação das características superficiais

A reabilitação das características superficiais visa garantir a segurança (rugosidade), o conforto (regularidade longitudinal e transversal) e a impermeabilidade da camada de desgaste. Acrescem ainda outras características tais como a drenabilidade e diminuição de ruído. Recorre-se a este tipo de reabilitação com mais frequência nos casos em que é necessário melhorar as características de aderência pneu-pavimento, em cuja superfície é visível a exsudação do betume, em superfícies polidas, em locais específicos como rampas e curvas, em locais críticos onde a visibilidade é reduzida devido à projeção de água ou reflexão de luz (Vicente, 2006).

A execução das técnicas que visam exclusivamente a reabilitação das características superficiais requer que os pavimentos estejam em boas condições estruturais.

As técnicas que se enquadram na reabilitação das características superficiais, segundo Branco *et al.* (2011) são as que se apresentam de seguida:

- Revestimentos betuminosos superficiais;
- Microaglomerado betuminoso a frio;
- Lama asfáltica;
- Microbetão betuminoso rugoso;
- Argamassa betuminosa
- Betão betuminoso muito delgado
- Betão betuminoso drenante.

Os revestimentos betuminosos superficiais são constituídos por camadas de desgaste delgadas, resultantes da sobreposição de uma ou mais camadas de ligante

hidrocarbonado e de agregado granular. Este tipo de revestimento é definido pelo modo de aplicação dos materiais constituintes, pois permite uma aplicação sucessiva e intercalada de camadas de ligante betuminoso e de gravilhas sobre o pavimento (Antunes *et al.*, 2005).

Este tipo de revestimento é indicado para zonas de tráfego baixo e a sua aplicação depende do tipo de pavimento existente e quando este apresente boas condições, não sendo visíveis muitas degradações à superfície.

O microaglomerado betuminoso a frio é constituído por uma mistura betuminosa a frio com emulsão betuminosa, normalmente modificada, realizada “*in situ*” com equipamento apropriado e posteriormente espalhada sobre o pavimento existente no estado fluído (sem se dar ainda a rotura da emulsão) em camada bastante delgada, com espessura média é de 1 cm. A emulsão betuminosa a utilizar é à base de ligantes puros ou modificado, sendo as mais utilizadas as emulsões betuminosas catiónicas de rotura controlada (Intevial, 2009).

A lama asfáltica (Slurry Seal) é uma mistura betuminosa semelhante ao microaglomerado betuminoso a frio, diferindo na menor dimensão dos agregados utilizados.

O microbetão betuminoso rugoso é constituído por camadas betuminosas delgadas. Baseia-se nas excelentes características em termos de conforto e segurança (melhoria da regularidade e aderência elevada e durável).

A argamassa betuminosa é uma mistura considerada adequada para a recuperação de forma minimalista, de uma camada de desgaste, sob a condição de tráfego não ser muito severo e para retardar o aparecimento de fendilhamento. Por ser uma mistura com alguma deformabilidade permite a recuperação do estado superficial da camada de desgaste em situações de fendilhamento generalizado, o que retarda a intervenção de uma reabilitação estrutural (Pereira e Miranda, 1999).

Existem ainda outras técnicas que permitem melhorar as características superficiais dos pavimentos ou resolver problemas pontuais relacionados com a segurança de circulação, tais como: o betão betuminoso muito delgado, o betão betuminoso drenante microaglomerado a frio com emulsão, a termo-regeneração, a ranhuragem do pavimento, reparações localizadas e selagem de fendas.

No que se refere ao betão betuminoso muito delgado e o betão betuminoso drenante, afiguram-se como técnicas com uma maior aplicabilidade, exceto nas vias de tráfego ligeiro, onde os revestimentos superficiais são a técnica mais aconselhável (Oliveira e Freitas, 2012).

No que diz respeito ainda à selagem de fendas, destaca-se a membrana de absorção de tensões (SAM), do inglês *Stress Absorbing Membrane*, é composto por uma mistura betuminosa a quente com betume modificado com borracha (BMB) pulverizado na superfície do pavimento existente, seguido, imediatamente, pela aplicação de uma camada de agregado de tamanho uniforme que é enrolado e incorporado na membrana do ligante. A sua espessura nominal, geralmente, varia entre 9 e 12 mm, dependendo do tamanho do agregado. A camada selante SAM é um tratamento de superfície que é usada, principalmente, para restaurar as características de atrito da superfície, preencher as fissuras e fornecer uma membrana impermeável para minimizar a intrusão de águas superficiais na estrutura do pavimento (Clemson, 2014). Na Figura 5 apresenta-se o esquema da SAM.

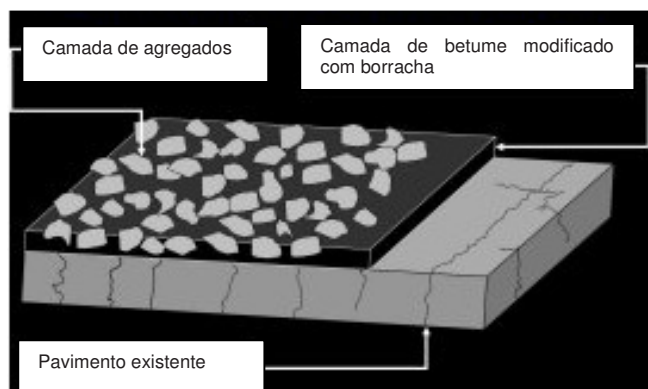


Figura 5 - Esquema de membrana impermeabilizante de pavimentos fendilhados - SAM adaptado de (Clemson, 2014)

2.1.4.2. Técnicas de reabilitação das características estruturais

As características estruturais de um pavimento correspondem à sua capacidade de carga, ou seja, a capacidade do pavimento para suportar as ações devidas ao tráfego (Antunes, 1993).

A reabilitação estrutural dos pavimentos compreende a execução de uma ou mais camadas, acompanhadas ou não de outros trabalhos complementares (melhoria do sistema da drenagem por exemplo). Essas camadas são a camada de desgaste, a

camada de regularização e a camada de base (Pereira e Miranda, 1999). Neste domínio, o reforço com misturas betuminosas a quente, é uma das principais medidas, visando o aumento da capacidade estrutural do pavimento existente.

Se o reforço do pavimento não ocorrer quando a superfície do pavimento apresenta um baixo nível de fendilhamento, num pequeno intervalo de tempo, a área de fendilhamento da superfície do pavimento passa de um valor reduzido para um valor de difícil controlo em termos de estratégia de reforço de pavimentos (Pais, 1999).

Na Figura 6, apresenta-se estratégias normalmente adotadas na reabilitação estrutural de pavimentos fendilhados.

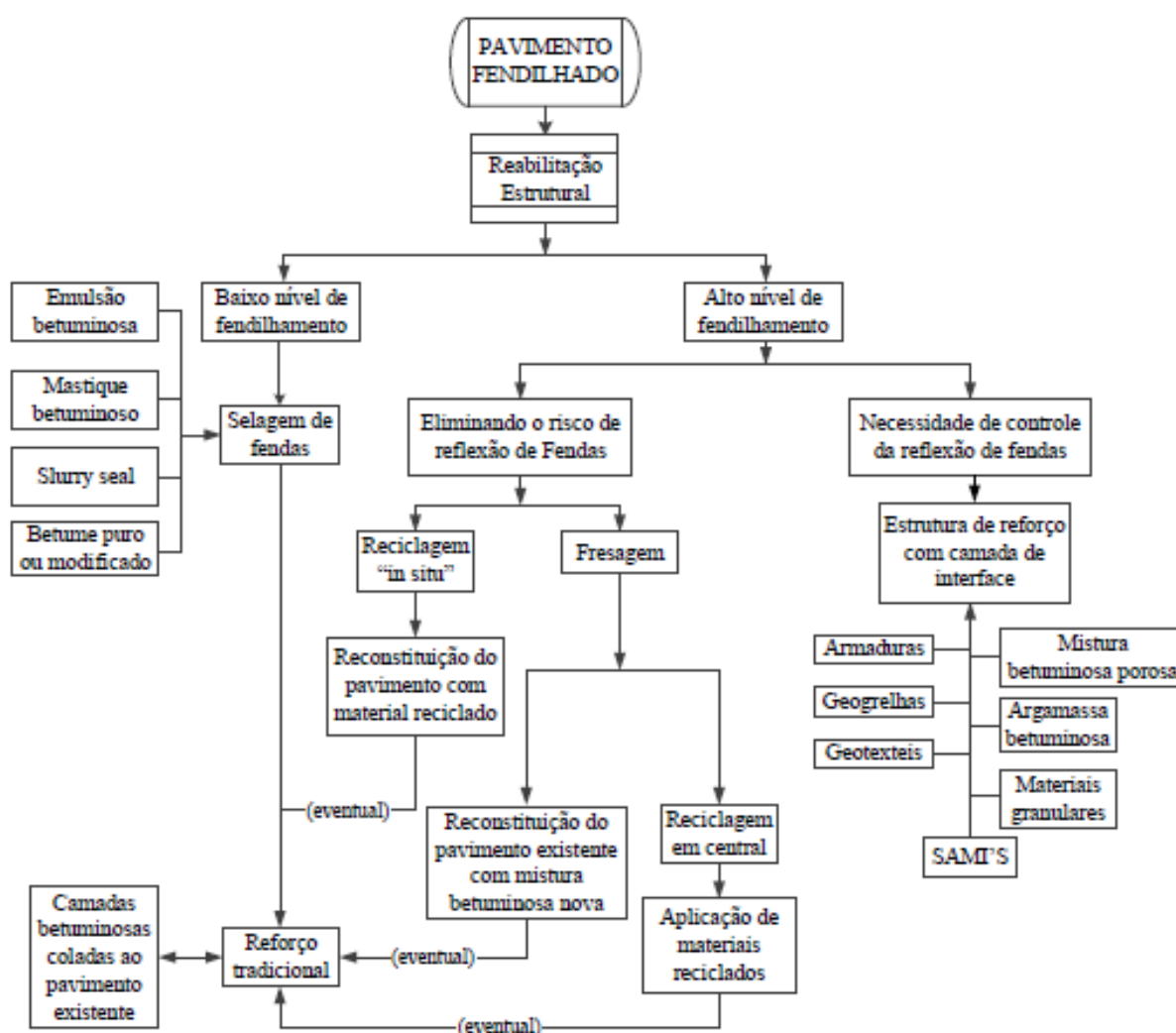


Figura 6 - Estratégias normalmente adotadas na reabilitação estrutural de pavimentos fendilhados (Minhoto, 2005)

No caso dos pavimentos pouco degradados, os reforços consistem na aplicação de camadas betuminosas sobre o pavimento existente, após a realização de pequenos trabalhos de reparação como selagem de fendas, tapagem das covas, melhoramento da drenagem, entre outros. Para os pavimentos muito degradados, é frequente recorrer-se à fresagem das camadas mais degradadas e a execução das novas camadas de reforço. Existem ainda várias técnicas de reciclagem de materiais fresados do pavimento, que consistem na reutilização dos materiais provenientes dos pavimentos antigos como matéria-prima e na produção de misturas betuminosas.

Para Batista (2004) as técnicas inovadoras utilizadas em Portugal no âmbito da reabilitação estrutural de pavimentos são também consideradas inovadoras noutros países europeus, podendo-se referir as seguintes:

- Reforço de pavimentos com misturas betuminosas de alto módulo;
- Reforço de pavimentos com misturas com betumes modificados com polímeros;
- Reforço de pavimentos com misturas betuminosas com borracha reciclada de pneus;
- Reforço de pavimentos com misturas betuminosas a frio;
- Reciclagem de pavimentos flexíveis;
- Reforço de pavimentos adotando técnicas anti-reflexão de fendas.

No reforço de pavimentos com misturas betuminosas de alto módulo aplicam-se misturas em que se utiliza como ligante um betume mais duro (penetração nominal 10/20) do que o habitualmente utilizado nas misturas tradicionais, resultando em maiores módulos de deformabilidade e melhor comportamento às deformações permanentes. A temperatura de fabrico situa-se na ordem de 170 – 190°C e a temperatura ideal para a compactação em obra encontra-se entre 145 – 175° C.

Esta solução apresenta algumas vantagens, pois permite obter-se módulos de deformabilidade superiores para espessuras inferiores, comparado com as misturas betuminosas a quente. A aplicação dessa solução é relativamente interessante em zonas com condicionalismos de cotas, no entanto não é muito viável a sua aplicação direta sobre suportes relativamente flexíveis, com alguma irregularidade ou relativamente fendilhadas.

O reforço de pavimentos com misturas com betumes modificados com polímeros compreende a aplicação de camada de desgaste com misturas betuminosas drenantes e

misturas betuminosas rugosas em que se utiliza como ligante um betume modificado com polímero (termoplástico ou elastómero), cuja temperatura de fabrico se situa na ordem de 160 – 180° C e a temperatura ideal para a compactação 140 – 160° C. Estas misturas apresentam melhores características funcionais, através de uma melhoria da rugosidade e da aderência, especialmente em tempo chuvoso, uma maior durabilidade, menor suscetibilidade térmica e maior flexibilidade. Apresentam em geral melhor comportamento à fadiga e/ou melhor resistência às deformações permanentes.

Na modificação do betume podem ser utilizados quase todos os polímeros, no entanto, nem todos apresentam resultados satisfatórios. Os polímeros classificam-se quanto à sua estrutura e propriedades em termoplásticos; termoendurecíveis e elastómeros.

As misturas betuminosas com borracha reciclada de pneus utilizadas no reforço de pavimentos obedecem a dois processos de fabrico: via seca (“*dry process*”) e via húmida (“*wet process*”) (LNEC, 2007). Na via seca, a borracha é adicionada juntamente com os agregados, ao passo que na via húmida o betume é previamente modificado com a borracha, antes deste se misturar com os agregados. Obtem-se misturas betuminosas abertas e misturas betuminosas rugosas, resultando em melhor resistência à fadiga e à propagação de fendas, melhor resistência ao envelhecimento (camada de desgaste); melhoria das características superficiais e diminuição do ruído de rolamento.

O reforço de pavimentos pode também incluir a aplicação de camadas com misturas betuminosas a frio. Trata-se de uma técnica em que se utiliza como ligante uma emulsão betuminosa (fluido em que o betume se encontra disperso numa fase aquosa sob a forma de glóbulos discretos que se mantêm em suspensão devido a cargas electostáticas produzidas pelo emulsionante) e que pode ser aplicada em camadas de base ou em reperfilamento do pavimento existente antes da aplicação de novas camadas de reforço. As misturas são fabricadas e aplicadas à temperatura ambiente.

A reciclagem de pavimentos flexíveis é um processo que engloba várias técnicas ou procedimentos de reciclagem tais como: reciclagem a frio *in situ*; reciclagem a quente em central; reciclagem a quente *in situ*; reciclagem semi-temperada, etc..

O reforço de pavimentos adotando técnicas anti-reflexão de fendas visa reforçar o pavimento fendilhado utilizando uma técnica que permite reduzir a velocidade de propagação das fendas através da realização de camadas da reduzida espessura com o objectivo de reduzir os esforços de corte na interface com as novas camadas de reforço

do pavimento. Neste tipo de interfaces enquadram-se as grelhas, as geomalhas, os geotêxteis impregnados com betume, as SAMI's (*Stress Absorving Membrane Interlayer*) e as argamassas com betume modificados. Existem vários sistemas de camadas de SAMI, na Figura 7 é apresentada SAMI numa camada simples.

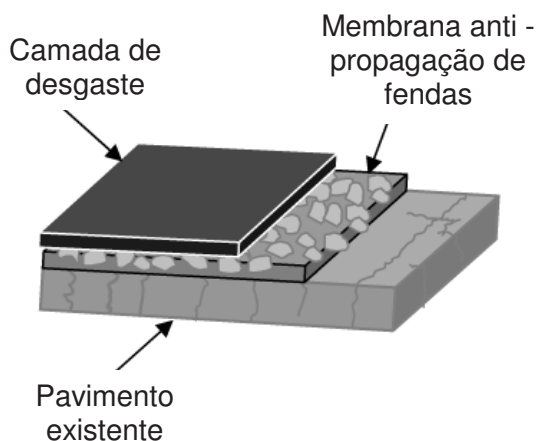


Figura 7 - Esquema de SAMI simples adaptado de (Clemson, 2014)

Estas membranas são constituídas por uma camada betuminosa delgada com betume modificado aplicada sobre toda a superfície de um pavimento betuminoso fendilhado. Têm como objectivo aumentar a resistência da superfície à propagação de fendas em pavimentos betuminosos que apresentam sinais de fadiga generalizada, mas com a capacidade de suporte suficiente para a camada de base e subleito (Molenaar *et al.*, 1986).

Na construção de novas estradas com baixa intensidade de tráfego, a execução de SAMI's poderá ser associado a uma base tratada com ligantes hidráulicos, que normalmente tende a fendilhar por retração. Com esta solução, garante-se uma elevada capacidade de degradação de cargas (solo-cimento) e uma adequada impermeabilização e resistência à propagação de fissuras.

Ainda sobre as técnicas de realização de interfaces anti-propagação de fendas, utiliza-se as grelhas, formadas por materiais ou combinações de materiais que podem ser colocados na estrutura do pavimento numa construção nova, na reabilitação ou conservação em simultâneo com um tratamento de sobreposição das camadas para prolongar a vida útil do pavimento, são materiais contituidas por polipropileno, polietileno,

poliester, fibra de vidro, etc.. Estas soluções permitirão prolongar a vida útil do pavimento, reduzindo os custos de manutenção ao longo da vida útil (Caltrans, 2008).

Para resolução de casos mais severos de fendilhamento, aconselha-se a aplicação de armaduras compostas por uma malha de aço ou ferro galvanizado (Oliveira e Freitas, 2012).

2.1.5. Dimensionamento de pavimentos rodoviários

Para pavimentos flexíveis os estados de tensões/deformação que são críticos para o dimensionamento estrutural são: a extensão máxima de tração na base do conjunto das camadas ligadas (misturas betuminosas) e a extensão máxima de compressão no topo do solo da fundação. Ao limitar a extensão máxima de tração na base do conjunto das camadas das misturas betuminosas, evita-se a ruína do pavimento por fendilhamento por fadiga das camadas betuminosas ao passo que ao limitar a extensão de compressão no topo do solo da fundação, evita-se o aparecimento à superfície de deformações excessivas por deformação da fundação. Dessa forma adotou-se os seguintes critérios preconizados pela Shell (Shell, 1978):

Limitação do fendilhamento por fadiga das camadas betuminosas:

$$\varepsilon_t = (0,856 \times V_b + 1,08) \times E^{-0,36} \times N_{80}^{-0,2} \quad (1)$$

Sendo V_b a percentagem volumétrica de betume e E o módulo de deformabilidade da mistura betuminosa, em Pascais; ε_t e N_{80} representam, respetivamente, a extensão máxima de tração induzida na camada e número de eixos padrão de 80 kN.

Limitação da contribuição da fundação para a formação de deformações permanentes excessivas:

$$\varepsilon_c = K_s \times N_{80}^{-0,25} \quad (2)$$

Onde (ε_c) representa a extensão vertical máxima de compressão no topo do solo de fundação; (N_{80}), o número de eixo padrão de 80 kN e (K_s), parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento do pavimento.

Toma o valor de $2,8 \times 10^{-2}$ para 50% de probabilidade de sobrevivência, $2,1 \times 10^{-2}$ para 85% e $1,8 \times 10^{-2}$ para 95%.

2.1.5.1. Procedimento utilizado no âmbito dos pavimentos novos

Os métodos de dimensionamento de pavimentos destinam-se a fixar os materiais a empregar e as espessuras das camadas dos pavimentos tendo em atenção as variáveis de projeto. Podem no entanto classificar-se em dois grupos, consoante a forma como foram estabelecidos: os métodos empíricos, baseados exclusivamente na observação do comportamento de pavimentos de troços experimentais, e os métodos analíticos, que tem como base a modelação do comportamento dos pavimentos, relacionando os estados de tensão e de deformação induzidos pelo tráfego e pelas ações climáticas e com o estado de degradações estruturais.

A partir da aplicação de métodos analíticos, algumas administrações rodoviárias, nomeadamente a portuguesa, Junta Autónoma de Estradas (JAE), atualmente Estradas de Portugal (EP), S.A., têm vindo a estabelecer procedimentos mais simplificados para a conceção dos pavimentos, recorrendo a elaboração de catálogos de seções de pavimentos, aos quais está subjacente a aplicação de determinado método de dimensionamento.

Assim, foi desenvolvido pela Junta Autónoma de Estradas em 1995 um Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV), que inclui um catálogo de seções de pavimentos (JAE, 1995a).

O dimensionamento de pavimentos rodoviários pelo MACOPAV consiste, genericamente, nos seguintes passos:

1. Estabelecimento da espessura das camadas e composição dos materiais que as constituem. As estruturas novas geralmente aplicadas na pavimentação rodoviária nacional são constituídas por:

- Camada de desgaste em betão betuminoso (geralmente com 5cm de espessura, embora possa ter 4cm para tráfego leve, classes T5 e T6 ou inferiores, ou 6cm para tráfego intenso, classes T2 e T1 ou superiores);
- Camada de regularização ou de base (depende da espessura) em mistura betuminosa densa ou macadame betuminoso;

- Camada de sub-base constituída por uma ou duas camadas granulares de agregado britado de granulometria extensa, geralmente com espessura de 15 ou 20 cm (total de 30 ou 40cm no caso da existência de duas camadas).

Essa estrutura assenta no solo de fundação, que em caso de necessidade pode ter características melhoradas no topo, executando-se um leito de pavimento.

2. Definição do número de eixos padrão (N_p) que vai solicitar o pavimento durante a vida útil considerada geralmente de 20 anos para pavimentos flexíveis novos e a temperatura de serviço, para o local de dimensionamento.
3. Cálculo da rigidez do betume.
4. Cálculo do módulo de deformabilidade (E_m), das misturas betuminosas.
5. Determinação do módulo de deformabilidade da fundação.
6. Estimativa do módulo de deformabilidade das camadas granulares.
7. Com as camadas completamente caracterizadas mecanicamente e conhecendo as suas espessuras de partida, efetua-se o cálculo do estado de tensão-deformação, recorrendo a um dos programas de cálculo automático. Obtém-se com este cálculo as extensões relevantes: extensão de tração na base das camadas betuminosas, no sentido da progressão do tráfego (critério da fadiga); extensão vertical de compressão, no topo da fundação (critério de deformação permanente).
8. Com as extensões determinadas no passo anterior, segue-se o cálculo do número de eixos padrão que o pavimento suporta (eixos padrão admissíveis, N_a) para o critério da fadiga e para o critério de deformação permanente.
9. Conhecendo o número de eixos padrão (N_p), que previsivelmente solicita a estrutura (passo 2) e o número de eixos padrão admissíveis, (N_a), pode obter-se a percentagem de resistência que se gasta, ou seja, o dano D :

$$D = \frac{N_p}{N_a} \times 100 \quad (3)$$

- $D > 100\%$: **subdimensionamento**;
- $D < 80\%$: **sobredimensionamento**.

Em caso de sobredimensionamento ou subdimensionamento, geralmente, intervém-se na espessura da camada que se dimensiona. Com os novos dados, repetem-se do 3º passo e seguintes do procedimento até chegar a percentagem adequada do dano D .

2.1.5.2. Procedimento utilizado na reabilitação de pavimentos existentes

A reabilitação ocorre com o objetivo de promover uma melhoria das características, essencialmente estruturais, do pavimento face a novas solicitações, para um novo período de vida, nomeadamente com um tráfego mais elevado que o considerado no período anterior (Branco *et al.*, 2011). Consiste portanto, no aumento da capacidade resistente do pavimento através de reforço de camadas.

Em Portugal são aplicados essencialmente dois métodos para dimensionar, no âmbito da ação de reabilitação, visando a determinação da espessura de camadas betuminosas de reforço de um pavimento flexível. O primeiro se designa por procedimento baseado nas deflexões reversíveis (teoria de elasticidade), é uma metodologia aplicada pelo LNEC nos finais dos anos 60, tendo entretanto conhecido várias transformações. O segundo é de estrutura bastante mais simples, foi desenvolvido pelo Asphalt Institute (AI, 1983) e designa-se por “procedimento baseado nas espessuras efetivas”.

Para fazer a análise no procedimento baseado nas deflexões reversíveis que permitirá definir a espessura da camada de reforço, é necessário, primeiramente, fazer a caracterização do pavimentos existente, definir de subtrechos homogéneos, fazer a caraterização estrutural complementar (Oliveira e Freitas, 2012).

A caraterização do pavimento existente consiste na análise da história do pavimento, englobando as informações sobre o tráfego e várias atividades tais como:

- Avaliação do estado do sistema de drenagem;
- Avaliação do estado superficial (fendilhamento: densidade; gravidade);
- Avaliação da capacidade de carga (deflexão);
- Caracterizar perfil longitudinal e transversal (reperfilamento).

Centrando-se na avaliação da capacidade de carga, esta pode ser feita por alguns equipamentos. No entanto o defletómetro de impacto é o equipamento que mais se utiliza para a observação da capacidade de carga ao nível de projeto.

Realizados os ensaios de carga e recolhida a informação descrita, é necessário fazer o tratamento dos dados obtidos, no sentido de estabelecer os trechos do pavimento uniforme do ponto de vista da capacidade de carga e determinar as deflexões mais representativas.

Para cada local selecionado é preciso conhecer a estrutura de pavimento ensaiada. Para tal, recorre-se à realização de carotes e poços abertos no bordo do pavimento, para complementar a caracterização estrutural.

Conhecendo tipo e valor da carga que provocou um determinado defletograma (como é o caso dum defletómetro de impacto, onde a carga é transmitida por uma placa circular e tem um valor conhecido, o qual depende da altura de queda) num pavimento com estrutura conhecida (espessura e composição das camadas), é possível estabelecer uma deformada para o pavimento semelhante à resultante do ensaio de carga com defletómetro de impacto. Recorre-se a um programa de cálculo do estado de tensão-deformação, admitindo certas características mecânicas das camadas de pavimento, estimadas em função da caracterização da qualidade do pavimento existente, considerando comportamento elástico-linear (Oliveira e Freitas, 2012).

Quando as deformadas medidas e calculadas são semelhantes, pode admitir-se que as características mecânicas do pavimento que deram origem a deformada calculada são muito próximas das características mecânicas que o pavimento apresentava na altura da realização do ensaio de carga.

Dessa forma, para estabelecer a espessura duma camada de reforço, conhecendo o comportamento previsível da estrutura existente, pode recorrer-se a um processo semelhante ao do dimensionamento analítico dum pavimento novo.

2.2. Desenvolvimento sustentável/sustentabilidade

O conceito do desenvolvimento sustentável resume a complexa questão da compatibilidade, a nível mundial, entre as políticas económicas, valores ambientais e humanos. O tratamento deste tema nasceu da consciência que resulta da contradição entre o crescimento e a existência de recursos limitados. A primeira realização deste conceito remonta à publicação, pelo Clube de Roma, do relatório intitulado "Os Limites do Crescimento" (Corriere e Rizzo, 2012) no qual foi enfatizado que o crescimento a longo prazo, não se refere a um aumento puramente quantitativo de indicadores económicos, em detrimento da dimensão qualitativa.

A percepção de que os recursos naturais são escassos ou finitos e que devem ser preservados para as gerações futuras e que qualquer forma de desenvolvimento só será sustentável se se promover o equilíbrio entre as necessidades económicas e sociais das

populações e proteção do meio ambiente. Apesar de ser um conceito recente, a sua essência tem levado a que os impactes ambientais tenham peso crescente nas decisões relacionadas com a construção/exploração dos pavimentos rodoviários.

Segundo Corriere e Rizzo (2012), a sustentabilidade é uma visão global de uma forma de desenvolvimento não só económico, mas também social, que o crescimento económico ocorre nos limites dos ecossistemas ecológicos. Se o homem "consome" mais do que o meio ambiente pode fornecer ou se ele polui os recursos, em suma, não haverá possibilidade de desenvolvimento sustentável, tal como definido no relatório elaborado pela UNEP (United Nations Environment Programme), em 1987, conhecido como relatório Brundtland, nome do seu coordenador. Nesse relatório o conceito desenvolvimento sustentável é definido como o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades (Brundtland (1987) apud Robèrt *et al.* (2002)).

O termo desenvolvimento sustentável é, portanto, o desenvolvimento compatível com a manutenção dos recursos necessários para a vida de seres humanos e de outros organismos do planeta, o ambiente e a qualidade de vida humana.

No âmbito de acordos internacionais com vista ao desenvolvimento sustentável, destaca-se a conferência do Rio na elaboração e descrição de um quadro político global para o desenvolvimento sustentável - a Agenda 21 e ainda os protocolos que cobrem redução de clorofluorcarbono "CFC" (Montreal, Copenhaga e Viena) e do Protocolo de Quioto, visando a redução dos gases com efeito estufa (Robèrt *et al.*, 2002).

Nessa perspectiva, os projetos de construção ou reabilitação de pavimentos rodoviários, para além dos dois critérios clássicos das considerações técnicas e a viabilidade económica, passam a satisfazer a um terceiro e particularmente exigente critério que é o da minimização dos impactes ambientais negativos, incorporando dessa forma a questão da sustentabilidade.

Ora, importa evidenciar que o termo sustentabilidade deriva do conceito de desenvolvimento sustentável e em termos gerais pode-se definir como a condição ou característica referida à permanência no tempo de uma atividade, projeto ou dos benefícios derivados deste (Vidal e Carlos, 2006).

Entende-se por outro lado que a sustentabilidade procura uma harmonização ou equilíbrio dos aspetos económicos, ambientais e sociais para uma melhoria da qualidade de vida humana, respeitando o direito das próximas gerações de poderem contar com a mesma qualidade de vida.

De evidenciar que numa das recomendações da agenda 21 refere-se que “é preciso desenvolver indicadores do desenvolvimento sustentável que sirvam de base sólida para a tomada de decisões em todos os níveis e que contribuam para uma sustentabilidade auto-regulada dos sistemas integrados do meio ambiente e desenvolvimento” (Brundtland, 1987). Nessa sequência, ao nível das organizações foram desenvolvidos vários indicadores para avaliar a sustentabilidade de várias atividades.

Para Vidal e Carlos (2006) é necessário usar modelos ou processos que permitam avaliar a sustentabilidade das diversas atividades que o homem realiza. Esta avaliação é possível através dos indicadores da sustentabilidade usados quer no campo económico, quer no ambiental e quer no social.

Porém, não é menos verdade que a sustentabilidade de qualquer atividade humana faz sentido, sempre que exista a relação necessária entre os sistemas económicos, ambientais e sociais, tendo como núcleo central o homem (Pinheiro, 2006).

Na atualidade, o uso de sistemas de avaliação para quantificar os benefícios da sustentabilidade tende a ser uma realidade, também devido ao facto de existir cada vez mais uma consciencialização ambiental (Costa *et al.*, 2013).

Na perspectiva de Araújo *et al.* (2013), as preocupações com a sustentabilidade estão cada vez mais presentes no quotidiano das pessoas, assumindo-se já como um fator de ponderação na tomada de decisões, em complemento às vertentes económica e de durabilidade de uma determinada solução ou produto. No entanto, no caso dos pavimentos rodoviários existe ainda um grande caminho a percorrer.

Ainda segundo Araújo *et al.* (2013) não são ainda totalmente conhecidas as consequências ambientais da construção de estradas, e em particular dos pavimentos rodoviários, ao longo do tempo, isto é, durante o seu ciclo de vida.

Para Santero *et al.* (2011b) a pegada ecológica de um pavimento é medida pela agregação de impactos sobre seu ciclo de vida, começando com a extração de matérias-primas e culminando em vários cenários de fim-de-vida. Quando os componentes individuais ou todas as fases do ciclo de vida são omissos do quadro de avaliação do ciclo de vida, as conclusões resultantes correm riscos de serem recolhidas com informações incompletas.

De acordo com Santero *et al.* (2011a) apud (Araújo *et al.*, 2013) o ciclo de vida de um pavimento rodoviário se encontra dividido em cinco fases: (1) extração de matérias-primas e produção; (2) construção; (3) utilização; (4) conservação; (5) fim-de-vida. Cada fase é composta por vários componentes, cada um representa uma interação única entre o pavimento e o meio ambiente. Na Figura 8 apresenta-se as fases e componentes do ciclo de vida do pavimento.

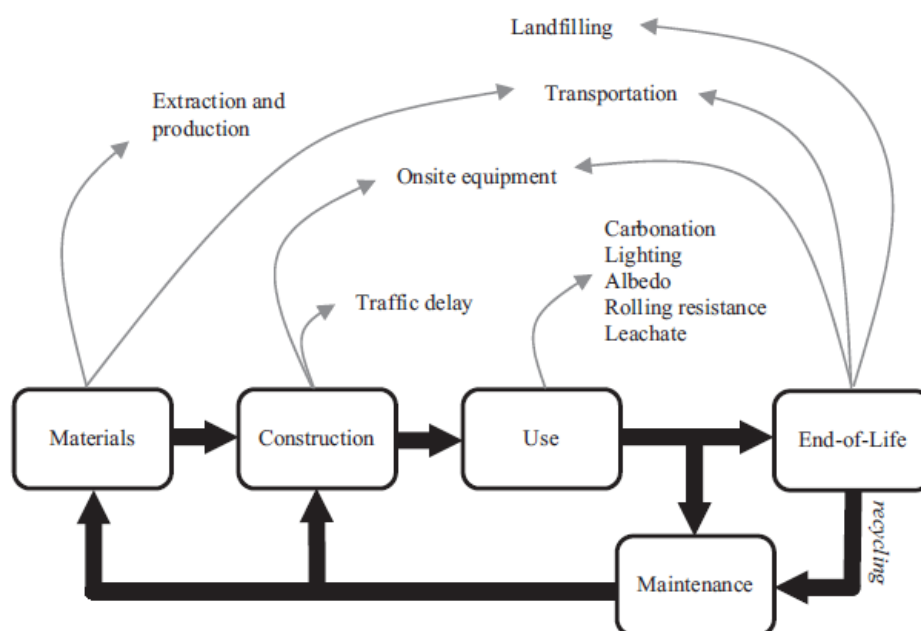


Figura 8 - Fases e componentes do ciclo de vida do pavimento (Santero *et al.*, 2011a)

No que toca à avaliação do ciclo de vida verifica-se que é uma tendência importante das indústrias que enfatizam a gestão do ambiente para realizar uma avaliação do ciclo de vida na fase de projeto e na escolha do método de construção e tomar decisões com base na avaliação. Na apresenta-se a avaliação de ciclo de vida, tal como definido na norma ISO 14040 (Chiu *et al.*, 2008).

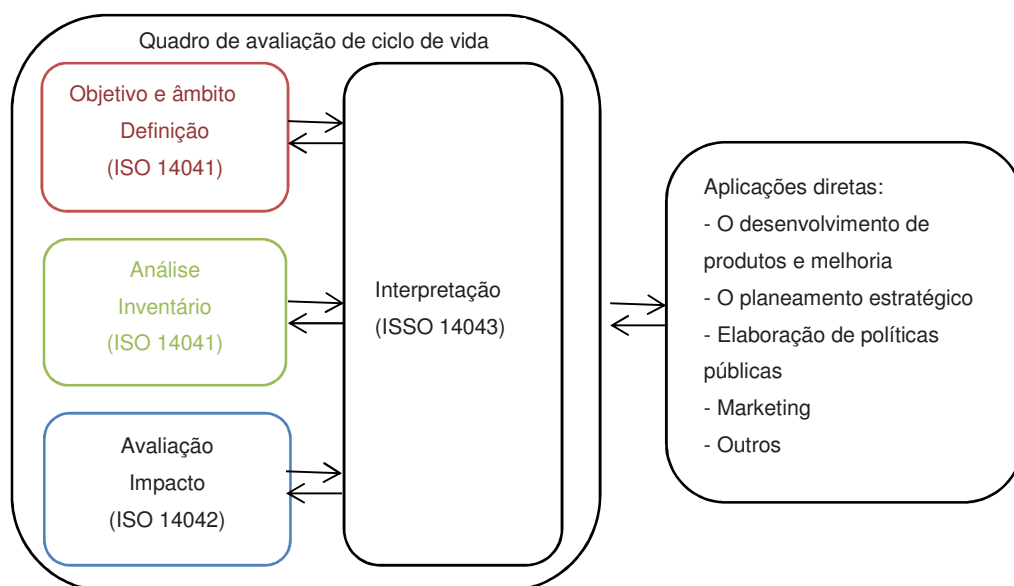


Figura 9 - Quadro de avaliação do ciclo de vida de acordo com a ISO 14040 adaptado de (Chiu *et al.*, 2008)

Segundo Santos *et al.* (2013) a metodologia de análise do custo de ciclo de vida constitui um processo que permite avaliar o valor económico total de um determinado projeto, já que considera na análise os custos iniciais e futuros (estes últimos convertidos em valor atualizado pelo processo de desconto).

Nessa perspetiva, há que se ter em conta aos custos associados à gestão de pavimentos. Para Branco *et al.* (2011), estes podem ser divididos em dois grupos principais: os custos da administração e os custos dos utentes. Os custos da administração englobam um conjunto de componentes de custos tais como: custo de projeto; custo da construção; custo da conservação e valor residual. Já os custos dos utentes integram as seguintes componentes de custos: custo de operação de veículo; custo do tempo de percurso; custo dos acidentes e custo do desconforto.

Porém, sobre os custos associados à administração, acresce-se outros componentes de custos, conhecidos como os custos dos não-utentes (*"non-user costs"*), tais como: poluição do ar, poluição sonora entre outros (Haas *et al.*, 1994).

Na Figura 10 resumem-se os principais indicadores utilizados para a avaliação da sustentabilidade nos sistemas de gestão de pavimentos.

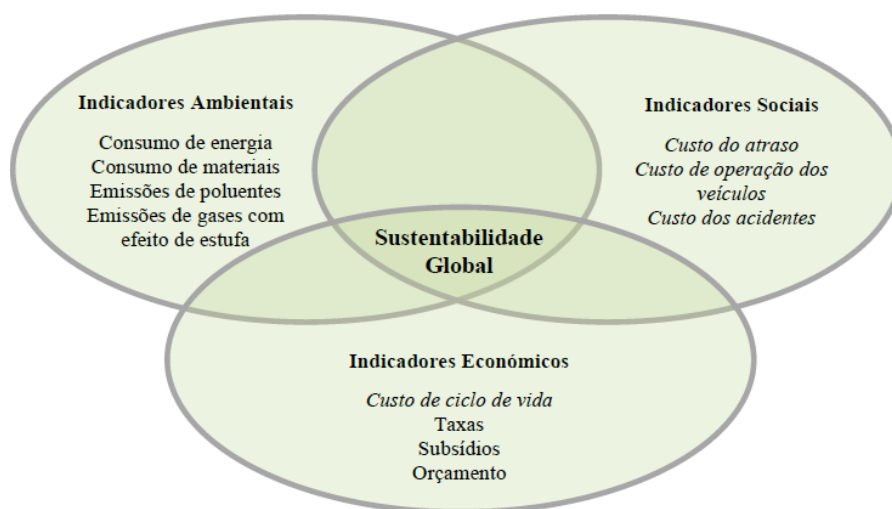


Figura 10 - Questões de sustentabilidade a considerar nos sistemas de gestão de pavimentos (Santos *et al.*, 2013)

2.2.1. Avaliação económica de alternativas

A aplicação de princípios economicistas ao projeto de transportes, incluindo pavimentos rodoviários, ocorre basicamente a dois níveis: no primeiro nível, encontram-se as decisões da gestão requeridas para determinar a possibilidade e a viabilidade de uma alternativa; no segundo nível, escolhe-se economicamente a melhor alternativa para o projeto. A maior diferença na avaliação económica entre estes dois níveis de gestão de pavimentos consiste na importância do detalhe ou na informação requerida. Os princípios básicos envolvidos nos dois níveis são os mesmos (Haas *et al.*, 1994).

O objetivo da avaliação dos custos de pavimentos é o de apoiar a decisão quanto à escolha das alternativas de construção, e conservação mais rentáveis, quanto ao custo e benefício, face a determinadas condições técnicas e económicas. Inicialmente os métodos de avaliação económica de pavimentos apenas consideravam os custos iniciais de construção do pavimento. Presentemente, dado que os investimentos nos pavimentos são realizados para um longo prazo, essa avaliação considera todo o ciclo de vida do pavimento e respetivos custos e benefícios.

Na Figura 11 apresenta-se os procedimentos tidos em conta no desenvolvimento de um plano apropriado de conservação, ou seja, a manutenção preventiva do pavimento, sendo que a relação custo-benefício de cada programa pode ser determinada pela razão de benefício total e custo total (Figura 12) entre os vários programas de conservação. O programa com maior custo-benefício é escolhido para ser a melhor estratégia.

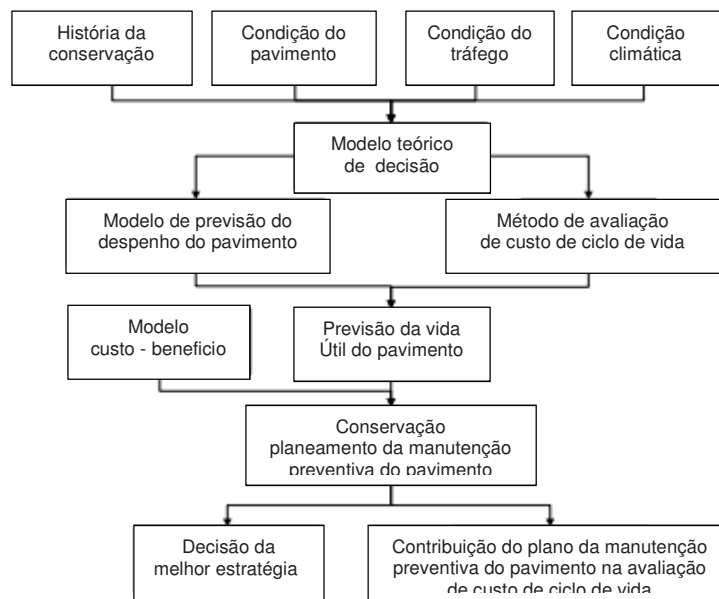


Figura 11 - Desenvolvimento de um plano apropriado de conservação adaptado de (Ding *et al.*, 2013)

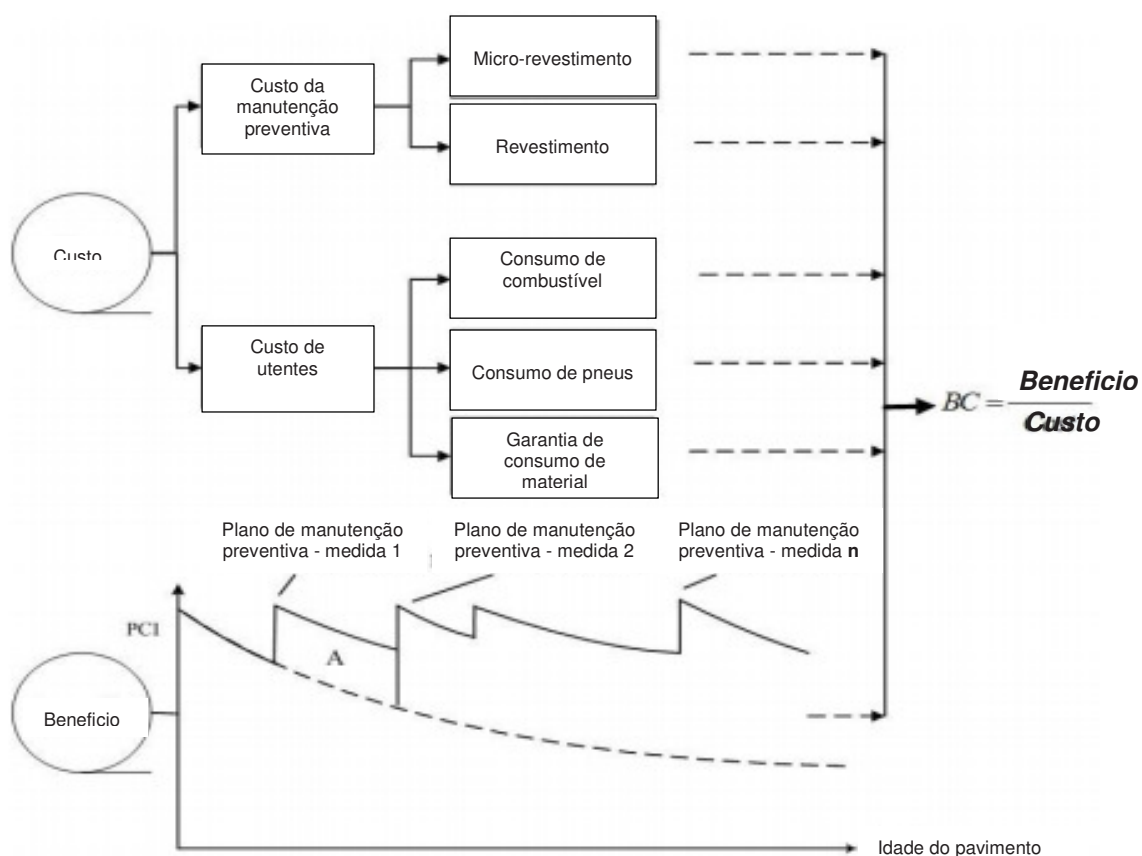


Figura 12 - Determinação da relação custo-benefício de uma estratégia de conservação adaptado de (Ding *et al.*, 2013)

Assim, é necessário integrar na análise todos os fatores influentes na evolução do pavimento, determinando, para uma dada qualidade exigida, o menor custo total. Deste modo, é necessário avaliar a história económica previsível para um dado pavimento, a qual compreende uma sucessão de custos e benefícios, determinados ou previstos, para cada período de tempo considerado.

2.2.2. Indicadores ambientais

Para avaliação de impactes negativos no ambiente desde a construção, exploração e manutenção de infraestruturas rodoviárias são propostos quatro grupos de indicadores ambientais relacionados com os seguintes impactes da infraestrutura (Antunes e Marecos, 2013):

- Poluição sonora;
- Poluição atmosférica;
- Emissões de gases com efeito de estufa;
- Emissões com impacto na saúde (qualidade do ar);
- Poluição da água;
- Consumo de recursos naturais.

Na Figura 13 resumem-se os principais impactos das infraestruturas rodoviárias para as populações locais e para a sociedade em geral.

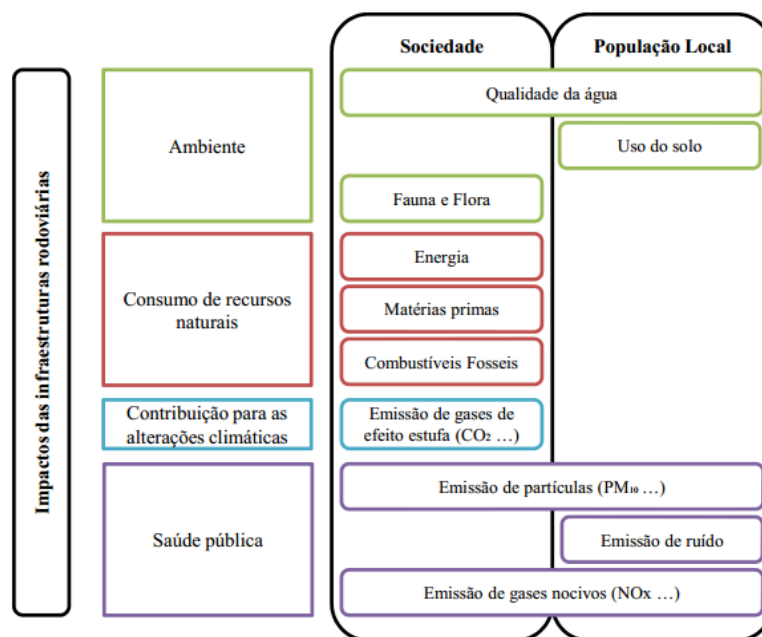


Figura 13 - Impacto das infraestruturas rodoviárias na sociedade e população local (Antunes e Marecos, 2013)

Por outro lado, tendo em conta as características dos pavimentos em estudo, para efeito de aferição dos impactes ambientais poder-se-á optar por estabelecer o volume de material utilizado em cada solução de reabilitação como indicador do impacte ambiental, pois, entende-se que as soluções para as quais se utilize o menor volume (m^3) de material por cada unidade de área de pavimento (m^2) são, do ponto de vista ambiental, as melhores escolhas (Costa, 2008).

2.2.3. Indicadores sociais

Os indicadores sociais são os de mais difícil determinação no caso dos pavimentos e, por isso são muitas vezes deixados de fora das análises. Numa análise de sustentabilidade, os indicadores sociais não são necessariamente apenas os custos dos utentes (isso seria verdade numa análise dos custos do ciclo de vida). Num exemplo onde este tipo de indicadores foi considerado, a sua escolha recaiu na segurança e no conforto de circulação (Torres-Machí *et al.*, 2014). Apesar disso, por simplicidade, por vezes os indicadores sociais são limitados à quantificação dos custos dos utentes.

De referir que os custos dos utentes são custos induzidos aos utilizadores da infraestrutura e aos contribuintes em geral, resultantes de condições normais de operação da infraestrutura e de atividades de manutenção (zonas de trabalho), incluindo os custos do tempo de percurso, os custos de operação dos veículos e os custos associados aos impactos causados na segurança (custos dos acidentes).

Por outro lado, a inclusão do custo dos acidentes implica necessariamente ter conhecimento de diferentes valores de sinistralidade associados aos pavimentos estudo. Os referidos valores nem sempre se encontram disponíveis.

Assim sendo e por questão de simplicidade, por vezes os indicadores sociais são limitados à quantificação dos custos dos utentes.

Nessa sequência, a abordagem tradicional atribuí um valor monetário a cada hora de viagem de cada veículo (em função da sua categoria, motivo da viagem, etc.) e, posteriormente, ao cálculo do tempo de percurso extra sempre que existem intervenções que causem constrangimentos a circulação, chegando-se a uma valorização monetária para esse constrangimento. Esta abordagem tem associado dois tipos de dificuldades: por um lado, a definição de uma valorização monetária a uma hora de tempo de viagem de cada veículo é uma fonte de incertezas, por outro, é necessário saber à partida a

configuração das zonas de trabalhos pois só assim, se poderá calcular, com a devida exatidão, um valor para o tempo de percurso extra (Costa, 2008).

Por conseguinte, seria necessário estimar a duração de cada medida de intervenção de conservação e reabilitação e, em seguida, somar todas as durações de intervenção ocorridas ao longo do período de análise correspondentes a cada pavimento.

Podendo optar para efeito de aferição de custos sociais por uma abordagem que consiste na estimativa do número de dias ao longo do ciclo de vida de uma determinada estrutura de pavimento, nos quais a mesma estará sujeita a intervenções de conservação e reabilitação (LNEC, 2008) apud (Costa, 2008).

CAPÍTULO 3 – CASOS DE ESTUDO E METODOLOGIAS

3.1. Introdução

A prossecução do principal objetivo desta dissertação pressupõe à partida da escolha de um ou vários pavimentos urbanos degradados de forma a desencadear estudos, visando a escolha de alternativas de reabilitação dos mesmos, tendo em conta cada situação em concreto.

Dessa forma, recorreu-se à Câmara Municipal de Guimarães que prontamente atribuiu dois pavimentos urbanos com limitação imposta à partida, pela falta de informações quer ao nível de projeto quer ao nível do tráfego, razão pela qual se programou os trabalhos de campo para a obtenção das informações relevantes que sirvam de base na projeção das soluções de reabilitação.

Portanto, os objetivos deste capítulo passam por um lado, pela descrição de metodologias utilizadas ao nível da avaliação superficial e estrutural, bem como a respetiva caracterização; apresentação das alternativas de reabilitação propostas e por fim, descrever a metodologia adotada para a avaliação da sustentabilidade das soluções propostas de reabilitação.

3.2. Descrição dos casos de estudo

3.2.1. Rua Cónego Dr. Manuel Faria

Sita em Azurém (Figura 14), esta rua constitui uma das importantes vias de acesso à Universidade do Minho, com uma extensão aproximadamente de 315 metros e uma largura média de 7,15 metros, sendo que uma boa parte da sua extensão se encontra ladeada em ambos os sentidos por zonas de estacionamento. Pela sua localização e serventia, evidencia-se a tendência em distribuir o tráfego com o destino e origem na rede estruturante, garantindo a acessibilidade aos espaços adjacentes, sem pôr em causa a normal vivência urbana e vivência local.

Na Figura 15 apresenta-se esquematicamente o perfil transversal tipo de uma via distribuidora local.



Figura 14 - Localização do trecho, rua Cónego Dr. Manuel Faria

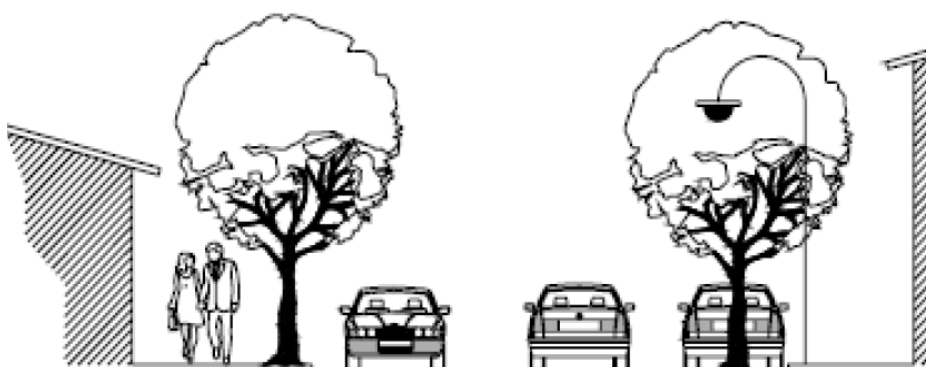


Figura 15 - Perfil transversal tipo de uma via distribuidora local (Seco *et al.*, 2008)

3.2.2. Rua Associação Artística Vimaranesense

Sita em Creixomil (Figura 16), esta rua tem uma extensão de aproximadamente 556 metros e largura média de 9,47 metros, sendo que uma boa parte dessa extensão se encontra ladeada em ambos os sentidos por edifícios habitacionais. Pela sua localização e serventia, caracteriza-se pelo forte pendor de uma via de acesso local, na medida em que serve de acesso direto aos espaços adjacentes e os movimentos pedonais bastante presente, bem como às atividades associadas à vivência local.

Na Figura 17 apresenta-se esquematicamente o perfil transversal tipo de uma via de acesso local.

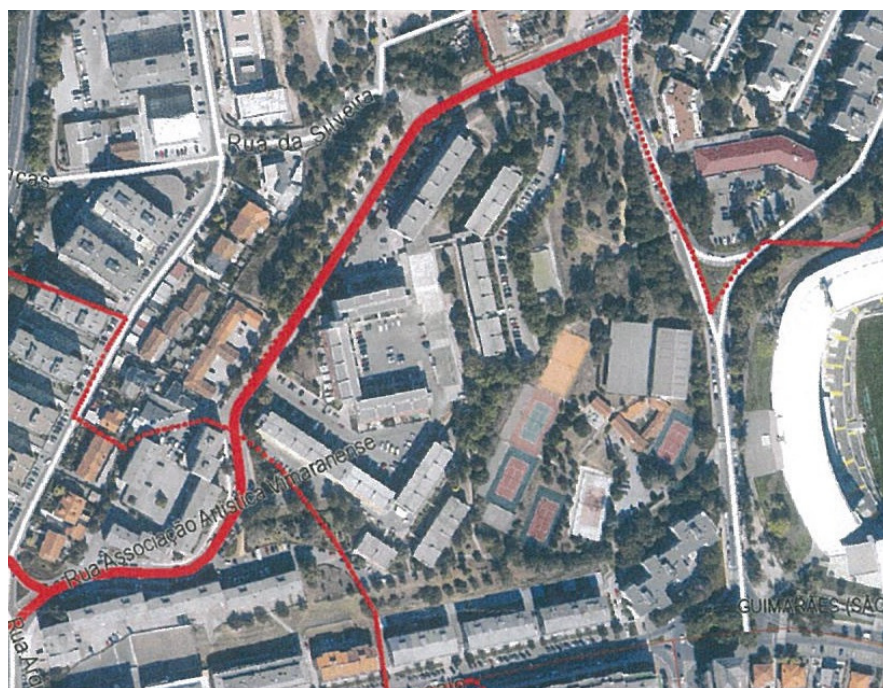


Figura 16 - Localização do trecho, rua associação artística vimaranense

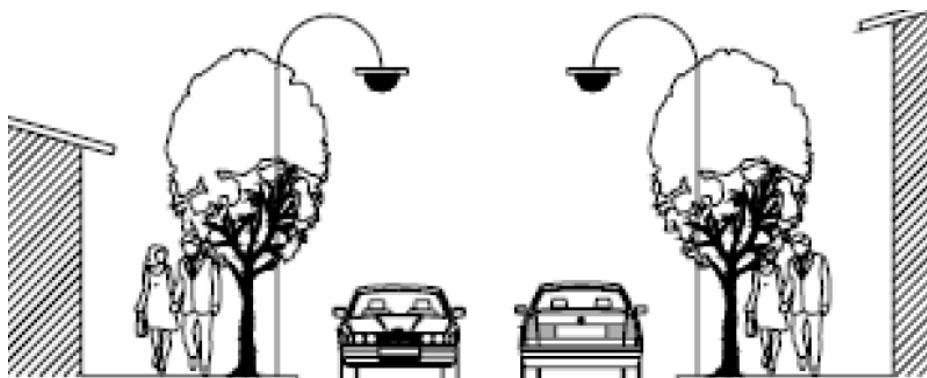


Figura 17 - Perfil transversal tipo de uma via de acesso local (Seco *et al.*, 2008)

3.3. Metodologia para a caracterização do estado superficial e estrutural dos pavimentos

Os pavimentos são estruturas que geralmente não apresentam rotura súbita, mas sim deterioração funcional e estrutural que se inicia a partir da abertura ao tráfego (Bernucci *et al.*, 2008). Para tal, de acordo com os diferentes tipos de pavimentos e necessário definir parâmetros que caracterizem objetivamente o seu estado, estrutural e funcional num determinado instante (Branco *et al.*, 2006), definindo dessa forma os parâmetros de estado.

Nessa perspetiva, para os pavimentos em estudo foram realizados os seguintes trabalhos de campo: levantamento do estado superficial através de observação visual/levantamento fotográfico; avaliação da capacidade de carga com recurso ao defletómetro de impacto, (Falling Weight Deflectometer, FWD); trabalhos complementares nomeadamente abertura de poços e carotagem ao longo dos pavimentos para avaliar as respetivas estruturas.

3.3.1. Avaliação do estado superficial

As degradações observáveis à superfície constituem um parâmetro imprescindível para a avaliação da qualidade funcional, na medida em que define o nível de serviço do pavimento, no que diz respeito à circulação, conforto e segurança.

As degradações podem ser registadas através de dois métodos: observação visual, com registo do estado observado em diferentes suportes para posterior tratamento e observação através de equipamento de tipo vídeo ou fotográfico (Branco *et al.*, 2011).

O estado superficial dos pavimentos em estudo se encontra avaliado através da determinação do nível de degradação de diferentes tipos de patologias nomeadamente o aparecimento de fendas isoladas (Figura 18), ninhos ou covas (Figura 19), pele de crocodilo (Figura 20), rodeira (Figura 21), pelada (Figura 22), degradação de reparações (Figura 23). Portanto, para cada uma destas degradações foi estabelecida uma gama de valores a variar entre 0 e 3 (aumentando com o nível de gravidade da degradação), com exceção do fendilhamento, onde o valor máximo é de 6 (0 a 3 para caracterizar a severidade das fendas isoladas e 4 a 6 para a severidade da pele de crocodilo).



Figura 18 - Fendas isoladas (Rua Cónego Dr. Manuel Faria)



Figura 19 - Ninhos (Rua Cónego Dr. Manuel Faria)



Figura 20 - Pele de crocodilo (Rua Cónego Dr. Manuel Faria)



Figura 21 - Rodeiras (Rua Associação Artística Vimaranesense)



Figura 22 - Pelada (Rua Associação Artística Vimaranesse).



Figura 23 - Degradação da reparação (Rua Associação Artística Vimaranesse).

3.3.2. Avaliação da capacidade de carga

A capacidade estrutural do conjunto “pavimento - solo de fundação” (capacidade de carga do pavimento) pode ser avaliada com base em determinados parâmetros tais como: (i) os módulos de elasticidade dos materiais das camadas; (ii) a vida residual; (iii) a espessura requerida para um novo período de vida; (iv) a deformação vertical da superfície, considerada como a resposta do pavimento quando este é submetido à aplicação de uma carga em determinadas condições (Branco *et al.*, 2006).

As deformações reversíveis observáveis na superfície dos pavimentos, também designadas por deflexões, constituem o melhor indicador da qualidade estrutural do corpo do pavimento e, em particular, das camadas granulares e da capacidade de suporte do

solo de fundação no caso de pavimentos flexíveis (Pereira e Miranda, 1999). E refletem a influência de vários parâmetros, tais como, a espessura das diversas camadas e as características mecânicas dos materiais constituintes (JAE, 1995b).

A avaliação da capacidade estrutural pelo método não-destrutivo sofre a influência do comportamento resiliente dos materiais, que por sua vez é influenciado pelo teor de humidade e pela temperatura, a qual reduz o módulo de rigidez das misturas betuminosas (Macêdo, 1996).

A deflexão de um pavimento pode ser obtida por vários equipamentos disponíveis tais como a viga de Benkelman, o defletógrafo de Lacroix, o curviâmetro, o defletómetro de impacto, entre outros.

Dependendo do modo como são aplicadas as cargas durante os ensaios de carga, pode-se distinguir dois grupos: carga rolante e carga pontual. A carga rolante corresponde ao equipamento que induz a carga no pavimento a partir da passagem de um eixo de um veículo pesado, sendo a medição da deflexão realizada num determinado ponto. Fazem parte deste grupo equipamentos como a viga de Benkelman, deflectógrafo de Lacroix e o Curviâmetro. No caso de equipamento baseado na carga pontual, esta é aplicada num dado ponto da superfície do pavimento, através de cargas dinâmicas ou estáticas, sendo os dinâmicos os mais utilizados. Equipamentos como o defletómetro de impacto induzem cargas de impacto, através da queda de uma massa a uma determinada altura (Antunes, 1993).

Como já foi referido anteriormente, para avaliação da capacidade estrutural dos pavimentos em estudo, utilizou-se defletómetro de impacto, sendo que durante os ensaios com este equipamento foram aplicadas na superfície do pavimento duas pancadas com cargas entre 30 e 65 kN, sendo feita uma interpolação linear para obter as deflexões para uma carga de 40KN, correspondente ao eixo padrão de 80 kN considerada a carga de referência para o estudo. No que refere à posição dos sensores, estes encontram-se às seguintes distâncias do centro de aplicação de carga: 0, 0,3, 0,45, 0,6, 0,9, 1,2, 1,5, 1,8 e 2,1 metros.

Na Figura 24 é apresentado o equipamento utilizado nos ensaios ou seja para avaliação da capacidade de carga dos pavimentos.



Figura 24 - Defletómetro de impacto

3.3.3. Avaliação das estruturas dos pavimentos

A avaliação da condição estrutural do pavimento, de forma adequada, é indispensável em projetos de reabilitação, porque possibilita um melhor diagnóstico das patologias e das suas possíveis origens (Cavalcante *et al.*, 2004).

A operacionalização dessa avaliação faz-se pela análise e levantamento das informações ao nível de espessuras e a composição das camadas dos pavimentos através de sondagens de rotação e poços, permitindo deste modo, conhecer em que condição se encontra a estrutura, e assim, dimensionar o reforço procurando compatibilizar as diversas características resistentes dos materiais que compõem o pavimento reforçado perante as solicitações futuras do tráfego.

A abertura dos poços e extração de carotes inserem-se nos métodos destrutivos, pois consistem na remoção de partes das camadas do pavimento para avaliação das suas características e condições “in loco” e extração de amostras para ensaios em laboratório.

Nas Figuras 25, 26 e 27, apresentam-se os procedimentos realizados para a avaliação das estruturas dos pavimentos em estudo.



Figura 25 - Medição das espessuras por abertura de poço



Figura 26 - Sondagens à rotação (carotagem)



Figura 27- Carote extraído para a determinação das espessuras das camadas ligadas

3.4. Alternativas de reabilitação propostas

3.4.1. Alternativas propostas

De forma a poder realizar a avaliação da sustentabilidade de diferentes alternativas, optou-se por determinar três soluções de reabilitação que se julgou serem as mais adequadas para a reabilitação dos pavimentos, tendo em conta a função que estes desempenham dentro da rede viária municipal. As soluções propostas são as que se seguem: (1) Execução de reforço tradicional; (2) Fresagem das camadas betuminosas existentes e construção das novas camadas; (3) Reciclagem *in situ* com espuma de betume das camadas betuminosas existentes e aplicação de nova camada de desgaste.

Para tal, serão considerados para efeito da reabilitação, os materiais tradicionalmente aplicados, cujos módulos são determinados recorrendo ao método da Shell para novas misturas betuminosas. No que diz respeito ao módulo da camada reciclada, considerou-se os valores médios dos limites dos módulos de deformabilidade obtidos em estudos experimentais feitos a nível nacional e internacional para o caso de reciclagem com espuma de betume. No entanto, para a obtenção dos módulos da camada granular e fundação fez-se o ensaio de CBR que permite estimar o valor do módulo de deformabilidade desse material.

Na Tabela 3 resume-se a metodologia adotada na obtenção dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas das camadas de reforço e antigas dos pavimentos.

Tabela 3 - Metodologia para a determinação de módulos de deformabilidade das camadas dos pavimentos

Material/ camadas	Coefficiente de <i>Poisson</i>	Metodologia adotada
Camadas betuminosas novas	0.35	Fórmula previsional da Shell
Camadas betuminosas antigas	0.35	JPavBack
Camada betuminosa reciclada com espuma de betume	0.35	Referências bibliográficas
Camada Granular	0.35	Fórmula (Powell <i>et al.</i> , 1984) e JPavBack
Solo de fundação	0.40	Fórmula (Powell <i>et al.</i> , 1984) e JPavBack

3.4.2. Avaliação do tráfego

O tráfego é um dos agentes de degradação que maior importância tem na evolução do comportamento dos pavimentos. Se a evolução do tráfego real for superior à estimada no projeto, em princípio, o pavimento terá uma vida útil inferior (Freitas e Pereira, 2001).

O estudo de tráfego para este trabalho baseou-se essencialmente em contagens manuais. Sendo que diversos tipos de veículos foram agrupados pelas 11 categorias definidas pela Junta Autónoma de Estradas (JAE), atual estradas de Portugal (EP). A partir destas contagens e tendo em conta as características dos pavimentos em estudo, com uma velocidade de circulação dos veículos de 50 Km/h e devido ao seu posicionamento na rede, como via distribuidora local e via de acesso local respetivamente, aliás descritos nos pontos 3.2.1 e 3.2.2 deste capítulo. Estimou-se as taxas de crescimento para o período de dimensionamento, calculou-se o fator de agressividade, donde resultou o tráfego acumulado para dois períodos considerados.

Apresenta-se para cada pavimento em estudo (Tabela 4 e Tabela 5) o resumo do estudo de tráfego, com vista à projeção do Número Acumulado de Eixos Padrão (NAEP) de 80 kN para o período de dimensionamento considerado (20 anos). Este é também considerado o tráfego de projeto (N_p) utilizado no dimensionamento das diversas soluções.

Tabela 4 - Projeção do NAEP (Rua Cónego Dr. Manuel Faria)

Ano	Taxa crescimento	TMDAvp	Classe tráfego	Fator de agressividade	NAVP	NAEP (N_p)
0 (0-10)	1%	147	T6	7,33	560 077	9 074 417
10 (10-20)	3%	162			677 906	

Tabela 5 - Projeção do NAEP (Rua Associação Artística Vimaranesense)

Ano	Taxa crescimento	TMDAvp	Classe tráfego	Fator de agressividade	NAVP	NAEP (N_p)
0 (0-10)	1%	50	T6	3,06	190 935	1 292 410
10 (10-20)	3%	55			422 040	

Com base no tráfego médio diário de veículos pesados do ano zero para cada pavimento (TMDAvp0), verifica-se que o tráfego para ambos os pavimentos é da classe T6 de acordo com a classificação do tráfego do MACOPAV (JAE, 1995a).

3.5. Metodologia para a avaliação da Sustentabilidade de soluções de reabilitação

A metodologia para a avaliação da sustentabilidade das soluções de pavimentação baseia-se na metodologia desenvolvida por Araújo *et al.* (2014). Tendo por base as cinco fases do ciclo de vida de pavimentos rodoviários: (1) extração de matérias-primas e produção; (2) construção; (3) utilização; (4) conservação; (5) fim-de-vida.

Porém, uma vez que o principal objetivo deste trabalho visa avaliar a sustentabilidade de soluções de reabilitação, limitar-se-á essa avaliação no domínio das duas fases do ciclo de vida dos pavimentos rodoviários. Ou seja (1) extração de matérias-primas e produção e por fim (4) a conservação, neste caso, a reabilitação. Tendo cada fase a constituição que se apresenta de seguida.

Extração de Materiais primas e produção: todas as entradas e saídas do sistema são consideradas nesta fase, incluindo a extração e britagem de agregados, produção de ligantes (cimento, betume ou emulsão betuminosa) e produção de misturas (betuminosas ou hidráulicas). Além disso, o transporte de materiais e misturas é considerado tanto entre a extração das matérias-primas e os locais de produção como entre estes e a obra, bem como os equipamentos e atividades inerentes ao transporte.

Conservação/Reabilitação: Esta fase compreende todas as atividades de construção a levar a cabo no pavimento de forma a manter o nível de serviço satisfatório durante a vida útil do pavimento.

Dessa forma, a operacionalização da metodologia para a avaliação da sustentabilidade dos pavimentos rodoviários no âmbito da reabilitação, onde algumas fases e os componentes do ciclo de vida do pavimento são considerados, encontra-se estruturada por etapas de seguinte forma:

Etapa 1 - Caracterização do pavimento: nesta etapa, inclui-se as características geométricas, o tipo de pavimento, a espessura de cada camada de pavimento, bem como a indicação da distância média de transporte dentro da área de exploração da matéria-prima, produção e execução em obra e entre ambos, tendo em vista a determinação de impactos inerentes às operações de transporte.

Etapa 2 - Caracterização do material: nesta etapa todos os materiais e as misturas são caracterizados, a sua composição, por meio da definição das percentagens (em massa) de cada componente, e as suas densidades (soltas) e compactadas. Estes valores servem de base para o cálculo do número de viagens a serem realizadas por camiões para o transporte.

Etapa 3 - Caracterização dos equipamentos/processos: nesta etapa é feita a caracterização das diferentes atividades/processos, bem como os equipamentos utilizados. A determinação dos consumos e as emissões para cada atividade que compõe o ciclo de vida.

Etapa 4 - Resultados globais das energias consumidas e emissões gasosas produzidas: apresenta-se um resumo das características da estrada e um mapa pormenorizado das quantidades de materiais e misturas necessários, seguindo-se a apresentação de consumos e emissões resultantes de cada atividade, que são depois apresentados em termos globais e agrupados por categorias de impacto, para fins de análise e comparação. Tendo em consideração a análise do potencial de aquecimento global “*Global Warming Potential*”, GWP. Este é determinado através da conversão de CO₂, CH₄ e N₂O, devido ao seu potencial para o efeito estufa, em emissões de CO₂ equivalente, utilizando os fatores de conversão de 1, 23 e 296, respetivamente (Huang *et al.*, 2009). Deste modo, o potencial de aquecimento global é determinado pela Equação 2.

$$GWP = CO_2 + 23CH_4 + 296N_2O \quad (4)$$

A determinação do consumo de energia do equipamento e as emissões de gases resultantes é obtido de acordo com as Equações 5 e 6, respetivamente (Araújo *et al.*, 2014).

$$TEC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (UFC_i \times UECF_i \times V_j) \quad (5)$$

Onde TEC é o consumo total de energia (J); UFC_i é o consumo unitário de combustível do equipamento i (L/m³); UECF_i é fator de conversão da energia unitária do combustível utilizado pelo equipamento i (J/L); V_j é o volume de material/mistura j utilizado (m³).

$$TER_{(g)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (UER_{(g)i} \times UFC_i \times V_j) \quad (6)$$

Onde $TER_{(g)}$ é a emissão total de gás libertado (kg); $UER_{(g)i}$ as emissões unitárias do gás g libertado pelo equipamento i (kg/L); UFC_i é o consumo unitário de combustível de material i (L/m³); V_j é o volume de material / mistura j utilizado (m³).

Etapa 5 - Análise Custos: apresenta-se os custos de cada alternativa em estudo com o objetivo de fornecer aos decisores uma base para a seleção da solução mais adequada (além de outros impactos relacionados com a construção e a manutenção).

Portanto a avaliação das emissões de gases com efeito de estufa e a avaliação custos económicos para cada solução de reabilitação, permitiu determinar através de comparação entre as soluções, aquela que é mais sustentável do ponto de vista ambiental e económico.

Capítulo 4 – RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização do estado superficial

A metodologia de avaliação explanada na avaliação do estado superficial, ponto 3.3.1 do capítulo anterior, nomeadamente na determinação do nível de degradação de diferentes tipos de patologias, permitiu ilustrar graficamente o estado superficial dos pavimentos em estudo (Figura 28 e Figura 29).

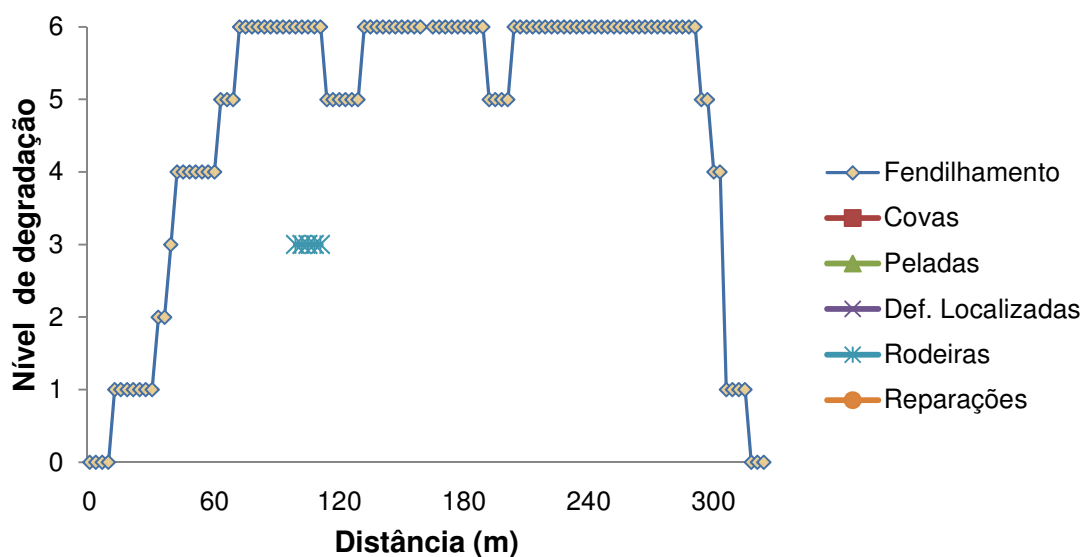


Figura 28 - Caracterização do estado superficial do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria

Na rua Cónego Dr. Manuel Faria (Figura 28) pode verificar-se que pavimento apresenta fendilhamento em toda a sua extensão, sendo que o nível de fendilhamento agrava-se evoluindo para pele de crocodilo, na maior parte da extensão do pavimento.

Verifica-se igualmente a existência de rodeira sem grande expressão. No entanto, é de realçar a ausência de outras patologias da família de deformações (deformações localizadas, ondulação, abatimento longitudinal e transversal) por um lado e por outro lado, a ausência das patologias da família da desagregação da camada de desgaste nomeadamente peladas e ninhos, bem como a ausência de reparações resultante da instalação de infraestruturas urbanas.

Em relação à rua Associação Artística Vimaranesse (Figura 29), verifica-se também que o pavimento apresenta praticamente fendilhamento em toda a sua extensão e com nível de degradação bastante elevado, evoluindo portanto, para pele de crocodilo. Verifica-se

também a ocorrência de reparações mal executadas resultante da instalação das infraestruturas urbanas sobretudo nas zonas em que o pavimento é ladeado pelos edifícios habitacionais, dando origem a vários tipos de fendilhamento; a observância de desagregação de camada de desgaste que poderá dever-se a má ligação entre a nova mistura (massa betuminosa fria) e a camada de desgaste; verificação de outras patologias tais como: covas, deformação localizada e rodeiras.

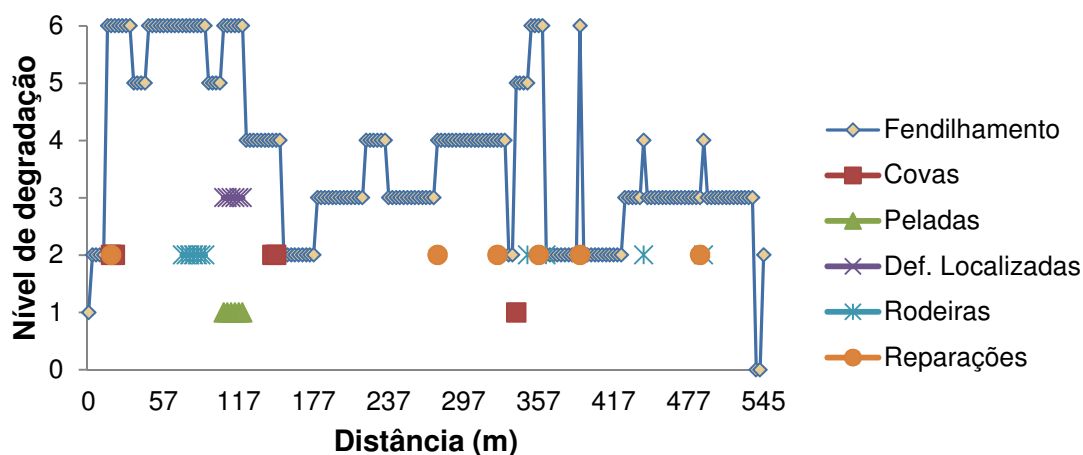


Figura 29 - Caracterização do estado superficial do pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesse

4.2. Caracterização da capacidade de carga

A correta caracterização estrutural do pavimento só é possível pela análise das deflexões elásticas, tratando-se das deflexões obtidas por defletómetro de Impacto (FWD). Os resultados dos ensaios de capacidade de carga foram normalizados para a carga de 65 kN (carga de referência para o estudo). Essa normalização deve-se à verificação de pequenas variações da força aplicada. E estas variações por sua vez podem estar associadas às características de deformabilidade do meio ensaiado, à existência de atrito no sistema de guiamento da massa cadente e à variação de deformabilidade dos amortecedores com a temperatura.

Nas Figuras 30, 31, 32 e 33, apresenta-se as deflexões registadas em cada ponto ensaiado e por sentido dos pavimentos em estudo. Em que D1 a D9 representa o posicionamento de sensores relativamente ao centro de aplicação da carga.

No pavimento da rua Cónego Dr. Manuel Faria, sentido 1 (Figura 30), pode-se verificar que a máxima amplitude de deflexões ocorre no ponto correspondente aos 270 metros onde se registou fendilhamento de nível 6, tendo a mínima amplitude de deflexões registada no ponto corresponde aos 90 metros, onde igualmente se registou fendilhamento no nível mais elevado.

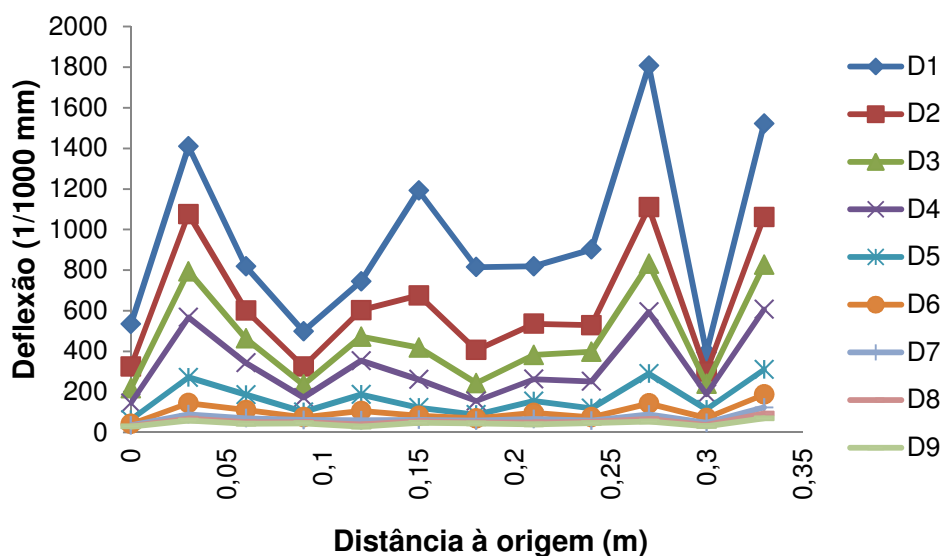


Figura 30 - Relação entre as deflexões normalizadas para cada ponto ensaiado da Rua Cónego Dr. Manuel Faria (Sentido 1)

Poder-se-á concluir com a análise das deflexões do sentido 1 que a degradação visível à superfície do pavimento por si só, não é responsável pela elevada ou baixa deflexão, na medida em que se registou a mínima e máxima amplitude de deflexões em pontos do pavimento onde se registou o nível máximo de fendilhamento (pele de crocodilo). Portanto, o comportamento das camadas granular e solo de fundação poderão ser determinantes nesta situação específica.

No que diz respeito ao sentido 2 do referido pavimento (Figura 31), verifica-se a ocorrência da máxima amplitude de deflexões no ponto correspondente aos 105 metros, onde se registou fendilhamento de nível 6 e rodeira, tendo a mínima amplitude de deflexões registada no ponto corresponde aos 15 metros, onde se registou fendas isoladas.

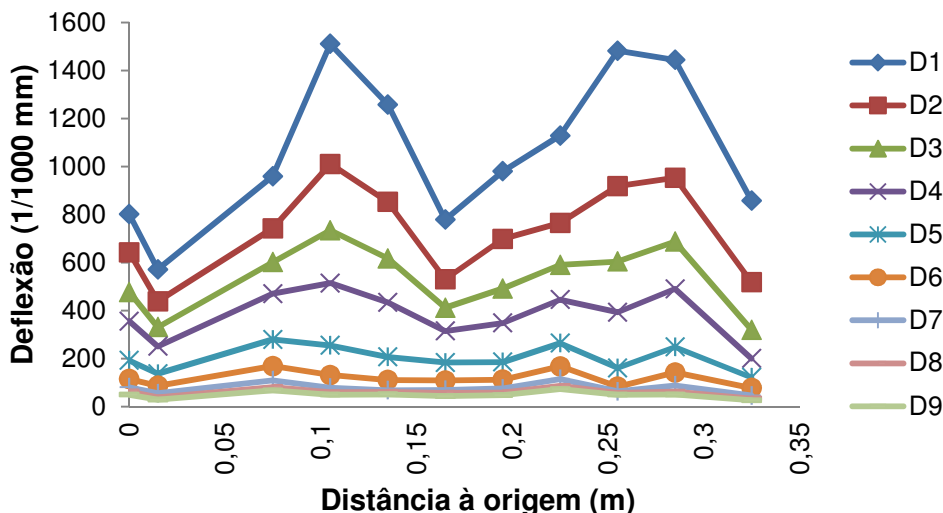


Figura 31 - Relação entre as deflexões normalizadas para cada ponto ensaiado da Rua Cónego Dr. Manuel Faria (Sentido 2)

Da análise das deflexões do sentido 2 do pavimento em questão, verifica-se que o estado da degradação superficial reflete-se na amplitude das deflexões, ou seja, no ponto onde registou menor nível de fendilhamento verificou-se menor amplitude de deflexões e no ponto onde se registou o maior nível de fendilhamento, verificaram-se maiores deflexões.

Relativamente às deflexões do pavimento da rua Associação Artística Vimaranesense, pode verificar-se que no sentido 1 (Figura 32) a máxima amplitude de deflexão ocorre no ponto correspondente aos 545 metros, onde se registou fendilhamento de nível 6. A mínima amplitude registou-se no ponto correspondente aos 40 metros, onde se observou igualmente o fendilhamento de nível 6.

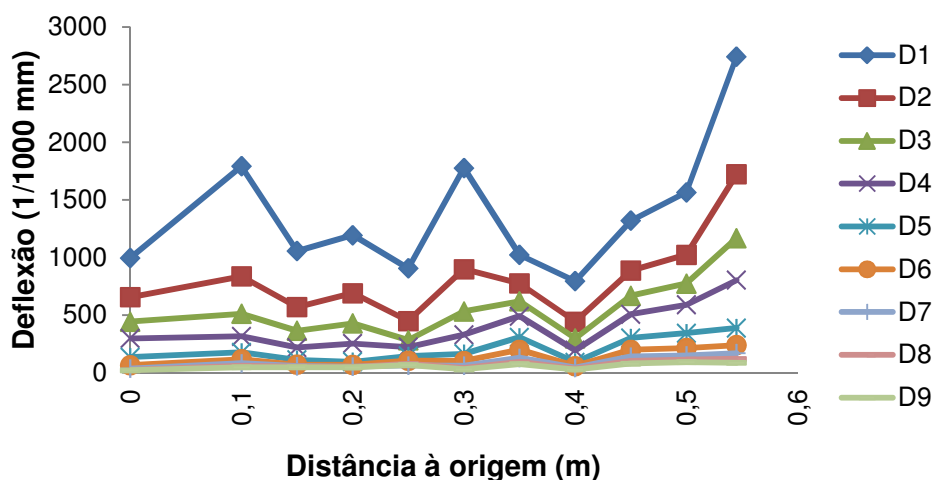


Figura 32 - Relação entre as deflexões normalizadas para cada ponto ensaiado da Rua Associação Artística Vimaranesense (Sentido 1)

Já no sentido 2 (Figura 33), a ocorrência da máxima amplitude de deflexão corresponde ao ponto 525 metros, onde não se registou apenas fendas isoladas devido às reparações localizadas com a massa betuminosa fria. A mínima amplitude foi registada no ponto correspondente aos 225 metros, onde se observou fendilhamento de nível 4.

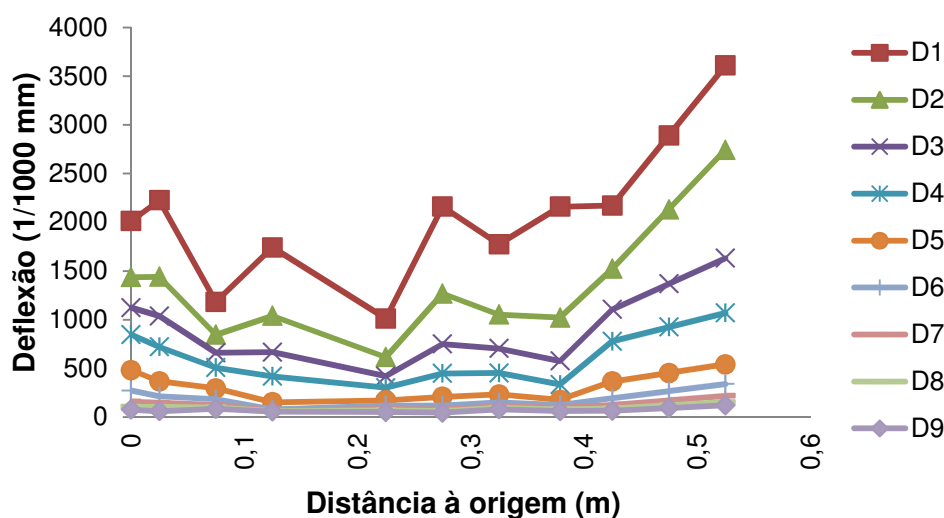


Figura 33 - Relação entre as deflexões normalizadas para cada ponto ensaiado da Rua Associação Artística Vimaranesense (Sentido 2)

Analisando apenas a amplitude máxima das deflexões registadas dos pavimentos, com base na leitura do sensor (D1) e por sentido, verifica-se que estamos perante elevada deflexão. Facto que por si só, já indica uma redução significativa da capacidade estrutural.

Porém, por se tratar de estradas pouco extensas optou-se para efeito de análise de deflexões considerar a totalidade da extensão em ambos os sentidos, sem subdividi-la em subtrechos de comportamento homogéneo. Nesse sentido foi determinado o defletograma característico de cada trecho através do percentil 85 correspondente a uma probabilidade das deflexões serem excedidas inferior a 15%.

De modo a obter a bacia de deflexões representativa de cada pavimento selecionou-se o ponto cujas deflexões se encontravam mais próximas das obtidas através do cálculo do percentil 85. Na Figura 34 e Figura 35, apresenta-se as deflexões representativas de cada caso de estudo.

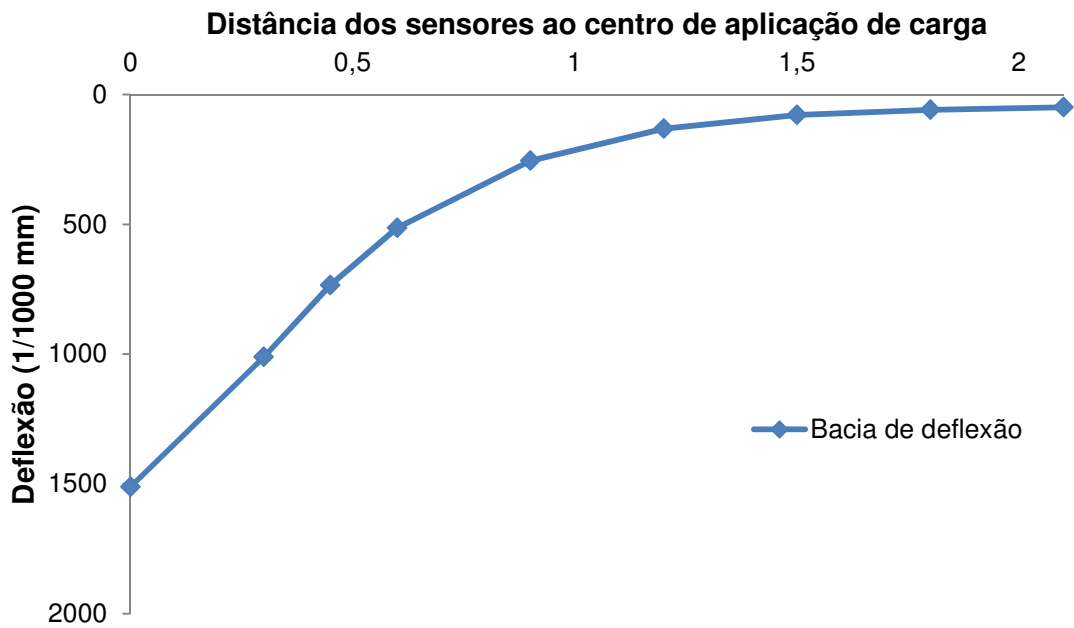


Figura 34 - Deflexões representativas do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria

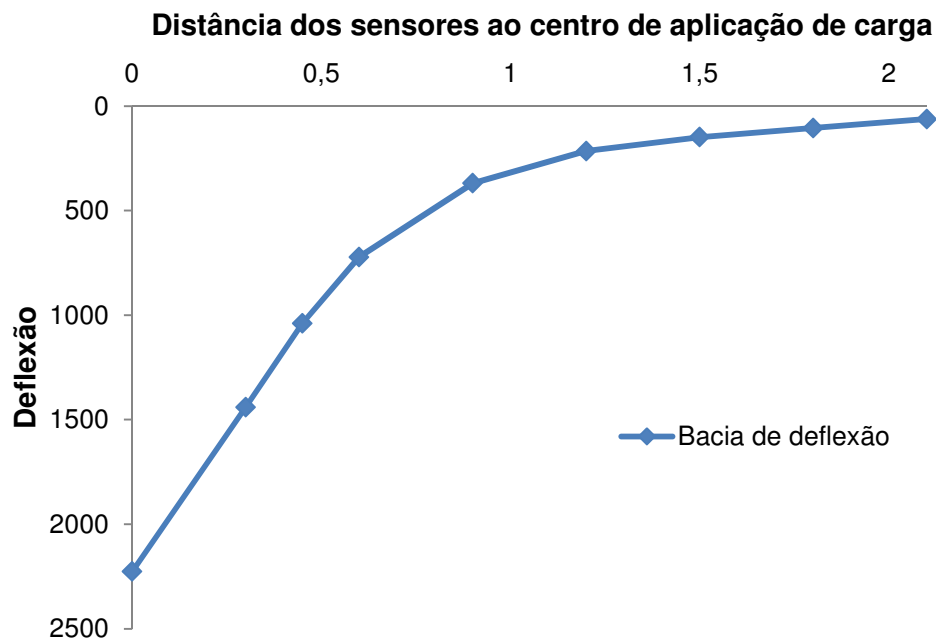


Figura 35 - Deflexões representativas do pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesense

Para ambos os pavimentos, verifica-se uma elevada deflexão máxima associada a uma baixa curvatura da bacia de deflexão. O que poderá indicar portanto, que quer as

camadas superiores quer as camadas inferiores dos pavimentos influenciam globalmente a má capacidade estrutural do pavimento, podendo classificar os mesmos como sendo de baixa capacidade estrutural. Facto que é refletido desde logo, pela observância de baixos módulos de deformabilidade das camadas dos pavimentos e consequentes degradações visíveis à superfície dos mesmos.

4.3. Caracterização das estruturas dos pavimentos existentes

A metodologia explanada na Secção 3.3.3 deste trabalho permitiu classificar os pavimentos em estudo quanto ao tipo, bem como conhecer as espessuras e os materiais constituintes.

Estruturalmente, as camadas dos pavimentos em estudo são constituídas por materiais granulares (camadas granulares) e hidrocarbonados (camadas betuminosas). Portanto trata-se de pavimentos flexíveis.

No que se refere ao pavimento da rua Cónego Dr. Manuel Faria (Figura 36), observa-se para as camadas betuminosas uma espessura de 10 cm correspondente à soma da espessura média da camada de regularização e da camada de desgaste. Enquanto a única a camada granular que o pavimento apresenta tem uma espessura média de 22 cm. Estes valores resultaram da extração de carotes (camadas betuminosas) e de um estudo realizado anteriormente pelo Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho (camadas granulares). Desse estudo resultou também um valor de CBR do solo de fundação na ordem dos 5%.

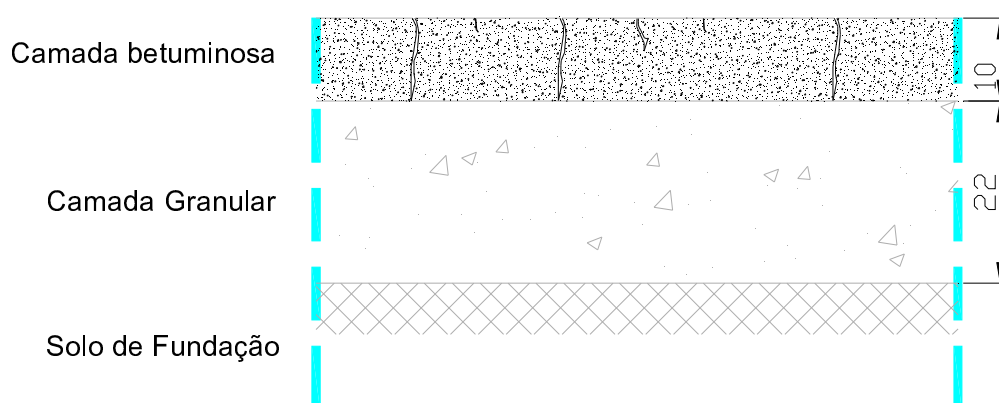


Figura 36 - Geometria do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria

No caso da rua Associação Artística Vimaranesse (Figura 37), observa-se para as camadas betuminosas, espessura média de 8 cm para a camada de regularização (em semi-penetração) e de 4 cm para a camada de desgaste. Os referidos valores resultam de informações recolhidas em trabalhos de campo através de abertura de um poço e extração de vários carotes. Tendo a única camada granular uma espessura média de 22 cm.

Os materiais recolhidos ao nível do solo de fundação foram ensaiados em laboratório para a determinação da sua capacidade de carga, tendo resultado um CBR de 4.86%, no ensaio realizado de acordo com a Especificação LNEC E198. Este ensaio foi realizado nas condições (densidade e teor em água) observadas *in situ*.

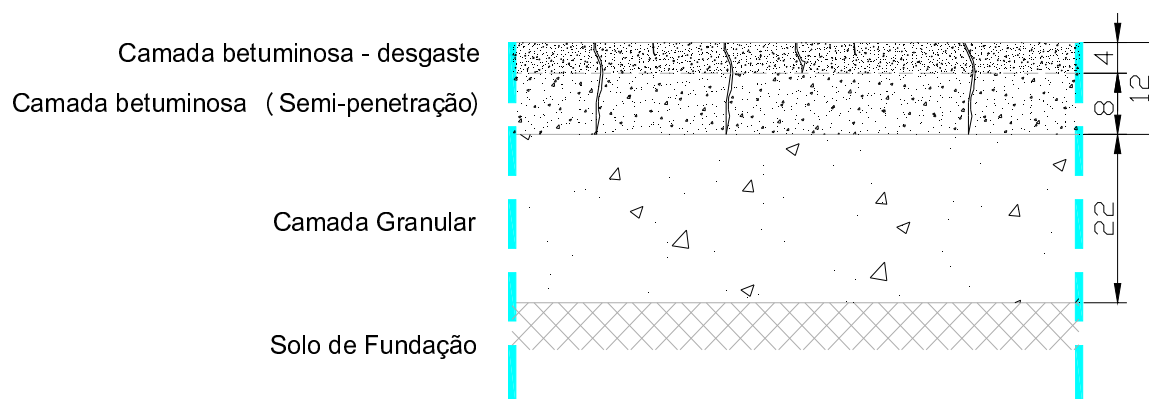


Figura 37- Geometria do pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesse

Para perceber melhor as características dos pavimentos em estudo e classificá-los estruturalmente, foi determinado um conjunto dos módulos de deformabilidade para cada pavimento. Estes módulos de deformabilidade foram calculados iterativamente pelo método da análise inversa com auxílio do programa de cálculo JPavBack 1.1, com finalidade de obter a bacia de deflexão de cálculo o mais próximo possível da bacia de deflexão real (obtida nos ensaios).

Nesse sentido, a geometria do pavimento e as deflexões obtidas em campo são dois parâmetros essenciais para a obtenção de um modelo adequado do pavimento existente. Na Figura 38 e Figura 39 são representadas as aproximações das deformadas dos pavimentos em estudo.

A definição do comportamento estrutural dos pavimentos em estudo ficou completa com a iteração que aproximou o mais possível a deformada teórica da deformada obtida em ensaios de campo.

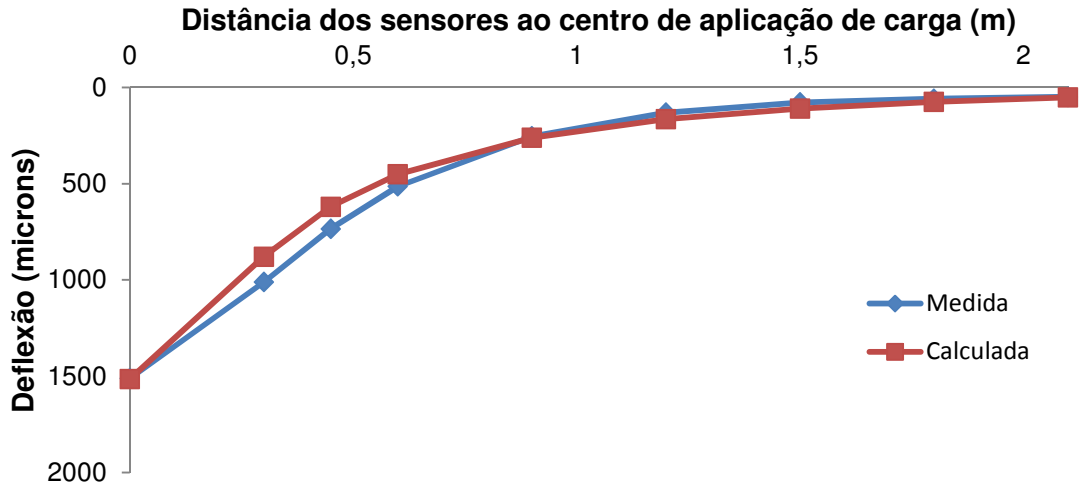


Figura 38 - Aproximação das bacias de deflexão (Rua Cónego Dr. Manuel Faria)

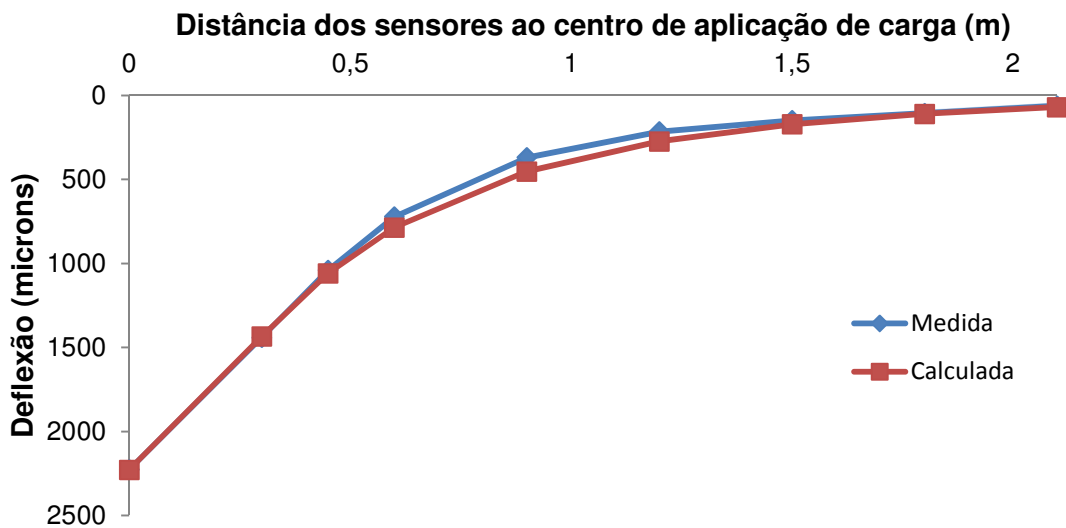


Figura 39 - Aproximação das deformadas (Associação Artística Vimaranesse)

A aproximação das deflexões medidas e calculadas foi possível pela determinação de uma espessura de 2,7 metros para o solo da fundação no caso do pavimento da rua Cónego Dr. Manuel Faria e 3 metros para o pavimento da rua Associação Artística Vimaranesse e a consideração da existência a essa profundidade de um substrato mais rígido cujo módulo de deformabilidade é de 1000 MPa e o coeficiente de *Poisson* de 0.20.

No processo iterativo para a determinação dos módulos de deformabilidade, verificou-se a contribuição ou a influência de cada camada na definição da bacia de deformação.

Na Tabela 6 e Tabela 7 são apresentados os módulos de deformabilidade obtidos para cada pavimento a reabilitar.

Tabela 6 - Módulos de deformabilidade do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria (MPa)

Solo de fundação	Camada Granular	Camada Betuminosa	
		Base	Desgaste
55	110	1600	1600

Tabela 7 - Módulos de deformabilidade do pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesense (MPa)

Solo de fundação	Camada Granular	Camada Betuminosa	
		Semi-penetração	Desgaste
30	70	1400	700

Tendo por base a aproximação das deformadas e conseqüentemente a obtenção dos módulos das camadas dos pavimentos pela análise inversa, foi possível verificar que os pavimentos apresentam uma baixa capacidade estrutural.

4.4. Dimensionamento das alternativas de reabilitação

O dimensionamento das alternativas de reabilitação utilizado baseia-se na análise mecânica da estrutura do pavimento através do cálculo dos estados de tensão/deformação dos diferentes materiais constituintes das camadas do pavimento e da fundação. O respetivo cálculo é feito para a aplicação de uma carga correspondente à passagem do eixo padrão, representativo do tráfego pesado que solicita a estrutura do pavimento.

Os principais parâmetros que afetam o comportamento estrutural dos pavimentos foram tidos em conta na conceção das alternativas de reabilitação e na verificação do dimensionamento, tais como: as condições climáticas (temperatura), o tráfego, as condições geotécnicas (solo de fundação), e as características mecânicas dos materiais de cada camada.

O conhecimento da distribuição de temperaturas em todo o pavimento é fundamental para atribuir aos materiais betuminosos propriedades mecânicas adequadas. As propriedades térmicas dos materiais betuminosos são descritas principalmente pelo módulo de rigidez, que depende da amplitude e da forma da distribuição da temperatura pelas camadas betuminosas. Se as variações do módulo das camadas são consideradas no processo de conceção dos pavimentos, a precisão dos resultados fica melhorada (Minhoto, 2005).

Assim, com base na temperatura média mensal do ar, foi determinada a temperatura média anual ponderada do ar de (15.2°C) para cálculo das correspondentes temperaturas de projeto das camadas de misturas betuminosas, consoante a espessura de cada camada e tendo em conta o zonamento climático onde se inserem os pavimentos em estudo. Na tabela que se segue, apresenta-se a temperatura de projeto para os diversos distritos do país em função da temperatura média mensal do ar (TMMA) e da profundidade no pavimento (z).

Tabela 8 - Temperatura de projeto ao longo de Portugal continental (Pais e Silva, 2012)

Distrito	w-TMMA(°C)	z(cm)						
		5	10	15	20	25	30	35
Braga	15,2	23,2	22,7	22,2	21,7	21,3	21,0	20,7
Bragança	14,9	22,6	22,2	21,6	21,2	20,8	20,5	20,2
Viana do Castelo	15,7	23,9	23,4	22,8	22,4	22	21,6	21,3
Viseu	16,0	24,3	23,8	23,3	22,8	22,4	22,0	21,7
Coimbra	18,0	27,3	26,7	26,0	25,5	25,0	24,6	24,3
Leiria	16,0	24,2	23,7	23,2	22,7	22,3	21,9	21,6
Portalegre	16,5	25,1	24,6	24,0	23,5	23,0	22,7	22,4
Setúbal	17,6	26,7	26,1	25,5	24,9	24,5	24,1	23,8
Lisboa	17,8	27,0	26,3	25,7	25,1	24,7	24,3	24,0
Évora	19,2	29,1	28,4	27,7	27,1	26,6	26,2	25,8
Faro	17,5	26,5	25,9	25,3	24,7	24,3	23,9	23,6
Castelo Branco	18,5	28,0	27,4	26,7	26,1	25,7	25,3	24,9
Guarda	16,5	25,1	24,5	23,9	23,4	23,0	22,7	22,3
Aveiro	18,0	27,3	26,7	26,0	25,5	25,0	24,6	24,3
Vila Real	16,0	24,3	23,8	23,2	22,7	22,3	22,0	21,7
Porto	15,3	23,3	22,9	22,3	21,8	21,5	21,1	20,8
Santarém	17,4	26,4	25,8	25,2	24,6	24,2	23,8	23,5
Beja	19,2	29,1	28,5	27,7	27,1	26,6	26,2	25,8

No que diz respeito ao tráfego pesado resultante do cálculo efetuado no estudo de tráfego, considerou-se um eixo-padrão de 80kN e um período de vida de projeto de 20 anos. Tendo em conta os critérios de ruína de diferentes materiais e o número

acumulado de eixos padrão, calculam-se as extensões/tensões de tração ou de compressão induzidas na estrutura pelo eixo padrão.

No que se refere ao betume, prevê-se utilizar para todas as camadas das alternativas propostas para a reabilitação dos pavimentos em estudo, o betume 35/50 que é um dos betumes convencionais mais usados em Portugal.

4.4.1. Execução de reforço

Na maioria dos reforços executados em Portugal, é usual a aplicação de misturas betuminosas fabricadas a quente (misturas tradicionais de reforço).

As misturas betuminosas a quente normalmente utilizadas incluem o macadame betuminoso em camada regularização e/ou base, a mistura betuminosa densa e o betão betuminoso em camada de desgaste ou adjacente a esta (JAE, 1995a). Para essas soluções, geralmente utilizam-se betumes com penetração nominal de 35/50 ou 50/70.

Nesta solução de reabilitação, o dano à deformação permanente é o critério de ruína que define o dimensionamento do pavimento sito na rua Cónego Dr. Manuel Faria (Tabela 9), iteração 3. Ao passo que se verifica que o dano à fadiga é o critério que condiciona o dimensionamento para o pavimento da rua Associação Artística Vimaranesse (Tabela 10), iteração 3.

Tabela 9 - Verificação dos critérios de dimensionamento do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria na alternativa de reforço

Iteração	Espessura (m)			Dano à fadiga	Dano à deformação permanente	Situação
	MBD	MB	BD			
1	-	-	0.06	8%	780%	KO
2	-	0.05	0.05	20%	227%	KO
3	0.08	-	0.05	43%	92%	OK
4	-	0.08	0.04	41%	123%	KO

Tabela 10 - Verificação dos critérios de dimensionamento do pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesense na alternativa de reforço

Iteração	Espessura (m)			Dano à fadiga	Dano à deformação permanente	Situação
	MBD	MB	BD			
1	-	-	0.06	19%	391%	KO
2	-	0.08	0.04	21%	57%	KO
3	-	0.07	0.04	80%	79%	OK
4	-	0.06	0.04	29%	108%	KO

Nas Tabelas 9 e 10, MBD representa a mistura betuminosa densa em camada de regularização, MB é um macadame betuminoso em camada de regularização e BD um Betão betuminoso aplicado em camada de desgaste.

Na Figura 40 e na Figura 41 estão esquematicamente representadas, respetivamente, a estrutura de cada pavimento em (com as espessuras em centímetros), tendo em conta o reforço (novas camadas). Porém, devido à elevada densidade e severidade de fendilhamento dos pavimentos em causa (“suporte do reforço”), considerou-se uma redução de 20% na extensão de tração admissível para reduzir a probabilidade de as fendas do pavimento antigo se propagarem rapidamente para as novas camadas. Tratando-se de procedimento de segurança, não dispensa a aplicação de uma SAMI entre o pavimento existente e as camadas de reforço, cuja finalidade é retardar a propagação das fendas.

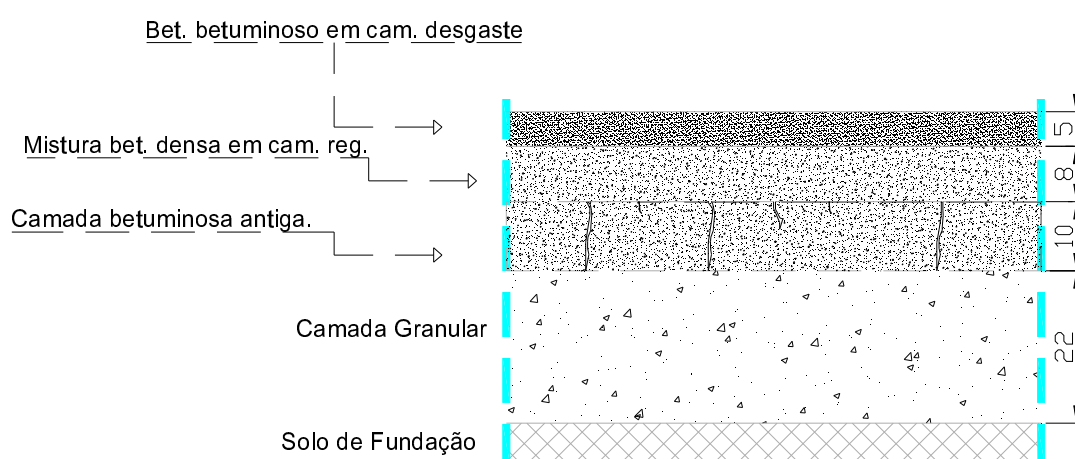


Figura 40 - Estrutura do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria para a alternativa de reforço

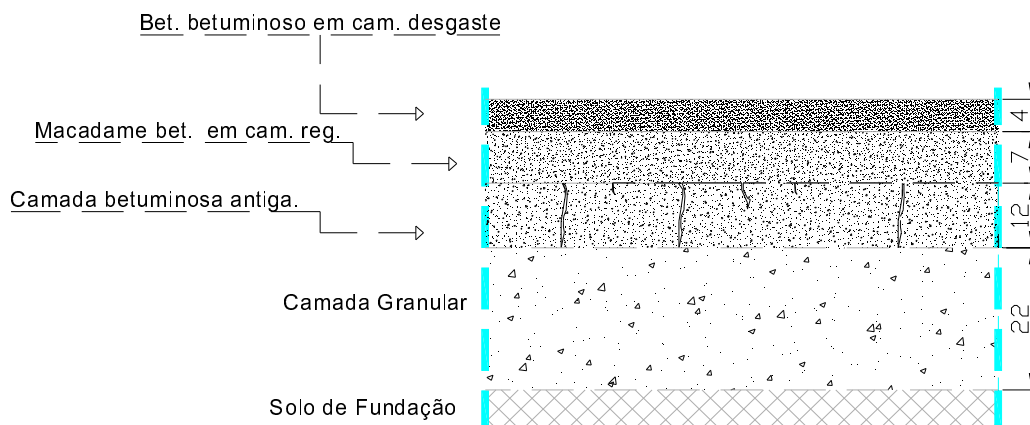


Figura 41 - Estrutura do pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesense para a alternativa de reforço

Analisando as espessuras das camadas de reforço resultantes do dimensionamento verifica-se uma subida de cota em 13cm (Figura 40), e de 11cm (Figura 41) relativamente à cota final do pavimento antigo. Este facto implicaria a elevação de todas as caixas de visita ao longo dos pavimentos, bem como dos lancis e passeios, na medida em que os reforços anulam praticamente a diferença altimétrica existente entre o pavimento e o passeio.

4.4.2. Fresagem das camadas betuminosas existentes e reposição com novas camadas

De acordo com Minhoto (2005), a reflexão de fendas corresponde a uma propagação do fendilhamento existente no pavimento degradado para as camadas de reforço, conduzindo ao fendilhamento prematuro destas camadas e é causada pela combinação do carregamento cíclico do tráfego com o efeito térmico das variações de temperatura.

Tratando-se portanto de pavimentos com a elevada densidade e severidade de fendilhamento, esta solução visa eliminar a origem do desenvolvimento do fenómeno de propagação das fendas para que de seguida haja lugar aos trabalhos de reposição com novas camadas

Nesta solução de reabilitação, o dano à fadiga é o critério de ruína que define o dimensionamento para o pavimento sito na rua Cónego Dr. Manuel Faria (Tabela 11), iteração 3, ao passo que a iteração 2 (Tabela 12) é que define o dimensionamento para o

pavimento da rua Associação Artística Vimaranesse, na medida em que as iterações 3 e 4 comprovam que não é possível obter menor espessura.

Tabela 11 - Verificação dos critérios de dimensionamento do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria na alternativa de fresagem e reposição

Iteração	Espessura (m)			Dano à fadiga	Dano à deformação permanente	Situação
	MBD*	MB*	BD*			
1	-	0.16	0.06	44%	24%	KO
2	-	0.12	0.04	420%	171%	KO
3	-	0.14	0.06	89%	44%	OK
4	-	0.14	0.05	129%	61%	KO

Tabela 12 - Verificação dos critérios de dimensionamento do pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesse na alternativa de fresagem e reposição

Iteração	Espessura (m)			Dano à fadiga	Dano à deformação permanente	Situação
	MBD*	MB*	BD*			
1	-	0.08	0.04	480%	293%	KO
2	-	0.12	0.05	78%	56%	OK
3	-	0.12	0.04	120%	83%	KO
4	-	0.11	0.05	119%	82%	KO

Nas Tabelas 11 e 12, MBD representa a mistura betuminosa densa em camada de regularização, MB é um macadame betuminoso em camada de regularização e BD um Betão betuminoso aplicado em camada de desgaste.

Nas Figuras 42 e 43 estão esquematicamente representadas respetivamente a estrutura de cada pavimento em (espessuras em cm), tendo em conta a reposição com novas camadas betuminosas.

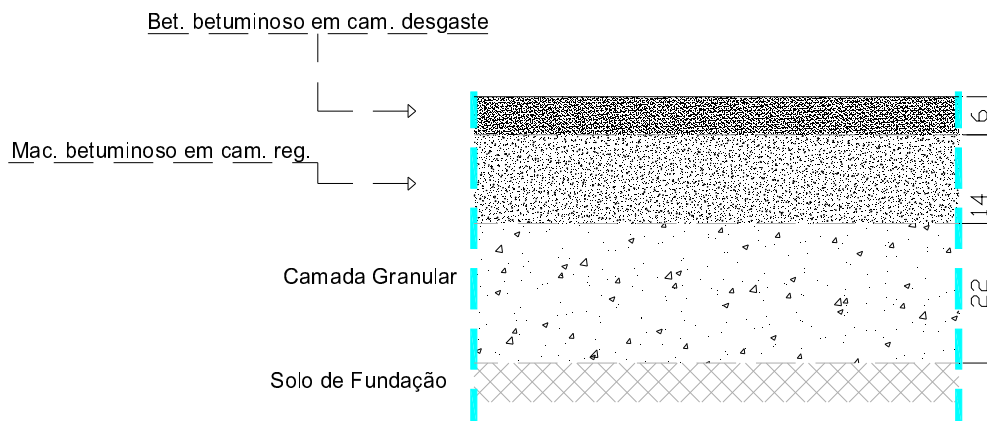


Figura 42- Estrutura do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria para a alternativa de fresagem e reposição

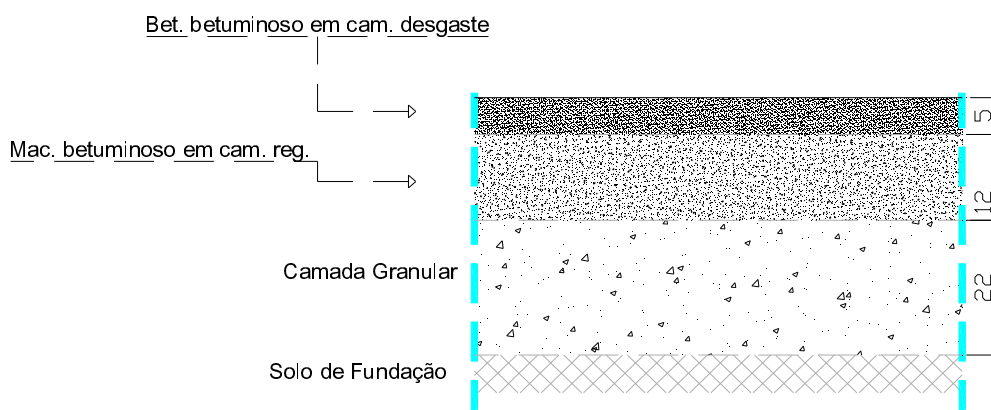


Figura 43- Estrutura do pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesense para a alternativa de fresagem e reposição

Analisando as espessuras das camadas repostas, relativamente ao pavimento da rua Cónego Dr. Manuel Faria (Figura 42), verifica-se que estas perfazem uma espessura total de 20cm correspondente a uma subida de cota em 10cm relativamente à cota final do pavimento antigo. Já no pavimento da rua Associação Artística Vimaranesense (Figura 43), as camadas repostas perfazem uma espessura total de 17cm, a que significa uma subida de cota em 7cm relativamente à cota final do antigo pavimento. Este facto que implicaria a elevação de lancis e todas as caixas de visita ao longo dos pavimentos, bem como a reposição dos passeios, na medida em que reduz para metade a diferença altimétrica existente entre o pavimento e o passeio.

De salientar que esta solução impõe a necessidade de providenciar vazadouros licenciados, dando assim um destino final adequado do ponto de vista ambiental, devido aos resíduos resultantes da fresagem e a remoção das camadas betuminosas degradadas do pavimento antigo.

4.4.3. Reciclagem *in situ* com espuma de betume

A reciclagem de pavimentos rodoviários com espuma de betume consiste na reutilização dos materiais resultante da fresagem dos mesmos como matéria-prima para o fabrico de misturas a aplicar em novos pavimentos, permitindo a eliminação da reflexão de fendas. Este tipo de processo surgiu nos EUA nos anos 70 durante a crise petrolífera como forma de combate ao aumento do custo de petróleo e seus derivados (Batista *et al.*, 2006)

A espuma de betume é produzida no local por um dispositivo integrado no equipamento de reciclagem (que realiza as operações de fresagem e de mistura em simultâneo). O processo consiste na injeção, numa câmara de expansão, de uma pequena quantidade de água (cerca de 2 a 3%) e ar em betume aquecido a uma temperatura de cerca de 170 °C (PIARC, 2003). A introdução da água e do ar no betume quente dá lugar a que o betume se expanda aumentando até 30 vezes o seu volume inicial (Figura 44). Com o aumento de volume reduz-se a viscosidade inicial do betume o que permite um perfeito envolvimento com os agregados provenientes da fresagem do pavimento.

Os valores do módulo de deformabilidade usualmente utilizados para este tipo de material reciclado variam entre 2000 a 5000 MPa. Os valores mais elevados dizem respeito à estabilização de material que contenha misturas betuminosas envelhecidas (com uma percentagem da ordem dos 50%) e material granular britado de uma camada de base. Os valores inferiores são obtidos quando esse material a trata, apresente uma granulometria mais monogranular, como é o caso das areias (Fonseca, 2002).

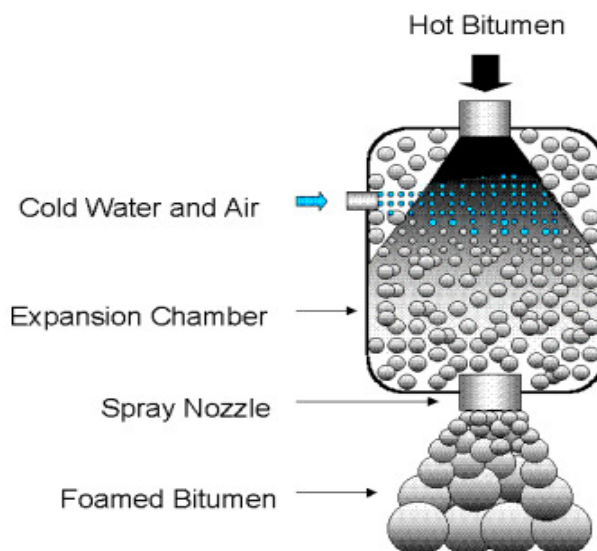


Figura 44 - Esquema de produção de espuma de betume (PIARC, 2003)

De acordo com Wirtgen GmbH (2001) o valor de resistência à tração obtido num ensaio de compressão diametral efetuado em provetes Marshall à temperatura de 25° C, situa-se entre 350 a 800 kPa, para as misturas contendo 50% de agregados reciclados e 50% de agregados “virgens”. Para o módulo de resiliência o valor de referência varia entre 2500 a 5000 MPa.

Com base no exposto acima, para efeito de dimensionamento neste trabalho utilizou-se um valor intermédio (3500 MPa) para o módulo de rigidez das camadas recicladas com espuma de betume.

Importa no entanto salientar que a reciclagem do pavimento *in situ* fecha o ciclo de vida de materiais constituintes do pavimento a reabilitar, na medida em que é utilizado como matéria-prima para o pavimento no mesmo local. Dessa forma reduz-se significativamente a utilização recursos naturais, nomeadamente agregados e betumes, promovendo a diminuição de zonas de vazadouros e depósitos de resíduos provenientes de fresagem (Pereira e Miranda, 1999).

Nesta solução de reabilitação, o dano à fadiga é o critério de ruína que define o dimensionamento para o pavimento sito na rua Cónego Dr. Manuel Faria (Tabela 13), iteração 4. Ao passo que se verifica que o dano à deformação permanente é o critério que define dimensionamento para o pavimento da rua Associação Artística Vimaranesense (Tabela 14), iteração 1.

Tabela 13 - Verificação dos critérios de dimensionamento do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria na alternativa de reciclagem *in situ* com espuma de betume

Iteração	Espessura (m)			Dano à fadiga	Dano à deformação permanente	Situação
	Reciclada	MB	BD			
1	0.10	-	0.06	354%	355%	KO
2	0.10	0.08	0.05	58%	42%	KO
3	0.10	0.07	0.04	121%	74%	KO
4	0.10	0.08	0.04	84%	56%	OK

Tabela 14 - Verificação dos critérios de dimensionamento do pavimento da R. Associação Artística Vimaranesense na alternativa de reciclagem *in situ* com espuma de betume

Iteração	Espessura (m)			Dano à fadiga	Dano à deformação permanente	Situação
	Reciclada	MB	BD			
1	0.12	-	0.06	52%	95%	OK
2	0.12	0.08	0.04	5%	15%	KO

Nas Tabelas 13 e 14, MB é um macadame betuminoso em camada de regularização e BD um Betão betuminoso aplicado em camada de desgaste.

Nas Figuras 45 e 46 estão esquematicamente representadas respetivamente as estruturas de cada pavimento (espessuras em cm), tendo em conta a camada reciclada com espuma de betume e as novas camadas aplicadas sobre a mesma.

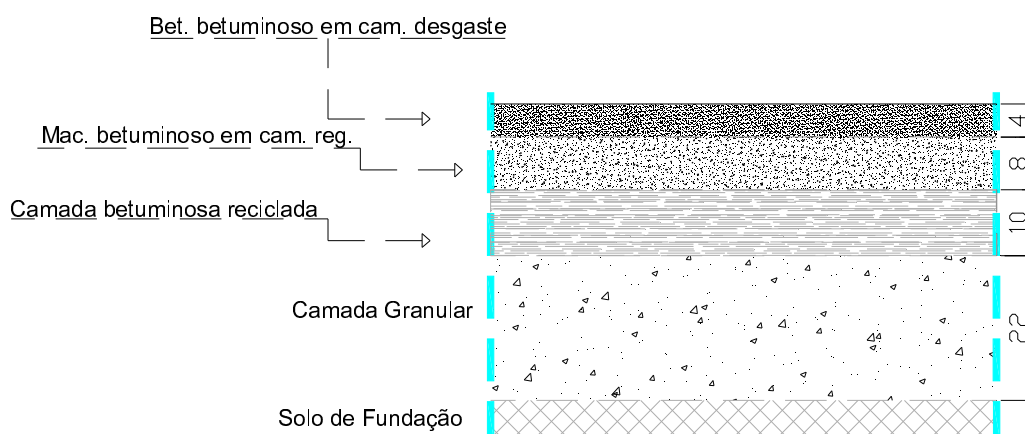


Figura 45 - Estrutura do pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria para a alternativa de reciclagem *in situ* com espuma de betume

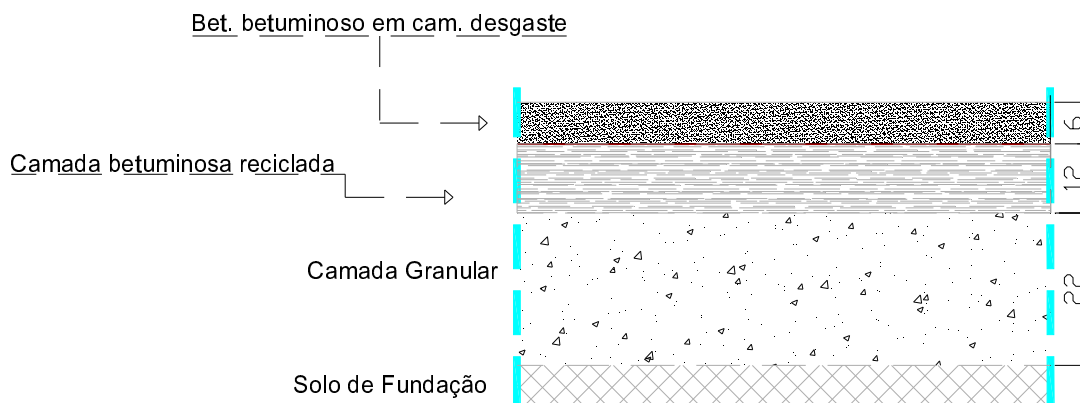


Figura 46 - Estrutura do pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesense para a alternativa de reciclagem *in situ* com espuma de betume

Analisando as espessuras do pavimento da rua Cónego Dr. Manuel Faria (Figura 47) verifica-se que o conjunto das camadas betuminosas (a camada reciclada e reforço) perfaz uma espessura total de 22cm, a que corresponde a uma subida de 12cm relativamente à cota final da camada de desgaste antiga. Anulando praticamente a diferença altimétrica existente entre a faixa de rodagem e o passeio. Já no que refere ao pavimento da rua Associação Artística Vimaranesense (Figura 48) verifica-se que o conjunto das camadas betuminosas (a camada reciclada e reforço) perfaz uma espessura total de 16cm a que corresponde a uma subida de 6 cm relativamente à cota final da camada de desgaste antiga.

4.4.4. Análise comparativa de espessuras das soluções propostas

O cálculo da espessura de reforço para cada solução de reabilitação proposta, baseou-se nos métodos empírico-mecanicistas, permitindo comparar as espessuras das camadas betuminosas resultantes das soluções de reabilitação propostas. Nas Figuras 49 e 50 apresenta-se respetivamente as espessuras obtidas para cada pavimento e para as soluções propostas.

Da análise genérica, verifica-se (Figura 47) que a espessura das camadas betuminosas da solução “reforço tradicional” é inferior a da solução fresagem e reposição com as novas camadas e esta por sua vez, inferior a da solução reciclagem/reforço.

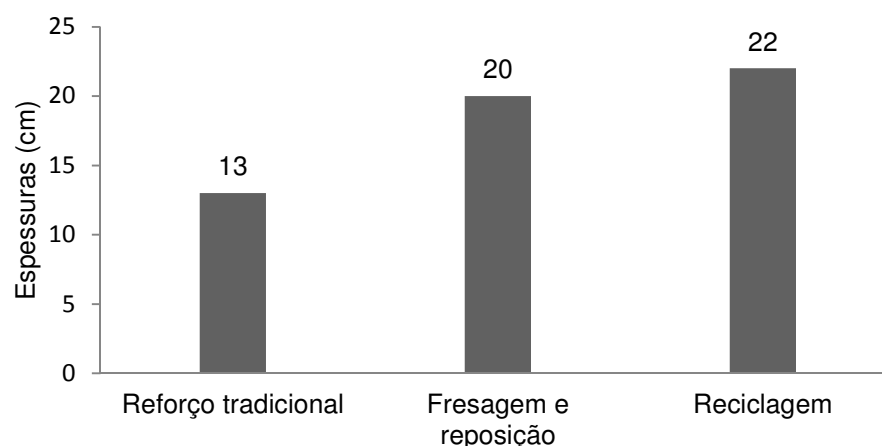


Figura 47 - Espessuras das novas camadas betuminosas, pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria

De realçar que a sobreposição da espessura final da solução de reabilitação “reforço tradicional” sobre a camada de desgaste do pavimento antigo, resultará numa cota final da nova camada de desgaste mais elevada comparativamente com outras soluções. Tendo a referida cota final mais elevada em 1 e 2 cm em relação à solução de reabilitação “fresagem e reposição e a da reciclagem com espuma de betume, respetivamente (Tabela 15).

Tabela 15 - Relação de espessuras das camadas betuminosas

	Reforço tradicional	Fresagem e reposição	Reciclagem
Camada betuminosas novas	13	20	22
Camada betuminosa antiga	10	-	-
Total das espessuras betuminosas	23	20	22
Camada granular	22	22	22

No que se refere às espessuras das soluções de reabilitação do pavimento da rua Associação Artística Vimaranesse (Figura 48), verifica-se a tendência verificada na Figura 47, ou seja, a espessura das camadas betuminosas da solução de reabilitação “reforço tradicional” é inferior em relação a solução fresagem e reposição com as novas camadas e esta por sua vez, inferior a da solução reciclagem com espuma de betume.

No entanto a solução reforço tradicional, apesar de em termos de espessura se apresentar inferior, ela é aquela que apresenta a cota final da camada de desgaste mais elevada comparativamente com outras soluções (Tabela 16).

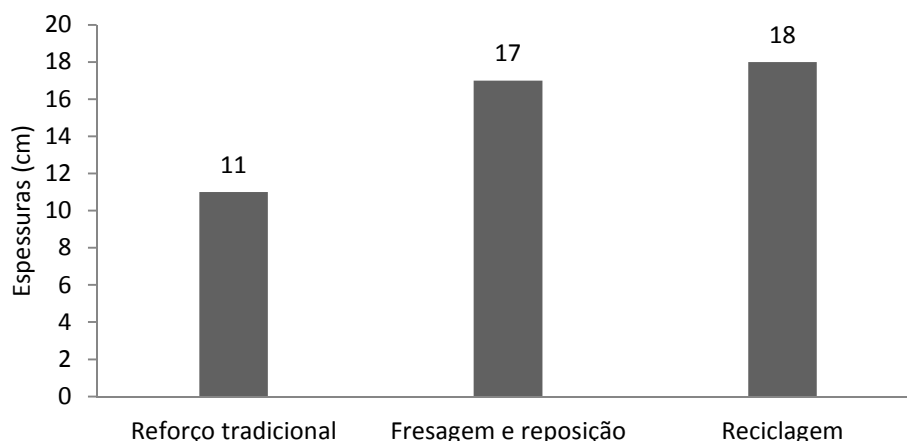


Figura 48- Espessuras de reforço obtidas para o pavimento da Rua Associação Artística Vimaranesense

Uma vez que se trata da requalificação de pavimento no meio urbano a subida da cota final da camada de desgaste pode em algumas situações, inviabilizar a execução de algumas soluções de reabilitação face à espessura final resultante.

Tabela 16 - Relação de espessuras das camadas betuminosas

	Reforço tradicional	Fresagem e reposição	Reciclagem
Camada betuminosas novas	11	17	20
Camada betuminosa antiga	12	-	-
Total das espessuras betuminosas	23	17	20
Camada granular	22	22	22

4.5. Análise da sustentabilidade das soluções de reabilitação propostas

A análise da sustentabilidade das soluções de reabilitação de pavimentos urbanos em estudo baseou-se nos princípios que visam materializar em custos, os indicadores económicos por um lado, e por outro, avaliar o impacto ambiental causado por cada solução de reabilitação e, em particular, o seu consumo de energia e emissões de gases com efeito de estufa (com a determinação do potencial de aquecimento global - GWP).

No plano ambiental, os resultados dessa avaliação encontram-se divididos em quatro categorias de atividades, evidenciando dessa forma, a contribuição das mesmas ao nível dos consumos e emissões de gases, nomeadamente, as operações de transporte, extração de matérias-primas, a produção de misturas betuminosas e operações *in situ*.

Enquanto no plano económico essa divisão limita-se à quantificação de custos das atividades de reabilitação, evidenciando a contribuição de cada fase de reabilitação no custo total de cada solução.

Para cada pavimento, é feita de acordo com a metodologia de avaliação explanada no ponto 3.5, a caracterização do pavimento, dos materiais e dos equipamentos/processos, de modo a facultar uma boa base de comparação entre as soluções.

4.5.1. Pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria

Prevê-se uma área de 2255,40 m² para a execução de soluções de reabilitação para o pavimento em estudo. Essa execução resulta num consumo total de energia em Terajoule (TJ) e emissão de gases (ton ou kg), conforme se apresenta na Tabela 17.

Tabela 17 - Consumos e emissões totais das operações da reabilitação

	Reforço tradicional	Fresagem e reposição	Reciclagem in situ com espuma de betume
Consumo de energia (TJ)	0.30	0.46	0.30
Emissões CO ₂ (ton)	17.65	26.86	21.27
Emissões CH ₄ (kg)	0.01	0.01	0.01
Emissões N ₂ O (kg)	0.09	0.14	0.10
Emissões SO ₂ (kg)	33.33	51.15	48.06
Emissões NO _x (kg)	86.79	133.12	112.14

Verifica-se (Tabela 17) que a solução com maior consumo de energia entre as soluções de reabilitação é fresagem e reposição das camadas betuminosas, com 0.46 TJ, ao passo que as restantes soluções se situam em 0.30 TJ. Consequentemente, a solução de fresagem e reposição das camadas betuminosas é também aquela que apresenta maiores emissões gasosas com efeito de estufa.

Na Tabela 18 é apresentada a relação entre a energia consumida e potencial de aquecimento global (GWP) por categoria de atividade e por cada solução de reabilitação. Onde se verifica que apesar do consumo da energia ser equivalente entre as soluções de reabilitação “Reforço tradicional e a Reciclagem *in situ* com espuma de betume” ao nível das emissões de gases com a potencialidade para o aquecimento global, a solução Reciclagem *in situ* apresenta maior impacto ambiental.

Nas Figuras 49 e 50 são apresentados respetivamente, o peso relativo de cada atividade no consumo total de energia e no potencial de aquecimento global para cada solução de reabilitação.

Tabela 18 - Relação entre a energia consumida e potencial de aquecimento global (GWP) de cada solução de reabilitação

		Reforço tradicional	Fresagem e reposição	Reciclagem in situ com espuma de betume
Consumo de energia (TJ)	Transporte	0.03	0.04	0.03
	Matéria-prima	0.04	0.06	0.05
	Produção de misturas	0.23	0.35	0.21
	Operações <i>in situ</i>	0.01	0.01	0.01
GWP CO ₂ -eq (ton)	Transporte	2.22	3.40	2.16
	Matéria-prima	6.98	10.74	11.27
	Produção de misturas	7.95	12.24	7.34
	Operações <i>in situ</i>	0.52	0.52	0.52

Como se pode verificar (Figura 49), a produção de misturas betuminosas, é das atividades de reabilitação, aquela que concentra o maior consumo de energia nas três soluções de reabilitação em estudo, situando-se na ordem de 70 a 75% da energia necessária para as atividades de reabilitação.

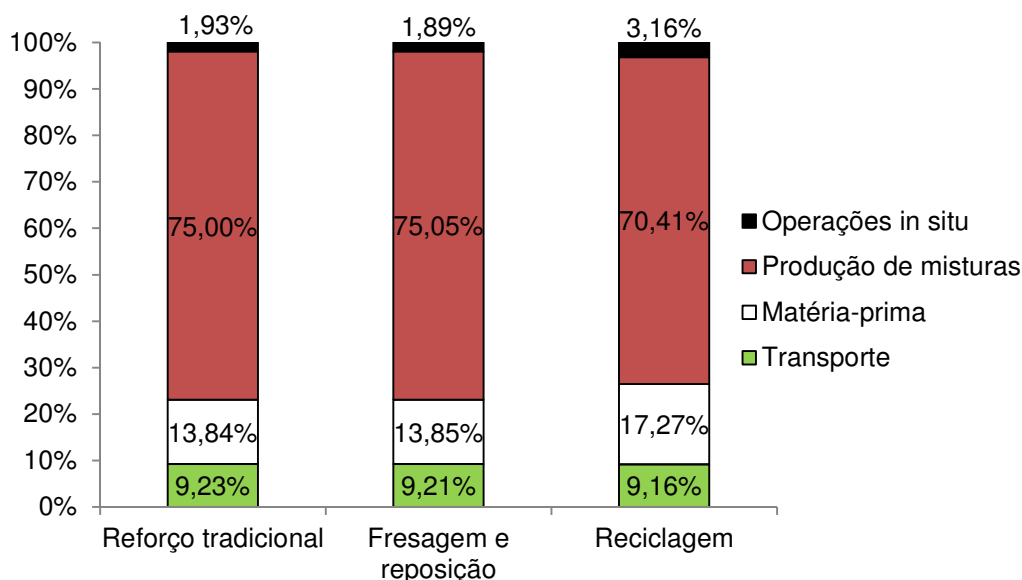


Figura 49 - Contribuição de cada atividade para o consumo de energia por solução de reabilitação

Ao nível das atividades com maior contributo na emissão gasosa, destacam-se a extração da matéria-prima e a produção das misturas betuminosas (Figura 50). Verifica-se portanto, que o contributo da atividade da produção de misturas betuminosas é menos significativo comparativamente com a sua contribuição no consumo de energia necessária por solução de reabilitação. Apesar de ainda ser uma das atividades com a maior contribuição para as emissões gasosas.

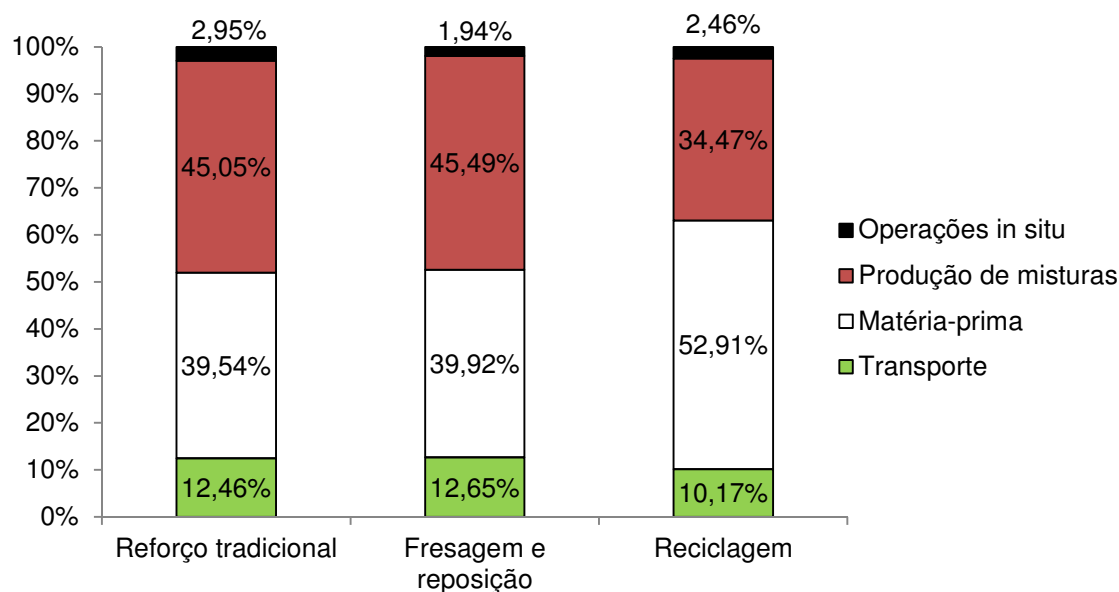


Figura 50 - Contribuição de cada atividade para a emissão de CO₂-eq (GWP) por cada solução de reabilitação

No que se refere à contribuição de cada solução na emissão de gases com potencial para aquecimento global, verifica-se que a solução “reforço tradicional” é a solução que representa menor impacto ambiental, pela observância da menor percentagem em relação às restantes soluções de reabilitação (Figura 51).

No plano de custos económicos, se a reabilitação do pavimento em estudo passasse por execução de uma das soluções em causa, tendo em conta as respetivas características, o custo final de cada solução seria conforme apresentado na Tabela 19.

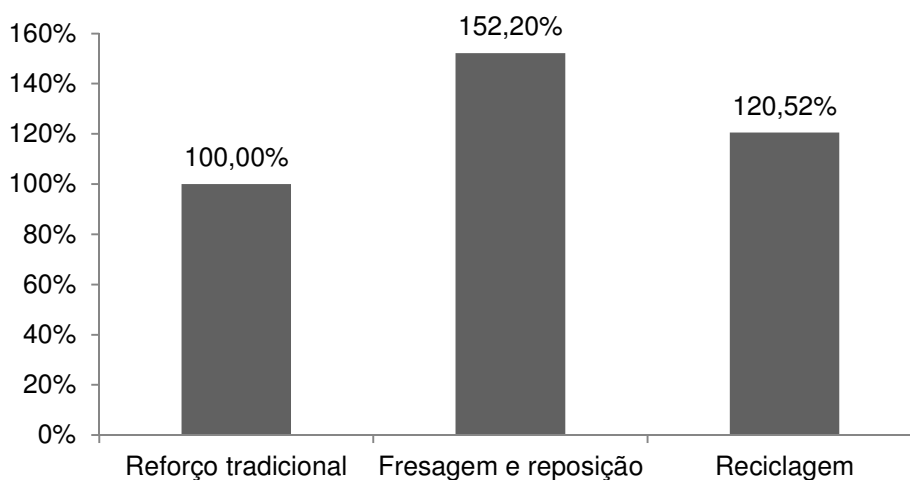


Figura 51 - Relação da emissão de CO₂-eq (GWP) entre a solução “reforço tradicional” e as restantes soluções

Tabela 19 - Custo de execução de soluções de reabilitação

	Reforço tradicional	Fresagem e reposição	Reciclagem <i>in situ</i> com espuma de betume
Betão Betuminoso em Camada de Desgaste	18,043.20 €	21,651.84 €	14,418.43 €
Betão Betuminoso em Camada de Regularização	23,456.16 €	-	-
Macadame Betuminoso	-	34,733.16 €	19,825.34 €
Fresagem de camadas betuminosas e transporte para depósito	-	26,162.64 €	-
Reciclagem de camadas betuminosas, <i>in situ</i> , com ligante betuminoso	-	-	37,848.38 €
SAMI's (Stress Absorving Membrane Interlayer)	13,532.40 €	-	-
Total	55,031.76 €	82,547.64 €	72,092.16 €

Com base nos resultados apresentados (Tabela 19) verifica-se que a solução menos onerosa é a de “reforço tradicional” comparativamente às restantes soluções, devido ao reduzido número de atividades. Grosso modo, o número e a espessura das camadas, bem como as atividades de fresagem e a reciclagem *in situ* com espuma de betume das camadas betuminosas degradadas são as variáveis diferenciadoras ao nível de custos finais de cada solução de reabilitação.

Verifica-se (Figura 52) que as soluções de reabilitação “fresagem/reposição” e a “reciclagem *in situ* com espuma de betume” apresentam os custos económicos mais elevados quando comparados com solução “Reforço tradicional”, representando um custo adicional na ordem de 50% e 31%, respetivamente.

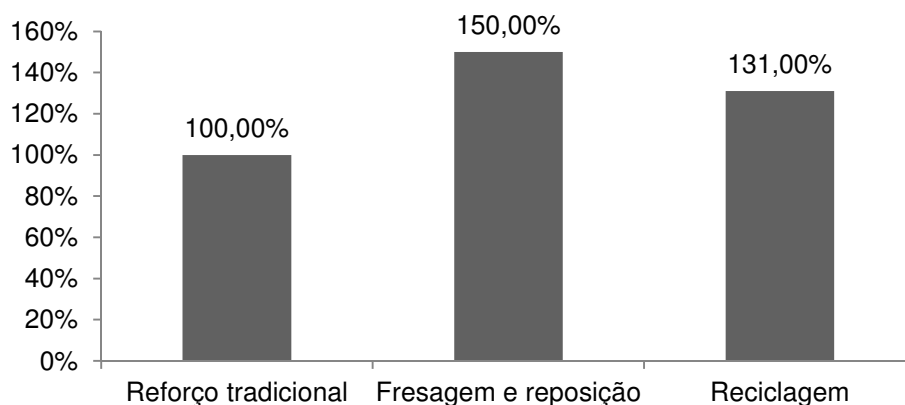


Figura 52 - Comparação de custos das restantes alternativas em relação à solução de reforço tradicional

4.5.2. Pavimento da Rua Associação Artística Vimaranense

Prevê-se neste pavimento uma área pavimentação de 5270,90 m² para a execução de soluções de reabilitação, resultando essa execução, num consumo total de energia em Terajoule (TJ) e emissão de gases (kg), conforme se apresenta na Tabela 20.

Tabela 20 - Consumos e emissões totais das operações da reabilitação.

	Reforço tradicional	Fresagem e reposição	Reciclagem <i>in situ</i> com espuma de betume
Consumo de energia (TJ)	0.60	0.92	0.38
Emissões CO ₂ (ton)	34.97	53.44	33.06
Emissões CH ₄ (kg)	0.02	0.03	0.01
Emissões N ₂ O (kg)	0.18	0.28	0.13
Emissões SO ₂ (kg)	66.01	101.81	84.45
Emissões NO _x (kg)	172.53	267.09	183.61

Verifica-se (Tabela 20) que a solução com maior consumo de energia entre as soluções de reabilitação é fresagem e reposição das camadas betuminosas, com 0.92 TJ, por outro lado, a solução “reciclagem com espuma de betume” é a que apresenta menor consumo de energia com 0.38 TJ.

Na Tabela 21 é apresentada a relação entre a energia consumida e o potencial de aquecimento global (GWP) por categoria de atividade e por cada solução de reabilitação. Onde se verifica que a solução “Reciclagem *in situ* com espuma de betume” é aquela que apresenta simultaneamente menor consumo e menores emissões de gases com efeito de estufa, seguido da solução “Reforço tradicional” e por fim a solução “Fresagem e reposição” é aquela que apresenta maiores emissões.

Nas Figuras 53 e 54 são apresentados respetivamente, o peso relativo de cada atividade no consumo total de energia e no potencial de aquecimento global para cada solução de reabilitação.

Tabela 21 - Relação entre a energia consumida e potencial de aquecimento global (GWP) de cada solução de reabilitação

		Reforço tradicional	Fresagem e reposição	Reciclagem <i>in situ</i> com espuma de betume
Consumo de energia (TJ)	Transporte	0.05	0.08	0.04
	Matéria-prima	0.08	0.13	0.08
	Produção de misturas	0.45	24.30	0.24
	Operações <i>in situ</i>	0.01	0.02	0.02
GWP CO ₂ -eq (ton)	Transporte	4.29	6.67	2.82
	Matéria-prima	13.80	21.33	21.07
	Produção de misturas	15.73	24.31	8.58
	Operações <i>in situ</i>	1.21	1.21	0.63

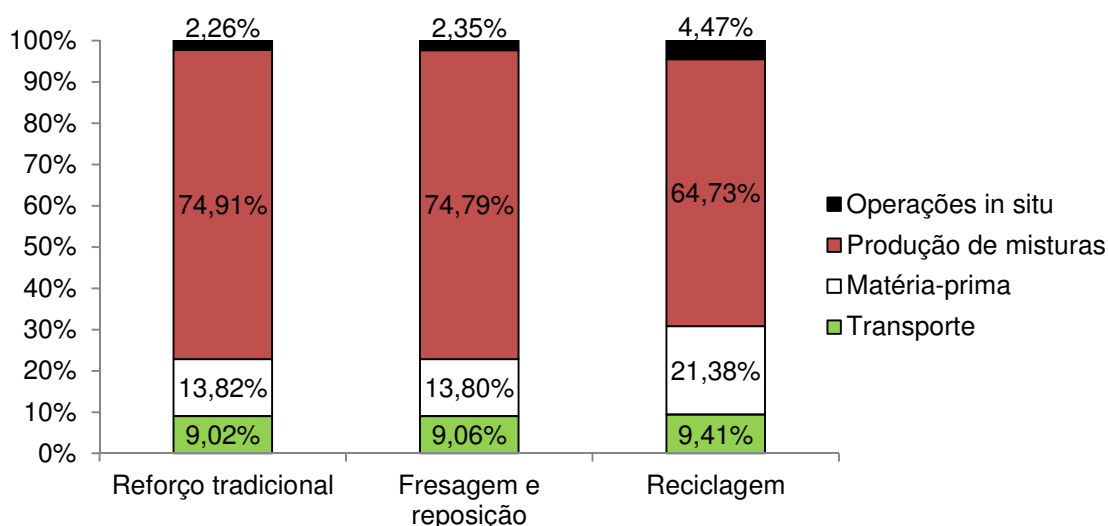


Figura 53 - Contribuição de cada atividade para o consumo de energia por solução de reabilitação

Como se pode verificar (Figura 53) a produção de misturas betuminosas, é das atividades de reabilitação, aquela que apresenta o maior consumo de energia necessária nas três soluções, seguido da atividade do consumo da matéria-prima, tendo a atividade de transporte e as operações *in situ* as atividades com menor consumo da energia.

Destaca-se as aproximações em termos percentuais da contribuição das atividades inerentes à execução das opções de reabilitação reforço tradicional e fresagem e reposição das camadas betuminosas no consumo da energia.

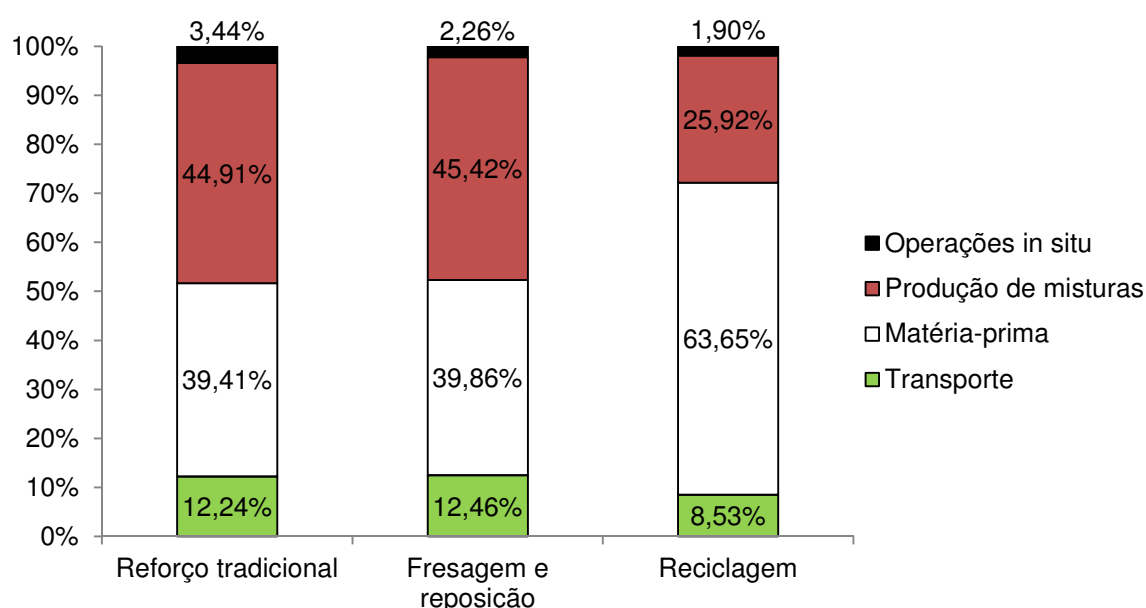


Figura 54 - Contribuição de cada atividade para a emissão de CO₂-eq (GWP) por cada solução de reabilitação

Genericamente, as atividades com maior contributo na emissão gasosa são a extração da matéria-prima e a produção das misturas betuminosas (Figura 54). Destaca-se porém que a emissão de CO₂-eq para a solução reciclagem com espuma betuminosa, a extração da matéria-prima é atividade com maior percentagem, representando 63,65% contra 25,92% da atividade de produção de misturas, 8,53 da atividade de transporte e 1,90% para as operações *in situ*.

No que se refere à contribuição de cada solução para a emissão de gases com potencial para aquecimento global, verifica-se que a solução “Reciclagem com espuma de betume” é a solução que representa menor impacto ambiental, pela observância da menor percentagem em relação às restantes soluções de reabilitação, conforme se pode

observar na Figura 55, tendo por referência as emissões da solução de “reforço tradicional”.

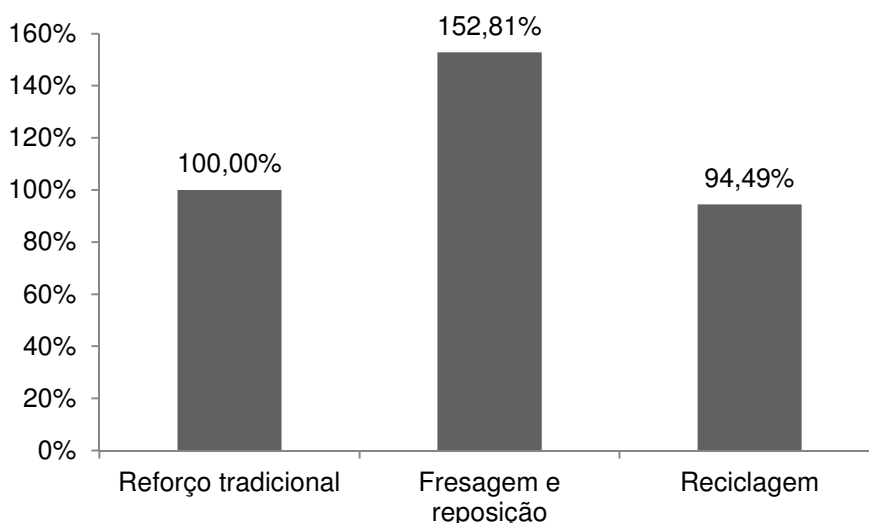


Figura 55- Relação da emissão de CO₂-eq (GWP) entre a solução “reforço tradicional” e as restantes soluções

No plano económico, os custos de reabilitação do pavimento por execução de uma das soluções, são conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - Custo de execução de soluções de reabilitação.

	Reforço tradicional	Fresagem e reposição	Reciclagem <i>in situ</i> com espuma de betume
Betão Betuminoso em Camada de Desgaste	33,733.63 €	42,167.04 €	50,600.45 €
Macadame Betuminoso	40,585.78 €	69,575.62 €	-
Fresagem de camadas betuminosas e transporte para depósito	-	73,370.65 €	-
Reciclagem de camadas betuminosas, <i>in situ</i> , com ligante betuminoso	-	-	106,260.94 €
SAMI's (Stress Absorbing Membrane Interlayer)	31,625.40 €	-	-
Total	105,944.81 €	185,113.31 €	156,861.39 €

Com base nos resultados apresentados (Tabela 22) verifica-se que a solução menos onerosa é a solução “reforço tradicional” comparativamente às restantes soluções devido ao reduzido número de atividades, sendo a solução “fresagem e reposição” com maior custo entre soluções de reabilitação. Em termos relativos (Figura 56) verifica-se que as soluções de reabilitação “Fresagem/reposição” e a “reciclagem *in situ* com espuma de

betume” apresentam um custo adicional na ordem de 74,73% e 48,06%, respetivamente, quando comparados com solução de “Reforço tradicional”.

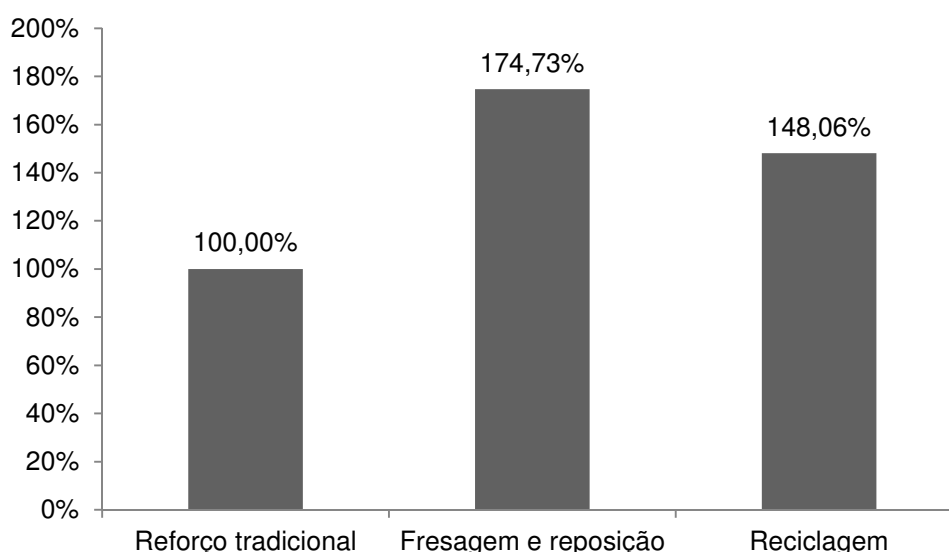


Figura 56 - Comparação de custos das restantes alternativas em relação à solução de reforço tradicional

No plano de custos económicos, verifica-se que o número e a espessura de camadas, bem como as atividades de fresagem e a reciclagem *in situ* das camadas betuminosas degradadas são as variáveis diferenciadoras ao nível de custos finais de cada solução de reabilitação em análise.

Grosso modo, no domínio do consumo de energia necessária para a execução de cada solução, verifica-se que produção de misturas betuminosas é das atividades de reabilitação, aquela que apresenta o maior consumo de energia necessária nas três soluções, seguido da atividade do consumo da matéria-prima, tendo a atividade de transporte e as operações *in situ* as atividades com menor consumo da energia.

Em termos de soluções com menor consumo de energia, menor emissão de gases com efeito de estufa e menor custos económicos, a solução “Reforço tradicional” é aquela que, no caso do pavimento da rua Cónego Dr. Manuel Faria, demonstra ser a mais sustentável. Já no caso do pavimento da rua Associação Artística Vimaranesse, a solução “Reforço tradicional” apresenta-se como solução menos onerosa. Porém, em termos de emissões de gases com potencialidade para o aquecimento global, a solução de reciclagem *in situ* com espuma de betume apresenta-se como a melhor solução do ponto de vista ambiental.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

A prossecução do principal objetivo deste trabalho justificou a utilização da metodologia para a avaliação da sustentabilidade das diferentes soluções de reabilitação, visando essencialmente analisar entre as soluções propostas para reabilitação aquela que apresenta menor custo, em termos económicos, e menor impacto ambiental ou seja menor consumo de energia e menores emissões de gases com efeito de estufa.

Nessa sequência, a execução da metodologia na reabilitação dos pavimentos em estudo e tendo em conta as soluções propostas para os dois pavimentos, face aos resultados obtidos para os mesmos, permitiu obter as seguintes conclusões:

a) *Pavimento da Rua Cónego Dr. Manuel Faria*

No plano ambiental a solução de reabilitação para o pavimento em causa que resulta no menor consumo da energia e conseqüentemente menores emissões de gases é a solução reforço tradicional. Portanto, esta é a solução que evidencia o menor potencial para o aquecimento global, seguida da solução reciclagem com a espuma de betume e por fim a solução fresagem e reposição das camadas betuminosas.

A evidência da menor potencialidade para o aquecimento global para a solução “reforço tradicional” relativamente a solução “reciclagem com espuma de betume” poderá dever-se essencialmente às emissões gasosas produzidas pela atividade da reciclagem do pavimento degradado, na medida em que o consumo de energia para ambas as soluções é equivalente.

No âmbito da avaliação económica, a solução menos onerosa é igualmente a solução de reforço tradicional em comparação com as restantes soluções, sendo seguida pela solução de reciclagem *in situ* com espuma de betume. Importa porém salientar, que a reciclagem dos pavimentos betuminosos, apesar de ser uma prática considerada assertiva do ponto de vista ambiental, a sua atividade é presentemente cara devido aos equipamentos que esta solução envolve.

Face ao exposto poder-se-á concluir que a solução de reforço tradicional é a solução mais sustentável pela conjugação favorável das principais variáveis determinantes da metodologia utilizada.

b) Rua da Associação Artística Vimaranense

No plano ambiental, a solução de reabilitação para o pavimento em causa que resulta no menor consumo da energia (na ordem de 0,38 TJ) é a reciclagem *in situ* com espuma de betume, contra 0,60 TJ da solução reforço tradicional, e 0,92 TJ da fresagem e reposição das camadas betuminosas, tendo como consequência menores emissões de gases com efeito de estufa. Dessa forma é a melhor solução do ponto de vista ambiental, devido ao menor potencial para o aquecimento global.

Do ponto de vista económico, a solução tradicional continua a representar a solução com menor custo económico, seguida da solução de reciclagem *in situ* com espuma de betume e por fim a fresagem e reposição das camadas betuminosas.

Com os resultados obtidos em ambos pavimentos, poder-se-á tecer as seguintes considerações:

- As atividades de reabilitação com maior contributo no consumo de energia e na emissão de CO₂-eq (gases com potencial para o aquecimento global) são a extração da matéria-prima e a produção das misturas betuminosas;
- Ao nível das emissões, verifica-se que o contributo da atividade da produção de misturas betuminosas é menos significativo comparativamente com a sua contribuição no consumo de energia necessária para execução de solução de reabilitação, apesar de ainda ser uma das atividades com a maior contribuição para as emissões gasosas.
- Verifica-se a tendência da solução de fresagem e reposição das camadas betuminosas ser a solução com maiores emissões de gases e simultaneamente maior custo económico;
- A reciclagem *in situ* com espuma de betume torna-se viável do ponto de vista ambiental em trechos com maior extensão do material a reciclar, devido o custo que representa a mobilização equipamentos para o efeito;
- A solução reforço tradicional pela simplicidade do seu método construtivo é aquela que apresenta os custos mais baixos entre as soluções de reabilitação propostas neste trabalho. Porém, poderá ser aquela com uma durabilidade menor, uma vez que não se eliminam as fendas do pavimento existente e poder-se-á observar a sua propagação para as novas camadas ao fim de um período de tempo relativamente reduzido.

Com este trabalho foi possível avaliar de forma mais abrangente o processo de dimensionamento da reabilitação de pavimentos urbanos, tendo em conta não apenas a componente técnica, mas também a parte ambiental e económica, que não são ainda consideradas por norma neste tipo de projeto. Assim, este trabalho poderá servir de base para uma mudança de paradigma em termos de avaliação de alternativas de reabilitação, permitindo até que as Autarquias possam considerar técnicas de conservação de pavimentos “não convencionais”, como a Reciclagem *in situ*, em futuros Cadernos de Encargos de obras de reabilitação de pavimentos urbanos.

5.2. Trabalhos futuros

A procura do saber é um processo dinâmico, na medida em que é quase infinita. Desse modo, interessante seria englobar o terceiro pilar do desenvolvimento sustentável, neste caso concreto os indicadores sociais na avaliação da sustentabilidade das soluções de reabilitação dos pavimentos urbano e por outro lado recorrer-se a pavimentos urbanos com maiores extensões de modo a aferir os custos sociais resultantes da ação de reabilitação. Isto porque a metodologia utilizada neste trabalho não tem em conta os referidos custos.

A inclusão desse terceiro pilar na avaliação da sustentabilidade das soluções de reabilitação facultará aos decisores uma visão global sobre os impactes gerados no aspeto ambiental, económico e social pela implementação de uma determinada solução na atividade de reabilitação de um determinado pavimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AI (1983). *Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation*, Asphalt Institute, Maryland.
- Antunes, I., Giuliani, F., Sousa, J.B. (2005). *Caracterização reológica de Betumes modificados CRM sujeito a envelhecimento artificial*, 3º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.
- Antunes, M. (1993). *Avaliação da capacidade de carga de pavimentos utilizando ensaios dinâmicos*, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Antunes, M.L., Marecos, V. (2013). Aplicação de indicadores Ambientais na Gestão de Infraestruturas Rodoviárias, *CRP*, pp. SP8, 142.
- Araújo, J.P.C., Oliveira, J., Silva, H., J, S., Palha, C. (2013). *Avaliação da Influência da Camada de desgaste na sustentabilidade dos Pavimentos Rodoviários*, 7º Congresso Rodoviário Português, p. SP8, 31, Lisboa.
- 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*, Vol. 32, pp. 97-110.
- Azevedo, M.D. (1999). *Gestão da Conservação de Pavimentos - As Técnicas de Reabilitação Estrutural dos Pavimentos*
- Batista, F. (2004). *Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos - Misturas Betuminosas Densas a Frio*, Tese de Doutoramento, Universidade do Porto.
- Batista, F., Antunes, M., Fonseca, P. (2006). *Desempenho de Misturas Betuminosas com BMB Aplicadas em Portugal*, IV Congresso Rodoviário Português, p. 1-10, Estoril, Lisboa.
- Bernucci, L.B., Mota, L.M.G., Ceratti, J.A.P., Soares, J.B. (2008). *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Branco, F., Pereira, P., Santos, L. (2006). *Pavimentos Rodoviários*, Coimbra.
- Branco, F., Pereira, P., Santos, L. (2011). *Pavimentos Rodoviários*, Edições Almedina, Coimbra.
- Brundtland, G.H. (1987). *Report of the World Commission on Environment - "Our Common Future"*, United Nations, General Assembly.
- C.E. (2001). *Livre blanc — La politique européenne des transports à l'horizon 2010: l'heure des choix*, Commission européenne, Luxembourg.

- Caltrans (2008). *Maintenance Technical Advisory Guide, Volume I - Flexible Pavement Preservation*, Second ed, State of California Department of Transportation, Sacramento, California, EUA.
- Cavalcante, F.P., Macêdo, J.A.G., Motta, L.M.G., Filho, I.D.S.P. (2004). *Avaliação Estrutural de Trecho Rodoviário no Estado da Paraíba*, Anais da 36ª Reunião Anual de Pavimentação, Curitiba, PR, Brasil.
- Chiu, C.-T., Hsu, T.-H., Yang, W.-F. (2008). Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 52 (3), pp. 545-556.
- Clemson (2014). *Asphalt Rubber Technology Service*, Clemson University; www.ces.clemson.edu/arts; <http://www.clemson.edu/ces/arts/samsami.html>.
- Corriere, F., Rizzo, A. (2012). Sustainability in Road Design: A Methodological Proposal for the Drafting of Guideline, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 53, pp. 39-48.
- Costa, B., Pinheiro, M., Nunes, M., Lourenço, H., Carvalho, P., Cerqueira, N. (2013). *Gestão da Sustentabilidade nas Estradas – Caso de Reabilitação da Maginal de Oeiras a Cascais*, 7º Congresso Rodoviário Português, p. 112, Lisboa.
- Costa, H. (2008). *Análise de Custos de Ciclo de Vida Relativa a Pavimentos Rodoviários Flexíveis*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa.
- Ding, T., Sun, L., Chen, Z. (2013). Optimal Strategy of Pavement Preventive Maintenance Considering Life-cycle Cost Analysis, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 96, pp. 1679-1685.
- Fonseca, P. (2002). *Reciclagem de pavimentos rodoviários*, 6ª Semana das Engenharias, Instituto Politécnico de Bragança–Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Bragança.
- Freitas, E., Pereira, P. (2001). Estudo da Evolução do Desempenho dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis, *Revista Engenharia Civil, Universidade do Minho*, Vol. n.º 11, pp. 47-58.
- Haas, R., Hudson, R., Zaniewski, J. (1994). *Modern Pavement Management*, Krieger Publishing Company, Malabar; Florida.

- 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*, Vol. 17 (2), pp. 283-296.
- Inteval (2009). *Aspectos Técnicos na Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários - Processos Construtivos nas Técnicas de Conservação e Reabilitação*, Gestão Integral Rodoviária, SA., Lisboa.
- JAE (1995a). *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*, Junta Autónoma das Estradas, Almada.
- JAE (1995b). *Manual de Dimensionamento do Reforço de Pavimentos Flexíveis*, Junta Autónoma das Estradas, Almada.
- LNEC (2007). *Homologação de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC (2008). *Avaliação económica de diferentes soluções de pavimentação ao longo do ciclo de vida das infra-estruturas rodoviárias – Relatório Intercalar; Relatório 140/2008 – NIRA* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Macêdo, J.A.G. (1996). *Interpretação de Ensaios Deflectométricos para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis*, Tese de Doutoramento, COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro.
- Minhoto, M. (2005). *Consideração de Temperatura no comportamento Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos rodoviários Flexíveis*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga.
- Molenaar, A.A.A., Heerkens, J.C.P., Verhoeven, J.H.M. (1986). *Effects of stress absorbing membrane interlayers*, Association of Asphalt Paving Technologists Proc.
- OCDE (1997). *Stratégies de Recyclage dans les Travaux Routiers*, Organisation de coopération et de développement économiques, France.
- Oliveira, J., Freitas, E. (2012). *Apontamento das Aulas da Disciplina da Gestão da Reabilitação de Vias Urbanas*, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Braga.
- Pais, J. (1999). *Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães.

- Pais, J., Pereira, P., Azevedo, M.D. (2000). Ensaios Mecânicos para Caracterização de Misturas Betuminosas, *1º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2000*, pp. 639-649.
- Pais, J., Silva, H. (2012). *Apontamentos de Aulas da disciplina de Dimensionamento e Construção de Pavimentos de Vias Urbanas*, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Braga.
- Pereira, P., Miranda, C. (1999). *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*, Impresso na Tipografia Barbosa & Xavier, Lda, Universidade do Minho, Braga.
- Pereira, P., Pais, J., Freitas, E., Silva, H., Oliveira, J. (2007). A Reabilitação da Rede Rodoviária no Século XXI - A Contribuição da Inovação para uma Visão Global da Reabilitação Rodoviária, *Revista Engenharia Civil, UM, nº 27*, pp. 19-36.
- PIARC (2003). Pavement recycling.
- Pinheiro, D. (2006). *Ambiente e Construção sustentável*, Instituto do Ambiente, Amadora.
- Pinto, J. (2003). *Caracterização Superficial de Pavimentos Rodoviários*, Mestrado em Vias de Comunicação, Universidade do Porto, Porto.
- Powell, W., Potter, J., Mayhew, H., Nunn, M. (1984). *The structural design of bituminous roads*, Pavement Design and Maintenance Division, Highways and Structures Dept., Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire.
- Robèrt, K.H., Schmidt-Bleek, B., Aloisi de Larderel, J., Basile, G., Jansen, J.L., Kuehr, R., Price Thomas, P., Suzuki, M., Hawken, P., Wackernagel, M. (2002). Strategic sustainable development - selection, design and synergies of applied tools, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 10 (3), pp. 197-214.
- Santero, N.J., Masanet, E., Horvath, A. (2011a). Life-cycle assessment of pavements Part I: Critical review, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 55 (9–10), pp. 801-809.
- Santero, N.J., Masanet, E., Horvath, A. (2011b). Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 55 (9–10), pp. 810-818.
- Santos, B., Santos, L., Cavaleiro, V. (2013). *Custos dos Utentes para a Análise de Custos de Ciclos de Vida de Estradas Portuguesas*, 7º Congresso Rodoviário Português, p. SP7, 88, Lisboa.

- Seco, Á., Antunes, A., Costa, A., Silva, A. (2008). *Princípios Básicos de Organização de Redes Viárias*, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte - CCDRn.
- Shell, I.P.C. (1978). *Pavement Design Manual - Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic*, Shell International Petroleum Company Ltd, London.
- Stuchi, E.T. (2005). *Interferência de Obras de Serviços de Água e Esgoto Sobre o Desempenho de pavimentos Urbanos*, Mestrado, Universidade de São Paulo.
- Torres-Machí, C., Chamorro, A., Videla, C., Pellicer, E., Yepes, V. (2014). An Iterative Approach for the Optimization of Pavement Maintenance Management at the Network Level, *The Scientific World Journal*, Vol. 2014, pp. 11.
- Vicente, A.M. (2006). *A Utilização de Betumes Modificados com Borracha na Reabilitação de Pavimentos Flexíveis*, Dissertação de Mestrado em Vias de Comunicação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Vidal, N.T., Carlos, D.G. (2006). *A Sustentabilidade das Obras de Geotécnicas*, 10^o Congresso Nacional de Geotecnia, UNL, Lisboa.
- Wirtgen GmbH (2001). *Wirtgen Cold Recycling Manual*, Windhagen, Germany.