



**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**

**ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL

## **Reciclagem de Pavimentos na Engenharia Rodoviária**

**Henrique José Henriques Zacarias Cabeças**

Orientador: Dr.<sup>ª</sup> Maria Teresa Guerra Pinheiro Alves

Co-Orientador: Dr.<sup>º</sup> Soheyl Sazedj

**Mestrado em Engenharia Civil**

Área de especialização: Construção

Dissertação

Évora, Abril 2014

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi elaborado sob a orientação da Doutora Maria Teresa Guerra Pinheiro Alves da Universidade de Évora e sob a coorientação do Doutor Soheyl Sazedj da Universidade de Évora, a ambos agradeço a disponibilidade com que me motivaram, pela sua orientação, ensinamentos e conselhos dados para a elaboração da dissertação sem os quais dificilmente teria conseguido levar esta tarefa até ao fim. Mais, agradeço pela revisão e sugestões prestadas, o muito obrigado.

Um agradecimento muito especial ao meu irmão pela ajuda nesta dissertação, pela paciência, compreensão, apoio e encorajamento, pela revisão e sugestões prestadas.

Ao meu colega e amigo de trabalho e de mestrado Eng.º Gil Dores pela ajuda, companheirismo e amizade ao longo deste tempo.

Quero agradecer aos Eng.º (s) Sérgio Mendes, Augusto Fernandes, Pedro Seixas, Juan Francisco Rebosa, Marco Simões, Nuno Carapuça, Bruno Rodrigues, João Almeida, aos Sr. (s) José Carlos Rodrigues, Jorge Moura pelos elementos e material fornecido e informação complementar.

Quero deixar também um agradecimento à Eng<sup>a</sup> Ana Isabel Soares Cardoso pela documentação fornecida e disponibilidade que me ajudou para completar a dissertação.

Aos Eng.º (s) Miguel López Bachiller, Martin Diekmann, um agradecimento pelas informações disponibilizadas que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Por fim ao resto da minha família pelo apoio e encorajamento. Ao meu pai um agradecimento muito especial.

Dedico este trabalho ao meu pai, ao meu irmão, aos meus tios, e especialmente à minha mãe que já não está presente mas que está comigo todos os dias.

## **RESUMO**

Numa primeira fase deste trabalho inclui-se o levantamento das principais patologias que aparecem nos pavimentos rodoviários, assim como, da reabilitação e conservação dos mesmos através da aplicação de técnicas de reciclagem. Seguidamente é analisado um caso de estudo, tendo, para o efeito, sido elaborado um inquérito, o qual foi enviado a várias empresas, com o objetivo de facultarem opiniões, opções e informações sobre, entre outros aspetos, a viabilidade económica da aplicação das técnicas de reciclagem nos pavimentos degradados, em substituição das técnicas tradicionais.

### **Palavras-chave**

Pavimentos rodoviários

Reabilitação de pavimentos

Reciclagem de pavimentos

# **PAVEMENT RECYCLING ROAD ENGINEERING**

## **ABSTRACT**

Initially this work includes a survey of the main pathologies that appear on road surfaces, as well as the rehabilitation and conservation of the same by applying recycling techniques. The second part will treat the recycling on site with a cold binder such as cement. Then be analyzed a case study and a survey of the industry, with the objective to verify the practical experience and the economic viability of applying the recycling techniques on degraded pavement.

## **Key-words**

Road pavements

Pavement rehabilitation

Recycling pavements

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ABGE – Agregado Britado de granulometria Extensa

AC - Asphalt Concrete

CCP - Código dos Contratos Públicos

D.E – Direcção de Estradas

EAPA - European Asphalt Pavement Association

E.P. - Estradas de Portugal

J.A.E – Junta Autónoma das Estradas

LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MACOPAV- Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional

RAP - Reclaimed Asphalt Pavement

RCD – Resíduos de demolição e Construção

RJUE- Regime Jurídico da Urbanização e da Edificação

# ÍNDICE GERAL

|  |    |
|--|----|
| <b>OBJECTIVO</b> .....   | 1  |
| <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | 3  |
| <b>1. ESTADO DE ARTE</b> .....   | 7  |
| <b>1.1 LEGISLAÇÃO</b> .....  | 7  |
| <b>1.2 CARACTERIZAÇÃO DE PAVIMENTOS</b> .....                                      | 9  |
| <b>1.3 PATOLOGIAS E DEGRADAÇÃO NOS PAVIMENTOS</b> .....                            | 14 |
| <b>1.4 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS</b> .....                              | 25 |
| <b>1.5 ORIGEM DOS PAVIMENTOS RECICLADOS</b> .....                                  | 28 |
| <b>1.6 TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS</b> .....                              | 31 |
| <b>1.6.1 RECICLAGEM <i>IN SITU</i></b> .....                                       | 34 |
| 1.6.1.1 RECICLAGEM <i>IN SITU</i> , A FRIO, COM CIMENTO.....                       | 36 |
| 1.6.1.2 RECICLAGEM <i>IN SITU</i> , A FRIO, COM EMULSÃO BETUMINOSA .....           | 37 |
| 1.6.1.3 RECICLAGEM <i>IN SITU</i> , A FRIO, COM BETUME-ESPUMA .....                | 39 |
| 1.6.1.4 RECICLAGEM <i>IN SITU</i> , A FRIO, COM CIMENTO E EMULSÃO.....             | 41 |
| 1.6.1.5 RECICLAGEM <i>IN SITU</i> , A QUENTE, COM BETUME /<br>REJUVENESCEDOR ..... | 41 |
| <b>1.6.2 RECICLAGEM EM CENTRAL</b> .....   | 43 |
| 1.6.2.1 RECICLAGEM EM CENTRAL, A FRIO, COM EMULSÃO<br>BETUMINOSA.....              | 44 |
| 1.6.2.2 RECICLAGEM EM CENTRAL, A FRIO, COM BETUME-ESPUMA.....                      | 44 |
| 1.6.2.3 RECICLAGEM EM CENTRAL, SEMI-QUENTE, COM EMULSÃO<br>BETUMINOSA.....         | 45 |
| 1.6.2.4 RECICLAGEM EM CENTRAL, A QUENTE, COM BETUME.....                           | 45 |
| 1.6.2.5 CENTRAL CONTÍNUA E DESCONTÍNUA.....  | 51 |
| <b>1.6.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS</b> .....  | 54 |
| 1.6.3.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA RECICLAGEM <i>IN SITU</i> .....                | 54 |
| 1.6.3.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA RECICLAGEM EM CENTRAL..                        | 55 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>2. CASO DE ESTUDO</b> .....                                   | 57  |
| <b>2.1 METODOLOGIA</b> .....                                     | 57  |
| <b>2.2 ANÁLISE ÀS RESPOSTAS DAS EMPRESAS AO INQUÉRITO</b> .....  | 60  |
| <b>2.3 ANÁLISE COMPARATIVA</b> .....                             | 70  |
| <b>3. CONCLUSÕES</b> .....                                       | 93  |
| <b>DESENVOLVIMENTOS FUTUROS E O INCENTIVO À RECICLAGEM</b> ..... | 96  |
| <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....  | 98  |
| <b>ANEXOS</b> .....  | 101 |
| <b>EMPRESA A</b> .....   | 101 |
| <b>EMPRESA B</b> .....   | 104 |
| <b>EMPRESA C</b> .....   | 112 |
| <b>EMPRESA D</b> .....   | 116 |
| <b>EMPRESA E</b> .....   | 117 |
| <b>EMPRESA F</b> .....   | 119 |

## ÍNDICE DE FIGURAS:

|   |    |
|---|----|
| Figura n.º 1 - Pavimento rodoviário em betão betuminoso .....   | 3  |
| Figura n.º 2 - Central descontínua na produção de betão betuminoso (fig. RM-200 com torre dosificadora mezcladora INNOVA) ..... | 4  |
| Figura n.º 3 - Conservação e manutenção pontual de pavimentos rodoviários.....  | 5  |
| Figura n.º 4 - Fresagem do pavimento para prevenir a degradação, evitando, assim, a entrada em colapso do pavimento.....        | 6  |
| Figura n.º 5 - Material fresado em vazadoiro para ser reutilizado e transportado para central .....                             | 8  |
| Figura n.º 6 - Reciclagem de pavimento rodoviário <i>in situ</i> com incorporação de material fresado a 100% ..                 | 9  |
| Figura n.º 7 - Pavimento tipo flexível.....   | 10 |
| Figura n.º 8 - Pavimento tipo semi-rígido .....   | 10 |
| Figura n.º 9 - Pavimento tipo rígido.....   | 11 |
| Figura n.º 10 - Estado do pavimento ao longo do tempo e tempo útil de vida (Batista, 2004).....                                 | 15 |
| Figura n.º 11 - Fendilhamento do tipo pele de crocodilo (Ferreira, 2009).....   | 18 |
| Figura n.º 12 - Fendilhamento (FHWA, 2003).....   | 19 |
| Figura n.º 13 - Rodeiras (Freire, 2004).....  | 19 |
| Figura n.º 14 – Rodeiras.....   | 20 |
| Figura n.º 15 – Processo construtivo – reciclagem <i>in situ</i> a frio.....  | 35 |
| Figura n.º 16 – Esquema de produção da mistura reciclada a frio <i>in situ</i> com emulsão betuminosa (Wirtgen, 2006).....      | 38 |
| Figura n.º 17 - Fases da evolução da reciclagem a frio <i>in situ</i> com emulsão betuminosa (Baptista, 2006).....              | 39 |
| Figura n.º 18 - Processo de obtenção betume-espuma.....   | 40 |
| Figura n.º 19 – Esquema de produção da mistura reciclada a frio <i>in situ</i> com betume-espuma (Wirtgen, 2006).....           | 40 |
| Figura n.º 20 - Fases da evolução da sequência da reciclagem <i>in situ</i> com betume-espuma (Baptista, 2006).....             | 41 |
| Figura n.º 21 – Fases e sequência da reciclagem a quente <i>in situ</i> (Baptista, 2006).....                                   | 42 |
| Figura n.º 22 – Processo construtivo – reciclagem de pavimentos em central.....   | 43 |
| Figura n.º 23 - Esquema da reciclagem a frio em central com betume-espuma (Baptista, 2006).....                                 | 45 |
| Figura n.º 24 - Esquema de reciclagem a quente em central (Baptista, 2006) .....  | 47 |
| Figura n.º 25 – Fresadora.....  | 47 |
| Figura n.º 26 - Material fresado.....   | 48 |
| Figura n.º 27 -Transporte de material fresado.....  | 48 |
| Figura n.º 28 - Pavimento fresado pronto para receber o novo pavimento.....   | 49 |
| Figura n.º 29 – Espalhadora.....  | 49 |

|   |    |
|---|----|
| Figura n.º 30 - Cilindro misto (pneus e de rolo).....   | 50 |
| Figura n.º 31 - Esquema de uma central descontínua (Método de Reclaimed Asphalt Pavement, RAP, a frio), European Asphalt Pavement Association (EAPA) 1998 (Baptista, 2006).....   | 52 |
| Figura n.º 32 - Esquema de uma central descontínua (Método de Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) a quente, European Asphalt Pavement Association (EAPA), 1998 (Baptista, 2006).....   | 52 |
| Figura n.º 33 - Esquema de uma central contínua, European Asphalt Pavement Association (EAPA), 1998 (Baptista, 2006).....   | 53 |
| Figura n.º 34 - Máquina recicladora WR 2500 S, Empresa Construções JJR, S.A.....  | 78 |
| Figura n.º 35 - Misturadora WM 1000 acoplada à recicladora para a operação de reciclagem a frio in situ com incorporação de calda de cimento, Wirtgen Group.....  | 79 |
| Figura n.º 36 - Recicladora WR 2500 S (Wirtgen, 2006).....  | 79 |
| Figura n.º 37 - Processo de reciclagem <i>in situ</i> a frio de pavimentos rodoviários utilizando a máquina recicladora (Couto, 2009).....  | 80 |
| Figura n.º 38 - Sequência de equipamento para a execução dos trabalhos de reciclagem <i>in situ</i> a frio com cimento (Gomes, 2009).....   | 80 |
| Figura n.º 39 - motoniveladora, equipamento utilizado após compactação do pavimento reciclado pelo cilindro de rolos, para regularização e nivelamento do pavimento, Changlin, Motoniveladora PY190H.....   | 81 |
| Figura n.º 40 - Cilindro de pneus, equipamento utilizado após a utilização da motoniveladora.....   | 81 |
| Figura n.º 41 - Cilindro de rolos, equipamento a ser utilizado após o pavimento estar reciclado.....  | 82 |
| Figura n.º 42 - Trabalhos aplicando o método tradicional e técnicas de reciclagem <i>in situ</i> , a frio, com cimento.....   | 83 |
| Figura n.º 43 - Trabalhos aplicando o método tradicional.....   | 84 |
| Figura n.º 44 - Processo construtivo do método tradicional.....   | 85 |
| Figura n.º 45 - Curva granulométrica obtida (Apresentação da empreitada – E.N. 226, km 14,000 ao km 64,000, beneficiação entre Lamego e Ponte do Abade – reciclagem <i>in situ</i> com cimento do pavimento existente, autorizado por Rodrigues, Bruno, empresa Construções JJR& Filhos, S.A., Julho 2007)..... | 90 |
| Figura n.º 46 - Estrutura do pavimento existente antes da execução dos trabalhos de reabilitação.....   | 91 |
| Figura n.º 47 - Estrutura do pavimento depois da execução dos trabalhos de reabilitação.....  | 91 |

## ÍNDICE DE QUADROS:

|  |    |
|--|----|
| Quadro n.º 1 – Tipos de deformação nos pavimentos flexíveis (Alves, 2007; Branco e Pereira, 2006).....   | 22 |
| Quadro n.º 2 – Tipos de fendilhamento nos pavimentos flexíveis (Alves, 2007; Branco e Pereira, 2006).....  | 23 |
| Quadro n.º 3 – Tipos de desagregação e polimento da camada de desgaste nos pavimentos flexíveis (Alves, 2007; Branco e Pereira, 2006).....   | 24 |
| Quadro n.º 4 – Tipos de movimento de materiais nos pavimentos flexíveis (Alves, 2007; Branco e Pereira, 2006).....   | 25 |
| Quadro n.º 5 – Estatísticas de reciclagem de pavimentos em 2010 (EAPA, 2010).....  | 27 |
| Quadro n.º 6 - Obras com a utilização dos processo da reciclagem em Portugal (Martinho, Pais e Picado-Santos, 2004).....   | 28 |
| Quadro n.º 7 - Temperatura como fator determinante na reciclagem de pavimentos (Batista, 2009).....  | 32 |
| Quadro n.º 8 - Técnicas de reciclagem (Baptista, 2006).....  | 32 |
| Quadro n.º 9 – Mapa de trabalhos.....  | 57 |
| Quadro n.º 10 –Resumo das soluções adotadas.....   | 63 |
| Quadro n.º 11 - Mapa de trabalho adaptado à reciclagem de pavimentos <i>in situ</i> a frio com cimento (elaborado pela empresa A, em resposta à alínea g) do n.º 2 do inquérito).....  | 67 |
| Quadro n.º 12 - Tabela de custos referente à pavimentação corrente.....  | 71 |
| Quadro n.º 13 - Tabela de custos referente à pavimentação com material reciclado.....  | 72 |
| Quadro n.º 14 - Custo diário das diversas máquinas que integram a reciclagem <i>in situ</i> , a frio com cimento.....  | 74 |
| Quadro n.º 15 - Custo total diário das máquinas que integram a reciclagem <i>in situ</i> , a frio com cimento....  | 74 |
| Quadro n.º 16 – Rendimentos por m2.....  | 75 |
| Quadro n.º 17 - Custo total por m2 sem custos indirectos e sem lucro.....  | 75 |
| Quadro n.º 18 - Trabalhos aplicando o método tradicional.....  | 76 |
| Quadro n.º 19 - Trabalhos aplicando as técnicas de reciclagem <i>in situ</i> , a frio com cimento.....   | 77 |
| Quadro n.º 20 - Estimativa de custos para as soluções apresentadas pelas empresas.....   | 87 |
| Quadro n.º 21 - Resistências obtidas (Apresentação da empreitada – E.N. 226, km 14,000 ao km 64,000, beneficiação entre Lamego e Ponte do Abade – reciclagem <i>in situ</i> com cimento do pavimento existente, autorizado por Rodrigues, Bruno, empresa Construções JJR& Filhos, S.A., Julho 2007)..... | 90 |

## OBJECTIVO

O processo da reciclagem, que traz reconhecidas e óbvias vantagens no âmbito da sustentabilidade ambiental, económica e social (Moreira, 2005), será o tema desenvolvido ao longo da dissertação. Pretende-se que a reciclagem seja uma boa opção no presente e no futuro. A escassez dos recursos naturais e a subida do petróleo são um bom exemplo para que haja essa alternativa.

As estradas portuguesas estão cada vez mais envelhecidas e degradadas. Os utentes que circulam com veículos pesados face à crise e ao aumento do preço das portagens estão a evitar consideravelmente o auto estradas em proveito da circulação nas estradas nacionais e secundárias. A estrutura dos pavimentos está a ser sacrificada consideravelmente levando-a ao estado de ruína sendo o fenómeno da fadiga e das deformações permanentes os responsáveis, pelo que será necessário envergar para uma solução de reabilitação, conservação e manutenção mais benéfica. Pretende-se dar a conhecer a composição da estrutura de pavimento, das suas características e dos diversos fenómenos que originam a sua degradação.

Será dado conhecimento das várias técnicas de reciclagem de pavimentos, bem como das que mais se adequam à execução de trabalhos em função da qualidade funcional e/ou estrutural de um dado pavimento. Quando um pavimento está sujeito a cargas e à ação das condições climáticas, o seu tempo útil de vida decresce, pelo que, face ao tipo de patologias e degradação que apresenta, assim será aplicada a técnica de reciclagem mais apropriada.

Pretende-se, por isso, com esta dissertação averiguar se a reciclagem de pavimentos, *in situ*, funciona ou não e se de facto existe viabilidade económica da reciclagem de pavimentos em Portugal, comparativamente com o método convencional.

Em traços gerais para esta dissertação será abordada a técnica de reciclagem baseada na reutilização do material desagregado e fresado com a finalidade de reaproveitamento total desse material, ou seja a 100%, *in situ*, a frio, com cimento em estruturas de pavimentos que se encontram bastante degradadas. Com vista a sustentar o ponto de vista apresentado nesta dissertação, a partir da análise de um caso de estudo verificar-se-á se

efetivamente a reciclagem de pavimentos é ou não uma boa opção em relação ao método convencional.

A metodologia efetuada para o desenvolvimento desta dissertação pode ser referenciada em três fases. Uma primeira fase pela caracterização dos pavimentos rodoviários, para dar uma ideia da constituição das diversas camadas de pavimento, da degradação e patologias a que o pavimento está sujeito ao longo do seu período de vida. Numa segunda fase será abordada uma descrição dos diversos processos de reciclagem. Por último, será realizada através de um caso de estudo e de inquéritos a empresas a viabilidade económica da reciclagem de pavimentos como alternativa ao método convencional.

## INTRODUÇÃO

O pavimento rodoviário é um meio de contacto e de comunicação entre as populações, possibilitando a mobilidade do tráfego em geral, bem como o desenvolvimento económico e social, (figura n.º 1, exemplo de um pavimento rodoviário). Requer, por isso, uma atenção especial de modo a permitir a existência de condições necessárias para que os seus utentes se sintam bem.



Figura n.º 1 - Pavimento rodoviário em betão betuminoso

Hoje em dia, pensa-se seriamente no tempo útil de vida de um pavimento, o qual, devido à ação direta do tráfego e dos agentes atmosféricos, vai ficando, com o passar dos anos, debilitado e degradado. Assim, atualmente, na execução de reforços que asseguram a sua estabilidade e durabilidade o objetivo é não destruí-lo, mas sim prolongar o seu tempo útil de vida através da sua reconstrução e reabilitação.

O impacto social, ambiental e económico é um fator importante para o desenvolvimento das características dos pavimentos rodoviários, sem esquecer, naturalmente, a segurança e a comodidade das estradas (Ferreira, 2009).

De facto, a segurança, conforto e a comodidade são aspetos que estão muito relacionados com a inovação, a evolução e a tecnologia das estradas, no sentido de se melhorarem as condições de uso dos pavimentos (Lopes, 2011).

A inovação rodoviária, que é caracterizada presentemente pela sua sustentabilidade, surge com o objetivo de reduzir os efeitos nocivos no meio

ambiente aquando da construção, conservação e manutenção das estradas <sup>1</sup>. Esta questão tem merecido ultimamente bastante atenção, quer a nível da comunidade europeia, quer a nível mundial. Nesse sentido, uma das técnicas inovadoras que está a ser utilizada consiste na reciclagem de pavimentos rodoviários. Esta inovação é um ponto-chave para o desenvolvimento da tecnologia de construção de vias de comunicação de modo a melhorar no que toca à emissão dos gases que provocam o efeito de estufa na atmosfera (3.<sup>as</sup> Jornadas CEPESA Betumes/Centro Rodoviário Português, 2011). A temperatura de fabrico das misturas betuminosas nas centrais betuminosas (figura n.º 2) é, sem dúvida, o ponto fulcral na libertação de gases; assim, a tendência atual vai no sentido de melhorar este aspeto, promovendo as técnicas da reciclagem, sendo necessário para isso reduzir a temperatura de fabrico das referidas misturas. Pretende-se que com a utilização de métodos realizados através das diversas experiências a utilização das misturas seja a mais adequada ao fim que se pretende na defesa do meio ambiente.

Reduzir os custos da construção também é um dado importante a ter em conta e cuja resposta só poderá ser dada através do avanço tecnológico.



Figura n.º 2 - Central descontínua na produção de betão betuminoso (fig. RM-200 com torre dosificadora mezcladora INNOVA) <sup>2</sup>

<sup>1</sup> [http://www.crp.pt/docs/A45S134-148\\_Art\\_T5\\_7CRP\\_2013.pdf](http://www.crp.pt/docs/A45S134-148_Art_T5_7CRP_2013.pdf), acedido a 28-12-2013

<sup>2</sup> Inrame, <http://www.inrame.com/productos/plantas-asfalticas/>, acedido a 18-08-2012.

A redução dos riscos de exposição dos operários na fabricação e espalhamento das misturas betuminosas a altas temperaturas também é importante para a salvaguarda da saúde dos operários (3.<sup>as</sup> Jornadas CEPISA Betumes/Centro Rodoviário Português, 2011). Deseja-se, ainda, a qualidade, de forma a assegurar um excelente comportamento mecânico e a melhorar a durabilidade das camadas betuminosas a fim de evitar grandes custos nas posteriores operações de conservação das vias de comunicação. Em resultado deste desenvolvimento sustentável os promotores da obra acabam por ter benefícios, pois terão menos despesa com o trabalho efetuado.

As técnicas de reciclagem de pavimentos podem ajudar no desenvolvimento da construção sustentável, nomeadamente, na diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera e na redução do consumo energético (Cunha, 2010). A conservação e manutenção das estradas é sempre útil e desejável, sendo de grande importância a consolidação e valorização patrimonial das vias, contribuindo, assim, para que os pavimentos não percam as suas qualidades funcionais e estruturais, de modo a que haja, entre outros aspetos já abordados, uma diminuição dos acidentes rodoviários. Se as operações de conservação e manutenção das estradas forem realizadas a tempo e horas serão, naturalmente, menores os impactos económicos, técnicos, sociais e ambientais, (Cunha, 2010) (exemplo de uma conservação pontual de uma estrada, conforme ilustra a figura n.º 3 e 4).



Figura n.º 3 - Conservação e manutenção pontual de pavimentos rodoviários



Figura n.º 4 - Fresagem do pavimento para prevenir a degradação, evitando, assim, a entrada em colapso do pavimento

# 1 ESTADO DE ARTE

## 1.1 LEGISLAÇÃO

Já existe legislação específica para os Resíduos de Construção e de Demolição (RCD), a qual está no Decreto-Lei 46/2008 de 12 de Março. A obrigatoriedade do cumprimento do regime de gestão de RCD está consagrada no Código dos Contratos Públicos (CCP), anexo ao Decreto-Lei 18/2008 de 29 de Janeiro, e no Regime Jurídico da Urbanização e da Edificação (RJUE), Lei 60/2007 de 4 de Setembro. O plano de prevenção e gestão de resíduos de construção e demolição vem referenciado na alínea f) do n.º 5 do art.º 43.º do CCP - “Elementos da solução da Obra” - como elemento a integrar no projeto de execução. O caderno de encargos é nulo quando o projeto de execução não contempla o respetivo plano, conforme o disposto da alínea c) do n.º 8 do art.º 43º do CCP. Atualmente, é obrigatória a formalização de um plano de prevenção e gestão de RCD nos processos de concurso para a execução de empreitadas, bem como a formalização de um plano para as obras de carácter particular que se pretende executar, devendo o mesmo constar como elemento do projeto quando submetido à aprovação da autarquia a que diz respeito e a obras sujeitas a licenciamento municipal, a loteamentos urbanos e a edifícios.

A gestão dos RCD inclui todas as operações como meio de prevenção e de reutilização de materiais; caso estes não sejam reutilizados far-se-á a sua recolha para vazadouro através do transporte, procedendo-se à sua armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação. A responsabilidade da gestão dos RCD termina com a entrega destes em instalações ou operadores de gestão de resíduos devidamente licenciados ou através da transferência dessa responsabilidade para as entidades responsáveis pelo sistema de gestão de fluxos de resíduos. Sempre que possível será dada prioridade à reutilização, seguidas da reciclagem ou valorização e, só em último caso, à deposição em aterro. Os RCD serão entregues em instalações ou operadores de gestão devidamente licenciados para o efeito. A utilização de RCD nas obras deve ter em conta as normas técnicas nacionais e comunitárias aplicáveis. Na ausência destas, serão

aplicadas as especificações técnicas definidas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, relativas à utilização de RCD.

As técnicas de reciclagem surgem com o objetivo da redução do emprego de novos materiais, daí a necessidade de promover os produtos das fresagens e reutilizá-los na mesma obra ou em obras similares. Os RCD oriundos da fresagem da camada de desgaste e da camada de regularização em betão betuminoso, e mesmo no próprio agregado da base do pavimento em granulometria extensa, são materiais bastante adequados à reutilização para a mesma obra, mantendo o material em grande parte com as suas características, devendo, se necessário, ser corrigido com novos agregados e ligante.

A gestão de resíduos dos RCD prevê a possibilidade de reincorporação de resíduos de betuminosos em centrais, desde que sejam cumpridas as especificações técnicas elaboradas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), com o objetivo de diminuir a utilização de recursos naturais e de minimizar o recurso à deposição em aterro, permitindo assim um aumento do tempo de vida útil dos recursos naturais. Uma das especificações técnicas emitidas pelo LNEC para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central é a E 472 – 2009 (figura n.º 5). Para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos rodoviários é a E 473 – 2009 (figura n.º 6).



Figura n.º 5 - Material fresado em vazadouro para ser reutilizado e transportado para central



Figura n.º 6 - Reciclagem de pavimento rodoviário *in situ* com incorporação de material fresado a 100%

## 1.2 CARACTERIZAÇÃO DE PAVIMENTOS

Quanto à tipologia, os pavimentos são caracterizados consoante o material que envolve as suas camadas, podendo os mesmos também se diferenciarem de acordo com as suas características geométricas e mecânicas, classificando-se, assim, em três categorias (Batista, 2009):

- flexíveis;
- semi-rígidos;
- rígidos.

Os pavimentos flexíveis (figura n.º 7) são constituídos por camadas de misturas betuminosas, localizando-se nas camadas superiores do pavimento, quer dizer nas camadas de desgaste (camada superficial) e de regularização em mistura betuminosa, ao passo que nas camadas inferiores (base e de sub-base) estão localizadas as camadas em granulometria extensa denominadas por *tout venaint* (materiais granulares).



Figura n.º 7 - Pavimento tipo flexível

Os pavimentos semi-rígidos (figura n.º 8) são constituídos por material betuminoso nas camadas de desgaste (camada superficial) e de regularização em mistura betuminosa e hidráulico e granular nas camadas de base e ou de sub-base;

Nos pavimentos rígidos (figura n.º 9) o material aplicado é o hidráulico e o granular.



Figura n.º 8 - Pavimento tipo semi-rígido



Figura n.º 9 - Pavimento tipo rígido

Para o trabalho que ora se apresenta, os pavimentos flexíveis e os semi-rígidos são aqueles que interessam analisar, uma vez que estes na camada de desgaste são constituídos por betão betuminoso, material cuja reciclagem será o tema que irá ser desenvolvido. Apesar de ambos os pavimentos terem propriedades comuns nas camadas superficiais, eles diferenciam-se nas camadas de base e ou de sub-base: enquanto no pavimento flexível não se aplica cimento na base e ou na sub-base, já no pavimento semi-rígido esse facto ocorre na base ou na sub-base, sendo denominada essa camada por granulometria extensa estabilizada mecanicamente com cimento. Neste tipo de pavimentos, devido à sua elevada rigidez, a camada de base é a única a suportar os esforços causados pelo tráfego (Batista, 2009).

Nos pavimentos flexíveis a camada de base em granulometria extensa tem funções estruturais, sendo nessa camada que as degradações têm maior incidência, enquanto que num pavimento rígido as degradações têm maior incidência na camada superficial, a qual é caracterizada por ter funções estruturais (Batista, 2009).

Os pavimentos são caracterizados pelo material nele aplicado: a qualidade e a resistência do corpo do pavimento é decrescente em profundidade, isto é, os esforços vão sendo reduzidos em proporção à profundidade.

As misturas betuminosas nos pavimentos flexíveis são executadas nas camadas superficiais e enquadram-se em dois grupos:

- a) misturas betuminosas a quente: o ligante (betume) necessita de aquecimento no fabrico, no espalhamento e na compactação;
- b) misturas betuminosas a frio: é um processo muito mais simples, o ligante como o agregado não necessitam de serem aquecidos durante o processo de fabrico e de espalhamento; a mistura é aplicada á temperatura ambiente. O ligante aplicado é a emulsão betuminosa ou espuma-betume.

Há uma relação entre as diversas camadas constituintes de um pavimento, de modo a permitir que o mesmo se mantenha firme, seguro e durável face à ação de desgaste provocada pelo tráfego e pelas condições climáticas. O seu período útil de vida ronda os 20 anos (corresponde ao período de vida de dimensionamento pelo MACOPAV para pavimentos flexíveis).

As espessuras da camada de regularização e da camada de desgaste em betão betuminoso são definidas em função do tipo e da quantidade de tráfego, um facto determinado através de estudos elaborados para o efeito.

O pavimento é caracterizado segundo a sua qualidade funcional e a qualidade estrutural.

O estado funcional de um pavimento é a própria superfície que está em contacto com os rodados dos veículos automóveis e com a atmosfera, deve assegurar uma superfície de rolamento isenta de qualquer obstáculo (Ferreira, 2009). As suas características manifestam-se através da sua textura, regularidade transversal e longitudinal, atrito, ruído e características anti-derrapantes.

O estado estrutural de um pavimento tem a ver com a composição da sua base e sub-base, relacionando-se com a sua capacidade de resistência às cargas impostas pela ação dos veículos automóveis (Ferreira, 2009). Sublinhe-se que se o estado estrutural de um pavimento não está em condições a qualidade funcional também estará posta em causa.

A superfície da camada de desgaste, deve manter-se uniforme e com uma certa rugosidade, de maneira a garantir a aderência do rodado dos veículos ao respetivo pavimento, devendo, outrossim, possuir a inclinação

necessária para evitar a acumulação de águas pluviais, de modo a que o escoamento se faça sem qualquer obstrução, garante a impermeabilização de toda a estrutura e da fundação do pavimento; ela evita que a água se propague para os solos de fundação, assegurando a qualidade funcional e estrutural, o que se torna essencial para a manutenção da segurança, conforto e comodidade rodoviária.

A estrutura de um pavimento é assente sobre uma fundação, denominada leito, sendo este constituído pelo terreno natural. A fundação pode ser executada a partir de solos selecionados por diversas operações de terraplanagem e compactação com o objetivo de aumentar a capacidade de carga da fundação de maneira a possuir uma plataforma pronta para receber material proveniente do corpo do pavimento (estrutura). O corpo do pavimento, como já ficou dito, é composto pela sub-base e base, com ou sem ligante, e camada de regularização em betão betuminoso. Essas camadas são as que definem a estrutura do pavimento face às solicitações impostas pela carga dos veículos.

O dimensionamento de um pavimento pode ser efetuado segundo dois métodos o empírico-mecanista e o expedito. Há duas ações fundamentais para o dimensionamento de um pavimento: o efeito do tráfego e sua caracterização com contagem do número de cargas eixo-padrão e o efeito da temperatura. Quanto aos critérios de dimensionamento há que limitar o valor das extensões responsáveis pela rotura por fadiga e por deformação permanente para evitar que surja a ruína prematura de um pavimento (Lopes, 2009). Está implícita a realização de ensaios para caracterização da resistência das misturas e a ensaios de caracterização dos agregados para a formulação das misturas betuminosas que compreende o comportamento mecânico do pavimento tendo em conta o módulo de deformabilidade (Lopes, 2009). Através do método expedito podem ser seguidas as indicações do manual MACOPAV (JAE, 1995) para a verificação das espessuras das camadas, estrutura do pavimento, características do material e sua composição. O período de vida para o dimensionamento de um pavimento flexível ou semi-rígido é de 20 anos, enquanto que para os pavimentos rígidos o período é de 30 anos. Outro método expedito de dimensionamento é o programa de cálculo automático PAVIFLEX, este utilizado para pavimentos flexíveis. Métodos mais elaborados

e mais exigentes (empírico-mecanicista) utilizados em Portugal são o da SHELL e da Universidade de Nottingham (Lopes, 2009)

### **1.3 PATOLOGIAS E DEGRADAÇÃO NOS PAVIMENTOS**

A maior parte dos pavimentos rodoviários das estradas sem portagens no nosso país necessita de uma manutenção e conservação, quer ao nível funcional quer ao nível estrutural e são realizadas quando existem modificações das características iniciais do pavimento. A perda da qualidade de um pavimento leva a que sejam efetuadas operações de manutenção e conservação, de modo a repor a qualidade inicial da rede rodoviária, prolongando, assim, o seu período de vida útil.

O tráfego pesado e as condições atmosféricas são fatores determinantes para o estado evolutivo do desempenho mecânico de um pavimento (Lopes, 2011). Quando a estrutura de um pavimento está em boas condições, significa que estamos em presença de um pavimento saudável, com uma boa qualidade estrutural.

Esta circunstância dá-se pelo facto dessas vias estarem sujeitas a um tráfego intenso, nomeadamente de veículos pesados, que “foge” das vias com portagem. Aquelas não estavam, assim, preparadas para tantas solicitações de cargas impostas pelos veículos.

A rede de infraestruturas rodoviárias está inserida numa malha rodoviária que contribui para o desenvolvimento económico e social do país. Os transportes são um pilar no desenvolvimento da economia portuguesa.

A evolução das infraestruturas rodoviárias em Portugal desenvolveu-se notoriamente desde que foi criado o plano rodoviário nacional e desde a adesão à Comunidade Europeia. Houve então um substancial aumento da extensão das estradas e, por conseguinte, um incremento dos transportes.

A partir do momento em que um pavimento entra ao serviço do tráfego, está desde logo sujeito à sua degradação gradual, provocada, como já anteriormente foi salientado, pelas sucessivas passagens dos veículos automóveis e pela sua exposição às condições ambientais. Assim, ao longo do tempo, vai, naturalmente, sofrendo sucessivas degradações localizadas. Por

isso, e não é de mais sublinhar, as características originais do pavimento vão sendo diminuídas.

Como é evidente, torna-se necessário acompanhar a evolução das possíveis degradações do pavimento com o objetivo de dar uma resposta pronta e atempada que garanta a sua qualidade. Trata-se, aqui, de uma ação de prevenção para que os custos não venham de futuro a ser mais elevados.

No esquema abaixo indicado (figura n.º 10), podemos observar que quando um pavimento é alvo de medidas de conservação constantes e preventivas ao nível superficial o seu tempo útil de vida é prolongado. Com efeito, se essa intervenção não suceder, podemos assistir a que a deterioração se estenda às camadas inferiores, ou seja estruturais, implicando ações mais profundas de reabilitação, e, em consequência, custos mais elevados.

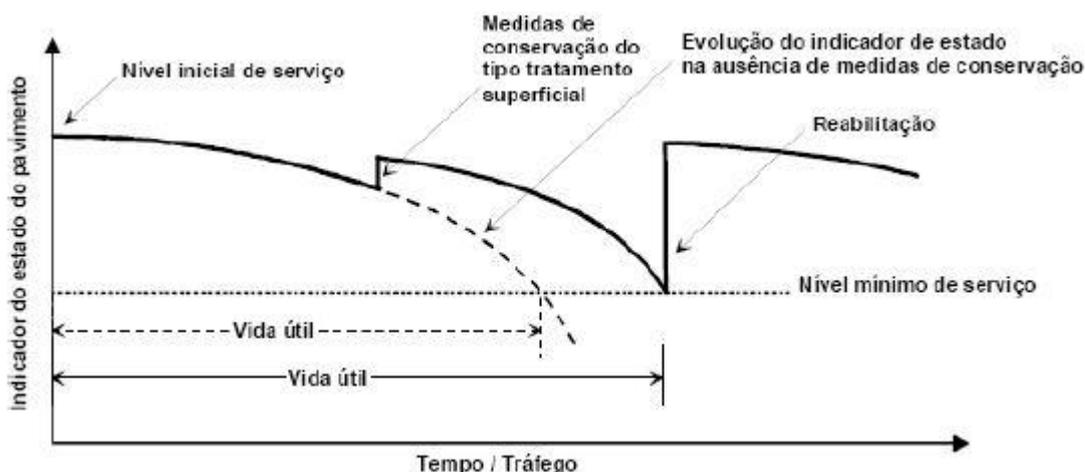


Figura n.º 10 - Estado do pavimento ao longo do tempo e tempo útil de vida (Batista, 2004)

Antes de tudo, e para que o pavimento envelhecido e degradado possa ser intervencionado através de um processo de manutenção e de conservação, empregando-se, para o efeito, as técnicas da reciclagem, é necessário que o mesmo seja avaliado nos seguintes aspetos:

- a) sua composição granulométrica;
- b) tipo e estado do pavimento;
- c) espessura da camada alvo de reciclagem;
- d) condições climáticas próprias da zona a reciclar;
- e) meios de transportes que o utilizam;
- f) dimensão e extensão da obra, etc.

Além disso, será, naturalmente, necessário fazerem-se estudos no terreno através da visualização direta como a ensaios, aspetos que permitirão analisar com maior rigor as estratégias de conservação mais adequadas com o propósito de se verificarem quais as espessuras necessárias de cada camada a ser reabilitada, tendo em conta vários fatores, tais como: o tipo de tráfego (pesado ou ligeiro) que costuma servir-se da via, ou seja, o tipo de cargas a que o pavimento está submetido; as condições climáticas a que a via está sujeita; o período de vida útil que se pretende para o pavimento, para se proceder aos respetivos cálculos; o seu estado de degradação.

Com efeito, qualquer ação de reparação de um pavimento requer que anteriormente tenha havido uma fase de observação e de diagnóstico, e por fim de avaliação do seu estado. Depois seguir-se-á a fase de projeto com o respetivo dimensionamento, caderno de encargos, especificações técnicas e, após a elaboração destes, virá a formalização do processo de concurso e a fase de lançamento de concurso da empreitada através de uma plataforma eletrónica.

De um modo geral, têm que se ter em conta todos os meios disponíveis que são necessários quando se pretende aplicar a técnica de reciclagem mais adequada, a qual pode ser *in situ* ou em central, a frio ou a quente. De igual modo, tem que ter em conta o tipo de ligante a ser utilizado na técnica pela qual se optou. Há outros fatores a serem considerados: os transtornos na circulação rodoviária aquando da intervenção, os impactos no meio ambiente, os custos da obra, a largura da estrada e a maquinaria utilizada.

As degradações são variadas consoante as suas características, podendo ser definidas mediante o seu estado. Assim, existem as degradações superficiais, a irregularidade transversal e longitudinal do pavimento, o atrito longitudinal e transversal que define a estabilidade dos pneus dos veículos no piso, a textura superficial que demarca um pavimento e o ruído e a drenagem do pavimento. Cada uma dessas degradações concorre para o enfraquecimento da camada superficial e estrutural de um pavimento. É evidente que quando um pavimento apresenta degradação do seu ponto de vista funcional e a mesma não for intervencionada, estamos a caminhar para que o pavimento tenha que ser reabilitado de uma forma mais profunda, isto é, ao nível estrutural. Por sua vez, diga-se que a degradação da camada

superficial provoca um maior desgaste dos pneus dos veículos, aumentando, de igual modo, o ruído causado pela circulação.

A água e a temperatura têm um papel preponderante no desenvolvimento deste fenómeno, contribuindo para a diminuição das resistências superficiais e estruturais do pavimento. De facto, assim que um pavimento entra em função, a sua qualidade inicial, pelas razões já apontadas, diminui, perdendo gradualmente os seus atributos, havendo, por isso, redução da capacidade resistente do pavimento.

Existem dois fatores importantes que definem o processo de degradação do pavimento: os passivos que estão interligados com a espessura do material, sua composição e qualidade da construção, e os ativos que compreendem as ações climáticas e as cargas sobre o pavimento impostas pelo tráfego em geral.

As ações dos veículos automóveis sobre o pavimento assumem um papel importante para a ruína deste, através dos estados de tensões e de extensões, provocando a fadiga das misturas betuminosas e deformações permanentes nos solos de fundação.

As patologias dos pavimentos flexíveis podem ser caracterizadas do seguinte modo: fendilhamento, deformações, desagregação e polimento da camada de desgaste e movimentação de materiais, a qual consiste na subida de finos à superfície do pavimento.

O fendilhamento da camada superficial faz com que a água da chuva entre para as camadas inferiores através das fendas, o que vai contribuir para o aparecimento de deformações permanentes por perda de capacidade de suporte das camadas. As deformações permanentes têm a sua origem nas camadas estruturais do pavimento e desenvolvem-se até às camadas superiores de betão betuminoso.

Com o surgimento de fendilamentos o fenómeno de fadiga do pavimento dá-se na parte inferior das camadas betuminosas onde as tensões de tração são notórias. O fenómeno das deformações permanentes surge na parte superior dos solos de fundações onde se verificam as maiores tensões de compressão.

O fendilhamento resulta das passagens consecutivas do rodado dos veículos pesados, resultante dos esforços de tração na base das camadas em

betão betuminoso. No fendilhamento tem-se as fendas longitudinais paralelas ao eixo da via, as fendas transversais perpendiculares ao eixo da via, as fendas por fadiga e as de pele de crocodilo. No geral, estas fendas devem-se à falta de suporte das camadas inferiores. As fendas longitudinais paralelas ao eixo da via surgem também pela má ligação da junta longitudinal, pela drenagem insuficiente e pela retração das massas betuminosas originadas pelo betão betuminoso bastante rígido.

As fendas surgem na zona de passagem dos rodados dos veículos, denominada por rodeiras, e desenvolvem-se depois em todas as direções, inclusive na direção transversal até ocuparem toda a largura da faixa de rodagem. As fendas são isoladas ou ramificadas consoante a degradação, denominando-se pele de crocodilo (figura n.º 11) e fendas por fadiga.



Figura n.º 11 - Fendilhamento do tipo pele de crocodilo (Ferreira, 2009)

Através do fendilhamento, (figura n.º 12) e em consequência da entrada das infiltrações das águas da chuva, a degradação do pavimento desenvolve-se até às camadas inferiores, inclusive aos solos de fundação, diminuindo a capacidade de resistência e de carga do pavimento e daí surgir o colapso da estrutura.



Figura n.º 12 – Fendilhamento (FHWA, 2003)

A passagem de água através das fendas vai originar deformações permanentes, a instabilidade dos solos de fundação e das camadas de base e sub-base, que com as repetidas cargas impostas pelos veículos automóveis acabam por provocar deformações no pavimento que podem ser localizadas ou caracterizadas por ondulações.

As rodeiras (figuras n.º 13,14) verificadas num determinado pavimento são deformações nas misturas betuminosas, devendo-se à passagem repetitiva dos veículos automóveis pesados a baixa velocidade, às temperaturas elevadas ou à má distribuição do ligante aquando da execução da camada correspondente.



Figura n.º 13 – Rodeiras (Freire, 2004)



Figura n.º 14 – Rodeiras

As deformações podem ser causadas pelo abatimento longitudinal ao eixo da via ou da berma ou pelo abatimento transversal. As deformações podem ainda resultar de depressões localizadas em zonas onde houve falta de compactação das camadas inferiores do pavimento, de ondulações por deformação da estrutura ou de má distribuição do ligante e da excessiva deformação plástica da camada de desgaste. Além disso, as deformações são ainda causadas pelas rodeiras na zona de passagem dos veículos e são caracterizadas segundo o seu raio - de pequeno raio quando se trata da fraca resistência à deformação plástica das misturas betuminosas, de grande raio quando se trata de deformações permanentes na estrutura do pavimento, inclusive nos solos de fundação.

Na desagregação e no polimento da camada de desgaste há vários aspetos que contribuem para estas anomalias, tais como: peladas no pavimento, desagregação do material de superfície, ninhos ou covas e polimento dos agregados da camada superficial.

As peladas consistem na desagregação pontual em forma de placa, resultante da fraca espessura, da instabilidade ou da má ligação da camada de desgaste à camada subjacente.

A desagregação superficial, como o próprio nome indica, diz respeito à desintegração do material da camada de desgaste por falta de finos, de ligante ou de *filler*, ou até mesmo do agregado mais grosso.

Ninhos ou covas são patologias que se manifestam na camada de desgaste, formando cavidades em forma arredondada, que podem progredir

até às camadas inferiores, podendo daí surgirem outras degradações como o fendilhamento. A formação destas anomalias deve-se à falta de qualidade do material ou à falta de capacidade resistente das camadas inferiores em zonas pontuais e localizadas.

O polimento dos agregados, como o próprio nome indica, consiste no polimento da superfície da camada de desgaste por abrasão do material mais grosso, apresentando um aspeto brilhante e polido.

Quanto à movimentação de materiais, há dois tipos: a exsudação e a subida de finos à superfície da camada superficial. A exsudação é, vulgarmente, verificada na zona de passagem dos rodados, tendo um aspeto negro e brilhante originado pela migração do ligante betuminoso à camada superficial. A exsudação pode ser também uma consequência da excessiva rega de colagem entre camadas, do tipo de mistura betuminosa usada nos pavimentos ou das temperaturas elevadas. Relativamente à subida de finos até camada superficial, ela ocorre quando há um arrastamento de finos dos solos de fundação ou camadas granulares para a zona superficial. Este facto surge quando o pavimento está sujeito a tensões devido à passagem dos veículos automóveis e à má drenagem do pavimento que ao conter água nessas camadas é expulsa para a superfície. O pavimento fica com cor esbranquiçada proveniente dos finos, inicialmente na zona das fendas que com o tempo se propagam para toda a superfície da camada de desgaste.

A qualidade de um pavimento flexível reduz-se de forma contínua com o aparecimento das várias degradações, se uma não for reparada a tempo e horas poderá dar origem a outras tantas.

Os seguintes quadros referem-se às várias famílias de degradações dos pavimentos flexíveis, bem como as suas anomalias.

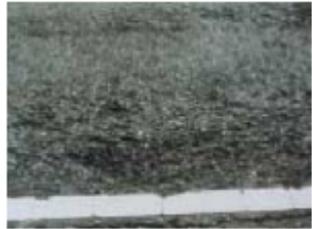
Quadro n.º 1 - Tipos de deformação nos pavimentos flexíveis (Alves, 2007; Branco e Pereira, 2006)

| Tipos de deformações |   |  |   |
|----------------------|---|--|---|
| <u>Abatimento</u>    | Longitudinal – pode localizar-se ao longo do pavimento junto à berma ou ao longo do eixo da faixa de rodagem.   | Berma – pode resultar de uma redução da capacidade de suporte das camadas granulares e do solo de fundação, relacionada com a entrada de água através da berma ou da interface berma-pavimento.  |    |
|                      |   | Eixo – ocorre quando existe um fendilhamento ao longo do eixo, resultando uma redução da capacidade de suporte por infiltração de água até às camadas inferiores granulares e ao solo de fundação, ou problemas de construção da camada superficial de desgaste. |    |
|                      | Transversal – tem uma localização dependente da ocorrência de situações patológicas ao nível das camadas inferiores, em particular no solo de fundação e camadas granulares.  |  |   |
|                      | <u>Deformações localizadas</u> – alterações de nível do pavimento, formando depressões ou alteamentos, podendo surgir isoladamente em diferentes pontos do pavimento; podem resultar da falta de capacidade do solo de fundação, contaminação localizada das camadas granulares ou capacidade deficiente em zonas pontuais do pavimento, em particular das camadas granulares.  |  |  |
|                      | <u>Ondulação</u> – deformação transversal que se repete com uma determinada frequência ao longo do pavimento; pode ocorrer nas camadas de desgaste constituídas por revestimento superficial, devido a deficiências na distribuição do ligante; pode verificar-se também em camadas de betão betuminoso onde ocorra o arrastamento da mistura por excessiva deformação plástica, devido à acção do tráfego; pode também ter como causa a deformação da fundação.                        |  |  |
|                      | <u>Rodeiras</u> – deformações transversais localizadas ao longo da zona de passagem dos rodados dos veículos, podendo ser de grande ou de pequeno raio; podem ter como causas a compactação insuficiente das camadas em geral, a capacidade deficiente das camadas granulares e da fundação, com ocorrência de deformações permanentes (rodeiras de grande raio) ou mesmo a presença de misturas betuminosas com reduzida resistência à deformação plástica (rodeiras de pequeno raio). |  |  |

Quadro n.º 2 - Tipos de fendilhamento nos pavimentos flexíveis (Alves, 2007; Branco e Pereira, 2006)

| <b>Tipos de fendilhamento</b> |   |
|-------------------------------|---|
| <b>Fendas</b>                 | <p><b>Fadiga</b> – fendas irregulares localizadas na zona de passagem dos rodados dos veículos, geralmente iniciadas na direcção longitudinal, progredindo na direcção transversal e noutras direcções irregulares; podem ser isoladas e ramificadas, consoante a menor ou maior fase de desenvolvimento respectivamente; as causas possíveis são a fadiga das camadas betuminosas, a falta de capacidade de suporte das camadas granulares e do solo de fundação, camada de superfície com qualidade deficiente dos materiais.</p>  |
|                               | <p><b>Longitudinais</b> – fendas paralelas ao eixo da estrada, localizadas geralmente ao longo da zona de passagem dos veículos e por vezes junto ao eixo; as causas possíveis são a deficiência da junta longitudinal de construção, a drenagem deficiente, originando diferencial de capacidade de suporte junto à berma e/ou misturas betuminosas muito rígidas originando abertura de fendas por retracção.</p>    |
|                               | <p><b>Transversais</b> – fendas sensivelmente perpendiculares ao eixo da estrada, isoladas ou com um espaçamento variável, abrangendo parte ou toda a largura da faixa de rodagem; podem ser resultantes de uma deficiência da junta transversal de construção, da retracção térmica da camada de desgaste ou mesmo da capacidade de suporte diferencial da fundação.</p>   |
|                               | <p><b>Pele de crocodilo</b> – fendas que formam entre si uma malha de dimensão variável, localizada inicialmente na zona de passagem dos rodados dos veículos abrangendo progressivamente toda a largura da via de tráfego; resultante da evolução das fendas ramificadas; as causas podem ser as mesmas que foram anteriormente descritas para as fendas de fadiga.</p>   |

Quadro n.º 3 - Tipos de desagregação e polimento da camada de desgaste nos pavimentos flexíveis (Alves, 2007; Branco e Pereira, 2006)

| Tipos de desagregação e polimento da camada de desgaste  |   |
|--|---|
| <p><b>Desagregação superficial</b> – arranque de uma das fracções do agregado, geralmente a mais grossa ou perda do masticque (finos, filer e ligante betuminoso).</p>   |    |
| <p><b>Pelada</b> – desprendimento em forma de placa, da camada de desgaste, relativamente à camada inferior; as causas mais influentes podem ser a espessura reduzida da camada de desgaste, uma deficiente ligação entre esta e a camada betuminosa seguinte ou até a falta de estabilidade da camada de desgaste.</p>  |    |
| <p><b>Ninhos (covas)</b> – cavidades de forma arredondada localizadas na camada de desgaste, podendo progredir para as camadas inferiores; as causas possíveis são a evolução de outras degradações, em particular do fendilhamento, a deficiente qualidade dos materiais da camada de desgaste e/ou uma zona localizada com deficiente capacidade de suporte.</p> |   |
| <p><b>Polimento dos agregados</b> – desgaste por abrasão, geralmente da fracção grossa do agregado, conferindo à superfície do pavimento um aspecto polido e brilhante.</p>  |  |

Quadro n.º 4 - Tipos de movimento de materiais nos pavimentos flexíveis  
(Alves, 2007; Branco e Pereira, 2006)

| <b>Tipos de movimento de materiais</b>  |   |
|---|---|
| <p><b>Exsudação</b> – migração à superfície do ligante betuminoso na camada de desgaste, em particular na zona de passagem dos rodados dos veículos, conferindo-lhe um aspecto negro e brilhante; pode resultar de um excesso de ligante (consequente envolvimento dos agregados grossos e redução da macrotextura), de contaminação por rega de colagem excessiva, por ligante de reduzida viscosidade e/ou mistura betuminosa de reduzida estabilidade submetida a tráfego intenso e temperaturas elevadas.</p>   |  |
| <p><b>Subida (ou bombagem) de finos</b> – manchas de cor esbranquiçada, devidas à presença de finos, provenientes das camadas granulares e do solo de fundação, inicialmente junto às fendas, evoluindo para toda a superfície da camada de desgaste; as causas possíveis são a drenagem deficiente do pavimento, que promove a ascensão da água através do solo de fundação, das camadas granulares e das camadas betuminosas fendilhadas, arrastando os finos e/ou circulação da água infiltrada nas camadas granulares através das fendas e expulsa através destas devido à passagem dos veículos.</p> |  |

## 1.4 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Entende-se por reciclagem de pavimentos rodoviários a transformação de um piso, que se encontra envelhecido e degradado, num outro piso com características estruturais similares e adaptadas ao tráfego que irá suportar (Batista, 2009). Assim, na reciclagem de pavimentos procede-se à reutilização de materiais oriundos da desagregação das camadas do pavimento envelhecido e deteriorado ou do material fresado para a construção de um novo pavimento ou de uma nova camada. A reciclagem faz-se, pois, em pavimentos rodoviários que perderam as suas características e propriedades iniciais. Nalguns casos, porém, pode-se atuar em pavimentos que ainda estão em condições de serviço com o objetivo de reforçar e melhorar as suas características originais, aproveitando-se, ainda, a oportunidade para a correção do perfil longitudinal e transversal desses mesmos pavimentos. A reciclagem é, nesse sentido, uma boa solução, já que não só evita que o material fresado seja conduzido para um vazadouro, como possibilita a sua reutilização (Cunha, 2010). Desde logo, a reutilização do material fresado poderá ser feita durante a execução dos trabalhos de fresagem, por meio de equipamento próprio, e os agregados poderão ser executados no próprio local, ou serem transportados para outro local, onde o material fresado seja utilizado

para a execução de novos pavimentos. A reciclagem, além de ser uma boa alternativa, ajuda a melhorar o meio ambiente, sendo o seu principal objetivo a reutilização de produtos fresados oriundos de um pavimento degradado, envelhecido e, portanto, deficiente para a circulação rodoviária. Os produtos da fresagem provenientes da reciclagem de pavimentos podem ter vários destinos, ou seja, tanto podem ser reutilizados na obra de onde são originários, como em outras obras. Ao serem utilizados na mesma obra, eles poderão ser reutilizados através do processo da reciclagem *in situ* a frio com maquinaria própria para a execução deste tipo de reciclagem, ou serem transportados para uma central para o fabrico de material reciclado. Ao material desagregado é adicionado um aglomerante ou conglomerante (emulsão ou cimento) e água (para hidratação, pré-moldagem e compactação)<sup>3</sup>. Em alguns casos, poderão ser adicionados agregados para corrigir a granulometria dos inertes, bem como outro aditivo necessário à sua composição. A mistura obtida será submetida a ensaios laboratoriais, sendo testada em função dos casos em estudo a adotar em obra, sendo posteriormente espalhada e compactada. O pavimento fica o tempo necessário sem circulação rodoviária para curar e entrar em presa. Está-se na presença de um novo pavimento, constituído por uma nova camada de base ou por uma camada estruturalmente resistente, ou ainda de uma nova camada de desgaste.

O tipo de reciclagem a ser utilizada varia em função do estado de degradação do pavimento podendo a técnica de reciclagem ser de ordem funcional, no caso da degradação ser na camada de desgaste, ou estrutural no caso da degradação ser na camada de base do pavimento (Costa, 2008; Cunha, 2010).

A utilização de produtos reciclados pode levar a uma menor utilização de betume e de agregados novos, assim como, a reduzir as distâncias de transporte (Lourenzo, 2009). Todas estas situações permitem uma poupança energética e diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>.

Apesar dos aspetos referidos no anterior parágrafo, deve fazer-se sempre uma avaliação dos gastos relativos a todo o processo de reciclagem

---

<sup>3</sup> Fonseca, Paulo, *reciclagem de pavimentos rodoviários*, empresa RECIPAV – Engenharia e Pavimentos, Lda, <http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem.pdf>, acedido a 17-08-2012;

(material fresado, transporte, tratamento, armazenamento do RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), sobreaquecimento dos agregados e do ligante, amortização de todos os equipamentos afetos à execução do processo da reciclagem). O preço do betume e dos agregados tem uma grande influência, logo são parâmetros importantes a ter em conta de maneira a conseguir aferir a viabilidade dos trabalhos através da utilização da reciclagem na execução do novo pavimento (Baptista, 2006).

Na poupança por tonelada do material reciclado em quantidades pequenas a margem de satisfação não é grande, sendo, contudo, apreciável para grandes quantidades (Lourenzo, 2009).

A European Asphalt Pavement Association (EAPA) recolheu no ano de 2010 as estatísticas referentes à reciclagem de pavimentos tal como se verifica na tabela abaixo mencionada, quadro 5:

Quadro n.º 5 – Estatísticas de reciclagem de pavimentos em 2010 (EAPA, 2010)

| Country        | available reclaimed asphalt (tonnes) | % of available reclaimed asphalt used in |                     |                |                | % of the new hot and warm mix production that contains reclaimed material |
|----------------|--------------------------------------|--|---------------------|----------------|----------------|---|
|                |                                      | hot and warm recycling                   | half warm recycling | cold recycling | unbound layers |   |
| Austria        | 500.000                              | 80                                       |                     | 8              | 12             |   |
| Belgium        | 1.500.000                            | 57                                       |                     |                |                | 47  |
| Czech Republic | 1.650.000                            | 15                                       |                     | 35             | 20             | 10  |
| Croatia        | 75.000                               |  |                     | 35             |                |   |
| Denmark        | 350.000                              | 56                                       |                     |                | 44             | 39  |
| Finland        | 1.000.000                            |  |                     |                |                | 65  |
| France         | 7.080.000                            | 40                                       | no data             | no data        | no data        | no data   |
| Germany        | 14.000.000                           | 82                                       |                     |                | 18             | 60  |
| Greece         | 0                                    | 0  | 0                   | 0              | 0              | 0   |
| Great Britain  | 4.000.000                            |  |                     |                |                |   |
| Hungary        | 44.580                               | 12                                       |                     | 15             | 40             | 10  |
| Iceland        | 15.000                               |  |                     |                | 25             | 2,5   |
| Ireland        | 100.000                              | 40                                       | 0                   | 0              | 60             | 2,0   |
| Italy          | 11.000.000                           | 20                                       |                     |                |                |   |
| Luxembourg     | 200.000                              |  |                     |                |                |   |
| Netherlands    | 4.000.000                            | 75                                       |                     |                |                | 67  |
| Norway         | 750.000                              | 15                                       | 13                  | 12             | 60             | 8   |
| Poland         | 110.000                              | 4  |                     |                |                | 0,2   |
| Portugal       | 2.100                                | 15                                       | 0                   | 5              | 20             | 25  |
| Romania        | 40.000                               | 40                                       | 15                  | 20             | 25             | <5  |
| Slovenia       | 26.160                               |  | 30                  | 20             | 50             |   |
| Spain          | 1.590.000                            | 56                                       | 9                   | 16             | 19             | 11  |
| Sweden         | 1.100.000                            | 70                                       | 5                   | 5              | 20             | 60  |
| Switzerland    | 1.450.000                            | 52                                       | 19                  | 18             | 11             | 21  |
| Turkey         | 2.420.000                            | 19                                       |                     |                | 81             | 10  |
| Japan          |                                      |  |                     |                |                | 72,9  |
| U.S.A.         | 66.500.00                            | 84                                       |                     |                | 12             |   |
| Ontario-Canada | 4.000.000                            | 85                                       |                     |                | 15             | 85  |

Pode verificar-se que, de acordo com os dados da tabela, Portugal é um dos países da Europa com menor emprego das técnicas de reciclagem, talvez porque os donos de obra ainda não tenham informação suficiente para execução de trabalhos de manutenção e conservação através desse processo.

No quadro 6 que se segue, porém, observa-se que existem algumas obras em que a reciclagem foi utilizada em Portugal como alternativa à pavimentação tradicional e convencional.

Quadro n.º 6 - Obras com a utilização dos processos da reciclagem em Portugal (Martinho, Pais e Picado-Santos, 2004)

| REFª | ANO     | DISTRITO         | ESTRADA             | ÁREA APRÓX. (m <sup>2</sup> ) | TIPO DE RECI-CLAGEM    | ESPE- SURAS (m) | LIGANTES     |          | MATERIAIS CORRECTIVOS  |          | ESTRUTURA DO PAVIMENTO |         |           |            | DONO DE OBRA                      |
|------|---------|------------------|---------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------|--------------|----------|------------------------|----------|------------------------|---------|-----------|------------|-----------------------------------|
|      |         |                  |                     |                               |                        |                 | TIPO         | % (peso) | TIPO                   | % (peso) | ANTES                  |         | DEPOIS    |            |                                   |
|      |         |                  |                     |                               |                        |                 |              |          |                        |          | MATER.                 | ESP.(m) | MATER.    | ESP.(m)    |                                   |
| 1    | 1992 /3 | Porto            | EN 12               | 100 000                       | In situ a frio         | 0,20            | Emulsão bet. | 5        | nenhum                 | -        | Mist.Bet.              | ?       | Mist.Bet. | 0,05       | IEP - Dir. Estradas do Porto      |
|      |         |                  |                     |                               |                        |                 | Cimento      | 2        |                        |          | Mac. hidr.             | ?       | Recid.    | 0,20       |                                   |
| 2    | 1995    | Viseu            | EN 222              | 120 000                       | In situ a frio         | 0,15            | Emulsão bet. | 5        | Pó de pedra (05)       | 15       | Mist.Bet.              | ?       | Mist.Bet. | 0,13       | IEP - Dir. Estradas de Viseu      |
|      |         |                  |                     |                               |                        |                 | Cimento      | 2        |                        |          | Bases gr.              | ?       | Recid.    | 0,15       |                                   |
| 3    | 1997 /8 | Porto            | EN 108              | 250 000                       | In situ a frio         | 0,15            | Emulsão bet. | 3,5      | nenhum                 | -        | Mist.Bet.              | 0,08    | Mist.Bet. | 0,12       | IEP - Dir. Estradas do Porto      |
|      |         |                  |                     |                               |                        |                 | Cimento      | 2        |                        |          | Bases gr.              | 0,10    | Recid.    | 0,15       |                                   |
| 4    | 1997 /8 | Porto            | EN's 14/ 104 / 105  | 230 000                       | A quente em central    | 0,15            | Betume       | ?        | Agreg. britados        | 60       | Mist.Bet.              | ?       | Mist.Bet. | 0,05       | IEP - Dir. Estradas do Porto      |
|      |         |                  |                     |                               |                        |                 |              |          |                        |          | Bases gr.              | ?       | Recid.    | 0,08       |                                   |
| 5    | 1998    | Évora            | EN 254              | 36 400                        | In situ a frio         | 0,10            | Emulsão bet. | 4,5      | Agr. brit. gr. extensa | 43,5     | Mist.Bet.              | 0,10    | Mist.Bet. | 0,07       | IEP - Dir. Estradas de Évora      |
|      |         |                  |                     |                               |                        |                 | Cimento      | 1,5      |                        |          | Bases gr.              | 0,30    | Recid.    | 0,10       |                                   |
| 6    | 1998 /9 | Beja             | EN 260 (IP8)        | 126 000                       | In situ a frio         | 0,12            | Emulsão bet. | 5        | Pó de pedra            | 10       | Mist.Bet.              |         | Mist.Bet. | 0,06 a 0,1 | IEP - Dir. Estradas de Beja       |
|      |         |                  |                     |                               |                        |                 | Cal          | 1 a 2    |                        |          | Bases gr.              |         | Recid.    | 0,12       |                                   |
| 7    | 2001    | Beja             | EN 383              | 116 600                       | In situ a frio         | 0,20            | Cimento      | 4        | nenhum                 | -        | Rev. sup.              | 0,10    | Mist.Bet. | 0,03       | IEP - Dir. Estradas de Beja       |
|      |         |                  |                     |                               |                        |                 |              |          |                        |          | Mac. hidr.             | 0,15    | Recid.    | 0,20       |                                   |
| 8    | 2001    | Bragança         | IP 4                | 70 000                        | In situ a frio         | 0,30            | Cimento      | 3,5      | nenhum                 | -        | Mist.Bet.              | 0,16    | Mist.Bet. | 0,10       | IEP - Dir. Estradas de Bragança   |
|      |         |                  |                     |                               |                        |                 |              |          |                        |          | Bases gr.              | 0,30    | Recid.    | 0,30       |                                   |
| 9    | 2001    | Viseu            | Arruamentos urbanos | ?                             | Semi-quente em central | 0,04 a 0,12     | Emulsão bet. | 3,5      | nenhum                 | -        | Mist.Bet.              | ?       | Mist.Bet. | ?          | Câmara Municipal de Viseu         |
|      |         |                  |                     |                               |                        |                 |              |          |                        |          | Bases gr.              | ?       | Recid.    | ?          |                                   |
| 10   | 2002    | Portalegre       | IP 2                | 100 000                       | In situ a frio         | 0,15            | Emulsão bet. | 3        | nenhum                 | -        | Mist.Bet.              | 0,16    | Mist.Bet. | 0,10       | IEP - Dir. Estradas de Portalegre |
|      |         |                  |                     |                               |                        |                 |              |          |                        |          | Bases gr.              | 0,30    | Recid.    | 0,15       |                                   |
| 11   | 2002    | Porto            | Arruamentos urbanos | 14 720                        | In situ a frio         | 0,20            | Bet. espuma  | 3        | Pó de pedra (05)       | 9        | Mist.Bet.              | 0,10    | Mist.Bet. | 0,06       | Câmara Municipal do Porto ?       |
|      |         |                  |                     |                               |                        |                 | Cimento      | 2        |                        |          | Bases gr.              | 0,20    | Recid.    | 0,20       |                                   |
| 12   | 2003 /4 | Évora            | EN 114              | 120 000                       | In situ a frio         | 0,16            | Cimento      | 4        | nenhum                 | -        | Mist.Bet.              | 0,16    | Mist.Bet. | 0,10       | IEP - Dir. Estradas de Évora      |
|      |         |                  |                     |                               |                        |                 |              |          |                        |          | Bases gr.              | ?       | Recid.    | 0,16       |                                   |
| 13   | 2004    | Porto            | EN 222              | 86 000                        | In situ a frio         | 0,12            | Emulsão bet. | 3        | nenhum                 | -        | Mist.Bet.              | 0,06    | Mist.Bet. | 0,13       | IEP - Dir. Estradas do Porto      |
|      |         |                  |                     |                               |                        |                 | Cimento      | 1        |                        |          | Bases gr.              | 0,25    | Recid.    | 0,12       |                                   |
| 14   | 2004    | Faro             | EM 529              | 30 000                        | In situ a frio         | 0,15            | Cimento      | 4,5      | nenhum                 | -        | Mist.Bet.              | 0,04    | Mist.Bet. | 0,13       | Câmara Municipal de Silves        |
|      |         |                  |                     |                               |                        |                 |              |          |                        |          | Bases gr.              | 0,30    | Recid.    | 0,15       |                                   |
| 15   | 2004    | Leiria / Coimbra | AE 1                | ?                             | A quente em central    | ?               | Betume       | 3,5      | Agreg. britados        | 70       | Mist.Bet.              | ?       | Mist.Bet. | ?          | BRISA                             |
|      |         |                  |                     |                               |                        |                 |              |          |                        |          | Bases gr.              | ?       | Recid.    | ?          |                                   |

## 1.5 ORIGEM DOS PAVIMENTOS RECICLADOS

Hoje em dia, devido ao incremento das medidas de preservação da natureza e do meio ambiente e associado a isso o preço excessivo do petróleo, cada vez há mais interesse na aplicação de métodos de reciclagem de pavimentos, os quais permitem a economia do processo de construção, restauração e conservação das vias de comunicação.

Com efeito, na atualidade é uma condição necessária o uso da reciclagem dos pavimentos rodoviários para proteção do meio ambiente (Cunha, 2010). A reciclagem contribui para a abertura de novos horizontes com o intuito de atalhar o uso e a aplicação de novos materiais, evitando, assim, a delapidação os recursos naturais que cada vez são mais escassos.

O fabrico de misturas recicladas a quente em central teve um incremento considerável a partir dos anos setenta, devido à crise do petróleo e à subsequente subida do seu preço (Baptista, 2006). Desde esse período, e também em virtude do Protocolo de Quioto (Abril, 1998), que a reciclagem de pavimentos se tornou mais acentuada, havendo a expectativa de aperfeiçoamento das técnicas de reciclagem, no sentido de se empregarem taxas mais elevadas de material reciclado.

Efetivamente, com o Protocolo de Quioto a reciclagem de betuminosos tem tido um incremento soberbo a nível mundial, possibilitando não só uma poupança energética, como a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Acresce a estes aspetos, que o elevado custo do betume faz com que a reutilização dos materiais seja uma evidência nos nossos dias.

As preocupações ambientais vão no sentido manter o planeta limpo, o qual deverá ser preservado e protegido dos agentes agressivos que assolam a natureza. A fresagem dos pavimentos rodoviários surge, assim, com o objetivo de minimizar os efeitos nefastos na natureza, sendo o material reutilizando na própria obra que se pretende executar, uma obra que pode ser de beneficiação, manutenção, conservação e até mesmo de reforço de camadas de pavimentos flexíveis, evitando que os materiais provenientes da fresagem sejam encaminhados para vazadouro e que contaminem os solos. Já se vê que a reciclagem é uma técnica que tem vindo a adquirir grande importância. O seu procedimento é simples, ou seja, permite recuperar o pavimento existente envelhecido e degradado, tornando-o num novo pavimento com características semelhantes às originais.

O envelhecimento do pavimento ocorre quando o betume sofre alterações físicas e químicas deixando-o mais duro e frágil e com problemas de resistência à fadiga, aumentando o risco da sua fissuração e deterioração. Por essa razão, é necessário contribuir em estimar a evolução dessas propriedades com o objetivo de obter a durabilidade do ligante e da utilidade das misturas betuminosas no novo pavimento que se pretende executar.

O pavimento antigo é fresado e desagregado para ser reutilizado. Poderão, neste caso, ser ou não incorporados materiais novos que possuam todos os requisitos que normalmente se exigem aos pavimentos rodoviários com a mistura tradicional. A mistura reciclada pode ser utilizada na mesma

estrada ou caminho ou noutro local de atuação que necessite de um pavimento novo em condições de segurança e de conforto.

O material reciclado que se incorpora na mistura final reciclada pode variar entre os 10% e os 100%. Caso a reciclagem de pavimentos seja efetuada em central em que a mistura seja a quente o procedimento da composição de material reciclado é incorporado na mistura final na ordem dos 10% aos 70% (Cunha, 2010); caso a mistura seja feita a semi-quente o material reciclado é incorporado na mistura final na ordem dos 100% (Freitas, 2009). *In situ* o material reciclado poderá ser incorporado na mistura final até aos 100% (Wirtgen, 2004).

Atualmente, para a reciclagem a quente há meios e estudos que possibilitam a aplicação de taxas altas de produtos da fresagem, com a utilização de agentes rejuvenescedores com o objetivo de melhorar a qualidade e rejuvenescer o betume envelhecido (o betume envelhecido tem alterações físicas e químicas, com características de um material duro, frágil e com menor resistência à fadiga, fácil de deteriorar, tornando-o quebradiço), permitindo que tenha um comportamento idêntico ao do betume convencional. A reciclagem a quente é um processo no qual o material antigo se combina com o novo betume ou rejuvenescedor e agregados novos, em que as proporções são estabelecidas previamente através de fórmulas para o caso em estudo que se pretende. Este processo tem um mecanismo semelhante ao praticado pela central a quente quando a produção das misturas a quente são produzidas convencionalmente.

O agente rejuvenescedor para o betume é um material orgânico de características químicas e físicas que restauram e reconstituem o betume antigo e envelhecido em condições adequadas de um ligante com características muito idênticas ao de um betume novo de uma mistura a quente convencional. Nas misturas recicladas a quente agrega-se betume novo do tipo argamassa asfáltica, enquanto nos reciclados a frio se utilizam emulsões betuminosas e o procedimento da dosificação dos materiais a incorporar na mistura é o mesmo que numa central de produção de misturas a frio convencional. A conservação do pavimento tem por objetivo mantê-lo em condições idênticas às que tivera originalmente, aquando da sua primeira construção. Uma condição necessária é a impermeabilização do pavimento

através de uma camada de desgaste em betão betuminoso de maneira a proteger a sua estrutura. A capacidade de suporte destes pavimentos deriva, sem dúvida, de uma fundação capaz de suportar as camadas subjacentes e manter a estabilidade da estrutura. Há várias operações de manutenção importantes para que um pavimento se mantenha em condições de conforto e de segurança dos seus utentes. Essas operações são as de rotina, as periódicas e as de restauração do pavimento.

## 1.6 TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

Existem diversas técnicas de reciclagem que recorrem ao emprego do material fresado. Essas técnicas caracterizam-se e definem-se segundo:

- a) o local onde se concretizam, ou seja, poderão ser desenvolvidas em central ou no próprio local da obra onde são executados os trabalhos (*in situ*);
- b) a temperatura de fabrico da mistura na qual estão integrados os produtos da fresagem, podendo ser a quente, a semi-quente ou a frio, correspondendo esta última à temperatura ambiente;
- c) o ligante que poderá ser adicionado à mistura, como é o caso do betume, cimento, emulsão betuminosa, emulsão betuminosa e cimento, espuma betume, etc.

Na reciclagem em central a quente, o ligante mais utilizado é o betume, enquanto que na reciclagem em central a semi-quente o mais usado é a emulsão betuminosa modificada. Na reciclagem *in situ* predomina a reciclagem a frio, sendo utilizado como ligante o cimento, o betume espuma, a emulsão betuminosa ou ainda a emulsão betuminosa e cimento.

A reciclagem de pavimentos poderá ser feita a quente, a semi-quente ou a frio, sendo que no seguinte quadro encontram-se os diferentes processos de reciclagem e respetivas considerações.

De acordo com o quadro 8, pode constatar-se que existem quatro técnicas que poderão ser usadas *in situ* e outras quatro em central. Em qualquer uma delas poderá ou não ser adicionado à mistura ligante e eventualmente material corretivo.

Na definição dos vários processos de reciclagem devem ser considerados vários fatores como: a temperatura (quadro 7); o local; o ligante; os aditivos e as características e composição do pavimento existente a reciclar: em função disso, escolhe-se o processo mais adequado.

Quadro n.º 7 - Temperatura como fator determinante na reciclagem de pavimentos (Batista, 2009)

| Processo               | Considerações   |
|------------------------|---|
| Reciclagem a Frio      | Será o mais económico em termos energéticos   |
|                        | Os ligantes utilizados: Cimento; Cal; Emulsão betuminosa; Betume espuma; Estabilizadores químicos;                              |
|                        | Pode ser desenvolvido quer <i>in situ</i> quer em <b>central</b>  |
| Reciclagem Semi-quente | Permite reciclar até 100% do material fresado   |
|                        | Mais económico em termos energéticos relativamente ao processo a quente   |
|                        | Utiliza uma emulsão específica como ligante   |
|                        | Obriga a dispor de uma central de mistura a quente, onde a mistura é aquecida a 90 <sup>o</sup> C                               |
|                        | Pode ser armazenada até 24 horas desde que a temperatura seja mantida acima dos 60 <sup>o</sup> C                               |
| Reciclagem a Quente    | É a técnica que conduz a maiores consumos energéticos   |
|                        | A técnica a quente <i>in situ</i> é mais exigente em termos de equipamento, que é muito específico e dispendioso                |
|                        | A técnica a quente em <b>central</b> tem limitação na percentagem de incorporação de material fresado do pavimento a reabilitar |

No seguinte quadro apresentam-se as diversas técnicas de reciclagem:

Quadro n.º 8 - Técnicas de reciclagem (Baptista, 2006)

| <u>Tipo de reciclagem</u>                       | <u>Local de mistura</u> |            |
|---|-------------------------|------------|
|   | <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        |

Os vários processos são, (Martinho, 2005):

- reciclagem *in situ*, a frio, com cimento;
- reciclagem *in situ*, a frio, com emulsão betuminosa;
- reciclagem *in situ*, a frio, com betume espuma;
- reciclagem *in situ*, a frio com cimento e emulsão;
- reciclagem *in situ*, a quente com betume/rejuvenescedor.
- reciclagem em central, a frio, com emulsão betuminosa;
- reciclagem em central, a frio, com betume espuma;
- reciclagem em central, semi-quente, com emulsão betuminosa;
- reciclagem em central, a quente, com betume.

Na reciclagem a frio *in situ* o material do pavimento existente é aplicado na sua totalidade para o fabrico da mistura a reciclar (Nunes, 2008). As técnicas da reciclagem *in situ* podem ser feitas a quente ou a frio mediante o que se queira executar e consoante o estado de degradação do pavimento (degradação estrutural ou funcional). Caso seja a frio, na mistura incorpora-se cimento, emulsão betuminosa, emulsão betuminosa e cimento ou espuma betume. A quente incorpora-se betume e a espessura a reciclar é na ordem dos 0,06 m de espessura. A maquinaria para este tipo de reciclagem é mais complexa, mais exigente e específica. A reciclagem *in situ* em termos energéticos é detentora de um sistema diferente do sistema da reciclagem em central. A operação é feita de uma só vez. O material do pavimento a reciclar é fresado ou desagregado no local de intervenção dos trabalhos e aplicado no mesmo local, podendo ser ou não, mediante a elaboração de ensaios, adicionado ligante ou aditivos ou outros materiais para correção da granulometria. Caso a reciclagem seja feita a frio tem que se incorporar água para hidratação e compactação da mistura. A compactação da camada é feita através dos métodos convencionais utilizando o cilindro liso e o de pneus.

Na reciclagem em central o material fresado de uma determinada obra é transportado para junto da central e é utilizado para o fabrico da mistura do material a reciclar. As várias etapas do material reciclado através da reciclagem em central a quente são as seguintes:

- a) fresagem do material deteriorado e envelhecido numa determinada faixa de rodagem a reabilitar;

- b) transporte desse produto para junto da central descontínua ou contínua;
- c) fabrico do material a reciclar com incorporação de produtos fresados que podem ir até uma percentagem de 70%, mediante o tipo de central de fabrico;
- d) após o fabrico, transporte do material reciclado para a obra;
- e) pavimentação com recurso às pavimentadoras convencionais;
- f) compactação através dos métodos convencionais por intermédio de cilindros lisos ou de pneus.

### 1.6.1 RECICLAGEM *IN SITU*





Figura n.º 15 - Processo construtivo – reciclagem *in situ* a frio

O processo construtivo para a execução de trabalhos no âmbito da reciclagem *in situ* são os indicados na figura nº 15 que compreende o seguinte:

- desagregação do pavimento existente, equipamento: recicladora, misturadora, trator com cuba de água;
- compactação e nivelamento do pavimento, equipamento: cilindro de rolos e de pneus, motoniveladora;
- rega de impregnação, equipamento: cisterna e espalhador de rega de colagem;
- camada de regularização em mistura betuminosa reciclada ou não e compactação, equipamento: espalhadora, camião, cilindro de pneu e de rolo;
- rega de colagem, equipamento: cisterna e espalhador de rega de colagem;
- camada de desgaste em betão betuminoso (pode ou não ser reciclada) e compactação, equipamento: espalhadora (pavimentadora), camião, cilindro de pneu e de rolo.

### 1.6.1.1 RECICLAGEM *IN SITU*, A FRIO, COM CIMENTO

Este processo é similar ao da reciclagem com emulsão betuminosa sendo neste caso o cimento o ligante <sup>4</sup>. É recomendado quando o pavimento está bastante degradado, quando existem deficiências estruturais, quer dizer, quando a estrutura do pavimento está bastante instável e deteriorada nas camadas de base e sub-base. Este processo é feito numa única operação, o pavimento é fresado ou desagregado por uma ou várias máquinas próprias para fresar, conforme a largura da faixa de rodagem e o rendimento que a empresa construtora queira garantir para a execução dos trabalhos. Mistura-se cimento e água formando uma calda, sendo esta incorporada no momento da desagregação do material através dos injetores. Em vez da calda, o cimento pode ser espalhado manualmente no pavimento antes da passagem da recicladora, esta operação é feita normalmente em obras de pequenas dimensões, cuja extensão não justifique outros preparos, nem uma mistura homogénea do cimento. Existe um outro processo em que a dosagem é uniforme, sendo usado em obras de alguma dimensão e extensão, neste processo o espalhamento é mais elaborado e é feito com o recurso a pulverizadores, sendo realizado de modo imediato antes da passagem da máquina recicladora para minimizar o levantamento de nuvens de pó de cimento. É evidente que na calda de cimento e água a dosagem é mais exata e evita a formação de nuvens de cimento, sendo os misturadores acoplados à máquina recicladora.

O equipamento específico para este processo o da reciclagem *in situ* com incorporação de cimento é munido por uma ou mais fresadoras, dotadas de um tambor de eixo horizontal, de modo a permitir fresar o pavimento até uma determinada profundidade previamente definida de forma a permitir que o material seja o mais homogéneo possível (Batista, 2009).

---

<sup>4</sup> Fonseca, Paulo, reciclagem de pavimentos rodoviários, empresa RECIPAV – Engenharia e Pavimentos, Lda <http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem.pdf>, acedido a 17-08-2012

### **1.6.1.2 RECICLAGEM *IN SITU*, A FRIO, COM EMULSÃO BETUMINOSA**

Trata-se de um processo similar ao da reciclagem *in situ* com cimento, diferindo apenas no ligante e é recomendado quando existe deficiências de ordem funcional. Esta técnica é aplicada em tempo seco de modo a permitir a rotura da emulsão betuminosa, não é pois recomendada a sua aplicação em tempo húmido por ser de cura lenta que anda na ordem das duas a três semanas, não sendo possível durante esse período executar uma outra camada (Nunes, 2008). É um processo que consiste em adicionar ao material fresado a emulsão betuminosa, podendo ou não ser necessário material corretivo tal como pó de pedra, cimento, cal ou algum agregado, tendo em conta a fórmula de trabalho predefinida para a execução da obra. Para finalizar este processo adiciona-se água e posteriormente far-se-á o respetivo espalhamento. Este processo é feito por uma recicladora móvel munida por uma fresa. Os materiais corretivos são, normalmente, espalhados de modo uniforme no pavimento a reciclar antes da passagem da máquina recicladora, o tempo de espera é o mínimo possível de maneira a que os materiais não tenham hipótese de ser espalhados para outra zona fora da execução dos trabalhos.

Atualmente existem máquinas que fazem essa adição automaticamente, com o mesmo tratamento antes da máquina recicladora fazer a sua passagem.

Acoplada à máquina recicladora tem-se a cisterna de emulsão e o tanque de água. Fresa-se o pavimento até a uma determinada profundidade pré-estabelecida, faz-se a mistura com o ligante e água, espalha-se e compacta-se.

Relativamente a este processo de reciclagem é necessário ter-se em conta a largura da faixa de rodagem e o perfil transversal da via para se saber quantas passagens a máquina (tendo em conta a largura da máquina, poderá haver zonas de sobreposição na passagem) terá que efetuar nas zonas de sobreposição que não podem exceder os 0,30 m e estão compreendidas entre os 0,15 m e os 0,30 m <sup>5</sup>. Na zona de sobreposição evita-se a sobredosagem, uma vez que se considera que a máquina irá fazer o seu trabalho em duas

---

<sup>5</sup> Wirtgen Group, manual de reciclagem a frio, 2ª edição, 2004, Aplicações da reciclagem a frio, pag.94.

fases porque a largura o vai permitir. Assim, o trabalho é feito da seguinte forma: numa primeira passagem os injetores de água e de emulsão betuminosa serão desligados na zona de sobreposição, sendo apenas o pavimento desagregado nessa zona, aguardando que na segunda passagem seja efetuada a operação correspondente e então ligam-se os injetores.

Os agregados são os do pavimento existente, resultantes da desagregação do pavimento envelhecido e desagregado que se pretende reabilitar. Poderá, como foi dito anteriormente, ser corrigida a granulometria através da adição de material corretivo para tratamento do material contaminante, assim como a emulsão terá que ser selecionada em função das características do pavimento a ser reabilitado. Para a formulação da mistura esta será efetuada em laboratório, sendo recolhida previamente uma amostra do material desagregado do pavimento a reciclar.

A figura n.º 16 que a seguir se apresenta exemplifica e ilustra o processo deste tipo de reciclagem.

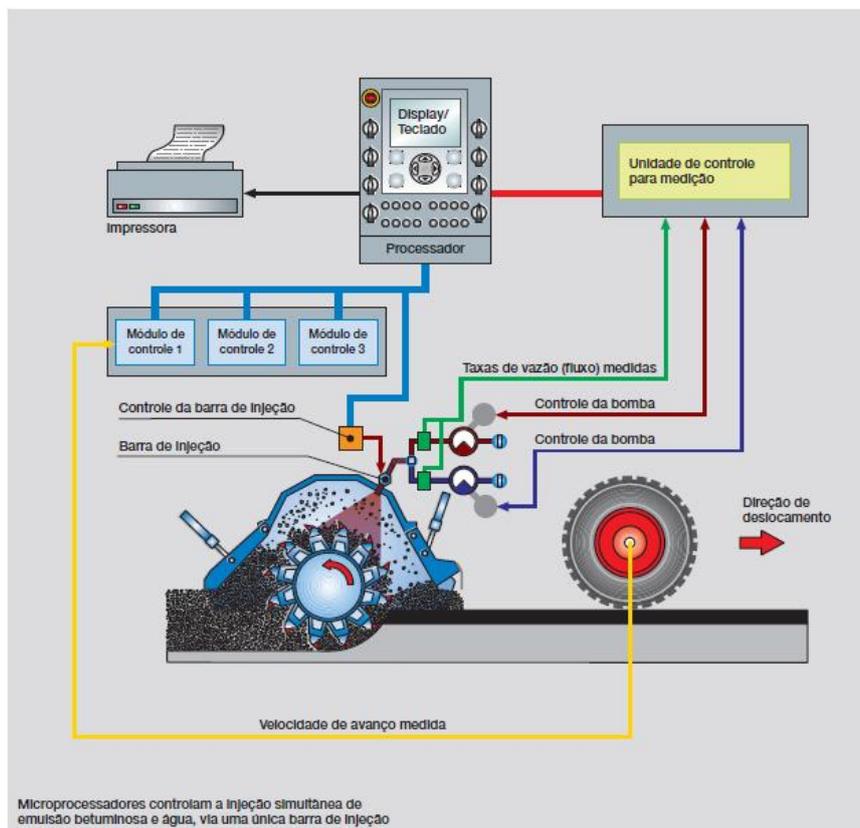


Figura n.º 16 – Esquema de produção da mistura reciclada a frio *in situ* com emulsão betuminosa (Wirtgen, 2006)

A figura n.º 17 seguinte mostra a sequência do processo desde a fresagem até à compactação, isto é, até que o pavimento esteja apto a entrar em serviço.

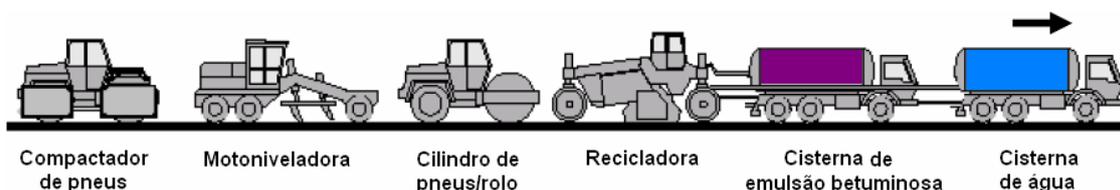


Figura n.º 17 - Fases da evolução da reciclagem a frio *in situ* com emulsão betuminosa (Baptista, 2006)

### 1.6.1.3 RECICLAGEM *IN SITU*, A FRIO, COM BETUME-ESPUMA

É uma técnica idêntica às anteriores, sendo, porém, neste caso, usado como ligante o betume-espuma. Tal como a reciclagem com emulsão betuminosa, ambas são de sistema coloidal. A reciclagem a frio *in situ* com betume-espuma é um processo novo e há boas perspetivas de vir a ser uma técnica bastante utilizada, uma vez que tem a vantagem de, contrariamente à reciclagem com emulsão betuminosa, após compactação o pavimento entrar de imediato em serviço, sem que haja tempo de cura e é aplicada à temperatura ambiente. É, desse modo, uma técnica muito usada em países cujas temperaturas são extremas e com bastante rentabilidade na execução dos trabalhos (Cunha, 2010).

A espuma do betume (figura n.º 18) é fabricada e conseguida a partir da adição de água fria ao betume a uma temperatura acima dos 170°C com percentagem que pode variar entre os 2 ou 3% da massa de betume. Como é natural, a água ao ser adicionada ao betume a quente evapora e forma uma espuma, o volume aumenta cerca de 20 a 30 vezes em relação ao estado inicial do betume (Batista, 2009). Este ligante é obtido através de uma câmara de expansão como mostra a figura que a seguir se reproduz. Diga-se, ainda, que a água é injetada no betume quente a uma pressão na ordem dos 5 bar.

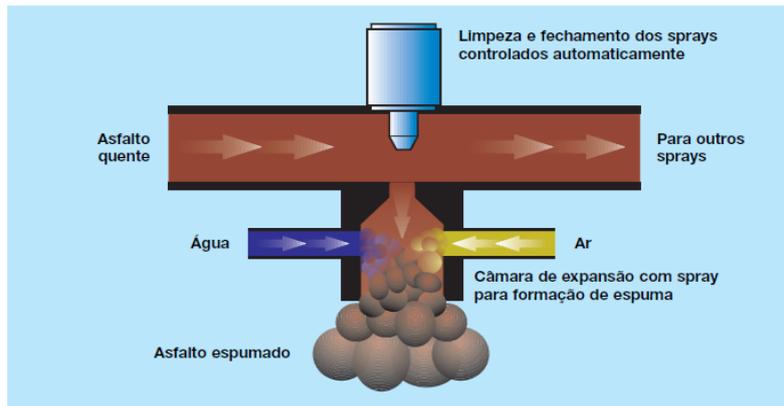


Figura n.º 18 – Processo de obtenção betume-espuma<sup>6</sup>

A espuma neste processo sai no bico injetor da câmara de expansão para fazer a mistura com o material fresado no tambor. O equipamento afeto a este processo, estando acoplado à máquina recicladora, é composto pela cisterna de betume, pela cisterna de água e por um compressor. A figura que a seguir se apresenta exemplifica e ilustra o processo deste tipo de reciclagem.

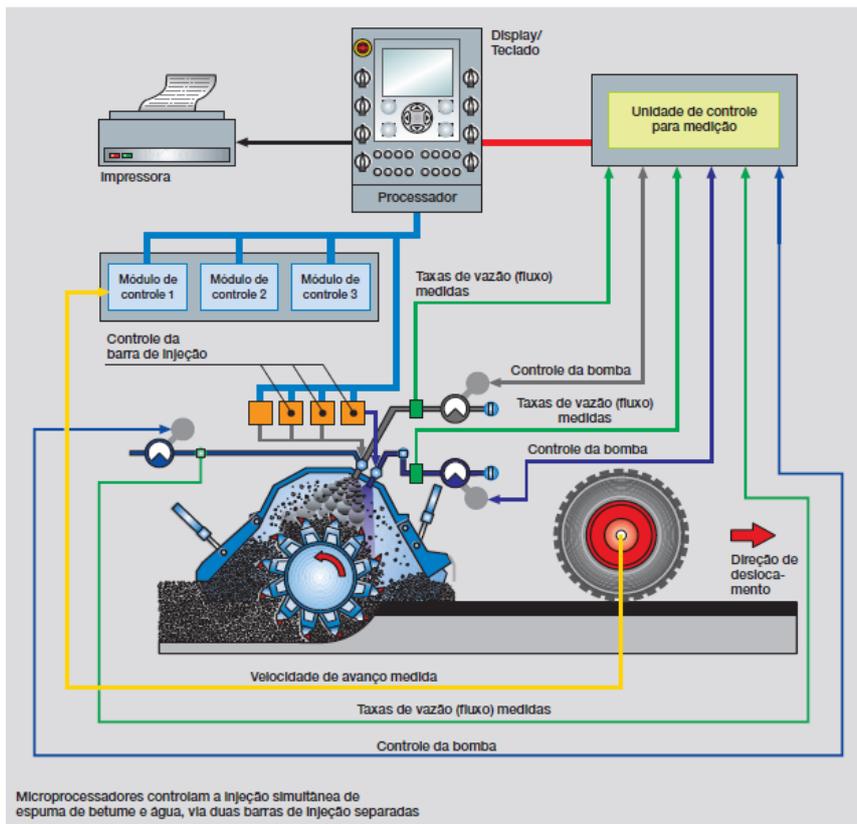


Figura n.º 19 – Esquema de produção da mistura reciclada a frio *in situ* com betume-espuma (Wirtgen, 2006)

<sup>6</sup> Wirtgen GmbH, Espuma de asfalto- o ligante inovador para a construção de rodovias, [http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdfdokumente/03kaltrecyclingstabilisierung/allgemein1/sc\\_haumbitumen/pfoamp.pdf](http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdfdokumente/03kaltrecyclingstabilisierung/allgemein1/sc_haumbitumen/pfoamp.pdf), pag.7, acedido a 19-08-2012.

Através da figura seguinte pode-se visualizar um esquema acerca da sequência do processo desde a fresagem até à compactação, fase final em que o pavimento fica pronto para entrar em serviço.

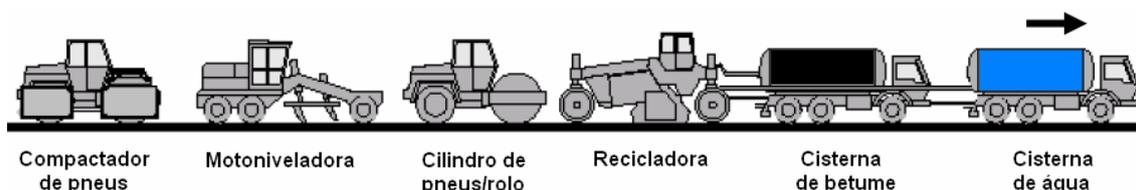


Figura n.º 20 - Fases da evolução da sequência da reciclagem *in situ* com betume-espuma (Baptista, 2006)

#### 1.6.1.4 RECICLAGEM *IN SITU*, A FRIO, COM CIMENTO E EMULSÃO

Trata-se de um processo similar ao da reciclagem *in situ* com cimento, por ter uma resistência idêntica <sup>7</sup>. A adição da emulsão neste processo faz com que a camada a reciclar tenha uma menor retração e deformabilidade ao mesmo tempo que aumenta a sua flexibilidade.

#### 1.6.1.5 RECICLAGEM *IN SITU*, A QUENTE, COM BETUME / REJUVENESCEDOR

Este tipo de reciclagem não é viável em Portugal, visto que exige um equipamento específico e bastante dispendioso. Além disso, trata-se de uma técnica complexa, exigente e incómoda devido às dimensões da maquinaria não sendo aconselhável em termos ambientais, uma vez que durante o fabrico do pavimento emite substâncias para a atmosfera. É uma técnica utilizada em países que têm estradas de grandes extensões e com larguras de faixas de rodagem bastante superiores às nossas, como é o caso dos EUA.

A recicladora reabilita o pavimento degradado ou envelhecido transformando-o num novo pavimento; é munida por todos os mecanismos desde o aquecimento do pavimento a reabilitar à fresagem e à adição de novos materiais, de betume e agregados, fazendo a mistura desses materiais até ao espalhamento através de uma pavimentadora.

<sup>7</sup> Fonseca, Paulo, *reciclagem de pavimentos rodoviários*, empresa RECIPAV – Engenharia e Pavimentos, Lda, <http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem.pdf>, acedido a 17-08-2012

Esta técnica compreende dois processos: a termoperfilagem e a termoregeneração, que consistem no aquecimento do pavimento betuminoso da camada superficial (Cunha, 2010).

A termoperfilagem consiste no aquecimento do pavimento existente a uma determinada temperatura e compactação da mesma por cilindros lisos e de pneus com o objetivo de eliminar fendas e fissuras e de correção e regularização do perfil longitudinal e transversal da via. Neste processo não há adição de novos materiais nem mistura.

A termoregeneração consiste no aquecimento através de ar quente sobre a camada do pavimento existente a temperaturas elevadas na ordem dos 660°C (Batista, 2009), submetidas a elevada pressão para escarificação, regularização do perfil longitudinal e transversal e compactação. Após a camada estar compactada procede-se à execução de uma camada superficial de desgaste para garantir a qualidade funcional do pavimento. É uma técnica adequada a pavimentos que tenham deficiências funcionais. Esta técnica tem as mesmas características de uma camada de desgaste.

A figura seguinte, esquematiza as diferentes fases e a sequência deste tipo de reciclagem.



Figura n.º 21 – Fases e sequência da reciclagem a quente *in situ* (Baptista, 2006)

## 1.6.2 RECICLAGEM EM CENTRAL

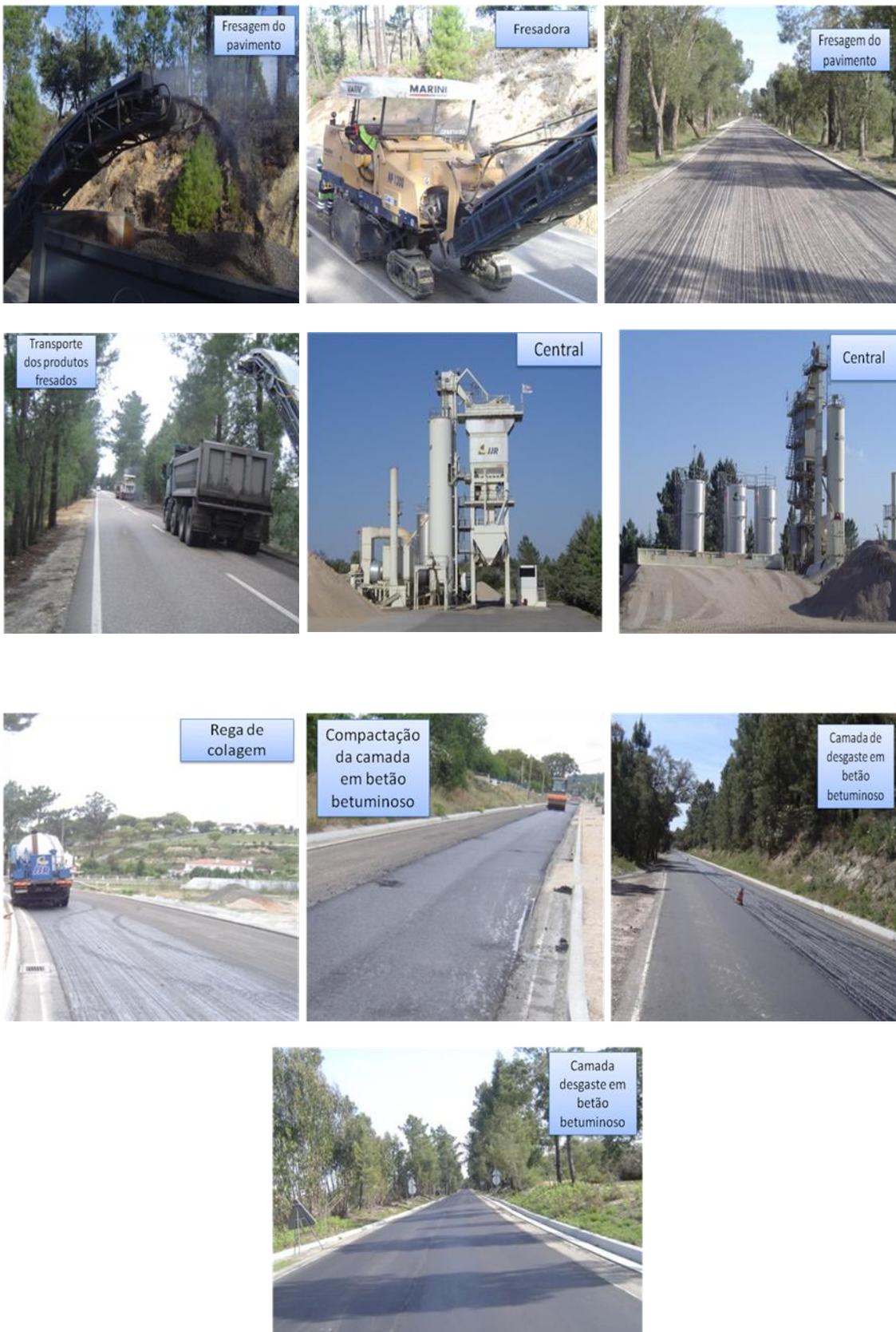


Figura n.º 22 - Processo construtivo – reciclagem de pavimentos em central

O processo construtivo para a execução de trabalhos no âmbito da reciclagem em central são os indicados na figura nº 22 que compreende o seguinte:

- fresagem do pavimento existente, equipamento: fresadora, bobcat (para limpeza do pavimento);
- transporte dos produtos resultantes da fresagem para a central, equipamento: caminhão;
- Central de betão para fabrico da camada reciclada;
- rega de colagem, equipamento: cisterna e espalhador de rega de colagem;
- camada de regularização em mistura betuminosa reciclada e compactação, equipamento: espalhadora, caminhão, cilindro de pneu e de rolo;
- rega de colagem, equipamento: cisterna e espalhador de rega de colagem;
- camada de desgaste em betão betuminoso (pode ou não ser reciclada) e compactação, equipamento: espalhadora, caminhão, cilindro de pneu e de rolo.

#### **1.6.2.1 RECICLAGEM EM CENTRAL, A FRIO, COM EMULSÃO BETUMINOSA**

O material fresado da obra em execução é transportado para junto de uma central, é reaplicado através de uma mistura reciclada com a contribuição da emulsão betuminosa e, possivelmente, através de material corretivo à temperatura ambiente. O material após o fabrico da mistura é transportado para o local onde se pretende executar os trabalhos e é espalhado através da espalhadora, sendo compactado por cilindros lisos e de pneus. O tempo de cura é idêntico ao da técnica praticada *in situ*.

#### **1.6.2.2 RECICLAGEM EM CENTRAL, A FRIO, COM BETUME-ESPUMA**

Esta técnica é igual à anteriormente mencionada, sendo aqui, porém, o ligante o betume-espuma, através de um sistema coloidal. O processo é

idêntico ao da reciclagem a frio *in situ*. A figura seguinte, esquematiza as diferentes fases e a sequência deste tipo de reciclagem.

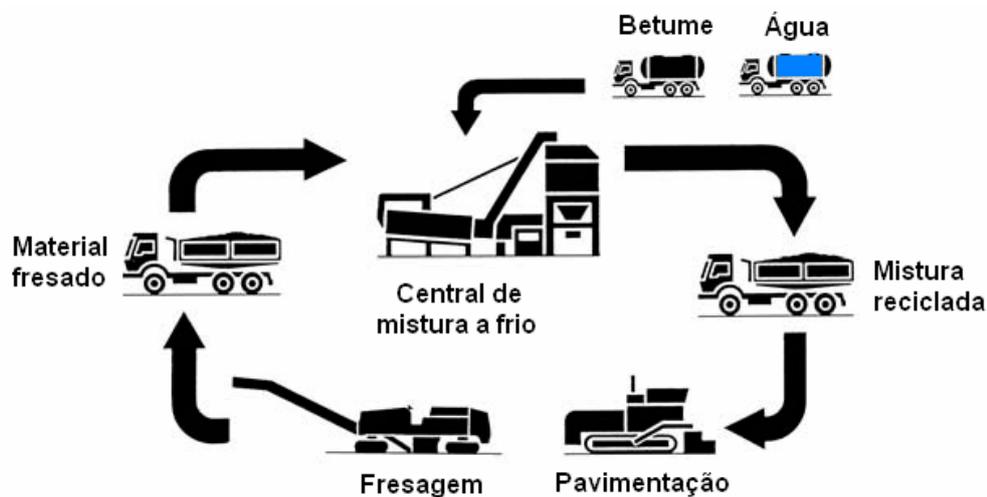


Figura n.º 23 - Esquema da reciclagem a frio em central com betume-espuma (Baptista, 2006)

### 1.6.2.3 RECICLAGEM EM CENTRAL, SEMI-QUENTE, COM EMULSÃO BETUMINOSA

À semelhança das outras técnicas em central, o material fresado é transportado do local da execução dos trabalhos para junto de uma central, sendo armazenado por lotes mediante as características desse mesmo material. Este processo tem vantagens em relação à reciclagem *in situ* com emulsão betuminosa, pois não tem tempo de cura e, portanto, logo após o espalhamento da material reciclado o pavimento está pronto a ser usado.

O material fresado é aquecido a uma temperatura de 90°C no tambor secador da central; a mistura é feita no misturador com emulsão betuminosa.

Uma outra vantagem deste tipo de reciclagem é que o armazenamento da mistura pode ser por um período de 24 horas, sendo feito o espalhamento e a compactação a uma temperatura semi-quente da ordem dos 60°C (Cunha, 2010). Acresce, ainda, que há a possibilidade do material fresado ser aplicado na sua totalidade na mistura reciclada, o que se torna, naturalmente, vantajoso.

### 1.6.2.4 RECICLAGEM EM CENTRAL, A QUENTE, COM BETUME

O fabrico é idêntico ao do fabrico de uma mistura a quente tradicional; aqui, porém, neste processo de reciclagem o que difere é a incorporação do

material proveniente do pavimento antigo, degradado e envelhecido, com o objetivo de adquirir excelentes resultados ao nível ambiental, técnico e económico. O objetivo é, pois, reduzir o recurso a materiais novos. Existe, no entanto, uma limitação, a saber: o material fresado na mistura reciclada não pode ser incorporado a 100%. Antes de se aplicar este processo é necessário fazer-se um estudo de viabilidade económica, tal como verificar custos inerentes ao transporte e ao material novo a incorporar. A fórmula de trabalho é feita mediante ensaios e a mistura a reciclar é verificada tendo em conta o material fresado e o material novo para obtenção da granulometria adequada.

Os materiais que constituem o novo pavimento são os agregados, o betume e o material fresado proveniente do pavimento degradado e envelhecido. O pavimento velho e degradado é fresado no local onde se pretende executar o novo pavimento, sendo depois transportado para junto da central onde será fabricada a nova mistura betuminosa (Cunha, 2010). Os equipamentos utilizados são os mesmos que se usam na execução da mistura betuminosa tradicional, com as devidas adaptações para a mistura do material fresado. O emprego do material fresado tem uma finalidade que consiste na redução de custos e na procura de bons resultados no âmbito técnico e ambiental. Nesta técnica é habitual adicionar-se material corretivo, agregado e betume por forma a garantir uma boa qualidade do produto final, com semelhanças da mistura betuminosa a quente de fabrico convencional.

A percentagem de betume está relacionada com a percentagem de betume do material do fresado, de modo a se chegar à percentagem ótima de betume <sup>8</sup>. Para a formulação da mistura betuminosa final com a incorporação do material fresado, é necessário saber-se as características dos agregados e do betume envelhecido. O material fresado na central está referenciado por lotes, uma vez que cada lote corresponde a obras diversas com características diferentes em termos de betume e de agregados, daí que a formulação da mistura seja diferente de lote para lote. Segue-se um esquema (figura n.º 8), para dar uma leitura de como se processa a técnica de reciclagem a quente em central, desde a fresagem do pavimento velho, ao fabrico e à execução do

---

<sup>8</sup> [http://www.civil.uminho.pt/cec/revista/Num26/n\\_26\\_pag\\_29-43.pdf](http://www.civil.uminho.pt/cec/revista/Num26/n_26_pag_29-43.pdf)

novo pavimento. As figuras n.º 24 a 30 dão uma ideia de como é executado os trabalhos visualizando os diversos equipamentos de fresagem, transporte, espalhamento e compactação do novo pavimento reciclado.

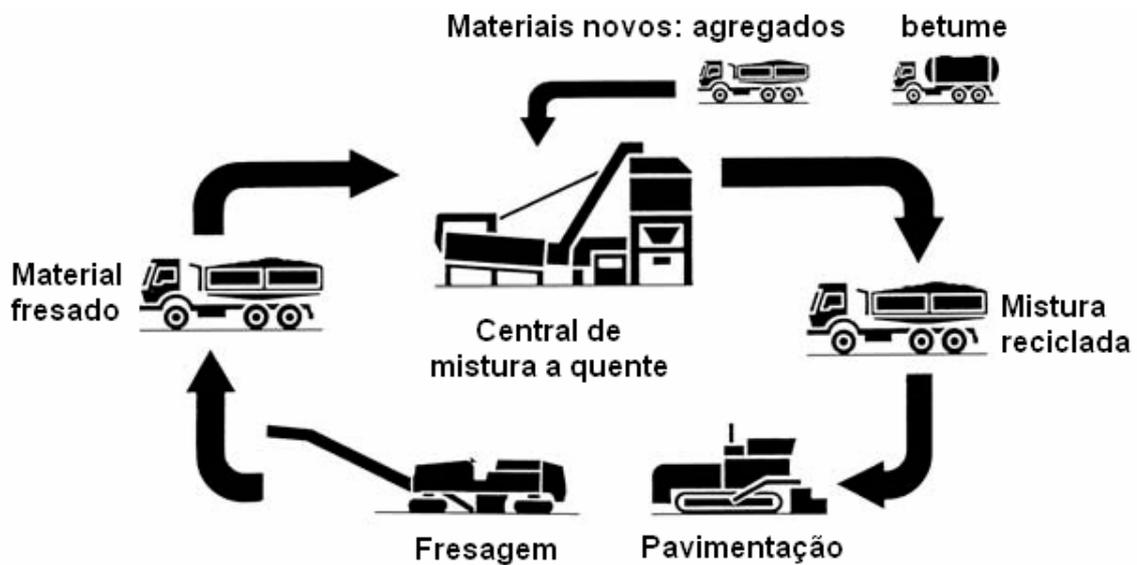


Figura n.º 24 - Esquema de reciclagem a quente em central (Baptista, 2006)



Figura n.º 25 – Fresadora



Figura n.º 26 - Material fresado



Figura n.º 27 - Transporte de material fresado



Figura n.º 28 - Pavimento fresado pronto para receber o novo pavimento



Figura n.º 29 – Espalhadora



Figura n.º 30 - Cilindro misto (pneus e de rolo)

O recurso a esta técnica por si só é uma vantagem, uma vez que já se está a reduzir a incorporação de novos materiais na mistura final. Outro aspeto a salientar, refere-se ao nível do ambiente, visto não ser necessário o transporte do material fresado a vazadouro. Nestes últimos anos, com a subida do preço do petróleo, a reutilização do material fresado, tanto na Europa como nos restantes continentes, tem tido um papel preponderante. Esta técnica, tendo em conta os vários experimentos efetuados para a aplicação do material, tem-se revelado boa, pois as características mecânicas e a resistência desse material, faz com que ela não tenha desvantagens face à técnica tradicional (Baptista, 2006).

Contudo, em termos energéticos este tipo de reciclagem tem a desvantagem de o material fresado ter que ser submetido a temperaturas bastante mais elevadas do que na mistura convencional, no entanto, como diz (Baptista, 2006), ao se incorporar menos betume e agregados novos o consumo energético, em termos gerais, é muito idêntico ao da técnica convencional caso a temperatura final seja igual à da mistura betuminosa convencional a quente.

Na Europa, os dados da European Asphalt Pavement Association (EAPA, 2010) de reciclagem a quente em central são bastante relevantes,

representando, atualmente, resultados assaz animadores com percentagens superiores aos 75% das misturas recicladas. Portugal está aquém das expectativas no uso da reciclagem a quente em relação aos restantes países europeus, mas existem obras que mostram, com algum sucesso, a utilização das técnicas de reciclagem em geral.

### **1.6.2.5 CENTRAL CONTÍNUA E DESCONTÍNUA**

A central continua e descontinua são equipamentos utilizados na reciclagem em central, a frio, a semi-quente ou a quente, e diferem uma da outra na percentagem de material fresado a incorporar no fabrico da mistura reciclada, conforme mais adiante se refere. As centrais aqui abordadas são as que são utilizadas habitualmente para o fabrico de misturas betuminosas convencionais a quente, com as devidas adaptações.

As centrais descontínuas o material fresado pode ser colocado a frio ou a quente junto com os agregados, mediante taxas de material fresado que se queira empregar na mistura a reciclar. A técnica do sobreaquecimento do agregado novo, que contribui para melhorar as características da mistura, é utilizada em centrais descontínuas na forma de aquecimento a temperaturas elevadas (200-275°C), de acordo com a taxa de material proveniente da fresagem, para que ao entrar em contacto com o material fresado ou reciclado não aquecido a temperatura do conjunto seja a desejada.

No misturador adiciona-se o ligante que vai ser utilizado. Existem várias possibilidades no âmbito desta técnica, tendo em conta onde se pretende introduzir o material reciclado (no misturador ou nos queimadores ou funis a quente). O convencional tem uma limitação na percentagem de material reciclado na ordem dos 10% a 30%, da mistura total fabricada, para que a temperatura dos agregados não seja excessiva, devendo ser inferior a 275°C, pois caso contrário pode produzir uma degradação do ligante logo no primeiro contacto (Baptista, 2006).

O processo de sobreaquecimento dos agregados foi o mais utilizado durante a fase da sua origem, até que surgiram as centrais de tambor-secador-

misturador. Nas centrais descontinuas a incorporação do material reciclado é na ordem dos 10% a 70% (Baptista, 2006).

A temperatura empregada nas centrais descontinuas (figura n.º 31 e 32), a fim de se realizar o processo de fabricação da mistura final, é, usualmente, 160°C.

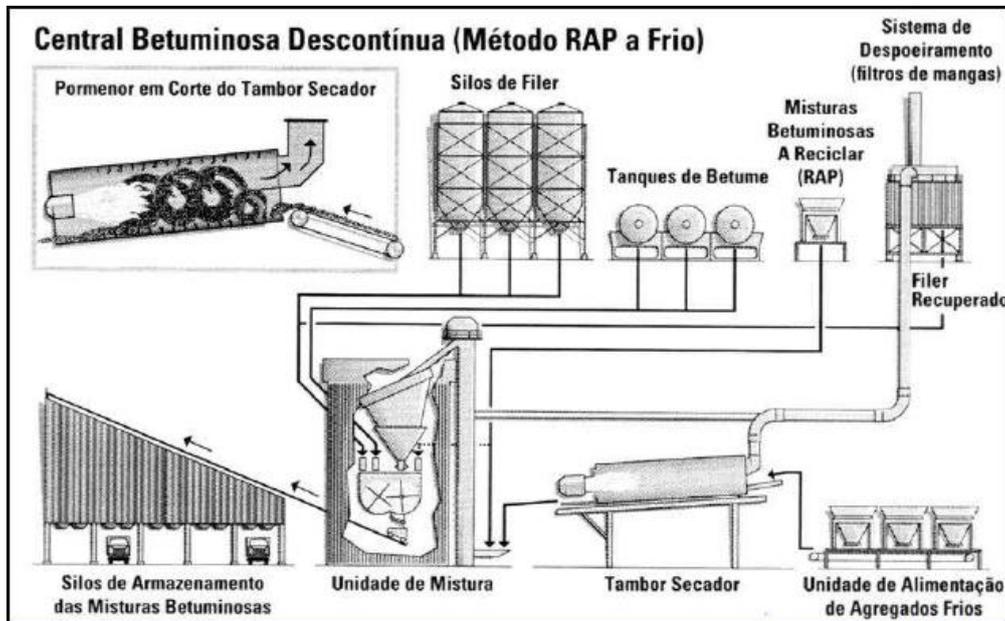


Figura n.º 31 - Esquema de uma central descontinua (Método de Reclaimed Asphalt Pavement, RAP, a frio), European Asphalt Pavement Association (EAPA) 1998 (Baptista, 2006)

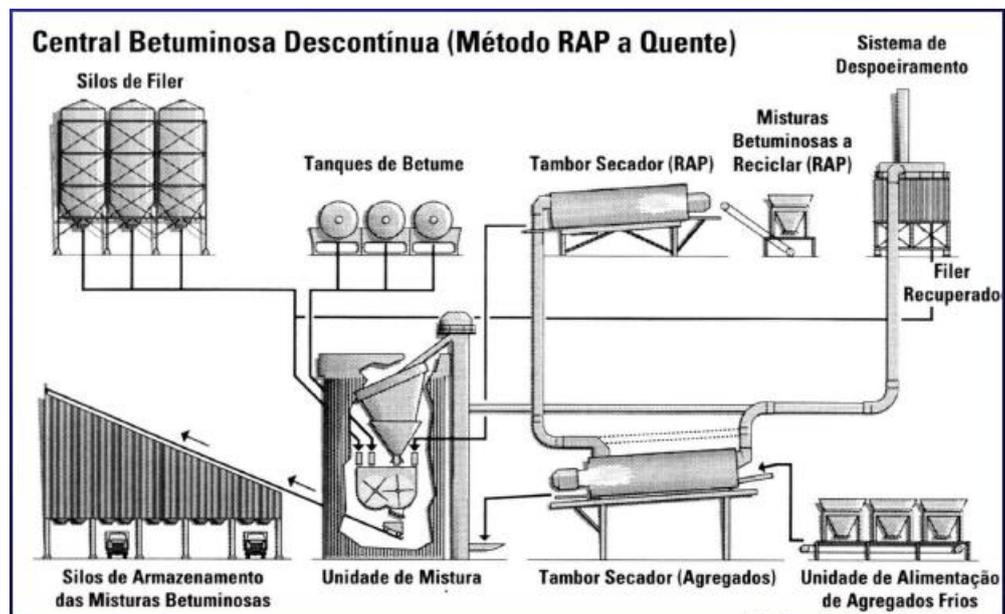


Figura n.º 32 - Esquema de uma central descontinua (Método de Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) a quente, European Asphalt Pavement Association (EAPA), 1998 (Baptista, 2006)

A técnica de aquecimento indireto é aquela que é empregada nas centrais contínuas (figura n.º 33), de tambor-secador-misturador. Na parte frontal do tambor colocam-se os agregados sendo aí secados e aquecidos; no meio do tambor coloca-se a mistura que se pretende reciclar e, por sua vez, na parte superior agrega-se o betume.

Os agregados atuam em primeiro plano para evitar a ação direta da chama sobre o material reciclado. A mistura antiga aquece-se por transferência do calor dos agregados. Os materiais vão girando no tambor produzindo um fluxo contínuo do material durante todo o processo. A necessidade de manter em primeiro lugar os agregados na mistura reciclada limita a percentagem de material reciclado no fabrico da mistura final. As percentagens do material reciclado estão na ordem dos 10% a 30% (Baptista, 2006).

A introdução do material reciclado nas misturas finais pode, geralmente, permitir poupanças muito úteis, podendo aquele atingir os 30% da mistura final.

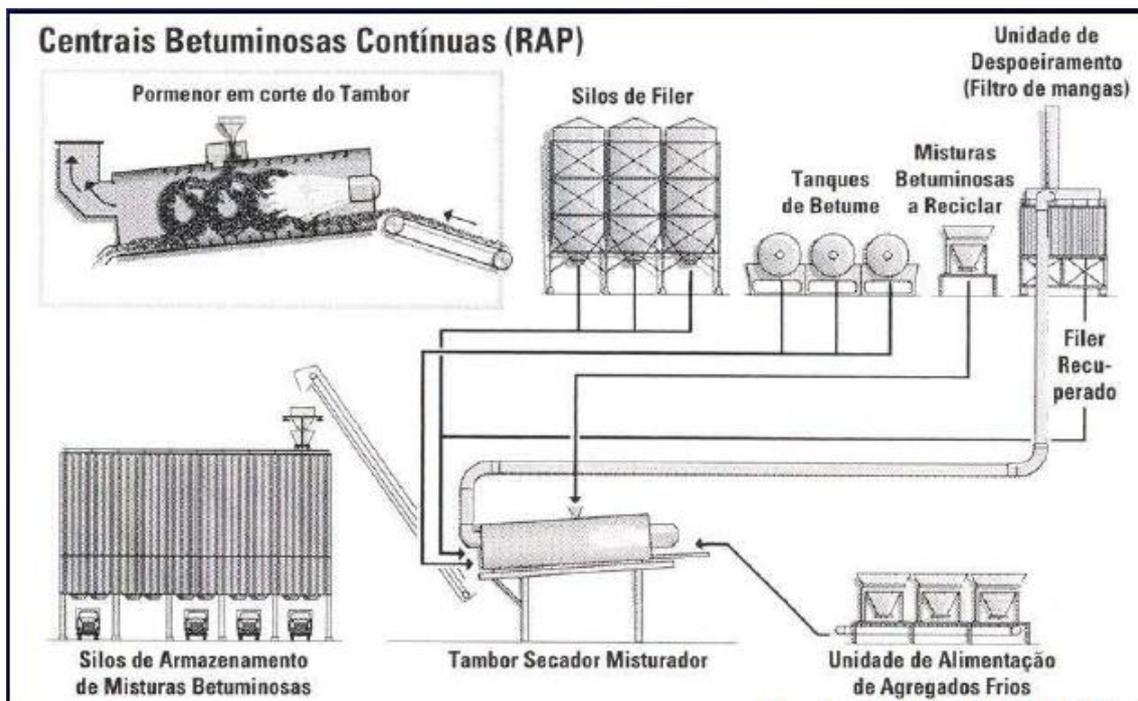


Figura n.º 33- Esquema de uma central contínua, European Asphalt Pavement Association (EAPA), 1998 (Baptista, 2006)

### 1.6.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS

Neste ponto é feito um apanhado das principais vantagens e desvantagens das reciclagens *in situ* e, em central (Batista, 2009).

#### 1.6.3.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA RECICLAGEM *IN SITU*

As vantagens da reciclagem *in situ* são:

- economia no transporte de agregados, redução de custos e de gastos energéticos, uma vez que não é necessário transportar o material para a central, nem para a obra, pois os produtos fresados serão todos eles empregues no local da execução dos trabalhos;
- a mistura é fabricada à temperatura ambiente, não sendo por isso necessário aquecer os materiais;
- todo o material fresado pode ser aproveitado no local;
- pelas razões atrás apontadas, não há grande mobilidade de veículos de transporte na obra, pelo que as estradas de acesso à respetiva obra não serão tão danificadas;
- menores emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera;
- diminuição da deslocação de trabalhadores, otimização do trabalho, redução da poluição, rapidez de execução dos trabalhos, etc.

As desvantagens da *reciclagem in situ* são:

- necessita de tempo de presa, não se pode abrir de imediato ao tráfego;
- contrariamente à reciclagem em central não pode aproveitar a capacidade aglomerante residual do betume envelhecido (material fresado);
- o transporte e o espalhamento não são realizados através de equipamentos convencionais;
- a camada de desgaste não pode ser reciclada *in situ* frio;

- na reciclagem *in situ* a quente não consegue regular o aquecimento da mistura de maneira a não produzir um endurecimento inadmissível do betume.
- tem um menor comportamento mecânico e uma menor capacidade de reforço em relação à reciclagem a quente em central.

### 1.6.3.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA RECICLAGEM EM CENTRAL

As vantagens da reciclagem em central são:

- controle na adição de novos materiais, maior homogeneidade na dosagem da mistura dos produtos reciclados, podendo os mesmos serem controlados por medição e pesagem;
- pode ser feita qualquer espessura de massa betuminosa;
- contrariamente à reciclagem *in situ* a frio, na reciclagem em central o transporte, o espalhamento e a compactação podem ser realizados através de equipamentos convencionais;
- pode-se aproveitar melhor a capacidade aglomerante residual do betume envelhecido (material fresado). Não necessita de tempo de presa, podendo abrir-se de imediato ao tráfego;
- a camada de desgaste pode ser feita com esta metodologia, o que não acontece na reciclagem *in situ* especialmente a frio;
- pode-se regular o aquecimento da mistura de maneira a não produzir um endurecimento inadmissível do betume;
- a reciclagem a quente em central tem um comportamento mecânico e uma capacidade de reforço idêntica ou análoga à das massas betuminosas novas e superiores à da reciclagem *in situ*;
- possibilita a utilização de materiais provenientes de outras obras;
- pode ser utilizado equipamento e métodos convencionais com as devidas adaptações.

As desvantagens da reciclagem em central são:

- só se justifica em obras de alguma dimensão do ponto de vista dos custos com materiais e transportes a utilização da reciclagem

a quente em central. Em pequenas obras, a central deverá estar muito próxima, para haver rentabilidade económica;

- a central deverá estar munida de uma grande superfície de armazenamento de materiais reciclados e de novos materiais;
- necessidade de uma boa organização das operações do material fresado de modo a facilitar uma operação contínua;
- nem todo o material fresado pode ser reciclado, tem de haver uma seleção prévia para o fabrico da mistura em função da formulação da mistura de trabalho.

## 2 CASO DE ESTUDO

De maneira a aferir, em termos práticos, a utilização da técnica da reciclagem em Portugal, na construção e remodelação de pavimentos, foi criado um possível cenário para um pavimento degradado para que várias empresas pudessem apresentar as suas soluções aplicando a técnica de reciclagem que considerassem mais adequada. Além do cenário, também foi efetuado um inquérito cujas respostas se encontram no Anexo.

### 2.1 METODOLOGIA

Como metodologia, foi estabelecido um cenário para este caso de estudo, que inclui a reparação de um pavimento que apresenta grandes depressões, nomeadamente rodeiras bastante acentuadas. O pavimento existente foi caracterizado e é composto por uma camada de 0,30 m de camada de base em granulometria extensa, por uma camada de regularização em betão betuminoso com 0,06 m de espessura e por último por uma camada de desgaste em betão betuminoso com 0,04 m. O pavimento estruturalmente está bastante debilitado, necessitando de uma reparação acentuada, considerando-se a hipótese da remoção de solos de má qualidade e correspondentes camadas do pavimento, conforme o Quadro 9.

Quadro n.º 9 – Mapa de trabalhos

| Código   | Designação dos Trabalhos   | Und            | Quantidade |
|----------|--|----------------|------------|
| <b>1</b> | <b>PAVIMENTAÇÃO</b>  |                |            |
| 1.1      | Abertura de caixa no pavimento, com profundidade de 0,60 m, incluindo escavação, remoção e transporte a vazadouro dos produtos escavados | m <sup>3</sup> | 14055,14   |
| 1.2      | Regularização e compactação do fundo de caixa  | m <sup>2</sup> | 23425,23   |
| 1.3      | Fornecimento e colocação de manta geotêxtil de alta densidade com a gramagem de 300 g/cm <sup>3</sup>                                    | m <sup>2</sup> | 23425,23   |

|     |   |                |          |
|-----|---|----------------|----------|
| 1.4 | Execução de camada de sub-base em agregado britado de granulometria extensa, com a espessura de 0,25 m, após recalque com material proveniente de britagem de granito, incluindo fornecimento, espalhamento, regularização e compactação e todos os trabalhos necessários | m <sup>2</sup> | 23425,23 |
| 1.5 | Execução de camada de base em agregado britado de granulometria extensa, com a espessura de 0,25 m, após recalque com material proveniente de britagem de granito, incluindo fornecimento, espalhamento, regularização e compactação e todos os trabalhos necessários     | m <sup>2</sup> | 23425,23 |
| 1.6 | Execução de camada de regularização em betão betuminoso aplicado a quente, com a espessura de 0,06 m, após recalque, incluindo rega de colagem e todos os trabalhos necessários   | m <sup>2</sup> | 23425,23 |
| 1.7 | Execução de camada de desgaste em betão betuminoso aplicado a quente, com a espessura de 0,04 m, após recalque, incluindo rega de colagem e todos os trabalhos necessários  | m <sup>2</sup> | 23425,23 |

A granulometria extensa da base do pavimento existente é de origem de rio, pedra rolada, envolvida por saibre. O local a vazadouro está até 25 km da intervenção dos trabalhos. Para a execução da sub-base e base em granulometria extensa de origem granítica, o local de carga deste material está a uns 30 km do local da execução dos trabalhos. Trata-se de uma estrada Municipal de acesso a propriedades agrícolas com passagem de veículos pesados. Caso seja necessário as empresas podem considerar a colocação de uma central betuminosa, já que existe espaço nas proximidades.

A partir do cenário, foi criado um inquérito para realizar às empresas. O objetivo do inquérito é verificar se as empresas optariam pela execução de trabalhos aplicando as técnicas da reciclagem, tendo em conta o volume da obra e as características do troço de estrada a ser intervencionada, ou se, pelo contrário, aplicariam o método tradicional, de maneira a verificar qual dos métodos seria mais viável. Por sua vez, no caso da opção das empresas incidir na aplicação da reciclagem o que se pretende é também aferir sobre qual das técnicas de reciclagem recairia a opção, tendo em conta os fatores económicos e ambientais.

O inquérito utilizado foi o indicado a seguir:

- a) a empresa já realizou trabalhos em empreitadas no âmbito da reciclagem de pavimentos?
- b) caso já tivesse realizado trabalhos dessa natureza, qual a técnica que mais utilizaram?
- c) neste preciso momento a empresa está realizar trabalhos de reciclagem de pavimentos no âmbito de empreitadas? Para o decorrer do ano 2012, estão previstas algumas empreitadas para executarem? Se, sim, qual ou quais as técnicas que vão utilizar?
- d) a empresa tem equipamento específico para todas as técnicas de reciclagem? Qual o mais utilizado?
- e) no vosso entender a reciclagem de pavimentos é uma boa opção? Caso seja uma boa opção diga porquê?
- f) se possível refira algumas empreitadas em que a reciclagem de pavimentos teve um papel importante?
- g) considere que teria de realizar os trabalhos indicados no Quadro 5 aplicando uma técnica de reciclagem de pavimentos:
  - g1) a que profundidade iria ser executada a atuação destes trabalhos? Qual a espessura de pavimento a reciclar?
  - g2) qual o processo de reciclagem mais adequada para a execução destes trabalhos, por qual optaria e porquê?:
  - g3) qual o equipamento específico a utilizar para a execução deste trabalho?
  - g4) que camadas em betão betuminoso adicional seriam necessárias executar?
  - g5) em termos económicos, a reciclagem de pavimentos é vantajosa?
  - g6) em termos de custos, o dono de obra seria beneficiado? Por m<sup>2</sup> qual seria o preço?
  - g7) a que extensão ou quantidades de trabalho seria viável a execução dos pavimentos a reciclar? Qual a técnica mais adequada que empregaria?
  - g8) qual seria a designação de trabalhos a incorporar no mapa de trabalhos no âmbito da reciclagem de pavimentos rodoviários?

## 2.2 ANÁLISE ÀS RESPOSTAS DAS EMPRESAS AO INQUÉRITO

Ao todo foram consultadas 6 empresas, as quais estão identificadas como empresa A a empresa F. No Anexo encontram-se as respostas de cada uma das empresas. Neste ponto será efetuada uma análise às respostas dadas por cada uma delas.

A técnica mais utilizada pela empresa A em empreitadas no âmbito da reciclagem de pavimentos é a reciclagem *in situ* por via húmida com a adição de uma percentagem de cimento (poucas foram as vezes em que foi usada a técnica por via seca), não havendo, no entanto, grande diferença em termos de rentabilidade de uma para a outra.

No que concerne à empresa B, esta utilizou várias técnicas de reciclagem: cada uma delas foi executada em função do objetivo a que se destinava, bem como em função da composição das camadas/estrutura do pavimento e do seu estado de degradação/patologia. Não especificou, porém, qual das técnicas é a mais rentável, referindo apenas que a técnica mais rentável é a que na sua utilização incorpora a menor percentagem de matérias-primas (em termos de custo) e, simultaneamente, a que implica menores fluxos de transportes para dentro e para fora da obra.

A empresa C indica que até ao momento efetuou apenas trabalhos de reciclagem de pavimentos em central a quente com o ligante, betume.

A empresa D é uma empresa da região alentejana com uma boa carteira de obras públicas de pavimentação de estradas, mas por falta de conhecimento ou por falta de oportunidade não executou até ao momento qualquer trabalho relacionado com a reciclagem de pavimentos e não prevê a execução desses trabalhos no ano de 2012 nem no ano de 2013; além disso é uma empresa que não possui equipamento para a execução de trabalhos de reciclagem de pavimentos.

A empresa E é também uma empresa da região alentejana, com uma boa carteira de obras públicas, mas no âmbito da reciclagem, de acordo com as respostas ao inquérito, a sua utilização tem sido reduzida, tendo apenas realizado trabalhos de fresagem do pavimento em betão betuminoso através de aluguer de equipamento. É uma empresa muito similar à empresa D, com

pouca experiência e com poucos conhecimentos e recursos no que toca às técnicas de reciclagem. Neste sentido, não prevê a execução de trabalhos de reciclagem no ano 2012 nem no ano 2013.

A empresa F indica que a técnica de reciclagem de pavimentos mais utilizada por si é em central a quente com betume e refere que fornece misturas betuminosas com material fresado à boca da central para venda ao público (normalmente empresas que executam pavimentos em betão betuminoso) com requisitos da Norma EN 13108-1:2006, correspondente à marcação CE para misturas betuminosas e que estão de acordo com as especificações do E.P. (Estradas Portugal). Executa também obras de reciclagem *in situ* a frio, com cimento, mas com muito pouca frequência.

Quatro das empresas, A, B, C e F têm, no entanto, aspetos em comum:

- já realizaram obras utilizando a técnica da reciclagem;
- as empresas A e B não tiveram obras de reciclagem no decurso do ano 2012. A empresa C previa ainda no decorrer do ano 2012 a incorporação de material fresado, quer em macadames para camadas de base, quer em camadas de desgaste com incorporação de material fresado de agregados de basalto; a empresa F tem misturas betuminosas em central a quente com a incorporação de material fresado para fornecimento ao público conforme solicitações dos clientes ainda no decorrer do ano 2012, contudo, em termos de empreitadas não prevê a sua execução empregando a técnica de reciclagem;
- têm equipamento específico para a reciclagem de pavimentos, exceto a empresa C, que apenas possui equipamento próprio para “reciclagem em central, a quente, com betume”;
- são unânimes em referir que a reciclagem é vantajosa, visto que com a sua aplicação implica uma redução de custos e do impacte ambiental, evitando assim, a exploração de recursos naturais e a produção de resíduos. A empresa C, por ter apenas equipamento para reciclagem em central, a quente, com betume, referiu que a rentabilidade das diferentes técnicas dependerá essencialmente das distâncias de transporte e das características dos materiais fresados, assim como das misturas betuminosas a fabricar;

- referem no seu historial obras que executaram aplicando as técnicas de reciclagem de pavimentos.

Relativamente à interpretação que as empresas fazem do mapa de quantidades de trabalhos da execução dos trabalhos no caso de estudo segundo o método tradicional, tanto a empresa A como as empresas B e F valorizam a técnica da reciclagem para a execução dos trabalhos. A empresa A nitidamente optaria por uma solução da reciclagem de pavimentos *in situ* com a adição de cimento, por via húmida ou via seca; a empresa B apresentou inclusive valorizações em anexo, em que se pode verificar que a reciclagem é economicamente mais vantajosa, constatando-se que o método tradicional apresenta preços acima dos da reciclagem; a empresa F optaria pela reciclagem em central a quente com betume para as camadas de regularização e de desgaste em betão betuminoso referindo que a reciclagem de pavimentos com incorporação de fresados tem uma redução de custos na ordem dos 9% aos 13%, em relação às camadas em betão betuminoso sem a incorporação de material fresado; para a camada de base a empresa optaria pela reciclagem de pavimentos *in situ* com adição de cimento. Relativamente à empresa C, esta não valoriza a reciclagem de pavimentos: só a utilizaria caso a central estivesse implementada na proximidade da obra, de acordo com a legislação em vigor, não sendo portanto necessário suportar custos na sua mobilização, construção e legalização.

Quanto à questão da profundidade (espessuras) da execução dos trabalhos através da reciclagem, as empresas A, B e F têm a mesma opinião: antes de se desenvolver o trabalho deve ir-se à obra e fazer-se um estudo da capacidade de carga do pavimento existente, para ter elementos precisos para se poder verificar as espessuras necessárias, bem como verificar a percentagem de materiais a incorporar, caso seja necessário. Tendo em conta o caso de estudo e a descrição dos trabalhos enunciados no mapa de quantidade, a empresa B considera uma profundidade de 0,30 m para a execução dos trabalhos.

No que diz respeito à interpretação que a empresa A faz do mapa de quantidade, descrição da zona, meios e características do pavimento, ela optaria pela reciclagem *in situ* com cimento, enquanto a empresa B optaria pelo

tipo de técnica de reciclagem em função das características do pavimento, de acordo com as suas respostas ao inquérito:

- hipótese 1: “*Reciclagem in situ, com cimento – Esta poderá ser a melhor solução com vista ao reforço do pavimento, caso sejam previamente removidas as camadas betuminosas. A camada de base existente em Tout-Venaint poderá ser tratada com cimento numa espessura de 0,25 a 0,30 m*”.
- hipótese 2: “*Reciclagem in situ, com emulsão betuminosa: Esta solução só é aplicável caso as camadas a reciclar sejam as camadas de mistura betuminosa*”.
- hipótese 3: “*Reciclagem in situ, com emulsão betuminosa e cimento: É a mesma solução acima descrita. O cimento destina-se a conferir mais coesão à mistura.*”

A empresa F optaria pela reciclagem *in situ*, com cimento para a execução da camada de base reciclada e para execução das camadas de regularização e de desgaste com incorporação do material fresado proveniente da obra.

As empresas A, B e F são unânimes em relação ao equipamento utilizado, indo ao encontro de equipamento próprio para reciclagem *in situ*, Conforme quadro 10.

Quadro n.º 10 – Resumo das soluções adotadas

| <b>Empresas</b> | <b>Soluções adotadas para a execução dos trabalhos</b>                    |
|-----------------|---|
| Empresa A       | Reciclagem de pavimento <i>in situ</i> , com cimento                      |
| Empresa B       | Reciclagem de pavimento <i>in situ</i> , com cimento                      |
| Hipótese 1      | Reciclagem de pavimento <i>in situ</i> , com cimento                      |
| Hipótese 2      | Reciclagem de pavimento <i>in situ</i> , com emulsão betuminosa           |
| Hipótese 3      | Reciclagem de pavimento <i>in situ</i> , com emulsão betuminosa e cimento |
| Empresa C       | Método tradicional  |
| Empresa D       | Sem solução   |
| Empresa E       | Sem solução   |
| Empresa F       | Reciclagem de pavimento <i>in situ</i> , com cimento                      |

No que diz respeito às camadas superficiais em betão betuminoso e camadas adicionais em relação à camada reciclada, as empresas A, B e F concordam que seria necessário efetuar alguns cálculos de dimensionamento,

tendo em conta a camada de suporte das camadas subjacentes e do tráfego previsto para a zona, embora a empresa F manifeste que, tendo em conta as camadas existentes, seria necessária no mínimo uma camada de regularização em misturas betuminosas com 0,06 m de espessura e uma camada de desgaste em betão betuminoso com 0,04 m de espessura. As empresas A, B e F consideram ainda que economicamente a reciclagem é mais vantajosa. Como referiu a empresa B:

*“... Em termos teóricos poder-se-á dizer que a reciclagem é a solução mais económica, uma vez que induz uma poupança significativa dos materiais a incorporar, reduz os transportes, bem como uma redução da quantidade de energia despendida no processo de construção. São também atributos desta técnica a sua grande mais valia em termos ambientais pois minimiza a produção de RCD, bem como diminui consideravelmente o recurso a novos materiais, nomeadamente agregados provenientes de pedreiras ...”.*

A empresa A menciona que o dono de obra seria beneficiado com a execução da reciclagem de pavimentos, neste caso para a reciclagem *in situ* a frio com o ligante o cimento, uma vez que não seria necessário executar trabalhos descritos no mapa de quantidades indicados no método tradicional:

*“... Nitidamente numa situação destas iriam haver grandes vantagens económicas uma vez que com um só trabalho (reciclagem) se iriam evitar os trabalhos 1.1 + 1.2 + 1.3 + 1.4 + 1.5, pelo que sem fazer contas logo se percebe que as vantagens económicas são muitas ...”.*

A empresa B é mais objetiva, apresentando, tanto para o método tradicional como para o método da reciclagem, custos por m<sup>2</sup>, permitindo uma melhor perceção dos valores. Assim, para os trabalhos constantes no mapa de quantidades de acordo com o método tradicional de reabilitação rodoviária, atinge-se um valor médio de 34,46 €/m<sup>2</sup>, enquanto com o recurso à reciclagem

chega-se a um valor médio de 21,74 €/m<sup>2</sup>, consistindo na execução de trabalhos de:

*“...fresagem do pavimento betuminoso existente, reciclagem da base em agregado britado e posterior aplicação de uma camada de regularização com incorporação de fresados, (cerca de 15%), seguido de uma camada de desgaste tradicional. Esta solução apresenta ainda a vantagem de possibilitar a manutenção das atuais cotas do pavimento. Caso se verifique a possibilidade de alteração das cotas finais do pavimento, poder-se-á assim suprimir os trabalhos de fresagem e efetuar uma reciclagem do pavimento betuminoso existente. Esta solução poderá gerar uma economia de cerca de 15% relativamente ao preço da reciclagem indicada anteriormente”.*

Se a opção for pela alteração das cotas finais do pavimento, suprimindo os trabalhos de fresagem e se se executarem através da reciclagem *in situ* com emulsão betuminosa, o processo da reciclagem iria ter um benefício aproximado de 15%, em relação à reciclagem atrás mencionada, o preço médio passava a ser de 18,62 €/m<sup>2</sup>.

A empresa F apresenta apenas custos de fornecimentos à boca da central de material para as camadas de regularização, AC20 Reg. 35/50 (mistura betuminosa densa) com 25% de incorporação de material fresado, a 35,00 €/ton e para a camada de desgaste em betão betuminoso AC surf 35/50 (betão betuminoso de desgaste) com 10% de incorporação de material fresado a 40,00 €/ton. Sem a incorporação de fresados para a camada de regularização AC20 reg. 35/50 (mist. betuminosa densa) sairia a 43,00 €/ton e para a camada de desgaste AC surf 35/50 (betão betuminoso de desgaste) sairia a 45,00 €/ton, isto, para exemplificar que a reciclagem tem custos inferiores aos do método tradicional, uma redução de custo na ordem dos 12% aos 20%.

A empresa C, como já foi dito, não opta pelas técnicas de reciclagem.

A empresa A optou pela reciclagem *in situ* a frio com cimento como solução para a execução dos trabalhos e como alternativa ao processo

convencional, por ser o mais adequado para a execução dos trabalhos atendendo às características do terreno do caso em estudo e visto que o pavimento estava degradado a nível estrutural. De facto, o pavimento do troço correspondente encontrava-se bastante degradado com grandes depressões e intransitável nalguns casos. De acordo com as patologias detetadas, tudo indicava uma insuficiente compactação das camadas inferiores com deficiências da estrutura do pavimento e dos solos de fundação, formando na zona da via em contacto com os rodados dos veículos depressões significativas com rodeiras de pequeno e grande raio. Durante a execução da obra através do método convencional, detetou-se, segundo os trabalhos desenvolvidos e tendo em conta e seguindo o mapa de quantidades, que a estrutura do pavimento estava mal compactada, podendo daí verificar-se que os solos eram bons e isentos de argilas. O tout-venant de origem do rio não era rolado mas sim britado, assim o método da reciclagem *in situ* com cimento poderia ser empregue na obra sem qualquer objeção, utilizando-se a máquina recicladora. Nesse sentido, conforme as respostas apresentadas pela empresa A, a reciclagem era um processo que poderia ter sido usado no troço de estrada, havendo benefícios em termos de custos. Os artigos 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 e 1.5, correspondentes ao articulado do mapa de quantidades para o método tradicional, não entrariam no orçamento no caso de ter sido aplicado o método da reciclagem e seriam reduzidos a um artigo adaptado à reciclagem *in situ* a frio com cimento por via húmida, conforme o enumerado no inquérito respondido pela empresa A. Desse modo, do ponto de vista económico, o método da reciclagem utilizando a técnica *in situ* a frio com cimento é o mais vantajoso. Acresce que a empresa A optaria por esta técnica na execução da empreitada não só por ser mais rentável mas também por ser a solução mais fácil de controlar em relação às outras técnicas da reciclagem:

*“...Optaria pela opção reciclagem in situ com cimento, porque é uma solução mais fácil de controlar, com mais tradição, se houver sobredosagem acidental do cimento à partida não é prejudicial como no caso das emulsões e betumes. Quando se está a utilizar betume espuma ou emulsão os bicos da máquina entopem-se com muita frequência, sendo que por vezes o operador não se apercebe, logo a*

*zona reciclada não fica toda ela com a mesmas quantidades de ligante, podendo haver maior concentração de ligante em zonas localizadas e isso é muito prejudicial para o comportamento da camada ...”*

*“... As reciclagens em central a quente, a frio e semi-quente não são na nossa opinião economicamente viáveis, além disso não existem equipamentos apropriadas para este tipo de trabalhos ...”*

A designação ou descrição dos trabalhos a incorporar no mapa de trabalhos, no âmbito da reciclagem *in situ* a frio com cimento em pavimentos, seria o seguinte:

Quadro n.º 11 - Mapa de trabalho adaptado à reciclagem de pavimentos *in situ* a frio com cimento (elaborado pela empresa A, em resposta à alínea g) do n.º 2 do inquérito)

|     |   |                |          |  |  |
|-----|---|----------------|----------|--|--|
| 1.1 | Reciclagem " <i>in situ</i> " do pavimento existente por via húmida, por demolição daquele, incluindo todas as operações necessárias até à sua reaplicação, e adição mínima de ---% de cimento, com equipamento tipo Wirtgen. | m <sup>2</sup> | 23425,23 |  |  |
| 1.2 | Fornecimento e colocação de regas betuminosas de impregnação, colagem ou cura:  |                |          |  |  |
|     | Rega de cura betuminosa:  |                |          |  |  |
|     | Com emulsão betuminosa.   | m <sup>2</sup> | 23425,23 |  |  |

Nas respostas ao inquérito, a empresa B optou por duas soluções viáveis em relação ao método convencional. Qualquer uma delas traz benefícios em termos de custos.

A solução 1 é constituída por duas fases:

- primeira fase: execução de fresagem do pavimento existente numa espessura de 0,05 a 0,10 m correspondente às camadas de betão betuminoso;
- segunda fase: reciclagem da camada de granulometria extensa incorporando cimento numa espessura de 0,20 m.

Seguidamente, seria executada a camada de regularização em betão betuminoso com incorporação de fresados, através da reciclagem a quente em central com betume utilizando uma percentagem de 15% dos produtos da fresagem. Por último, seria executada a camada de desgaste numa espessura de 0,04 m em betão betuminoso sem incorporação de produtos fresados. A solução 2 poderia ser válida mais no campo funcional e menos no campo estrutural, por ser a reciclagem *in situ* com emulsão betuminosa numa espessura de 0,15 m. Posteriormente, seriam executadas as camadas de regularização em mistura betuminosa com 0,06 m de espessura e camada de desgaste com 0,04 m de espessura. Em conclusão, uma vez que o pavimento existente estava bastante degradado a nível estrutural, a solução mais benéfica seria sem dúvida alguma a solução 1, dado que a reciclagem iria interferir com a camada de granulometria extensa, enquanto a solução 2 iria interferir mais com as camadas em betão betuminoso a nível funcional, não sendo por isso recomendável para este caso.

A empresa C por não ter equipamento próprio para a reciclagem de pavimentos *in situ* a frio desvaloriza os trabalhos de reciclagem para o troço de estrada do caso de estudo. Por sua vez, seguindo as respostas da empresa ao inquérito, deduz-se que a execução de trabalhos aplicando-se somente a técnica de reciclagem em central a quente com betume não é uma boa aposta.

A empresa D é uma empresa que não tem qualquer experiência relacionada com reciclagem de pavimentos rodoviários, por isso não responde às questões do inquérito relacionadas com essa temática. Percebe-se que os técnicos da empresa não possuem experiência e não veem a reciclagem como uma alternativa ao sistema convencional, no entanto referem em termos teóricos que a reciclagem poderá ser uma boa aposta e uma boa opção ao sistema convencional em termos ambientais. Pressupõe-se que a empresa não possui equipamento próprio para a reciclagem de pavimentos, entendendo que atualmente é difícil adquirir esse equipamento porque a crise não dá azo a grandes investimentos.

À semelhança da empresa D, verifica-se que a empresa E não tem experiência na reciclagem de pavimentos rodoviários, mas possui alguns conhecimentos na área. Constata-se que realizou apenas trabalhos de fresagem com máquina fresadora de alugar. Refere que a reciclagem é uma

boa aposta no reaproveitamento dos produtos fresados em vez de estes serem reencaminhados para um vazadouro autorizado o que implica custos. Mais se verifica que a empresa está sensibilizada para a reciclagem de pavimentos, demonstrando que ao recorrer ao aluguer de equipamento não tem capacidade para ter maquinaria própria, e, como é óbvio, atualmente é impensável as empresas investirem em maquinaria uma vez que a crise é notória e as empresas não arriscam.

A empresa F optaria pela reciclagem de pavimentos como alternativa à técnica convencional, pelo facto do material ser reaproveitado sem ter que ser encaminhado para vazadouro, trazendo por isso benefícios ambientais, económicos, bem como redução dos meios de transporte para a execução de trabalhos e poupança dos recursos naturais<sup>9</sup>. Para a execução dos trabalhos a empresa escolheria a reciclagem da camada de base reciclada com cimento e a reciclagem em central a quente com betume para a execução posterior da camada de regularização e de desgaste em betão betuminoso reciclado proveniente do material fresado da obra. Os trabalhos consistem no seguinte: fresagem da camada de desgaste do pavimento existente de modo a garantir a quantidade necessária para a execução das novas camadas com material fresado; para a camada de regularização em mistura betuminosa com 0,06 m de espessura é incorporado 25% do material fresado e para a camada de desgaste em betão betuminoso com 0,04 m de espessura é incorporado 10% do material fresado. Deve por isso ser necessário apenas fresar o pavimento existente na ordem dos 35% que corresponde à camada de desgaste existente; o restante material das camadas betuminosas que não são fresados é reaproveitado e desagregado *in situ* pela recicladora e envolvido nas camadas em granulometria extensa existente com a incorporação de cimento de modo a perfazer 0,30 m de espessura, e compactado através de cilindro estático e pneumático. A técnica mencionada pela empresa é bastante boa e deve ser tida em conta por não ser necessário desperdiçar material: o material existente é todo reaproveitado no local de intervenção dos trabalhos sem que seja necessário o recurso ao transporte dos produtos sobrantes a vazadouro.

As empresas não estiveram no local para verificar o estado do pavimento existente, logo não tiveram elementos mais precisos para uma análise mais

---

<sup>9</sup> [https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/6786/3/Moreira\\_2006\\_CN.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/6786/3/Moreira_2006_CN.pdf), acedido a 07-01-2014

detalhada, baseando-se apenas num mapa de quantidades para elaborarem as respostas às várias questões colocadas no inquérito. O objetivo foi, no entanto, conseguido. O intuito deste inquérito era conseguir valores, custos inerentes a cada método, no sentido de se constatar qual das técnicas é economicamente mais vantajosa.

## **2.3 ANÁLISE COMPARATIVA**

Com vista a se verificar qual das técnicas é a mais económica e viável anexa-se um Quadro 8 com custos de trabalhos por m<sup>2</sup> executados pelo método tradicional e Quadro 9 pela técnica de reciclagem em pavimentos rodoviários, *in situ*, a frio, na conservação e manutenção das estradas em Portugal, nas empreitadas que foram executadas em datas e em locais diferentes e em obras de médio/grande volume. No que se refere a obras pequenas esses valores não podem ser dados como uma referência, os valores terão que ser acrescidos, devido a rendimentos de trabalhos e ao valor da deslocação de maquinaria (ida e volta) para a execução da obra. Os custos são uma média ponderada de cada tarefa e não é específica apenas a uma obra, mas a várias. Para esta média foi necessário o apoio e a colaboração das Estradas de Portugal (E.P.), pois, para o efeito, é a entidade que mais empreitadas realiza a nível nacional quer utilizando o método convencional quer utilizando as técnicas da reciclagem de pavimentos.

Analisando os Quadros 12 e 13 pode-se constatar que existem diferenças de custos da pavimentação tradicional em relação à pavimentação em que são utilizadas as técnicas de reciclagem.

Tendo em conta a crise mundial e, em especial, a crise na construção - a qual é um dos pilares no desenvolvimento de um país - em que Portugal está inserido, após consulta a algumas empresas, estas são unânimes em referir que, na maioria dos casos, praticam preços nos seus orçamentos a custo zero, ou seja, sem lucros (para não despedirem pessoal e não pedirem a sua insolvência) para poderem ser adjudicatárias das empreitadas postas em concurso com custos correspondentes aos materiais, mão-de-obra e equipamento.

Quadro n.º 12 - Tabela de custos referente à pavimentação corrente

| Designação   | Un             | Preço/m <sup>2</sup> |
|--|----------------|----------------------|
| <b>Pavimentação Corrente</b>   |                |                      |
| Escavação em terreno de qualquer natureza com 0,30m de espessura, incluindo transporte, carga e descarga dos produtos sobranes a vazadouro.  | m <sup>2</sup> | 0,80 €               |
| Camada de sub-base em ABGE (tout-venaint) com 0,15m de espessura, após recalque, incluindo fornecimento, espalhamento, regularização, compactação e todos os trabalhos e acessórios necessários. | m <sup>2</sup> | 2,50 €               |
| Camada de sub-base em ABGE (tout-venaint) com 0,25m de espessura, após recalque, incluindo fornecimento, espalhamento, regularização, compactação e todos os trabalhos e acessórios necessários. | m <sup>2</sup> | 4,27 €               |
| Camada de sub-base em ABGE (tout-venaint) com 0,30m de espessura, após recalque, incluindo fornecimento, espalhamento, regularização, compactação e todos os trabalhos e acessórios necessários. | m <sup>2</sup> | 5,00 €               |
| Camada de base em ABGE (tout-venaint) com 0,25m de espessura, após recalque, incluindo fornecimento, espalhamento, regularização, compactação e todos os trabalhos e acessórios necessários.     | m <sup>2</sup> | 4,27 €               |
| Camada de base em ABGE (tout-venaint) com 0,15m de espessura, após recalque, incluindo fornecimento, espalhamento, regularização, compactação e todos os trabalhos e acessórios necessários.     | m <sup>2</sup> | 2,60 €               |
| Camada de regularização (AC14 reg ligante) em BB com 0,06m de espessura, após recalque, incluindo rega de colagem e todos os trabalhos e acessórios necessários.                                 | m <sup>2</sup> | 5,20 €               |
| Camada de desgaste (AC14 surf ligante) em BB com 0,04m de espessura, após recalque, incluindo rega de colagem e todos os trabalhos e acessórios necessários.                                     | m <sup>2</sup> | 3,50 €               |
| Camada de desgaste (AC14 surf ligante) em BB com 0,05m de espessura, após recalque, incluindo rega de colagem e todos os trabalhos e acessórios necessários.                                     | m <sup>2</sup> | 4,30 €               |

No que se refere às obras de construção civil, existem tabelas de custos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) com rendimentos de mão-de-obra e de equipamentos, já para a construção de vias de comunicação não existem tabelas de custos, pelo que foi necessária a colaboração da E.P., de empresas do ramo de estradas e de uma pesquisa bastante rigorosa na

internet, de modo a ter-se elementos e custos de referência para a execução de cada tarefa.

Quadro n.º 13 - Tabela de custos referente à pavimentação com material reciclado

| <b>Pavimentação com material Reciclado</b>   | Un             | Preço/m <sup>2</sup> |
|--|----------------|----------------------|
| Reciclagem de pavimento a frio " <i>in situ</i> " do pavimento existente numa espessura de 0,30m e uma percentagem 5 % de cimento IIA 32,5, inclui todo o equipamento necessário para a sua execução e todos os trabalhos de compactação, humidade necessária, homogeneização da mistura, perfilamento adequado da razante de modo a criar as pendentes necessárias e mão-de-obra necessária à sua correta execução. | m <sup>2</sup> | 7,40 €               |
| Mistura reciclada " <i>in situ</i> " a frio, com emulsão betuminosa, na espessura de 0,15 m, inclui todo o equipamento necessário para a sua execução e todos os trabalhos de compactação, humidade necessária, homogeneização da mistura, perfilamento adequado da razante de modo a criar as pendentes necessárias e mão-de-obra necessária à sua correta execução.  | m <sup>2</sup> | 4,20 €               |
| Camada de regularização (AC14 reg ligante) em BB de 0,06 m de espessura com mistura reciclada a quente, em central, incluindo rega de colagem e todos os trabalhos e acessórios necessários.   | m <sup>2</sup> | 4,00 €               |
| Camada de regularização (AC14 reg ligante) em BB de 0,04 m de espessura com mistura reciclada a quente, em central, incluindo rega de colagem e todos os trabalhos e acessórios necessários.   | m <sup>2</sup> | 3,10 €               |
| Camada de regularização (AC14 reg ligante) em BB de 0,04 m de espessura com mistura reciclada a quente, em central, incluindo rega de colagem e todos os trabalhos e acessórios necessários.   | m <sup>2</sup> | 3,60 €               |

No que diz respeito aos trabalhos de reciclagem a frio *in situ*, com cimento, por ser o tema que interessa para esta dissertação, eles foram alvo de uma pesquisa profunda através da internet e da colaboração das entidades atrás mencionadas e de algumas empresas do ramo de estradas. Para uma melhor precisão do custo foi feita uma tabela de cálculo adaptada com a referência a um artigo publicado numa revista espanhola em 2002, *Carreteras* (Fernández, 2002). Os valores foram adaptados à realidade de hoje com a colaboração do engenheiro da empresa Firms Ecológicos Soltec. A tabela de cálculo de análise de custos das unidades afetas à reciclagem *in situ* com

cimento é constituída por três fatores importantes para o cálculo: materiais, mão-de-obra e maquinaria afeta à execução dos trabalhos:

- materiais: tem que se ter em conta o tipo de estrutura do pavimento existente e seus constituintes, cimento, água e material de desgaste da recicladora, como é o caso dos bits, tambores e carcaça da mistura;
- mão-de-obra: pessoal especializado afeto à maquinaria, pessoal necessário para os cortes e mudanças do tráfego durante a execução de trabalhos nas estradas;
- maquinaria: há vários fatores que influem no custo da obra por m<sup>2</sup>, valor da aquisição, período de amortização, manutenção da maquinaria, custo financeiro, gastos da exploração, rendimentos, dias de execução por cada ano de trabalho, máquinas auxiliares afetas à obra, tais como, viatura tipo oficina para reparação das máquinas em curso, viatura para transporte de pessoal e transporte das máquinas afetas à obra (ida e volta).

As tabelas de cálculo utilizadas são as indicadas nos Quadros 14,15,16 e 17. O transporte (ida e volta) das máquinas para o local do estaleiro da zona de trabalhos tem um custo, esse custo depende da distância. Há que transportar no mínimo 5 máquinas (recicladora, VW 1000, trator com cuba de água, um compactador, no mínimo, e uma motoniveladora para a execução da rasante da estrada). O preço está na ordem de 1,5 €/km por transporte especial, de maneira que para uma distância de 100 km, o custo seja de  $100 \times 2$  (ida e volta do transporte especial)  $\times 2$  (levar e recolher as máquinas)  $\times 1,5$  €/km  $\times 5$  máquinas = 3.000,00 €. O custo dos bits, dos tambores e da carcaça da mistura da máquina recicladora, que está relacionado com o desgaste direto da máquina para a execução de trabalhos de desagregação e injeção de calda de cimento no pavimento existente numa espessura de 0,30 m, depende muito do estado do pavimento, que pode variar entre os 0,06 €/m<sup>2</sup> e os 0,12 €/m<sup>2</sup>, e de circunstâncias diferentes, uma vez que por ano pode ir aos 0,50 €/m<sup>2</sup>. A estes valores soma-se 15% para desgastes indiretos.

Quadro n.º 14 - Custo diário das diversas máquinas que integram a reciclagem *in situ*, a frio com cimento

| Tipo de máquina                              | Recicladora | Dosificador | Trator   | Compactador | Motoniveladora |
|--|-------------|-------------|----------|-------------|----------------|
|  | WR 2500     | WM 1000     | Cuba     | 20 Ton      |                |
| <b>Valor da aquisição</b>                    | 680.000 €   | 350.000 €   | 90.000 € | 120.000 €   | 210.000 €      |
| <b>Período de amortização (anos)</b>         | 7           | 7           | 7        | 7           | 7              |
| <b>Custo de financiamento (%)</b>            | 5%          | 5%          | 5%       | 5%          | 5%             |
| <b>Percentagem de reparações e materiais</b> | 10%         | 10%         | 10%      | 10%         | 10%            |
| <b>Dias de trabalho por ano</b>              | 150         | 150         | 150      | 150         | 150            |
| <b>Potencia (CV)</b>                         | 610         | 150         | 150      | 150         | 150            |
| <b>Preço do gasóleo</b>                      | 1,40        | 1,40 €      | 1,40 €   | 1,40 €      | 1,40 €         |
| <b>Custo anual</b>                           | 97.143 €    | 50.000 €    | 12.857 € | 17.143 €    | 30.000 €       |
| <b>Financiamento anual</b>                   | 4.857 €     | 2.500 €     | 643 €    | 857 €       | 1.500 €        |
| <b>Reparações e manutenção</b>               | 68.000 €    | 35.000 €    | 9.000 €  | 12.000 €    | 21.000 €       |
| <b>Total custo anual</b>                     | 170.000 €   | 87.500 €    | 22.500 € | 30.000 €    | 52.500 €       |
| <b>Custo diário</b>                          | 1.133 €     | 583 €       | 150 €    | 200 €       | 350 €          |
| <b>Combustível (8horas)</b>                  | 896 €       | 314 €       | 269 €    | 269 €       | 269 €          |
| <b>Óleos (10% do combustível)</b>            | 90 €        | 31 €        | 27 €     | 27 €        | 27 €           |
| <b>Custo do maquinista</b>                   | 160 €       | 80 €        | 80 €     | 80 €        | 80 €           |
| <b>Total do custo diário</b>                 | 2.279 €     | 1.008 €     | 526 €    | 576 €       | 726 €          |

Quadro n.º 15 - Custo total diário das máquinas que integram a reciclagem *in situ*, a frio com cimento

| Máquinas                   | Custo diário |
|----------------------------|--------------|
| <b>Recicladora WR 2500</b> | 2.279 €      |
| <b>Dosificador WM 1000</b> | 1.008 €      |
| <b>Trator c/ Cuba</b>      | 526 €        |
| <b>Cilindro 20 ton</b>     | 576 €        |
| <b>Motoniveladora</b>      | 726 €        |
| <b>Total</b>               | 5.115 €      |

O custo do equipamento auxiliar corresponde a 10% do custo total diário das máquinas principais que integram a reciclagem *in situ* a frio com cimento. O equipamento auxiliar corresponde aos veículos que transportam os manobreadores para o local de trabalho e ao veículo que faz de oficina para pequenas reparações. Para o custo total da tonelada de cimento tem que se somar o preço do transporte que pode ir aos 0,03 €/ton.km, e acrescentar 1,5 €/ton para o tempo de paragem resultante da descarga do cimento no local da obra. Para a medição final do cimento tem que se acrescentar 10% para desperdícios, que corresponde à limpeza das máquinas e às possíveis

sobreposições em zonas da passagem da recicladora no pavimento durante a execução dos trabalhos.

O rendimento do trabalho para espessuras de 0,30 m com uma percentagem de cimento na ordem dos 5% por via húmida pode oscilar entre 2660 m<sup>2</sup>/dia, em obras complicadas com material abrasivo, e inferior a 50.000 m<sup>2</sup>, e a 10.000 m<sup>2</sup>/dia em obras com condições favoráveis.

Quadro n.º 16 – Rendimentos por m<sup>2</sup>

| Comprimento da reciclagem | m                 | 3.346          | Quantidades totais |        |                |
|---------------------------|-------------------|----------------|--------------------|--------|----------------|
| Largura da reciclagem     | m                 | 7,0            | Área               | 23.425 | m <sup>2</sup> |
| Espessura de reciclagem   | m                 | 0,30           | Volume             | 7.027  | m <sup>3</sup> |
| Densidade do material     | kg/m <sup>3</sup> | 2000           | Massa              | 14.055 | t              |
| Método de trabalho        |                   | Rec.<br>Middle |                    |        |                |
| Horas de trabalho por dia | h                 | 8,0            |                    |        |                |

|                        | Produção       |      | Fator de eficiência(%) | Produção teórica |      |
|------------------------|----------------|------|------------------------|------------------|------|
| Velocidade de trabalho | m/min          | 3    | 100%                   | m/min            | 8    |
| Faixas de reciclagem   | faixas         | 3    |                        | Faixas           | 3    |
| Produção diária        | m <sup>2</sup> | 3360 |                        | m <sup>2</sup>   | 8960 |
| Duração                | Dias           | 7    |                        | Dias             | 3    |

Quadro n.º 17 - Custo total por m<sup>2</sup> sem custos indiretos e sem lucro

| Material   | Cálculo                               | Custo€/m <sup>2</sup> |
|--|---------------------------------------|-----------------------|
| <b>Material corretivo</b>  |                                       | 0,00 €                |
| <b>Cimento</b>   | 34,65 kg/ m <sup>2</sup> X 0,094€/kg  | 3,26 €                |
| <b>Bits</b>  |                                       | 0,14 €                |
| Maquinaria   | Cálculo                               | Custo€/m <sup>2</sup> |
| <b>Rendimento</b>  | 3.360 m <sup>2</sup> / dia            |                       |
| <b>Transporte de máquinas para o local de trabalho (ida e volta)</b> |                                       | 0,13 €                |
| <b>Custo total do equipamento</b>                                    | 5.115€/dia / 3.360m <sup>2</sup> /dia | 1,52 €                |
| <b>Equipamento auxiliar</b>  | 511,5€/dia / 3.360m <sup>2</sup> /dia | 0,15 €                |
| Mão-de-obra  | Cálculo                               | Custo€/m <sup>2</sup> |
| <b>Encarregado</b>   | 144€ /dia / 3.360m <sup>2</sup> /dia  | 0,04 €                |
| <b>Serventes</b>   | 192€/dia / 3.360m <sup>2</sup> /dia   | 0,06 €                |
| <b>Total</b>   |                                       | <b>5,30 €</b>         |

Os custos verificados na reciclagem *in situ* a frio com cimento visam confrontar com os custos praticados pelo método tradicional, de modo a se poder avaliar qual das técnicas é economicamente mais vantajosa, tendo em conta a mão-de-obra, o equipamento e o material afeto a cada tarefa. Para se ser mais explícito, e tendo em conta o caso de estudo, observa-se o seguinte no que se refere aos preços adotados nos trabalhos correntes relativos ao método tradicional sem as camadas adicionais em betão betuminoso, Quadro 18:

Quadro n.º 18 - Trabalhos aplicando o método tradicional

| Código   | Designação dos Trabalhos   | Ud             | Quant.   | Preço unit. | Totais      |
|----------|--|----------------|----------|-------------|-------------|
| <b>1</b> | <b>PAVIMENTAÇÃO</b>  |                |          |             |             |
| 1.1      | Abertura de caixa no Pavimento, com profundidade de 0,60m, incluindo escavação, remoção e transporte a vazadouro dos produtos escavados  | m <sup>3</sup> | 14055,14 | 2,60 €      | 36.543,36 € |
| 1.2      | Regularização e compactação do fundo de caixa  | m <sup>2</sup> | 23425,23 | 0,20 €      | 4.685,05 €  |
| 1.3      | Fornecimento e colocação de manta geotêxtil de alta densidade com a gramagem de 300 g/cm <sup>3</sup>  | m <sup>2</sup> | 23425,23 | 0,95 €      | 22.253,97 € |
| 1.4      | Execução de camada de sub-base em agregado britado de granulometria extensa, com a espessura de 0,25m, após recalque com material proveniente de britagem de granito, incluindo fornecimento, espalhamento, regularização e compactação e todos os trabalhos necessários | m <sup>2</sup> | 23425,23 | 3,75 €      | 87.844,61 € |
| 1.5      | Execução de camada de base em agregado britado de granulometria extensa, com a espessura de 0,25m, após recalque com material proveniente de britagem de granito, incluindo fornecimento, espalhamento, regularização e compactação e todos os trabalhos necessários     | m <sup>2</sup> | 23425,23 | 3,75 €      | 87.844,61 € |

|              |                     |
|--------------|---------------------|
| <b>Total</b> | <b>239.171,60 €</b> |
|--------------|---------------------|

Para os mesmos trabalhos mas aplicando as técnicas da reciclagem de pavimentos para a execução das camadas de base, pode-se observar o seguinte, Quadro 19:

Quadro n.º 19 - Trabalhos aplicando as técnicas de reciclagem *in situ*, a frio com cimento

| Código | Designação dos Trabalhos   | Ud             | Quant. | Preço unit. | Totais       |
|--------|--|----------------|--------|-------------|--------------|
| 1.1    | Reciclagem de pavimento a frio <i>in situ</i> do pavimento existente numa espessura de 0,30 m e uma percentagem 5% de cimento IIA 32,5, inclui todo o equipamento necessário para a sua execução e todos os trabalhos de compactação, humidade necessária, homogeneização da mistura, perfilamento adequado da razante de modo a criar as pendentes necessárias e mão-de-obra necessária à sua correta execução. | m <sup>2</sup> | 23425  | 5,30 €      | 124.152,50 € |

De referir para que um pavimento esteja em contacto direto com o rodado dos veículos é necessário que sejam executadas camadas adicionais para consolidar e impermeabilizar toda a estrutura do pavimento. As camadas para a consolidação da estrutura do pavimento são as: camada de regularização em mistura betuminosa densa e a camada de desgaste em betão betuminoso. É de salientar, antes da execução dos trabalhos sejam feitos ensaios laboratoriais e dimensionamento da estrutura do pavimento em função das: características do pavimento existente, do tráfego a que está sujeito a via, das condições atmosféricas da zona, do fendilhamento por fadiga das camadas betuminosas, fendilhamento por retração, perda de coesão do material com ligante hidráulico e da deformação permanente (Batista, 2009; Santos, 2009). É de toda a conveniência saber-se se a camada de base reciclada na espessura de 0,30 m seria a espessura necessária para o suporte das cargas de pavimento, deve ser verificada a percentagem de cimento e a qualidade do cimento, e as espessuras das camadas adicionais em mistura betuminosa e betão betuminoso.

O objetivo da aplicação da reciclagem de pavimentos *in situ* a frio com cimento é transformar um pavimento degradado, débil e heterógeno num pavimento com estrutura mais homogénea e resistente, pronto para receber o trânsito. A durabilidade da via deve ser incrementada e garantida, com maior resistência à erosão e menor suscetibilidade à água, maior resistência à fadiga e maior capacidade estrutural (Santos, 2009). É intencional que seja aumentada a sua capacidade de resistência face às solicitações impostas pelos veículos automóveis. Os solos de fundação e as camadas inferiores do

pavimento que sejam beneficiados, eliminando as características deficientes que poderiam ter tido antes da aplicação da técnica da reciclagem.

Para a execução dos trabalhos de reciclagem de pavimento a frio, in situ, com o ligante o cimento descritos no Quadro 19 a recicladora WR 2500 S (figura n.º 34 e figura n.º 36) da Wirtgen é o equipamento apropriado para este processo de reciclagem, com grandes produções diárias, com larguras de trabalho de 2,50m ou 3,00m e com a profundidade de trabalho que pode ir até 0,50m, regulável pelo rebaixamento ou elevação do rotor. Esta máquina, munida por um rotor e câmara de mistura, pode trabalhar a várias velocidades; pode ainda trabalhar em rotação de desagregação do material ascendente ou descendente sem que lhe seja acionada a conversão. Possui um sistema de nivelamento automático com controle de profundidade confiável com resultados bastante satisfatórios e perfeitos, Wirtgen GmbH, 2006, Recicladora WR 2500 S.



Figura n.º 34- Máquina recicladora WR 2500 S, Empresa Construções JJR, S.A.

A máquina WM 1000 (figura n.º 35) misturadora de calda de cimento que é acoplada à recicladora é um equipamento que, de certa forma, vem como complemento a esse processo, permitindo que a mistura seja o mais homogénea possível com a distribuição uniforme da calda de cimento no pavimento desagregado e fresado pela recicladora, não havendo por isso emissão de poeira para a atmosfera. Possui um sistema de injeção controlado

por microprocessadores, capaz de medir água, cimento, para adicionar à mistura desagregada ou fresada consoante o grau de exigência e mediante fórmulas de trabalho na composição da mistura. A calda de cimento é alimentada por meio das conexões da mangueira, Wirtgen, Group <sup>10</sup>.



Figura n.º 35 - Misturadora WM 1000 acoplada à recicladora para a operação de reciclagem a frio in situ com incorporação de calda de cimento, Wirtgen Group <sup>11</sup>

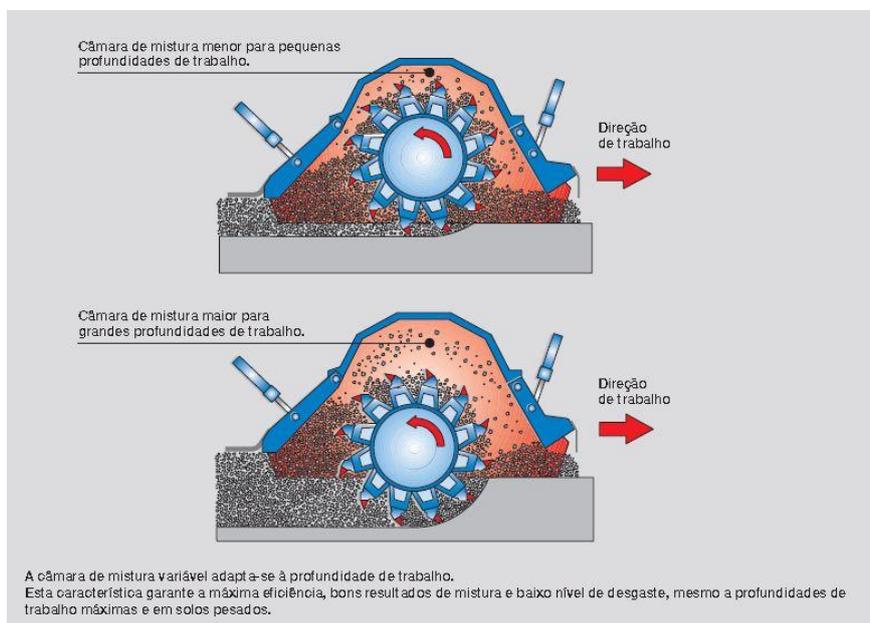


Figura n.º 36- Recicladora WR 2500 S (Wirtgen, 2006)

<sup>10</sup> Wirtgen, GmbH, slurry mixer WM 1000, [http://www.wirtgen.de/en/produkte/kaltrecycler/wm\\_1000/WM1000\\_k\\_Bildergalerie.html](http://www.wirtgen.de/en/produkte/kaltrecycler/wm_1000/WM1000_k_Bildergalerie.html), acedido a 22-08-2012

<sup>11</sup> Wirtgen, GmbH, slurry mixer WM 1000, [http://www.wirtgen.de/en/produkte/kaltrecycler/wm\\_1000/WM1000\\_k\\_Bildergalerie.html](http://www.wirtgen.de/en/produkte/kaltrecycler/wm_1000/WM1000_k_Bildergalerie.html), acedido a 22-08-2012

A sequência na execução dos trabalhos desta natureza através do equipamento próprio para cada tarefa é considerada tendo em conta a função e o método de trabalho, conforme se pode observar pelas figuras a seguir apresentadas, as quais dão uma perceção de como é efetuado um pavimento reciclado *in situ* a frio com cimento.

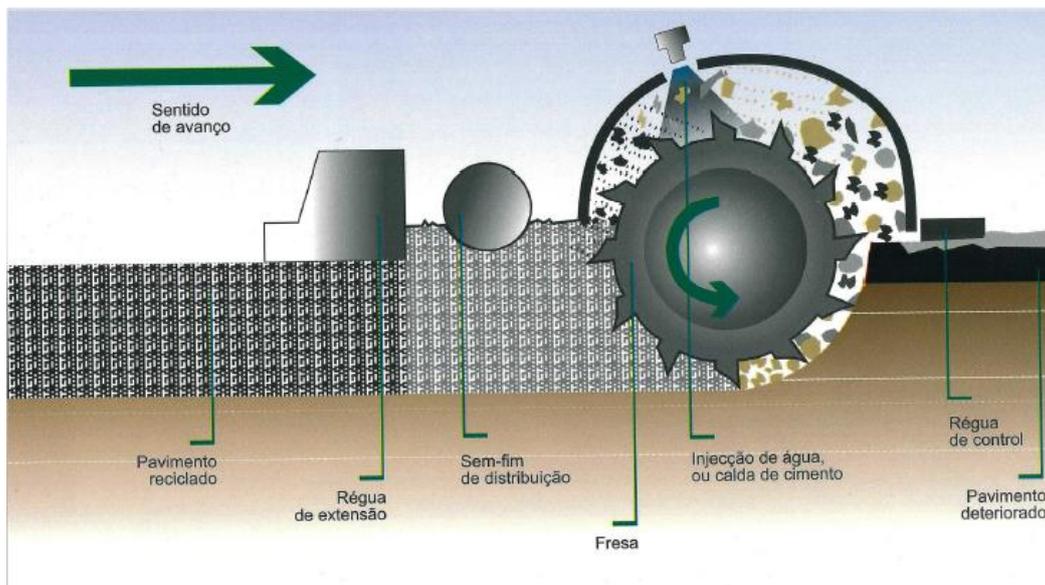


Figura n.º 37 - Processo de reciclagem *in situ* a frio de pavimentos rodoviários utilizando a máquina recicladora (Couto, 2009).



Figura n.º 38 - Sequência de equipamento para a execução dos trabalhos de reciclagem *in situ* a frio com cimento (Gomes, 2009)

A Motoniveladora (figura n.º 39) é utilizada no pavimento reciclado com o objetivo de nivelar e regularizar o pavimento reciclado logo após a primeira compactação pelo cilindro de rolos.



Figura n.º 39 - motoniveladora, equipamento utilizado após compactação do pavimento reciclado pelo cilindro de rolos, para regularização e nivelamento do pavimento, Changlin, Motoniveladora PY190H <sup>12</sup>



Figura n.º 40 - Cilindro de pneus, equipamento utilizado após a utilização da motoniveladora <sup>13</sup>

Por último, e após a utilização da motoniveladora e do cilindro de pneus (figura n.º 40) no pavimento reciclado, é utilizado o cilindro de rolos (figura n.º 41) com vista à compactação final da superfície de rolamento do pavimento para garantir a sua qualidade funcional.

---

<sup>12</sup> Changlin Company Ltd, Motoniveladora do tipo PY190H, [http://changlin.com.pt/2motor\\_grader\\_2.html](http://changlin.com.pt/2motor_grader_2.html), acedido a 22-08-2012

<sup>13</sup> Moviter, representante exclusiva da Hamm em Portugal, Cilindros do tipo Hamm, <http://www.moviter.pt/portal/index.php?id=1391>, acedido a 22-08-2012



Figura n.º 41 - Cilindro de rolos, equipamento a ser utilizado após o pavimento estar reciclado <sup>14</sup>

Exemplo seguido pela (“Apresentação da empreitada – E.N. 226, km 14,000 ao km 64,000, beneficiação entre Lamego e Ponte do Abade – reciclagem *in situ* com cimento do pavimento existente, autorizado por Rodrigues, Bruno, Empresa JJR Filhos S.A., Julho 2007”):

a) Os trabalhos executados segundo as seguintes etapas:

- correção pontual da granulometria quando necessário;
- o pavimento existente foi escarificado e foi-lhe adicionada água, cimento, agregados quando necessário e aditivos;
- pré-compacção a 90-95%, de modo a evitar a perda da humidade;
- nivelamento para melhorar e regularizar a superfície do pavimento;
- compactação final a 98-100% com o objectivo de atingir a densidade óptima;
- cura da base para protecção da mistura reciclada;

b) Em função de cada etapa foi usado o equipamento (figura n.º42):

- Recicladora Wirgten 2500 com o objetivo de fresar e escarificar o pavimento existente;
- acoplada à recicladora tem-se a misturadora Wirgten WM 400 – 25 ton cimento / 8 m3 água;

<sup>14</sup> Moviter, representante exclusiva da Hamm em Portugal, Cilindros do tipo Hamm, <http://www.moviter.pt/portal/index.php?id=1391>, acedido a 22-08-2012

- cilindro vibrador compactador do pavimento reciclado;
- motoniveladora para nivelamento e regularização do pavimento reciclado;
- cilindro de rolo e cilindro de pneus para compactação final do pavimento reciclado;
- cisterna para armazenamento de cimento – 30 ton;
- trator com tanque para abastecimento de água – 8 m3.

Após a execução dos trabalhos sugere-se que se façam ensaios para verificação das resistências e capacidade de carga da estrutura executada.

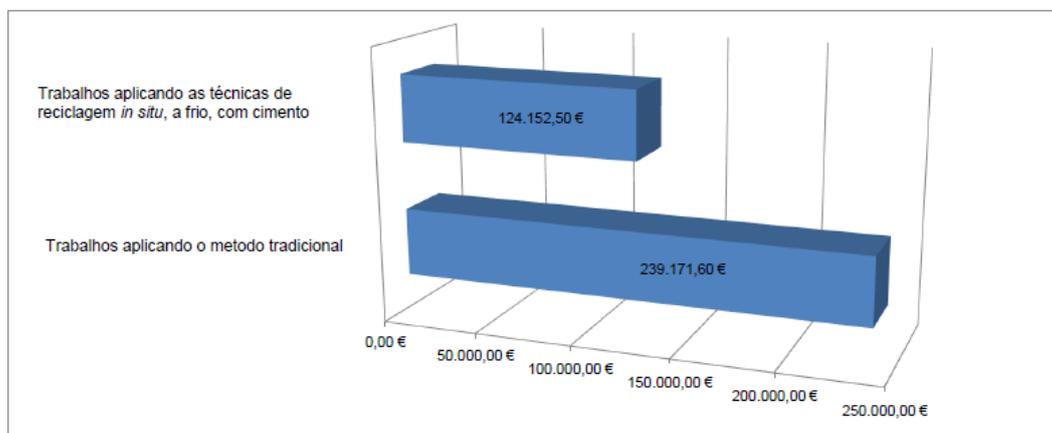


Figura n.º 42 - Trabalhos aplicando o método tradicional e técnicas de reciclagem *in situ*, a frio, com cimento

Através da análise do quadro apresentado, deduz-se que a reciclagem de pavimentos para este tipo de trabalhos é a melhor opção (figura n.º 42). Neste caso, poder-se-á dizer que a reciclagem tem uma vantagem económica próximo dos 50%, havendo que acrescentar a este valor uns 6 a 10% correspondente ao lucro da empresa e uns 10% correspondente a custos indiretos, uma vez que os valores registados na tabela de custos para o método tradicional já contemplam o lucro da empresa e os custos indiretos.

A reciclagem de pavimentos traz também vantagens num outro aspeto: ao utilizar-se o método tradicional, na operação da escavação são executados uma média de 335 m<sup>3</sup> por dia, sendo, portanto, precisos 42 dias úteis para que a tarefa seja concluída, ou seja são necessários mais dias de execução de trabalhos e de movimentação dos camiões para o transporte dos produtos sobranes a vazadouro - sacrificando, assim, mais as estradas devido à deslocação dos veículos de transporte - já que executando-se o mesmo tipo de

trabalhos com base no recurso às técnicas da reciclagem *in situ* a frio serão apenas necessários 7 dias para que a tarefa seja terminada. Por sua vez, as estradas não serão tão sacrificadas com o transporte de produtos sobrantes porque o material é reutilizado *in situ* através da recicladora.

No que respeita à execução das camadas de sub-base e base, através do uso do método tradicional, diga-se que com o transporte do agregado britado em granulometria extensa para o local de intervenção de trabalhos serão necessários também 42 dias úteis que corresponde a uma média de 558 m<sup>2</sup>/dia, mais uma vez se observa que há vantagens com o uso do processo da reciclagem de pavimentos. De facto, através da utilização deste processo, na primeira semana os trabalhos incidem na escavação; nas semanas seguintes, até perfazer 42 dias úteis, a escavação e as camadas de sub-base e base são executadas em simultâneo; após este tempo, serão necessários mais 6 dias para se terminarem os trabalhos das camadas de sub-base e base, totalizando, assim, 48 dias úteis para a execução das três tarefas (figura n.º 43).

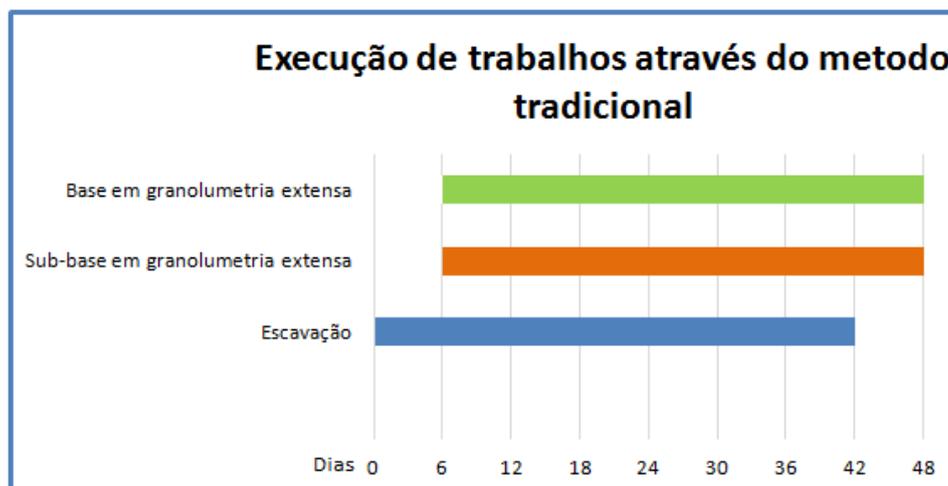


Figura n.º 43 - Trabalhos aplicando o método tradicional



Abertura de caixa de pavimento (Escavação)



Colocação de sub base e base em granulometria extensa



Compactação da granulometria extensa, colocação das camadas em betão betuminoso  
Figura n.º 44 – Processo construtivo do método tradicional

O processo construtivo para a execução de trabalhos no âmbito do método tradicional são os indicados na figura n.º 44 que compreende o seguinte:

- escavação, equipamento: escavadora;
- transporte dos produtos resultantes da escavação a vazadouro, equipamento: camião;
- regularização e compactação do fundo de caixa de pavimento, equipamento: motoniveladora e cilindro de rolos;

- transporte de material de granulometria extensa para a execução da camada de sub-base, equipamento: retroescavadora e camião;
- colocação de granulometria extensa, equipamento: retroescavadora e motoniveladora;
- rega de água e compactação da camada de sub-base, equipamento: joper e cilindro de rolos;
- rega de água e compactação da camada de base, equipamento: joper e cilindro de rolos;
- rega de impregnação betuminosa, equipamento: cisterna e espalhador de rega de impregnação;
- camada de regularização em mistura betuminosa e compactação equipamento: espalhadora, camião, cilindro de pneu e de rolo;
- rega de colagem, equipamento: cisterna e espalhador de rega de colagem;
- camada de desgaste em betão betuminoso e compactação, equipamento: espalhadora, camião, cilindro de pneu e de rolo.

Em conclusão, depreende-se facilmente, uma vez mais, que em termos técnicos, económicos e ambientais a reciclagem de pavimentos aplicando-se a técnica a frio *in situ* com cimento é mais vantajosa em relação à pavimentação com recurso ao método tradicional <sup>15</sup>, conforme quadro 20. Há uma redução do tempo em dias para a execução dos trabalhos, maior rentabilidade na produção desses mesmos trabalhos, menor carga de pessoal (mão-de-obra) e de equipamento. A viabilidade económica é assegurada com redução de custos por m<sup>2</sup>, com valores próximos dos 50% relativamente ao método tradicional. Por sua vez, há redução do recurso a transportes e ao material proveniente das pedreiras trazendo como consequência um benefício ambiental: as estradas adjacentes são menos sacrificadas.

A partir das respostas das empresas e da análise comparativa verificou-se que, tendo em consideração o estado de degradação da via, a técnica que mais se adaptava em termos económicos e ambientais era a reciclagem *in situ* com cimento por via húmida que corresponde à intenção da empresa A. É a mais viável para as características do caso de estudo, pois não é necessário

<sup>15</sup> [https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/6786/3/Moreira\\_2006\\_CN.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/6786/3/Moreira_2006_CN.pdf), acedido a 07-01-2014

fresar a camada de betuminoso e depois reciclar a base em agregado britado: a reciclagem far-se-á de uma só vez, tirando-se partido da redução dos meios de transportes para o encaminhamento do material fresado para a central, já que o material seria reciclado no próprio local através da máquina recicladora. Por outro lado, verifica-se que apresenta cotas finais do pavimento com 0,10 m acima em relação às cotas do pavimento existente, podendo as mesmas ser alteradas porque se trata de uma estrada que não tem passeios e em que as serventias podem ser adaptadas, trazendo benefícios em termos de drenagem superficial e subterrânea. É, por isso, solução viável na medida em que não se vê qualquer inconveniente em alterar as cotas acima do existente, vindo a contribuir para uma boa drenagem das águas provenientes da chuva e das possíveis infiltrações de água no pavimento. Garante, assim, uma maior proteção dos solos de fundação e das bases do pavimento, contribuindo para uma boa qualidade funcional da superfície de rolamento, o que permite aumentar o tempo útil de vida da estrada quando posta ao serviço a qualquer tipo de tráfego.

Como alternativa tem-se uma 2.<sup>a</sup> hipótese, a qual corresponde à solução 1 apresentada pela empresa B, que se enquadra nas características do pavimento existente, sendo a “*fresagem do pavimento betuminoso existente, reciclagem da base em agregado britado e posterior aplicação de uma camada de regularização com incorporação de fresados, (cerca de 15%), seguido de uma camada de desgaste tradicional*”. Tem um senão: o material fresado não é aplicado na totalidade, cerca de 85% do material terá que ir para vazadouro, ou para *stock* da central, isto acarreta custos de transporte e contribui para a poluição do meio ambiente. A camada de base é reciclada *in situ* a frio, com cimento.

Quadro n.º 20 - Estimativa de custos para as soluções apresentadas pelas empresas

| <b>Empresas</b> | <b>Soluções adotadas para a execução dos trabalhos</b>          | <b>Estimativa de Custos</b> |
|-----------------|---|-----------------------------|
| Empresa A       | Reciclagem de pavimento <i>in situ</i> , com cimento            | 84.330,83 €                 |
| Empresa B       |   |                             |
| Solução1        | Reciclagem de pavimento <i>in situ</i> , com cimento            | 154.606,52 €                |
| Solução2        | Reciclagem de pavimento <i>in situ</i> , com emulsão betuminosa | 63.248,12 €                 |
| Empresa C       | Método tradicional  |                             |
| Empresa D       | Sem solução   |                             |
| Empresa E       | Sem solução   |                             |
| Empresa F       | Reciclagem de pavimento <i>in situ</i> , com cimento            | 154.606,52 €                |

A solução 2 da empresa B, que corresponde à reciclagem *in situ* a frio, com emulsão betuminosa, à semelhança da empresa A dá a hipótese de alterar as cotas finais do pavimento, sem haver necessidade de se recorrer à fresagem do betão betuminoso existente e de se efetuar a reciclagem do betuminoso, é uma boa técnica, mas somente quando as camadas a reciclar sejam apenas as misturas betuminosas e neste caso as camadas a reciclar interferem também com a camada de base do pavimento existente, pelo que esta técnica não seria a mais aconselhada.

No que respeita à solução da empresa F, ela é igualmente boa, pois o material é todo reaproveitado no local da obra, a camada de desgaste em betão betuminoso é fresada em parte, ou seja, somente será fresado o necessário de modo a satisfazer a percentagem de material fresado para a constituição das novas camadas em betão betuminoso recicladas e a base é reciclada *in situ* a frio com cimento.

Há um senão comum à solução 1 apresentada pela empresa B e à empresa F: as soluções poderão ser económicas e ambientalmente menos vantajosa por se reportar a custos de fresagem, de transporte dos produtos fresados para junto da central, mobilização de uma central móvel para a proximidade do local da obra e de custos inerentes aos gases emitidos para a atmosfera durante a execução da fresagem do pavimento, bem como na mobilização dos veículos de transporte desses produtos. Se houvesse uma central instalada nas proximidades do local da obra, então possivelmente já se justificava, mesmo sabendo que ambientalmente traria mais poluição com a execução da fresagem e com a deslocação de veículos para a central.

Analisando o inquérito da empresa C, a reciclagem de pavimentos é desvalorizada por aquela não ter equipamento próprio para a reciclagem *in situ* a frio. Além disso, tendo em conta as características do pavimento antes de ter sido intervencionado através do método tradicional, o qual apresentava degradação ao nível estrutural, a técnica da reciclagem em central, a quente com betume, não era a mais indicada para a intervenção, tal como sugeria a respetiva empresa caso houvesse central na proximidade dos trabalhos.

Caso a empreitada fosse executada aplicando-se a técnica da reciclagem, supostamente a mais favorável em termos económicos seria a

reciclagem *in situ* a frio com cimento, uma solução apresentada pela empresa A.

A opção das empresas em favor da reciclagem de pavimentos acarreta também uma significativa redução dos custos. Analisando os orçamentos apresentados pela empresa B, facilmente se deduz que, caso a empreitada fosse executada utilizando o processo da reciclagem, o preço base para lançamento de concurso seria bastante inferior em comparação com o do método tradicional, ou seja, a empreitada seria adjudicada com um valor inferior entre os 37 % e os 50 % mediante o processo de reciclagem. Relativamente aos orçamentos apresentados pela empresa B, pode-se verificar que os preços praticados para cada artigo do articulado estão acima dos preços praticados no mercado, um facto compreensível porque as empresas têm que se proteger não “abrindo o jogo” ao poder concorrencial. Os preços estão inflacionados, mas todos eles são homogéneos, sendo pois possível verificar as percentagens de custos de execução dos trabalhos o que é bastante bom e interpreta-se de uma maneira bastante favorável indo ao encontro do que se pretende.

É possível verificar que a aplicação das técnicas da reciclagem *in situ* a frio com cimento é a mais favorável, evitando-se que sejam empregues os recursos naturais na sua totalidade, sendo necessário sensibilizar os donos de obra para a utilização da reciclagem pois tem vantagens ambientais e económicas, como já várias vezes foi vincado.

Verifica-se, assim, que a utilização das técnicas de reciclagem de pavimentos acarreta bastantes benefícios económicos e ambientais, já que se recorre menos aos recursos naturais, não necessitando das percentagens de material que é habitual quando se aplica o método tradicional.

Para reforçar a ideia de que a reciclagem *in situ* a frio com cimento é uma boa solução, a título exemplificativo é abordada uma empreitada que foi executada no norte de Portugal. Após a conclusão dos trabalhos foram feitos ensaios com resultados bastante satisfatórios como mostra o quadro n.º (Apresentação da empreitada – E.N. 226, km 14,000 ao km 64,000, beneficiação entre Lamego e Ponte do Abade – reciclagem *in situ* com cimento do pavimento existente, autorizado por Rodrigues, Bruno, empresa Construções JJR& Filhos, S.A., Julho 2007), verificou-se, ainda, que a

capacidade de carga foi atingida, superando o esperado e mesmo o que se obteria na reabilitação de pavimentos utilizando a técnica convencional para o reforço de pavimentos com características de degradação a nível estrutural.

Quadro n.º 5 - Resistências obtidas (Apresentação da empreitada – E.N. 226, km 14,000 ao km 64,000, beneficiação entre Lamego e Ponte do Abade – reciclagem *in situ* com cimento do pavimento existente, autorizado por Rodrigues, Bruno, empresa Construções JJR& Filhos, S.A., Julho 2007)

| <i>Resistências Obtidas</i> |                      |                    |                   |                      |                   |
|-----------------------------|----------------------|--------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| Idade do provete            | Compactação relativa | Compressão Simples |                   | Compressão Diametral |                   |
|                             |                      | Valores mínimos    | Valores atingidos | Valores mínimos      | Valores atingidos |
| 7 dias                      | 97 %                 | 3,00 → 2,00 MPa    | 4,04 MPa          | 0,40 → 0,30 Mpa      | 0,40 MPa          |
| 28 dias                     | 97 %                 | 4,50 → 2,90 MPa    | 5,92 MPa          | 0,60 → 0,40 MPa      | 0,62 MPa          |

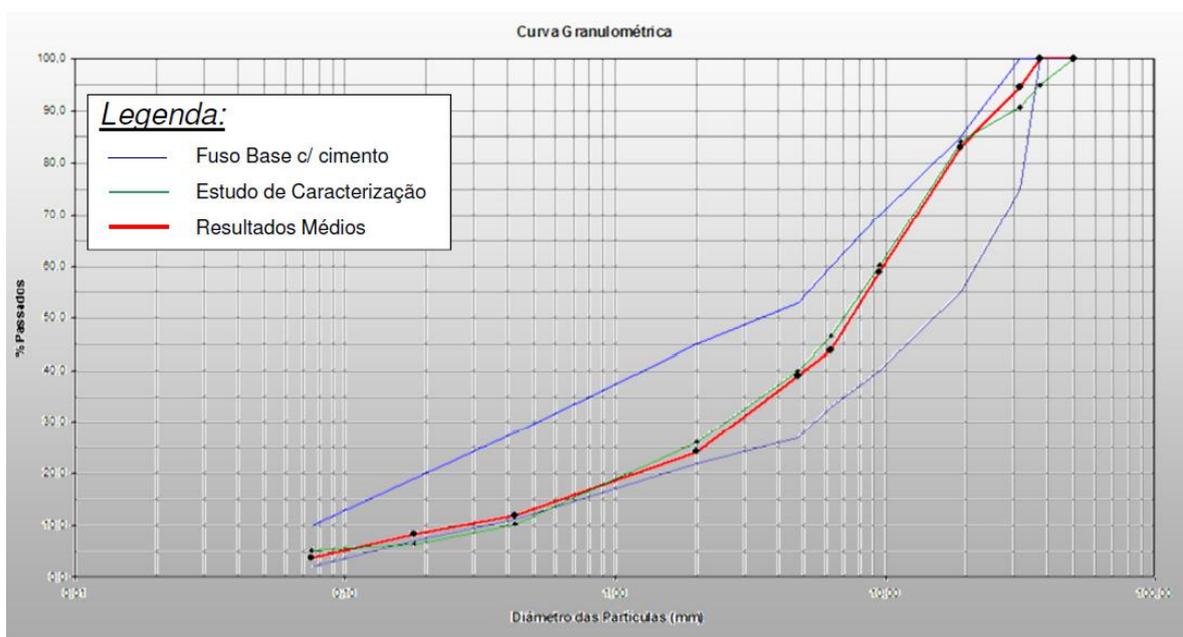


Figura n.º 45 - Curva Granulométrica obtida (Apresentação da empreitada – E.N. 226, km 14,000 ao km 64,000, beneficiação entre Lamego e Ponte do Abade – reciclagem *in situ* com cimento do pavimento existente, autorizado por Rodrigues, Bruno, empresa JJR& Filhos, S.A, Julho 2007)

A percentagem de cimento do tipo Portland de calcário CEM II/B-L 32,5 N aplicada na reciclagem foi de 4%, com resistências iniciais de desenvolvimento lento e progressão muito sensível até aos 28 dias e elevada trabalhabilidade. O pavimento existente tinha a estrutura conforme indica a figura nº 46.

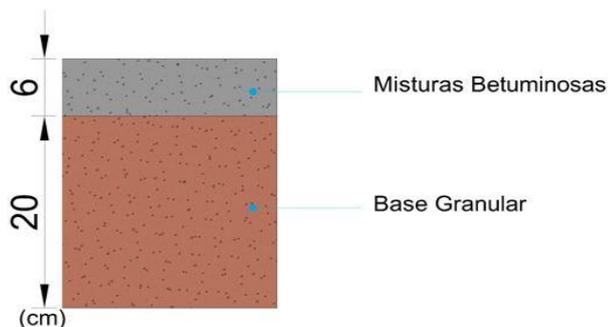


Figura n.º 46 – Estrutura do pavimento existente antes da execução dos trabalhos de reabilitação

O pavimento reabilitado com inclusão das camadas adicionais em betão betuminoso ficou com a seguinte estrutura, como indica a figura n.º 47.

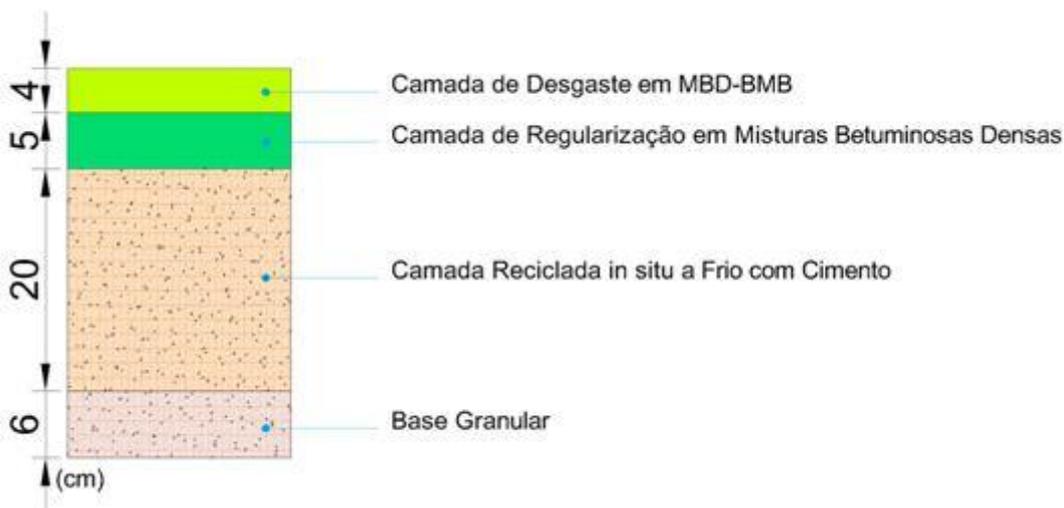


Figura n.º 15 – Estrutura do pavimento depois da execução dos trabalhos de reabilitação

A camada reciclada ficou como a camada de base da estrutura do pavimento, numa espessura de 20cm, enquanto a camada de regularização foi executada numa espessura de 5 cm, em mistura betuminosa densa e, por último, a camada de desgaste foi efetuada em mistura betuminosa descontínua com betume modificado com borracha reciclada de pneus, com uma espessura de 4cm. A estrutura do pavimento foi reabilitada com o material do próprio

pavimento existente, como se tivesse sido executada uma nova camada com material novo proveniente dos recursos naturais.

### 3. CONCLUSÕES

Sobre o trabalho aqui desenvolvido podem tirar-se as seguintes conclusões:

Com base nas respostas apresentadas pelas empresas que responderam ao inquérito, no qual se apresentava um caso de estudo para ser analisado pelas mesmas, e numa pesquisa relativa ao assunto, no sentido de aprofundar e averiguar a viabilidade económica da aplicação das técnicas de reciclagem em pavimentos degradados e debilitados em substituição do método das técnicas tradicionais, foi possível concluir, através dos termos comparativos específicos aos dois métodos, o tradicional e o da reciclagem, que existem diferenças de preço por m<sup>2</sup> que colocam em vantagem este último método, pelo que se pode apostar nesta solução para a execução dos trabalhos, indo ao encontro da reciclagem de pavimentos como uma opção simples e viável, traduzindo-se na simplificação de trabalhos e, por conseguinte, acarretando benefícios económicos e ambientais. Além disso, diga-se que também foi possível concluir que, para o caso em estudo, dentre as diversas técnicas de reciclagem a mais benéfica é a reciclagem *in situ* a frio, com cimento. Com efeito, na reciclagem *in situ* a frio com cimento sem a fresagem das camadas de betão betuminoso o preço médio ronda os 3,60 €/m<sup>2</sup>, enquanto que na reciclagem *in situ* a frio com cimento com a fresagem das camadas de betão existente o preço médio é de 6,60 €/m<sup>2</sup>. A reciclagem *in situ* a frio com emulsão betuminosa é bastante económica com um preço médio de 2,70 €/m<sup>2</sup>, mas neste caso não seria a recomendada por interferir apenas com a reciclagem das camadas de betão betuminoso existente.

Através dos respetivos inquéritos, foi possível verificar que a maioria das empresas estão empenhadas no recurso à reciclagem de pavimentos como alternativa ao método tradicional, porque, além de poderem praticar preços mais apetecíveis, essa alternativa permite uma redução do fluxo de transportes para dentro e fora da obra. O senão tem a ver com as empresas de estrutura pequena e com fracos recursos económicos, já que não lhes é “permitida” a adoção da execução de trabalhos utilizando a reciclagem de pavimentos *in situ* a frio com cimento porque os preços das maquinarias para este tipo de trabalhos bem como o custo com a sua manutenção exige um grande esforço

económico dificilmente suportável por essas empresas. Assim, para estas empresas, o método tradicional não deixa de ser adequado aquando da execução dos trabalhos, cumprindo todos os requisitos, normas e meios para o cumprimento dos trabalhos de reparação e de reabilitação de pavimentos degradados. Seja como for, a solução provável para essas empresas será certamente a aquisição e a utilização da maquinaria em conjunto, dividindo entre elas os próprios custos, quer com a sua aquisição quer com a sua manutenção.

Um outro aspeto negativo relacionado com a reciclagem *in situ* a frio, tendo em conta as respostas das empresas ao inquérito, diz respeito ao facto de que o preço por m<sup>2</sup> de execução de trabalhos com base no sistema de reciclagem poder vir a aumentar devido à fraca utilização do equipamento específico ao longo do ano e nos anos seguintes; ou seja, por se tratar de equipamento caro e com despesas elevadas com a sua manutenção, como já foi atrás assinalado, leva a que não só as empresas com fracos recursos mas nalguns casos também as empresas com maior volume possam optar pela utilização do método tradicional.

De qualquer modo, tendo em conta o caso de estudo e partindo dos inquéritos efetuados às empresas, bem como de uma pesquisa e análise relacionados com o tema, pode concluir-se qual das técnicas de reciclagem será a mais adequada:

- as empresas que optaram pela reciclagem apresentaram a reciclagem *in situ* a frio como a melhor solução para a reparação e reabilitação do pavimento: num só trabalho em que é usada a máquina recicladora facilmente se verifica que, com essa solução, se evitam trabalhos desnecessários de escavação, de carga, descarga e transporte dos produtos sobrantes a vazadouro, reduzindo-se, assim, o transporte, o equipamento e a mão-de-obra;
- apesar da reciclagem *in situ* a frio com cimento sem a fresagem das camadas de betão betuminoso ter sido escolhida por uma só empresa, esta solução é, no entanto, a mais económica, sendo este facto confirmado pelos valores já atrás apresentados, porque não é necessário fresar as camadas de betão betuminoso

existente e o material seria reciclado e reaproveitado a 100% no próprio local através da máquina recicladora;

- a reciclagem em central a quente com incorporação de fresados oriundos da própria obra, atendendo à sua dimensão, não é viável pelo facto de se ter que mobilizar uma central para a proximidade da obra, acarretando, por isso, custos económicos e ambientais acrescidos com a carga, descarga e transporte dos produtos fresados para junto da mesma;
- no que respeita à reciclagem *in situ* a frio com emulsão betuminosa, para o referido caso de estudo não é a técnica aconselhável porque o pavimento necessita de reparação ao nível da sua estrutura e não somente ao nível funcional.

## DESENVOLVIMENTOS FUTUROS E O INCENTIVO À RECICLAGEM

O incentivo à reciclagem de pavimentos em relação ao poder económico e político é um objetivo que tem que ser cumprido. Portugal, a Europa e o mundo de um modo geral, nestes últimos anos, têm vivido momentos muito difíceis. A reciclagem não é o grande pilar no desenvolvimento de uma nação, mas a realidade é certa e objetiva, quer dizer, ela ajuda e contribui numa quota-parte para trazer benefícios financeiros, económicos e mesmo ambientais.

Torna-se indispensável encorajar os donos da obra a que implementem nos seus cadernos de encargos a obrigatoriedade da aplicação da reciclagem de pavimentos, colocando nos seus mapas de quantidades artigos com descrições de trabalhos referentes à reciclagem – seja *in situ*, seja em central a frio, a quente ou a semi-quente - de pavimentos, em função dos cálculos efetuados pelo projetista e consoante o que se pretende.

Compete aqui aos decisores que tenham um papel preponderante na criação de leis e portarias que obriguem os donos de obra a colocarem nos seus projetos e caderno de encargos a execução de trabalhos utilizando as técnicas da reciclagem de pavimentos como uma prioridade. Para tal é necessário criar estruturas de incentivo e de esclarecimento através da organização de conferências, seminários, etc., em que se fale das vantagens financeiras, económicas e ambientais do recurso à reciclagem de pavimentos. Por sua vez, e na sequência do que foi dito, cabe ao poder criar limiares, limites, etc., em função da extensão e quantidades de trabalho das obras, referentes à utilização das técnicas de reciclagem.

Os governos, através do Ministério das Obras Públicas, devem assumir um papel preponderante na criação de um Observatório das Obras Públicas, com o objetivo de gerir, fiscalizar, avaliar, ou delegar competências a outras entidades ou técnicos no sentido de se inspecionar, fiscalizar, emitir pareceres de projetos e empreitadas postas a concurso para que a reciclagem seja um facto.

Num futuro mais imediato, deve haver um incentivo para se evitar que os produtos sobrantes sejam encaminhados para vazadouro, devendo, no

entanto, ser aplicados e executados, sempre que possível, na própria obra de onde eles são provenientes.

Deixa-se aqui um repto, com vista ao desenvolvimento da aplicação da reciclagem a quente em central, com o objetivo de que no futuro seja possível ir mais além dos 70% (limite viável até ao momento pelas centrais descontínuas no fabrico de material reciclado) da aplicação do material fresado. Seria, sem dúvida, um passo importante. Para tal, é necessário melhorar a maquinaria existente, investir na pesquisa da inovação tecnológica, promover estudos direcionados à melhoria da qualidade das misturas betuminosas recicladas e do ligante. Diga-se, ainda, que no caso da inovação da maquinaria o caminho a seguir será também no sentido de haver menos poluição, provocada pelos gases emitidos para a atmosfera.

Será, ainda, fundamental desenvolver estudos com ligantes inovadores que possibilitem que a mistura reciclada seja melhorada no que se refere à resistência à fadiga, às deformações permanentes e às ações nocivas das condições atmosféricas e das cargas impostas pelos veículos automóveis.

Como é sabido, já é possível, neste momento, através da reciclagem em central a semi-quente com o ligante a emulsão betuminosa, a colocação em obra da mistura betuminosa de material fresado a 100%: trata-se de um grande triunfo humano, mas há que ir mais além, e sabe-se como isso será possível face aos últimos avanços tecnológicos e à constante formação de técnicos. São estas evidências que dão esperança. A economia e o planeta agradecerão.

## BIBLIOGRAFIA

Alves, Teresa Sofia Figueiredo, “*Metodologias de Auscultação de Pavimentos Rodoviários – Aplicação Prática do Radar de Prospecção e do Defletómetro de Impacto*”, Dissertação de Mestrado, I. S. T. – U.T.L., Setembro 2007;

Análisis de Costes de las Unidades de Reciclado Y Estabilizado In Situ con Cemento [http://193.146.160.29/gtb/sod/usu/\\$UBUG/repositorio/10271514\\_Lopez.pdf](http://193.146.160.29/gtb/sod/usu/$UBUG/repositorio/10271514_Lopez.pdf), accedido a 23-01-2013;

Avilés Lourenzo, José, “*Estudio de la tenacidad de los microaglomerados reciclados en caliente mediante el ensayo BTM. Efecto del tipo y contenido de betún*”, Tese de Doutoramento, Universitat Politècnica de Catalunya, Março 2009;

Branco, F.; Pereira, L.P. (2006) “Pavimentos rodoviários”, Coimbra, Edições Almedina;

Baptista, António Miguel Costa, “*Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central Contribuição para o seu estudo e aplicação*” Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Coimbra, Dezembro 2006;

Baptista, Dora, Misturas “Betuminosas Recicladas a Quente em Central na Rede Brisa”, 2ª Jornadas Cepsa Betumes / CRP, [http://www.crp.pt/docs/A25S2-02\\_Dora\\_Baptista.pdf](http://www.crp.pt/docs/A25S2-02_Dora_Baptista.pdf), pag. 5, accedido a 18-08-2012;

Batista, de Filipe Goulart de Medeiros Reis , “*Reabilitação de Pavimentos Flexíveis através de Reciclagem com Cimento*” Dissertação de Mestrado, I. S. T. – U.T.L., Outubro 2009;

Batista, F. A., “*Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos – Misturas betuminosas densas a frio*”, Tese de Doutoramento em Engenharia, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP, Porto, Junho de 2004;

Changlin Company Ltd, Motoniveladora do tipo PY190H, [http://changlin.com.pt/2motor\\_grader\\_2.html](http://changlin.com.pt/2motor_grader_2.html), accedido a 22-08-2012;

Couto, Mário Rui, “Mota-Engil Pavimentações”, 2ªs Jornadas Cepsa Betumes / CRP, [http://www.crp.pt/docs/A25S4-04\\_Mario\\_Rui\\_Couto.pdf](http://www.crp.pt/docs/A25S4-04_Mario_Rui_Couto.pdf), pag. 6, accedido a 22-08-2012;

Cunha, Célia Melo, “*Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis Diferentes Tipos de Reciclagem*”, dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Julho 2010;

EP-IEP-JAE (2006) “Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários”, vol.2 Gestão da Conservação, Gabinete de Gestão da Rede, Estradas de Portugal, Almada;

EP-IEP-JAE (1997) “Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis”, 2ª versão, Direcção dos Serviços de Conservação, Almada;

European Asphalt Pavement Association, EAPA, 2010, <http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/Asphalt%20in%20figures%202010.pdf>, pág. 4, accedido a 18-08-2012;

Ferreira, José Fernando Bolarinho, “*Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Camadas de Sub-base Não Ligadas de Estradas de Baixo Tráfego*”, Dissertação de Mestrado, I. S. T. – U.T.L., Setembro 2009;

FHWA, “Distress Identification Manual for the Log-Term Pavement Performance Program”, publication no. FHWA-RD-03-031, U.S: Federal Highway Administration, June 2003;

Fonseca, Paulo, *reciclagem de pavimentos rodoviários*, empresa RECIPAV– Engenharia e Pavimentos, Lda, <http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem.pdf>, acessido a 17-08-2012;

Freitas, José, “*Mistura Temperada com emulsão / Reciclagem Semi - Quente – Pormenores do Processo de Fabrico*”, Empresa Construções, JJR & Filhos, S.A., 2ª Jornadas Jornadas Cepsa Betumes / CRP, [http://www.crp.pt/docs/A25S2-02\\_Jose\\_Freitas.pdf](http://www.crp.pt/docs/A25S2-02_Jose_Freitas.pdf), pag.3 , acessido a 18-08-2012;

Freire, A. C. “*Agregados para misturas betuminosas*”, Palestra na Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Almada, 2004;

Gomes, Eduardo Andrade, “*Impacte das novas tecnologias apresentado no mercado português*”, Jornadas Cepsa Betumes / CRP, [http://www.crp.pt/docs/A25S4-04\\_Eduardo\\_Gomes.pdf](http://www.crp.pt/docs/A25S4-04_Eduardo_Gomes.pdf), Lisboa, Julho 2009, pag. 2, acessido a 22-08-2012;

Intrame, empresa líder a nível mundial de fabrico de centrais betuminosas, <http://www.intrame.com/productos/plantas-asfalticas/>, acessido a 18-08-2012;

Lopes, Fátima Isabel Solva, “*Estudo da Reflexão de Fendas em Pavimentos Semi-Rígidos*”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2011;

Martinho, F.; Santos, Luis Picado; Pais, Jorge, “*Reciclagem de Pavimentos Rodoviários - Selecção do Processo Construtivo*”, [http://www.crp.pt/docs/A11S96-pavimentos\\_24.pdf](http://www.crp.pt/docs/A11S96-pavimentos_24.pdf), pag.5, acessido a 18-08-2012;

Moreira, J. Pedro, “*Contribuição para a reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento*”, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, 2005

Moviter, representante exclusiva da Hamm em Portugal, Cilindros do tipo Hamm, <http://www.moviter.pt/portal/index.php?id=1391>, acessido a 22-08-2012;

Nunes, Maria Gabriela Ferreira, “*Reciclagem de Pavimentos In Situ a Frio com Emulsão Betuminosa*”, Dissertação de Mestrado, ISEL, Outubro 2008;

Quesada Vallejo, Israel, “*Evaluación del comportamiento de diferentes tramos de carretera rehabilitados utilizando mezclas recicladas en frío*”, Tese de Doutoramento, Universitat Politècnica de Catalunya, Fevereiro 2004;

Wirtgen GmbH, Espuma de asfalto- o ligante inovador para a construção de rodovias, [http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf-dokumente/03\\_kaltrecycling\\_stabilisierung/allgemein\\_1/schaumbitumen/p\\_foam\\_p.pdf](http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf-dokumente/03_kaltrecycling_stabilisierung/allgemein_1/schaumbitumen/p_foam_p.pdf), pag.7, acessido a 19-08-2012;

Wirtgen, GmbH,2006, Nova geração de recicladoras – Recicladora WR 2500 S, [http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf-dokumente/03\\_kaltrecycling\\_stabilisierung/wr\\_2500\\_s/prospekt\\_22/DS\\_WR2500S\\_PT\\_0806\\_LO.pdf](http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf-dokumente/03_kaltrecycling_stabilisierung/wr_2500_s/prospekt_22/DS_WR2500S_PT_0806_LO.pdf), pag. 2, acedido a 22-08-2012;

Wirtgen, GmbH,2006, Nova geração de recicladoras – Recicladora WR 2500 S, [http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf-dokumente/03\\_kaltrecycling\\_stabilisierung/wr\\_2500\\_s/prospekt\\_22/DS\\_WR2500S\\_PT\\_0806\\_LO.pdf](http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf-dokumente/03_kaltrecycling_stabilisierung/wr_2500_s/prospekt_22/DS_WR2500S_PT_0806_LO.pdf), pag. 20, acedido a 19-08-2012;

Wirtgen GmbH,2006, Nova geração de recicladoras – Recicladora WR 2500 S, [http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf-dokumente/03\\_kaltrecycling\\_stabilisierung/wr\\_2500\\_s/prospekt\\_22/DS\\_WR2500S\\_PT\\_0806\\_LO.pdf](http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf-dokumente/03_kaltrecycling_stabilisierung/wr_2500_s/prospekt_22/DS_WR2500S_PT_0806_LO.pdf), pag. 26, acedido a 19-08-2012;

Wirtgen, GmbH,2006, Nova geração de recicladoras – Recicladora WR 2500 S, [http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf-dokumente/03\\_kaltrecycling\\_stabilisierung/wr\\_2500\\_s/prospekt\\_22/DS\\_WR2500S\\_PT\\_0806\\_LO.pdf](http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf-dokumente/03_kaltrecycling_stabilisierung/wr_2500_s/prospekt_22/DS_WR2500S_PT_0806_LO.pdf), pag. 28, acedido a 19-08-2012;

Wirtgen, GmbH, slurry mixer WM 1000, [http://www.wirtgen.de/en/produkte/kaltrecycler/wm\\_1000/WM1000\\_k\\_Bildergalerie.html](http://www.wirtgen.de/en/produkte/kaltrecycler/wm_1000/WM1000_k_Bildergalerie.html), acedido a 22-08-2012;

Wirtgen Group, manual de reciclagem a frio, 2ª edição, 2004, Aplicações da reciclagem a frio, pag.22.

## ANEXOS

Neste anexo são apresentadas as respostas ao inquérito efetuado às empresas.

### EMPRESA A

a) R:

Sim já realizou trabalhos de reciclagem de Pavimentos.

b) R:

A técnica mais utilizada tem sido a Reciclagem "*in situ*" do pavimento existente por via húmida, por demolição de toda a estrutura do pavimento, aplicando uma percentagem de cimento a estudar conforme o caso. Também é usual a reciclagem por via seca.

Em termos de rentabilidade não existe grande diferença.

c) R:

Neste momento não estamos a executar reciclagem de pavimentos e não está previsto.

d) R:

Sim, o mais utilizado é a técnica reciclagem *in situ*, com cimento.

e) R:

Sim a reciclagem é uma boa opção tendo em conta as seguintes mais-valias:

- Evita a produção de resíduos;
- Evita a exploração de novos recursos naturais (abertura de pedreiras ou exploração das existentes), Etc.

f) R:

- 1 – OBRA: EN 226 - QUILOMETRO 14+000 AO QUILOMETRO 64+000 - BENEFICIAÇÃO ENTRE LAMEGO E A PONTE DO ABADE – *Para a Direção de estradas de Viseu.*
- 2 – OBRA: EN 371 E ER 371 - PAVIMENTAÇÃO ENTRE ARRONCHES E CAMPO MAIOR E ENTRE CAMPO MAIOR E RETIRO (FRONTEIRA) – *Direção de estradas de Portalegre.*
- 3 – OBRA: EN 244 - BENEFICIAÇÃO ENTRE PONTE DE SOR E O CRUZAMENTO COM A EN 118 – *Direção de estradas de Portalegre.*

- 4 – OBRA: ESTRADA MUNICIPAL - EM 538: BENEFICIAÇÃO ENTRE PORTEL E AMIEIRA  
– CM de Portel.

g1) R:

Para saber a espessura teria que ser feito um estudo à capacidade de carga do pavimento existente e com base nisso calcular as espessuras das camadas. Cada caso deve ser estudado individualmente.

g2) R:

Optaria pela opção reciclagem *in situ* com cimento, porque é uma solução mais fácil de controlar, com mais tradição, se houver sobredosagem accidental do cimento à partida não é prejudicial como no caso das emulsões e betumes. Quando se está a utilizar betume espuma ou emulsão os bicos da máquina entopem-se com muita frequência, sendo que por vezes o operador não se apercebe, logo a zona reciclada não fica toda ela com a mesmas quantidades de ligante, podendo haver maior concentração de ligante em zonas localizadas e isso é muito prejudicial para o comportamento da camada.

As reciclagens em central a quente, a frio e semi-quente não são na nossa opinião economicamente viáveis, além disso não existem equipamentos apropriadas para este tipo de trabalhos.

g3) R:

ver manual Wirtgen.

g4) R:

Dados retirados de cálculo.

g5) R:

Reciclagem (ver pergunta e))

g6) R:

Supondo que depois de efetuados todos os cálculos chegou-se à conclusão que a camada reciclada tem capacidade de carga para responder às solicitações da via em questão. Nitidamente numa situação destas iriam haver grandes vantagens económicas uma vez que com um só trabalho (reciclagem) se iriam evitar os trabalhos 1.1 + 1.2 + 1.3 + 1.4 + 1.5, pelo que sem fazer contas logo se percebe que as vantagens económicas são muitas.

g7) R:

Não responde.

g8) R:

A designação seria a seguinte:

|          |   |                |  |  |  |
|----------|---|----------------|--|--|--|
| 03.10.2  | Reciclagem " <i>in situ</i> " do pavimento existente por via húmida, por demolição daquele, incluindo todas as operações necessárias até à sua reaplicação, e adição mínima de ---% de cimento, com equipamento tipo Wirtgen. | m <sup>2</sup> |  |  |  |
| 03.7     | Regas betuminosas de impregnação, colagem ou cura:  |                |  |  |  |
| 03.7.1   | Rega de cura betuminosa:  |                |  |  |  |
| 03.7.1.1 | Com emulsão betuminosa.   | m <sup>2</sup> |  |  |  |

## EMPRESA B

a) R:

Sim

b) R:

As técnicas que já utilizámos foram:

I. Reciclagem *in-situ* de pavimentos com emulsão;

II. Reciclagem *in-situ* de pavimentos com cimento;

III. Reciclagem *in-situ* de pavimentos com espuma de betume;

IV. Reciclagem de pavimentos em central;

As duas primeiras técnicas acima referidas têm uma abordagem diferente da mencionada no ponto III e a utilização de cada uma delas depende do objetivo a que se destinam, bem como da composição / estrutura do pavimento e do estado de degradação / patologia que o pavimento apresenta. É portanto difícil falar em rentabilidade de uma determinada técnica em detrimento da outra, uma vez que, e fazendo uma analogia com a medicina, cada uma delas pode ser entendida como um medicamento / terapia, cuja eficácia é tanto maior quanto mais adequada for ao tratamento da “doença”. Pese embora o acima referido, eu diria que, em teoria, a técnica mais rentável do ponto de vista económico é a que, na sua utilização, incorpora a menor % de custo de matérias-primas e simultaneamente a que implicar menores fluxos transportes para dentro e para fora da obra.

c) R:

Neste momento e ao longo de 2012 alguns dos trabalhos que temos previsto prendem-se com a reabilitação de pavimentos rodoviários, mas nenhuma destas intervenções prevê a realização de qualquer trabalho de reciclagem. Contudo o equipamento que dispomos, dada a sua versatilidade, está neste momento a realizar trabalhos de estabilização de solos na concessão do Pinhal Interior, nas proximidades de Condeixa

d) R:

Sim. Temos duas recicladoras de pavimento tipo Wirtgen WR 2000 e 2500s, a primeira a operar em Portugal e a segunda no mercado Peruano. A estes equipamentos podem ser acoplados outros equipamentos (cisterna de betume / emulsão betuminosa, misturadora

Wirtgen 1000 ou misturador / espalhador Panien, que também dispomos) e que em conjunto definem e materializam em obra cada uma das técnicas de reciclagem “*in-situ*” descritas no ponto b) supra.

Dispomos ainda de equipamento de reciclagem de pavimentos betuminosos em central, os quais poderão ser acoplados às centrais de fabrico de misturas betuminosas com o objetivo de efetivar este tipo de reciclagem, com contornos diferentes das técnicas anteriormente referidas

e) R:

Em nosso entender, genericamente diria que sim, dado que introduz economias no processo de reabilitação e este facto, só por si implica reduções de custos e menores impactos no meio ambiente, sem qualquer prejuízo da qualidade final do produto.

f) R:

IC8 – Beneficiação do pavimento entre Serpa e Vila Verde de Ficalho;  
EN 370 - Beneficiação do pavimento entre Aviz e o limite do distrito de Portalegre;

IC12 – Beneficiação do pavimento entre o IP3 e Canas de Senhorim;  
EN 123 – Beneficiação do pavimento entre Castro Verde e proximidades de Mértola;

Peru: Beneficiação entre Conococha e Yanacancha

g1) R:

A intervenção / formulação de uma reciclagem, obedece a critérios de dimensionamento do pavimento, atendendo á especificidade do trabalho. Para tal, uma visita à obra e posterior estudo das condições do pavimento existente são fases obrigatórias com vista à determinação da espessura do pavimento a reciclar, bem como da percentagem de materiais a incorporar (emulsão, cimento, cal ou outro). Para efeitos do presente exercício, consideramos uma profundidade de 0,30m.

g2) R:

**Reciclagem *in situ*, com cimento:**

Esta poderá ser a melhor solução com vista ao reforço do pavimento, caso sejam previamente removidas as camadas betuminosas. A camada

de base existente em Tout-Venant poderá ser tratada com cimento numa espessura de 0,25 a 0,30 m.

**Reciclagem *in situ*, com emulsão betuminosa:**

Esta solução só é aplicável caso as camadas a reciclar sejam as camadas de mistura betuminosa.

**Reciclagem *in situ*, com emulsão betuminosa e cimento:**

É a mesma solução acima descrita. O cimento destina-se a conferir mais coesão à mistura.

g3) R:

Recicladora de pavimento Wirtgen WR 2000

Misturadora Wirtgen 1000 ou misturador tipo Panien

Cisterna de betume / emulsão betuminosa

Motoniveladora

Cilindro de pneus

Cilindro de rolos

g4) R:

Esta decisão depende do dimensionamento do pavimento face, pelo menos, aos seguintes dois parâmetros:

- Capacidade de suporte das camadas subjacente;
- Tráfego previsto.

g5) R:

Em termos teóricos poder-se-á dizer que a reciclagem é a solução mais económica, uma vez que induz uma poupança significativa dos materiais a incorporar, reduz os transportes, bem como uma redução da quantidade de energia despendida no processo de construção. São também atributos desta técnica a sua grande mais-valia em termos ambientais pois minimiza a produção de RCD, bem como diminui consideravelmente o recurso a novos materiais, nomeadamente agregados provenientes de pedreiras.

g6) R:

Valorizações em anexo. Admitindo uma valorização estimada, baseada no mapa de trabalhos que nos remeteu e recorrendo a preços de referência / preços de mercado no que diz respeito aos trabalhos de

reabilitação rodoviária, chegamos a um preço médio de 34,46 €/m<sup>2</sup> para a solução que definiu com “Base”.

Uma solução recorrendo a fresagem do pavimento betuminoso existente, reciclagem da base em agregado britado e posterior aplicação de uma camada de regularização com incorporação de fresados, (cerca de 15%), seguido de uma camada de desgaste tradicional, o preço médio poderá baixar para aproximadamente 21,74 €/m<sup>2</sup>. Esta solução apresenta ainda a vantagem de possibilitar a manutenção das atuais cotas do pavimento. Caso se verifique a possibilidade de alteração das cotas finais do pavimento, poder-se-á assim suprimir os trabalhos de fresagem e efetuar uma reciclagem do pavimento betuminoso existente. Esta solução poderá gerar uma economia de cerca de 15% relativamente ao preço da reciclagem indicada anteriormente.

g7) R:

Esta questão requer uma análise mais aprofundada que apenas é possível efetuar caso a caso e perante dados concretos, que vão desde os critérios de dimensionamento (função dos parâmetros abordados acima), à estrutura do pavimento existente, à disponibilidade dos meios / capacidade de resposta da empresa em questão, até à localização da obra e dos recursos / meios envolvidos ou a envolver na obra.

g8) R:

Depende da solução de reciclagem a adotar. Genericamente poder-se-á definir como reciclagem “*in situ*” com emulsão betuminosa ao processo que permite reabilitar, “*in situ*” um pavimento, normalmente envelhecido, através da desagregação por fresagem, incorporando uma emulsão betuminosa adequada, em conjunto com água. A incorporação de agregados deverá ser considerada, caso seja necessário efetuar uma correção granulométrica aproximando o produto da fresagem a um fuso previamente estabelecido. Esta definição permite, caso a caso, alterar “*mutatis mutandis*” em função de uma das soluções de reciclagem a adotar, que abaixo mencionamos:

Reciclagem *in situ*, com cimento

Reciclagem *in situ*, com emulsão betuminosa

Reciclagem *in situ*, com emulsão betuminosa e cimento

Reciclagem *in situ*, com betume espuma

Reciclagem *in situ*, a quente, com betume/rejuvenecedor.

Reciclagem em central, a frio, com emulsão betuminosa.

Reciclagem em central, a frio, com betume espuma.

Reciclagem em central, semi-quente, com emulsão betuminosa.

Reciclagem em central, a quente, com betume.

**SOLUÇÃO BASE**

**LISTA DE PREÇOS**

| <b>Código</b> | <b>Designação dos Trabalhos</b>  | <b>Unid.</b> | <b>Quant.</b> | <b>Preços unit.</b> | <b>Totais</b>       |
|---------------|--|--------------|---------------|---------------------|---------------------|
| <b>1</b>      | <b>PAVIMENTAÇÕES</b>   |              |               |                     |                     |
| 1.1           | Abertura de caixa no Pavimento, com profundidade de 0,60m, incluindo escavação, remoção e transporte a vazadouro dos produtos escavados  | m3           | 14.055,14     | 4,20 €              | 59.031,59 €         |
| 1.2           | Regularização e compactação do fundo de caixa  | m2           | 23.425,23     | 0,60 €              | 14.055,14 €         |
| 1.3           | Fornecimento e colocação de manta geotêxtil de alta densidade com a gramagem de 300 g/cm3  | m2           | 23.425,23     | 1,32 €              | 30.921,30 €         |
| 1.4           | Execução de camada de base em agregado britado de granulometria extensa, com a espessura de 0,25m, após recalque com material proveniente de britagem de granito, incluindo fornecimento, espalhamento, regularização e compactação e todos os trabalhos necessários | m2           | 23.425,23     | 6,90 €              | 161.634,09 €        |
| 1.5           | Execução de camada de base em agregado britado de granulometria extensa, com a espessura de 0,25m, após recalque com material proveniente de britagem de granito, incluindo fornecimento, espalhamento, regularização e compactação e todos os trabalhos necessários | m2           | 23.425,23     | 7,20 €              | 168.661,66 €        |
| 1.6           | Execução de camada de regularização em betão betuminoso aplicado a quente, com a espessura de 0,06m, após recalque, incluindo rega de colagem e todos os trabalhos necessários   | m2           | 23.425,23     | 9,38 €              | 219.728,66 €        |
| 1.7           | Execução de camada de desgaste em betão betuminoso aplicado a quente, com a espessura de 0,04m, após recalque, incluindo rega de colagem e todos os trabalhos necessários  | m2           | 23.425,23     | 6,54 €              | 153.201,00 €        |
| <b>Total</b>  |  |              |               |                     | <b>807.233,43 €</b> |

**Custo m2      34,46 €**

**SOLUÇÃO 1****LISTA DE PREÇOS**

| <b>Código</b> | <b>Designação dos Trabalhos</b>   | <b>Unid.</b> | <b>Quant.</b> | <b>Preços unit.</b> | <b>Totais</b>       |
|---------------|---|--------------|---------------|---------------------|---------------------|
| <b>1</b>      | <b>PAVIMENTAÇÕES</b>  |              |               |                     |                     |
| 1.1           | Fresagem de camadas de pavimentos existentes em misturas betuminosas em profundidades entre 5 e 10 cm.  | m2           | 23.425,23     | 3,00 €              | 70.275,69 €         |
| 1.2           | Reciclagem in situ, com cimento numa espessura de 0,20m.  | m2           | 23.425,23     | 3,60 €              | 84.330,83 €         |
| 1.3           | Execução de camada de regularização em betão betuminoso aplicado a quente, com a espessura de 0,06m, após recalque.(com incorporação de fresados 15%), incluindo rega de colagem e todos os trabalhos necessários | m2           | 23.425,23     | 8,60 €              | 201.456,98 €        |
| 1.4           | Execução de camada de desgaste em betão betuminoso aplicado a quente, com a espessura de 0,04m, após recalque, incluindo rega de colagem e todos os trabalhos necessários   | m2           | 23.425,23     | 6,54 €              | 153.201,00 €        |
| <b>Total</b>  |   |              |               |                     | <b>509.264,50 €</b> |

**SOLUÇÃO 2****LISTA DE PREÇOS**

| <b>Código</b> | <b>Designação dos Trabalhos</b>   | <b>Unid.</b> | <b>Quant.</b> | <b>Preços unit.</b> | <b>Totais</b>       |
|---------------|---|--------------|---------------|---------------------|---------------------|
| <b>1</b>      | <b>PAVIMENTAÇÕES</b>  |              |               |                     |                     |
| 1.1           | Reciclagem in situ, com emulsão betuminosa numa espessura de 0,15m.   | m2           | 23.425,23     | 2,70 €              | 63.248,12 €         |
| 1.2           | Execução de camada de regularização em betão betuminoso aplicado a quente, com a espessura de 0,06m, após recalque,, incluindo rega de colagem e todos os trabalhos necessários | m2           | 23.425,23     | 9,38 €              | 219.728,66 €        |
| 1.3           | Execução de camada de desgaste em betão betuminoso aplicado a quente, com a espessura de 0,04m, após recalque, incluindo rega de colagem e todos os trabalhos necessários       | m2           | 23.425,23     | 6,54 €              | 153.201,00 €        |
| <b>Total</b>  |   |              |               |                     | <b>436.177,78 €</b> |

## EMPRESA C

a) R:

Sim.

b) R:

A técnica mais utilizada é a “*Reciclagem em central, a quente, com betume*”. A rentabilidade das diferentes técnicas dependerá essencialmente das distâncias de transporte e das características dos materiais fresados, assim como, das misturas betuminosas a fabricar, ou seja, quanto melhor a qualidade do material fresado, face às características que o compõem, ou até do tipo de equipamento de remoção (fresadora), implicará numa otimização da camada em causa, ou seja poderá incorporar mais ou menos % de fresado, consoante se tratam de camadas de AC14 ou AC20 (por exemplo) e consoante a origem do fresado resulta de camadas finais ou camadas subjacentes, pois também estas possuem mais ou menos betume e melhor ou pior qualidade de agregados, dela constituente.

c) R:

Neste preciso momento não se encontram em curso trabalhos de reciclagem de pavimentos. No decorrer do corrente ano apenas encontram-se previstos trabalhos para clientes particulares. Nestes está prevista a incorporação de material fresado, quer em macadames para camadas de base, quer em camadas de desgaste com incorporação de material fresado de agregados de basalto.

d) R:

Não. Das técnicas apresentadas neste inquérito apenas possuímos equipamento próprio para “*Reciclagem em central, a quente, com betume*”. Em 2010, efetuámos contudo, uma empreitada de Macadame com incorporação de borracha em depósito separado, contudo, face à existência de novos betumes modificados já com borracha, implicaram uma mais-valia em termos produtivos, pois não carece de equipamentos ou depósitos especiais em centrais betuminosas a quente.

e) R:

No nosso entender, a reciclagem de pavimentos pode ser uma boa opção desde que bem gerida nos parâmetros definidos na alínea b) anterior. Dependendo desses condicionalismos referidos, com esta opção poder-se-á verificar, em alguns casos, uma otimização de custos. De qualquer modo, existirá uma redução de depósitos a vazadouro, assim como poderão ser utilizados materiais sobrantes de outras obras, pelo que, com estes processos, a diminuição do consumo dos recursos naturais pode ser relevante.

f) R:

Empreitada: "Beneficiação da EN365-2 entre o Cartaxo e o início da Variante à EN365.2" para a C.M. Cartaxo;

Empreitada: ""EN 9 - BENEFICIAÇÃO ENTRE S. PEDRO DA CADEIRA E TORRES VEDRAS" para as Estradas de Portugal, S.A.;

Empreitada: "IC 2 - BENEFICIAÇÃO ENTRE CONDEIXA (KM 178+029) E COIMBRA (184+165) " para as Estradas de Portugal, S.A.;

g1) R:

Não responde

g2) R:

Não responde

g3) R:

N/A

g4) R:

N/A

g5) R:

Será expectável poder incorporar um máximo de 50% de material a incorporar, caso se opte pela reciclagem de pavimentos. Teríamos, então, que acabar por fabricar parte das MBQ através das técnicas convencionais, recorrendo a fornecimentos consideráveis de agregados e restantes constituintes. Face a estas quantidades, como na produção das misturas com a incorporação de materiais reciclados, existem custos acrescidos relacionados com a quebra na capacidade de produção das centrais e com aumentos relevantes de gastos energéticos, entende-se que seria aceitável executar a reciclagem de pavimentos, caso a central estivesse já implementada na proximidade da obra, de acordo com a

legislação em vigor, não sendo portanto necessário suportar custos na sua mobilização, construção e legalização, este é um fator muito importante face ao aumento considerável do gasóleo e outros elementos. Assim, neste caso, optaríamos para execução dos trabalhos designados aplicando técnicas convencionais.

g6) R:

Pensamos ter respondido a esta questão na alínea g5).

g7) R:

Na nossa opinião, neste caso específico, a opção de não efetuar a reciclagem de pavimentos teve a ver com a necessidade de implantação da central, assim, seria necessário efetuar contas, entre o gasóleo dos transportes, eventuais portagens, ou em alguns casos o que se procura otimizar é o transporte de qualquer elemento no retorno das viaturas, justificando o transporte. Para além dessas variáveis é importante também a definição da capacidade da central betuminosas por hora e a quantidade de carros para fechar ciclos produtivos. Assim, as contas a efetuar não podem ser só em termos de m<sup>2</sup> de trabalho, pois isso implica ainda a otimização das equipas, equipamentos, etc.

g8) R:

|       |  |                |
|-------|--|----------------|
| 1     | Fresagem de camadas de pavimentos existentes remoção e transporte a vazadouro dos produtos escavados ou reutilização em central, conforme definido no projeto: |                |
| 1.1   | Em misturas betuminosas:   |                |
| 1.1.1 | Em profundidades entre 0,05 e 0,10 m   | m <sup>2</sup> |
| 2     | Misturas recicladas:   |                |
| 2.1   | Mistura reciclada a quente em central na espessura definida no projeto   | m <sup>2</sup> |

Contudo, deixamos ainda como sugestão, um conjunto de artigos adaptados aos novos cadernos de encargos da Estradas de Portugal, S.A., que poderiam ser adaptados às várias atividades de aproveitamento de material fresado, como segue:

|                |  |                |
|----------------|--|----------------|
| 03.09          | Trabalhos especiais de pavimentação:   |                |
| 03.09.01       | Fresagem de camadas de pavimentos existentes remoção e transporte a vazadouro dos produtos escavados ou reutilização em central, conforme definido no projeto:                               |                |
| 03.09.01.01    | Em misturas betuminosas:   |                |
| 03.09.01.01.02 | Em profundidades entre 0,05 e 0,10 m   | m <sup>2</sup> |
| 03.09.01.01.03 | Em profundidades superiores a 0,10 m   | m <sup>2</sup> |
| 03.99.05       | Execução de camada granular no enchimento de bermas constituída por misturas betuminosas recuperadas das fresagens.  | m <sup>3</sup> |
| 03.99.06       | Fornecimento e colocação de AC20 base 35/50 (MB) com incorporação de materiais betuminosos de fresagem em percentagem ponderal de 30% (reciclagem a quente em central):                      |                |
| 03.99.06.01    | Com 0,06 m de espessura.   | m <sup>2</sup> |
| 03.99.06.02    | Com 0,09 m de espessura.   | m <sup>2</sup> |
| 03.99.07       | Fornecimento e colocação de AC14 bin 35/50 (BB) subjacente à camada de desgaste, com incorporação de materiais betuminosos de fresagem em percentagem ponderal de 30% (reciclagem a quente): |                |
| 03.99.07.01    | Com 0,05 m de espessura.   | m <sup>2</sup> |
| 03.99.08       | Fornecimento e colocação de AC20 reg 35/50 (MB) com incorporação de materiais betuminosos de fresagem em percentagem ponderal de 30% em camada de regularização (reciclagem a quente).       | ton            |
| 03.99.09       | Fornecimento e colocação de AC20 bin 35/50 (MB) com incorporação de materiais betuminosos de fresagem em percentagem ponderal de 30% em camada de regularização (reciclagem a quente):       |                |
| 03.99.09.01    | Com 0,06 m de espessura.   | m <sup>2</sup> |
| 03.99.10       | Fornecimento e colocação de AC14 reg 35/50 (BB) com incorporação de materiais betuminosos de fresagem em percentagem ponderal de 30% em camada de regularização (reciclagem a quente).       | ton            |

## EMPRESA D

a) R:

Não

b) R:

Não

c) R:

Não

d) R:

Não

e) R:

Na teoria sim porque poupa o ambiente.

f) R:

Não tenho dados

g1) R:

S/ experiência

g2) R:

S/ experiência

g3) R:

S/ experiência

g4) R:

S/ experiência

g5) R:

S/ experiência

g6) R:

S/ experiência

g7) R:

S/ experiência

g8) R:

S/ experiência

## EMPRESA E

a) R:

Sim

b) R:

A técnica utilizada foi a fresagem do pavimento betuminoso numa espessura entre 5 e 10 cm. Utilizando maquina fresadora

c) R:

Não

d) R:

O equipamento utilizado sempre foi de aluguer

e) R:

Sim, implica o reaproveitamento de materiais de certa qualidade em lugar de leva-los a vazadouros autorizados (com o custo a mais que isso implica)

f) R:

EN 371 E ER 371 - PAVIMENTAÇÃO ENTRE ARRONCHES E CAMPO MAIOR E ENTRE CAMPO MAIOR E RETIRO (FRONTEIRA) – DONO DE OBRA: ESTRADAS DE PORTUGAL, S.A.

Beneficiação de caminhos agrícolas (reaproveitando materiais fresados como camadas granulares).

g1) R:

**CONSULTAR TABELA 2 (pagina nº.5) “OPCIONES RECOMENDADAS DE RECICLAJE SEGÚN EL ESTADO DEL FIRME” DO FICHEIRO “RECICLADO PAVIMENTOS.PDF “ ENVIADO POR E-MAIL.**

g2) R:

Para reciclagem *in situ*, Recicladora Wirtgen WR 2500 S

<http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf->

[dokumente/03\\_kaltrecycling\\_stabilisierung/wr\\_2500\\_s/prospekt\\_22/p\\_wr\\_2500s\\_s.pdf](http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf-dokumente/03_kaltrecycling_stabilisierung/wr_2500_s/prospekt_22/p_wr_2500s_s.pdf)

g3) R:

N respondeu

g4) R:

N respondeu

g5) R:

N respondeu

g6) R:

N respondeu

g7) R:

N respondeu

g8) R:

N respondeu

## EMPRESA F

a) R:

Sim

b) R:

Reciclagem em central a quente com betume. Reciclagem *in situ* a frio, com cimento com muito pouca frequência

c) R:

Empreitadas para o corrente ano não estão previstas, no entanto, nas centrais betuminosas que a empresa dispõe, há a possibilidade da venda a qualquer momento de misturas betuminosas a quente com incorporação de material fresado que responde aos requisitos da Norma EN 13108-1:2006, correspondente à marcação CE para misturas betuminosas e estão de acordo com as especificações da EP.

d) R:

Sim. O mais utilizado é a central betuminosa com equipamento adaptado à reciclagem de pavimentos.

e) R:

É uma boa opção porque permite uma poupança dos recursos naturais, em termos ambientais e económicos é bastante vantajosa.

f) R:

Beneficiação/Reforço do pavimento da A1 – Sublanço Pombal/Condeixa; Obra na Aldeia da Luz aplicando a reciclagem de pavimentos *in situ* a frio.

g1) R:

A profundidade do pavimento seria com base de estudos e cálculos no local em função da capacidade da carga do pavimento existente.

g2) R:

Optaria pela a reciclagem *in situ* com cimento para a execução da camada de base reciclada e pela reciclagem em central, a quente com betume para camada de regularização e de desgaste em betão betuminoso reciclado. Os trabalhos consistem no seguinte:

Fresagem necessária do pavimento existente do material nobre da camada de desgaste de modo a garantir nas novas camadas 25% do

material fresado para a camada de regularização em betão betuminoso com 0,06m de espessura e 10 % o material fresado a incorporar na nova camada de desgaste com 0,04m de espessura. O restante material das camadas betuminosas que não é fresado é reaproveitado e desagregado *in situ* pela recicladora e envolvido nas camadas em granulometria extensa existente, e compactado através de cilindro estático e pneumático.

g3) R:

Recicladora da wirtgen 2500 WRS, e central betuminosa adaptada à reciclagem de pavimentos.

g4) R:

0,06 m de camada de regularização em betão betuminoso e uma camada de desgaste em betão betuminoso com 0,04 m, no entanto seria útil efetuar cálculos de capacidade de carga do pavimento existente, para verificar se as espessuras são o não as corretas.

g5) R:

Porque há um reaproveitamento do material existente e não é necessário recorrer aos recursos naturais, apenas somente será necessário na correção da granulometria para a composição das camadas. Há um reaproveitamento do material existente, e por isso não é necessário o encaminhamento do material sobranete a vazadouro.

g6) R:

O reaproveitamento do material existente sem se recorrer aos recursos naturais já é um benefício económico, mas poderá dizer-se que relativamente às camadas de regularização e de desgaste em betão betuminoso recicladas com incorporação de material fresado à uma redução de custo entre os 12% e os 20%. Para exemplificar os custos de fornecimentos à boca da central de material para as camadas de regularização, AC20 Reg. 35/50 (mist. betuminosa densa) com 25% de incorporação de material fresado, é de 35,00 €/ton e para a camada de desgaste em betão betuminoso AC surf 35/50( Betão betuminoso de desgaste) com 10% de incorporação de material fresado é de 40,00 €/ton. Sem incorporação de fresados para a camada de regularização AC20 Reg. 35/50 (mist. betuminosa densa) sairia a 43,00 €/ton e para a

camada de desgaste AC surf 35/50( Betão betuminoso de desgaste)  
sairia a 45,00 €/ton.

g7) R:

N/ aplicável

g8) R:

A designação dos trabalhos seriam muito parecido aos dos trabalhos convencionais, sendo neste caso com as devidas adaptações à reciclagem de pavimento, com as respetivas percentagens de fresados e ligantes a incorporar no produto final reciclado.