



**DIOGO ANDRADE  
SIMÕES**

**MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE PAVIMENTOS  
COM MICROAGLOMERADO ENQUANTO  
ESTRATÉGIA ECONÓMICA E SUSTENTÁVEL**



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil  
Ano 2014

**DIOGO ANDRADE  
SIMÕES**

**MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE PAVIMENTOS COM  
MICROAGLOMERADO ENQUANTO ESTRATÉGIA  
ECONÓMICA E SUSTENTÁVEL**

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

## **o júri**

presidente

**Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa**  
professora associada da Universidade de Aveiro

**Professora Doutora Rosa Paula da Conceição Luzia**  
professora adjunta do Instituto Politécnico de Castelo Branco

**Professor Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta**  
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Ao Professor Doutor Agostinho Benta por toda a confiança depositada em mim, pelo constante incentivo, por exigir sempre mais e acima de tudo por toda a transmissão do seu conhecimento na projeção e elaboração deste trabalho, bem como a sua minuciosidade na análise do mesmo.

À Dra. Rita Afonso pela sua simpatia, cuidado e prestabilidade.

À Ana por todo o apoio incondicional e incentivo constante em todos os momentos da minha vida, motivando-me a fazer sempre mais e melhor.

Ao Luís Gustavo que, pela sua existência, me encoraja diariamente a atingir os meus objetivos.

Aos meus pais, Eugénia Simões e Luís Simões, por tornarem possível eu chegar até aqui, ser quem sou e por estarem sempre comigo nos bons e maus momentos.

À minha avó Merciana Conceição, que tanto orgulho teria em assistir à finalização desta fase da minha vida.

Por fim, mas não menos importante, a toda a minha família (incluindo aqueles que nela entraram mais recentemente) e amigos pela presença constante na minha vida e especial preocupação e apoio nesta fase da mesma.

**palavras-chave**

Preservação de Pavimentos, Manutenção Preventiva de Pavimentos, Tratamento de Manutenção Preventiva com Microaglomerado, Análise Económica, Análise Ambiental.

**resumo**

A presente dissertação teve como principal objetivo avaliar e comparar, a nível económico e ambiental, diferentes soluções de manutenção e reabilitação de pavimentos rodoviários. Foram consideradas 3 tipos de intervenções, com base em períodos de vida útil do pavimento de 10, 15 e 20 anos: reconstrução do pavimento, reforço estrutural e tratamento de manutenção preventiva com recurso a microaglomerado. O estudo contínuo de novas técnicas de manutenção preventiva de pavimentos rodoviários surge devido à necessidade de conciliar o impacto económico, de uma crescente rede rodoviária mundial, com as significativas implicações ambientais que esse crescimento acarreta. As situações mais desvantajosas foram as que incluíram reconstruções e não incluíram nenhum tratamento de manutenção preventiva com microaglomerado. Já a mais vantajosa foi a situação com recurso apenas ao tratamento de manutenção preventiva com microaglomerado, seguida da sua conjugação com o reforço estrutural e/ou reconstrução. Os resultados finais apontam para o tratamento de manutenção preventiva com microaglomerado ser um tratamento económica e ambientalmente sustentável, sendo o de menor custo, com menos emissões de CO<sub>2</sub> e menor gasto energético, permitindo alcançar o horizonte de serviço pretendido de 40 anos. Os programas de manutenção preventiva demonstram inúmeras vantagens, no entanto, exigem uma mudança de mentalidades e um significativo controlo e planeamento das intervenções necessárias e dos seus custos, sendo essencial um maior envolvimento e investigação, por parte da engenharia, nestes tratamentos.

**keywords**

Pavement preservation, Pavement Preventive Maintenance, Preventive Maintenance Treatment with Microsurfacing, Economic Analysis, Environmental Analysis.

**abstract**

The present thesis had as the main goal to assess and compare different solutions for maintenance and rehabilitation of road pavements, considering both economic and environmental aspects. Three different interventions were considered, based on a lifetime span of 10, 15 and 20 years: reconstruction of the pavement, structural reinforcement and preventive maintenance treatment with microsurfacing. The economic impact of a growing world road network and its environmental implications leads to the necessity of continuously studying new preventive maintenance techniques for road pavements. On one side we have the reconstruction of the pavement without any preventive maintenance treatment with microsurfacing, the most disadvantageous solution, and on the other side we have the situation that only uses preventive maintenance treatment with microsurfacing, followed by their combination with structural reinforcement and/or reconstruction of the pavement. The preventive maintenance treatment with microsurfacing seems to be both economical and environmentally sustainable, assuring the level of service for the desired life span of 40 years, with fewer costs, less CO<sub>2</sub> emissions and a smaller usage of energy. Despite the fact of showing several advantages, the usage of preventive maintenance plans still requires a change of the current mentalities and significant planning and control of the interventions and its costs, requiring a greater participation and investigation by the engineers.

**Índice**

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento Temático .....	1
1.2. Objetivos do Estudo.....	2
2. Considerações Iniciais .....	3
2.1. Tipos de Pavimentos .....	3
2.1.1. Pavimentos flexíveis. ....	3
2.1.2. Pavimentos rígidos. ....	4
2.1.3. Pavimentos semi-rígidos. ....	5
2.2. Patologias em Pavimentos Flexíveis.....	5
2.2.1. Deformações.....	6
2.2.2. Fendilhamento ou fissuração.....	8
2.2.3. Desagregação da camada de desgaste. ....	11
2.2.4. Movimento de materiais.....	13
2.3. Técnicas de Conservação e Reabilitação de Pavimentos Flexíveis .....	14
2.3.1. Técnicas de reabilitação das características superficiais.....	15
2.3.2. Técnicas de reabilitação das características estruturais.....	17
2.3.2.1. Reforço. ....	17
2.3.2.2. Reciclagem. ....	19
3. Microaglomerado Betuminoso a Frio.....	21
3.1. Emulsões Betuminosas.....	21
3.1.1. Fabrico.....	21
3.1.2. Caracterização das emulsões betuminosas.....	22
3.1.2.1. Natureza iónica. ....	23
3.1.2.2. Índice de rotura. ....	25
3.1.2.3. Teor nominal em ligante.....	26
3.1.2.4. Tipo de ligante.....	27
3.1.2.5. Viscosidade.....	27
3.1.2.6. Estabilidade. ....	28
3.1.2.7. Tipo de fases.....	30
3.1.2.8. Adesividade. ....	31
3.1.2.9. Dimensão das partículas de betume.....	32
3.2. Agregados .....	33

3.3. Outros constituintes .....	34
3.4. Fabrico e Aplicação .....	34
4. Manutenção Preventiva de Pavimentos .....	37
4.1. Programa de Manutenção Preventiva de Pavimentos .....	39
4.2. O Microaglomerado enquanto Tratamento de Manutenção Preventiva .....	40
5. Análise Comparativa .....	43
5.1. Dimensionamento .....	45
5.1.1. Estrutura Inicial do Pavimento .....	45
5.1.2. Reforço Estrutural .....	46
5.2. Programação das Diferentes Intervenções .....	50
5.3. Análise Económica .....	56
5.3.1. Descrição dos custos .....	57
5.3.2. Análise comparativa .....	63
5.4. Análise Ambiental .....	66
5.4.1. Descrição das emissões/consumos energéticos .....	67
5.4.2. Análise comparativa .....	75
6. Discussão/Conclusão .....	79
7. Referências Bibliográficas .....	83
Anexos .....	91



## Índice de Figuras

Figura 1 - Interligação de Patologias (Pereira & Miranda, 1999; citado por Branco <i>et al.</i> , 2006).....	5
Figura 2 - Abatimento transversal e longitudinal, respetivamente (Alves, 2007).....	6
Figura 3 - Ondulação (Alves, 2007) .....	7
Figura 4 - Rodeira (Alves, 2007).....	7
Figura 5 - Deformação localizada (Alves, 2007) .....	8
Figura 6 - Fendas parabólicas (Maia, 2012) .....	8
Figura 7 - Fendas de fadiga (Alves, 2007) .....	9
Figura 8 - Fenda longitudinal (Alves, 2007) .....	9
Figura 9 - Fenda transversal (Alves, 2007) .....	10
Figura 10 - Pele de crocodilo (Maia, 2012).....	10
Figura 11 - Desagregação superficial (Miller & Bellinger, 2003) .....	11
Figura 12 - Pelada (Miller & Bellinger, 2003) .....	11
Figura 13 - Ninhos (Alves, 2007).....	12
Figura 14 - Polimento de agregados (Miller & Bellinger, 2003) .....	12
Figura 15 - Subida de finos (Miller & Bellinger, 2003).....	13
Figura 16 - Exsudação (Miller & Bellinger, 2003; citado por Maia, 2012).....	13
Figura 17 - Evolução do estado de um pavimento e suas intervenções (Batista, 2004).....	14
Figura 18- Fabrico de uma emulsão betuminosa (Traduzido e adaptado de AkzoNobel, 2014).....	22
Figura 19- Inserção dos elementos no moinho coloidal (Adaptado de Bernucci, Motta, Ceratti, & Soares, 2008).....	22
Figura 20- Esquema representativo de uma emulsão catiónica (Bernucci <i>et al.</i> , 2008).....	24
Figura 21- Ensaio de determinação da natureza iónica de uma emulsão (AkzoNobel, 2014) .....	24
Figura 22- Exemplo representativo de ensaio de rotura (AkzoNobel, 2014).....	26
Figura 23- Esquema de ensaio à viscosidade (AkzoNobel, 2014) .....	28
Figura 24- Evolução de problemas de estabilidade (Traduzido e adaptado de ATEB, 2005) .....	29
Figura 25- Exemplificação da Adesividade (Traduzido de ATEB, 2005) .....	32
Figura 26- Aplicação de microaglomerado (Traduzido e adaptado de ATEB, n.d.).....	36
Figura 27 - Relação entre a condição do pavimento e o tempo de vida (Broughton <i>et al.</i> , 2012).....	44
Figura 28 - Estruturas dos pavimentos iniciais.....	46
Figura 29 - Estruturas dos pavimentos com reforços estruturais .....	49
Figura 30 - Resumo esquemático das situações .....	50
Figura 31 – Totais de custo (€/km) e VPL .....	65
Figura 32 – VPL (do pavimento com 20 km) agrupado segundo a estrutura inicial do pavimento.....	66

Figura 33 - Emissões (pavimento com 20 km) agrupadas segundo a estrutura inicial do pavimento .....	77
Figura 34 - Consumo energético (do pavimento com 20 km) agrupado segundo a estrutura inicial do pavimento .....	78

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Tipos de pavimentos, materiais e deformabilidade (Branco <i>et al.</i> , 2006).....	3
Tabela 2- Tipos de reciclagem (Batista, 2006).....	19
Tabela 3 – Tipo de fases (Adaptado de Costa, 2001; citado por Pereira, 2010 e AkzoNobel, 2014).....	31
Tabela 4 - Granulometria para microaglomerado (Traduzido e adaptado de ISSA, 2010). 33	
Tabela 5 – Comparação das aplicações de vários tratamentos de manutenção preventiva (Hicks, Seeds, & Peshkin, 2000).....	40
Tabela 6 - Tempos de vida de TMPM's.....	44
Tabela 7 - Dados e resultados do dimensionamento .....	45
Tabela 8 - Dados e resultados do dimensionamento do reforço estrutural (10anos).....	47
Tabela 9 - Dados e resultados do dimensionamento do reforço estrutural (15anos).....	48
Tabela 10 - Dados e resultados do dimensionamento do reforço estrutural (20anos).....	48
Tabela 11 - Programação da situação 1.A. ....	51
Tabela 12 - Programação da situação 1.B. ....	51
Tabela 13 - Programação da situação 1.C. ....	52
Tabela 14 - Programação da situação 1.D. ....	52
Tabela 15 - Programação da situação 2.A. ....	53
Tabela 16 - Programação da situação 2.B. ....	53
Tabela 17 - Programação da situação 2.C. ....	54
Tabela 18 - Programação da situação 2.D. ....	54
Tabela 19 - Programação da situação 3.A. ....	54
Tabela 20 - Programação da situação 3.B. ....	55
Tabela 21 - Programação da situação 3.C. ....	55
Tabela 22 - Programação da situação 3.D. ....	55
Tabela 23 - Custos considerados relativos à execução das misturas betuminosas.....	58
Tabela 24 - Custo total de cada estrutura inicial dos pavimentos (10,15 e 20 anos).....	58
Tabela 25 - Custo de cada reforço estrutural (10,15 e 20 anos) .....	59
Tabela 26 - Custo de cada reconstrução (10, 15 e 20 anos) .....	59
Tabela 27 - Custos do TMPM .....	60
Tabela 28 - Custos das situações 1 .....	61
Tabela 29 - Custos das situações 2 .....	62
Tabela 30 - Custos das situações 3 .....	63
Tabela 31 - Valores de custo (€/km), VPL e CAUE por ordem crescente.....	64
Tabela 32 - Emissões/consumos energéticos de atividades, materiais e maquinaria .....	68
Tabela 33 - Emissões e consumo energético da execução do pavimento inicial (10, 15 e 20 anos) .....	69
Tabela 34 - Emissões e consumo energético da execução de reforços estruturais.....	70
Tabela 35 - Emissões e consumo energético da reconstrução de pavimentos (10, 15 e 20 anos) .....	71
Tabela 36 - Emissões e consumo energético do TMPM .....	72

Tabela 37 - Emissões e consumos das situações 1 .....	73
Tabela 38 - Emissões e consumos das situações 2 .....	74
Tabela 39 - Emissões e consumos das situações 3 .....	75
Tabela 40 - Valores das emissões de CO <sub>2e</sub> (Kg/Km) e consumos energéticos (MJ/Km) por ordem crescente.....	76

## 1. Introdução

### 1.1. Enquadramento Temático

A rede rodoviária representa a infraestrutura mais importante para o desenvolvimento global de um país. Sem esta, a deslocação a qualquer ponto num dado território seria impossível, prejudicando o transporte de pessoas e de mercadorias. Deste modo, a rede rodoviária apresenta-se como um elemento imprescindível para o desenvolvimento socioeconómico do nosso país (Branco, Pereira, & Santos, 2006).

Anteriormente a 1985, Portugal apresentava uma extensão excessiva de rede rodoviária para o volume de tráfego que efetivamente a utilizava, como tal, com o aparecimento do Plano Rodoviário Nacional (PRN85) houve uma reorganização da rede considerada nacional, visando a modernização, aumento de qualidade e aumento do volume de tráfego nesta (Branco *et al.*, 2006; Batista, 2004).

Posteriormente surgiu o atual Plano Rodoviário Nacional (PRN2000), cuja principal alteração incidiu na reclassificação de algumas estradas e inclusão de estradas em zonas com acessos bastante limitados. Com estas alterações houve um aumento significativo da extensão rodoviária com a inclusão das denominadas Estradas Regionais (Branco *et al.*, 2006; Batista, 2004).

Com uma aproximação à finalização do plano rodoviário, surgiu um aumento do investimento no domínio da conservação e reabilitação em detrimento da nova construção. Dessa forma, o pavimento, como sendo o elemento das obras rodoviárias mais sujeito a ações intensas, principalmente ações atmosféricas e de tráfego e, por isso, mais suscetível a degradações, deverá ser um elemento prioritário. Por esse motivo, como forma de garantir a constante qualidade do pavimento, é necessário, quando possível, evitar a sua degradação e em último caso, quando isso não é possível, tentar repará-la rapidamente (Branco *et al.*, 2006).

A reabilitação pode ser executada de diferentes formas, tendo como principais condicionantes não só o estado funcional e estrutural do pavimento como também a qualidade que se pretende manter ou atingir (Pais, Pereira, & Azevedo, 2000). No entanto, a espera pela deterioração do pavimento para proceder à sua reabilitação envolve mais custos económicos e leva a maior perda de tempo, o que se associa a interrupções de serviço e maior inconveniência para os negócios e residentes locais (Jackson, 2001).

Atualmente, com a situação crítica em que se encontra o país e com a sua extensa rede rodoviária, surge uma limitação económica que obriga não só ao incentivo à reabilitação como também à escolha das soluções de reabilitação mais adequadas. O critério que deve ser tido em conta na escolha da solução deve ser não só técnico, mas também económico e ambiental (Fonseca, 2013). Neste sentido, surge a manutenção preventiva de pavimentos que pretende aplicar séries de tratamentos preventivos de baixo custo de forma a aumentar o tempo de serviço dos pavimentos. Esta técnica tem demonstrado conseguir uma melhor qualidade das estradas, maior satisfação do cliente e benefícios económicos, sendo que nos EUA estima-se que cada dólar gasto no presente irá poupar 6 dólares no futuro. Ainda assim, a implementação deste tipo de programas tem atravessado algumas dificuldades, especialmente devido a uma longa filosofia de *'If it ain't broke, don't fix it.'* (Jackson, 2001).

Assim sendo, é vital, para a engenharia e gestão das vias de comunicação, a elaboração de modelos efetivos para o tratamento de pavimentos, inclusivamente análises de custo do seu ciclo de vida. Dessa forma, a calendarização e orçamentação desenhadas para a preservação de pavimentos serão mais fidedignas (Labi, Lamptey, & Kong, 2007).

### **1.2. Objetivos do Estudo**

O presente trabalho pretendeu transmitir uma perspetiva geral e atual da importância da conservação e reabilitação, e dos diferentes métodos utilizados nas mesmas, realçando a sua crescente necessidade e aplicabilidade. O seu principal objetivo foi a comparação económica e ambiental de diversas situações com base em 3 tipos de intervenção: reforço estrutural; reconstrução e tratamento de manutenção preventiva com recurso a microaglomerado, bem como o dimensionamento e comparação de diferentes pavimentos, dimensionados para 10, 15 e 20 anos, para cada situação. Através dessas comparações pretendeu-se verificar qual das situações se demonstrou mais benéfica no que diz respeito aos aspetos económicos e ambientais.

## 2. Considerações Iniciais

### 2.1. Tipos de Pavimentos

Um pavimento apresenta como principal função garantir a circulação de veículos de forma cómoda e segura durante um determinado período de tempo, tendo em conta as diferentes solicitações que atuam sobre ele. Dentro destas solicitações as que necessitam de maior atenção são as ações de tráfego e as ações climáticas (Branco *et al.*, 2006). As ações atuantes no pavimento provocam diferentes tipos de comportamento no mesmo, conforme a sua tipologia. Existem três tipos de pavimentos que se distinguem quer com base na sua deformabilidade quer pela sua constituição, ou seja, através das diferentes camadas que os formam e características geométricas e mecânicas destas (Alves, 2007). Deste modo, os pavimentos dividem-se em flexíveis, rígidos ou semi-rígidos, sendo que os seus materiais e o seu nível de deformabilidade se apresentam na Tabela 1. No presente trabalho será dada particular importância aos flexíveis, aqueles que são mais frequentes na Rede Rodoviária Nacional.

Tabela 1 - Tipos de pavimentos, materiais e deformabilidade (Branco *et al.*, 2006)

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

#### 2.1.1. Pavimentos flexíveis.

Os pavimentos flexíveis são formados por uma camada superior de misturas betuminosas, seguida de uma ou duas camadas granulares. A flexibilidade destes componentes permite que este tipo de pavimentos seja bastante deformável. É necessário dar ainda especial atenção ao facto deste tipo de pavimento ser muito vulnerável a esforços de tração (Santos, 2010).

Descrevendo sucintamente as camadas que constituem este pavimento com base no JAE (1995); Branco *et al.* (2006) e Santos (2009), tem-se o seguinte:

- Camada de Desgaste - Constituída por material betuminoso, tendo uma espessura variável entre 4 e 6 cm, tem como função base a distribuição das cargas exercidas pelo tráfego e impermeabilização do pavimento, evitando a penetração de água. Esta camada deve ter uma boa aderência para permitir uma circulação cómoda e segura dos veículos.
- Camada de Regularização - Constituída por material betuminoso mais pobre que na camada de desgaste, com uma espessura entre 5 e 12 cm, exercendo a principal de função de redistribuição e transferência de tensões exercidas na camada de desgaste. É importante que tenha uma superfície regular e desempenada para facilitar a execução da camada de desgaste.
- Camada de Base - Constituída por material britado ou por material betuminoso, a sua espessura varia entre 15 e 30 cm, e permite a degradação das tensões exercidas pelo tráfego, evitando a mobilização excessiva do terreno de fundação.
- Camada de Sub-base - Constituída por material britado, variando a sua espessura entre 15 e 30 cm, apresenta propriedades de permeabilidade de modo a se opor à estagnação da água e evitar a ascensão desta por capilaridade para as camadas superiores.

### 2.1.2. Pavimentos rígidos.

Os pavimentos rígidos são constituídos por uma laje de betão de cimento, compactada por vibração, que se encontra apoiada numa sub-base granular. Esta sub-base, dependendo da intensidade do tráfego, pode ser ou não estabilizada com um ligante hidráulico (Branco *et al.*, 2006).

O facto deste tipo de pavimento apresentar como camada estrutural e principal uma laje de betão torna-o pouco deformável (Francisco, 2012). Esta característica permite uma grande resistência à flexão e baixa deformação, mesmo quando sujeito a uma intensidade de tráfego elevada (Branco *et al.*, 2006).

Como as tensões provocadas pelo tráfego estão a atuar numa grande área da laje de betão a sub-base granular não vai desempenhar um papel resistente, servindo



principalmente para facilitar a execução da laje em boas condições e garantir a sua resistência à erosão (Branco *et al.*, 2006).

### 2.1.3. Pavimentos semi-rígidos.

Os pavimentos semi-rígidos apresentam características dos dois pavimentos anteriormente especificados. Sendo as suas camadas superiores formadas por materiais betuminosos; a camada de base por material granular, estabilizado com ligante hidráulico, e a sub-base também por material granular, no entanto, estabilizado mecanicamente. Tendo em conta a sua constituição, a camada de base, devido à sua grande rigidez, absorve a maior parte dos esforços verticais. Em alguns casos as camadas betuminosas desempenham também um papel estrutural importante (Branco *et al.*, 2006).

Neste tipo de estruturas os maiores esforços são de tração e compressão. Sendo que os de tração se formam maioritariamente no fundo da camada de base e os de compressão no fundo da camada granular (Santos, 2009).

## 2.2. Patologias em Pavimentos Flexíveis

Qualquer pavimento rodoviário sujeito a ações climáticas e de tráfego sofre alterações ao longo do seu período de vida, o que poderá levar a degradações que afetem a sua qualidade. É importante salientar que há sempre a hipótese de, devido a deficiências dos materiais ou má execução do pavimento, essas alterações serem agravadas (Fontes, 2009).

As patologias referentes a pavimentos flexíveis dividem-se em quatro grandes grupos: deformações; fendilhamento; desagregação da camada de desgaste e movimento de materiais (Alves, 2007). Estas patologias podem interligar-se conforme a sequência representada na seguinte figura (ver Figura 1).

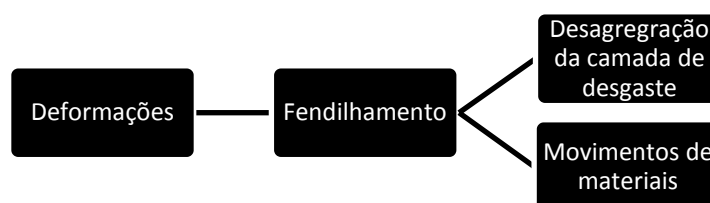


Figura 1 - Interligação de Patologias (Pereira & Miranda, 1999; citado por Branco *et al.*, 2006)

### 2.2.1. Deformações.

As deformações apresentam como principal origem os fatores de degradação ligados às condições de drenagem, à capacidade de suporte das fundações e à compacidade das camadas estruturais. Estas dividem-se em: abatimento; ondulação; deformações localizadas e rodeiras (Branco *et al.*, 2006; Eugénio, 2008).

O abatimento é uma deformação extensa, cujas causas dependem da direção em que se desenvolve (Branco *et al.*, 2006) tendo-se assim:

- Direção transversal - Resultante de falhas localizadas no pavimento, colapso de cavidades subterrâneas, má execução de juntas de trabalho e/ou forças tangenciais resultantes de travagens e acelerações (Maia, 2012) (ver Figura 2).
- Direção longitudinal - Pode suceder na berma, devido à redução da capacidade de suporte das camadas granulares e do solo de fundação, ou na faixa de rodagem, resultante do fendilhamento ao longo do eixo e consequente diminuição da capacidade de suporte, por infiltração de água, até às camadas inferiores e ao solo de fundação (EP-IEP-JAE, 2006; EP-IEP-JAE, 1997; citado por Eugénio, 2008; Branco *et al.*, 2006).



Figura 2 - Abatimento transversal e longitudinal, respetivamente (Alves, 2007)

A ondulação corresponde a uma deformação que se repete com uma dada frequência. Esta pode ocorrer em camadas de desgaste, que apresentem revestimento superficial devido a uma deficiente distribuição do ligante; em camadas de betão betuminoso, quando existe o arrastamento da mistura por excessiva deformação plástica devido à ação do tráfego; e/ou por deformação da fundação (Branco *et al.*, 2006) (ver Figura 3).



Figura 3 - Ondulação (Alves, 2007)

As rodeiras, representando a patologia mais significativa a nível de deformação, são uma deformação longitudinal que se desenvolve ao longo da banda de circulação de veículos. A sua presença é mais comum em faixas para autocarros ou nas vias mais à direita, devido à circulação de pesados (Maia, 2012). As principais causas desta patologia são a compactação insuficiente das camadas em geral; a capacidade insuficiente das camadas granulares e/ou a presença de misturas betuminosas com fraca resistência à deformação (EP-IEP-JAE, 2006; EP-IEP-JAE, 1997; citado por Alves, 2007; Branco *et al.*, 2006) (ver Figura 4).



Figura 4 - Rodeira (Alves, 2007)

Por fim, existe a deformação localizada que é uma deformação numa pequena área de pavimento. Esta pode ocorrer devido à falta de capacidade do solo de fundação, contaminação localizada nas camadas granulares e/ou capacidade insuficiente de resistência em zonas pontuais do pavimento (EP-IEP-JAE, 2006; EP-IEP-JAE, 1997; citado por Eugénio, 2008; Branco *et al.*, 2006) (ver Figura 5).



Figura 5 - Deformação localizada (Alves, 2007)

### 2.2.2. Fendilhamento ou fissuração.

O fendilhamento representa a degradação mais frequente em pavimentos flexíveis, representando, por vezes, perda de qualidade estrutural por parte do pavimento. A causa mais comum para este tipo de patologia é a fadiga dos materiais constituintes da camada betuminosa, resultante de esforços de tração por flexão atuantes nesta camada (Branco *et al.*, 2006). Dos diferentes tipos de fendilhamento distinguem-se os seguintes grupos:

- Fendas parabólicas - Surgem na zona de passagem dos pneus apresentando o eixo da parábola orientado longitudinalmente. Têm como principais causas esforços tangenciais, grandes variações de temperatura, má ligação das camadas de desgaste às restantes camadas e/ou incapacidade do ligante asfáltico de resistir às variações de volume provocadas por variações de temperatura (Maia, 2012) (ver Figura 6).



Figura 6 - Fendas parabólicas (Maia, 2012)

- Fendas de fadiga - Apresentam-se normalmente segundo uma direção longitudinal e de forma ramificada (Branco *et al.*, 2006). Estas resultam da fadiga do pavimento, mais propriamente das camadas betuminosas; da falta de suporte das camadas granulares ou fundação; e/ou da deficiente qualidade dos materiais constituintes da camada superior do pavimento (EP-IEP-JAE, 2006; EP-IEP-JAE, 1997; FHWA, 2003; citado por Alves, 2007; Branco *et al.*, 2006) (ver Figura 7).



Figura 7 - Fendas de fadiga (Alves, 2007)

- Fendas longitudinais – Encontram-se situadas paralelamente ao eixo da via, apresentando como principais causas para o seu surgimento o sub-dimensionamento das camadas; deformações com grande desenvolvimento; a retração térmica das camadas de desgaste; utilização de agregados com coeficiente de expansão térmica elevada; deficiente junta longitudinal de trabalho; e/ou fadiga estrutural, devido a solicitações exageradas na camada de base (Maia, 2012; Yao & Weng, 2012) (ver Figura 8).



Figura 8 - Fenda longitudinal (Alves, 2007)

- Fendas transversais - Localizam-se perpendicularmente ao eixo da estrada e têm como principais causas uma junta transversal de trabalho deficiente, retração térmica da camada de desgaste e/ou capacidade de suporte diferencial da fundação (EP-IEP-JAE, 2006; EP-IEP-JAE, 1997; FHWA, 2003; citado por Alves, 2007; Branco *et al.*, 2006) (ver Figura 9).



Figura 9 - Fenda transversal (Alves, 2007)

- Fendas com origem à superfície - Este tipo de fendas surgem na superfície do pavimento e desenvolvem-se para as camadas subjacentes, sem atingir a base das camadas betuminosas. Têm como principais causas a deficiente execução do pavimento e/ou a carga excessiva transmitida por veículos pesados (Freitas, 2004; citado por Branco *et al.*, 2006).
- Pele de crocodilo - Representa o grupo mais importante de fendas e resultam do desenvolvimento de fendas ramificadas que formam uma malha ou grelha (Branco *et al.*, 2006). Esta deformação permite definir um estado de ruína do pavimento. Apresenta como principais causas a fadiga do pavimento, envelhecimento dos seus constituintes, projeto estrutural não adequado, rotura da camada de desgaste, falta de qualidade de suporte das camadas globais do pavimento e/ou fraca qualidade dos materiais constituintes do pavimento (Maia, 2012) (ver Figura 10).



Figura 10 - Pele de crocodilo (Maia, 2012)

### 2.2.3. Desagregação da camada de desgaste.

Este grupo de degradações é essencialmente representado pela perda de qualidade superficial da camada de desgaste, muitas das vezes resultante de uma deficiente ligação dos materiais que constituem a mistura betuminosa (Branco *et al.*, 2006). Divide-se em quatro patologias importantes:

- Desagregação superficial - Representa uma das degradações mais importantes deste grupo de patologias, correspondendo a uma depressão de grande dimensão na camada de desgaste, que resulta do rápido desgaste do ligante betuminoso e consequente desprendimento dos agregados mais grossos. As principais causas para esta patologia são a atuação de tensões tangenciais elevadas, a deficiente ligação entre materiais, a má qualidade dos materiais utilizados e/ou a evolução de outras patologias (Maia, 2012) (ver Figura 11).



Figura 11 - Desagregação superficial (Miller & Bellinger, 2003)

- Pelada – Esta patologia resulta do desenvolvimento de fendas parabólicas, anteriormente especificadas, tendo como resultante o desprendimento da camada de desgaste. As principais causas para este acontecimento são uma espessura insuficiente da camada de desgaste, a sua má ligação com a camada subjacente e/ou a sua estabilidade reduzida (Maia, 2012) (ver Figura 12).



Figura 12 - Pelada (Miller & Bellinger, 2003)

- Ninhos - São covas arredondadas que surgem nas camadas de desgaste apresentando causas semelhantes à desagregação superficial. Ou seja, agravamento de outras degradações pré-existentes, má qualidade dos materiais aplicados na camada de desgaste e/ou a existência de zonas específicas com menor capacidade de suporte estrutural (Maia, 2012) (ver Figura 13).



Figura 13 - Ninhos (Alves, 2007)

- Polimento dos agregados - A ação abrasiva resultante do tráfego torna a textura do pavimento lisa e brilhante, este efeito diminui o coeficiente de atrito entre o veículo e o pavimento, tornando a circulação de veículos perigosa. Apresenta como principais causas a utilização de agregados não adequados às solicitações de tráfego respectivas e/ou do colapso dos agregados constituintes da camada de base (Maia, 2012) (ver Figura 14).



Figura 14 - Polimento de agregados (Miller & Bellinger, 2003)



#### 2.2.4. Movimento de materiais.

O movimento de materiais representa o conjunto de degradações que surgem devido à movimentação dos materiais constituintes das camadas betuminosas, granulares ou da fundação (Branco *et al.*, 2006). Este divide-se em dois tipos de anomalias.

A anomalia denominada subida ou bombagem de finos consiste na libertação da água acumulada, no interior do pavimento ou no solo de fundação, através de fendas presentes na superfície. A água transporta consigo os finos das camadas por onde passa (Branco *et al.*, 2006) (ver Figura 15).



Figura 15 - Subida de finos (Miller & Bellinger, 2003)

Existe ainda outro tipo de anomalia dentro do movimento de materiais, a exsudação. Esta corresponde à deslocação de ligante excessivo, presente nas misturas betuminosas, para a superfície da camada de desgaste, resultando numa aparência negra e brilhante. Apresenta como principal causa o excesso de betume e/ou baixa porosidade (Maia, 2012) (ver Figura 16).



Figura 16 - Exsudação (Miller & Bellinger, 2003; citado por Maia, 2012)

### 2.3. Técnicas de Conservação e Reabilitação de Pavimentos Flexíveis

Como já foi mencionado anteriormente, os pavimentos rodoviários, quando sujeitos à ação do tráfego e agentes climáticos, sofrem uma degradação progressiva. Essa degradação pode ser classificada de duas maneiras distintas, degradação estrutural ou funcional. A estrutural, conforme se pressupõe pela designação, coloca em causa a capacidade do pavimento para resistir às cargas que o solicitam, enquanto a funcional se refere a condições que afetam a qualidade de circulação dos veículos (Branco *et al.*, 2006).

Um pavimento é dimensionado para uma determinada vida útil, durante esse período é necessário estabelecer um programa de intervenções em termos de conservação do pavimento, de modo a garantir os níveis de serviço mínimos necessários para uma circulação cómoda, segura e económica dos utentes. Terminada a vida útil do pavimento torna-se necessário intervir na sua reabilitação. Na Figura 17 é apresentado um gráfico que representa a evolução da degradação de um pavimento ao longo do tempo e as intervenções necessárias para garantir o nível de serviço mínimo necessário (Batista, 2004).

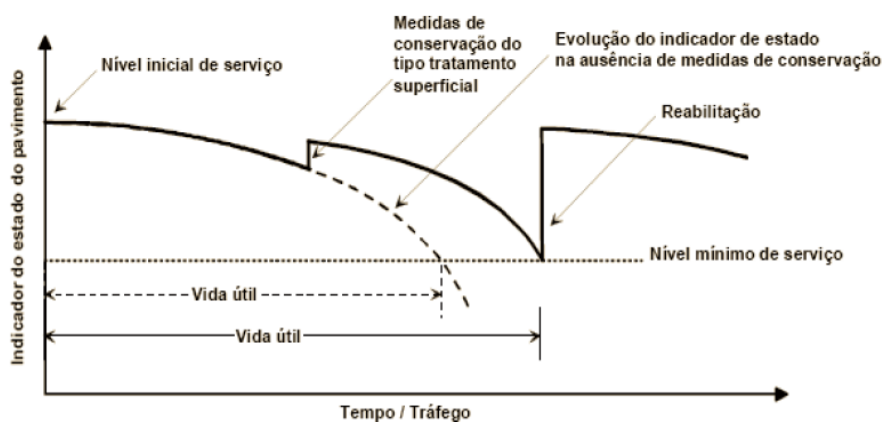


Figura 17 - Evolução do estado de um pavimento e suas intervenções (Batista, 2004)

Existindo a necessidade de intervir num pavimento é necessário escolher a solução mais adequada, para isso deve-se ter em conta os seguintes critérios (Batista, 2004):

- Técnico - Deve optar-se por uma solução que garanta a qualidade necessária para a resolução do problema existente, garantido uma durabilidade adequada.
- Económico - Levar em conta os custos da intervenção e os custos inerentes à entrada em serviço, tanto para os utentes como para as entidades gestoras.

- Ambiental - Ter sempre em consideração o impacto ambiental causado, avaliando o mesmo, sendo este um critério imprescindível.

Dentro da reabilitação de pavimentos é possível distinguir duas técnicas diferentes, sendo uma designada por técnica de reabilitação das características superficiais e outra como técnica de reabilitação das características estruturais (Francisco, 2012).

### **2.3.1. Técnicas de reabilitação das características superficiais.**

As técnicas de reabilitação de características superficiais são aplicadas nas camadas de desgaste com o intuito de repor as características funcionais iniciais do pavimento. Para se proceder à aplicação desta técnica é necessário garantir que o pavimento se encontra em condições estruturais adequadas (Pereira & Miranda, 1999; citado por Fontes, 2009).

A utilização destas técnicas não tem efeito direto a nível estrutural, tendo apenas os seguintes objetivos (Fontes, 2009):

- Evitar o agravamento de anomalias existentes;
- Impermeabilizar a camada de desgaste;
- Evitar o aparecimento prematuro de fendas;
- Atribuir novamente uma textura áspera à superfície do pavimento.

Apresenta-se seguidamente a descrição de algumas técnicas e materiais utilizados para a reabilitação de características superficiais.

A utilização de revestimentos betuminosos superficiais apresenta-se como a técnica com o melhor custo benefício, sendo por isso uma opção vantajosa (Branco *et al.*, 2006). No entanto, é necessário ter em conta que deve ser utilizada em pavimentos sem degradações muito visíveis e onde o pavimento esteja sustentado por uma boa estrutura de suporte, tornando-se, por isso, uma técnica especialmente adequada para zonas de baixo e médio tráfego (Branco *et al.*, 2006; Francisco, 2012). As principais funções deste tipo de revestimentos são o melhoramento das características antiderrapantes e da impermeabilização (Branco *et al.*, 2006). O facto deste tipo de revestimento permitir a utilização de camadas sucessivas de ligante e agregado, torna possível a existência de diversos tipos de revestimentos superficiais (Francisco, 2012).

O microaglomerado betuminoso a frio apresenta-se como uma camada fina constituída por emulsões betuminosas, agregados, *filler*, aditivos e água (Hein, Olidis, Darter, & Quintus, 2003). A aplicação deste material é uma técnica utilizada para obter boas condições de aderência de pneus (devido à rugosidade obtida) e uma melhor impermeabilização. No entanto, pode também ser utilizado em selagem de juntas longitudinais e reparações localizadas provocadas pela desagregação da camada de desgaste. Esta técnica apresenta uma grande poupança energética, pois é efetuada a frio, e garante boas características superficiais a um baixo custo, sendo estas as suas principais vantagens (Branco *et al.*, 2006). Este tratamento será descrito mais detalhadamente no ponto 3, visto ser fundamental ao desenvolvimento deste trabalho.

A lama asfáltica é uma mistura betuminosa com constituição aproximada à do microaglomerado betuminoso a frio, mas é formada por agregados de menor dimensão. Este facto reduz a aderência dos pneus pois causa problemas de rugosidade (Cunha, 2010). A utilização desta técnica é uma solução muito recorrente em Portugal, apesar de ter vindo a perder o seu interesse noutros países (Miranda & Pereira, 1999; citado por Cunha, 2010).

Segundo Santos (2010), o micro betão betuminoso rugoso é uma das técnicas mais recorrentes na Europa no que diz respeito à intervenção em autoestradas ou vias rápidas, devido ao grande volume de tráfego a circular nestas. Este material é uma mistura betuminosa cuja aplicação é efetuada em camadas de 2,5 a 3,5 cm que, apesar de apresentar defeitos a nível de impermeabilização, tem diversas vantagens tais como:

- Grande durabilidade;
- Boas condições de conforto e segurança;
- Ótima aderência entre pavimento e veículos;
- Baixo ruído na circulação.

A argamassa betuminosa está englobada nas misturas betuminosas a quente e é adequada a zonas de volume de tráfego reduzido. Graças à sua alta deformabilidade é utilizada em pavimentos com fendilhamento generalizado, retardando, desse modo, a intervenção estrutural (Cunha, 2010). Em Portugal, a argamassa betuminosa, quando contém betume modificado, é utilizada recorrentemente como solução retardadora para o processo de propagação de fendas (Branco *et al.*, 2006).

### **2.3.2. Técnicas de reabilitação das características estruturais.**

A reabilitação estrutural de um pavimento tem como principal objetivo o aumento da sua capacidade resistente, tendo em consideração o seu tempo de vida e as solicitações que atuam sobre ele (Francisco, 2012). Compreende principalmente a execução de novas camadas, mas também outros trabalhos complementares, como por exemplo o melhoramento do sistema de drenagem (Branco *et al.*, 2006).

Os três principais indicadores que permitem determinar a necessidade de uma intervenção a nível estrutural são: a ruína estrutural do pavimento, a previsão de um grande aumento de tráfego e um plano de conservação com gastos elevados (Carreteras, 2002; citado por Santos, 2009).

Existem diversas técnicas para a reabilitação estrutural de um pavimento, sendo que estas se dividem em três processos distintos: o reforço do pavimento, através da criação de novas camadas; a reciclagem do pavimento ou a sua reconstrução.

A reconstrução, apesar de ser um processo de reabilitação, não será aprofundada seguidamente, visto consistir basicamente na demolição e posterior construção de um novo pavimento. Não é uma técnica muito comum, apresentando-se adequada quando o pavimento está em estado de ruína estrutural e se pretende repor o nível de serviço inicial (Santos, 2009).

#### **2.3.2.1. Reforço.**

O reforço estrutural de pavimentos consiste na execução de camadas de reforço, mais propriamente de camadas betuminosas adicionais. Este tem como função base a recuperação estrutural do pavimento, o que permitirá o aumento da capacidade estrutural e vida útil deste (Jacinto, 2003; citado por Santos, 2009).

Este tipo de intervenção difere consoante o grau de degradação do pavimento. No caso de um pavimento pouco degradado a intervenção de reforço é antecedida pela execução de pequenas reparações ou melhorias, tais como: arranjo e selagem de fendas, tapamento de covas e/ou aperfeiçoamento da drenagem. Quando o grau de degradação de um pavimento é elevado torna-se necessário proceder inicialmente à fresagem das camadas que apresentem maior degradação e posteriormente reparar as camadas restantes. Só após esse processo estar concluído é que se iniciará então o reforço (Ribeiro, 2012).

As misturas betuminosas fabricadas a quente têm sido preferencialmente utilizadas na execução das camadas de reforço, embora na atualidade se recorra cada vez mais a outros materiais (Batista, 2004). A escolha do material a aplicar nas camadas de reforço depende essencialmente do número de camadas que vão ser aplicadas (Branco *et al.*, 2006).

Seguidamente irá proceder-se a uma breve descrição de algumas das misturas mais utilizadas no reforço de pavimentos.

As misturas betuminosas tradicionais, cujo fabrico é feito em centrais betuminosas específicas para esse processo, são misturas betuminosas a quente, elaboradas a partir de agregados e betume (Batista, 2004; Cunha, 2010). As características que esta mistura vai adquirir dependem dos materiais utilizados e das respetivas proporções (Cunha, 2010). Em Portugal, as misturas deste género mais usuais e as suas respetivas aplicações são: macadame betuminoso para camadas base ou de regularização, betão betuminoso para camadas de desgaste, mistura betuminosa densa para camadas de regularização e betão betuminoso aplicado de forma subjacente às camadas de desgaste drenante ou delgada (JAE, 1998; citado por Batista, 2004).

As misturas de alto módulo de deformabilidade apenas diferem das misturas betuminosas tradicionais na utilização de um ligante muito duro que permite maiores módulos de deformabilidade à mistura (Batista, 2004). A utilização destas misturas apresenta-se essencialmente vantajosa em zonas com tráfego elevado; que não permitam a utilização de uma grande espessura e onde as variações de cota sejam uma condicionante (Vicente, 2006). Apresentam como principais vantagens a redução da utilização de recursos naturais, redução dos volumes de transporte de materiais (o que reduz também os custos de transporte) e redução dos tempos de execução da camada (Batista, 2004). As maiores desvantagens deste tipo de mistura são esta necessitar de uma maior temperatura, tanto no fabrico como na aplicação, e, devido à sua elevada rigidez, a sua aplicação como camada de desgaste poder gerar fendas por retração, provocadas por variações de temperatura (Vicente, 2006).

Outro tipo de misturas são as misturas betuminosas modificadas com polímeros. Estas correspondem a uma mistura betuminosa cujo betume sofre alterações nas suas propriedades, através da adição de agentes químicos durante o seu fabrico (Cunha, 2010). Estas misturas surgem com a constante necessidade de melhorar o pavimento,

principalmente a nível da regularidade superficial, profundidade da textura e aderência (Batista, 2004).

Por último faz-se referência às misturas betuminosas com borracha, que recorrem, para além dos seus constituintes usuais (agregados e betume), a borracha proveniente da reciclagem de pneus usados (Batista, 2004). As principais vantagens da borracha na mistura são uma maior resistência ao envelhecimento; o aumento da resistência à fadiga, por parte da mistura; e aumento da resistência às deformações permanentes (Branco *et al.*, 2006).

### 2.3.2.2. Reciclagem.

A reciclagem tem vindo a ser um processo cada vez mais utilizado, principalmente na reabilitação de pavimentos em pior estado. O processo de reciclagem tem como principal objetivo atuar em estruturas envelhecidas e degradadas, permitindo que estas adquiram uma maior regularidade, homogeneidade e resistência (Martinho, Santos, & Pais, 2004). Existem diferentes processos de reciclagem cuja distinção é feita com base nas seguintes características (INIR, 2011; citado por Felix, 2013):

- Local - Pode ser feita *in situ* ou numa central;
- Temperatura de fabrico - Pode ser efetuada a quente, temperada, semi-quente ou frio;
- Tipo de ligante - Pode ser utilizado um ligante betuminoso, hidráulico ou mistura.

As principais técnicas de reciclagem utilizadas e os locais onde são efetuadas as misturas apresentam-se representadas na Tabela 2 e encontram-se explicitadas seguidamente.

Tabela 2- Tipos de reciclagem (Batista, 2006)

Tipo de Reciclagem	Local da Mistura	
	<i>In Situ</i>	Em central
Reciclagem a frio com cimento	Sim	Não
Reciclagem a frio com emulsão betuminosa	Sim	Sim
Reciclagem a frio com betume-espuma	Sim	Sim
Reciclagem semi-quente com emulsão betuminosa	Não	Sim
Reciclagem a quente	Sim	Sim

A reciclagem *in situ* com utilização de cimento é uma técnica recorrentemente utilizada no reforço estrutural de pavimentos, consistindo na reutilização de materiais presentes no pavimento para proceder à execução de uma camada de base. Esta camada é executada com os materiais presentes no pavimento, acrescidos de um ligante, água, aditivos e por vezes agregados, se necessário (Vicente, 2006). O pavimento, com esta intervenção, adquire maior rigidez, resistência à erosão e menor suscetibilidade à ação da água (Santos, 2009).

O processo de reciclagem *in situ* com utilização de emulsão betuminosa consiste na utilização da emulsão como ligante dos materiais fresados, devendo proceder-se nesta intervenção ao acréscimo de água para pré-molhagem dos agregados e aditivos. Apresenta-se como um processo vantajoso quando apenas é necessário intervir na camada de desgaste, devido ao seu envelhecimento ou degradação. Esta intervenção tem como principais condicionantes a sua suscetibilidade a condições climáticas e variações de humidade atmosféricas e os agregados utilizados (Simões & Paul, 2002; citado por Santos, 2009).

Quanto à reciclagem a frio *in situ* esta é executada com betume espuma e consiste na mistura do material fresado presente no pavimento com betume espuma. É importante salientar que para se executar a espuma de betume é necessário aquecer o betume, de forma a se proceder ao acréscimo de água. As melhorias resultantes desta intervenção são a resistência à fadiga e uma base com melhores características (Santos, 2009).

As reciclagens em central consistem na fresagem do pavimento com posterior transporte e armazenamento em central. Na central procede-se à execução da mistura betuminosa reciclada, que é seguidamente transportada novamente para a obra e aplicada (Felix, 2013).

A reciclagem *in situ* a quente é um processo de aquecimento do pavimento, de modo a permitir uma mais fácil desagregação deste e posterior mistura com emulsões betuminosas ou betumes modificados com polímeros (Santos, 2009). É aplicada maioritariamente na reabilitação de fendas presentes na camada de desgaste, no aparecimento de descolagem na interface da camada de desgaste com a de suporte e em vias com elevado tráfego de pesados com uma degradação alta (Pereira & Miranda, 1999; citado por Vicente, 2006).



### **3. Microaglomerado Betuminoso a Frio**

A definição de microaglomerado, enquanto técnica de reabilitação de características superficiais, foi abordada anteriormente. No entanto, a especificação dos seus constituintes bem como o seu fabrico e modo de aplicação torna-se essencial para a compreensão do presente trabalho, pelo que serão abordados neste capítulo.

#### **3.1. Emulsões Betuminosas**

Uma emulsão betuminosa, segundo Read e Whiteoak (2003), é um sistema de duas fases constituído por betume, água e aditivos. Os aditivos desempenham dois papéis importantes, por um lado facilitam a formação e estabilização da emulsão e, por outro, permitem modificar as propriedades da mesma. O betume encontra-se disperso no meio contínuo formado pela água, apresentando-se sob a forma de glóbulos discretos. Estes glóbulos são mantidos em suspensão pela intervenção de cargas electroestáticas, estabilizadas por um emulsionante, que permitem que os glóbulos se repelem mantendo os líquidos imiscíveis e, conseqüentemente, o sistema em equilíbrio.

##### **3.1.1. Fabrico.**

O processo de fabrico das emulsões betuminosas (ver Figura 18) inicia-se com a mistura de água, emulsionante e outros aditivos químicos necessários, sendo esta mistura posteriormente inserida, juntamente com o betume quente, no moinho coloidal. É necessário ter em atenção que esta inserção deve ser executada em simultâneo mas com os elementos separados (ver Figura 19). A temperatura do betume e da fase aquosa são muito importantes pois influenciam a viscosidade e facilidade de penetração do betume e, no que diz respeito à água, evita que esta se evapore. No moinho coloidal o betume quente é desfeito em pequenos glóbulos micrométricos, sendo estes envolvidos pelo emulsionante. Este emulsionante transmite cargas electroestáticas, que impedem a mistura da fase aquosa e dos glóbulos de betume, à superfície dos glóbulos (Read & Whiteoak, 2003).

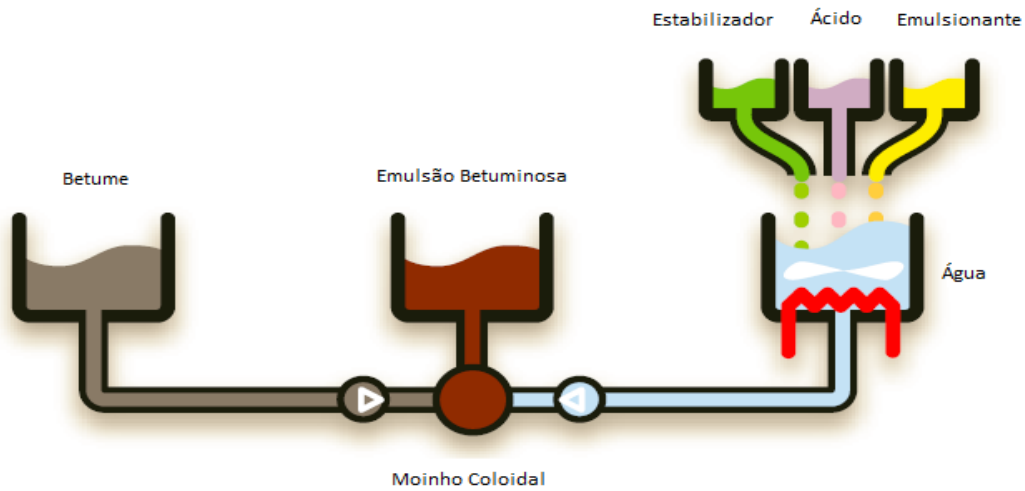


Figura 18- Fabrico de uma emulsão betuminosa (Traduzido e adaptado de AkzoNobel, 2014)

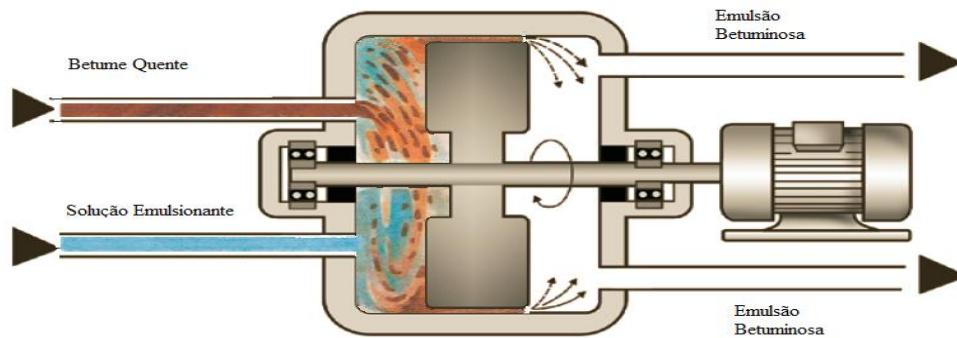


Figura 19- Inserção dos elementos no moinho coloidal (Adaptado de Bernucci, Motta, Ceratti, & Soares, 2008)

### 3.1.2. Caracterização das emulsões betuminosas.

As emulsões betuminosas são designadas por uma nomenclatura onde aparecem indicadas as suas características mais importantes (EP, 2012):

- Natureza iónica;
- Índice de rotura;
- Teor nominal em ligante;
- Tipo de ligante.

Dando como exemplo uma emulsão designada por "C 40 B 3", a nomenclatura utilizada apresenta os seguintes significados (EP, 2012; Afonso, 2011):

- A letra "C" designa a natureza iónica da emulsão, sendo neste caso uma emulsão catiónica. A outra designação possível é "A" que se refere a emulsões aniónicas.
- O "40" representa o teor nominal em ligante (em percentagem).
- A letra "B" refere-se ao tipo de ligante, sendo neste exemplo utilizado um betume de base. Pode surgir ainda a designação "BP", que representa um betume modificado com polímeros; "BF", que representa um betume base com uma percentagem de fluidificante superior a 2%; e, por fim, "BPF", que designa um betume modificado com polímeros com uma percentagem de fluidificante superior a 2%.
- O "3" indica o índice de rotura, podendo este variar entre 0 e 7, sendo que o 7 representa a velocidade de rotura mais reduzida.

Existem ainda outras características, para além das utilizadas na nomenclatura, que influenciam as emulsões betuminosas e serão também seguidamente mencionadas.

### ***3.1.2.1. Natureza iónica.***

A influência da natureza iónica das emulsões betuminosas tem como base as leis fundamentais da electricidade, segundo as quais as cargas iguais se repelem e as cargas opostas se atraem (Read & Whiteoak, 2003). Esta natureza das partículas permite a sua divisão segundo os seguintes tipos de emulsão:

- Emulsões catiónicas;
- Emulsões aniónicas;
- Emulsões não iónicas;
- Emulsões de argila estabilizada.

Destas quatro divisões optou-se por especificar apenas as duas primeiras, visto as não iónicas raramente serem utilizadas e as emulsões de argila estabilizada serem mais apropriadas para meios industriais comparativamente à aplicação em pavimentação (Read & Whiteoak, 2003).

No que diz respeito às emulsões catiónicas e aniónicas, estas são diferenciadas pelo tipo de cargas elétricas que envolvem os glóbulos de betume. Nas aniónicas as cargas envolventes são negativas, enquanto nas catiónicas são positivas (Pereira, 2010). Segundo Branco *et al.* (2006) as emulsões aniónicas são mais apropriadas para o tempo seco e devem ser utilizadas com agregados de calcário, enquanto as catiónicas podem ser utilizadas com tempo húmido ou seco e com qualquer tipo de agregado. Na Figura 20 apresenta-se um esquema representativo de uma emulsão catiónica, diferindo apenas da aniónica no que diz respeito ao sinal das cargas envolventes.

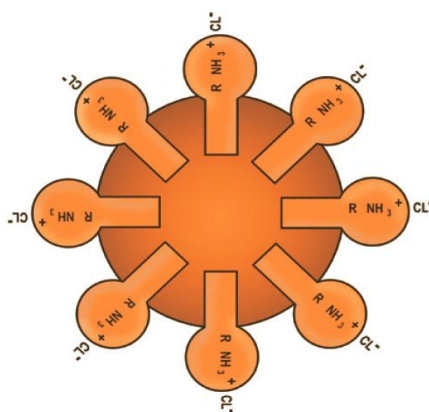


Figura 20- Esquema representativo de uma emulsão catiónica (Bernucci *et al.*, 2008)

Para determinar a natureza iónica de uma emulsão betuminosa é possível recorrer a um ensaio com um equipamento de medição de pH, conforme representado na Figura 21. Este ensaio é efetuado através da inserção de eléctrodos dentro das emulsões betuminosas e posterior confirmação de qual o eléctrodo que atrai as partículas. As cargas que envolvem os glóbulos de betume terão o sinal oposto ao eléctrodo que as atraiu (Bernucci *et al.*, 2008).

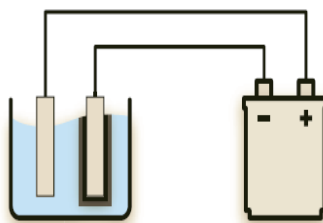


Figura 21- Ensaio de determinação da natureza iónica de uma emulsão (AkzoNobel, 2014)

### 3.1.2.2. Índice de rotura.

O índice de rotura indica a velocidade com que ocorre a rotura das emulsões betuminosas. Quando as emulsões betuminosas são colocadas em contacto com os agregados a sua superfície é envolvida pelos glóbulos de betume. Este facto origina a rotura do emulsionante e, conseqüentemente, surge a libertação e evaporação da mesma (Bernucci *et al.*, 2008). Este acontecimento é designado por rotura da emulsão.

Os parâmetros que apresentam maior influência no índice de rotura são os seguintes (Read & Whiteoak, 2003):

- Percentagem de betume – Um maior número de partículas de betume aumenta a probabilidade de contacto entre partículas, aumentando assim a velocidade de rotura.
- Composição da fase aquosa – Um aumento da quantidade de emulsionante permite uma redução da velocidade de rotura, pois dificulta a rotura entre a fase aquosa e o betume.
- Tamanho das partículas de betume – Na prática, quanto mais pequenas forem as partículas de betume mais dispersas estas se encontram, diminuindo assim a velocidade de rotura.
- Vento, temperatura e humidade – Estes três fatores influenciam a rapidez com que se evapora a água. A velocidade de rotura aumenta com a rapidez com que se origina a evaporação das partículas de água.
- Temperaturas elevadas - Influencia a reologia do betume, visto tornar as suas partículas mais móveis e frágeis, aumentando a probabilidade de contacto entre partículas e, conseqüentemente, a velocidade de rotura.
- Utilização de agentes de rotura - A sua aplicação pode ser feita durante a execução da emulsão betuminosa ou após a sua aplicação num pavimento. Estes agentes são aditivos químicos e apresentam como objetivo acelerar ou retardar a rotura de uma emulsão.
- Agregados - A aplicação dos agregados deve ser executada logo após a aplicação da emulsão betuminosa no pavimento, de modo a permitir que estes se envolvam na emulsão. Esta aplicação provoca uma aceleração da velocidade de rotura, provocada pela absorção do emulsionante pelos agregados e pela evaporação da água.

A utilização de emulsões betuminosas com diferentes velocidades de rotura depende da aplicação pretendida. Enquanto as emulsões com velocidade de rotura rápida são mais adequadas para revestimentos superficiais, misturas betuminosas a frio (quando utilizadas para preenchimento de covas) e regas de colagem; as de rotura média e lenta são mais utilizadas para trabalhos que necessitam de uma estabilidade mais longa, entre os quais, camadas de misturas betuminosas a frio e regas de impregnação (Branco *et al.*, 2006).

Existem dois tipos de ensaios, para determinar a velocidade de rotura de uma emulsão, que se diferenciam pelo elemento utilizado na sua execução. Um é efetuado com recurso a cimento enquanto o outro recorre a *filler* silícico. Em ambos os ensaios os materiais são acrescentados a uma emulsão betuminosa com o intuito de provocar a sua rotura, verificando a velocidade com que esta ocorre (Bernucci *et al.*, 2008) (ver Figura 22).

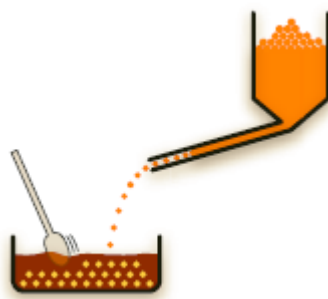


Figura 22- Exemplo representativo de ensaio de rotura (AkzoNobel, 2014)

### **3.1.2.3. Teor nominal em ligante.**

O teor nominal em ligante, normalmente estabelecido em percentagem, varia consoante a aplicação pretendida. Segundo Branco *et al.* (2006), essa percentagem deve variar entre 55% e 65% já o Transportation Research Board (2006) define uma variação de mais abrangente, entre 40% a 75%. No entanto, o InIR (n.d.) refere que numa emulsão betuminosa do tipo C40BF6, que é indicada para regas de impregnação especiais, o teor em ligante deverá ser de 40%, o que apoia a segunda variação referida.

#### **3.1.2.4. Tipo de ligante.**

No que diz respeito ao tipo de ligante, o principal foco incide na utilização ou não utilização de modificações no betume, sendo estas modificações efetuadas com base na adição de polímeros (Bernucci *et al.*, 2008). O betume modificado apresenta melhores propriedades e comportamento (AkzoNobel, 2014), sendo que a necessidade da sua utilização vai depender das condições de serviço presentes nos locais de aplicação. Muitas vezes o uso de um betume base em condições de serviço mais adversas pode aumentar a probabilidade de surgimento de anomalias, sendo portanto, aconselhável o uso de betume modificado (Read & Whiteoak, 2003). Para além disso, deverá ter-se em consideração a percentagem presente de fluidificante, sendo que este é um dissolvente volátil que tem como principal função uma redução temporária da viscosidade do betume à temperatura ambiente, tornando mais fácil o espalhamento de misturas betuminosas a frio a temperaturas inferiores (Silva, 2005).

#### **3.1.2.5. Viscosidade.**

A trabalhabilidade de uma emulsão betuminosa tem ligação direta com a viscosidade que esta apresenta, sendo mais fácil o seu manuseamento quando a viscosidade é mais reduzida (Pereira, 2010). Esta pode ser influenciada por alguns fatores, entre os quais (Read & Whiteoak, 2003):

- Aumento da concentração de betume - No caso da percentagem de betume ser reduzida a influência é pouca, no entanto, se a percentagem for elevada as variações na viscosidade podem ser difíceis de controlar (grande aumento da viscosidade);
- Modificação da fase aquosa - Quando estamos perante uma emulsão catiónica é possível aumentar a viscosidade recorrendo a uma diminuição do conteúdo ácido ou a um aumento do emulsionante;
- Alteração da fluência durante a circulação no moinho coloidal - Este facto apenas tem influência quando a percentagem de betume é superior a 65%, nesses casos a distribuição das partículas sofre uma alteração gerando um aumento da viscosidade;
- Diminuição da viscosidade do betume que circula no moinho coloidal - O tamanho das partículas de betume sofre uma redução e, conseqüentemente, a viscosidade sofre um aumento.

A medição da viscosidade é efetuada com recurso a um viscosímetro, conforme apresentado na Figura 23 (Bernucci *et al.*, 2008), este processo consiste no aquecimento da emulsão, para a temperatura a que vai ser sujeita na aplicação, e posterior medição do tempo que demora o seu escoamento para um gobelé, correspondendo um maior tempo a um maior nível de viscosidade (AkzoNobel, 2014).

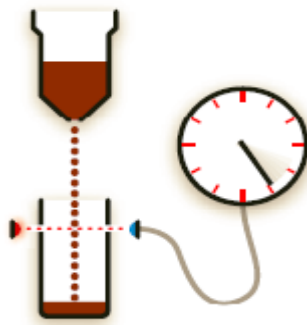


Figura 23- Esquema de ensaio à viscosidade (AkzoNobel, 2014)

### 3.1.2.6. Estabilidade.

No que diz respeito à estabilidade, esta pode ser afetada principalmente pela ocorrência de três fenómenos: cremificação, quando ocorre a elevação dos glóbulos de betume (ATEB, 2005); sedimentação, em que ocorre o depósito de glóbulos de betume; floculação, quando ocorre uma aproximação dos glóbulos de betume e coalescência, quando há formação de grandes nódulos de betume (Almeida, 2003).

Concretamente, no que diz respeito ao processo de sedimentação este resulta, normalmente, de assentamentos durante a aplicação da emulsão. Este facto ocorre devido a uma maior densidade do betume em relação à fase aquosa, à temperatura ambiente, que leva a que o betume desça gerando uma camada inferior rica em betume e uma superior pobre em betume (Read & Whiteoak, 2003). No entanto, é possível ocorrer o processo oposto - cremificação, ou seja, a densidade da fase aquosa ser superior à densidade dos glóbulos de betume e ocorrer a elevação dos mesmos, o que irá levar ao aumento da concentração de betume numa zona superior (ATEB, 2005).

Os processos de sedimentação e cremificação, como já foi referido, provocam um aumento da concentração de glóbulos de betume numa determinada zona, aumentando consideravelmente a possibilidade de contacto entre estes (ATEB, 2005). Quando dois



glóbulos de betume se aproximam, e conseguem energia suficiente para ultrapassar a carga de repulsão existente entre eles, podem entrar em contato e agregar-se, a este fenômeno atribui-se a designação de floculação (TRB, 2006). Quando o fenômeno de floculação é prolongado torna-se possível a fusão de glóbulos de betume em grandes nódulos, ou seja, ocorre a coalescência, que corresponde à rotura de emulsão (ATEB, 2005). Na Figura 24 é representada toda a evolução resultante de problemas de estabilidade, sendo necessário ter em conta que inicialmente pode ser despoletada pela ocorrência de sedimentação, como representado na figuram ou cremificação.

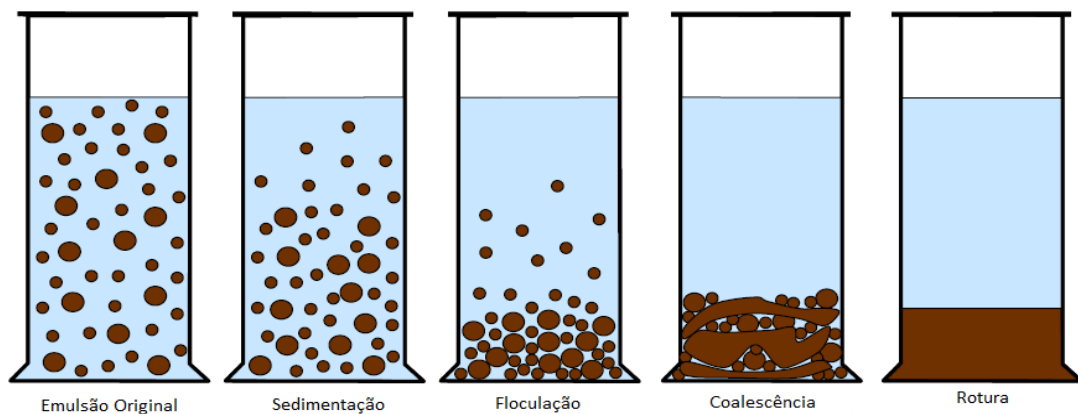


Figura 24- Evolução de problemas de estabilidade (Traduzido e adaptado de ATEB, 2005)

A resolução de problemas de estabilidade resultantes de sedimentação, cremificação e floculação pode ser feita com recurso a um processo de agitação mecânica, pelo contrário, o processo de coalescência é irreversível pois ocorre uma separação total da fase aquosa e dos glóbulos de betume (rotura da emulsão) (Almeida, 2003). Para reduzir a probabilidade de ocorrência de problemas de estabilidade deve-se tentar garantir as seguintes condições (Read & Whiteoak, 2003):

- Utilização de partículas de betume com menor dimensão - Partículas maiores apresentam maior facilidade de assentamento e, como tal, estão mais sujeitas a problemas de estabilidade;
- Densidades iguais entre a fase aquosa e o betume - Para obter esta igualdade pode adicionar-se cloreto de cálcio à fase aquosa, no entanto, é necessário garantir a mesma densidade a diferentes temperaturas;
- Aumento da viscosidade - Uma menor viscosidade facilita a ocorrência de sedimentação.

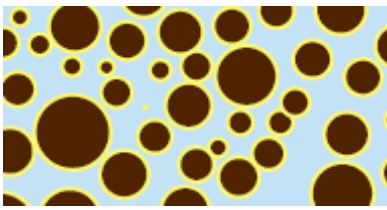
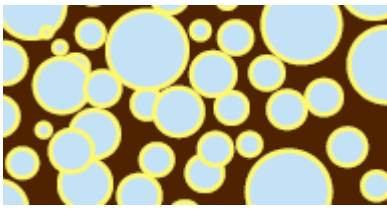

É importante ainda salientar que existe outro fator que influencia a sedimentação mas que pode reduzir ou aumentar a sua ocorrência. Esse fator é as forças de repulsão ou atração entre as partículas (Read & Whiteoak, 2003).

De forma a garantir a qualidade da emulsão betuminosa ao nível da sua estabilidade devem ser realizados dois ensaios: o ensaio de sedimentação e o ensaio de peneiramento. O ensaio de sedimentação consiste na colocação de 500 ml de uma amostra de emulsão betuminosa numa proveta durante cerca de 5 dias, sendo posteriormente retiradas duas pequenas amostras, uma do fundo e outra da superfície. Estas amostras são colocadas num gobelé e seguidamente numa estufa, sendo necessário passado 2 horas retirá-las para serem agitadas e novamente colocadas na estufa durante mais uma hora. Por fim retira-se as amostras e são deixadas a arrefecer à temperatura ambiente. A diferença de peso entre as duas amostras permite determinar a percentagem de resíduo depositado no fundo, ou seja, a sedimentação ocorrida. Torna-se importante salientar que o ensaio deve ser executado em duas provetas e utilizar-se a média dos resultados, sendo necessário garantir valores inferiores a 5% (Bernucci *et al.*, 2008). No que diz respeito ao ensaio de peneiramento este é executado através da passagem da emulsão betuminosa num peneiro de 0,841 mm, sendo determinado o peso das partículas de betume retidas no mesmo. A percentagem de material retido no peneiro deve ser inferior a 0,1%, sendo que um valor alto indica uma emulsão com partículas de betume de dimensão elevada e/ou onde já teve início o processo de coalescência (LAPAV, 2008).

### **3.1.2.7. Tipo de fases.**

No que diz respeito ao tipo de fases torna-se necessário salientar que existem duas fases, sendo elas a fase contínua e a fase dispersa. Cada uma destas pode corresponder à água ou ao betume, este facto permite que haja distinção quanto ao tipo de fases (Pereira, 2010), podendo estas serem diretas, inversas ou múltiplas (Costa, 2001; citado por Pereira, 2010) (ver Tabela 3).

Tabela 3 – Tipo de fases (Adaptado de Costa, 2001; citado por Pereira, 2010 e AkzoNobel, 2014)

Diretas (L/H)	Fase contínua é a água / fase dispersa é o betume	
Inversas (H/L)	Fase contínua é o betume / fase dispersa é a água	
Múltiplas (H/L/H)	Água dispersa em betume por sua vez disperso em água	

### 3.1.2.8. Adesividade.

A adesividade é uma característica fundamental das emulsões betuminosas, visto representar a capacidade do betume permanecer fixo nos agregados sem o risco de desprendimento por ação da água ou do tráfego. Existem dois tipos de adesividades (ver Figura 25) (ATEB, 2005):

- Ativa - representa a capacidade do betume cobrir a superfície dos agregados quando aplicada uma emulsão betuminosa.
- Passiva - representa a resistência do betume a ser desprendido da superfície dos agregados quando sujeitos a agentes externos.

A adesividade depende de inúmeros fatores, entre os quais o tipo e quantidade de emulsionante, o tipo de betume, o pH da solução emulsionante, o tamanho das partículas de betume e o tipo de agregado utilizado (Read & Whiteoak, 2003).

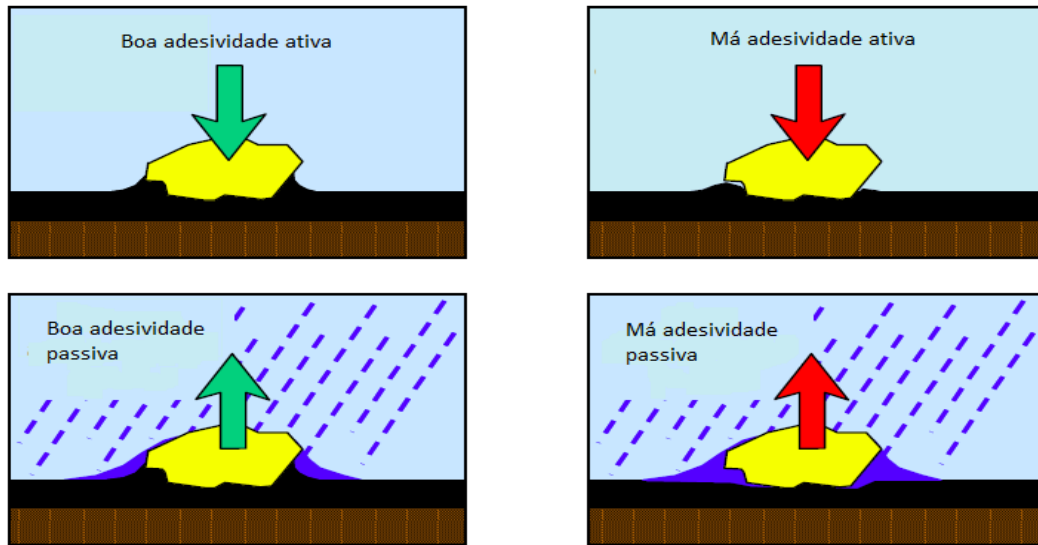


Figura 25- Exemplificação da Adesividade (Traduzido de ATEB, 2005)

### 3.1.2.9. Dimensão das partículas de betume.

A dimensão das partículas de betume, como já foi anteriormente especificado, é uma característica que tem influência direta noutras características (como a viscosidade, índice de rotura e estabilidade). Por esse motivo, é um fator ao qual se deverá dar especial atenção, este facto explica o cuidado das empresas ao englobarem, no controlo de qualidade, testes referentes à medição das partículas de betume (Redelius & Walter, 2005).

Estas partículas podem advir de formulações de emulsões betuminosas idênticas e ainda assim apresentarem diferentes propriedades, isto porque os principais fatores que influenciam as suas dimensões surgem durante o seu fabrico, bastando para tal que a produção tenha sido realizada em diferentes moinhos coloidais. Desta forma, os principais fatores que influenciam a dimensão das partículas de betume são (Redelius & Walter, 2005):

- Diferença de temperatura entre fase aquosa e o betume;
- Viscosidade do betume;
- Velocidade de rotação do moinho coloidal;
- Vazio entre o rotor e o estator no moinho coloidal.

### 3.2. Agregados

No que diz respeito aos agregados utilizados na elaboração do microaglomerado estes devem ser resultantes de rochas como granito, basalto ou outras que garantam uma boa qualidade do agregado (ISSA, 2010), no entanto existem diversas características do agregado que podem também influenciar a qualidade do microaglomerado, entre as quais (SCDT, 2003):

- Natureza – Influencia a coesão e adesividade e a compatibilidade do agregado com a emulsão.
- Forma - Devem apresentar faces fraturadas e devem ser evitadas formas redondas, pois reduzem o poder da mistura.
- Textura - Para facilitar a ligação agregado/emulsão deve apresentar uma textura rugosa.
- Idade e reatividade - Os agregados devem ter sido britados recentemente para manterem uma maior carga na superfície, o que favorece a reação entre os elementos.
- Limpeza - Agregados livres de impurezas apresentam uma melhor coesão.
- Solidez e resistência à abrasão- Característica que é muito importante em zonas que apresentem ciclos gelo-degelo ou se apresentem constantemente molhadas.

Em relação à granulometria adequada para o microaglomerado existem duas propostas, cuja distinção é efetuada com base na aplicação pretendida (ISSA, 2010). Estas granulometrias apresentam-se representadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Granulometria para microaglomerado (Traduzido e adaptado de ISSA, 2010)

Tamanho	Tipo 1	Tipo 2	Tolerância
3/8 (9,5 mm)	100	100	±5%
#4 (4,75 mm)	90-100	70-90	±5%
#8 (2,36 mm)	65-90	45-70	±5%
#16 (1,18 mm)	45-70	28-50	±5%
#30 (0,6 mm)	30-50	19-34	±5%
#50 (0,33 mm)	18-30	12-25	±4%
#100 (0,15 mm)	10-21	7-18	±3%
#200 (0,075 mm)	5-15	5-15	±2%

As duas granulometrias presentes na tabela anterior têm as seguintes aplicações (ISSA, 2010):

- Tipo 1- é mais adequada para preencher vazios no pavimento, para selar buracos e para fornecer uma superfície de desgaste mais duradoura.
- Tipo 2- permite a resistência máxima ao escorregamento e uma superfície de desgaste melhorada, apresentando como principais aplicações pavimentos com bastante circulação, enchimentos de rotina ou utilização em superfícies de elevada textura.

### 3.3. Outros constituintes

- *Filler* - É um elemento adicionado no microaglomerado em percentagens entre 0% e 3%, apresentando como principal objetivo ajustar as propriedades de cura e rotura da mistura. Para tal, podem ser utilizados materiais como cimento Portland, cal aérea, ou outro *filler* com os requerimentos necessários a um bom desempenho (ISSA, 2010).
- Aditivos - Podem ser considerados como aditivos todos os produtos aplicados ao microaglomerado com o objetivo de melhorar as suas características mecânicas e o seu comportamento em serviço, tanto no fabrico como na aplicação. Estes aditivos são normalmente usados com as seguintes finalidades: encurtar o tempo de cura, melhorar a coesão da mistura, aumentar a resistência mecânica a curto prazo, do microaglomerado, ou regular a rotura da emulsão (Carreteros, 2011).
- Água - É um componente que apresenta uma grande influência a nível da trabalhabilidade do microaglomerado, pois se este apresentar pouca água vai ser pouco fluido, sendo possível uma rotura prematura da emulsão; enquanto que se apresentar valores elevados de água pode ocorrer separação dos componentes (Gerardi & Soengas, 2012). É ainda importante salientar que a água deve apresentar-se livre de sais nocivos e contaminantes para garantir a qualidade deste elemento (ISSA, 2010).

### 3.4. Fabrico e Aplicação

O microaglomerado, como já foi anteriormente mencionado, resulta da mistura de emulsão betuminosa, agregados, *filler*, água e aditivos. Estes componentes são inseridos

numa máquina de aplicação de microaglomerado (Figura 26) que, utilizando as proporções desejadas de cada elemento, insere-as pela ordem adequada num misturador. Após a mistura dos diferentes elementos a grade de espalhamento aplica a mistura ao longo do pavimento (SCDT, 2003). No entanto, é necessário ter em conta três fatores que têm grande influência na aplicação do microaglomerado (ISSA, 2010a; citado por TRB, 2010):

- Aderência dos agregados à mistura - Apresenta-se como uma situação crítica pois os agregados produzidos por diferentes tipos de trituradora podem ser de formatos diferentes, assim como, misturas com a mesma granulometria podem apresentar distribuições diferentes do tamanho dos agregados.
- Peso dos agregados - Uma aplicação mais espessa com um determinado agregado pode ter um peso menor que uma aplicação mais fina com outro. Sendo assim, torna-se importante que a máquina de aplicação de microaglomerado seja calibrada consoante o tipo de agregado.
- Condição da superfície - Apresenta influência direta na taxa de aplicação do material. Uma superfície lisa permite manter uma taxa de aplicação constante enquanto uma superfície aberta irá necessitar, para além do revestimento da superfície, de tapar vazios, apresentando uma taxa de aplicação variável. É necessário também ter em consideração a variação de textura ao longo da mesma via, visto influenciar a taxa de aplicação.

Dessa forma, no que se refere ao último fator, antes da aplicação do microaglomerado torna-se necessário garantir que o pavimento está estruturalmente são e com a preparação adequada para receber o tratamento. Pelo que deve efetuar-se a limpeza e tratamento de fissuras ligeiras; enchimento de fissuras de maior dimensão e varrimento e limpeza do pavimento, de modo a eliminar contaminantes e sujidade (Broughton, Lee, & Kim, 2012).

Após a aplicação da mistura no pavimento deverá ocorrer a rotura da emulsão betuminosa por coalescência, ou seja, ocorrer a libertação da água e ligação do betume aos agregados, resultando no processo de cura da mistura. Esta sequência de acontecimentos permite a ligação da mistura ao pavimento existente (SCDT, 2003).

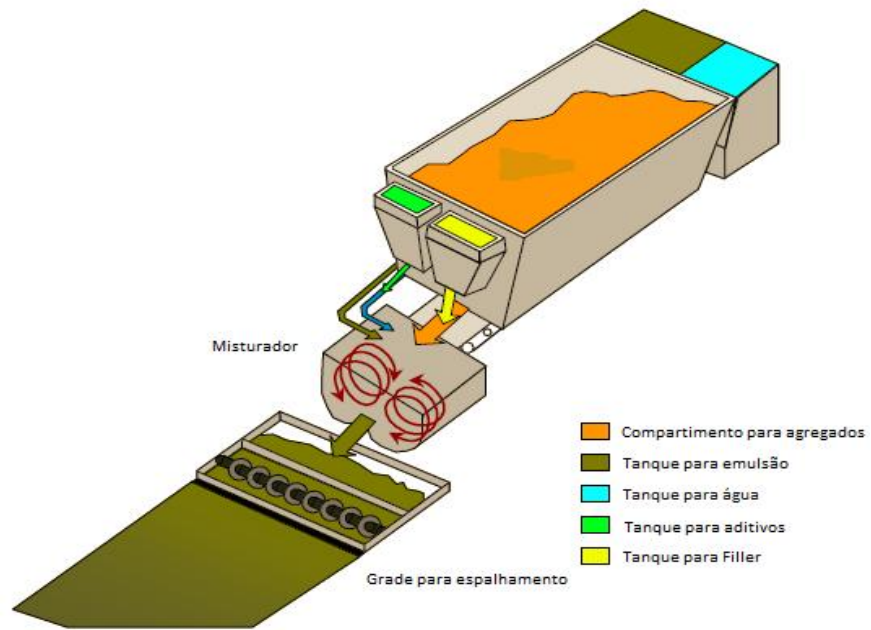


Figura 26- Aplicação de microaglomerado (Traduzido e adaptado de ATEB, n.d.)



#### 4. Manutenção Preventiva de Pavimentos

A manutenção preventiva de pavimentos é um plano estratégico de tratamentos, que apresentam custo-eficácia, elaborado para um sistema rodoviário com o intuito de preservar esse sistema e manter ou melhorar a sua condição funcional (sem aumentar de forma significativa a capacidade estrutural) (ASSHTO, 1997; citado por Geiger, 2005). Esta estratégia é a componente principal da manutenção de pavimentos, sendo as restantes componentes as pequenas reabilitações e as manutenções de rotina (Geiger, 2005). A manutenção de pavimentos é um método pelo qual as estradas são tratadas antes de ocorrer uma falha significativa e tem as vantagens de permitir a intervenção antes dos utilizadores protestarem e de economizar dinheiro ao longo da vida do pavimento (SCDT, 2003), no entanto, a sua função nunca poderá ser a de aumentar, diretamente, a sua capacidade estrutural (Geiger, 2005), sendo que não inclui novos pavimentos ou pavimentos que necessitem de grandes reabilitações ou reconstruções (Galehouse, Moulthrop, & Hicks, 2003).

Vantagens dos programas de manutenção preventiva de pavimentos (Jackson, 2001):

- Maior satisfação do cliente – Os condutores reconhecem que a conservação é importante para reforçar as condições de segurança, mobilidade e pavimentação. Para além disso o tempo despendido na manutenção e reabilitação é menor.
- Decisões melhor informadas – Este tipo de programas exigem disponibilidade e acesso a informação (combinando a história de desempenho, as condições atuais dos pavimentos e o desempenho esperado das diversas opções de tratamentos disponíveis), nesse sentido as construtoras são desafiadas a obter essa informação, o que traz benefícios a este tipo de programas, devido ao maior conhecimento inerente.
- Estratégias e técnicas melhoradas – Com o crescimento das necessidades e exigências, muitos materiais têm sido desenhados com vista a melhorar o seu desempenho e a indústria tem desenvolvido novos métodos e equipamentos de aplicação que melhoram os tratamentos, aumentando bastante a esperança de vida dos mesmos, o que leva à redução dos custos de manutenção.

- Melhoria das condições do pavimento – Os programas de manutenção preventiva de pavimentos bem sucedidos têm demonstrado, de forma bem documentada, prolongar o desempenho do ciclo dos pavimentos individuais e da sua rede.
- Redução de custos – Um dos benefícios mais significativos deste tipo de programas é o benefício financeiro. As comparações teóricas têm documentado uma poupança económica na aplicação dos programas de manutenção preventivos.
- Aumento da segurança – Estes programas providenciam benefícios de segurança visto disponibilizarem melhores superfícies, devido à melhor retenção dos agregados, o que se traduz em menos defeitos como rodeiras, desagregação superficial e buracos. Por sua vez, esta melhoria na textura das superfícies tem uma influência positiva no atrito (seco ou molhado); na projeção de água e no ruído da estrada. Por fim, a menor necessidade de interrupções para reparações faz com que haja menor exposição dos utilizadores e dos trabalhadores aos riscos inerentes às atividades de construção.

Apesar das vantagens referidas anteriormente, a implementação destes planos passa por algumas dificuldades. Por um lado os condutores e as instituições estão habituados a assistir à deterioração das estradas antes da sua reparação, sendo que os pavimentos em pior estado recebem geralmente mais atenção. Assim, uma das maiores preocupações é que seja aceite a orientação dos trabalhos para pavimentos que estão em condições relativamente boas (Jackson, 2001), sendo necessário que os engenheiros defendam os valores dos tratamentos preventivos (Galehouse *et al.*, 2003). Por outro lado, apesar da engenharia apoiar a mudança para os tratamentos preventivos de manutenção, houve sempre maior investimento na construção de novas estradas do que na manutenção das existentes, sendo que é necessário promover e reforçar o apoio por parte das entidades gestoras. Também por isso surge a necessidade de apostar na investigação, de forma a aumentar os dados reais que apoiem e promovam as vantagens deste tipo de tratamentos, e na formação, pois neste tipo de intervenções a familiarização com os mecanismos da aplicação não é suficiente, uma vez que os donos das obras e os empreiteiros devem saber selecionar os projetos e identificar os tratamentos apropriados bem como o tempo de aplicação desses tratamentos. Para além disso, é fundamental o acompanhamento do desempenho dos tratamentos de forma a delinear o que funciona e o que não funciona (Jackson, 2001) para evitar falhas, pois uma única falha num novo programa é suficiente para o descredibilizar (Galehouse *et al.*, 2003). A alteração na disponibilidade financeira

também é uma limitação pois poderá comprometer os resultados, visto que o atraso na aplicação cíclica dos tratamentos poderá arriscar a efetividade do programa, motivo este que também leva à eleição dos tratamentos direcionados para a reabilitação. É ainda importante que a equipa esteja toda de acordo com a alteração para este tipo de iniciativas, pois esta pode interpretar a mudança como uma crítica ao seu modo de trabalhar até então e, assim, colocar em risco todo o processo (Jackson, 2001). Por fim, há as questões relativas às pressões do mercado e às políticas, tendo em consideração as perdas de cotas e os efeitos de mercado (Galehouse *et al.*, 2003).

#### **4.1. Programa de Manutenção Preventiva de Pavimentos**

É possível concluir com alguma facilidade que a utilização frequente de tratamentos de manutenção preventiva permitiria a constante garantia de uma boa “performance”, com a máxima qualidade do pavimento, no entanto seria uma situação com fraco custo-eficácia. Em contra partida a fraca utilização destes tratamentos, apesar dos benefícios a nível de custo e da pouca necessidade de interrupção da via, levaria à violação das condições regulamentares mínimas da qualidade do pavimento, aumento de custos de operação e insatisfação dos utilizadores da via. Deste modo o programa de manutenção preventiva deverá encontrar o equilíbrio entre estes dois extremos, visando garantir a melhor performance com o mínimo custo e incómodo para o utilizador (Lamprey, Labi, & Li, 2008). Para tal, o programa deverá consistir no "tratamento certo; para a estrada certa; na altura certa", ou seja, o tratamento de manutenção preventiva deve retardar a deterioração do pavimento e repor a qualidade necessária da superfície do mesmo (tratamento certo); a porção do pavimento a tratar deve ser adequada e consistente ao financiamento existente, de forma a que o investimento não seja perdido (estrada certa) e deverá existir um sistema de gestão do pavimento que avalie a condição do pavimento e a sua taxa de deterioração, de modo a prever a melhor altura de aplicação do tratamento (hora certa) (ISSA, n.d.).

Dessa forma, o programa de manutenção preventiva de pavimentos estabelece os tratamentos preventivos a serem efetuados, bem como a altura em que devem ser executados e os custos associados, sendo importante para este fim o estudo de diferentes combinações de manutenções preventivas e tempos de intervenção para identificar o

melhor custo-eficácia (Lampthey *et al.*, 2008). Visto que, na atualidade a sua definição é feita com base no julgamento e experiência de engenheiros seniores ou então com base no historial prático de aplicações feitas anteriormente (FHWA, 1998).

#### 4.2. O Microaglomerado enquanto Tratamento de Manutenção Preventiva

As *guidelines* existentes para a escolha de um determinado tratamento baseiam-se normalmente numa combinação das condições do pavimento, no tempo adequado e no seu custo. Existem muitos tratamentos de manutenção preventiva disponíveis, sendo que segundo uma revisão de Cuelho, Mokwa e Akin (2006) os mais utilizados são: selagem de fissuras; camada fina de mistura betuminosa a quente; *chip sealing*; correção das condições de drenagem e microaglomerado. No entanto, o mesmo estudo conclui que não há um método padrão único que funcione para todas as situações de manutenção preventiva, devendo este ser adaptado a cada pavimento. Apesar do microaglomerado ter também desvantagens [como não ser adequado para deficiências estruturais do pavimento nem para fissuras severas (TRB, 2010); a seleção dos componentes ser exigente, de forma a poderem trabalhar em conjunto (Johnson, 2000; citado por Cuelho *et al.*, 2006); necessitar de equipamento específico e caro (Wade *et al.*, 2001; citado por Cuelho *et al.*, 2006) e o sucesso depender da experiência do empreiteiro, da adequação da mistura dos componentes (Kazmierowski *et al.*, 1993; citado por Cuelho *et al.*, 2006), bem como da aplicação (TRB, 2010)] no presente estudo optou-se pela sua utilização, enquanto tratamento de manutenção preventiva, visto este tratamento conseguir ser mais abrangente, adequando-se a inúmeras patologias (ver Tabela 5), e demonstrar bastantes vantagens.

Tabela 5 – Comparação das aplicações de vários tratamentos de manutenção preventiva (Hicks, Seeds, & Peshkin, 2000)

Patologias do pavimento	Microaglomerado	Selagem de fissuras	Fog Seal	Lama asfáltica	Cape Seal	Chip Seal	Camada fina de mistura betuminosa a quente
Rugosidade não relacionada com estabilidade	X				X		X
Rugosidade (estabilidade)							X

Rodeiras	X						X
Fissuras por fadiga (apenas para baixa severidade)	X		X	X	X	X	X
Fissuras longitudinais e transversais	X	X		X	X	X	X
Exsudação	X					X	
Desagregação superficial	X		X	X	X	X	

Para além do microaglomerado se demonstrar uma estratégia adequada para diversas patologias e como o tratamento preventivo mais abrangente no estudo de Hicks *et al.* (2000) este também demonstrou ser custo eficaz para fissuras, durante um ano, para fissuras resultantes de variações térmicas (Bae & Stoffels, 2007) e parece ser um tratamento adequado para lidar com a exsudação, desagregação superficial, oxidação e perda de atrito de superfície (TRB, 2010). Para além disso, atrasa a degradação do pavimento visto preencher vazios e fissuras no mesmo, prevenindo a entrada de água para as camadas subjacentes (Distin & Louw, 2002). Por fim, embora já referido na Tabela 5, diversos estudos destacam também a sua eficácia no tratamento de rodeiras (e.g. Labi, Hwee, Lapmtey, & Nunoo, 2006; Labi *et al.*, 2007; TRB, 2010).

Este tratamento apresenta vantagens na ótica do utilizador visto ter um menor nível de ruído do pneu na circulação (comparativamente com outros tipos de revestimento) (Ducasse, Distin, & Osborne, 2004); proporcionar excelente suavidade e bons níveis de atrito (Watson & Jared, 1998); e, uma vez que não necessita de montagem de estaleiro no local nem de uma camada de colagem, permite que a interrupção de tráfego seja mínima (Ducasse *et al.*, 2004). Este apresenta ainda melhor impacto ambiental, comparativamente com outros tratamentos de durabilidade parecida, visto ser aplicado a frio, pelo que não emite gases nocivos durante a sua aplicação (Broughton *et al.*, 2012), o que irá reduzir custos de forma direta e indireta (AppaRoa, Kumar, Amar, & Ryntathiang, 2013). Para além disso, a aplicação a frio torna-se mais segura para o trabalhador (Ducasse *et al.*, 2004). Este tratamento mostra-se efetivo para todos os níveis de tráfego e útil quer para áreas urbanas, quer para as rurais (TRB, 2010), bem como eficaz em todas as condições climáticas, embora com um melhor desempenho nos climas quentes (TRB, 2004). Para além da poupança económica indireta, derivada dos seus benefícios ambientais, o

microaglomerado é um tratamento de baixo custo que, se aplicado corretamente, é uma alternativa econômica à repavimentação convencional (Ji, Nantung, Tompkins, & Harris, 2013), sendo possível preservar mais Km's (ISSA, n.d.). No mesmo sentido, ao ser comparado com tecnologias de misturas a quente em camadas finas, demonstrou um melhor equilíbrio entre custo-eficácia e impacto ambiental (Takamura, Lok, & Wittlinger, 2001). Todos estes fatores levam a crer que o microaglomerado vai ao encontro dos desafios crescentes que a indústria dos pavimentos enfrentará nos próximos anos, como as regulamentações a nível ambiental e as restrições econômicas, sendo que apresenta um bom equilíbrio entre efetividade, custo, quantidade de patologias que pode tratar e potencial para desenvolvimento futuro de tratamentos de manutenção preventivos (Broughton *et al.*, 2012), aumentando a qualidade da estrada e tendo uma vida útil significativa (Labi *et al.*, 2006; Labi *et al.*, 2007).

## 5. Análise Comparativa

Foram consideradas para este estudo 3 tipos de estruturas iniciais de pavimento, dimensionadas para 10, 15 e 20 anos. Cada uma dessas estruturas será sujeita a 3 tipos de intervenções, que serão posteriormente comparadas:

- Reforço estrutural;
- Reconstrução;
- Tratamento de Manutenção Preventiva com recurso a Microaglomerado (TMPM).

Numa fase inicial, foi necessário estabelecer um horizonte que limite a duração pretendida para os pavimentos, de modo a tornar possível a sua comparação. Tendo em consideração a recomendação da FHWA (1996; citado por FHWA, 1998) o período de análise deverá ser no mínimo 35 anos, pelo que, considerando a duração das diferentes intervenções e o número de vezes que faz sentido a sua repetição contínua optou-se por aproximar o tempo de vida dos pavimentos aos 40 anos. Dessa forma, conseguiu-se ainda que o período de análise fosse suficientemente abrangente de modo a integrar, em quase todas as análises, pelo menos, um reforço ou reconstrução (FHWA, 1998). Importa acrescentar que se considerou coerente uma utilização contínua máxima de 4 TMPM's e de 2 reforços estruturais.

Seguidamente foi necessário definir o momento de intervenção adequado para cada uma das intervenções. No que se refere ao reforço estrutural, considerou-se, tendo por base o gráfico de Galehouse *et al.* (2003) (ver Figura 27), que a altura ideal para intervir seria quando o pavimento atinge 75% do seu tempo de vida, visto nessa altura deixar de garantir uma qualidade razoável de serviço. Quanto à reconstrução, sendo esta uma intervenção de último recurso, só foi efetuada quando terminou o tempo de vida definido para a estrutura do pavimento inicial. Por fim, no que se refere ao TMPM, sabe-se que este tipo de intervenção deve ser realizada quando o pavimento ainda se apresenta em boas condições (Ji *et al.*, 2013), o que, segundo o gráfico de Galehouse *et al.* (2003), se definiu como sendo aproximadamente 50% do tempo de vida do pavimento.

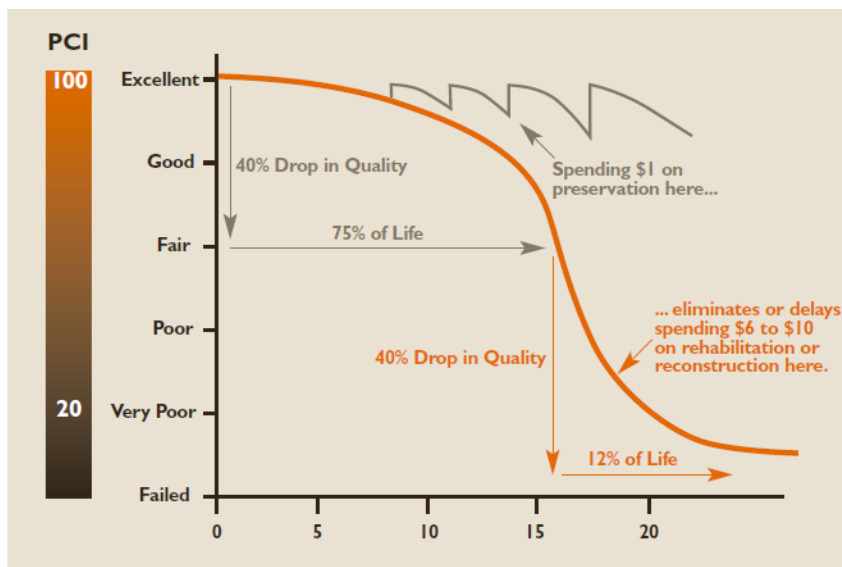


Figura 27 - Relação entre a condição do pavimento e o tempo de vida (Broughton *et al.*, 2012)

Para além disso, no que diz respeito ao prolongamento da vida de um pavimento com recurso a TMPM existe uma grande divergência de valores. Dessa forma, analisaram-se os tempos descritos em diversos estudos (ver Tabela 6) e optou-se pela utilização de um valor conservador, em detrimento da utilização de uma média, visto este aumentar a fidedignidade dos resultados da presente análise.

Tabela 6 - Tempos de vida de TMPM's

Referência	Comentário	Prolongamento da Vida do Pavimento	Tempo Considerado
Geoffroy, 1996; citado por Cuelho <i>et al.</i> , 2006	De acordo com NCHRP	4 a 6	5 Anos
	De acordo com FHWA	5 a 7	
Johnson, 2000; citado por Cuelho <i>et al.</i> , 2006	Grande volume de tráfego	7	
	Pequeno volume de tráfego	> 7	
Labi <i>et al.</i> , 2006; citado por Cuelho <i>et al.</i> , 2006	Baseado na rugosidade	5	
	Baseado na condição do pavimento	7	
	Baseado nas rodeiras	24	
Peshkin <i>et al.</i> , 2004; citado por Cuelho <i>et al.</i> , 2006	Revisão de literatura	4 a 7	
Smith & Beatty, 1999; citado por Cuelho <i>et al.</i> , 2006	Prolongamento de vida sugerido	7 a 10	
Wade <i>et al.</i> , 2001; citado por Cuelho <i>et al.</i> , 2006	Prolongamento de vida generalizado	4 a 7	



Hicks <i>et al.</i> , 2000	-	3 a 9	
TRB, 2004	-	4 a 7	
Giustozzi, Flintsch, & Crispino, n.d.	-	4 a 7	
Chan, Lane, & Kazmierowski, 2010	-	7 a 9	
Huang & Vukosavljevic, 2009	-	7 a 9	
Behbahani & Khajepour, 2014	-	7	

## 5.1. Dimensionamento

### 5.1.1. Estrutura Inicial do Pavimento.

De forma a ser possível comparar as diferentes intervenções efetuadas no pavimento, tendo por base a sua estrutura inicial, foi necessário o dimensionamento de pavimentos para diversos tempos de vida útil. Para esse dimensionamento optou-se pela utilização de uma estrutura tipo constituída por uma sub-base granular (SbG), camada de base com macadame betuminoso (MB), camada de regularização em macadame betuminoso (MB) e camada de desgaste com betão betuminoso (BB), considerando a vida útil de 10, 15 e 20 anos. O dimensionamento foi efetuado com recurso ao MACOPAV e ao método da Shell e as análises tensão-deformação com recurso ao programa de cálculo BISAR. Optou-se por não se descrever detalhadamente esses métodos visto não ser o foco do presente trabalho, no entanto, apresenta-se seguidamente uma tabela resumo (ver Tabela 7) com os valores utilizados e resultados do dimensionamento do pavimento bem como um esquema elucidativo da sua estrutura final (ver Figura 28). As respetivas tabelas de cálculo encontram-se no Anexo A.

Tabela 7 - Dados e resultados do dimensionamento

Dados Genéricos						
Temperatura de Serviço	Taxa de Crescimento	Pen 25	Tab	Classe de Tráfego	Velocidade	TMDA
27 °C (Viseu)	4%	43 (0,1 mm)	54 °C	T3	50km/h	600 veic.
Características das Camadas						
Camada	E (MPa)	v	n%	tb%	8a	8b (35/50)
Fundação(F3)	100	0,35	-	-	-	-
SbG	217	0,3	-	-	-	-
MB	4133	0,35	8	4,2	25,2	10,4
BB	4015	0,35	5	5,2	26	10,4

Verificações de Dano à Fadiga					
Tempo de Vida	Vb%	$\epsilon$	Nadmissível	Npassa	Dano
10 anos	8,5	0,000107	13973991	11830000	85%
15 anos	8,5	0,000096	24876093	19730000	79%
20 anos	8,5	0,000091	32874491	29300000	89%
Verificações de Dano à Deformação Permanente					
Tempo de Vida	Observações	$\epsilon$	Nadmissível	Npassa	Dano
10 anos	95%	0,000258	23619194	11830000	50%
15 anos	95%	0,000230	37840709	19730000	52%
20 anos	95%	0,000217	47429857	29300000	62%

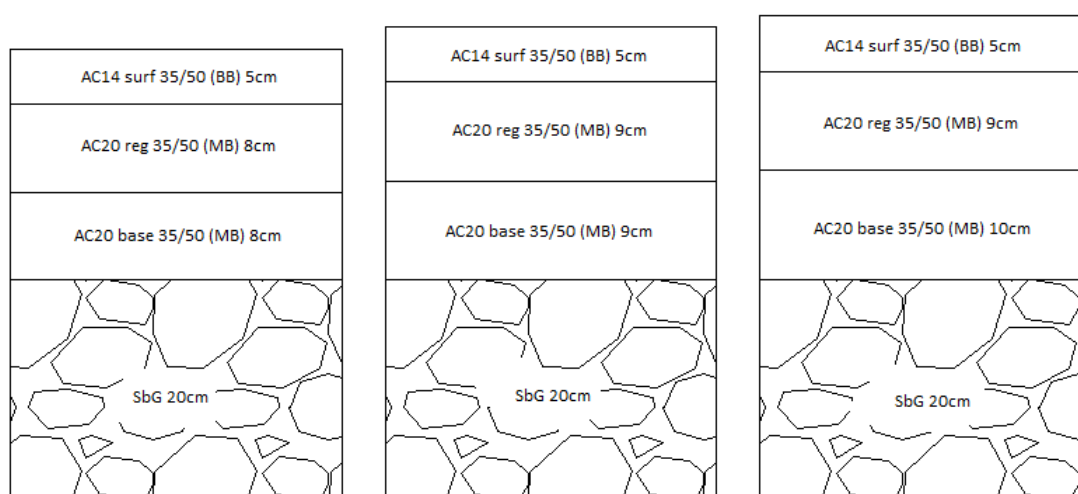


Figura 28 - Estruturas dos pavimentos iniciais

### 5.1.2. Reforço Estrutural.

Visto o estudo englobar a intervenção com recurso ao reforço estrutural de pavimentos torna-se necessário, para aumentar a sua fidedignidade, proceder ao dimensionamento do reforço a utilizar em cada intervenção. Não existindo dados reais que permitam determinar o estado do pavimento antes de se proceder ao seu reforço, tornou-se necessário fazer uma previsão teórica do estado do pavimento a fim de projetar as diferentes intervenções.

Considerou-se, como anteriormente foi especificado, que a altura ideal para realizar o reforço estrutural de um pavimento é aos 75% do seu tempo de vida. Pode então considerar-se que o pavimento existente ao fim de esse período deverá ter capacidade suficiente para resistir a cerca de 25% do N admissível calculado no dimensionamento inicial. Foi então necessário proceder-se a uma iteração onde, arbitrando valores do

módulo de deformabilidade das camadas betuminosas do pavimento (de forma proporcional) e com as extensões obtidas no BISAR para o mesmo, se visou obter aproximadamente esse valor. Todo este processo foi realizado com base na expressão do método da Shell para fadiga ou deformação permanente, consoante a que condicione mais o desempenho do pavimento. Tendo conhecimento dos módulos de deformabilidade das camadas betuminosas no momento da intervenção, determinou-se a camada de reforço necessária consoante a duração pretendida, através do método da Shell e do BISAR. Os valores utilizados e os resultados referentes a este processo encontram-se resumidos nas Tabelas 8, 9 e 10, referentes à estrutura do pavimento inicial para 10, 15 e 20 anos, respetivamente. Por fim, apresenta-se ainda um esquema elucidativo dos pavimentos após as intervenções e o seu tempo de vida inicial (para o qual foi dimensionado) e final (após as intervenções) (ver Figura 29). As respetivas tabelas de cálculo encontram-se no Anexo B.

Tabela 8 - Dados e resultados do dimensionamento do reforço estrutural (10anos)

<b>1º Reforço</b>					
<b>Dados Gerais da Intervenção</b>					
Altura de Intervenção	Nadmissível (7,5 anos)	Natingido (iteração)	E (MPa)	Prolongamento da Vida Pretendido	Reforço
7,5 anos	3492500	3480000	BB- 803	5 anos	5 cm de BB(E=4015)
			MB- 826,6		
			MB- 826,6		
<b>Verificação do Pavimento Reforçado ao Dano à Fadiga</b>					
VB	$\epsilon$	N <sub>passa</sub> (7,5-12,5)	Nadmissível	Dano	
8,5	0,0001752	7163280	21937641	33%	
<b>Verificação do Pavimento Reforçado ao Dano à Deformação Permanente</b>					
Observações	$\epsilon$	N <sub>passa</sub> (7,5-12,5)	Nadmissível	Dano	
95%	0,0003444	7163280	7461694	96%	
<b>2º Reforço</b>					
<b>Dados Gerais da Intervenção</b>					
Altura de Intervenção	Nadmissível (11,25 anos)	Natingido (iteração)	E (MPa)	Prolongamento da Vida Pretendido	Reforço
11,25 anos	1865000	1870000	1º Reforço BB- 2870,725	5 anos	4 cm de BB(E=4015)
			BB- 574,145		
			MB- 591,019		
			MB- 591,019		
<b>Verificação do Pavimento Reforçado ao Dano à Fadiga</b>					
VB	$\epsilon$	N <sub>passa</sub> (11,25-16,25)	Nadmissível	Dano	
8,5	0,0001541	8298225	80304541	14%	

Verificação do Pavimento Reforçado ao Dano à Deformação Permanente				
Observações	$\epsilon$	N <sub>passa</sub> (11,25-16,25)	Nadmissível	Dano
95%	0,0003081	8298225	11649928	79%

Tabela 9 - Dados e resultados do dimensionamento do reforço estrutural (15anos)

1º Reforço					
Dados Gerais Intervenção					
Altura de Intervenção	Nadmissível (11,25 anos)	Natingido (iteração)	E (MPa)	Prolongamento da Vida Pretendido	Reforço
11,25 anos	6220000	6260000	BB- 925,4575	5	5 cm (BB-E=4015)
			MB- 952,6565		
			MB- 952,6565		
Verificação do Pavimento Reforçado ao Dano à Fadiga					
VB	$\epsilon$	N <sub>passa</sub> (11,25-16,25)	Nadmissível	Dano	
8,5	0,0001533	8298225	33128058	25%	
Verificação do Pavimento Reforçado ao Dano à Deformação Permanente					
Observações	$\epsilon$	N <sub>passa</sub> (11,25-16,25)	Nadmissível	Dano	
95%	0,0003041	8298225	12275080	68%	
2º Reforço					
Dados Gerais Intervenção					
Altura de Intervenção	Nadmissível (15 anos)	Natingido (iteração)	E (MPa)	Prolongamento da Vida Pretendido	Reforço
15 anos	3070000	3120000	1º Reforço BB- 2870,725	5	3 cm (BB-E=4015)
			BB- 661,7039		
			MB- 681,1519		
			MB- 681,1519		
Verificação do Pavimento Reforçado ao Dano à Fadiga					
VB	$\epsilon$	N <sub>passa</sub> (15-20)	Nadmissível	Dano	
8,5	0,0001394	9613035	97462857	10%	
Verificação do Pavimento Reforçado ao Dano à Deformação Permanente					
Observações	$\epsilon$	N <sub>passa</sub> (15-20)	Nadmissível	Dano	
95%	0,0003061	9613035	11957398	80%	

Tabela 10 - Dados e resultados do dimensionamento do reforço estrutural (20anos)

1º Reforço					
Dados Gerais Intervenção					
Altura de Intervenção	Nadmissível (15 anos)	Natingido (iteração)	E (15 anos)	Prolongamento da Vida Pretendido	Reforço
15 anos	8217200	8230000	BB- 987,69	10 anos	6 cm (BB-E=4015)
			MB- 1016,718		
			MB- 1016,718		

Verificação do Pavimento Reforçado ao Dano à Fadiga					
VB	$\epsilon$	Npassa (15-25)	Nadmissível	Dano	
8,5	0,000135	21308796,9	55636832	38%	
Verificação do Pavimento Reforçado ao Dano à Deformação Permanente					
Observações	$\epsilon$	Npassa (15-25)	Nadmissível	Dano	
95%	0,0002586	21308796,9	23473397	91%	
2º Reforço					
Dados Gerais Intervenção					
Altura de Intervenção	Nadmissível (22,5 anos)	Natingido (iteração)	E (22,5 anos)	Prolongamento da Vida Pretendido	Reforço
22,5 anos	5867500	5880000	(1º Reforço) BB- 2870,725	10 anos	4 cm (BB-E=4015)
			BB- 706,198		
			MB- 726,955		
			MB- 726,955		
Verificação do Pavimento Reforçado ao Dano à Fadiga					
VB	$\epsilon$	Npassa (22,5-32,5)	Nadmissível	Dano	
8,5	0,0001243	28596285	162019936	18%	
Verificação do Pavimento Reforçado ao Dano à Deformação Permanente					
Observações	$\epsilon$	Npassa (22,5-32,5)	Nadmissível	Dano	
95%	0,0002421	28596285	30557010	94%	

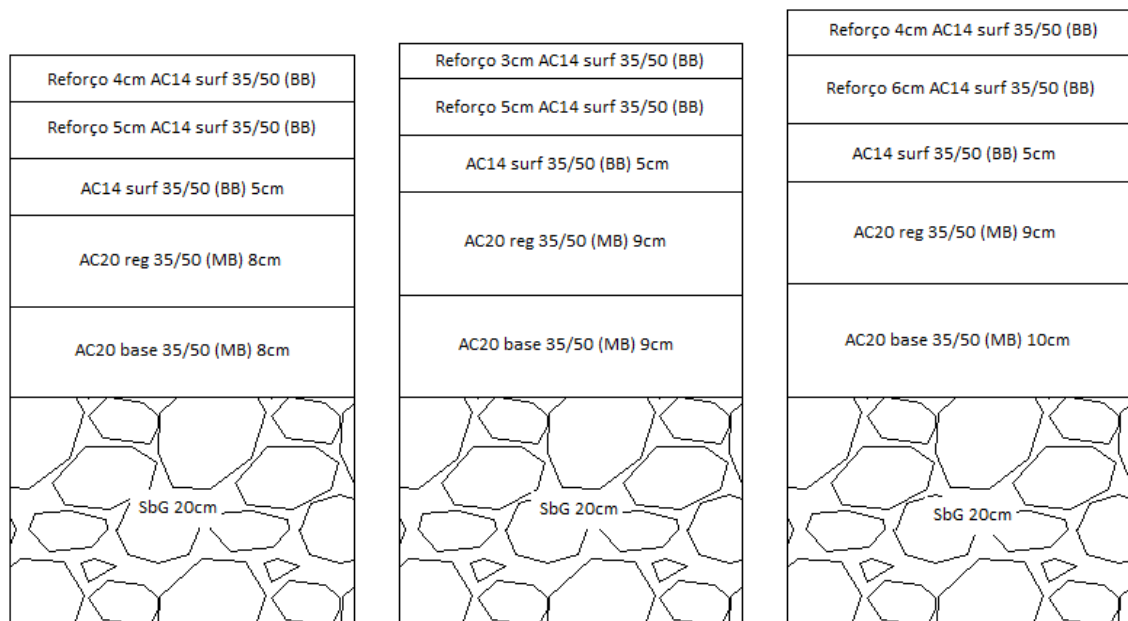


Figura 29 - Estruturas dos pavimentos com reforços estruturais

## 5.2. Programação das Diferentes Intervenções

Considerando as restrições anteriores, procedeu-se à programação das diferentes intervenções, que se irão explicitar tendo como ponto de partida as diferentes estruturas iniciais dos pavimentos, dimensionadas anteriormente no ponto 5.1.1; os reforços estruturais, descritos no ponto 5.1.2; e o tempo de prolongamento de vida de um TMPM, considerado como 5 anos. Para facilitar a perceção das diferentes análises, as estruturas iniciais do pavimento serão referidas como: 1, para 10 anos; 2, para 15 anos e 3, para 20 anos. Sendo os diferentes planos de intervenção posteriormente designados alfabeticamente. O A corresponde à utilização de reforço estrutural conciliado com reconstrução; o B apenas recorre a reconstruções; o C utiliza o maior número possível de TMPM's e quando necessário concilia-os com reconstruções; e o D utiliza uma mistura de diferentes intervenções (ver Figura 30).

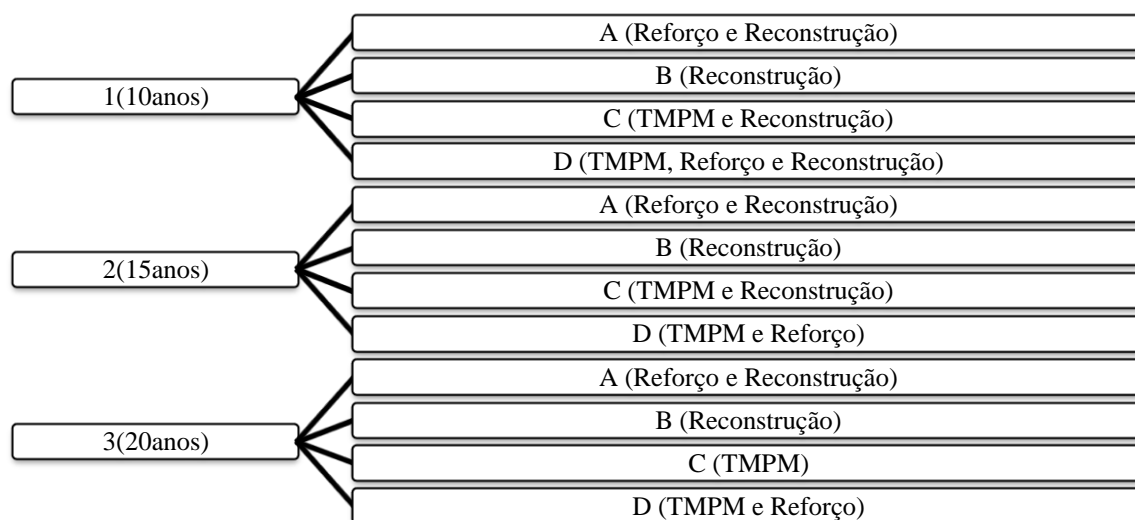


Figura 30 - Resumo esquemático das situações

Importa ainda explicitar que se optou por dividir o tempo de vida do pavimento em duas medidas distintas, a duração esperada de vida e a duração efetiva de vida. A primeira refere-se à duração para a qual cada atividade foi dimensionada ou programada e a segunda refere-se à duração que essas atividades irão acrescentar efetivamente ao tempo de vida do pavimento. Foi necessário estabelecer essa distinção devido às diferentes atividades nem sempre serem aplicadas no final do tempo previsto para a atividade anterior. O que se deve

ao facto de no caso do reforço a intervenção ser realizada aos 75% do tempo de vida do pavimento, conforme explicitado anteriormente, sendo a qualidade do pavimento ainda existente incluída no seu dimensionamento.

- **Situação 1 – Estrutura inicial do pavimento para 10 anos**

- Situação 1.A. – Ao pavimento inicial foram acrescentados 4 reforços estruturais, dimensionados para 5 anos, e 2 reconstruções, dimensionadas para 10 anos, pela ordem apresentada na Tabela 11, obtendo-se a duração efetiva de vida total de 42,5 anos.

Tabela 11 - Programação da situação 1.A.

Atividade	Momento de Intervenção (anos)	Duração Esperada de Vida (anos)	Duração Efetiva de Vida (anos)
Pavimento Inicial	0	10	7,5
1º Reforço Estrutural	7,5	5	3,75
2º Reforço Estrutural	11,25	5	5
1ª Reconstrução	16,25	10	7,5
3º Reforço Estrutural	23,75	5	3,75
4º Reforço Estrutural	27,5	5	5
2ª Reconstrução	32,5	10	10
Total			42,5

- Situação 1.B. - Para além do pavimento inicial, foram executadas 3 reconstruções, dimensionadas para 10 anos, conforme é apresentado na Tabela 12, obtendo-se a duração efetiva de vida total de 40 anos.

Tabela 12 - Programação da situação 1.B.

Atividade	Momento da Intervenção (anos)	Duração Esperada de Vida (anos)	Duração Efetiva de Vida (anos)
Pavimento Inicial	0	10	10
1ª Reconstrução	10	10	10
2ª Reconstrução	20	10	10
3ª Reconstrução	30	10	10
Total			40

- Situação 1.C. - Ao pavimento inicial foram aplicados 4 TTPM's e foi executada uma reconstrução, dimensionada para 10 anos, conforme é apresentado na Tabela 13, obtendo-se a duração efetiva de vida total de 40 anos.

Tabela 13 - Programação da situação 1.C.

Atividade	Momento da Intervenção (anos)	Duração Esperada de Vida (anos)	Duração Efetiva de Vida (anos)
Pavimento Inicial	0	10	10
1º TTPM	5	5	5
2º TTPM	10	5	5
3º TTPM	15	5	5
4º TTPM	20	5	5
Reconstrução	30	10	10
Total			40

- Situação 1.D. - Ao pavimento inicial foram acrescentados 2 reforços estruturais, dimensionados para 5 anos; 4 TTPM's e foi executada 1 reconstrução, dimensionada para 10 anos, pela ordem apresentada na Tabela 14, obtendo-se a duração efetiva de vida total de 40 anos.

Tabela 14 - Programação da situação 1.D.

Atividade	Momento da Intervenção (anos)	Duração Esperada de Vida (anos)	Duração Efetiva de Vida (anos)
Pavimento Inicial	0	10	7,5
1º Reforço Estrutural	7,5	5	5
1º TTPM	10	5	5
2º TTPM	15	5	5
Reconstrução	22,5	10	7,5
2º Reforço Estrutural	30	5	5
3º TTPM	32,5	5	5
Total			40



- **Situação 2 - Estrutura inicial do pavimento para 15 anos**

- Situação 2.A. - Ao pavimento inicial foram acrescentados 4 reforços estruturais, dimensionados para 5 anos e 1 reconstrução, dimensionada para 15 anos, pela ordem apresentada na Tabela 15, obtendo-se a duração efetiva de vida total de 40 anos.

Tabela 15 - Programação da situação 2.A.

Atividade	Momento da Intervenção (anos)	Duração Esperada de Vida (anos)	Duração Efetiva de Vida (anos)
Pavimento Inicial	0	15	11,25
1º Reforço Estrutural	11,25	5	3,75
2º Reforço Estrutural	15	5	5
Reconstrução	20	15	11,25
3º Reforço Estrutural	31,25	5	3,75
4º Reforço Estrutural	35	5	5
Total			40

- Situação 2.B. - Para além do pavimento inicial, foram executadas 2 reconstruções, dimensionadas para 15 anos e 10 anos, respetivamente, conforme é apresentado na Tabela 16, obtendo-se a duração efetiva de vida total de 40 anos.

Tabela 16 - Programação da situação 2.B.

Atividade	Momento da Intervenção (anos)	Duração Esperada de Vida (anos)	Duração Efetiva de Vida (anos)
Pavimento Inicial	0	15	15
1ª Reconstrução	15	15	15
2ª Reconstrução	30	10	10
Total			40

- Situação 2.C. - Ao pavimento inicial foram aplicados 3 TMPM's e foi executada uma reconstrução, dimensionada para 10 anos, conforme é apresentado na Tabela 17, obtendo-se a duração efetiva de vida total de 40 anos.

Tabela 17 - Programação da situação 2.C.

Atividade	Momento da Intervenção (anos)	Duração Esperada de Vida (anos)	Duração Efetiva de Vida (anos)
Pavimento Inicial	0	15	15
1º TTPM	7,5	5	5
2º TTPM	12,5	5	5
3º TTPM	17,5	5	5
Reconstrução	30	10	10
Total			40

- Situação 2.D. - Ao pavimento inicial foram acrescentados 2 reforços estruturais, dimensionados para 5 anos e 4 TTPM's, conforme apresentado na Tabela 18, obtendo-se a duração efetiva de vida total de 40 anos.

Tabela 18 - Programação da situação 2.D.

Atividade	Momento da Intervenção (anos)	Duração Esperada de Vida (anos)	Duração Efetiva de Vida (anos)
Pavimento Inicial	0	15	11,25
1º Reforço Estrutural	11,25	5	3,75
2º Reforço Estrutural	15	5	5
1º TTPM	17,5	5	5
2º TTPM	22,5	5	5
3º TTPM	27,5	5	5
4º TTPM	32,5	5	5
Total			40

- **Situação 3 - Estrutura inicial do pavimento para 20 anos**

- Situação 3.A. - Ao pavimento inicial foram acrescentados 2 reforços estruturais, dimensionados para 10 anos e 1 reconstrução, dimensionada para 10 anos, pela ordem apresentada na Tabela 19, obtendo-se a duração efetiva de vida total de 42,5 anos.

Tabela 19 - Programação da situação 3.A.

Atividade	Momento da Intervenção (anos)	Duração Esperada de Vida (anos)	Duração Efetiva de Vida (anos)
Pavimento Inicial	0	20	15
1º Reforço Estrutural	15	10	7,5
2º Reforço Estrutural	22,5	10	10
Reconstrução	32,5	10	10
Total			42,5

- Situação 3.B. - Para além do pavimento inicial, foi executada 1 reconstrução, dimensionada para 20 anos, conforme é apresentado na Tabela 20, obtendo-se a duração efetiva de vida total de 40 anos.

Tabela 20 - Programação da situação 3.B.

Atividade	Momento da Intervenção (anos)	Duração Esperada de Vida (anos)	Duração Efetiva de Vida (anos)
Pavimento Inicial	0	20	20
Reconstrução	20	20	20
Total			40

- Situação 3.C. - Ao pavimento inicial foram aplicados 4 TPMP's, conforme é apresentado na Tabela 21, obtendo-se a duração efetiva de vida total de 40 anos.

Tabela 21 - Programação da situação 3.C.

Atividade	Momento da Intervenção (anos)	Duração Esperada de Vida (anos)	Duração Efetiva de Vida (anos)
Pavimento Inicial	0	20	20
1° TPMP	10	5	5
2° TPMP	15	5	5
3° TPMP	20	5	5
4° TPMP	25	5	5
Total			40

- Situação 3.D. - Ao pavimento inicial foram acrescentados 2 reforços estruturais, dimensionados para 10 anos e 2 TPMP's, conforme apresentado na Tabela 22, obtendo-se a duração efetiva de vida total de 42,5 anos.

Tabela 22 - Programação da situação 3.D.

Atividade	Momento da Intervenção (anos)	Duração Esperada de Vida (anos)	Duração Efetiva de Vida (anos)
Pavimento Inicial	0	20	15
1° Reforço Estrutural	15	10	7,5
2° Reforço Estrutural	22,5	10	10
1° TPMP	27,5	5	5
2° TPMP	32,5	5	5
Total			42,5

### 5.3. Análise Económica

As infraestruturas de transporte são, frequentemente, em muitos países o setor público de maior investimento. A quantidade e a qualidade de infraestruturas de transporte influencia a vitalidade económica e a competitividade global de uma região ou país, visto aumentarem a mobilidade e acessibilidade para pessoas, bens e serviços, bem como desempenharem um papel importante no processo de produção económica.

O crescimento contínuo do comércio e da necessidade de transporte pessoal faz com que as agências de transporte e os seus fornecedores devam manter as vias de transporte em condições aceitáveis, bem como oferecer níveis de serviço desejáveis da forma mais custo-eficaz possível e com os recursos disponíveis. Dessa forma é necessário, entre outros fatores, que haja melhores práticas de avaliação e monitorização do impacto esperado das decisões de investimento alternativas. Para tal, deve-se ter em consideração os aspetos de eficiência económica, o desenvolvimento económico, o impacto ambiental ou ecológico (explicitado seguidamente) e o impacto técnico. O desenvolvimento económico, que engloba empregabilidade, número de estabelecimentos de negócio, produto interno bruto, economia regional e transações internacionais, é um importante fator de impacto, no entanto, na presente análise económica apenas se terá em consideração os fatores de eficiência económica, tais como, os custos iniciais, custos do ciclo de vida e seus benefícios e o rácio entre custo-benefício, tendo este impacto a curto, médio e longo prazo nos utilizadores e nas agências de transporte (Sinha & Labi, 2007).

Existem diferentes métodos para realizar uma análise de custo-benefício, sendo os mais comuns a análise de custo do ciclo de vida; o custo anual equivalente; análise custo-eficácia e o índice de custo de longevidade. A análise de custo do ciclo de vida envolve fatores como as taxas de juros, inflação, período de análise, custo unitário da intervenção/tratamento e a sua vida útil estimada. No que se refere ao custo anual equivalente, este apenas tem em conta o custo unitário da intervenção/tratamento e o tempo de vida estimado. Já a análise custo-eficácia baseia-se na curva de performance do pavimento, sendo a área abaixo da mesma equivalente à eficácia. Por fim, o índice de custo de longevidade considera também o custo unitário da intervenção/tratamento, o valor presente do custo unitário ao longo da vida da intervenção/tratamento, a carga exercida pelo tráfego e o tempo de vida da intervenção/tratamento (NAPA, 1990; citado por Morian, 2011).

Considerando não ser possível obter todos os dados necessários à aplicação dos últimos dois métodos mencionados, optou-se pela utilização do método de análise de custo do ciclo de vida, visto este ser mais abrangente que o custo anual equivalente. Através deste método obtém-se o Valor Presente Líquido (VPL) e o Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE) (FHWA, 1998):

O VPL pretende transformar ganhos e perdas, ocorridos em diferentes alturas, numa unidade comum de medida, através da fórmula apresentada seguidamente (ver Equação 1). Salientando-se que o  $n$  corresponde ao ano da intervenção e o  $i$  à taxa de atualização (FHWA, 1998), que se refere à capacidade de rentabilizar o dinheiro e à inflação (Jawad & Ozbay, 2006). A FHWA (1998) recomenda que esse valor se situe entre 3% e 5%, pelo que se optou pelo valor mais conservador, ou seja, 3 %.

$$VPL = CustoSinal + \sum_{k=1}^N CustoSinal/Tratamento_k \left[ \frac{1}{(1+i)^{n_k}} \right] \quad (1)$$

O CAUE (ver Equação 2) representa o VPL de todos os custos e benefícios como ocorrendo de modo uniforme ao longo do período de análise (FHWA, 1998), ou seja, os custos são convertidos num custo uniforme anual ao longo do período de análise (Morian, 2011). Importa ainda referir que o  $nf$  corresponde ao tempo total de vida (horizonte).

$$CAUE = VPL \left[ \frac{i(1+i)^{nf}}{(1+i)^{nf} - 1} \right] \quad (2)$$

### 5.3.1. Descrição dos custos.

O primeiro aspeto a ter em consideração é a descrição dos custos considerados para a estrutura inicial do pavimento e as suas intervenções, visto as comparações finais serem realizadas com base nesses valores. Seguidamente, apresentam-se esses custos; a justificação dos mesmos; e as respetivas conversões das unidades, de forma a garantir a uniformidade dos dados. É importante referir que se teve o cuidado de garantir que os valores utilizados se adequavam aos valores praticados atualmente em Portugal, mesmo quando a referência utilizada era de outro país.

Na Tabela 23, apresentam-se os custos relativos às atividades necessárias à execução das camadas betuminosas (Simões, 2008) e o seu custo final em € por tonelada

(€/ton). Esse custo foi utilizado posteriormente na Tabela 24 para calcular o custo total, em € por m<sup>2</sup> (€/m<sup>2</sup>), de cada estrutura de pavimento inicial de 10, 15 e 20 anos. Para tal, utilizaram-se também as espessuras, dimensionadas previamente, e a massa volúmica dos materiais sendo este um valor corrente de referência com base em estudos realizados em Portugal.

Tabela 23 - Custos considerados relativos à execução das misturas betuminosas

Atividade	Macadame Betuminoso	Betão Betuminoso
Produção (€/ton)	4,51	4,51
Materiais (€/ton)	22,30	25,80
Transporte (€/ton)	1,01	1,01
Espalhamento (€/ton)	2,78	2,78
Total (€/ton)	30,60	34,10

Tabela 24 - Custo total de cada estrutura inicial dos pavimentos (10,15 e 20 anos)

Estrutura do pavimento Inicial						
Tempo de Vida (anos)	Camadas e Procedimentos	Espessura (m)	Densidade (ton/m3)	Custo (€/ton)	Custo (€/m2)	Custo Total (€/m2)
10	Macadame Betuminoso	0,16	2,3	30,6	11,26	15,18
	Betão Betuminoso	0,05	2,3	34,1	3,92	
15	Macadame Betuminoso	0,18	2,3	30,6	12,67	16,59
	Betão Betuminoso	0,05	2,3	34,1	3,92	
20	Macadame Betuminoso	0,19	2,3	30,6	13,37	17,29
	Betão Betuminoso	0,05	2,3	34,1	3,92	

O procedimento referido anteriormente foi repetido para obter o custo em €/m<sup>2</sup> de cada reforço estrutural (ver Tabela 25), sendo que as espessuras utilizadas para este caso corresponderam aos dimensionamentos de reforços previamente efetuados. Importa ainda salientar que, neste caso, foi acrescido o custo da rega de colagem, retirado de Fonseca (2013).

Tabela 25 - Custo de cada reforço estrutural (10,15 e 20 anos)

Reforços - Custo					
Tempo de Vida (anos)	Camadas e Procedimentos	Espessura (m)	Massa Volúmica (ton/m3)	Custo (€/ton)	Custo (€/m2)
10	Betão Betuminoso (1º Reforço)	0,05	2,3	34,1	3,92
	Betão Betuminoso (2º Reforço)	0,04	2,3	34,1	3,14
	Rega de Colagem	n.a.	n.a.	n.a.	0,26
15	Betão Betuminoso (1º Reforço)	0,05	2,3	34,1	3,92
	Betão Betuminoso (2º Reforço)	0,03	2,3	34,1	2,35
	Rega de Colagem	n.a.	n.a.	n.a.	0,26
20	Betão Betuminoso (1º Reforço)	0,06	2,3	34,1	4,71
	Betão Betuminoso (2º Reforço)	0,04	2,3	34,1	3,14
	Rega de Colagem	n.a.	n.a.	n.a.	0,26

A Tabela 26 apresenta os custos relativos à reconstrução dos pavimentos, tendo em conta a remoção do pavimento já existente, que considerou os valores normalmente praticados em Portugal, e a nova execução das camadas betuminosas, de acordo com a Tabela 24.

Tabela 26 - Custo de cada reconstrução (10, 15 e 20 anos)

Reconstrução - Custo						
Tempo de Vida (anos)	Camadas e Procedimentos	Espessura (m)	Massa Volúmica (ton/m3)	Custo (€/ton)	Custo (€/m2)	Custo Total (€/m2)
10	Macadame Betuminoso	0,16	2,3	30,6	11,26	20,18
	Betão Betuminoso	0,05	2,3	34,1	3,92	
	Remoção de Pavimento Anterior	n.a.	n.a.	-	5	
15	Macadame Betuminoso	0,18	2,3	30,6	12,67	21,59
	Betão Betuminoso	0,05	2,3	34,1	3,92	
	Remoção de Pavimento Anterior	n.a.	n.a.	-	5	
20	Macadame Betuminoso	0,19	2,3	30,6	13,37	22,29
	Betão Betuminoso	0,05	2,3	34,1	3,92	
	Remoção de Pavimento Anterior	n.a.	n.a.	-	5	

Para estabelecer o custo adequado do tratamento com microaglomerado por m<sup>2</sup> procedeu-se à análise de diversos estudos que analisam esse custo, no entanto, a maioria dessas análises apresentou os seus resultados considerando o custo associado ao tratamento de uma faixa com 12 pés de largura e uma milha de comprimento. Dessa forma, para uniformizar esses dados procedeu-se à sua conversão para m<sup>2</sup>. Posteriormente, estes valores foram ainda convertidos para euros (€), visto serem referentes a estudos onde a moeda utilizada é o dólar (\$). O custo final (ver Tabela 27) foi ligeiramente inferior à média dos custos para se aproximar mais do valor de referência para Portugal (informação particular EP, 2014).

Tabela 27 - Custos do TMPM

Referência	\$/Milha (3,7m-largura)	\$/m <sup>2</sup>	€/m <sup>2</sup>	Média dos custos	Custo Final
Bolander, 2005; citado por Cuelho <i>et al.</i> , 2006	6700 a 13100	1,13 a 2,2	0,89 a 1,74	1,65€/m <sup>2</sup>	1,3 €/m <sup>2</sup>
Geoffroy, 1996; citado por Cuelho <i>et al.</i> , 2006	1000 a 1500	0,17 a 0,25	0,13 a 0,2		
	5000 a 7000	0,84 a 1,18	0,66 a 0,93		
	7000 a 10000	1,18 a 1,68	0,93 a 1,33		
	10000 a 15000	1,68 a 2,52	1,33 a 1,99		
	15000 a 25000	2,52 a 4,2	1,99 a 3,32		
Jahren & Bergeson, 1999; citado por Cuelho <i>et al.</i> , 2006	9100	1,53	1,21		
	10400	1,75	1,38		
Johnson, 2000; citado por Cuelho <i>et al.</i> , 2006	10600 a 14100	1,78 a 2,37	1,41 a 1,87		
Labi <i>et al.</i> , 2006; citado por Cuelho <i>et al.</i> , 2006	21600	3,63	2,86		
	26800	4,5	3,55		
Temple <i>et al.</i> , 2002; citado por Cuelho <i>et al.</i> , 2006	12000 a 34100	2,02 a 5,73	1,59 a 4,52		
	20600	3,46	2,73		
Wade <i>et al.</i> , 2001; citado por Cuelho <i>et al.</i> , 2006	8800	1,48	1,17		
	8800 a 14100	1,48 a 2,37	1,17 a 1,87		
	6000 a 14200	1,01 a 2,38	0,8 a 1,88		
Hicks <i>et al.</i> , 2000	-	1,5	1,18		
Huang & Vukosavljevic, 2009	-	1,05 a 2	0,83 a 1,58		
Chan <i>et al.</i> , 2010	-	1,05 a 2	0,83 a 1,58		
Behbahani & Khajepour, 2014	-	1,7	1,34		

Tendo por base os custos já referidos neste capítulo efetuou-se o levantamento dos custos de cada situação em análise no presente estudo, já especificadas no ponto 5.3. Para tal foram verificados os custos individuais de cada atividade em €/m<sup>2</sup> bem como o seu



custo total e, para facilitar a visualização e interpretação desses valores, efetuou-se a determinação dos custos relativos a uma via com 1 Km de extensão e 3,7m de largura. Para além disso, apresentam-se ainda os custos segundo o VPL e CAUE, cuja fórmula de cálculo se encontra descrita no ponto 5.4. Os dados referentes às diferentes situações encontram-se seguidamente na Tabela 28, 29 e 30, consoante se refiram à estrutura de pavimento inicial para 10, 15 e 20 anos, respetivamente.

Tabela 28 - Custos das situações 1

Situação	Atividade	Custo (€/m <sup>2</sup> )	Custo (€/km) Via 3,7m largura	VPL (€/km) Via 3,7m largura	CAUE (€/ano) por km de via com 3,7m largura
1.A.	Pavimento Inicial	15,18	56166,00	56166,00	2355,69
	1º Reforço Estrutural	4,18	15466,00	12390,78	519,69
	2º Reforço Estrutural	3,40	12580,00	9021,15	378,36
	1ª Reconstrução	20,18	74666,00	46186,81	1937,15
	3º Reforço Estrutural	4,18	15466,00	7664,68	321,47
	4º Reforço Estrutural	3,40	12580,00	5580,29	234,05
	2ª Reconstrução	20,18	74666,00	28570,19	1198,28
	Total	70,70	261590,00	165579,90	6944,69
1.B.	Pavimento Inicial	15,18	56166,00	56166,00	2429,87
	1ª Reconstrução	20,18	74666,00	55558,52	2403,59
	2ª Reconstrução	20,18	74666,00	41340,75	1788,50
	3ª Reconstrução	20,18	74666,00	30761,40	1330,81
	Total	75,72	280164,00	183826,67	7952,78
1.C.	Pavimento Inicial	15,18	56166,00	56166,00	2429,87
	1º TMPM	1,30	4810,00	4149,15	179,50
	2º TMPM	1,30	4810,00	3579,09	154,84
	3º TMPM	1,30	4810,00	3087,36	133,57
	4º TMPM	1,30	4810,00	2663,18	115,22
	Reconstrução	20,18	74666,00	30761,40	1330,81
	Total	40,56	150072,00	100406,18	4343,81
1.D.	Pavimento Inicial	15,18	56166,00	56166,00	2429,87
	1º Reforço Estrutural	4,18	15466,00	12390,78	536,05
	1º TMPM	1,30	4810,00	3579,09	154,84
	2º TMPM	1,30	4810,00	3087,36	133,57
	Reconstrução	20,18	74666,00	38395,94	1661,10
	2º Reforço Estrutural	4,18	15466,00	6371,79	275,66
	3º TMPM	1,30	4810,00	1840,50	79,62
Total	47,62	176194,00	121831,46	5270,72	

Tabela 29 - Custos das situações 2

Situação	Atividade	Custo (€/m <sup>2</sup> )	Custo (€/km) Via 3,7m largura	VPL (€/km) Via 3,7m largura	CAUE (€/ano) por km de via com 3,7m largura
2.A.	Pavimento Inicial	16,59	61383,00	61383,00	2655,57
	1º Reforço Estrutural	4,18	15466,00	11090,71	479,81
	2º Reforço Estrutural	2,61	9657,00	6198,46	268,16
	Reconstrução	21,59	79883,00	44229,28	1913,46
	3º Reforço Estrutural	4,18	15466,00	6140,66	265,66
	4º Reforço Estrutural	2,61	9657,00	3431,94	148,47
	Total	51,76	191512,00	132474,04	5731,14
2.B.	Pavimento Inicial	16,59	61383,00	61383,00	2655,57
	1ª Reconstrução	21,59	79883,00	51273,86	2218,23
	2ª Reconstrução	20,18	74666,00	30761,40	1330,81
	Total	58,36	215932,00	143418,26	6204,62
2.C.	Pavimento Inicial	16,59	61383,00	61383,00	2655,57
	1º TTPM	1,30	4810,00	3853,59	166,72
	2º TTPM	1,30	4810,00	3324,14	143,81
	3º TTPM	1,30	4810,00	2867,44	124,05
	Reconstrução	20,18	74666,00	30761,40	1330,81
	Total	40,67	150479,00	102189,58	4420,96
2.D.	Pavimento Inicial	16,59	61383,00	61383,00	2655,57
	1º Reforço Estrutural	4,18	15466,00	11090,71	479,81
	2º Reforço Estrutural	2,61	9657,00	6198,46	268,16
	1º TTPM	1,30	4810,00	2867,44	124,05
	2º TTPM	1,30	4810,00	2473,47	107,01
	3º TTPM	1,30	4810,00	2133,64	92,31
	4º TTPM	1,30	4810,00	1840,50	79,62
	Total	28,58	105746,00	87987,22	3806,54

Tabela 30 - Custos das situações 3

Situação	Atividade	Custo (€/m <sup>2</sup> )	Custo (€/km) Via 3,7m largura	VPL (€/km) Via 3,7m largura	CAUE (€/ano) por km de via com 3,7m largura
3.A.	Pavimento Inicial	17,29	63973,00	63973,00	2683,13
	1º Reforço Estrutural	4,97	18389,00	11803,20	495,05
	2º Reforço Estrutural	3,40	12580,00	6469,09	271,32
	Reconstrução	20,18	74666,00	28570,19	1198,28
	Total	45,84	169608,00	110815,47	4647,78
3.B.	Pavimento Inicial	17,29	63973,00	63973,00	2767,62
	Reconstrução	22,29	82473,00	45663,30	1975,50
	Total	39,58	146446,00	109636,30	4743,13
3.C.	Pavimento Inicial	17,29	63973,00	63973,00	2767,62
	1º TPM	1,30	4810,00	3579,09	154,84
	2º TPM	1,30	4810,00	3087,36	133,57
	3º TPM	1,30	4810,00	2663,18	115,22
	4º TPM	1,30	4810,00	2297,28	99,39
	Total	22,49	83213,00	75599,91	3270,63
3.D.	Pavimento Inicial	17,29	63973,00	63973,00	2683,13
	1º Reforço Estrutural	4,18	15466,00	9927,04	416,36
	2º Reforço Estrutural	3,40	12580,00	6469,09	271,32
	1º TPM	1,30	4810,00	2133,64	89,49
	2º TPM	1,30	4810,00	1840,50	77,19
	Total	27,47	101639,00	84343,26	3537,49

### 5.3.2. Análise comparativa.

Apesar de no presente estudo a diferença máxima da longevidade dos pavimentos ser de 2,5 anos, optou-se por, ainda assim, realizar as comparações base das diferentes situações através do CAUE, tendo em consideração este ser a única medida utilizada a relacionar o custo com a longevidade do pavimento, realçando que este apresenta o seu resultado por ano. Através desta análise pôde-se concluir que as situações mais económicas foram a 3.C., a 3.D. e a 2.D., pela ordem apresentada, e as menos económicas foram a 1.B., a 1.A. e a 2.B, pela ordem apresentada. As 3 situações mais económicas foram as únicas que não envolveram uma reconstrução, no entanto, apesar desse fator influenciar o custo total, o mesmo não deverá fazer com que estas situações sejam desvalorizadas pois são as

únicas a alcançar pelo menos os 40 anos sem necessitarem de uma intervenção profunda, realçando-se ainda o facto da situação mais barata apenas ter necessitado de TMPM's. Pôde-se ainda constatar que a estas 3 situações se seguiram 2 situações que, mesmo envolvendo uma reconstrução, se apresentaram entre as mais económicas, pois para além da reconstrução apenas se recorreu a TMPM's. No que diz respeito às 3 situações menos económicas, estas foram as únicas que envolveram pelo menos 2 reconstruções, motivo esse que as encarece, sendo de realçar que em nenhum desses casos foram utilizados TMPM's (ver Tabela 31).

Tabela 31 - Valores de custo (€/km), VPL e CAUE por ordem crescente

Situação	Custo (€/km) Via 3,7m Largura	Situação	VPL (€/km) Via 3,7m Largura	Situação	CAUE (€/ano) por km de via com 3,7m Largura
3.C.	83213	3.C.	75600	3.C.	3271
3.D.	101639	3.D.	84343	3.D.	3537
2.D.	105746	2.D.	87987	2.D.	3807
3.B.	146446	1.C.	100406	1.C.	4344
1.C.	150072	2.C.	102190	2.C.	4421
2.C.	150479	3.B.	109636	3.A.	4648
3.A.	169608	3.A.	110815	3.B.	4743
1.D.	176194	1.D.	121831	1.D.	5271
2.A.	191512	2.A.	132474	2.A.	5731
2.B.	215932	2.B.	143418	2.B.	6205
1.A.	261590	1.A.	165580	1.A.	6945
1.B.	280164	1.B.	183827	1.B.	7953

Verificou-se ainda que existem alterações de posição (ver Tabela 31) quando se utiliza o custo (€/km) comparativamente ao VPL ou o CAUE, no entanto, os 3 mais económicos e os 3 mais dispendiosos mantiveram-se iguais. Este facto demonstra que a taxa de atualização pode alterar os custos finais das construções/intervenções. Deste modo, quis-se comparar o VPL com o custo das diferentes situações, recorrendo-se, para tal, ao gráfico que consta na Figura 31. A partir do mesmo foi possível visualizar que em ambos os casos à medida que aumenta o tempo de vida da estrutura inicial do pavimento diminuem os custos. Para além disso, o benefício que advém da taxa de atualização (diferença entre o custo e o VPL) foi maior quando o tempo de vida da estrutura inicial do

pavimento é menor. Ainda assim, apesar desse benefício, as estruturas iniciais do pavimento para 10 anos mantêm-se, quase sempre, mais caras que as restantes.

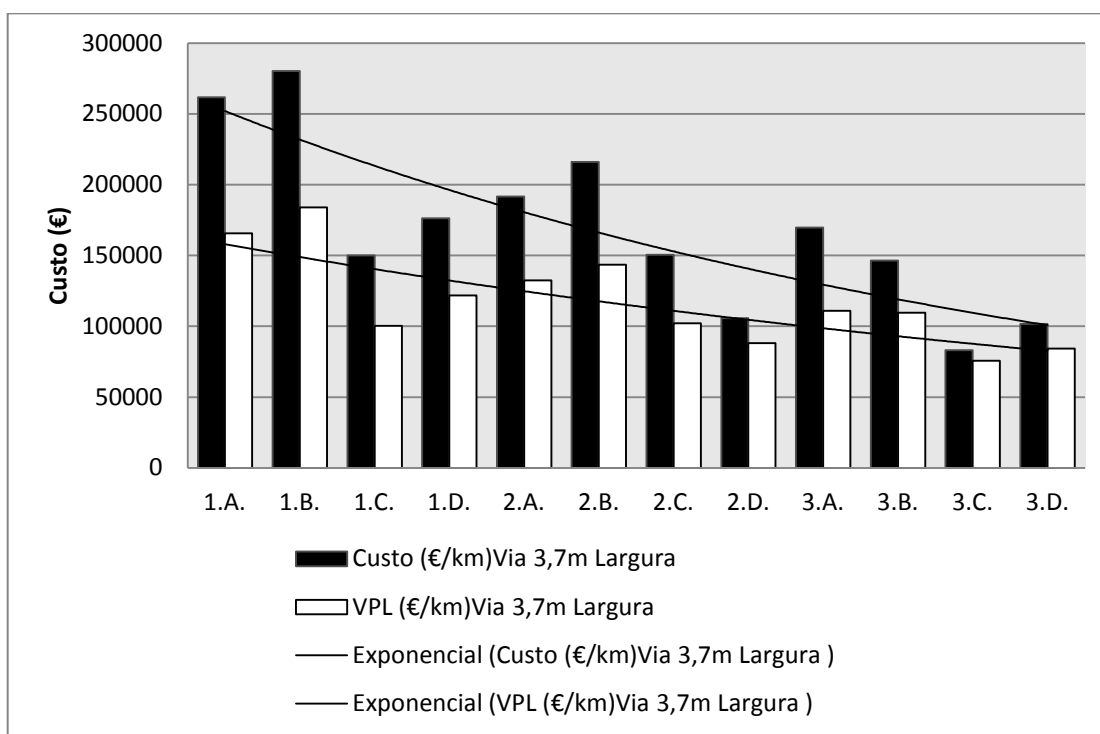


Figura 31 – Totais de custo (€/km) e VPL

De forma a facilitar a visualização dos resultados relativos aos custos das diferentes situações, considerou-se hipoteticamente um pavimento com 20 km, para ilustrar os custos totais (através do VPL) das suas construções e manutenções.

Na Figura 32 compararam-se os diferentes conjuntos de construções/intervenções (A, B, C e D), agrupando-os consoante a estrutura inicial do pavimento (1, 2 e 3 para 10, 15 e 20 anos, respetivamente). Conforme já se verificou, através da análise da Figura 31, pôde-se verificar, também no pavimento para 20 km, que a situação 1 foi, de modo geral, a mais dispendiosa, em oposição à 3, que se demonstrou mais económica. Dentro de cada estrutura inicial do pavimento a construção/intervenção C esteve entre as mais económicas, sendo a mais económica da situação 1 e da 3. No que se refere à situação 2, a D demonstrou-se ainda mais benéfica pois não necessitou de uma reconstrução. Deste modo, verificou-se que as situações que incluíram o máximo de TMPM's são vantajosas, mesmo quando estes foram combinados com reforços ou reconstruções. As situações A e B, independentemente da estrutura de pavimento inicial, demonstraram sempre ser as mais

dispendiosas, sendo que recorrem exclusivamente a reforços e reconstruções, não envolvendo TMPM's.

Tal como já se verificou para o CAUE, a situação mais económica foi a 3.C. e a mais dispendiosa foi a 1.B, sendo que a diferença entre ambas foi de 2.164.535€, o que permitiria executar cerca de 29 km de pavimento com a situação mais económica.

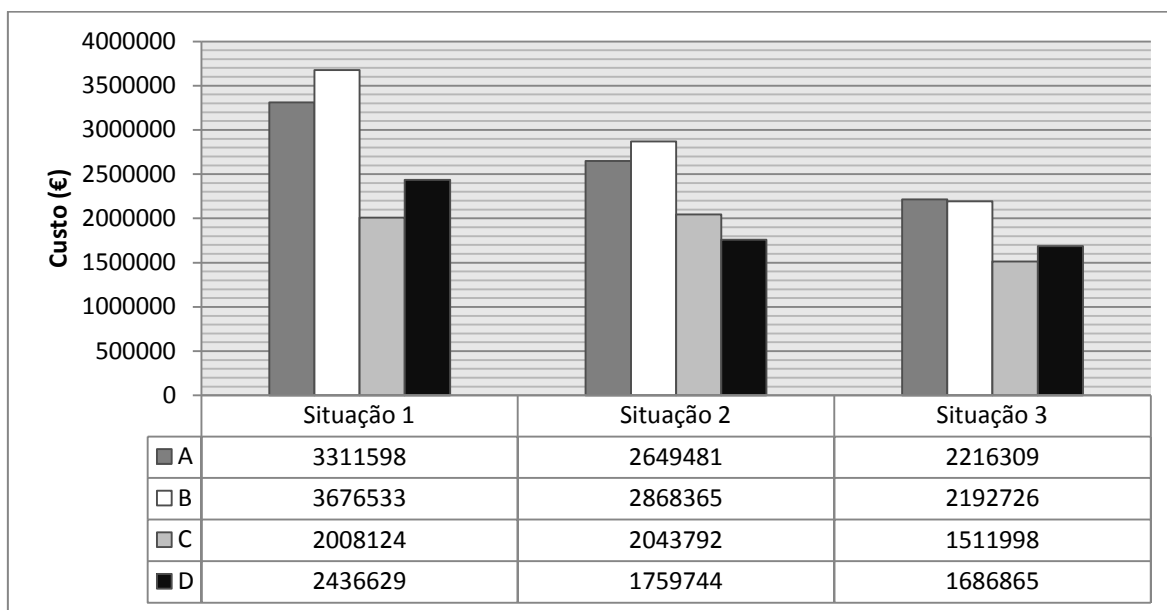


Figura 32 – VPL (do pavimento com 20 km) agrupado segundo a estrutura inicial do pavimento

#### 5.4. Análise Ambiental

O desenvolvimento sustentável tem sido definido como o equilíbrio entre o sucesso económico, a proteção ecológica e a responsabilidade social (Uhlman & Saling, 2010). Para que este se alcance são necessários métodos e ferramentas que quantifiquem e comparem o impacto ambiental do fornecimento de bens e serviços (produtos) para a nossa sociedade (Rebitzer *et al.*, 2004; Uhlman & Saling, 2010). O impacto ambiental é determinado com base em 5 aspetos principais: consumo de matérias-primas; consumo de energia; emissões resultantes; potencial de toxicidade e risco potencial (Saling *et al.*, 2002) que têm influência a curto, médio e longo prazo na comunidade e no governo (Sinha & Labi, 2007). Cada produto tem uma vida, que começa com o seu *design*, seguindo-se a extração de recursos para o produzir, a produção em si, o seu uso ou consumo e as atividades relacionadas com o seu fim de vida, como a reciclagem ou o tratamento de resíduos. Todo este processo tem consequências ao nível do impacto ambiental devido, por

exemplo, ao consumo de recursos e às emissões de gases. Sendo por isso comum a avaliação do ciclo de vida (*Life Cycle Assessment*), uma metodologia que estima e avalia os impactos ambientais referentes ao ciclo de vida de um produto, que deve ser realizada com base nas normas internacionais ISO (Rebitzer *et al.*, 2004), e que é utilizada em diferentes análises de eco-eficiência, como o BASF (Saling *et al.*, 2002), ou em metodologias de avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida (Finkbeiner, Schau, Lehmann, & Traverso, 2010).

Um pavimento sustentável deverá ter por base os seguintes critérios: otimizar o uso de recursos naturais e reduzir o consumo de energia; reduzir o impacto do efeito de estufa, através de uma menor emissão de gases nocivos; limitar a poluição; melhorar a saúde, segurança e prevenir riscos e garantir boas condições de conforto e segurança (Chappat & Bilal, 2003).

Os gases que contribuem para o efeito de estufa são a grande causa das variações climáticas, sendo que os principais gases que advêm da construção de estradas são o protóxido de azoto ( $N_2O$ ), o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e o metano ( $CH_4$ ). Como a contribuição destes gases não é a mesma, o seu impacto no efeito de estufa é expresso em  $CO_2$  equivalente ( $CO_{2e}$ ), conforme será realizado também neste estudo. É aceite que o impacto no efeito de estufa de  $N_2O$  é 310 e de  $CH_4$  é 21, pelo que 1kg de  $N_2O$  tem tanto efeito como 310 kg de  $CO_2$  (Chappat & Bilal, 2003).

A presente análise é uma aproximação à avaliação do ciclo de vida, no entanto, não se considera que aborde exaustivamente todos os fatores descritos pela ISO, considerando-se simplesmente uma análise ambiental do ciclo de vida de pavimentos.

#### **5.4.1. Descrição das emissões/consumos energéticos.**

Para ser possível calcular o impacto ambiental de cada situação foi necessário estipular as emissões em  $CO_{2e}$  (kg/ton) e os consumos energéticos (MJ/ton) referentes a materiais, atividades e maquinaria utilizados nas diferentes construções/intervenções. Estes foram obtidos com base na literatura, conforme descrito na Tabela 32.

Tabela 32 - Emissões/consumos energéticos de atividades, materiais e maquinaria

<b>Atividade / Material</b>	<b>Emissões CO<sub>2e</sub> (kg/ton)</b>	<b>Consumo Energético (MJ/ton)</b>
Betume (Eurobitume, 2011)	285	4900
Agregados (IVL, 2001)	10	40
Cal Hidráulica (CED, citado por Chappat & Bilal, 2003)	245	1244
Produção Misturas Betuminosas (IVL, 2001)	22	275
Aplicação Misturas Betuminosas (IVL, 2001)	0,6	9
Transporte de Materiais (km/ton) (IVL, 2001)	0,06	0,9
Emulsão Betuminosa (Eurobitume, 2011)	221	3490
Remoção de Pavimento para Reciclagem (IVL, 2001)	0,8	12
Cimento (IVL, 2001)	1080	5900
Água (IVL, 2001)	0,3	10
Aditivo (Cerea, 2010)	1837	71710
Emulsionante (Giustozzi <i>et al.</i> , n.d.)	600	63250
<b>Máquinas</b>	<b>Emissões de CO<sub>2e</sub> (kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Consumo energético (MJ/m<sup>2</sup>)</b>
Camião para aplicação de rega de colagem (Giustozzi <i>et al.</i> , n.d.)	0,036	0,491
Máquina de fresagem (Giustozzi <i>et al.</i> , n.d.)	0,12	1,5440
Máquina de Microaglomerado (Giustozzi <i>et al.</i> , n.d.)	0,03	0,424

Após estarem definidas as emissões e os consumos energéticos procedeu-se à determinação dos mesmos para os materiais, atividades e maquinaria envolvidas em cada tipo de construção/intervenção e os respetivos totais. Para tal, foi necessário definir a percentagem de cada constituinte englobado na formulação das misturas betuminosas, bem como do microaglomerado (ver Anexo C), de forma a determinar o número de quilogramas de cada elemento presente numa tonelada de cada mistura. Com base nesse valor, na densidade e nas espessuras foi possível determinar a quantidade de toneladas de cada elemento por m<sup>2</sup>, à exceção do microaglomerado onde se recorreu à utilização de uma taxa de aplicação da mistura que permitiu obter, para cada elemento da mistura, a quantidade de toneladas por m<sup>2</sup>. Esses valores obtidos foram multiplicados pelas emissões e consumos, referidos na Tabela 32, para obter as emissões e os consumos energéticos resultantes de cada construção/intervenção. No caso da maquinaria esse procedimento não foi executado visto ter-se obtido o valor das emissões e do consumo energético já por m<sup>2</sup>. Sendo ainda necessário explicitar que todos os transportes de materiais considerados foram estabelecidos com base numa distância única de 20 km.



Na Tabela 33 apresentam-se as emissões e o consumo energético associado à execução dos pavimentos iniciais, sendo que na atividade designada como aplicação da mistura betuminosa englobou-se a maquinaria necessária à mesma.

Tabela 33 - Emissões e consumo energético da execução do pavimento inicial (10, 15 e 20 anos)

Emissões (CO <sub>2e</sub> ) e Consumo energético	10 anos		15 anos		20 anos	
	BB	MB	BB	MB	BB	MB
Betume em CO <sub>2e</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	1,70	4,40	1,70	4,96	1,70	5,23
Agregados em CO <sub>2e</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	1,07	3,53	1,07	3,97	1,07	4,19
Cal Hidráulica em CO <sub>2e</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	0,54	0,00	0,54	0,00	0,54	0,00
Produção da Mistura Betuminosa em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	2,53	8,10	2,53	9,11	2,53	9,61
Aplicação da Mistura Betuminosa em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	0,07	0,22	0,07	0,25	0,07	0,26
Transporte (km/ton) em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	0,14	0,44	0,14	0,50	0,14	0,52
Total por Camada em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	6,04	16,69	6,04	18,77	6,04	19,82
<b>Total por Tempo de Vida em CO<sub>2e</sub> (kg/ m<sup>2</sup>)</b>	22,73		24,82		25,86	
Betume (MJ/ m <sup>2</sup> )	29,30	75,73	29,30	85,20	29,30	89,93
Agregados (MJ/ m <sup>2</sup> )	4,27	14,10	4,27	15,86	4,27	16,75
Cal Hidráulica (MJ/ m <sup>2</sup> )	2,72	0,00	2,72	0,00	2,72	0,00
Produção da Mistura Betuminosa (MJ/ m <sup>2</sup> )	31,63	101,20	31,63	113,85	31,63	120,18
Aplicação da Mistura Betuminosa (MJ/ m <sup>2</sup> )	1,04	3,31	1,04	3,73	1,04	3,93
Transporte (km/ton) (MJ/ m <sup>2</sup> )	2,07	6,62	2,07	7,45	2,07	7,87
Total por Camada (MJ/ m <sup>2</sup> )	71,02	200,97	71,02	226,09	71,02	238,65
<b>Total por Tempo de Vida (MJ/ m<sup>2</sup>)</b>	272,00		297,12		309,68	

No que diz respeito às emissões e consumo energético da execução de reforços estruturais (ver Tabela 34), estas foram calculadas do mesmo modo que o pavimento inicial, no entanto, teve de ser englobada a produção de uma emulsão betuminosa para a rega de colagem bem como a sua aplicação.

Tabela 34 - Emissões e consumo energético da execução de reforços estruturais

Emissões (CO <sub>2e</sub> ) e Consumo energético	10 anos		15 anos		20 anos	
	1º Reforço	2º Reforço	1º Reforço	2º Reforço	1º Reforço	2º Reforço
Betume em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	1,70	1,36	1,70	1,02	2,05	1,36
Agregados em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	1,07	0,85	1,07	0,64	1,28	0,85
Cal Hidráulica em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	1,47	1,17	1,47	0,88	1,76	1,17
Produção da Mistura Betuminosa em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	2,53	2,02	2,53	1,52	3,04	2,02
Aplicação da Mistura Betuminosa em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	0,07	0,06	0,07	0,04	0,08	0,06
Transporte (km/ton) em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	0,14	0,11	0,14	0,08	0,17	0,11
Emulsão Betuminosa (Rega de colagem) em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Camião para rega de colagem em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
<b>Total por Camada em CO<sub>2e</sub> (kg/ m<sup>2</sup>)</b>	<b>7,23</b>	<b>5,84</b>	<b>7,23</b>	<b>4,44</b>	<b>8,63</b>	<b>5,84</b>
Betume (MJ/ m <sup>2</sup> )	29,30	23,44	29,30	17,58	35,16	23,44
Agregados (MJ/ m <sup>2</sup> )	4,27	3,42	4,27	2,56	5,13	3,42
Cal Hidráulica (MJ/ m <sup>2</sup> )	7,44	5,95	7,44	4,46	8,93	5,95
Produção da Mistura Betuminosa (MJ/ m <sup>2</sup> )	31,63	25,30	31,63	18,98	37,95	25,30
Aplicação da Mistura Betuminosa (MJ/ m <sup>2</sup> )	1,04	0,83	1,04	0,62	1,24	0,83
Transporte (km/ton) (MJ/ m <sup>2</sup> )	2,07	1,66	2,07	1,24	2,48	1,66
Emulsão Betuminosa (Rega de colagem) (MJ/ m <sup>2</sup> )	3,49	3,49	3,49	3,49	3,49	3,49
Camião para rega de colagem (MJ/ m <sup>2</sup> )	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
<b>Total por Camada (MJ/ m<sup>2</sup>)</b>	<b>79,73</b>	<b>64,58</b>	<b>79,73</b>	<b>49,43</b>	<b>94,87</b>	<b>64,58</b>

No caso da reconstrução de pavimentos (ver Tabela 35) apenas foi necessário acrescentar, à execução do pavimento inicial, a remoção do pavimento (para reciclagem) bem como o transporte do material removido.

Tabela 35 - Emissões e consumo energético da reconstrução de pavimentos (10, 15 e 20 anos)

Emissões (CO <sub>2e</sub> ) e Consumo energético	10 anos		15 anos		20 anos	
	BB	MB	BB	MB	BB	MB
Remoção de Pavimento para Reciclagem em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	0,09	0,29	0,09	0,33	0,09	0,35
Transporte de Material Removido (km/ton) em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	0,14	0,44	0,14	0,50	0,14	0,52
Betume em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	1,70	4,40	1,70	4,96	1,70	5,23
Agregados em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	1,07	3,53	1,07	3,97	1,07	4,19
Cal Hidráulica em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	0,54	0,00	0,54	0,00	0,54	0,00
Produção da Mistura em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	2,53	8,10	2,53	9,11	2,53	9,61
Aplicação da Mistura Betuminosa em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	0,07	0,22	0,07	0,25	0,07	0,26
Transporte (km/ton) em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	0,14	0,44	0,14	0,50	0,14	0,52
Total por Camada em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	6,27	17,42	6,27	19,60	6,27	20,69
<b>Total por Tempo de Vida em CO<sub>2e</sub> (kg/ m<sup>2</sup>)</b>	23,70		25,88		26,97	
Remoção de Pavimento para Reciclagem (km/ton) (MJ/ m <sup>2</sup> )	1,38	4,42	1,38	4,97	1,38	5,24
Transporte de Material Removido 20 km (MJ/ m <sup>2</sup> )	2,07	6,62	2,07	7,45	2,07	7,87
Betume (MJ/ m <sup>2</sup> )	29,30	75,73	29,30	85,20	29,30	89,93
Agregados (MJ/m <sup>2</sup> )	4,27	14,10	4,27	15,86	4,27	16,75
Cal Hidráulica (MJ/ m <sup>2</sup> )	2,72	0,00	2,72	0,00	2,72	0,00
Produção da Mistura (MJ/ m <sup>2</sup> )	31,63	101,20	31,63	113,85	31,63	120,18
Aplicação da Mistura Betuminosa (MJ/ m <sup>2</sup> )	1,04	3,31	1,04	3,73	1,04	3,93
Transporte (km/ton) (MJ/ m <sup>2</sup> )	2,07	6,62	2,07	7,45	2,07	7,87
Total por Camada (MJ/ m <sup>2</sup> )	74,47	212,01	74,47	238,51	74,47	251,76
<b>Total por Tempo de Vida (MJ/ m<sup>2</sup>)</b>	286,49		312,99		326,24	

Todas as emissões e consumo energético do TPM estão descritas na Tabela 36, englobando a utilização de uma máquina de microaglomerado.

Tabela 36 - Emissões e consumo energético do TMPM

<b>Emissões (CO<sub>2e</sub>) e Consumo energético</b>	<b>TMPM</b>
Betume em CO <sub>2e</sub> para emulsão (kg/ m <sup>2</sup> )	0,1787
Aditivo em CO <sub>2e</sub> para emulsão (kg/ m <sup>2</sup> )	0,1782
Emulsionante em CO <sub>2e</sub> para emulsão (kg/ m <sup>2</sup> )	0,0062
Água em CO <sub>2e</sub> para emulsão (kg/ m <sup>2</sup> )	0,0002
Agregado em CO <sub>2e</sub> para microaglomerado (kg/ m <sup>2</sup> )	0,1133
Cimento em CO <sub>2e</sub> para microaglomerado (kg/ m <sup>2</sup> )	0,0549
Aditivo em CO <sub>2e</sub> para microaglomerado (kg/ m <sup>2</sup> )	0,0206
Água em CO <sub>2e</sub> para microaglomerado (kg/ m <sup>2</sup> )	0,0003
Máquina de Microaglomerado em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	0,0317
Transporte (km/ton) em CO <sub>2e</sub> (kg/ m <sup>2</sup> )	0,0168
<b>Total por TMPM em CO<sub>2e</sub> (kg/ m<sup>2</sup>)</b>	<b>0,6009</b>
Betume para emulsão (MJ/ m <sup>2</sup> )	3,2073
Aditivo para emulsão (MJ/ m <sup>2</sup> )	6,9573
Emulsionante para emulsão (MJ/ m <sup>2</sup> )	0,6508
Água para emulsão (MJ/ m <sup>2</sup> )	0,0064
Agregado para microaglomerado (MJ/ m <sup>2</sup> )	0,453
Cimento para microaglomerado (MJ/ m <sup>2</sup> )	0,2787
Aditivo para microaglomerado (MJ/ m <sup>2</sup> )	0,8032
Água para microaglomerado (MJ/ m <sup>2</sup> )	0,0113
Máquina de Microaglomerado (MJ/ m <sup>2</sup> )	0,424
Transporte (km/ton) (MJ/ m <sup>2</sup> )	0,2519
<b>Total por TMPM (MJ/ m<sup>2</sup>)</b>	<b>13,0440</b>

Tendo por base as emissões e os consumos energéticos de cada construção/intervenção, já referidos neste capítulo, efetuou-se o levantamento dos mesmos para cada situação em análise no presente estudo, já especificadas no ponto 5.3. De forma a facilitar a visualização e interpretação desses valores, foram ainda consideradas as emissões e os consumos energéticos para uma via de 1 Km de extensão e 3,7 m de largura. Os dados referentes às diferentes situações encontram-se seguidamente na Tabela 37, 38 e 39, consoante se refiram à estrutura de pavimento inicial para 10, 15 e 20 anos, respetivamente.

Tabela 37 - Emissões e consumos das situações 1

Situação	Atividade	Emissões de CO <sub>2</sub> e (kg/m <sup>2</sup> )	Consumo energético (MJ/m <sup>2</sup> )	Emissões de CO <sub>2</sub> e (kg/km) via com 3,7m de largura	Consumo energético (MJ/km) via com 3,7m de largura
	Pavimento Inicial	22,73	272,00	84101,00	1006400,00
1.A.	1º Reforço Estrutural	7,23	79,73	26751,00	295001,00
	2º Reforço Estrutural	5,84	64,58	21608,00	238946,00
	1ª Reconstrução	23,70	286,49	87690,00	1060013,00
	3º Reforço Estrutural	7,23	79,73	26751,00	295001,00
	4º Reforço Estrutural	5,84	64,58	21608,00	238946,00
	2ª Reconstrução	23,70	286,49	87690,00	1060013,00
	Total	96,27	1133,60	356199,00	4194320,00
1.B.	Pavimento Inicial	22,73	272,00	84101,00	1006400,00
	1ª Reconstrução	23,70	286,49	87690,00	1060013,00
	2ª Reconstrução	23,70	286,49	87690,00	1060013,00
	3ª Reconstrução	23,70	286,49	87690,00	1060013,00
	Total	93,83	1131,47	347171,00	4186439,00
1.C.	Pavimento Inicial	22,73	272,00	84101,00	1006400,00
	1º TTPM	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	2º TTPM	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	3º TTPM	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	4º TTPM	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	Reconstrução	23,70	286,49	87690,00	1060013,00
	Total	48,83	610,67	180684,32	2259464,20
1.D.	Pavimento Inicial	22,73	272,00	84101,00	1006400,00
	1º Reforço Estrutural	7,23	79,73	26751,00	295001,00
	1º TTPM	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	2º TTPM	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	Reconstrução	23,70	286,49	87690,00	1060013,00
	2º Reforço Estrutural	7,23	79,73	26751,00	295001,00
	3º TTPM	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	Total	62,69	757,08	231962,99	2801203,40

Tabela 38 - Emissões e consumos das situações 2

Situação	Atividade	Emissões de CO <sub>2</sub> e (kg/m <sup>2</sup> )	Consumo energético (MJ/m <sup>2</sup> )	Emissões de CO <sub>2</sub> e (kg/km) via com 3,7m de largura	Consumo energético (MJ/km) via com 3,7m de largura
2.A.	Pavimento Inicial	24,83	297,12	91871,00	1099344,00
	1º Reforço Estrutural	7,23	79,73	26751,00	295001,00
	2º Reforço Estrutural	4,44	49,43	16428,00	182891,00
	Reconstrução	25,88	312,99	95756,00	1158063,00
	3º Reforço Estrutural	7,23	79,73	26751,00	295001,00
	4º Reforço Estrutural	4,44	49,43	16428,00	182891,00
	Total	74,05	868,43	273985,00	3213191,00
2.B.	Pavimento Inicial	24,83	297,12	91871,00	1099344,00
	1ª Reconstrução	25,88	312,99	95756,00	1158063,00
	2ª Reconstrução	23,70	286,49	87690,00	1060013,00
	Total	74,41	896,60	275317,00	3317420,00
2.C.	Pavimento Inicial	24,83	297,12	91871,00	1099344,00
	1º TPM	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	2º TPM	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	3º TPM	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	Reconstrução	23,70	286,49	87690,00	1060013,00
	Total	50,33	622,74	186230,99	2304145,40
2.D.	Pavimento Inicial	24,83	297,12	91871,00	1099344,00
	1º Reforço Estrutural	7,23	79,73	26751,00	295001,00
	2º Reforço Estrutural	4,44	49,43	16428,00	182891,00
	1º TPM	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	2º TPM	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	3º TPM	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	4º TPM	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	Total	38,90	478,46	143943,32	1770287,20

Tabela 39 - Emissões e consumos das situações 3

Situação	Atividade	Emissões de CO <sub>2</sub> e (kg/m <sup>2</sup> )	Consumo energético (MJ/m <sup>2</sup> )	Emissões de CO <sub>2</sub> e (kg/km) via com 3,7m de largura	Consumo energético (MJ/km) via com 3,7m de largura
3.A.	Pavimento Inicial	25,86	309,68	95682,00	1145816,00
	1º Reforço Estrutural	8,63	94,87	31931,00	351019,00
	2º Reforço Estrutural	5,84	64,58	21608,00	238946,00
	Reconstrução	23,70	286,49	87690,00	1060013,00
	Total	64,03	755,62	236911,00	2795794,00
3.B.	Pavimento Inicial	25,86	309,68	95682,00	1145816,00
	Reconstrução	26,97	326,24	99789,00	1207088,00
	Total	52,83	635,92	195471,00	2352904,00
3.C.	Pavimento Inicial	25,86	309,68	95682,00	1145816,00
	1º TPMP	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	2º TPMP	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	3º TPMP	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	4º TPMP	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	Total	28,26	361,86	104575,32	1338867,20
3.D.	Pavimento Inicial	25,86	309,68	95682,00	1145816,00
	1º Reforço Estrutural	8,63	94,87	31931,00	351019,00
	2º Reforço Estrutural	5,84	64,58	21608,00	238946,00
	1º TTPM	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	2º TTPM	0,60	13,04	2223,33	48262,80
	Total	41,53	495,22	153667,66	1832306,60

#### 5.4.2. Análise comparativa.

No que diz respeito às emissões de CO<sub>2</sub>e, as situações que demonstraram ser mais benéficas foram a 3.C., 2.D e 3.D., pela ordem apresentada, e as mais prejudiciais foram a 1.A., 1.B. e 2.B., pela ordem apresentada. O mesmo se verificou para o consumo energético, que se manteve exatamente pela mesma ordem que as emissões de CO<sub>2</sub>e, conforme se pode verificar na Tabela 40. Como se descreveu no ponto anterior, as intervenções com recurso à reconstrução são as que apresentam mais emissões de CO<sub>2</sub>e e um maior consumo energético, seguidas da intervenção com reforço estrutural e, por fim,

os TMPM's. Dessa forma, como seria de esperar, as situações mais benéficas foram as únicas que não recorreram à reconstrução, sendo que a situação mais benéfica de todas, 3.C., apenas envolveu a utilização de TMPM's e as restantes, 2.D. e 3.D., apesar de também envolverem os TMPM's, conciliaram-nos com o reforço estrutural, mantendo-se, ainda assim, dentro das situações mais benéficas. Neste sentido, pode-se ainda referir que as situações que se seguem, 1.C. e 2.C., apesar de recorrerem à reconstrução, ao envolverem o recurso aos TMPM's, ainda se encontram no topo da tabela. Pelo contrário, as situações mais prejudiciais foram as que recorreram a pelo menos 2 reconstruções e não utilizaram nenhum TMPM.

Tabela 40 - Valores das emissões de CO<sub>2e</sub> (Kg/Km) e consumos energéticos (MJ/Km) por ordem crescente

Situação	Emissões de CO <sub>2e</sub> (kg/km) por km de via com 3,7m Largura	Situação	Consumo energético (MJ/km) por km de via com 3,7m Largura
3.C.	104575	3.C.	1338867
2.D.	143943	2.D.	1770287
3.D.	153668	3.D.	1832307
1.C.	180684	1.C.	2259464
2.C.	186231	2.C.	2304145
3.B.	195471	3.B.	2352904
1.D.	231962	3.A.	2795794
3.A.	236911	1.D.	2801203
2.A.	273985	2.A.	3213191
2.B.	275317	2.B.	3317420
1.B.	347171	1.B.	4186439
1.A.	356199	1.A.	4194320

De forma a facilitar a visualização dos resultados relativos às emissões e aos consumos energéticos das diferentes situações, considerou-se hipoteticamente um pavimento com 20 km, para ilustrar os mesmos.

Nas Figuras 33 e 34 compararam-se os diferentes conjuntos de construções/intervenções (A, B, C e D), agrupando-os consoante a estrutura inicial do pavimento (1, 2 e 3 para 10, 15 e 20 anos, respetivamente), sendo que a Figura 33 se refere às emissões de CO<sub>2e</sub> e a Figura 34 ao consumo energético. Sabendo que a ordem das emissões de CO<sub>2e</sub> e do consumo energético foi igual (ver Tabela 40) seria de prever que a



sua representação gráfica, para um pavimento com 20 km, iria variar de forma semelhante, o que se pode verificar nas figuras respetivas. Em ambas as análises pôde-se concluir que as situações 1 foram menos benéficas que as situações 3, sendo que nas situações 1 o menor tempo de vida da sua estrutura inicial obriga a um maior número de intervenções para atingir o horizonte. A nível global, as construções/intervenções C e D foram as mais vantajosas em oposição às A e B, que não envolvem TPM's.

Tal como já foi referido, a situação mais benéfica foi a 3.C. e a mais prejudicial foi a 1.A., sendo que a diferença de emissões de CO<sub>2e</sub> entre ambas foi de 5.032.474 kg, o que corresponde às emissões que a situação mais benéfica teria ao executar cerca de 48 km de pavimento. Já a diferença de consumo energético entre as duas situações foi de 57.109.056 MJ, o que corresponde ao consumo energético que a situação mais benéfica teria ao executar aproximadamente 43 km de pavimento.

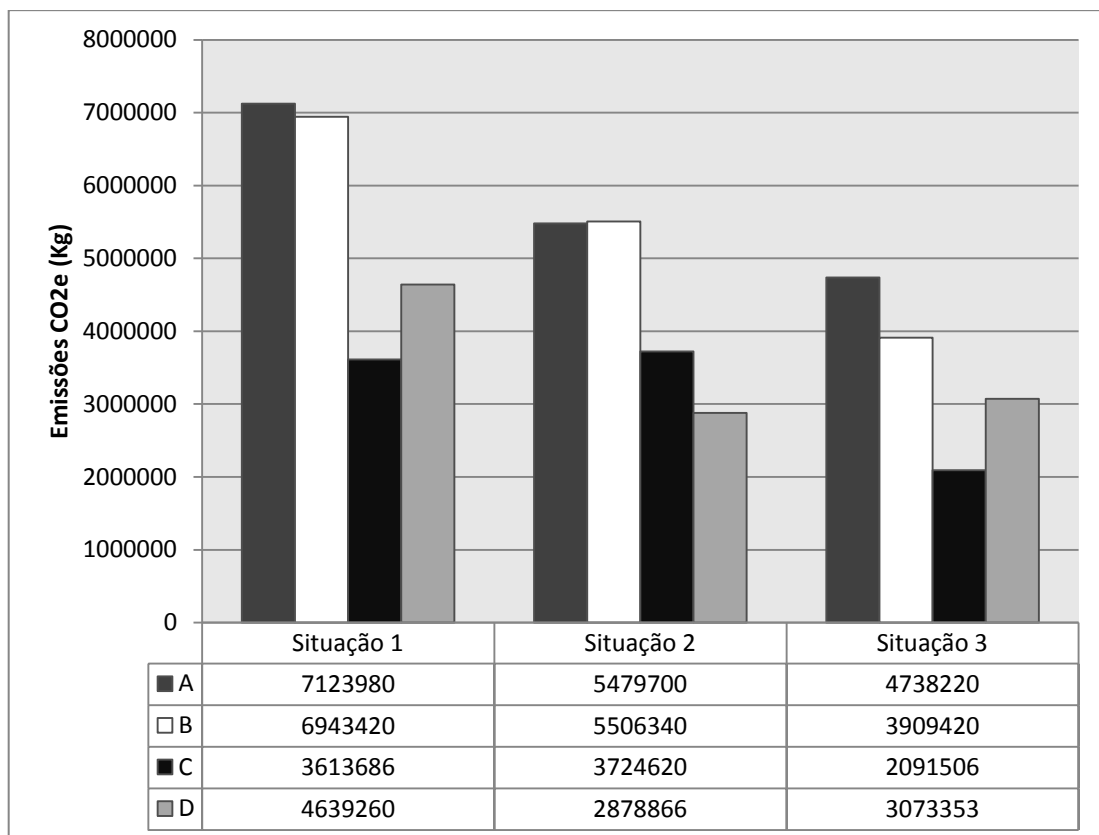


Figura 33 - Emissões (pavimento com 20 km) agrupadas segundo a estrutura inicial do pavimento

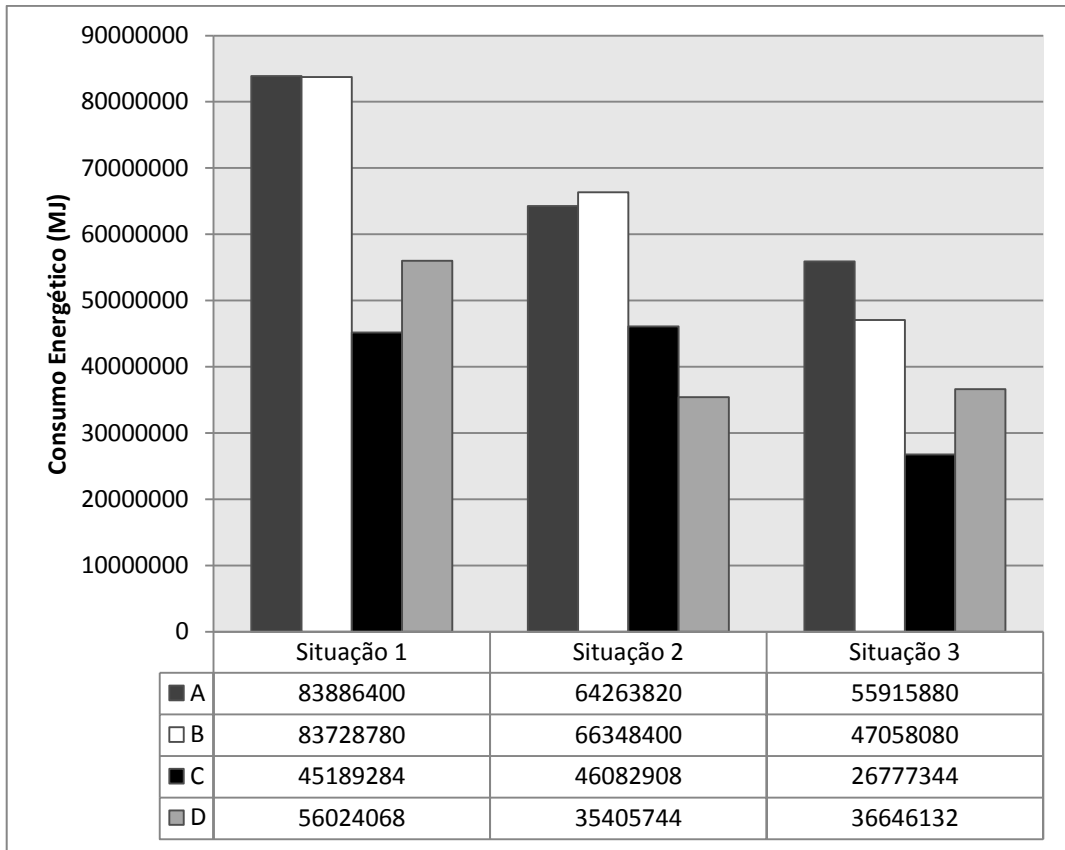


Figura 34 - Consumo energético (do pavimento com 20 km) agrupado segundo a estrutura inicial do pavimento

## 6. Discussão/Conclusão

O principal objetivo da presente dissertação foi a comparação, económica e ambiental, de diferentes situações relativas às construções/intervenções necessárias para atingir um horizonte de 40 anos em pavimentos rodoviários. As análises económica e ambiental foram realizadas separadamente, não se utilizando nenhum método de análise eco-eficiente que estabeleça a relação entre esses dois fatores simultaneamente, no entanto, devido aos resultados das diferentes análises, foi possível retirar algumas conclusões globais a esse respeito. Quer a nível económico como ambiental (emissões de CO<sub>2e</sub> e consumo energético) as situações que se demonstraram mais vantajosas foram a 3.C., 3.D. e 2.D., embora essa ordem não se tenha mantido igual para todas as análises. Já no que se refere às situações menos vantajosas estas foram, também em todas as análises, a 1.B., 1.A. e 2.B., nem sempre por essa ordem. Este facto pode ser justificado pela ausência de reconstruções e pela inclusão do máximo de TPM's consecutivos possíveis (4) nas situações mais vantajosas e à ausência de TPM's e necessidade de recorrer à reconstrução nas situações menos vantajosas. Estas intervenções apresentaram maior influência nos resultados principais visto os TPM's serem a intervenção menos dispendiosa e com menores emissões e consumo energético e a reconstrução ser a intervenção mais dispendiosa e com maiores emissões e consumo energético. Apesar da discrepância dos valores base destas duas intervenções, a sua conjugação (na situação 1.C. e 2.C.) demonstrou, bons resultados, visto serem a 4<sup>a</sup> e a 5<sup>a</sup> situações mais benéficas. De igual forma, a conjugação de TPM's com reforço estrutural (situação 2.D. e 3.D.) também apresentou bons resultados, visto as duas situações que englobaram apenas essas intervenções estarem entre as 3 melhores. Desta forma, as situações mais benéficas apresentaram sempre intervenções com TPM's, sendo a melhor situação, para qualquer análise, a 3.C., que apenas com recurso a TPM's conseguiu atingir o horizonte estabelecido (40 anos). Estes resultados apontam para o TPM ser um tratamento sustentável a nível económico e ambiental, sendo de realçar que os benefícios económicos indiretos relativos ao menor impacto ambiental não foram considerados nesta análise. Importa ainda realçar que a situação que engloba apenas TPM's não envolve nenhuma intervenção a nível estrutural, o que a torna inviável na prática, pois a sua estrutura dificilmente resistiria 40 anos. No que diz respeito ao seu custo, a literatura refere que este é um tratamento de baixo custo e que, no caso de aumentar pelo menos 1,6 anos de serviço,

já é custo-eficaz (Ji *et al.*, 2013), sendo que outro estudo demonstrou maior equilíbrio entre custo-eficácia e impacto ambiental do que as camadas finas de misturas betuminosas a quente, mesmo quando modificadas com recurso a polímeros (Takamura *et al.*, 2001). No mesmo sentido, os estudos referentes aos tratamentos preventivos em geral também apresentam resultados semelhantes, sendo que estes providenciaram uma redução significativa no gasto energético e nas emissões de gases responsáveis pelo efeito de estufa quando comparados com reabilitações e reconstruções (Chan *et al.*, 2010) e estimam que as misturas a frio podem reduzir o consumo de energia em pelo menos 20 a 40% (Chappat & Bilal, 2003). Por fim, estes proporcionaram um melhor desempenho médio ao longo do ciclo de vida e mostraram-se eco-eficientes ao serem comparados com reabilitações e reconstruções, atingindo uma poupança de quase 44% em emissões de CO<sub>2</sub> em 50 anos (Giustozzi *et al.*, n.d.).

Conforme se pôde verificar nas diversas análises realizadas, as construções/intervenções da situação 1 apresentaram-se como menos vantajosas quando comparadas com a 3, sendo que, à medida que aumentou o investimento inicial houve um decréscimo do custo, das emissões de CO<sub>2e</sub> e do consumo energético. Ou seja, apesar de um menor investimento inicial permitir uma maior rentabilização dos custos ao longo do ciclo de vida (taxa de atualização) a aplicação de um pavimento inicial mais duradouro e custoso pode permitir a diminuição do número de intervenções necessárias, e evitar estratégias de reabilitação mais profundas, até ser atingido o horizonte pretendido.

O presente estudo apresentou algumas limitações que devem ser consideradas na interpretação dos seus resultados. Inicialmente, a inexistência de casos práticos, que permitam estudar as condições do pavimento das diferentes situações ao longo do tempo e descrevam esses mesmos dados, impossibilitou a previsão de curvas de degradação baseadas em dados reais, referentes às diversas situações em estudo. Dessa forma, não foi possível diferenciar a degradação a nível superficial e estrutural, tendo sido considerada uma curva base para todos os casos de forma a possibilitar a realização do estudo. Por outro lado, o tempo de vida útil de um tratamento e o seu custo unitário apresentam grandes discrepâncias na literatura, devido às variações inerentes aos mesmos (e.g. volume de tráfego; tipo de materiais e práticas de construções) (Cuelho *et al.*, 2006). Sendo de realçar a falta de estudos que apresentem os custos de microaglomerado em Portugal e mesmo os que existem, na literatura estrangeira, não são muito recentes. No entanto, no

presente estudo, sempre que possível, tentou-se uniformizar essas medidas e, quando arbitradas, utilizar a situação mais desfavorável à tese defendida neste estudo.

Conforme referido, são necessárias descrições de casos práticos que avaliem custos, a evolução das condições do pavimento ao longo do tempo e que realizem análises eco-eficientes, situação esta que poderia ser considerada como uma continuação do presente trabalho. É necessário aumentar a informação relativa aos tratamentos preventivos, especialmente no que se refere à altura em que será mais vantajosa a sua aplicação. Por outro lado, é necessária a uniformização das medidas apresentadas nos estudos, bem como melhores descrições das mesmas (e.g. forma como obtiveram os valores e o que estes consideram) de forma a permitir estudos de revisão de literatura e estudos comparativos das várias técnicas. Por fim, as poucas desvantagens que o microaglomerado apresenta derivam, na sua maioria, da má aplicação e da má formulação do microaglomerado, pelo que o aumento da investigação e da prática desta técnica poderá torna-la ainda mais vantajosa e possibilitar melhores formulações de misturas de microaglomerado, de forma a potencializar este método ao máximo.

Devido ao aumento mundial das redes rodoviárias, a necessidade de estudar técnicas mais económicas e menos prejudiciais para o ambiente é enorme. Apesar das vantagens referidas dos programas de manutenção preventiva, mais concretamente do microaglomerado, estes exigem uma mudança de mentalidades e um enorme cuidado no controlo e na programação de custos de forma a se intervir sempre na altura adequada, sendo para tal essencial o empenho dos engenheiros e a investigação nesta área.



## 7. Referências Bibliográficas

- Afonso, R. T. (2011). Microaglomerados betuminosos e *slurries* coloridos. Tese de Mestrado, Universidade da Aveiro, Aveiro, Portugal.
- AkzoNobel. (2014). *Bitumen emulsion*. Boletim técnico. Recuperado em 28 de maio, 2014, de [http://sc.akzonobel.com/en/asphalt/Documents/AN\\_Asphalt\\_Emulsion\\_TB\\_eng.pdf](http://sc.akzonobel.com/en/asphalt/Documents/AN_Asphalt_Emulsion_TB_eng.pdf).
- Almeida, M. S. F. D. (2003). *Pavimentos rodoviários de baixo custo com emulsões betuminosas e resíduos das minas da panasqueira*. Tese de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.
- Alves, T. S. F. (2007). *Metodologias de auscultação de pavimentos rodoviários*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- AppaRoa, G., Kumar, R., Amar, D. D., & Ryntathiang, T. L. (2013). Green road approach for the sustainable development in India. *European Journal of Sustainable Development*, 2(2), 165-176.
- Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas. (n.d.). *Lechadas betuminosas: Microaglomerados en frío*. Recuperado em 17 de julho, 2014, de <http://ateb.es/images/pdf/FIC-3LECHADA.pdf>
- Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas. (2005). Las emulsiones de betún su química - física. Recuperado em 4 de fevereiro, 2014, de [http://ateb.es/images/pdf/monografias/1.\\_LAS\\_EMULSIONES\\_DE\\_BETUN\\_SU\\_QUIMICA-FISICA.pdf](http://ateb.es/images/pdf/monografias/1._LAS_EMULSIONES_DE_BETUN_SU_QUIMICA-FISICA.pdf)
- Bae, A., & Stoffels, S. M. (2007). Economic effects of microsurfacing on thermally-cracked pavements. *Journal of Civil Engineering*, 12(3), 177-185. doi: 10.1007/s12205-008-0177-y.
- BASF. (2010). *Micro Surfacing Eco-efficiency Analysis* (Relatório final). Nova Jérсия: BASF.
- Batista, F. A. B. A. (2004). *Misturas betuminosas densas a frio*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

- Bernucci, L. B., Motta, L. M. G., Ceratti, J. A. P., & Soares, J. B. (2008). *Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobras.
- Branco, F., Pereira, P., & Santos, L. P. (2006). *Pavimentos Rodoviários*. 1ª Edição. Coimbra: Almedina.
- Broughton, B., Lee, S., & Kim, Y. (2012). 30 Years of microsurfacing: a review. *International Scholarly Research Network*. doi: 10.5402/2012/279643
- Carreteros. (2011). *540 Microaglomerados en frío*. Recuperado em 17 de julho, 2014, de [http://www.carreteros.org/normativa/pg3/ordenes/circulares/029\\_2011/540.pdf](http://www.carreteros.org/normativa/pg3/ordenes/circulares/029_2011/540.pdf).
- Cerea, P. (2010). *Preventive maintenance treatments on road pavements: multi-approach life-cycle assessment*. Tese de Mestrado, Politecnico di Milano, Milano, Itália.
- Chan, S., Lane, B., & Kazmierowski, T. (2010). *Pavement preservation: A solution for sustainability*. Conferência anual da Transport Association of Canada. Recuperado em 5 de julho, 2014, de <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2010/docs/p1/lane.pdf>.
- Chappat, M., & Bilal, J. (2003). *The environmental road of the future: life cycle analysis*. Paris: COLAS.
- Cuelho, E., Mokwa, R., & Akin, M. (2006). *Preventive Maintenance Treatments of Flexible Pavements: A Synthesis of Highway Practice* (Relatório técnico). Montana, Universidade de Montana.
- Cunha, C. M. (2010). *Reciclagem de pavimentos rodoviários flexíveis diferentes tipos de reciclagem*. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Distin, T., & Louw, K. (2002). Developments in microsurfacing. *Sabita Digest*, 103-109.
- Ducasse, K., Distin, T., & Osborne, L. (2004). *The use of microsurfacing as a cost effective remedial action for surface rutting*. 8<sup>th</sup> Conference on asphalt pavements for Southern Africa. Recuperado em 7 de julho, 2014, de <http://asac.csir.co.za/capsa/Documents/017B.pdf>.



- Ecoasfalt. (2010). *Microaglomerado betuminoso a frio duplo 1ª aplicação – a executar na obra ‘conservação corrente por contrato 2010/2013 – Centro operacional norte – Distrito de Coimbra’*. Coimbra: Ecoasfalt.
- Estradas de Portugal. (2012). 14.03 - Pavimentação. In Estradas de Portugal (Org.). *Caderno de encargos tipo obra* (Volume 3). Portugal: Estradas de Portugal, S.A.
- Eugénio, B. M. A. (2008). *Reforço de pavimentos*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, Portugal.
- Eurobitume. (2011). *Life cycle inventory: bitumen*. Belgium: Eurobitume.
- Federal Highway Administration. (1998). *Life-cycle cost analysis in pavement design – Interim Technical Bulletin* (Relatório técnico). Washington, DC, FHWA.
- Felix, J. (2013). *Reciclagem de pavimentos flexíveis*. Tese de Mestrado, Universidade Fernando Pessoa, Porto, Portugal.
- Finkbeiner, M., Schau, E. M., Lehmann, A., & Traverso, M. (2010). Towards life cycle sustainability assessment. *Sustainability*, 2, 3309-3322. doi: 10.3390/su2103309.
- Fonseca, J. M. R. (2013). *Análise comparativa de soluções adotadas para a reabilitação de pavimentos flexíveis que integram a rede rodoviária nacional*. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Fontes, L. P. T. L. (2009). *Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos*. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Minho, Portugal.
- Francisco, A. P. S. (2012). *Comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis*. Tese de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal.
- Galehouse, L., Moulthrop, J. S., & Hicks, G. (2003). Principles of pavement preservation: definitions, benefits, issues, and barriers. *TR News*, 228, 4-9.
- Geiger, D. R. (2005). *Pavement preservation definitions* (Memorando). Estados Unidos, FHWA.

- Gerardi, C., & Soengas, C. J. (2012). *Conocimientos básicos sobre mezclas en frío*. Recuperado em 6 de julho, 2014, de [http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2013/05/Tesis2012\\_Gerardi\\_CONOCIMIENTOS-BASICOS-MEZCLAS-EN-FRIO.pdf](http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2013/05/Tesis2012_Gerardi_CONOCIMIENTOS-BASICOS-MEZCLAS-EN-FRIO.pdf).
- Giustozzi, F., Flintsch, G. W., & Crispino, M. (n.d.). *Environmental analysis of preventive maintenance treatments on road pavements*. 8<sup>th</sup> International conference on managing pavement assets. Recuperado em 21 de julho, 2014, de [http://pavementmanagement.org/icmpfiles/2011/T2\\_ICMPA134-GIUSTOZZI.pdf](http://pavementmanagement.org/icmpfiles/2011/T2_ICMPA134-GIUSTOZZI.pdf).
- Hein, D., Olidis, C., Darter, M., & Quintus, H. V. (2003). *Impact of recent technology advancements on pavement life*. Annual conference of the transportation association of Canada. Recuperado em 3 de junho, 2014, de <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2003/pdfs/hein.pdf>.
- Hicks, R. G., Seeds, S. B., & Peshkin, D. G. (2000). *Selecting a preventive maintenance treatment for flexible pavements*. Recuperado em 10 de julho, 2014, de <http://www.wsdot.wa.gov/NR/rdonlyres/F27BCD0A-793C-48EF-A795-6C57136C4437/0/PavementPreservation.pdf>.
- Huang, B., & Vukosavljevic, D. (2009). *Optimizing pavement preventive maintenance treatment applications in Tennessee (Phase I)* (Relatório técnico). Universidade de Tennessee, Knoxville.
- Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias. (n.d.). *Construção e reabilitação de pavimentos – ligantes betuminosos* (Disposições normativas). Portugal: InIR.
- International Slurry Surfacing Association. (2010). *Recommended performance guideline for microsurfacing*. Recuperado em 5 de julho, 2014, de <http://thebarnhardtgroup.com/wp-content/uploads/2010/07/A143-Microsurfacing-Guideline-Specifications.pdf>.
- International Slurry Surfacing Association. (n.d.). *High performance slurry systems: slurry systems and preventive maintenance – the right approach*. Recuperado em 5 de julho, 2014, de

<https://www.mdt.mt.gov/publications/docs/brochures/research/toolbox/ISSA/highperf.pdf>.

- IVL Swedish Environmental Research Institute. (2001). *Life cycle assessment of road: a pilot study for inventory analysis*. 2ª Edição. Sweden: IVL.
- Jackson, D. J. (2001). *Pavement preventive maintenance guidelines*. 2º Simpósio sobre manutenção e reabilitação de pavimentos e controle tecnológico (No. 01-128). Recuperado em 6 de julho, 2014, de <http://ntl.bts.gov/lib/18000/18200/18298/PB2001107716.pdf>.
- JAE. (1995). *Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*. Almada: JAE (Atual EP).
- Jawad, D., & Ozbay, K. (2006). *The discount rate in life cycle analysis of transportation projects* (Encontro anual). Washington, D.C.: TRB.
- Ji, Y., Nantung, T., Tompkins, B., & Harris, D. (2013). Evaluation for microsurfacing as pavement preservation treatment. *Journal of materials in civil engineering*, 540-547. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000568.
- Labi, S., Hwee, K. S., Lamptey, G., & Nunoo, C. (2006). *Long-term Benefits of Microsurfacing Applications in Indiana – Methodology and Case study* (Encontro anual). Washington, D.C.: TRB.
- Labi, S., Lamptey, G., & Kong, S. (2007). Effectiveness of Microsurfacing Treatments. *Journal of Transportation Engineering*, 133(5), 298-307. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:5(298)
- Lamptey, G., Labi, S., & Li, Z. (2008). Decision support for optimal scheduling of highway pavement preventive maintenance within resurfacing cycle. *Decision Support Systems*, 46, 376-387. doi: 10.1016/j.dss.2008.07.004
- Laboratório de Pavimentação. (2008). *Estudo laboratorial de comportamento à fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas mornas* (Relatório final). Porto Alegre.

- Maia, I. M. C. (2012). *Caracterização de patologias em pavimentos rodoviários*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, Portugal.
- Martinho, F., Santos, L. P., & Pais, J. C. (2004). Reciclagem de pavimentos rodoviários: seleção do processo construtivo.
- Miller, & Bellinger. (2003). *Distress identification manual for the long-term pavement performance program* [Manual]. McLean: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Morian, D. A. (2011). *Cost benefit analysis of including microsurfacing in pavement treatment strategies & cycle maintenance* (Relatório final). Harrisburg: PennDOT.
- Pais, J. C., Pereira, P. A., & Azevedo, M. C. M. (2000). A reflexão de fendas no dimensionamento de reforços de pavimentos flexíveis.
- Pereira, R. X. L. (2010). *Misturas betuminosas temperadas: estudo da interação aditivo-ligante*. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The Shell Bitumen handbook*. 5ª Edição. USA: ASCE Press.
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W. P., Suh, S., Weidema, B. P., & Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30, 701-720. doi: :10.1016/j.envint.2003.11.005
- Redelius, P., & Walter, J. (2005). *Bitumen emulsions*. Relatório técnico. Recuperado em 28 de maio, 2014, de <http://www.nynas.com/Global/Bitumen%20for%20paving%20applications/UK/33713.pdf>.
- Ribeiro, R. M. P. (2012). *Aplicação de mistura betuminosa aberta com betume modificado com alta incorporação de borracha na reabilitação de pavimentos rodoviários*. Tese de Mestrado, Instituto Politécnico de Viseu, Viseu, Portugal.

- Saling, P., Kicherer, A., Dittrich-Kramer, B., Wittlinger, R., Zombik, W., Schmidt, I., Schrott, W., & Schmidt, S. (2002). Eco-efficiency analysis by BASF: the method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 7(4), 203-218.
- Santos, J. M. R. (2010). *Materiais utilizados na construção de pavimentos rodoviários*. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Santos, M. J. L. (2009). *Dimensionamento de camadas de reforço de pavimentos rodoviários flexíveis*. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Silva, H. M. R. D. (2005). *Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado-mastique: Contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas*. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Minho, Portugal.
- Simões, J. A. (2008). *Pavimentos rodoviários flexíveis – exemplo de análise económica*. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Sinha, K. C., & Labi, S. (2007). *Transportation decision making – principles of project evaluation and programming*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- State of California Department of Transportation. (2003). *Technical Advisory Guide (TAG) for microsurfacing pilot projects*. Recuperado em 9 de julho, 2014, de <http://www.dot.ca.gov/hq/maint/TAGMicrosurfacingPilotProjects.pdf>.
- Takamura, K., Lok, K. P., & Wittlinger, R. (2001). *Microsurfacing for preventive maintenance: eco-efficient strategy*. Recuperado em 5 de julho, 2014, de [http://www.informe.basf.es/group/corporate/de\\_DE/function/conversions:/publishdownload/content/sustainability/eco-efficiency-analysis/images/CTAA\\_ecoefficiency.pdf](http://www.informe.basf.es/group/corporate/de_DE/function/conversions:/publishdownload/content/sustainability/eco-efficiency-analysis/images/CTAA_ecoefficiency.pdf).
- Transportation Research Board. (2004). *Optimal Timing of Pavement Preventive Maintenance Treatment Applications* (Relatório 523). Washington, D.C.
- Transportation Research Board. (2006). *Asphalt Emulsion Technology* (Circular E-C102). Washington, D.C.

- Transportation Research Board. (2010). *A Synthesis of Highway Practice*. Washington D.C.: Transportation Research Board.
- Uhlman, B. W., & Saling, P. (2010). Measuring and communicating sustainability through eco-efficiency analysis. *American Institute of Chemical Engineers*, 17-26d.
- Vicente, A. M. M. (2006). *A utilização de betumes modificados com borracha na reabilitação de pavimentos flexíveis*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Watson, D., & Jared, D. (1998). Georgia department of transportation's experience with microsurfacing. *Journal of the Transportation Research Record*, 1616(1), 42-46.
- Yao, J., & Weng, Q. (2012). Causes of longitudinal cracks on newly rehabilitated jointed concrete pavements. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 26(1), 84-94. doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000212

**Anexos**

Anexo A - Dimensionamento das estruturas de pavimentos iniciais ..... 92  
Anexo B - Dimensionamento de reforços estruturais para 10, 15 e 20 anos..... 95  
Anexo C - Constituições das misturas para análise ambiental ..... 101

## Anexo A - Dimensionamento das estruturas de pavimentos iniciais

CÁLCULO de Vb e VMA								
Designação	Observações	8b (kN/m <sup>3</sup> )	8a (kN/m <sup>3</sup> )	tb (%)	n (%)	Vb	Va	VMA
1ª tentativa	Desgaste	10,40	26,00	5,20	5,00	0,109	0,841	0,159
1ª tentativa	Macadame	10,40	25,20	4,20	8,00	0,085	0,835	0,165

CÁLCULO de Sb										
Designação	Observações	TS - (oC)	P25 - (0,1 mm)	Tab - (oC)	P25r - (0,1 mm)	Tabr - (oC)	IPen	V (km/h)	t - (s)	Sb - (MPa)
1ª tentativa	Desgaste	26,90	42,50	54,00	27,63	61,15	-0,109	50,00	0,02	25,7
1ª tentativa	Macadame	26,90	42,50	54,00	27,63	61,15	-0,109	50,00	0,02	25,7

CÁLCULO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE									
Designação	Observações	Vb - (%)	Va - (%)	Sm108	Sm3109	S68	S89	A	Em (form.) - (Pa)
1ª tentativa	Desgaste	10,93	84,07	9,99	10,59	0,65	0,46	9,60	4015359232
1ª tentativa	Macadame	8,50	83,50	9,96	10,58	0,59	0,47	9,62	4132547227

DANO DE FADIGA								
Designação	Observações	$\epsilon_t$	Vb - (%)	F	Em-(Pa)	N - (x 10 <sup>6</sup> )	N passa - (x 10 <sup>6</sup> )	DANO
1ª tentativa		0,000107	8,50	1,00	4132547227	13,97	11,83	85%

DANO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE					
Designação	Observações	$\epsilon_{dp}$	N - (x 10 <sup>6</sup> )	N passa	DANO
1ª tentativa	95% Sobrv.	0,000258	23,62	11,83	50%
1ª tentativa	85% Sobrv.	0,000258	43,76	11,83	27%

<b>BD</b>	<b>5</b>
<b>MB</b>	<b>8</b>
<b>MB</b>	<b>8</b>
<b>SBg</b>	<b>20</b>



CÁLCULO de Vb e VMA								
Designação	Observações	8b (kN/m <sup>3</sup> )	8a (kN/m <sup>3</sup> )	tb (%)	n (%)	Vb	Va	VMA
1ª tentativa	Desgaste	10,40	26,00	5,20	5,00	0,109	0,841	0,159
1ª tentativa	Macadame	10,40	25,20	4,20	8,00	0,085	0,835	0,165

CÁLCULO de Sb										
Designação	Observações	TS - (oC)	P25 - (0,1 mm)	Tab - (oC)	P25r - (0,1 mm)	Tabr - (oC)	IPen	V (km/h)	t - (s)	Sb - (MPa)
1ª tentativa	Desgaste	26,90	42,50	54,00	27,63	61,15	0,109	50,00	0,02	25,7
1ª tentativa	Macadame	26,90	42,50	54,00	27,63	61,15	0,109	50,00	0,02	25,7

CÁLCULO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE									
Designação	Observações	Vb - (%)	Va - (%)	Sm108	Sm3109	S68	S89	A	Em (form.) - (Pa)
1ª tentativa	Desgaste	10,93	84,07	9,99	10,59	0,65	0,46	9,60	4015359232
1ª tentativa	Macadame	8,50	83,50	9,96	10,58	0,59	0,47	9,62	4132547227

DANO DE FADIGA								
Designação	Observações	et	Vb - (%)	F	Em-(Pa)	N - (x 10 <sup>6</sup> )	N passa - (x 10 <sup>6</sup> )	DANO
1ª tentativa		0,000096	8,50	1,00	4132547227	24,88	19,73	79%

DANO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE					
Designação	Observações	edp	N - (x 10 <sup>6</sup> )	N passa	DANO
1ª tentativa	95% Sobrv.	0,000230	37,84	19,73	52%
1ª tentativa	85% Sobrv.	0,000230	70,10	19,73	28%

BD	5
MB	9
MB	9
SBg	20

CÁLCULO de Vb e VMA								
Designação	Observações	8b (kN/m3)	8a (kN/m3)	tb (%)	n (%)	Vb	Va	VMA
1ª tentativa	Desgaste	10,40	26,00	5,20	5,00	0,109	0,841	0,159
1ª tentativa	Macadame	10,40	25,20	4,20	8,00	0,085	0,835	0,165

CÁLCULO de Sb										
Designação	Observações	TS - (oC)	P25 - (0,1 mm)	Tab - (oC)	P25r - (0,1 mm)	Tabr - (oC)	IPen	V (km/h)	t - (s)	Sb - (MPa)
1ª tentativa	Desgaste	26,90	42,50	54,00	27,63	61,15	- 0,109	50,00	0,02	25,7
1ª tentativa	Macadame	26,90	42,50	54,00	27,63	61,15	- 0,109	50,00	0,02	25,7

CÁLCULO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE									
Designação	Observações	Vb - (%)	Va - (%)	Sm108	Sm3109	S68	S89	A	Em (form.) - (Pa)
1ª tentativa	Desgaste	10,93	84,07	9,99	10,59	0,65	0,46	9,60	4015359232
1ª tentativa	Macadame	8,50	83,50	9,96	10,58	0,59	0,47	9,62	4132547227

DANO DE FADIGA								
Designação	Observações	et	Vb - (%)	F	Em-(Pa)	N - (x 10^6)	N passa - (x 10^6)	DANO
1ª tentativa		0,000091	8,50	1,00	4132547227	32,87	29,30	89%

DANO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE					
Designação	Observações	edp	N - (x 10^6)	N passa	DANO
1ª tentativa	95% Sobrv.	0,000217	47,43	29,30	62%
1ª tentativa	85% Sobrv.	0,000217	87,87	29,30	33%

BD	5
MB	9
MB	10
SBg	20

## Anexo B - Dimensionamento de reforços estruturais para 10, 15 e 20 anos

## 10 Anos (1º Reforço)

N a atingir	3,49
-------------	------

E Inicial	25%	20%
BB 4015	1003,75	803
MB 4133	1033,25	826,6
MB 4133	1033,25	826,6
Nadmissível (mais condicionante)	7,4	3,48

Reforço	5 cm de BB(E=4015)	N 0-7,5	1872410
		N 0-12,5	3464250
		N80 (7,5-12,5)	7163280

## DANO DE FADIGA

Designação	Observações	et	Vb - (%)	F	Em-(Pa)	N - (x 10 <sup>6</sup> )	N passa - (x 10 <sup>6</sup> )	DANO
1ª tentativa		0,000175	8,50	1,00	826600000	21,94	7,16	33%

## DANO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Designação	Observações	edp	N - (x 10 <sup>6</sup> )	N passa	DANO
1ª tentativa	95% Sobrv.	0,000344	7,46	7,16	96%
1ª tentativa	85% Sobrv.	0,000344	13,82	7,16	52%

<b>Reforço</b>	<b>5</b>		4015
<b>BD</b>	<b>5</b>		803,00
<b>MB</b>	<b>8</b>	E	826,60
<b>MB</b>	<b>8</b>		826,60
<b>SBg</b>	<b>20</b>		217
Fundação	<b>Infinita</b>		100

10 Anos (2.º Reforço)

N a atingir	1,87
-------------	------

E Inicial		72%	71,5%
BB (1.º Reforço)	4015	2890,8	2870,725
BB	803,00	578,16	574,145
MB	826,60	595,152	591,019
MB	826,60	595,152	591,019
Nadmissível (mais condicionante)		1,92	1,87

Reforço	4 cm de BB (E=4015)	N 0-11,25	3036560
		N 0-16,25	4880610
		N80 (11,25-16,25)	8298225

DANO DE FADIGA								
Designação	Observações	et	Vb - (%)	F	Em-(Pa)	N - (x 10 <sup>6</sup> )	N passa - (x 10 <sup>6</sup> )	DANO
1ª tentativa		0,000154	8,50	1,00	574145000	80,30	8,30	10%

DANO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE					
Designação	Observações	edp	N - (x 10 <sup>6</sup> )	N passa	DANO
1ª tentativa	95% Sobrv.	0,000308	11,65	8,30	71%
1ª tentativa	85% Sobrv.	0,000308	21,58	8,30	38%

<b>Reforço</b>	<b>4</b>	4015
BD	5	2870,73
BD	5	574,15
MB	8	591,02
MB	8	591,02
SBg	20	217,00
Fundação	<b>Infinita</b>	100,00

## 15 Anos (1º Reforço)

N a atingir	6,22
-------------	------

E Inicial		25%	20%	23,0%	23,05%
BB	4015	1003,75	803	923,45	925,4575
MB	4133	1033,25	826,6	950,59	952,6565
MB	4133	1033,25	826,6	950,59	952,6565
Nadmissível (mais condicionante)		8,95	3,29	6,2	6,26

Reforço	4 cm de BB(E=4015)	N 0-11,25	3036560
		N 0-16,25	4880610
		N80 (11,25-16,25)	8298225

DANO DE FADIGA								
Designação	Observações	et	Vb - (%)	F	Em-(Pa)	N - (x 10 <sup>6</sup> )	N passa - (x 10 <sup>6</sup> )	DANO
1ª tentativa		0,000153	8,50	1,00	952656500	33,13	8,30	25%

DANO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE					
Designação	Observações	edp	N - (x 10 <sup>6</sup> )	N passa	DANO
1ª tentativa	95% Sobrv.	0,000304	12,28	8,30	68%
1ª tentativa	85% Sobrv.	0,000304	22,74	8,30	36%

<b>Reforço</b>	<b>5</b>		4015,00
<b>BD</b>	<b>5</b>		925,46
<b>MB</b>	<b>9</b>		952,66
<b>MB</b>	<b>9</b>	E	952,66
<b>SBg</b>	<b>20</b>		217,00
Fundação	<b>Infinita</b>		100,00

## 15 Anos (2º Reforço)

N a atingir	3,07
-------------	------

E Inicial		70%	72%	71,5%
BB (1º Reforço)	4015	2810,5	2890,8	2870,725
BB	925,46	647,822	666,3312	661,7039
MB	952,66	666,862	685,9152	681,1519
MB	952,66	666,862	685,9152	681,1519
Nadmissível (mais condicionante)		2,86	3,2	3,12

Reforço	3 cm de BB(E=4015)	N 0-15	4385170
		N 0-20	6521400
		N80 (15-20)	9613035

## DANO DE FADIGA

Designação	Observações	et	Vb - (%)	F	Em-(Pa)	N - (x 10 <sup>6</sup> )	N passa - (x 10 <sup>6</sup> )	DANO
1ª tentativa		0,000139	8,50	1,00	681151900	97,46	9,61	10%

## DANO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Designação	Observações	edp	N - (x 10 <sup>6</sup> )	N passa	DANO
1ª tentativa	95% Sobrv.	0,000306	11,96	9,61	80%
1ª tentativa	85% Sobrv.	0,000306	22,15	9,61	43%

<b>Reforço</b>	<b>3</b>	4015
BD	<b>5</b>	2870,73
<b>BD</b>	<b>5</b>	661,70
<b>MB</b>	<b>9</b>	681,15
<b>MB</b>	<b>9</b>	681,15
<b>SBg</b>	<b>20</b>	217,00
Fundação	<b>Infinita</b>	100,00

## 20 Anos (1º Reforço)

N a atingir	8,22
-------------	------

E Inicial		25%	24%	24,5%	24,7%	24,65%	24,6%
BB	4015	1003,75	963,6	983,675	991,705	989,6975	987,69
MB	4133	1033,25	991,92	1012,585	1020,851	1018,7845	1016,718
MB	4133	1033,25	991,92	1012,585	1020,851	1018,7845	1016,718
Nadmissível (mais condicionante)		8,67	7,32	8,02	8,35	8,29	8,23

Reforço	6 cm de BB (E=4015)	N 0-15	4385165,7
		N 0-25	9120453,9
		N80 (15-25)	21308796,9

## DANO DE FADIGA

Designação	Observações	et	Vb - (%)	F	Em-(Pa)	N - (x 10 <sup>6</sup> )	N passa - (x 10 <sup>6</sup> )	DANO
1ª tentativa		0,000135	8,50	1,00	1016718000	55,64	21,31	38%

## DANO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Designação	Observações	edp	N - (x 10 <sup>6</sup> )	N passa	DANO
1ª tentativa	95% Sobrv.	0,000259	23,47	21,31	91%
1ª tentativa	85% Sobrv.	0,000259	43,49	21,31	49%

<b>Reforço</b>	<b>6</b>		4015,00
<b>BD</b>	<b>5</b>		987,69
<b>MB</b>	<b>9</b>	E	1016,72
<b>MB</b>	<b>10</b>		1016,72
<b>SBg</b>	<b>20</b>		217,00
Fundação	<b>Infinita</b>		100,00

## 20 Anos (2º Reforço)

N a atingir	5,8675
-------------	--------

E Inicial	40%	60%	70%	75%	71%	71,5%
BB (1º Reforço)	4015	1606	2409	2810,5	3011,25	2870,725
BB	987,69	395,076	592,614	691,383	740,7675	706,19835
MB	1016,72	406,688	610,032	711,704	762,54	726,9548
MB	1016,72	406,688	610,032	711,704	762,54	726,9548
Nadmissível (mais condicionante)	0,53	2,86	5,38	7,17	5,71	5,88

Reforço	4 cm de BB(E=4015)	N 0-22,5	7757270
		N 0-32,5	14112000
		N80 (22,5-32,5)	28596285

## DANO DE FADIGA

Designação	Observações	et	Vb - (%)	F	Em-(Pa)	N - (x 10 <sup>6</sup> )	N passa - (x 10 <sup>6</sup> )	DANO
1ª tentativa		0,000124	8,50	1,00	706198350	162,02	28,60	18%

## DANO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Designação	Observações	edp	N - (x 10 <sup>6</sup> )	N passa	DANO
1ª tentativa	95% Sobrv.	0,000242	30,56	28,60	94%
1ª tentativa	85% Sobrv.	0,000242	56,61	28,60	51%

<b>Reforço</b>	<b>4</b>	4015
<b>BD</b>	<b>6</b>	2870,73
<b>BD</b>	<b>5</b>	706,20
<b>MB</b>	<b>9</b>	726,95
<b>MB</b>	<b>10</b>	726,95
<b>SBg</b>	<b>20</b>	217,00
Fundação	<b>Infinita</b>	100,00



## Anexo C - Constituições das misturas para análise ambiental

Camadas	Betume (kg/ton)	Agregado (kg/ton)	Cal Hidráulica (kg/ton)
Betão Betuminoso	52	929	19
Macadame Betuminoso	42	958	0

Tempo de vida	Camadas	Densidade (ton/m <sup>3</sup> )	Espessura (m)	Betume(ton/m <sup>2</sup> )	Agregado(ton/m <sup>2</sup> )	CalHidráulica (ton/m <sup>2</sup> )	Mistura (ton/m <sup>2</sup> )
10 Anos	BB	2,3000	0,0500	0,0060	0,1068	0,0022	0,1150
	MB	2,3000	0,1600	0,0155	0,3525	0,0000	0,3680
15 Anos	BB	2,3000	0,0500	0,0060	0,1068	0,0022	0,1150
	MB	2,3000	0,1800	0,0174	0,3966	0,0000	0,4140
20 Anos	BB	2,3000	0,0500	0,0060	0,1068	0,0022	0,1150
	MB	2,3000	0,1900	0,0184	0,4186	0,0000	0,4370

Tempo	Intervenção	Densidade (ton/m <sup>3</sup> )	Espessura (m)	Betume(ton/m <sup>2</sup> )	Agregado(ton/m <sup>2</sup> )	CalHidráulica (ton/m <sup>2</sup> )	Mistura (ton/m <sup>2</sup> )	Emulsão (ton/m <sup>2</sup> )
10 Anos	1º Reforço	2,3000	0,0500	0,0060	0,1068	0,0022	0,1150	0,001
	2º Reforço	2,3000	0,0400	0,0048	0,0855	0,0017	0,0920	0,001
15 Anos	1º Reforço	2,3000	0,0500	0,0060	0,1068	0,0022	0,1150	0,001
	2º Reforço	2,3000	0,0300	0,0036	0,0641	0,0013	0,0690	0,001
20 Anos	1º Reforço	2,3000	0,0600	0,0072	0,1282	0,0026	0,1380	0,001
	2º Reforço	2,3000	0,0400	0,0048	0,0855	0,0017	0,0920	0,001

Constituinte	Quantidade (kg/ton)
Agregado	809
Emulsão	105
Cimento	4
Aditivo	1
Água	81

\*Formulação de microaglomerado retirada de Ecoasfalt (2010)

Constituinte	Densidade Microaglomerado Tipo 3 (ton/m <sup>2</sup> )	Densidade Constituintes (ton/m <sup>2</sup> )
Agregado	0,014	0,011326
Emulsão	0,014	0,00147
Cimento	0,014	0,000056
Aditivo	0,014	0,0000112
Água	0,014	0,0011326

\*Densidade de microaglomerado retirada de ISSA (2010)

Constituinte	Quantidade (kg/ton)*
Betume	474
Aditivo	66
Emulsionante	7
Água	438

\*Formulação de emulsão betuminosa retirada de BASF (2010)

Constituinte	Densidade Constituintes (ton/m <sup>2</sup> de microaglomerado)
Betume	0,00069678
Aditivo	0,00009702
Emulsionante	0,00001029
Cimento	0,00002205
Água	0,00064386