



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Civil



Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis Diferentes Tipos de Reciclagem

Célia Melo Cunha
(Bacharel)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Área de especialização de Vias de Comunicação e Transportes

(Versão Definitiva)

Orientadores:

Licenciada Luísa Ferreira Cardoso Teles Fortes, Eq. Prof. Adj. do ISEL
Mestre Henrique Manuel Borges Miranda

Júri:

Presidente: Doutora Maria da Graça Dias Alfaro Lopes, Prof. Coordenador com
agregação do ISEL

Vogais:

Doutor José Manuel Coelho das Neves, Prof. Auxiliar do IST
Licenciada Luísa Ferreira Cardoso Teles Fortes, Eq. Prof. Adj. do ISEL
Mestre Henrique Manuel Borges Miranda

Julho de 2010



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Civil



Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis **Diferentes Tipos de Reciclagem**

Célia Melo Cunha
(Bacharel)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Área de especialização de Vias de Comunicação e Transportes

(Versão Definitiva)

Orientadores:

Licenciada Luísa Ferreira Cardoso Teles Fortes, Eq. Prof. Adj. do ISEL
Mestre Henrique Manuel Borges Miranda

Júri:

Presidente: Doutora Maria da Graça Dias Alfaro Lopes, Prof. Coordenador com
agregação do ISEL

Vogais:

Doutor José Manuel Coelho das Neves, Prof. Auxiliar do IST
Licenciada Luísa Ferreira Cardoso Teles Fortes, Eq. Prof. Adj. do ISEL
Mestre Henrique Borges Miranda

Julho de 2010

RESUMO

Em Portugal os pavimentos flexíveis integram a grande maioria da rede rodoviária, encontrando-se muitos deles no fim da sua vida útil. A reabilitação desses pavimentos é por isso cada vez mais uma preocupação actual, sendo a selecção do processo de reabilitação mais adequado função de aspectos de ordem técnica, económica e ambiental. No que diz respeito à reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis, além das soluções tradicionais, que normalmente passam pela fresagem e aplicação de novas camadas, a técnica de reciclagem, permite que os materiais provenientes das camadas degradadas do pavimento sejam novamente utilizados na reabilitação desse ou de outro pavimento.

Esta dissertação procura documentar a técnica de reciclagem de pavimentos flexíveis, que em função de diferentes variáveis com influência no processo construtivo, como seja o local de reciclagem, a temperatura a que se dá o processo e o ligante utilizado, dão origem a diferentes processos construtivos e consequentemente a diferentes tipos de reciclagem.

No presente trabalho são apresentados os diferentes tipos de reciclagem de pavimentos flexíveis, suas especificidades, materiais construtivos e fases de construção, bem como as vantagens e desvantagens associadas a cada um dos tipos de reciclagem, de modo a definir em que situação é que cada uma deles constitui uma alternativa viável de reabilitação de um pavimento flexível degradado.

PALAVRAS CHAVE

Pavimentos flexíveis

Reabilitação

Reciclagem

ABSTRACT

In Portugal flexible pavements constitute the vast majority of the road network, many of which are at the end of their useful life. The rehabilitation of these pavements is, therefore, an increased concern today. Selecting the most appropriate rehabilitation process should take into account several technical, economic and environmental aspects. Regarding the rehabilitation of flexible pavements, in addition to traditional solutions, which usually pass through the milling and placement of a new layer, there are recycling techniques, which allow materials recovered from damaged pavements to be used in the rehabilitation of other pavements.

This dissertation intends to describe the recycling techniques for flexible pavements, which according to different variables influence the construction process, such as the recycling facility, the temperature at which the process occurs and the binder used. These give rise to different construction processes and hence the different types of recycling.

The dissertation presents the different types of recycling of flexible pavements, their specificities, building materials and construction phases, as well as the advantages and disadvantages of each type of recycling in order to understand what the best alternative for each type of case is.

KEY WORDS:

Flexible pavement

Rehabilitation

Recycling

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecer aos meus orientadores, Eng.^a Luísa Ferreira Cardoso Teles Fortes e Mestre Henrique Manuel Borges Miranda pela sua orientação, ensinamentos e conselhos dados para a elaboração da dissertação.

À Doutora Fátima Batista do LNEC pela simpatia com que sempre fui recebida, pelos ensinamentos e elementos fornecidos.

Aos meus colegas de mestrado e amigos, pelo companheirismo e amizade. Um agradecimento muito especial ao amigo Zé, pela paciência e ajuda ao longo deste tempo.

Por fim, à minha família, pelo apoio e encorajamento. Um agradecimento muito especial aos meus pais pela compreensão e oportunidade que me deram.

Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis

Diferentes Tipos de Reciclagem

Índice Geral

1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objectivos.....	2
1.3 Estrutura do Trabalho	2
2 Conservação e Reabilitação de Pavimentos.....	5
2.1 Introdução aos Pavimentos Flexíveis	5
2.2 Principais Mecanismos de Degradação de Pavimentos Flexíveis.....	7
2.3 Técnicas de Conservação e Reabilitação de Pavimentos Flexíveis	10
2.3.1 Técnicas de Conservação das Características Superficiais	11
2.3.1.1 Revestimentos Superficiais	12
2.3.1.2 Microaglomerado Betuminoso a Frio.....	12
2.3.1.3 Microbetão Betuminoso Rugoso	12
2.3.1.4 Lama Asfáltica	13
2.3.1.5 Argamassa Betuminosa	13
2.3.2 Técnicas de Reabilitação Estrutural	13
2.3.2.1 Reforço do Pavimento	14
2.3.2.1.1 Misturas Betuminosas Tradicionais.....	14
2.3.2.1.2 Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade	15
2.3.2.1.3 Misturas Betuminosas Modificadas com Polímeros.....	16
2.3.2.1.4 Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Alta Percentagem de Borracha	16

2.3.2.2	Reciclagem de Pavimentos.....	17
2.4	Síntese da Conservação e Reabilitação de Pavimentos	17
3	Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis.....	19
3.1	Processo de Reciclagem	22
3.2	Local de Reciclagem	25
3.2.1	Reciclagem <i>In Situ</i>	26
3.2.2	Reciclagem em Central.....	27
3.2.2.1	Centrais Contínuas	28
3.2.2.2	Centrais Descontínuas	29
3.3	Considerações sobre a Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis.....	32
4	Diferentes Tipos de Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis.....	35
4.1	Reciclagem <i>In Situ</i> a Frio	36
4.1.1	Reciclagem <i>In Situ</i> a Frio com Cimento	40
4.1.2	Reciclagem <i>In Situ</i> a Frio com Emulsão Betuminosa.....	43
4.1.3	Reciclagem <i>In Situ</i> a Frio com Espuma de Betume	46
4.2	Reciclagem <i>In Situ</i> a Quente.....	50
4.3	Reciclagem em Central a Frio	53
4.4	Reciclagem em Central a Quente	55
4.5	Reciclagem em Central Semi-Quente.....	57
4.6	Síntese dos Diferentes Tipos de Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis.....	59
5	Vantagens e Desvantagens dos Diferentes Tipos de Reciclagem.....	61
5.1	Apresentação de Casos de Estudo sobre as Características Mecânicas das Misturas Recicladas.....	68
5.2	Apresentação de Caso de Estudo da Análise Económica das Técnicas de Reciclagem	77
5.3	Principais Conclusões no âmbito dos Diferentes Tipos de Reciclagem. Vantagens e Desvantagens dos Diferentes Tipos de Reciclagem.....	80
6	Considerações Finais e Trabalhos Futuros	83
6.1	Considerações Gerais	83
6.2	Desenvolvimentos Futuros	84
7	Bibliografia.....	85

Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis

Diferentes Tipos de Reciclagem

Índice de Figuras

Figura 2.1 Estrutura tipo de um pavimento flexível	5
Figura 2.3 – Resposta de um pavimento flexível quando sujeito a uma carga uniforme.....	8
Figura 2.4 – Evolução do estado de um pavimento (Batista, 2004)	10
Figura 3.1 – Benefícios gerais da técnica de reciclagem de pavimentos flexíveis	20
Figura 3.2 – Objectivos da reciclagem de pavimentos flexíveis.....	21
Figura 3.3 – Máquina recicladora (<i>Wirtgen</i> , 2009).....	24
Figura 3.4 – Classificação da técnica de reciclagem de acordo com o local de reciclagem	25
Figura 3.5 – Centrais de produção das misturas betuminosas recicladas	28
Figura 3.6 – Esquema de funcionamento de uma central betuminosa contínua adaptada para o fabrico de misturas betuminosas com incorporação de material fresado (Azevedo, 2009b)	29
Figura 3.7 – Método de adição do material fresado nas centrais descontínuas	29
Figura 3.8 – Esquema de funcionamento de uma central betuminosa descontínua com incorporação do material fresado a frio (Azevedo, 2009b).....	30
Figura 3.9 – Esquema de funcionamento de uma central betuminosa descontínua com incorporação do material fresado a quente (Azevedo, 2009b).....	31
Figura 3.10 – Esquema de funcionamento de uma central betuminosa descontínua com incorporação do material fresado pelo método <i>Recyclean</i> (Azevedo, 2009b)	31
Figura 4.1 – Tipos de reciclagem de pavimentos flexíveis (Adaptado de Pereira & Moreira, 2007) .	36
Figura 4.2 – Quantidade de CO ₂ libertado de acordo com método de reabilitação (Adaptado de Alkins <i>et al.</i> , 2008).....	37
Figura 4.3 – “Comboio” de reciclagem (<i>Wirtgen</i> , 2009).....	38
Figura 4.4 – Rotor de uma máquina recicladora (<i>Wirtgen</i> , 2009)	39

Figura 4.5 – Estrutura de um pavimento reciclado <i>in situ</i> a frio com cimento	41
Figura 4.6 – Conjunto recicladora e misturadora (<i>Wirtgen</i> , 2009)	41
Figura 4.7 – Esquema de uma misturadora (Adaptado de <i>Wirtgen</i> , 2009)	42
Figura 4.8 – Fases da reciclagem <i>in situ</i> a frio com cimento (<i>Costa-Baptista</i> , 2006).....	42
Figura 4.9 – Fases da reciclagem <i>in situ</i> a frio com emulsão betuminosa (<i>Costa-Baptista</i> , 2006)	44
Figura 4.10 – “Comboio” composto pela máquina recicladora, cisternas para água e emulsão betuminosa (<i>Batista & Antunes</i> , 2009).....	44
Figura 4.11 – Esquema de produção da mistura reciclada <i>in situ</i> com emulsão betuminosa (<i>Costa- Baptista</i> , 2006).....	45
Figura 4.12 – Esquema de obtenção da espuma de betume (Adaptado de <i>Wirtgen</i> , 2001)	47
Figura 4.13 – Fases de reciclagem <i>in situ</i> a frio com espuma de betume (<i>Costa-Baptista</i> , 2006)	47
Figura 4.14 – Esquema de produção da mistura reciclada <i>in situ</i> a frio com espuma de betume (<i>Costa -Baptista</i> , 2006).....	48
Figura 4.15 – Reciclagem <i>in situ</i> a frio com espuma de betume (<i>Seixas</i> , 2008)	49
Figura 4.16 – Fases da reciclagem a quente <i>in situ</i> (<i>Costa-Baptista</i> , 2006).....	50
Figura 4.17 – Pré-aquecedores utilizados na reciclagem <i>in situ</i> a quente (<i>Martec</i> , 2009).....	51
Figura 4.18 – Misturador (<i>Martec</i> , 2009).....	52
Figura 4.19 – Espalhamento da mistura (<i>Martec</i> , 2009)	52
Figura 4.20 – Fresagem a frio e transporte do material fresado (<i>ARRA</i> , 2009).....	54
Figura 4.21 – Fases de reciclagem em central a frio com emulsão betuminosa (<i>Picado Santos et al., 2008</i>)	55
Figura 4.22 – Fases de reciclagem em central contínua a quente com betume (<i>Picado Santos et al., 2008</i>)	57
Figura 4.23 – Fases de reciclagem em central semi-quente com emulsão betuminosa (<i>Picado Santos et al.</i> , 2008).....	58
Figura 5.1 – Resultado dos ensaios para avaliação da resistência à compressão das amostras com 7 dias de cura (Adaptado de <i>Rastelli & Giuliani</i> , 2004).....	69
Figura 5.2 – Resultado dos ensaios para avaliação da resistência à compressão das amostras com 28 dias de cura (Adaptado de <i>Rastelli & Giuliani</i> , 2004).....	70
Figura 5.3 – Representação gráfica das leis da fadiga para as misturas com betume 35/50 (<i>Costa- Baptista</i> , 2006).....	74
Figura 5.4 – Módulo de deformabilidade das misturas (<i>Picado-Santos & Pereira</i> , 2006).....	76

Figura 5.5 – Leis da fadiga das misturas betuminosas (Picado-Santos & Pereira, 2006).....	76
Figura 5.6 – Deformação permanente das misturas betuminosas (Picado-Santos & Pereira, 2006) ..	77
Figura 5.7 – Estrutura do pavimento degradado – Caso 1 (Adaptado de Picado-Santos & Pereira, 2006)	78
Figura 5.8 – Estrutura do pavimento degradado – Caso 2 (Adaptado de Picado-Santos & Pereira, 2006)	78
Figura 5.9 – Custos finais para cada uma das alternativas de reabilitação – Caso 1 e Caso 2 (Adaptado de Picado-Santos & Pereira, 2006).....	80

Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis

Diferentes Tipos de Reciclagem

Índice de Quadros

Quadro 3.1 – Percentagem de reciclagem função do método de adição do material (Adaptado de Azevedo, 2009b).....	32
Quadro 4.1 – Classificação dos tipos de reciclagem (Adaptado de Fonseca, 2002).....	35
Quadro 5.1 – Vantagens e desvantagens das técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis.....	65
Quadro 5.2 – Método de reabilitação de pavimentos flexíveis de acordo com a degradação (Adaptado de USDD, 2001).....	66
Quadro 5.3 – Vantagens e Desvantagens dos ligantes utilizados nas técnicas de reciclagem <i>in situ</i> a frio (Adaptado de Lewis & Collings, 1999).....	67
Quadro 5.4 – Amostras fabricadas e analisadas (Adaptado de Rastelli & Giuliani, 2004).....	68
Quadro 5.5 – Resultados dos ensaios para avaliação da resistência à tracção das amostras fabricadas (Adaptado de Rastelli & Giuliani, 2004)	70
Quadro 5.6 – Resultados dos ensaios – Caso 1 (Adaptado de Jimenéz, 2003).....	72
Quadro 5.7 – Resultados dos ensaios – Caso 2 (Adaptado de Jimenéz, 2003).....	72
Quadro 5.8 – Características das misturas produzidas e avaliadas (Adaptado de Costa-Baptista, 2006).....	73
Quadro 5.9 – Módulos de deformabilidade para as misturas com betume 35/50 (Adaptado de Costa-Baptista, 2006).....	74
Quadro 5.10 – Espessura das novas camadas (cm) (Adaptado de Picado-Santos & Pereira, 2006)...	79
Quadro 5.11 – Custo final associado a cada uma das alternativas de reabilitação – Caso 1 (Adaptado de Picado-Santos & Pereira, 2006)	79
Quadro 5.13 – Custo final associado a cada uma das alternativas de reabilitação – Caso 2 (Adaptado de Picado-Santos & Pereira, 2006)	79

1. Introdução

1.1 *Enquadramento*

Ao longo da sua vida útil, os pavimentos rodoviários sofrem processos de degradação sob acção do tráfego e das condições climáticas, tendo-se verificado que nos últimos anos as solicitações a que são sujeitos têm aumentado, quer em termos de volume tráfego, quer em termos da sua agressividade. Paralelamente as exigências dos utentes têm também vindo a aumentar.

A necessidade de reabilitar pavimentos surge assim como um imperativo, sendo a mesma consequência da ocorrência de degradações, que podem afectar a qualidade dos pavimentos a diferentes níveis. Esta necessidade crescente de realizar obras de reabilitação dos pavimentos existentes também origina quantidades crescentes e não desprezáveis de materiais disponíveis para uma eventual reciclagem.

Para além das técnicas tradicionais de reabilitação de um pavimento flexível, a reciclagem dos materiais provenientes dos pavimentos degradados e a sua aplicação nesses ou em outros pavimentos, aparece assim como uma solução alternativa.

Esta técnica, para além de permitir a reabilitação das características estruturais de um pavimento flexível, vai também ao encontro das preocupações actuais relativamente às políticas de desenvolvimento sustentável.

A reciclagem de pavimentos surgiu na década de 70 nos Estados Unidos, numa altura em que o petróleo registava valores muito elevados, traduzindo-se em custos muito elevados de fabrico, transporte e aplicação das misturas betuminosas.

Na década de 90 a reciclagem volta novamente a tomar um papel importante, também por razões de ordem económica, mas principalmente devido a factores de ordem ambiental. A partir desta data, os factores ambientais passam assumir uma maior importância na escolha do processo de reabilitação de um pavimento.

A reciclagem surge como uma solução de resposta às preocupações em relação aos recursos não renováveis e também à deposição dos resíduos provenientes de pavimentos degradados, sendo considerada genericamente como um instrumento da política de desenvolvimento sustentável.

No entanto, a reciclagem de misturas betuminosas só é viável, quando economicamente justificável, sendo cada vez mais importante promover uma aproximação entre problemas ambientais e as soluções técnicas e económicas.

1.2 Objectivos

A presente dissertação corresponde ao Trabalho Final de Mestrado em Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. O tema desenvolvido refere-se à “ Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis – Diferentes Tipos de Reciclagem”, tema que se insere na área de especialização de Vias de Comunicação e Transportes do Mestrado em Engenharia Civil.

De uma maneira geral, actualmente, a temática da Reciclagem é debatida e promovida a sua divulgação e importância a toda a sociedade. Por se tratar de um tema actual, de grande importância e como forma de aprofundar os conhecimentos adquiridos na área da pavimentação, recaiu sobre ele a escolha para o desenvolvimento deste trabalho.

O objectivo central do trabalho será a análise do processo relativo à Reciclagem de Pavimentos Flexíveis e os diferentes tipos de reciclagem.

Assim, numa primeira fase é efectuado o enquadramento da problemática da reciclagem, no contexto da reabilitação de pavimentos flexíveis, evoluindo posteriormente, para a reciclagem de pavimentos flexíveis, de modo a identificar quais as variáveis que interferem no processo e que dão origem a diferentes tipos de reciclagem.

Prossegue-se elaborando uma análise de cada tipo de reciclagem, com as especificidades, equipamentos utilizados e fases do processo construtivo.

Numa fase posterior, são avaliadas as vantagens e desvantagem decorrentes da utilização de cada tipo de reciclagem. Neste âmbito, para os diferentes tipos de reciclagem em que foi possível recolher dados sobre casos de estudo, procedeu-se a uma análise dos mesmos, de modo a aferir o desempenho das respectivas misturas recicladas.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho é constituído por seis capítulos principais, cuja organização e conteúdo se sintetizam nesta secção.

Neste primeiro capítulo introdutório, faz-se um enquadramento do tema em estudo, definem-se os principais objectivos do trabalho e realiza-se uma síntese da estrutura considerada para a dissertação.

No Capítulo 2 “Conservação e Reabilitação de Pavimentos” são inicialmente tecidas considerações gerais sobre a constituição e o modo de funcionamento dos pavimentos flexíveis, para depois evoluir para os mecanismos de degradação dos mesmos. É feita uma descrição dos diferentes mecanismos de degradação e das diferentes técnicas de conservação e reabilitação de pavimentos flexíveis.

O Capítulo 3 “Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis” trata essencialmente da reciclagem de pavimentos, como uma das soluções possíveis para a reabilitação dos mesmos, sendo também, realizada uma abordagem do processo de reciclagem de pavimentos flexíveis no geral, particularizando a problemática do local de reciclagem.

No Capítulo 4 “Diferentes Tipos de Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis” são apresentados e analisados os diferentes tipos de reciclagem de pavimentos, do ponto de vista das diferentes variáveis em jogo, nomeadamente o local de reciclagem, a temperatura do processo e o ligante utilizado. São analisadas ainda, as fases de cada tipo de reciclagem, o equipamento construtivo e outras especificidades.

No Capítulo 5 “Vantagens e Desvantagens dos Diferentes Tipos de Reciclagem” são mencionadas as vantagens e desvantagens de cada um dos diferentes tipos de reciclagem. Neste capítulo são ainda apresentados cinco casos de estudos, quatro deles relativos a desempenhos de misturas betuminosas recicladas, e um último em que são analisados custos associados a uma solução de reabilitação com reciclagem.

Por fim, no Capítulo 6 “Considerações Finais” são apresentadas as principais conclusões do trabalho, bem como os desenvolvimentos futuros no âmbito da reciclagem de pavimentos flexíveis.

2 Conservação e Reabilitação de Pavimentos

2.1 Introdução aos Pavimentos Flexíveis

Os pavimentos flexíveis são estruturas multi-estratificadas genericamente constituídos por camadas superiores de misturas betuminosas e camadas inferiores de materiais granulares.

O comportamento de um pavimento rodoviário é determinado pelas acções, do tráfego e climáticas, que actuam sobre ele, pela sua constituição, ou seja, pelo número e espessura das camadas e pelas características dos materiais, e finalmente pelas características da fundação (Picado-Santos *et al.*, 2008).

Importa por isso, que os materiais de pavimentação que constituem as diferentes camadas apresentem determinadas propriedades, de forma a garantir que o pavimento no seu conjunto tenha as condições para as quais foi concebido, ou seja, oferecer uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos em condições de segurança, economia e conforto.

Na Figura 2.1 apresenta-se a estrutura tipo de um pavimento flexível, bem como os materiais habitualmente utilizados para cada uma das camadas constituintes.

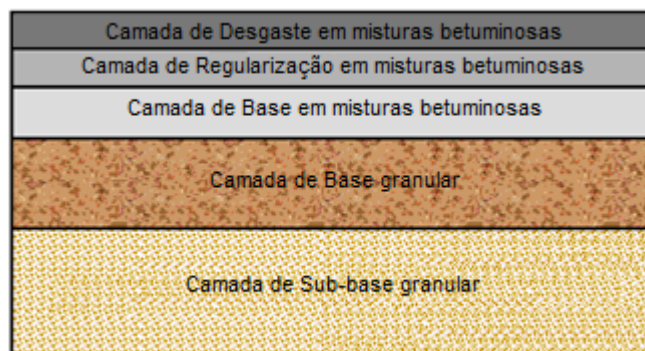


Figura 2.1 Estrutura tipo de um pavimento flexível

A realização das camadas superiores, consideradas como as mais nobres do pavimento flexível, é efectuada com a utilização de misturas betuminosas, as quais são constituídas por materiais granulares doseados de uma forma ponderal ou volumétrica e misturados numa central com uma determinada quantidade de ligante betuminoso.

Genericamente, estas camadas têm como principal função impermeabilizar a estrutura do pavimento para evitar a infiltração da água e dotar o pavimento de capacidade resistente, de modo a suportar as acções do tráfego. Acresce ainda referir que no caso específico da camada de desgaste, a sua superfície deve permitir a circulação adequada dos veículos.

Para que as misturas betuminosas se comportem de forma adequada, durante a construção e após a entrada em funcionamento do pavimento, é necessário garantir determinadas características, das quais se destacam as seguintes (Freire, 2004):

- Uma adequada estabilidade, de forma a resistir à passagem dos veículos sem o aparecimento de cavados de rodeira;
- Uma elevada durabilidade, para resistir ao desgaste causado pelo tráfego e pelos agentes atmosféricos;
- Uma adequada resistência à fadiga sob a passagem repetida dos rodados dos veículos;
- Uma flexibilidade que permita a adaptação das camadas betuminosas a assentamentos graduais observados nas camadas inferiores, sem que se verifique o aparecimento de fendilhamento;
- Impermeabilidade, para protecção das camadas adjacentes.

Além destes requisitos, é ainda importante que as misturas betuminosas apresentem adequada trabalhabilidade, de modo a facilitar as operações de fabrico, transporte e aplicação.

No caso de se destinarem a camadas de desgaste, as misturas betuminosas deverão também, após aplicação, obedecer a requisitos adicionais, nomeadamente, boa aderência (entre o pneu do veículo e a superfície do pavimento) e baixos níveis de ruído.

Refere-se, ainda, que as camadas betuminosas devem estar interligadas entre si através da aplicação de regas de colagem, de forma a funcionarem como sendo apenas uma só camada.

Relativamente às camadas inferiores (base e sub-base) são constituídas por materiais granulares, os quais têm como função a formação de um esqueleto pétreo que resista à acção do tráfego, sendo a sua resistência resultante do imbricamento dos agregados entre si. No entanto, actualmente já é habitual a utilização de bases de pavimentos flexíveis constituídas por materiais betuminosos.

Em função do método como são obtidos, os agregados podem classificar-se em naturais (areias, cascalheiras e rochas britadas), artificiais (escórias industriais) e reciclados (resíduos de construção e demolição).

Quando aplicados em camadas de base e de sub-base, os agregados assumem uma função estrutural de degradação das cargas aplicadas sobre o pavimento, conferem resistência à deformação e possibilitam uma correcta drenagem. Tal como acontece com as misturas betuminosas, também são exigidos aos agregados determinadas características, de forma a garantir que quando aplicados no pavimento desempenhem correctamente a sua função, as quais se discriminam seguidamente:

- Adequada granulometria, de forma a garantir um correcto imbricamento entre os agregados;
- Elevada resistência, para resistir ao choque;
- Forma preferencialmente cúbica, pois com esta forma os agregados apresentam maior resistência à deformação permanente e à fadiga, face a agregados com forma alongada ou arredondada;
- Limpeza, não devendo possuir impurezas que impeçam adequada aderência entre os agregados.

2.2 Principais Mecanismos de Degradação de Pavimentos Flexíveis

Os pavimentos estão permanentemente submetidos a vários tipos de agentes que contribuem para uma diminuição das características superficiais e estruturais. Efectivamente, as degradações nos pavimentos são devidas à acção do tráfego e às acções climáticas, como sejam a temperatura e a água (Vicente, 2006).

O comportamento dos pavimentos flexíveis é influenciado pelo impacte das condições térmicas, factor determinante na resistência das misturas betuminosas. Estas misturas betuminosas apresentam normalmente um comportamento visco-elástico, no entanto, para situações em que a temperatura é elevada, passam a apresentar um comportamento viscoso, que se traduz em elevadas deformações (menor rigidez). Para situações de baixas temperaturas, as misturas betuminosas passam a apresentar um comportamento elástico, que se traduz em pequenas deformações (maior rigidez).

A água é outro agente com grande influência no comportamento dos pavimentos, a sua presença pode dar origem a um aumento da deformabilidade dos materiais granulares e da respectiva fundação. Ao nível das camadas betuminosas poderá acentuar a desagregação e

fendilhamento, muitas vezes associado à bombagem de finos provenientes das camadas granulares (em particular se já existirem fendas nas camadas betuminosas). É importante por isso providenciar uma boa drenagem do pavimento, de forma a minimizar estes efeitos.

A acção sucessiva do tráfego que actua sobre o pavimento provoca estados de tensão e de extensão que conduzem a que o mesmo se degrade e atinja em último caso um estado de ruína, por fadiga das misturas betuminosas ou por deformação permanente do solo de fundação.

Como se pode verificar pela Figura 2.2, a acção imposta pelo tráfego dá origem à existência de duas zonas críticas do ponto de vista estrutural nos pavimentos flexíveis. A primeira zona localiza-se na base das camadas betuminosas, onde se verificam maiores tensões de tracção, que podem levar à rotura do pavimento por fadiga à tracção. A segunda zona localiza-se ao nível da face superior do solo de fundação, onde se verificam as maiores tensões de compressão, que podem dar origem à deformação permanente do solo de fundação.

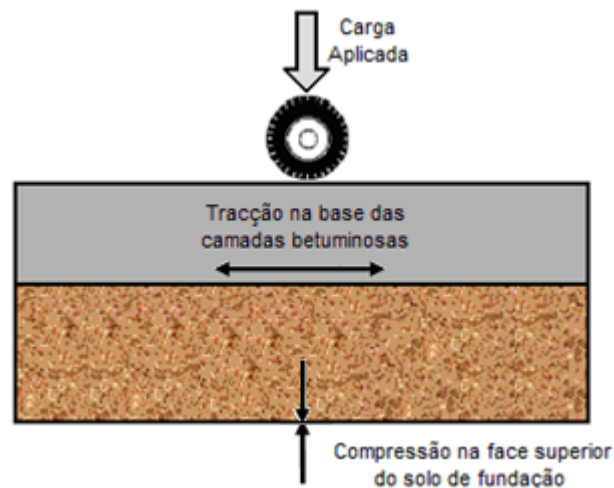


Figura 2.2 – Resposta de um pavimento flexível quando sujeito a uma carga uniforme

Assim, para os pavimentos flexíveis existem dois mecanismos principais de degradação, por um lado, o fendilhamento das camadas betuminosas, e por outro, a deformação permanente do solo de fundação do pavimento.

O fendilhamento por fadiga resulta da aplicação repetida de esforços de tracção na base das camadas betuminosas, provocados pela repetida passagem de rodados dos veículos pesados. As fendas resultantes podem ser isoladas ou ramificadas, consoante a fase de desenvolvimento, sendo que numa fase de avançado estado de degradação do pavimento formam uma malha denominada de “pele de crocodilo”, que tem início na zona de passagem dos rodados dos veículos e vai evoluindo em todas as direcções até abranger a largura da faixa de rodagem.

Nesta fase de degradação, além da diminuição da capacidade de suporte das camadas betuminosas, verifica-se também uma diminuição da capacidade das camadas granulares e do solo de fundação, devido à entrada de água exterior através das fendas.

A deformação permanente resulta do somatório das deformações plásticas nas camadas de materiais granulares e no solo de fundação do pavimento, sob acção repetida da passagem de veículos pesados. As deformações podem ser localizadas, no caso de se verificarem apenas em zonas pontuais do pavimento, ou apresentarem uma determinada frequência e nesse caso denominam-se de ondulações.

As deformações podem também ocorrer nas camadas de misturas betuminosas, e neste caso denominam-se de rodeiras. As rodeiras são causadas pela passagem de veículos pesados a baixas velocidades e/ou com temperaturas elevadas, ou pela má distribuição do ligante durante a aplicação da camada.

No entanto, para além do fendilhamento por fadiga e da deformação permanente, que constituem os principais mecanismos de degradação de um pavimento flexível, as degradações referentes a este tipo de pavimentos são muito mais vastas. As degradações dos pavimentos flexíveis podem ser classificadas de acordo com a perda das características funcionais ou estruturais do pavimento:

- As degradações das características funcionais dizem respeito à capacidade do pavimento em proporcionar uma circulação segura, cómoda e económica para os utilizadores. São degradações que afectam as características superficiais e geométricas do pavimento e que dizem respeito à camada de desgaste do pavimento.
- As degradações das características estruturais dizem respeito à falta de capacidade de carga do pavimento, provocada pela fadiga de uma ou mais camadas, ou pelo colapso da própria estrutura.

Estes dois tipos de degradações estão interligados, uma vez que a existência de uma leva a que se desenvolva a outra, ou seja, quando um pavimento apresenta fendilhamento na sua superfície, que interfere com a regularidade do pavimento (degradações das características funcionais), este pode permitir a entrada de água até às camadas granulares. A água nas camadas granulares, juntamente com acção do tráfego dá origem a deformações, com a consequente diminuição da capacidade de carga destas camadas e solo de fundação (degradações das características estruturais).

O processo de evolução das degradações, aparentes ou não, de um pavimento, apoia-se no “princípio da cadeia de consequências”, segundo o qual uma degradação não evolui isoladamente no tempo, antes dá origem a novos tipos de degradações, as quais, por sua vez, interferem com as características das primeiras. Gera-se deste modo uma actividade em ciclo, onde as diferentes degradações interferem mutuamente (Picado Santos *et al.*, 2008).

2.3 Técnicas de Conservação e Reabilitação de Pavimentos Flexíveis

Conforme referido anteriormente, os pavimentos rodoviários após a sua entrada em funcionamento, pela acção do tráfego e das condições climáticas, a que estão sujeitos, vão sofrendo várias e sucessivas degradações, as quais interferem com a qualidade de circulação e reduzem a aptidão do pavimento para suportar as cargas do tráfego.

Neste contexto, uma vez construído um pavimento, é fundamental estabelecer um programa de acompanhamento da sua evolução, para apoiar a decisão de intervir, de modo a repor a sua qualidade.

Como se pode verificar na Figura 2.3, um pavimento no início da sua vida útil apresenta um determinado nível máximo de serviço, que se caracteriza por elevados níveis de segurança, conforto e economia para os utilizadores. Ao longo do tempo, o pavimento vai perdendo as suas características iniciais, com a conseqüente diminuição do nível de serviço.

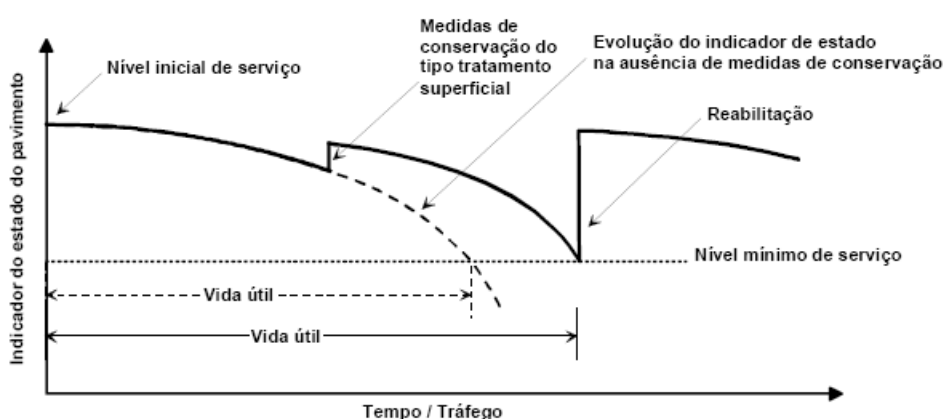


Figura 2.3 – Evolução do estado de um pavimento (Batista, 2004)

As intervenções num pavimento flexível podem ser classificadas de acordo com as características que se pretendem beneficiar. Por um lado a melhoria da qualidade funcional do

pavimento (ao nível da segurança, conforto e economia) - domínio da conservação, ou por outro lado a melhoria da qualidade estrutural (dotando o pavimento de capacidade resistente) - domínio da reabilitação.

Quando surge a necessidade de intervir no pavimento, a selecção da solução deverá responder aos seguintes critérios (Batista, 2004):

- Económicos – minimização dos custos da obra e dos custos suportados pelos utentes durante a execução da obra e após a entrada em funcionamento;
- Técnicos – eficácia na resolução dos problemas existentes e qualidade de desempenho no futuro;
- Ambientais – minimização dos impactes ambientais.

2.3.1 Técnicas de Conservação das Características Superficiais

A manutenção das características superficiais de um pavimento, encontra-se no domínio da conservação dos pavimentos e visa repor ou aumentar o nível de serviço do mesmo.

As técnicas de conservação das características superficiais actuam ao nível da camada de desgaste do pavimento flexível e podem ser aplicadas desde que as características estruturais do pavimento não tenham sido afectadas. São utilizadas em situações em que se pretende melhorar as características superficiais ou geométricas do pavimento, por exemplo melhoria das características de aderência ou impermeabilidade.

As reparações localizadas são consideradas uma técnica de conservação das características superficiais do pavimento, podendo ser utilizadas em situações em que o pavimento apresente degradações pontuais. Esta técnica consiste no enchimento das “covas” presentes no pavimento com uma mistura betuminosa, seguida de compactação.

As reparações localizadas são desconfortáveis para o utilizador do ponto de vista do conforto e segurança, pois dão origem a elevações ou depressões na superfície do pavimento. Trata-se de uma técnica muito utilizada quando não existe uma estratégia de conservação, ou quando não existem recursos financeiros disponíveis.

Como alternativa às reparações localizadas, existe uma outra técnica de conservação das características superficiais e que consiste na colocação de uma nova camada de desgaste sobre o pavimento existente, a qual poderá ser constituída por diferentes materiais, os quais serão apresentados de seguida.

2.3.1.1 Revestimentos Superficiais

Os revestimentos superficiais são camadas muito finas formadas pela sobreposição de agregados com uma ou duas camadas de ligantes betuminosos e colocadas sobre o pavimento já existente. Assim, é importante proceder-se antecipadamente à correcção de defeitos localizados, de modo a corrigir eventuais irregularidades longitudinais, que no caso de o pavimento apresentar grande irregularidade, tornam a aplicação desta técnica inadequada.

Esta técnica de conservação das características superficiais é segundo Picado-Santos *et al.* (2008) aquela que apresenta a melhor relação custo/benefício quando se pretende uma melhoria da rugosidade e impermeabilização do pavimento existente.

Inicialmente a utilização de revestimentos superficiais era indicada apenas para situações de tráfego pouco intenso, no entanto, com o aparecimento de novos betumes modificados, os revestimentos superficiais podem ser utilizados até mesmo em situações de tráfego elevado, como acontece por exemplo em auto-estradas.

2.3.1.2 Microaglomerado Betuminoso a Frio

O microaglomerado betuminoso a frio é uma camada muito fina (máximo de 1cm), que resulta da mistura de uma emulsão com agregados, água, filler comercial e caso seja necessário, aditivos. A mistura do material que dá origem ao microaglomerado betuminoso é realizada no próprio local, sendo a mistura espalhada sobre o pavimento existente.

Depois de colocada, a mistura não necessita de ser compactada, podendo proceder-se à imediata abertura da via ao trânsito, o que constitui uma vantagem relativamente a outras técnicas.

O microaglomerado betuminoso é especialmente indicado para situações de contingência de subida de cotas, nomeadamente zonas urbanas, por se tratar de uma camada muito delgada.

De acordo com Miranda & Pereira (1999) o interesse desta técnica deriva do grande rendimento conseguido durante a colocação do microaglomerado, por se tratar de uma camada muito fina, e da obtenção de características superficiais satisfatórias a um custo reduzido.

2.3.1.3 Microbetão Betuminoso Rugoso

Trata-se de uma mistura betuminosa aplicada em camadas com espessuras entre 2,5cm e 3,5cm. O microbetão betuminoso rugoso permite a obtenção de excelentes características superficiais nomeadamente no que diz respeito à aderência do pneu com o pavimento, o que o tornam especialmente indicado para situações em que o pavimento está sujeito a tráfego com elevada velocidade.

Para Picado-Santos *et al.* (2008) esta técnica tem a desvantagem de não conseguir apresentar razoáveis características de impermeabilidade, mas é económica e apresenta boas condições de conforto e segurança para os utilizadores.

2.3.1.4 Lama Asfáltica

A lama asfáltica também conhecida por *Slurry Seal* é uma mistura betuminosa com uma composição muito semelhante à do microaglomerado betuminoso a frio, no entanto a lama asfáltica apresenta na sua constituição agregados de menor dimensão relativamente aos utilizados no microaglomerado betuminoso a frio. Os agregados utilizados têm muitas vezes dimensões inferiores a 2mm, o que faz com que a lama asfáltica apresente problemas de rugosidade e conseqüentemente de aderência entre os pneus e o pavimento.

Trata-se de uma técnica que de acordo com Miranda & Pereira (1999) é muito utilizada em Portugal, mas que se tem tornado cada vez menos utilizada noutros países.

2.3.1.5 Argamassa Betuminosa

A argamassa betuminosa é uma mistura betuminosa que pode ser utilizada em situações em que o pavimento necessita de intervenções ao nível da camada de desgaste, no entanto a sua utilização está limitada a pavimentos com tráfego pouco intenso. A argamassa betuminosa é mais utilizada em Portugal como interface entre camadas, de forma a retardar o processo de propagação de fendas.

Nas situações de fendilhamento generalizado, e perante a necessidade de retardar uma reabilitação estrutural, poderá ser uma alternativa de curto prazo, dado que apresenta uma boa capacidade de se adaptar a deformabilidades acentuadas (Miranda & Pereira, 1999).

2.3.2 Técnicas de Reabilitação Estrutural

A reabilitação estrutural de pavimentos flexíveis envolve tradicionalmente a aplicação no pavimento de novas camadas de misturas betuminosas fabricadas a quente, de modo a dotar o pavimento de maior capacidade de carga. O número de camadas e a espessura depende da qualidade existente e da qualidade requerida definida no programa de reabilitação do pavimento.

As técnicas de reabilitação estrutural são soluções a longo prazo, geralmente entre 10 a 20 anos, que para além de permitirem a reabilitação das características estruturais possibilitam a melhoria das características funcionais, dado que estas técnicas implicam sempre a aplicação de uma nova camada de desgaste.

Actualmente existem várias técnicas de reabilitação estrutural de pavimentos flexíveis que passam pela colocação de uma camada de reforço no pavimento ou pela reciclagem do pavimento, de modo a eliminar as fendas existentes no pavimento.

Seguidamente serão apresentadas cada uma destas técnicas de reabilitação estrutural de pavimentos flexíveis.

2.3.2.1 Reforço do Pavimento

As operações de reabilitação de um pavimento flexível por processos tradicionais compreendem a execução de camadas de reforço em misturas betuminosas fabricadas a quente, em central, geralmente acompanhadas de fresagem das misturas betuminosas mais degradadas e do seu transporte a depósito (Batista, 2004).

No entanto, devido a factores de ordem económica, ambiental e até relativos à qualidade surgem novos materiais que constituem uma alternativa à solução tradicional.

Actualmente, e cada vez mais, a reabilitação estrutural dos pavimentos passa pela aplicação de novas misturas betuminosas em camadas de base ou de regularização, para além de camada de desgaste, que proporciona um aumento da capacidade de suporte do pavimento.

De seguida serão apresentadas algumas das misturas betuminosas utilizadas na reabilitação de pavimentos flexíveis.

2.3.2.1.1 Misturas Betuminosas Tradicionais

As misturas betuminosas tradicionais são fabricadas a quente em centrais especificamente concebidas para o efeito. São constituídas por agregados e betume, os quais são aquecidos com o intuito de diminuir a viscosidade do betume, e assim obter a consistência que permita o fabrico da mistura. Depois de misturados, são transportados até ao local da obra, espalhados e compactados, formando uma camada do pavimento.

As características mecânicas de uma mistura betuminosa são o resultado das características dos materiais que lhe deram origem e das suas proporções. Deste modo, consegue-se obter diferentes misturas, que em função das camadas do pavimento a que se destinam, assim apresentam propriedades diferentes.

O macadame betuminoso é uma mistura betuminosa tradicional com características de camada de base e de regularização, utilizada com o intuito de melhorar as características estruturais do pavimento. As suas características derivam da utilização de agregados com a dimensão máxima de 37,5mm e teores em betume da ordem dos 4% a 5%.

O betão betuminoso é outra mistura tradicional, mas que decorrente da utilização de materiais com diferentes características e em diferentes proporções apresenta características de camada de desgaste. Para o fabrico do betão betuminoso são utilizados agregados com uma dimensão máxima de 14mm e teores em betume entre 5% e 6%. Apesar de não ser aplicado ao nível das camadas de base, o betão betuminoso apresenta elevada resistência à reflexão de fendas, evitando assim o aparecimento de fendas à superfície e a consequente entrada de água para o pavimento, contribuindo deste modo para um aumento da capacidade de suporte do pavimento.

2.3.2.1.2 Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade

As misturas de alto módulo de deformabilidade aplicadas a partir dos anos 80 são materiais fortemente doseados (mais de 6%) em betume duro de destilação directa ou ligeiramente modificado (Capitão, 1996).

As misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade, por utilizarem betumes com índice de penetração menor, apresentam melhores características mecânicas relativamente às misturas betuminosas tradicionais, nomeadamente maiores módulos de deformabilidade, maior rigidez e uma consequente diminuição das deformações permanentes do pavimento.

O facto de se obter misturas betuminosas mais rígidas, permite a redução da camada de reforço. De acordo com Vicente (2006) esta técnica torna-se especialmente indicada para situações onde existam condicionalismos da subida de cotas, como sejam estradas em zonas urbanas, ou ainda em auto-estradas com tráfego pesado muito intenso.

Outras vantagens que decorrem da diminuição da espessura da camada de reforço são as seguintes (Batista, 2004):

- Redução da utilização dos recursos naturais (agregados e betume);
- Redução dos volumes de transporte dos materiais e, consequentemente, redução dos custos de transporte;
- Redução dos tempos de execução das camadas e, consequentemente, redução dos custos suportados pelos utentes (resultantes de atrasos e/ou acidentes).

As misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade devem ser empregues somente em camadas de base ou de regularização, não sendo aconselhável a sua aplicação em camadas de desgaste, devido à elevada rigidez, que sob o efeito de variações de temperatura pode levar ao fendilhamento por retracção da camada.

2.3.2.1.3 Misturas Betuminosas Modificadas com Polímeros

O betume modificado com polímeros é um betume ao qual são adicionados agentes químicos durante o processo de fabrico, com o propósito de alterar as suas propriedades reológicas.

Os polímeros mais utilizados actualmente na modificação dos betumes são os polímeros termoplásticos e os elastómeros. A adição destes componentes à mistura betuminosa, surge como resposta à necessidade de obtenção de melhores capacidades mecânicas do pavimento, para mais facilmente resistirem a esforços cada vez mais severos provocados pelo tráfego. Com esta alteração ao betume procura melhorar-se principalmente a elasticidade e a sensibilidade à temperatura, conduzindo a uma redução da deformação permanente e a um aumento da resistência à fadiga da camada, que faz com que esta apresente menor propensão para o aparecimento de fendas.

2.3.2.1.4 Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Alta Percentagem de Borracha

A utilização de misturas com betume modificado com alta percentagem de borracha na construção/reabilitação de pavimentos, permite que a própria via de comunicação de transporte rodoviário, a estrada, possa absorver, na sua infra-estrutura, um resíduo inevitavelmente gerado na sua actividade: os pneus usados (Batista, 2004).

O betume modificado com alta percentagem de borracha resulta da adição de borracha reciclada de pneus ao betume tradicional. De acordo com Recipav (2007) a borracha ao entrar em contacto com o betume quente reage e fixa os maltenos, constituintes do betume, que se vão perdendo com o passar do tempo devido aos raios ultravioleta. Assim, ao mesmo tempo que fixa os maltenos, permite que as misturas betuminosas aumentem a resistência ao envelhecimento e um conseqüente aumento da durabilidade destas mesmas misturas betuminosas.

A utilização de betume modificado com alta percentagem de borracha (BBA) aumenta a resistência à fadiga das misturas betuminosas, sendo esta superior à verificada em misturas com betume modificado com polímeros. Este comportamento é atribuído à maior flexibilidade proporcionada pela incorporação da borracha granulada ao betume. Nas misturas betuminosas com betume modificado com borracha também se verifica um aumento da resistência às deformações permanentes comparativamente às misturas com betume convencional, resultante da menor susceptibilidade térmica do betume (Pereira *et al.*, 2006).

Das misturas betuminosas com BBA, as misturas rugosas são as que maior aplicação têm tido em Portugal, sendo habitualmente aplicadas para além de camadas de desgaste em camadas

de base ou de regularização, quer em obras novas, quer em obras de reabilitação. A aplicação de misturas betuminosas rugosas com BBA é considerada vantajosa em locais onde os tempos de aplicação das cargas são elevados, para as quais as misturas betuminosas abertas não apresentam um desempenho tão bom em virtude da sua estrutura aberta (Miranda, 2008).

2.3.2.2 Reciclagem de Pavimentos

A reciclagem de pavimentos rodoviários é outra técnica de reabilitação estrutural de um pavimento flexível degradado, que surge como alternativa às soluções mais tradicionais que envolvem a colocação de um reforço no pavimento.

À semelhança da aplicação de uma nova camada de reforço no pavimento, também a técnica de reciclagem implica a fresagem prévia do pavimento, de modo a eliminar as fendas existentes no pavimento. No entanto, com a técnica de reciclagem, o material resultante do processo de fresagem não é desprezado e colocado em zonas de vazadoiro, pelo contrário, parte deste material e em alguns casos a totalidade (dependendo do tipo de reciclagem como se verá mais à frente) volta a ser utilizado nas novas camadas constituintes do pavimento reabilitado.

Decorrente da valorização do material fresado e da sua reutilização, o que não acontece com outras técnicas de reabilitação estrutural de pavimentos degradados, a reciclagem de pavimentos apresenta benefícios face a outras técnicas de reabilitação estrutural, os quais serão estudados ao longo deste trabalho, constituindo o objecto principal de estudo.

2.4 Síntese da Conservação e Reabilitação de Pavimentos

Após a entrada em funcionamento, o pavimento rodoviário flexível fica sujeito à acção do tráfego e das condições climáticas. A acção sucessiva destes dois factores, em especial do primeiro, conduz à ocorrência de sucessivos estados de tensão e extensão no pavimento, que geram o fendilhamento por fadiga das misturas betuminosas e a ocorrência de deformação permanente, os quais interferem com a qualidade de circulação dos utilizadores, e diminuem a capacidade do pavimento para suportar as cargas impostas.

A necessidade de intervir no pavimento, surge assim, de forma a devolver as características entretanto perdidas, podendo ser uma intervenção ao nível da conservação ou ao nível da reabilitação, de acordo com as características que se pretende beneficiar no pavimento.

Quando surge a necessidade de intervir ao nível das características funcionais do pavimento existem um conjunto de técnicas aplicáveis, nomeadamente as reparações localizadas ou a aplicação de revestimentos superficiais, capazes de devolver as respectivas características.

Quando a necessidade de intervir no pavimento é mais profunda, ao nível da reabilitação das características estruturais do pavimento, existem as técnicas próprias de reabilitação.

Tradicionalmente, a reabilitação de um pavimento flexível implica a fresagem do pavimento, depósito em vazadouro do material fresado e a colocação de uma nova camada de reforço composta por misturas betuminosas.

A técnica de reciclagem é outra possibilidade para a reabilitação das características estruturais do pavimento, que ao contrário da técnica de reforço tradicional, aproveita o material proveniente da fresagem, evitando o seu depósito em zonas de vazadouro.

Uma vez que se trata do objecto principal deste trabalho, a reciclagem será tratada e desenvolvida nos capítulos seguintes.

3 Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis

Geralmente, a reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis é conseguida por reconstrução ou reforço tradicional.

A reciclagem surge como sendo um processo alternativo às soluções tradicionais, com o reaproveitamento dos materiais provenientes de pavimentos degradados (que são incorporados nas camadas de novos pavimentos), tendo vantagens ambientais, técnicas e económicas e evitando-se o recurso a zonas de vazadouro. Pode por isso dizer-se que a reciclagem de pavimentos flexíveis degradados constitui um ciclo fechado.

A utilização da técnica de reciclagem apresenta, de acordo com Alkins *et al.* (2008), de um modo geral, os seguintes benefícios (Figura 3.1):

⇒ Benefícios Ambientais:

- Diminuição das zonas de vazadouro - com a reciclagem do pavimento, os materiais provenientes do mesmo voltam a ser utilizados no novo pavimento, com a consequente eliminação ou diminuição das zonas de vazadouro, que constituem um problema ambiental;
- Redução da utilização de novos agregados - trata-se de um recurso não renovável. A extracção, produção e transporte dos agregados consome energia, para além de ter um elevado impacte ambiental negativo.

⇒ Benefícios Económicos:

- O fornecimento de betumes e agregados com qualidade, para a construção e reabilitação de pavimentos, tem sido nos últimos anos, cada vez mais limitado. Para além disso, tem-se verificado um substancial incremento nos custos dos materiais, dos equipamentos, dos combustíveis e transportes, o que leva a que a reciclagem dos materiais já presentes no pavimento seja naturalmente encorajada.

⇒ Benefícios no Desempenho

- Permite a reabilitação das características estruturais de um pavimento degradado reutilizando o material já existente.

⇒ Benefícios Técnicos

- Com a técnica de reciclagem conseguem-se melhorias estruturais ou de regularidade do pavimento (mantendo a rasante), evitando-se assim problemas com grandes modificações na estrada e no *gabarit* associado a passagens superiores.



Figura 3.1 – Benefícios gerais da técnica de reciclagem de pavimentos flexíveis

A técnica de reciclagem de pavimentos rodoviários surgiu no âmbito da resolução de problemas de ordem económica e não ambientais. O que se verificou na década de 90 foi o renascimento desta técnica devido a problemas ambientais. No entanto, não deixa de ser verdade que nos dias de hoje, o factor económico assume novamente elevada importância, o que faz com que a técnica de reciclagem volte a ser encarada como uma forte alternativa às soluções tradicionais de reabilitação de pavimentos flexíveis degradados, uma vez que a reciclagem de pavimentos é, regra geral, mais económica do que um reforço com uma mistura tradicional, como se verá mais adiante no Ponto 5.2.

Outro aspecto bastante importante a ter em consideração diz respeito às situações em que a técnica de reciclagem pode ser utilizada como solução para a reabilitação das características estruturais de um pavimento flexível.

Assim, a reciclagem pode ser utilizada nas seguintes situações:

- No caso em que as camadas betuminosas do pavimento apresentam fendilhamento por fadiga;
- Em situações em que as camadas betuminosas apresentam deformações derivadas do impacto das condições térmicas;
- Em situações em que o pavimento se apresente em avançado estado de degradação.

No entanto, existem também algumas situações, em que a técnica de reciclagem não deverá ser utilizada, nomeadamente quando o pavimento apresenta problemas de fundação, ou problemas de drenagem. Para ambas as situações anteriores, a técnica de reciclagem não constituirá uma solução adequada, não devendo sequer ser aplicada. Importa, também, reter que a técnica de reciclagem apresenta algumas limitações, nomeadamente no que diz respeito ao equipamento de reciclagem.

O processo de reciclagem de um pavimento flexível tem como objectivo principal a reabilitação das características estruturais do pavimento, de forma a melhorar o seu comportamento quando solicitado pelo tráfego. Esta é uma técnica de reabilitação de pavimentos que permite a conservação dos recursos naturais, aproveitando os materiais existentes no pavimento antigo, diminuindo, assim, a necessidade de incorporação de novos materiais.

De acordo com Fonseca (2002), existem, ainda, outros objectivos parciais (Figura 3.2), aos quais a técnica de reciclagem deverá responder, nomeadamente, aumentar a capacidade resistente e a durabilidade do pavimento, proteger as camadas inferiores e o leito do pavimento, transformar o pavimento numa estrutura homogénea e resistente, de forma a tornar-se num processo vantajoso do ponto de vista técnico, económico e ambiental.

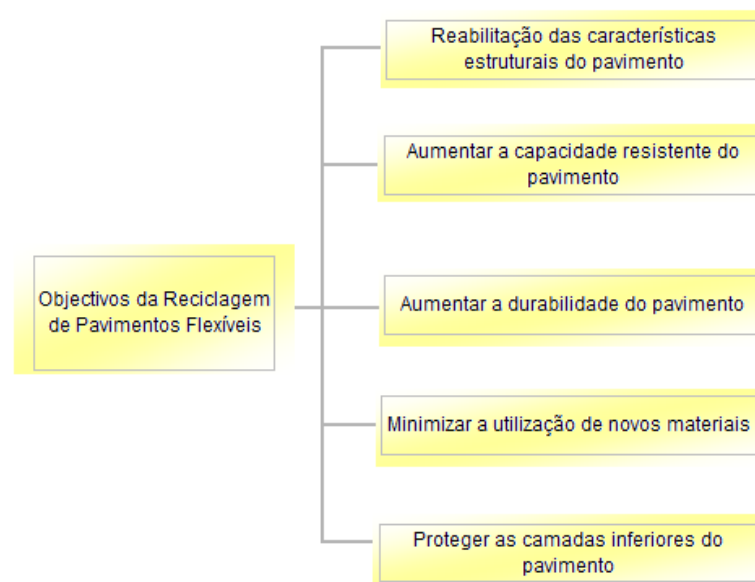


Figura 3.2 – Objectivos da reciclagem de pavimentos flexíveis

A reciclagem, é assim, mais uma opção de reabilitação de pavimentos degradados e não deve reciclar-se simplesmente porque é um cenário ecológico, mas sim porque é tecnicamente adequado e dela derivam vantagens económicas, tanto para as empresas como para as administrações (Azevedo, 2009b).

3.1 Processo de Reciclagem

Para que a técnica de reciclagem possa constituir uma alternativa viável de reabilitação de um pavimento flexível é importante que todo o processo seja analisado e dividido por fases, de modo a averiguar se a solução de reciclagem constitui em todas as fases uma solução viável para determinado caso de reabilitação, pois cada caso apresenta especificidades que o diferenciam e o tornam único.

O processo de reciclagem pode ser dividido em três grandes fases (Teixeira, 2006):

- Verificação das características do pavimento e se estas o elegem como adequado para a reciclagem;
- Estudo dos materiais e da composição da mistura betuminosa;
- Projecto do pavimento e realização da intervenção de reciclagem.

Numa primeira fase de estudo é avaliada a viabilidade da utilização da técnica, como solução para a reabilitação estrutural do pavimento degradado, tendo em consideração as condicionantes económicas, as solicitações do tráfego, os impactes ambientais, os aspectos logísticos, os aspectos geométricos, entre outros.

É também importante verificar se o pavimento apresenta heterogeneidades localizadas ou pontuais, por exemplo, se existem zonas de transição de espessura e/ou de material das camadas, ou ainda, se existem serviços enterrados. A existência de heterogeneidades ao longo do pavimento dificulta a intervenção da técnica de reciclagem, podendo em alguns casos tornar a técnica inviável.

Outro aspecto importante a ter em consideração tem origem nas limitações dos equipamentos utilizados, nomeadamente no que diz respeito à profundidade máxima admissível. Assim, a existência de fendas muito profundas no pavimento, impossibilita a aplicação da técnica de reciclagem.

Numa segunda fase, o processo de reciclagem compreende o estudo dos materiais a reciclar, provenientes do pavimento existente. Estes materiais podem ser constituídos por

agregados, ou por agregados aglutinados com ligantes betuminosos envelhecidos, que resultam da desagregação por fresagem do pavimento, numa determinada profundidade pré-estabelecida.

É importante também proceder-se à caracterização do material fresado, de modo a verificar qual o seu comportamento no pavimento reabilitado. Para tal deve ser realizada uma análise granulométrica (com e sem ligante) do material fresado e a caracterização do ligante antigo. Muitas vezes existe a necessidade de adição de novos agregados, para correcção granulométrica, ou de aditivos de regeneração, para repor no ligante envelhecido as componentes mais leves entretanto perdidas.

O estudo da formulação da mistura e da taxa de reciclagem é também uma etapa desta fase. A taxa de reciclagem (TR), também designada como taxa de incorporação, ou percentagem de reciclagem diz respeito à percentagem de material fresado que é incorporado na nova mistura betuminosa, ou seja, a proporção de material reciclado.

A taxa de reciclagem (TR) expressa em percentagem, corresponde à relação entre a massa total do material fresado (mt_F) e a massa total da mistura reciclada (mt_R) (Costa – Baptista, 2006).

$$TR = \frac{mt_F}{mt_R} \times 100\% \quad [3.1]$$

É importante proceder-se ao estudo da taxa de reciclagem, pois esta tem limites em função do tipo de reciclagem.

É também comum, definir-se a taxa de reciclagem de agregado (TRa) que diz respeito à massa de agregado do material fresado (ma_F) relativamente à massa de agregado da mistura reciclada (ma_R). A taxa de reciclagem de betume (TRb), diz respeito à proporção entre a massa de betume envelhecido (mb_F) e a massa de ligante total da mistura reciclada (mb_R).

$$TRa = \frac{ma_F}{ma_R} \times 100\% \quad [3.2]$$

$$TRb = \frac{mb_F}{mb_R} \times 100\% \quad [3.3]$$

Por fim, na terceira fase temos a elaboração do projecto de execução do pavimento reabilitado, onde devem constar todas as zonas do mesmo que não podem ser alvo do processo de reciclagem, nomeadamente, por questões relacionadas com deficiência do material. Nesse caso, o material deverá ser removido e transportado a vazadouro. Podem também ocorrer situações em que é aprovada a reutilização de material fresado proveniente de outros pavimentos no pavimento a reabilitar.

O projecto de execução deve também definir as profundidades de reciclagem, bem como a constituição e espessura das novas camadas recicladas.

Fundamental para o sucesso do processo de reciclagem, é também o equipamento de reciclagem. Para as operações de fresagem e reciclagem, serão utilizados dispositivos mecânicos, que podem ser independentes e efectuar cada um deles, uma determinada operação (fresagem, dosificação, distribuição do ligante, mistura, espalhamento da mistura), ou dispositivos que efectuam duas ou mais operações em simultâneo.

Actualmente existem máquinas denominadas de recicladoras, como se pode observar na Figura 3.3, equipadas com um rotor dentado, que lhes permite fresar o pavimento antigo em profundidade (que podem atingir os 50cm e com uma largura de trabalho que frequentemente ultrapassa os 2m). Estas máquinas possuem um misturador, onde é efectuada a mistura do material fresado com o novo ligante e eventualmente água se necessário procedendo em seguida ao espalhamento e nivelamento da mistura.



Figura 3.3 – Máquina recicladora (Wirtgen, 2009)

Já na fase de execução, mas ainda antes do início da reciclagem propriamente dita, a superfície deverá ser tratada, procedendo-se para tal às seguintes operações (Azevedo, 2009b):

- Limpeza e remoção de materiais estranhos existentes em toda a largura do pavimento;
- Tratamento e/ou eliminação de zonas muito contaminadas que possam não cumprir as especificações mínimas para serem recicladas.

3.2 Local de Reciclagem

Existem várias técnicas de reciclagem de pavimentos, que se distinguem essencialmente devido ao local onde se dá o processo de reciclagem (Figura 3.4). Assim, pode ser definido logo à partida dois tipos de reciclagem, reciclagem *in situ* e reciclagem em central. Neste âmbito tem influência o aspecto relacionado com o transporte do material entre a obra e a central, com os respectivos impactes, quer para os utentes (perturbação das condições de circulação), quer para os pavimentos existentes (maior agressividade do tráfego pesado em obra).

Importa por isso identificar quais as vantagens e desvantagens que decorrem do processo de reciclagem quando realizado *in situ* ou em central, para que quando aplicado, o processo seja uma solução vantajosa em termos económicos, técnicos e ambientais.



Figura 3.4 – Classificação da técnica de reciclagem de acordo com o local de reciclagem

A reciclagem *in situ* tem a vantagem de não necessitar de transporte e armazenamento, que a torna mais económica em relação à reciclagem em central. No entanto, em central, a vantagem é a de obter as misturas com mais qualidade, mas com custos mais elevados (Azevedo *et al.*, 2003).

3.2.1 Reciclagem *In Situ*

A reciclagem *in situ* consiste essencialmente em fresar o pavimento existente numa espessura pré-determinada, com o objectivo de no mesmo sítio misturar o material resultante do antigo pavimento, com um ou vários ligantes. De seguida esta mistura é colocada e compactada, assegurando a espessura desejada para a camada. Assim, o material da construção inicial, que antes estava degradado, é reciclado e reutilizado numa nova camada do pavimento, conferindo-lhe uma maior resistência mecânica.

Para a reciclagem *in situ* podem referir-se as seguintes vantagens (Picado - Santos *et al.*, 2008):

- Evita o transporte dos materiais fresados para outro local;
- Reduz a degradação dos pavimentos das estradas utilizadas pela obra;
- Dispensa os depósitos provisórios;
- O tempo de execução do processo é menor;
- Aproveita na íntegra todos os materiais existentes no pavimento;
- O investimento total em equipamentos é inferior ao processo em central;
- Em alguns casos terá menores consumos energéticos.

Mas a reciclagem *in situ* também apresenta algumas desvantagens, embora algumas possam ser atenuadas (Picado - Santos *et al.*, 2008):

- As condições locais de execução podem afectar a qualidade do trabalho;
- Este processo está mais dependente das condições meteorológicas;
- A heterogeneidade das camadas existentes prejudica o rigor das fórmulas de trabalho;
- Alguns equipamentos mais complexos estão sujeitos a avarias no local.

Segundo Fonseca (2002) a reciclagem *in situ* é uma técnica que respeita o meio ambiente e que ao mesmo tempo consegue ser económica porque reutiliza todos os materiais. Na verdade trata-se de uma técnica que permite alcançar taxas de reciclagem de 100%.

Em Portugal, a técnica de reciclagem *in situ* mais conhecida é a técnica a frio, no entanto, também existe a possibilidade de efectuar reciclagem *in situ* a quente de um pavimento, não

com o intuito de melhorar as características estruturais do pavimento, mas sim para melhorar as características funcionais como se encontra mencionado no Ponto 4.2.

Por se tratar de uma técnica efectuada no próprio local da obra, a técnica *in situ* apresenta uma maior sensibilidade a factores externos, nomeadamente no que diz respeito à granulometria dos agregados e a factores climáticos, uma vez que não é tão fácil controlar estes factores como acontece no processo em central.

3.2.2 Reciclagem em Central

Nas técnicas de reciclagem em central, o material a reciclar, proveniente da fresagem é transportado para a central, sendo posteriormente incorporado na produção das misturas betuminosas, as quais podem ser aplicadas no local de proveniência do próprio material fresado ou noutras obras. Assim, a principal desvantagem associada a este processo deriva do custo adicional de transporte do material a reciclar, do local da obra para a central e desta novamente para o local da obra.

No entanto, a reciclagem em central apresenta uma maior qualidade e fiabilidade do produto final obtido. O facto de se tratar de um local fixo, facilita a recepção e o aprovisionamento dos ligantes e eventuais materiais correctivos, permite uma melhoria na qualidade das misturas obtidas, que não são afectadas pelas condições locais de execução, nem pelas condições climáticas e um rigor sempre idêntico ao longo de toda a obra.

Desta forma, as questões relacionadas com o custo associado ao transporte do material até à central poderão ser compensadas com uma qualidade superior da mistura obtida.

O fabrico de misturas betuminosas recicladas em central é feito nas mesmas centrais de produção de misturas betuminosas convencionais. No entanto, estas mesmas centrais de produção de misturas betuminosas devem estar preparadas para receber e tratar o material fresado, proveniente de pavimentos antigos.

Existem dois tipos distintos de funcionamento das centrais (Figura 3.5): centrais contínuas e centrais descontínuas.

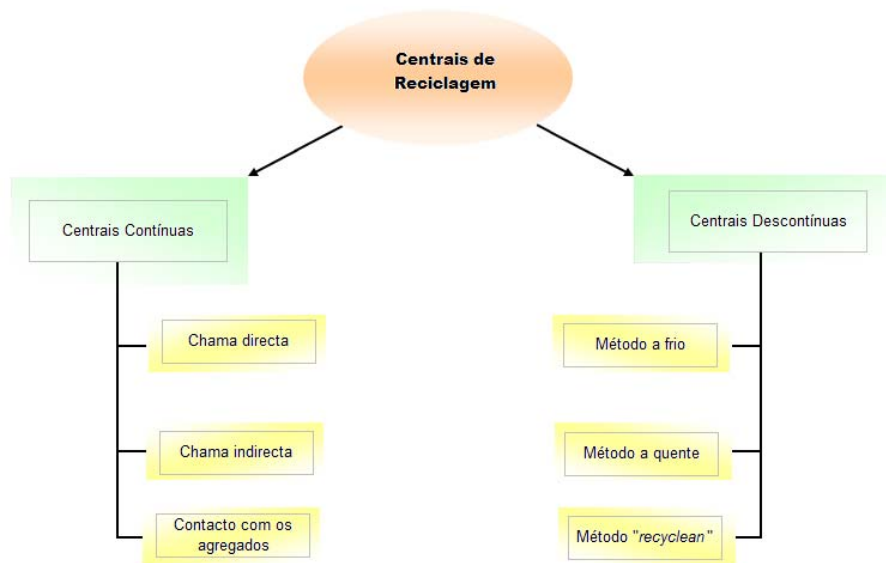


Figura 3.5 – Centrais de produção das misturas betuminosas recicladas

Nas centrais contínuas, também designadas de centrais de tambor secador misturador, a mistura do material fresado proveniente do pavimento antigo com os agregados novos é feita no mesmo tambor utilizado para o aquecimento e secagem desses mesmos agregados, enquanto nas centrais descontínuas, a mistura do material fresado com os agregados novos é feita numa unidade específica para que tal aconteça, denominada de misturador.

As centrais contínuas permitem a incorporação de 10 a 50 % de material a reciclar. Por sua vez, nas centrais descontínuas as taxas de incorporação de material fresado podem chegar aos 70%. Assim, pode dizer-se que em função do tipo de central escolhido para o fabrico das misturas betuminosas recicladas, teremos diferentes percentagens de incorporação de material fresado nessas novas misturas recicladas.

3.2.2.1 Centrais Contínuas

Nas centrais contínuas (Figura 3.6) existem três formas diferentes de aquecer o material fresado, no tambor secador misturador, antes de este ser adicionado ao betume. O material pode ser aquecido por chama directa, por chama indirecta, ou através do contacto com os agregados sobreaquecidos.

Actualmente, a concepção mais utilizada de centrais contínuas utilizam ambos os princípios de aquecimento por chama directa e por contacto directo com os agregados sobreaquecidos.

Neste tipo de centrais contínuas, de tambor secador misturador, as misturas betuminosas a reciclar são, após processamento, introduzidas na zona central do tambor (Azevedo, 2009b).

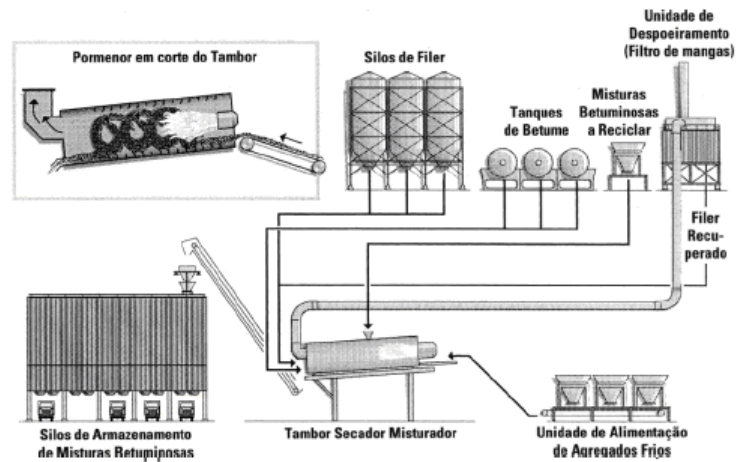


Figura 3.6 – Esquema de funcionamento de uma central betuminosa contínua adaptada para o fabrico de misturas betuminosas com incorporação de material fresado (Azevedo, 2009b)

3.2.2.2 Centrais Descontínuas

Para as centrais betuminosas descontínuas (Figura 3.7) existem várias formas distintas de incorporação do material fresado: pelo método a frio, a quente, ou pelo método *Recyclelean* (reciclagem limpa).

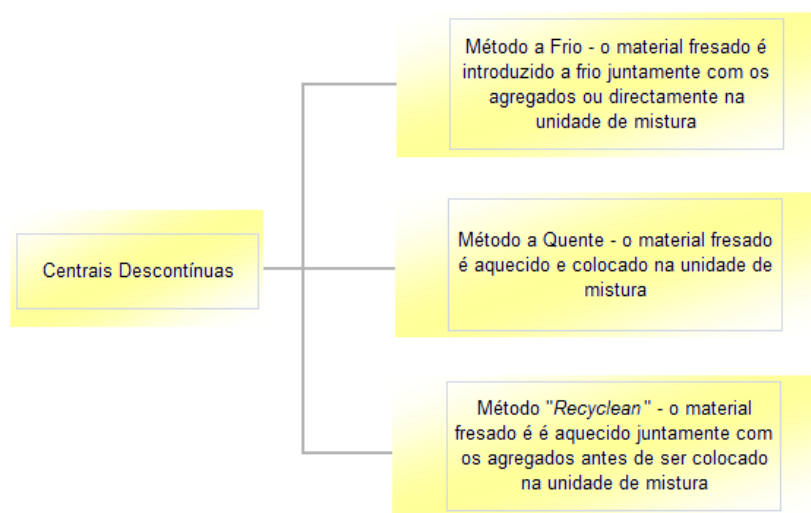


Figura 3.7 – Método de adição do material fresado nas centrais descontínuas

Nos métodos a frio (Figura 3.8) a introdução das misturas betuminosas a reciclar é feita quer na altura da descarga do secador para o elevador de agregados quentes, sendo o material aquecido pelo contacto com os novos agregados sobreaquecidos antes de entrar para o misturador, quer directamente para o misturador. No misturador é adicionada à mistura a quantidade adequada de betume novo, de acordo com as propriedades pretendidas para a mistura betuminosa. É importante evitar aquecimentos excessivos dos novos constituintes adicionados (Azevedo, 2009b).

Pelo método a quente (Figura 3.9), o material a reciclar é pré-aquecido num secador paralelo suplementar (tambor tandem), e só depois é que é aquecido e seco no segundo tambor, sendo posteriormente transferido para o misturador através de um silo pré-doseador.

Outra possibilidade é complementar-se a central descontínua de fabrico das misturas betuminosas, com a instalação de outro tambor secador destinado ao aquecimento, em separado, das misturas betuminosas fresadas. Este sistema permite a reciclagem de grandes quantidades de material fresado, em geral, até percentagens da ordem de 70% (Batista, 2004).

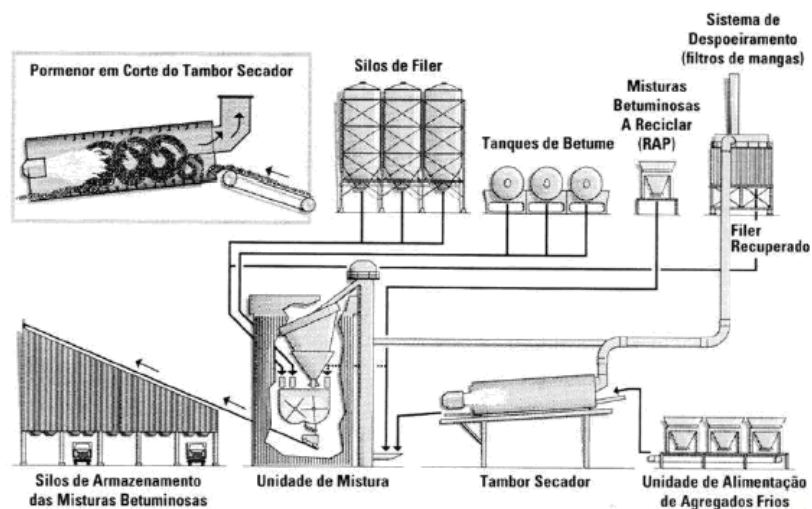


Figura 3.8 – Esquema de funcionamento de uma central betuminosa descontínua com incorporação do material fresado a frio (Azevedo, 2009b)

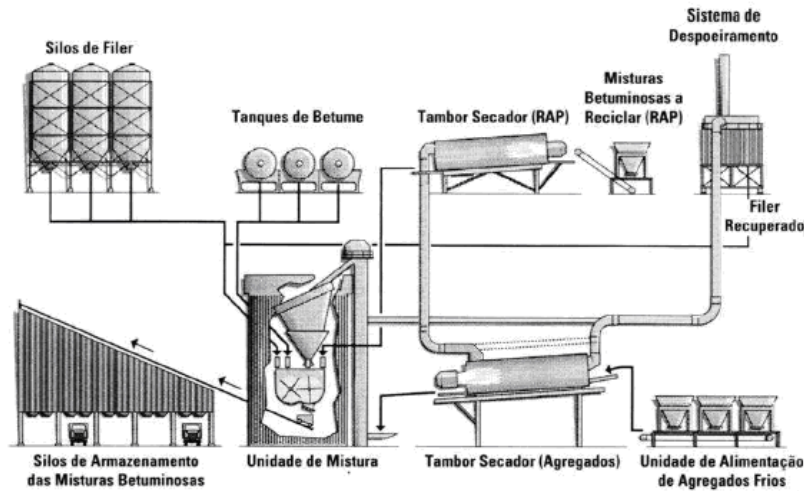


Figura 3.9 – Esquema de funcionamento de uma central betuminosa descontínua com incorporação do material fresado a quente (Azevedo, 2009b)

Existe ainda o método *Recyclean* (Figura 3.10), que é outra variante das centrais descontínuas. Neste método, o material fresado é inserido no tambor secador através de um anel, numa zona colocada atrás da chama para que esse mesmo material não entre em contacto directo com a chama, evitando assim o sobreaquecimento do material. O material fresado é então aquecido através do contacto com os agregados já quentes.

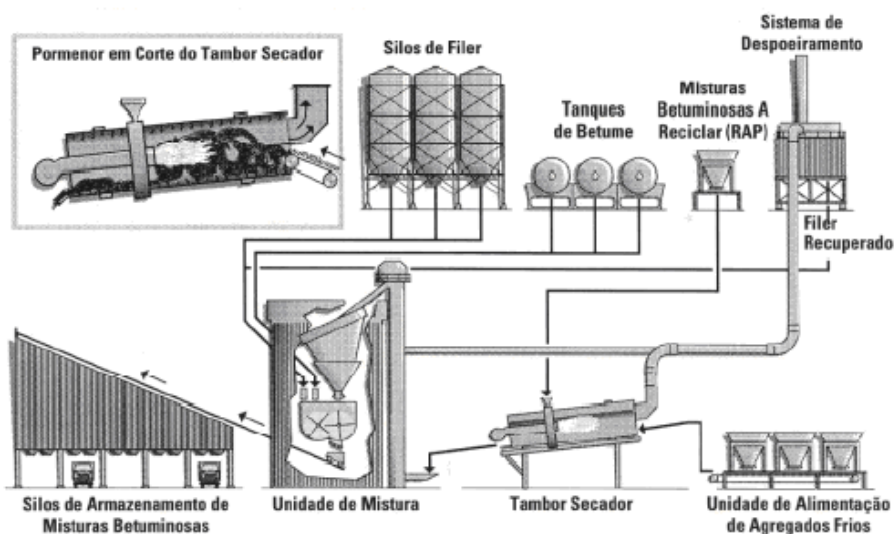


Figura 3.10 – Esquema de funcionamento de uma central betuminosa descontínua com incorporação do material fresado pelo método *Recyclean* (Azevedo, 2009b)

No caso do método a frio conseguem-se percentagens de reciclagem entre 10 a 30%. A menor ou maior taxa de reciclagem neste caso está dependente de vários factores, nomeadamente, teor em água dos materiais a reciclar e qualidade da mistura betuminosa fresada em relação às especificações impostas para a nova mistura betuminosa. No caso dos métodos a quente e *Recyclean*, dado que o material fresado é aquecido, conseguem-se taxas de incorporação de material fresado mais elevadas, respectivamente de 70% e 40%.

No Quadro 3.1 são apresentadas as percentagens máximas de incorporação de material fresado nas novas misturas betuminosas função do tipo de central e do método de adição do material.

Quadro 3.1 – Percentagem de reciclagem função do método de adição do material
(Adaptado de Azevedo, 2009b)

Método de Adição do Material		% de Reciclagem
Centrais Descontínuas	Método a Frio	10% a 30%
	Método a Quente	70%
	Método <i>Recyclean</i>	40%
Centrais Contínuas		10% a 50%

Verifica-se que a quantidade de misturas betuminosas fresadas de pavimentos antigos é cada vez maior, existindo uma tendência crescente para a reciclagem destes materiais. Com objectivo de se incorporarem nas misturas betuminosas, cada vez maiores percentagens de materiais fresados, têm vindo a ser desenvolvidos equipamentos mais sofisticados para este efeito, nomeadamente, tambores secadores com sistemas mais complexos de funcionamento (Batista, 2004).

3.3 Considerações sobre a Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis

A técnica de reciclagem surge como mais uma alternativa para a reabilitação de pavimentos flexíveis degradados. De um modo geral, a utilização da técnica de reciclagem apresenta benefícios ao nível económico, ambiental, técnico e de desempenho, factores a ter em consideração na selecção da solução de reabilitação de um pavimento.

Não existe apenas uma técnica única de reciclagem de pavimentos, mas sim várias, que derivam fundamentalmente do local onde se realiza o processo, nomeadamente as técnicas de reciclagem *in situ* ou em central.

As técnicas *in situ* têm a vantagem de evitar o transporte do material fresado e de se poder aproveitar na totalidade o material fresado proveniente do pavimento degradado. Por outro lado, as técnicas em central apresentam maiores custos económicos decorrentes da necessidade de transportar o material até à central de reciclagem, mas como contrapartida apresentam misturas betuminosas com elevada qualidade e maior fiabilidade.

No caso das técnicas em central, foi ainda possível concluir, que consoante o método de adição do material fresado à nova mistura, assim origina diferentes percentagens de incorporação de material fresado. Para centrais descontínuas a percentagem máxima de adição de material fresado é de 70%, enquanto para centrais contínuas a percentagem máxima é de 50%.

4 Diferentes Tipos de Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis

Para além do local onde se realiza o processo de reciclagem, existem ainda diferentes alternativas no que diz respeito à temperatura de reciclagem e ao tipo de ligante utilizado no processo. No Quadro 4.1 apresentam-se as várias possibilidades de reciclagem, de acordo com a variável em análise (local de reciclagem, temperatura e ligante utilizado).

Quadro 4.1 – Classificação dos tipos de reciclagem (Adaptado de Fonseca, 2002)

Técnicas de Reciclagem	
Local de reciclagem	"in situ" (no próprio pavimento)
	em central
Temperatura de reciclagem	a frio
	a quente
	semi-quente
Ligante utilizado	cimento
	emulsão betuminosa
	espuma de betume
	cimento com emulsão

Como resultado das diferentes variáveis que interferem no processo de reciclagem, assim temos diferentes tipos de reciclagem (Figura 4.1), que permitem a reabilitação de um pavimento flexível.

Independentemente do tipo de reciclagem a utilizar, existe sempre a necessidade de se realizarem estudos preliminares, os quais deverão ser acompanhados pela execução de um trecho experimental, em que são considerados aspectos relativos à espessura aproximada da intervenção, materiais a reciclar e a previsão da evolução do seu comportamento ao longo do tempo, a formulação da mistura final a utilizar, de modo a aferir quais as melhores soluções para a reabilitação do pavimento degradado.

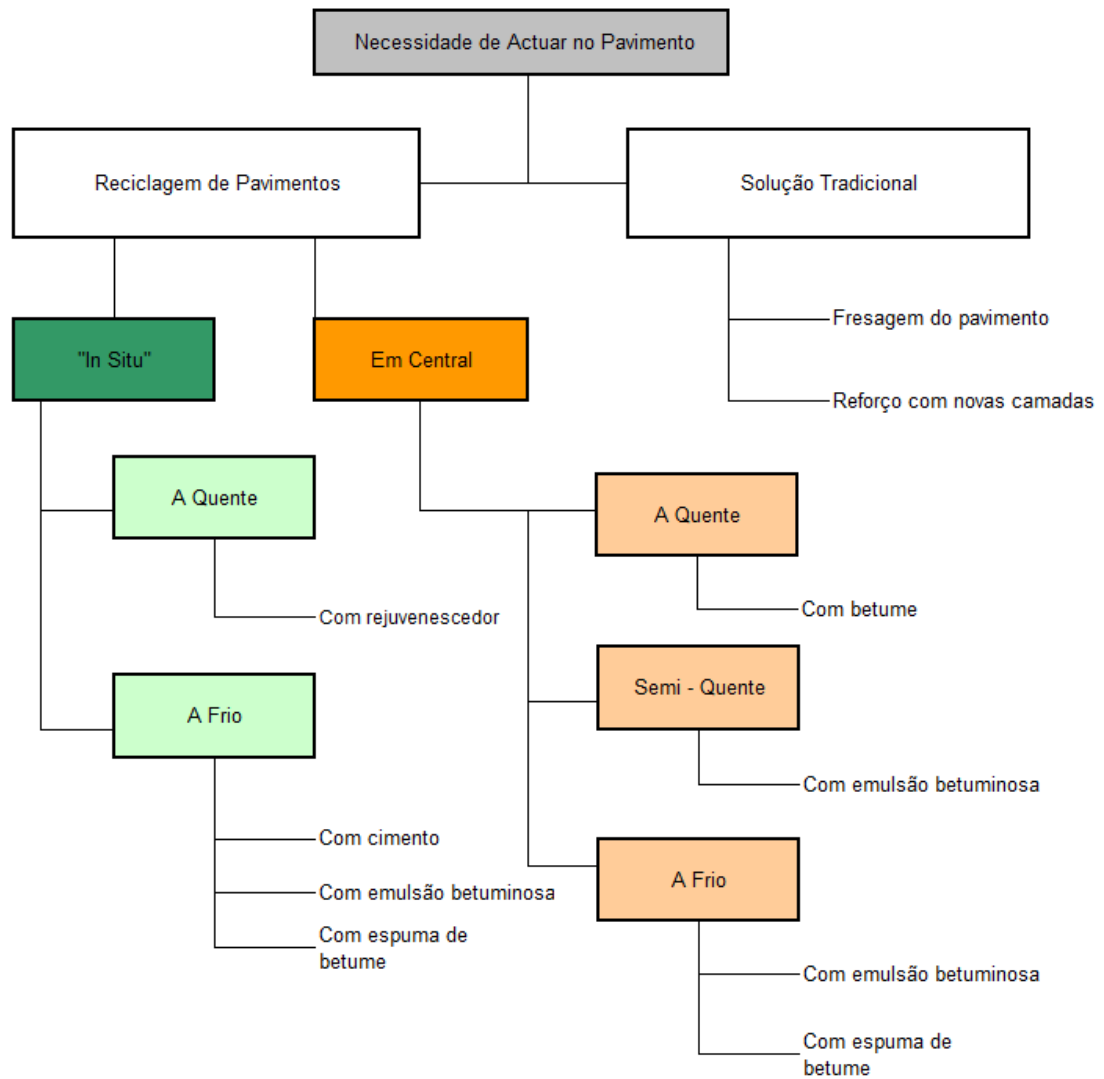


Figura 4.1 – Tipos de reciclagem de pavimentos flexíveis (Adaptado de Pereira & Moreira,2007)

Seguidamente será estudada cada um dos diferentes tipos de reciclagem, que derivam da combinação da escolha do local de reciclagem com a temperatura de reciclagem e com o ligante utilizado no processo.

4.1 Reciclagem In Situ a Frio

Na reciclagem *in situ* a frio, as camadas degradadas do pavimento são fresadas, de modo a serem reduzidas a dimensões apropriadas, para depois serem misturadas a frio com um aglutinante, no próprio local da obra.

De acordo com o USDD (2001), este tipo de reciclagem permite que os materiais provenientes do antigo pavimento, possam ser novamente utilizados numa camada de base do novo pavimento reabilitado.

Uma vez que se trata de uma técnica a frio, os consumos de energia são menores quando comparados com as técnicas a quente, por não haver a necessidade de aquecer o material. A reciclagem *in situ* a frio apresenta também menores níveis de emissão de gases tóxicos para a atmosfera quando comparada com uma solução tradicional de reabilitação de um pavimento.

De acordo com o estudo apresentado por Alkins *et al.* (2008), que compara a quantidade de dióxido de carbono libertado num processo de reabilitação de um pavimento por métodos tradicionais, com um processo de reabilitação que implicou a reciclagem *in situ* a frio de um pavimento, foi possível concluir que a quantidade de gases emitidos é cerca de metade para a solução que contempla a reciclagem do pavimento degradado (Figura 4.2).

Para analisar a quantidade de CO₂ libertado, foi utilizado um modelo computacional – PaLATE (*Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economics*), que comparou uma solução tradicional de reabilitação com a técnica de reciclagem *in situ* a frio. Foi analisado um troço com a extensão de 1 km com secção transversal de 7,5m, numa profundidade de 15cm.

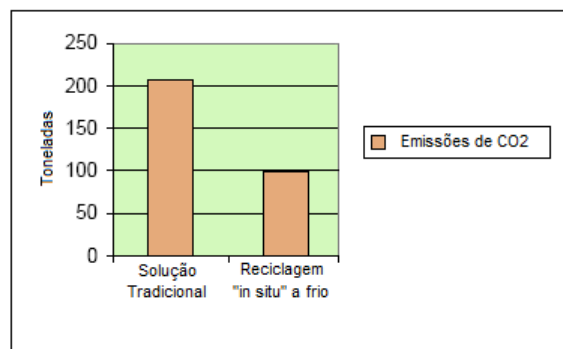


Figura 4.2 – Quantidade de CO₂ libertado de acordo com método de reabilitação (Adaptado de Alkins *et al.*, 2008)

Os resultados obtidos, indicam claramente uma menor quantidade de CO₂ libertado para a atmosfera quando utilizada a solução que implica a reciclagem *in situ* a frio do pavimento.

Neste tipo de reciclagem, à semelhança do que acontece com os outros, e tal como se viu no Ponto 3.1, em primeiro lugar há que verificar as condições do pavimento, e se este se encontra

em condições de ser alvo do processo de reciclagem. Caso o pavimento cumpra as condições, procede-se à fase de estudo dos materiais que constituem o pavimento e à obtenção de uma fórmula de trabalho para cada um dos trechos com características diferentes.

Já na fase de execução, os equipamentos necessários à realização da técnica de reciclagem *in situ* a frio são no mínimo uma máquina recicladora, cisternas para água e ligantes, motoniveladora e cilindros, os quais formam um comboio, frequentemente denominado por “comboio de reciclagem”, tal como se mostra na Figura 4.3.



Figura 4.3 – “Comboio” de reciclagem (Wirtgen, 2009)

A fase de execução tem início com a passagem em primeiro lugar da máquina recicladora. A máquina recicladora procede de forma contínua à desagregação do pavimento existente, à adição de água e do ligante através de injectores existentes no rotor da máquina (Figura 4.4), à mistura do material, e finalmente ao seu espalhamento. Se na fórmula de trabalho ficou estabelecido que seria necessário material correctivo, nomeadamente agregados, estes devem ser colocados sobre o pavimento antes da passagem da máquina recicladora, para que quando esta passe se proceda às correcções estabelecidas.



Figura 4.4 – Rotor de uma máquina recicladora (Wirtgen, 2009)

De forma a garantir a homogeneidade da camada reciclada, a máquina recicladora deverá avançar a uma velocidade lenta e uniforme, evitando-se paragens. Quando tal for imprescindível, deverá cortar-se de imediato o fornecimento de ligante e água para evitar sobredosagens ou encharcamentos (Azevedo, 2009b).

O avanço da recicladora está muito condicionado pelas características dos materiais existentes e pela profundidade em causa no processo de reciclagem.

Se a reciclagem for feita por faixas, estas devem sobrepor-se, com uma sobreposição mínima de 15cm, tendo o cuidado de desligar os injectores da máquina recicladora nesse comprimento de sobreposição aquando da primeira passagem da máquina, de forma a evitar a sobredosagem de ligante.

Depois de colocada a mistura, segue-se a compactação da camada reciclada que de acordo com Nunes *et al.* (2005) deverá ser primeiramente com um cilindro de rolo vibrante e de seguida com cilindro de pneus, e deverá ter início logo após a passagem da máquina recicladora.

Uma compactação final energética é fundamental para obter a resistência necessária e um bom comportamento do pavimento reciclado, pelo que deve alcançar-se a maior densidade possível, sendo recomendado atingir-se no mínimo 90% do Proctor modificado. Uma pequena variação na densidade, por exemplo 5%, traduz-se numa grande variação das resistências mecânicas, que pode significar uma redução da ordem dos 25%. (Paul & Simões, 2003).

A compactação executar-se-á longitudinalmente de forma contínua e sistemática, até se atingir o grau de compactação pretendido. Se a reciclagem se realizar por faixas paralelas os cilindros deverão sobrepor-se na faixa adjacente em pelo menos 15cm. Se forem utilizados dois

equipamentos de reciclagem em paralelo compactar-se-á a toda a largura abrangida pelas duas máquinas (Azevedo, 2009b).

Deve também proceder-se ao nivelamento da camada reciclada, utilizando para tal uma motoniveladora, uma vez que o volume de materiais tratados, após a reciclagem é superior ao inicial, tanto pela quantidade de água e ligante adicionados, bem como pelo empolamento que resulta do processo de desagregação das camadas muito densificadas do pavimento antigo depois de vários anos a suportar a acção do tráfego.

A reciclagem *in situ* a frio permite a utilização de diversos ligantes: cimento, emulsão betuminosa e espuma de betume. Dependendo do ligante utilizado, a camada de base reciclada apresentará determinadas características estruturais.

O processo de reciclagem *in situ* terá sempre de ser complementado com a colocação de camadas superiores em misturas betuminosas fabricadas a quente em central, de modo a dotar o pavimento das características superficiais necessárias à circulação do tráfego, daí que este tipo de reciclagem, para além de reabilitar estruturalmente o pavimento, possibilite também a melhoria das características superficiais.

4.1.1 Reciclagem *In Situ* a Frio com Cimento

Na actualidade, a reciclagem *in situ* com cimento é uma técnica largamente utilizada em países como, Estados Unidos, Austrália, Alemanha, Espanha e França. Em Portugal já foram realizadas algumas obras de reabilitação utilizando esta técnica. Inicialmente esta técnica era utilizada em vias com baixa intensidade de tráfego. No entanto, como resultado da ampla experiência entretanto adquirida, actualmente já é aplicada em estradas com um importante volume de veículos pesados (Gomes, 2005).

A utilização do cimento permite um grande aumento na capacidade de suporte do pavimento, sem que para isso seja necessário recorrer a uma camada com elevada espessura. A reciclagem *in situ* a frio com cimento é indicada para situações em que o pavimento a reabilitar apresenta degradações com elevada extensão, ou em casos em que existem restrições de subida de cota do pavimento.

A camada reciclada *in situ* a frio com cimento acaba por constituir segundo Picado-Santos *et al.* (2008) uma camada do tipo agregado de granulometria extensa tratado com cimento e apresenta resistência muito mais elevada que a anterior, passando a estrutura final a ser idêntica a um pavimento semi-rígido (Figura 4.5).

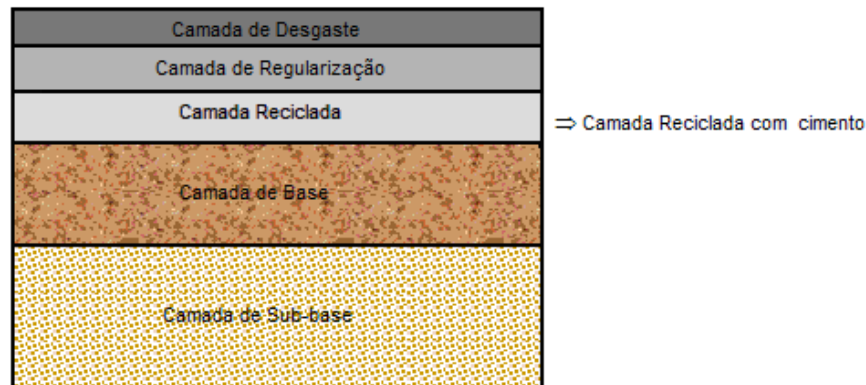


Figura 4.5 – Estrutura de um pavimento reciclado *in situ* a frio com cimento

Os valores da dosagem de cimento utilizados habitualmente variam em função do tipo de material fresado e do tipo de cimento utilizado, sendo o mínimo de dosagem de 4%. No entanto, de forma a garantir-se uma quantidade efectiva de 4% e atendendo a perdas e deficiências na aplicação, homogeneidade do material existente, ou deficiências na compactação é comum especificarem-se valores mínimos de 6% de cimento. Segundo Fonseca (2002) deverá utilizar-se um cimento com classe de resistência média 32,5 MPa. Cimentos de classe superior (42,5MPa) só devem ser utilizados sob condições especiais, por exemplo em situações de baixas temperaturas.

Na fase de execução deste tipo de reciclagem, a sequência construtiva é idêntica à já referida para a técnica *in situ* a frio. No entanto, quando a reciclagem *in situ* a frio utiliza como ligante o cimento, deverá ser acoplado à recicladora uma misturadora (Figura 4.6).



Figura 4.6 – Conjunto recicladora e misturadora (Wirtgen, 2009)

A misturadora (Figura 4.7) é uma unidade com capacidade para armazenar água, cimento e aditivos (se necessário), onde é fabricada a calda de água e cimento que depois será bombeada para os injectores existentes no rotor da recicladora. O cimento deverá ficar disperso na mistura de forma homogênea, que por sua vez, deverá apresentar uma cor uniforme.

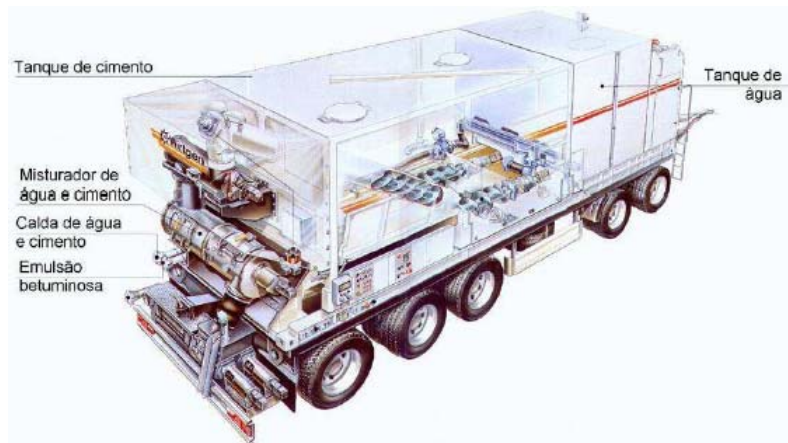


Figura 4.7 – Esquema de uma misturadora (Adaptado de Wirtgen, 2009)

Depois de colocada a mistura pela máquina recicladora procede-se à compactação da camada. A sequência construtiva da reciclagem *in situ* a frio com cimento encontra-se na Figura 4.8.

Após a realização da operação de compactação da camada reciclada, deverá proceder-se ao tratamento de cura da camada reciclada, de modo a proteger o material tratado do tráfego e das condições climáticas. Segundo Azevedo (2009b) não deverá circular qualquer tipo de trânsito sobre a camada durante um período de 7 dias.



Figura 4.8 – Fases da reciclagem *in situ* a frio com cimento (Costa-Baptista, 2006)

A mais-valia da utilização do cimento como ligante na reciclagem *in situ* resulta na obtenção de uma camada reciclada com elevadas características de resistência, sem que para isso seja necessário recorrer a uma camada com elevada espessura. De acordo com Fonseca

(2002) a utilização do cimento permite a obtenção de uma camada reciclada com módulos de deformabilidade que variam entre 5000MPa e 10000MPa, em função do tipo de material reciclado e da compactação da camada. Como se verá, estes valores são muito superiores àqueles que se verificam para a reciclagem *in situ* a frio em que são utilizados outros ligantes.

4.1.2 Reciclagem *In Situ* a Frio com Emulsão Betuminosa

As emulsões betuminosas podem ser definidas como dispersões, relativamente estáveis, de gotículas de betume convencional (fase dispersa ou descontínua) em água – meio emulsionante (fase contínua). Temos assim um sistema heterogéneo, comportando duas fases líquidas não miscíveis, onde uma das fases se encontra dispersa dentro de outra fase sob a forma de finas gotículas com dimensões entre 0,1 e 5 microns de diâmetro.

Em função da carga das partículas do betume, existem dois tipos de emulsões betuminosas, as aniónicas (carga negativa) e as catiónicas (carga positiva). Em termos de rapidez de rotura das emulsões betuminosas podemos ter rotura rápida, média ou lenta e podemos ainda caracterizar as emulsões em função da sua viscosidade, baixa, média ou alta. Segundo Fonseca (2002) as emulsões mais utilizadas na reciclagem são as catiónicas de rotura lenta, as quais proporcionam um correcto envolvimento com os agregados que resultam do processo de fresagem do pavimento antigo e permitem que o espalhamento da mistura se faça antes da rotura da emulsão.

É importante garantir uma boa afinidade entre a emulsão escolhida e o material a tratar, para que no futuro a camada reciclada não apresente anomalias que comprometam o sucesso da reciclagem, daí a importância fundamental de se realizar um trecho experimental, onde é possível testar a adesividade entre a emulsão betuminosa escolhida e o material reciclado, bem como as percentagens de emulsão betuminosa a utilizar. O trecho experimental permite ainda avaliar sobre a necessidade de se proceder à adição de material correctivo.

O valor da dosagem da emulsão betuminosa a utilizar depende da percentagem de betume e da percentagem de finos existente no material reciclado, por serem estes os que apresentam maiores problemas de envolvimento com este tipo de ligante. De acordo com Lewis & Collings. (1999) usualmente utilizam-se percentagens de emulsão de cerca de 5% do peso do material a reciclar, no entanto esta percentagem pode ser reduzida para valores até 3%, em função da percentagem de betume na mistura reciclada.

Este tipo de reciclagem visa sobretudo recuperar camadas de desgaste envelhecidas em pavimentos com valor estrutural adequado às condições de tráfego, abrangendo regra geral a espessura da camada de desgaste, acrescida de 3cm de forma a englobar a interface com a camada adjacente, que seria seriamente afectada pela violenta operação de fresagem (Picado – Santos *et al.*, 2008).

Como se pode observar na Figura 4.9, a sequência construtiva da técnica de reciclagem *in situ* a frio com emulsão é semelhante à da técnica com cimento. Também são utilizados “comboios” constituídos por uma máquina recicladora, à qual é acoplada desta vez, uma cisterna para água e outra para emulsão (Figura 4.10). A máquina recicladora procede à mistura da emulsão betuminosa com o material fresado e com a água, e ao espalhamento desta mesma mistura (Figura 4.11). Como o teor em emulsão betuminosa é relativamente baixo, existe a necessidade de adicionar água, especialmente se os agregados estiverem secos. De seguida procede-se à compactação da camada reciclada.

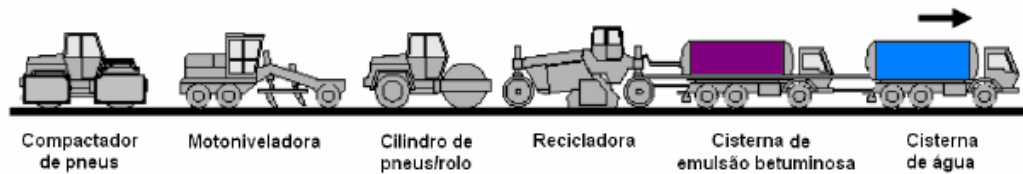


Figura 4.9 – Fases da reciclagem *in situ* a frio com emulsão betuminosa (Costa-Baptista, 2006)



Figura 4.10 – “Comboio” composto pela máquina recicladora, cisternas para água e emulsão betuminosa (Batista & Antunes, 2009)

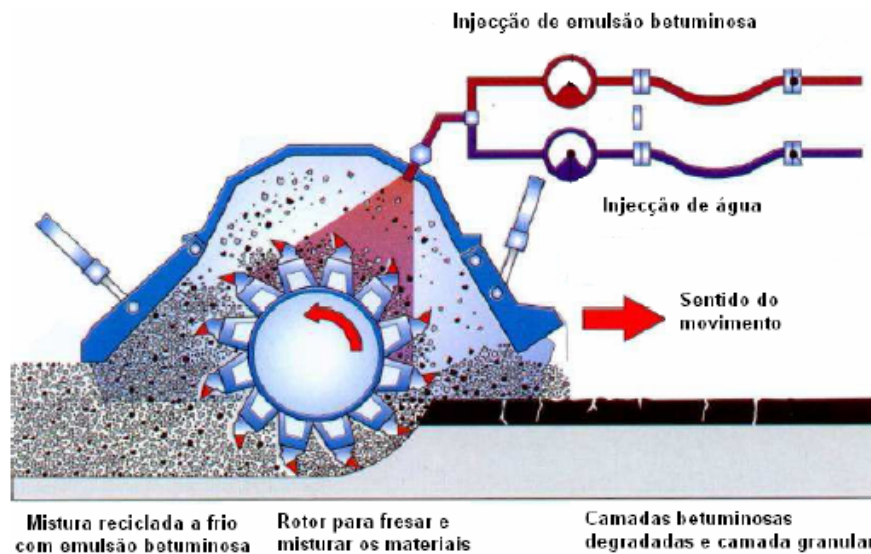


Figura 4.11 – Esquema de produção da mistura reciclada *in situ* com emulsão betuminosa (Costa-Baptista, 2006)

As espessuras das camadas a reciclar são geralmente de 12 a 15 cm. Não são aconselháveis espessuras superiores devido a problemas de cura da emulsão betuminosa, mas também devido ao aumento dos custos, uma vez que uma emulsão é mais cara que o cimento. Segundo Fonseca (2002) quando a espessura da camada a tratar ultrapassa os 12 cm é conveniente juntar uma pequena percentagem (entre 1% a 2%) de cimento.

A utilização do cimento em pequenas percentagens pode ter várias funções, nomeadamente facilitar ou acelerar a rotura da emulsão, reduzir a sensibilidade à água, especialmente com materiais argilosos ou contaminados ou aumentar a coesão do material resultante. Este tipo de reciclagem, que emprega dois tipos de ligantes (betuminosos e hidráulicos) é designado por reciclagem mista a frio.

A reciclagem *in situ* a frio com emulsão betuminosa permite a obtenção de uma camada que segundo Picado-Santos *et al.* (2008) é semelhante a um material de granulometria extensa tratado com emulsão e que de acordo com Fonseca (2002) permite alcançar módulos de deformabilidade de 2000MPa correspondentes a temperaturas entre os 20°C e os 25°C. No entanto estes valores dependem do tipo de material fresado (granulometria obtida e natureza dos materiais) e da quantidade de emulsão utilizada, podendo em alguns casos atingir valores da ordem de 5000MPa.

Segundo Batista (2004) a utilização deste tipo de misturas com recurso a uma emulsão betuminosa permite a obtenção de uma camada reciclada com maior flexibilidade, e que se adequa melhor, relativamente às camadas tratadas com cimento, quando aplicadas sobre suportes mais ou menos deformados ou relativamente fendilhados.

A utilização da emulsão betuminosa, obriga a um período inicial de cura, durante o qual a água vai sendo eliminada e a camada vai ganhando coesão e resistência. Só após este período de tempo é que a camada reciclada com emulsão betuminosa apresentará as características para que foi dimensionada. Daí que a utilização de uma emulsão betuminosa combinada com uma aplicação *in situ* resulte numa grande susceptibilidade da camada reciclada com este ligante às condições climáticas e à variação dos teores em água, pelo que os trabalhos de reciclagem *in situ* a frio com emulsão betuminosa devem ser realizados preferencialmente na Primavera ou no Verão, de modo a que o período de cura ocorra em situações mais favoráveis.

4.1.3 Reciclagem *In Situ* a Frio com Espuma de Betume

A reciclagem com espuma de betume é um processo de reabilitação de pavimentos que envolve a mistura de espuma de betume com o material proveniente da reciclagem do pavimento existente, produzindo um pavimento de alta qualidade, durável e flexível com um desempenho excepcional e resistente aos efeitos de climas extremos (Seixas, 2008).

O objectivo do fabrico da espuma de betume é a redução da viscosidade do betume possibilitando o envolvimento dos agregados, ou areias naturais e mesmo argilas com baixa plasticidade.

Este tipo de ligante é obtido quando se aquece o betume (a uma temperatura entre 180° C e 200° C) e se injecta em câmaras especiais, uma pequena quantidade de água fria (geralmente 1 a 2% do seu peso) e ar. A introdução de água e ar no betume quente faz com que este se expanda, aumentando até 30 vezes o seu volume inicial (Fonseca, 2002).

Esta expansão ocorre na designada câmara de expansão (Figura 4.12), a partir da qual a espuma de betume é injectada e misturada com o material do pavimento a reciclar. Nenhuma reacção química acontece, apenas as propriedades físicas do betume são temporariamente alteradas.

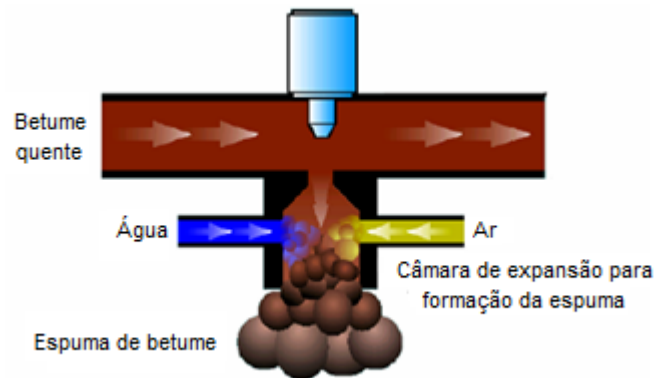


Figura 4.12 – Esquema de obtenção da espuma de betume (Adaptado de Wirtgen, 2001)

De acordo com Seixas (2008), a espuma de betume subsiste durante um período de 10 a 20 segundos, período durante o qual é feita a mistura com o material a reciclar. Enquanto espuma, não reveste completamente a superfície dos agregados, apenas envolve os finos formando uma argamassa, que efectivamente aglutina o material reciclado. A mistura betuminosa final passa a apresentar características particulares pelo uso da espuma de betume. Não apresenta cor preta, como é característica das misturas betuminosas.

Apesar de ser necessário o aquecimento do betume, este tipo de reciclagem não é considerada uma técnica a quente, uma vez que a mistura dos componentes (espuma de betume, material fresado e eventualmente aditivos), a colocação, e compactação da mistura são efectuadas à temperatura ambiente.

O equipamento necessário à reciclagem *in situ* a frio com espuma de betume, assim como o método construtivo são idênticos aos verificados para a técnica *in situ* a frio e já anteriormente referidos, no entanto, decorrente da utilização da espuma de betume, o “comboio de reciclagem” apresenta algumas alterações que implicam o acoplamento de uma cisterna de água e outra de betume à máquina recicladora (Figura 4.13).

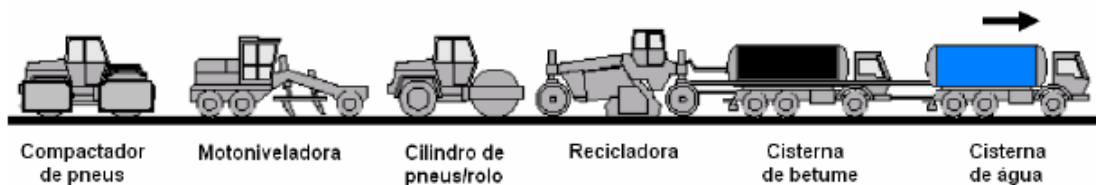


Figura 4.13 – Fases de reciclagem *in situ* a frio com espuma de betume (Costa-Baptista, 2006)

O betume quente é bombeado desde o tanque de betume até à recicladora, através de mangueiras providas para o efeito e injectado, juntamente com uma determinada quantidade de água, através da barra pulverizadora, localizada na proximidade do rolo misturador. A água, em contacto com o betume quente, provoca a expansão deste formando uma espuma de betume que se mistura com o material do pavimento (Figura 4.14). Seguem-se posteriormente as operações de nivelamento e compactação da camada (Seixas, 2008).

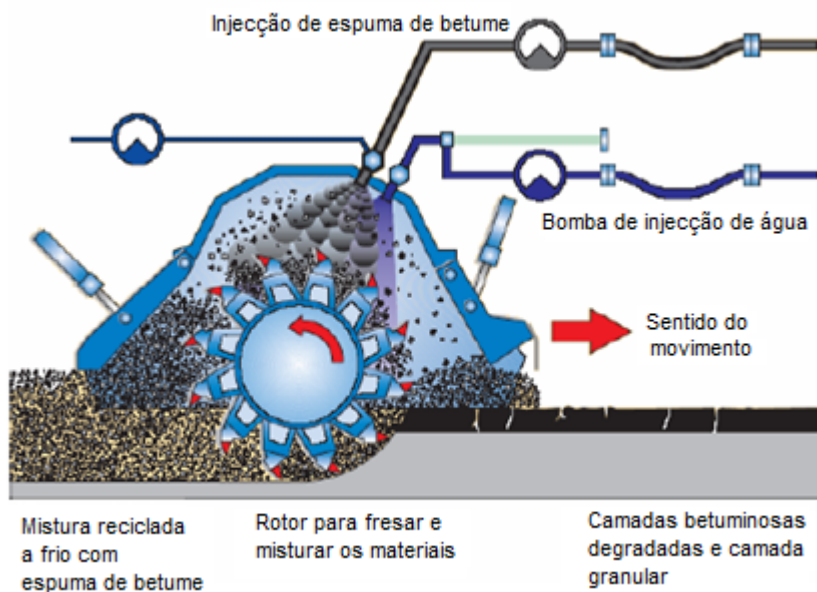


Figura 4.14 – Esquema de produção da mistura reciclada *in situ* a frio com espuma de betume (Costa –Baptista, 2006)

A dosagem deste tipo de ligante é de acordo com Lewis & Collings (1999) utilizado em percentagens que variam entre o 1,5% e 4%. Os valores máximos de dosagem são utilizados nos casos em que os materiais a tratar são essencialmente granulares, enquanto as dosagens mínimas são utilizadas em situações em que o material apresente elevada percentagem de betume. No entanto, trata-se de dosagens de ligante inferiores àquelas que se verificam para os outros tipos de reciclagem *in situ* a frio, o que leva a que as camadas tratadas com este tipo de reciclagem apresentem uma menor propensão para aparecimento de fendas por retracção.

Durante a fase de mistura, a temperatura ideal dos agregados deverá estar entre os 13°C e 23°C, dependendo do tipo de agregado a utilizar, enquanto a temperatura do betume deverá estar entre 180°C e 200°C. Por haver a necessidade de aquecer e manusear o betume a temperaturas elevadas, a reciclagem *in situ* a frio com espuma de betume envolve maiores perigos,

relativamente a outras técnicas *in situ* a frio, no que diz respeito à segurança dos trabalhadores em obra. Com estas temperaturas do betume há perigo de queimaduras graves, fogo e explosões.

Os módulos de deformabilidade para as camadas recicladas com espuma de betume conseguem valores que de acordo com Fonseca (2002) podem variar entre os 2000MPa e os 5000MPa, sendo o valor superior conseguido quando o material a tratar contém material betuminoso, e o valor inferior para situações em que o material a tratar apresente uma granulometria mais monogranular.

A reciclagem mostra ser uma boa alternativa técnica e económica às soluções tradicionais, nomeadamente no que respeita ao saneamento do pavimento existente e à execução de novas camadas (Vicente, 2006).

De acordo com Seixas (2008) o tratamento de pavimentos flexíveis degradados com recurso à técnica *in situ* a frio com espuma de betume permite a obtenção de uma nova camada estrutural resistente às deformações plásticas e durável, mesmo em situações de climas extremos.



Figura 4.15 – Reciclagem *in situ* a frio com espuma de betume (Seixas, 2008)

As perturbações do trânsito são mínimas. Segundo Seixas (2008) a reposição da circulação é imediata, podendo mesmo após a circulação proceder-se ao reperfilamento da via, sem qualquer inconveniente ou perda de resistência do material desde que se mantenha a percentagem de água utilizada na compactação.

4.2 Reciclagem In Situ a Quente

Este tipo de reciclagem difere da reciclagem *in situ* a frio, quanto à temperatura de reciclagem, tipo de ligante e equipamento principal de reciclagem.

Na verdade, a técnica de reciclagem *in situ* a quente, ao contrário de todos os outros tipos de reciclagem, não permite a reabilitação das características estruturais de pavimentos flexíveis degradados. Trata-se de uma técnica que permite apenas a reabilitação das características funcionais do pavimento ao nível da camada de desgaste, não podendo sequer ser utilizada em situações em que o pavimento apresente defeitos ao nível das camadas estruturais do pavimento. Pode, deste modo, considerar-se que esta é uma técnica de reabilitação das características funcionais dos pavimentos flexíveis.

De acordo com o USDD (2001), este tipo de reciclagem é utilizada para diminuir a permeabilidade do pavimento à água, melhorar as propriedades do ligante envelhecido e aumentar a resistência à derrapagem.

No que diz respeito ao ligante para a técnica de reciclagem *in situ* a quente é geralmente utilizado um produto rejuvenescedor, que comporta os componentes do betume que se perderam como consequência do seu envelhecimento, devolvendo ao betume as suas características (físicas e químicas) perdidas. Consoante a composição do betume envelhecido, teremos a composição do rejuvenescedor, uma vez que se trata de produtos feitos à medida para as circunstâncias concretas de cada projecto.

A reciclagem *in situ* a quente, envolve um “comboio” de equipamentos bastante complexos, sendo que um deles está munido de painéis radiantes, que no local elevam a temperatura da superfície do pavimento, facilitando assim, a desagregação do material superficial, por uma fresadora. O material depois de solto é então misturado de forma uniforme num aquecedor-misturador, com um produto rejuvenescedor e eventualmente material correctivo, nomeadamente agregados virgens ou aditivos, caso seja necessário. A mistura é espalhada por uma pavimentadora e compactada por equipamentos idênticos àqueles que são utilizados para a reciclagem *in situ* a frio. Na Figura 4.16 representam-se os equipamentos necessários e a sua sequência de intervenção neste tipo de reciclagem

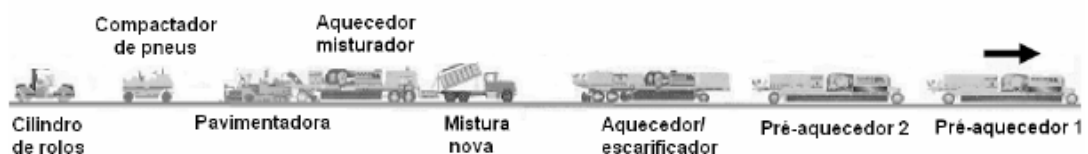


Figura 4.16 – Fases da reciclagem a quente *in situ* (Costa-Baptista, 2006)

O pavimento é aquecido através de um circuito de ar quente -até 600°C (Figura 4.17) o que, com ajuda de um sistema de infravermelhos que está sobreposto à camada a reciclar, permite que o pavimento atinja temperaturas de 150°C a 160°C numa espessura até 7cm. Seguidamente o pavimento quente é fresado, entrando posteriormente no misturador (Figura 4.18), onde se junta o agente rejuvenescedor. Seguidamente a mistura é colocada numa espalhadora de misturas (Figura 4.19) e compactada (Fonseca, 2002).

Segundo o USDD (2001), a qualidade das misturas betuminosas recicladas *in situ* a quente é difícil de controlar, por estar muito dependente de variados factores, nomeadamente, profundidade de reciclagem, tempo de exposição do pavimento aos pré-aquecedores, quantidade e natureza do produto rejuvenescedor e ainda do processo de compactação da camada reciclada.

A utilização da reciclagem *in situ* a quente está limitada a espessuras máximas da ordem dos 7 cm, uma vez que para se conseguirem temperaturas suficientemente elevadas em profundidade teríamos um aquecimento excessivo na superfície, que teria como consequência o envelhecimento do betume, precisamente o contrário daquilo que se pretende com a utilização deste tipo de reciclagem.



Figura 4.17 – Pré-aquecedores utilizados na reciclagem *in situ* a quente (Martec, 2009)

Para este tipo de reciclagem, distinguem-se dois processos: a termorregeração e a termorreperfilagem.

A termorreperfilagem consiste apenas no aquecimento do pavimento, seguido da sua compactação, tendo por objectivo selar as fendas existentes e repor a regularidade do perfil longitudinal. Neste processo não há lugar à adição de novos materiais ou misturas. A

termorregeração compreende o aquecimento do pavimento, a sua escarificação, recomposição, nivelamento e compactação da nova camada (Picado-Santos *et al.*, 2008).



Figura 4.18 – Misturador (Martec, 2009)



Figura 4.19 – Espalhamento da mistura (Martec, 2009)

Nos casos em que é aplicada a termorregeração poderá optar-se pela aplicação de uma nova camada de misturas betuminosas novas sobre a camada reciclada, passando esta nova camada a funcionar como camada de desgaste.

Segundo Baptista (2004), a adição de novos materiais correctivos está limitada a uma taxa de 30% da massa do material reciclado, devido a limitações do equipamento envolvido no processo.

A técnica de reciclagem *in situ* a quente, utiliza equipamento muito específico e com custo muito elevado, quando comparada com outros equipamentos utilizados em outros tipos de

reciclagem *in situ*. Além disso, o facto de ser necessário o aquecimento do pavimento leva a que esta técnica apresente elevados consumos de energia.

Para Picado-Santos *et al.* (2008) esta técnica apresenta também dificuldades de aplicação, não podendo ser utilizada quando o pavimento apresenta obstáculos, para além de um significativo grau de poluição, com consequentes impactes ambientais.

4.3 Reciclagem em Central a Frio

Na técnica de reciclagem em central a frio o material é removido através de uma prévia fresagem do pavimento e posteriormente numa central de produção de misturas betuminosas é misturado à temperatura ambiente com um ligante. De acordo com Gomes (2005) este tipo de reciclagem não é muito utilizado. Normalmente as técnicas de reciclagem a frio são aplicadas *in situ*.

A principal vantagem decorrente do processo em central está ligada com o maior controlo de qualidade na adição do ligante no processo de mistura. No entanto, há que transportar o material fresado para o local onde se encontra a central de produção da mistura, e de novo para o local de reabilitação do pavimento. Assim, dado o elevado número de operações envolvidas é fundamental procurar avaliar todos os custos de modo a que este tipo de reciclagem possa ser viável do ponto de vista económico.

As misturas betuminosas recicladas realizadas em central a frio, de acordo com USDD (2001), têm um comportamento semelhante a um material agregado de granulometria extensa e podem ser utilizadas em camadas de base do novo pavimento reabilitado, que no caso da reciclagem em central poderá ser outro diferente daquele onde o material foi fresado.

O processo de reciclagem inicia-se com a fresagem a frio (Figura 4.20) que reduz o revestimento do pavimento e eventualmente a base em partículas de dimensões adequadas. As dimensões das partículas resultantes da fresagem são determinadas em função da profundidade de corte, da velocidade de avanço da máquina fresadora, do sentido de rotação do cilindro fresador, da qualidade do material, das condições do pavimento, e do teor de betume.



Figura 4.20 – Fresagem a frio e transporte do material fresado (ARRA, 2009)

De seguida, o material a reciclar é transportado até à central de fabrico da nova mistura para se proceder à mistura do material fresado com o ligante e, caso haja necessidade, com agregados virgens.

As centrais de produção das misturas betuminosas já foram apresentadas atrás no Ponto 3.2.2. Neste tipo de reciclagem são utilizadas as centrais descontínuas pelo método de adição a frio, em que o material fresado é adicionado sem ser aquecido directamente na unidade de mistura, o material é então misturado com o ligante à temperatura ambiente.

O objectivo da fase de mistura é proporcionar uma distribuição uniforme do ligante por todo o material que está a ser reciclado e pelos agregados virgens.

Depois de produzida, a mistura é transportada até silos de armazenamento e daí para os camiões que a transportarão até à zona de reabilitação do pavimento, onde serão empregues as operações de espalhamento da mistura, com recurso a uma pavimentadora, e de compactação da nova camada reciclada. A Figura 4.21 mostra a sequência de operações e os equipamentos envolvidos.



Figura 4.21 – Fases de reciclagem em central a frio com emulsão betuminosa (Picado Santos *et al.*, 2008)

Os ligantes utilizados na técnica de reciclagem em central a frio podem ser uma emulsão betuminosa ou a espuma de betume. O processo construtivo é idêntico para os dois ligantes, variando apenas no que diz respeito à forma de obtenção da espuma de betume, processo esse que já foi analisado no Ponto 4.1.3.

A reciclagem em central a frio, não é uma técnica muito atractiva, por ser necessário o transporte do material fresado entre o local da obra e a central e desta novamente para o local da obra. Além disso, convém não esquecer que no caso das técnicas de reciclagem em central não existe a possibilidade de reciclar todo o material fresado proveniente do pavimento flexível degradado, e no caso das centrais descontínuas pelo método a frio a percentagem de reciclagem não vai além dos 30%.

4.4 Reciclagem em Central a Quente

A técnica de reciclagem em central, a quente, com betume, consiste em fabricar uma mistura betuminosa a quente, utilizando materiais fresados de pavimentos antigos, de modo a conseguir bons resultados técnico-económicos e ambientais. A qualidade das misturas realizadas com os materiais reciclados deve ser comparada à das realizadas com materiais novos (Picado-Santos *et al.*, 2008).

De acordo com o USDD (2001) as misturas recicladas em central a quente apresentam um desempenho aproximadamente equivalente aquele que é verificado para as misturas novas

produzidas a quente em central. Ainda de acordo com o USDD (2001), as misturas recicladas em central podem ser utilizadas no novo pavimento reabilitado em camadas de base, de regularização e até mesmo em camadas de desgaste.

Por se tratar de uma técnica em central, este tipo de reciclagem tem início com a fresagem a frio do pavimento, numa espessura que permita a eliminação das fendas existentes no pavimento. De seguida o material fresado é transportado em camiões até à central de produção das misturas betuminosas. Existem diferentes tipos de centrais, com diferentes processos de incorporação do material fresado proveniente do pavimento degradado na nova mistura betuminosa, os quais já foram apresentados no Ponto 3.2.2.

Um dos aspectos importantes a considerar no processo de fabrico das misturas betuminosas recicladas a quente, tem a ver com o sistema adoptado para o aquecimento deste material, assim serão as percentagens permitidas para incorporar no fabrico de misturas betuminosas a quente (Batista, 2004).

Independentemente do tipo de central e do método de adição escolhido para o processo de reciclagem a quente, é importante garantir que os agregados provenientes do processo de fresagem nunca entrem em contacto directo com a chama do queimador. Se tal acontecesse, o betume envelhecido dos agregados fresados seria queimado, originando elevados níveis de poluição ambiental. Para além disso, por se tratar de betume envelhecido, há também que ter cuidados relativamente à temperatura de aquecimento empregue, para que esta não exceda determinados valores, de forma a não provocar ainda mais o envelhecimento de um betume já de si envelhecido pela oxidação do ar e da água das chuvas.

Neste tipo de reciclagem é utilizado o betume como ligante. O betume a utilizar deverá ser um betume menos duro, para que a temperatura de amolecimento seja menos elevada.

Depois de fabricada a mistura betuminosa é transportada até ao local do novo pavimento onde é colocada e compactada. A Figura 4.22 mostra as diferentes fases do processo de reciclagem em central a quente.

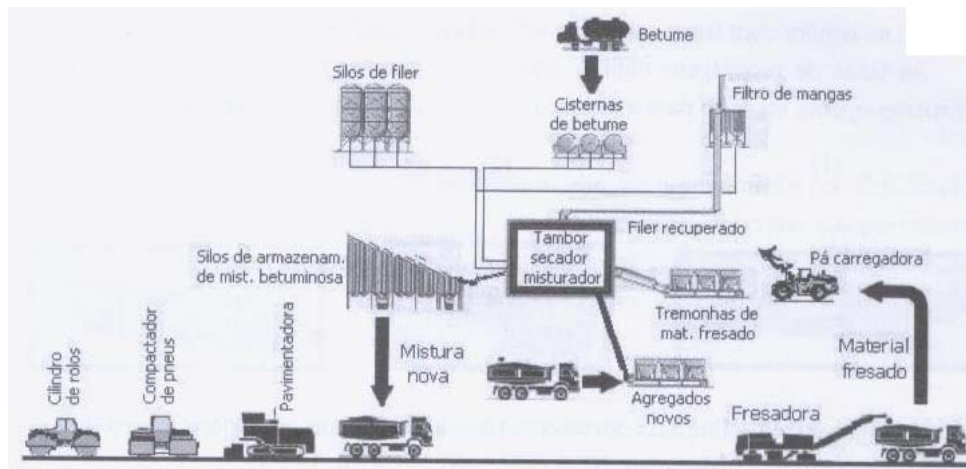


Figura 4.22 – Fases de reciclagem em central contínua a quente com betume (Picado Santos *et al.*, 2008)

4.5 Reciclagem em Central Semi-Quente

Esta técnica é bastante recente no nosso país, existindo apenas duas a três aplicações em obra. No entanto a Estradas de Portugal – S.A. encontra-se neste momento a testar esta técnica na EN244 no troço entre Ponto de Sor e Gavião.

Tal como acontece nas outras tipos de reciclagem em central, esta também começa com a fresagem do pavimento antigo a reabilitar, sendo depois o material transportado até à central de produção de misturas betuminosas. Daí a importância de realizar um estudo de viabilidade técnico económico para cada situação, de modo a garantir que os custos de transporte do material fresado não tornem a técnica inviável do ponto de vista económico, comprometendo o sucesso do processo de reciclagem.

Depois de transportado até à central o material é misturado com uma emulsão de betume modificado.

De acordo com Batista (2004), esta emulsão betuminosa modificada é capaz de suportar temperaturas elevadas, sem que o seu desempenho seja afectado, ao mesmo tempo que permite uma adesividade elevada e um correcto envolvimento dos agregados.

Na reciclagem em central semi-quente, tal como acontece na reciclagem em central a quente, a mistura é aquecida. No entanto, nesta técnica a temperatura é elevada até valores que variam entre os 70°C a 90°C, que são temperaturas inferiores aquelas que se verificam para a técnica a quente, em que a mistura betuminosa é aquecida entre os 100°C a 140°C.

O aumento da temperatura conduz a uma redução temporária da viscosidade do betume da emulsão, que permite um aumento da trabalhabilidade da mistura e um melhor revestimento dos agregados.

Depois das operações em central, o material volta a estar pronto para ser utilizado, podendo no entanto, segundo Vieira (2003) ser armazenado durante um período de 24 h, desde que as operações de colocação e espalhamento da mistura betuminosa se façam a uma temperatura de pelo menos 60°C.

As sucessivas fases de aplicação desta técnica estão representadas na Figura 4.23.

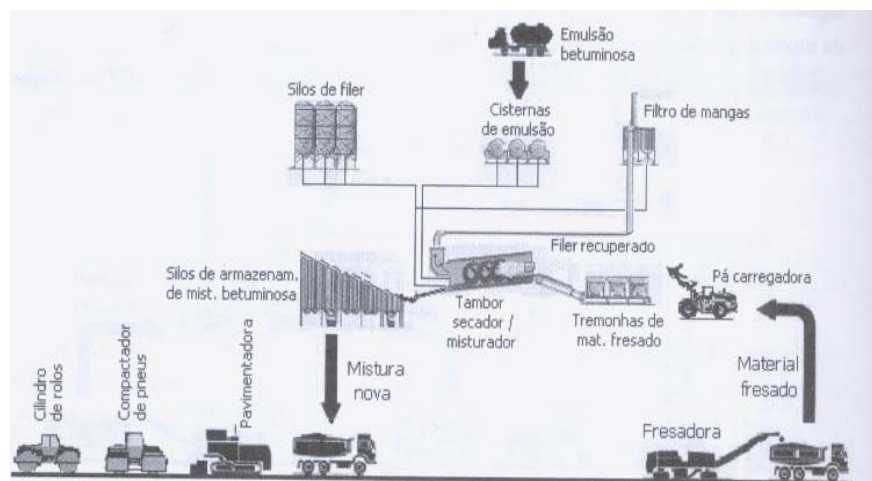


Figura 4.23 – Fases de reciclagem em central semi-quente com emulsão betuminosa (Picado Santos *et al.*, 2008)

Por se tratar de uma mistura betuminosa produzida acima da temperatura ambiente, permite alcançar as características finais da mistura num período de tempo muito inferior àquele que se verifica para as misturas produzidas com uma emulsão betuminosa convencional.

De acordo com Vieira (2003) este tipo de reciclagem em central semi-quente permite alcançar taxas de reciclagem até 100% do material fresado.

4.6 Síntese dos Diferentes Tipos de Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis

Para além das alternativas associadas ao local de reciclagem, tal como foi visto no capítulo anterior, existem também diferentes opções função do processo de reciclagem, no que respeita à temperatura de reciclagem e ao ligante utilizado no processo. Da combinação destas diferentes possibilidades resultam diferentes tipos de reciclagem.

Assim, podemos ter técnicas a frio, a quente, a semi-quente no que diz respeito a temperatura de reciclagem, e podemos utilizar cimento, emulsão betuminosa, espuma de betume ou até mesmo novo betume como ligante no processo de reciclagem. A conjugação destas diferentes variáveis dá origem aos diferentes tipos de reciclagem.

Todos os tipos de reciclagem, com a exceção da reciclagem *in situ* a quente, constituem uma alternativa de reabilitação das características estruturais de um pavimento flexível degradado. Relativamente a técnica *in situ* a quente, esta só pode ser utilizada ao nível da camada de desgaste, em situações em que o pavimento não apresente problemas estruturais. Trata-se por isso de uma técnica de conservação das características superficiais do pavimento.

Foi ainda possível aferir, no que diz respeito à temperatura de reciclagem, que as misturas produzidas a frio, independentemente do local de reciclagem, apresentam características que lhes permitem ser utilizadas ao nível de camadas de base, contribuindo deste modo para uma melhoria da capacidade de suporte do pavimento. As misturas recicladas a quente em central apresentam características que lhes permitem não só ser aplicadas ao nível das camadas de base, mas também em camadas de regularização e de desgaste, resultado do desempenho aproximadamente equivalente aquele que é verificado para as misturas novas produzidas a quente em central.

5 Vantagens e Desvantagens dos Diferentes Tipos de Reciclagem

Como foi visto anteriormente, nas situações de reciclagem *in situ*, o processo torna-se geralmente mais económico, por não haver a necessidade de transporte dos materiais, enquanto nas técnicas em central os custos mais elevados são compensados por uma qualidade e fiabilidade das misturas betuminosas obtidas. Mas importa também verificar que outras vantagens e/ou desvantagens apresentam cada uma das técnicas decorrentes do uso de determinado ligante e/ou temperatura de reciclagem e conjugar estas outras variáveis, de modo a ser possível definir em que situações é que cada uma das diferentes técnicas pode ou não ser utilizada como método eficiente de reabilitação de um pavimento flexível degradado.

O material reciclado *in situ a frio*, tal como já foi visto anteriormente, é incorporado no novo pavimento reabilitado, em novas camadas de base, contribuindo deste modo para uma melhoria das características e de comportamento do pavimento, quando solicitado pelo tráfego. Segundo Suleiman (2002) o comportamento, em termos de performance das camadas recicladas *in situ a frio* é semelhante a uma mistura betuminosa aberta a frio.

Em casos de pavimentos muito heterogéneos, a técnica *in situ a frio*, não é uma solução viável de reabilitação. Por exemplo, numa situação em que o pavimento a reabilitar possua camadas que ao longo da sua extensão vão apresentando diferentes constituições em termos de materiais, ou diferentes espessuras, tal obrigaria à realização de um estudo de formulação, acompanhado de um trecho experimental para todas as zonas do pavimento com características diferentes, o que do ponto de vista prático não seria razoável.

De acordo com o USDD (2001), em termos económicos, os custos associados a uma solução de reabilitação com recurso à técnica *in situ a frio*, com a aplicação de uma camada de desgaste com uma mistura betuminosa produzida a quente, são menores relativamente a uma solução que implique a fresagem do pavimento com a aplicação de uma nova camada com novas misturas betuminosas.

Devido a não ser necessário aquecer o material, a reciclagem *in situ a frio* tem a vantagem de permitir uma redução nos consumos de energia e não emitir gases tóxicos para o ambiente, associados ao aquecimento de misturas betuminosas. No entanto, as misturas recicladas *in situ a*

frio de acordo com Jimenéz (2003) são difíceis de compactar e por vezes apresentam problemas de desagregação.

No caso dos pavimentos reciclados in situ a frio com cimento, as camadas recicladas apresentam um elevado grau de rigidez, muito superior à dos materiais que lhe deram origem, o que potencia um aumento da vida residual do pavimento. Assim, esta técnica apresenta-se como uma boa solução quando existe a necessidade de aumentar a capacidade resistente das camadas recicladas. O pavimento que anteriormente era flexível passa a ser do tipo semi-rígido.

Mas o aumento da rigidez leva a uma diminuição da resistência à fadiga. A elevada rigidez dos materiais tratados com cimento e as tensões que se formam nestes mesmos materiais, devido ao efeito combinado das variações de temperatura e da carga do tráfego pesado, podem levar à rotura da camada reciclada. Assim, o material tratado com cimento apresenta uma tendência natural para a fissuração, a qual poderá ter repercussões à superfície. Caso esta situação ocorra, a entrada da água de superfície para o pavimento seria muito facilitada, dando origem a fadiga acelerada do pavimento, ou seja, exactamente o contrário do que se pretende com um processo de reabilitação estrutural.

De acordo com Picado-Santos *et al.* (2008) este problema de retracção das camadas recicladas com cimento é ultrapassável com a colocação de uma camada de reforço com betume modificado com borracha, enquanto para Paul & Simões. (2003) uma pré-fissuração transversal da camada reciclada antes da compactação constitui a melhor solução.

As camadas onde seja aplicada a reciclagem in situ a frio com emulsão betuminosa não apresentam módulos de deformabilidade tão elevados, como no caso de o ligante ser o cimento. Trata-se de uma técnica utilizada em situações em que o pavimento se encontre fendilhado, mas com adequado valor estrutural às condições de tráfego. No entanto, as camadas tratadas com emulsão não apresentam os mesmos problemas de fendilhamento por retracção dos materiais e conseguem adaptar-se melhor a eventuais deformações.

A técnica in situ a frio com emulsão betuminosa apresenta maiores custos relativamente à técnica de reciclagem in situ a frio com cimento, derivado dos custos mais elevados das emulsões betuminosas, para além de não poderem ser alcançadas as mesmas profundidades de reciclagem devido à cura da emulsão. A utilização de emulsão betuminosa exige um tempo de cura de duas a três semanas, não devendo nesse período ser aplicada nova camada.

A técnica in situ a frio com emulsão betuminosa apresenta também, maior sensibilidade às condições climáticas. O tempo seco deve predominar para permitir a rotura da emulsão, pelo

que o processo de reciclagem com emulsão está limitado em zonas com elevada percentagem de humidade relativa.

De acordo com Picado-Santos *et al.* (2006) em Portugal no ano de 2004 já haviam sido reciclados 1.900.000 m² de pavimentos, 43% dos quais através da técnica de reciclagem *in situ* a frio com emulsão. Trata-se de uma técnica de fácil aplicação, daí a elevada percentagem de utilização, que permite reabilitar pavimentos flexíveis degradados, regenerando os materiais betuminosos e segundo Batista (2004), transformando-os numa excelente base para o suporte das camadas betuminosas superiores.

Por sua vez, a técnica de reciclagem *in situ* a frio com espuma de betume é de acordo Seixas (2008), uma técnica indicada para situações de tráfego pesado com climas extremos, incluindo situações de altas e baixas temperaturas, gelo, seca e humidade. As camadas recicladas com espuma de betume, apresentam características de resistência com valores próximos daqueles que são obtidos com cimento, no entanto, não apresenta riscos de fissuração por retracção, como no caso das camadas recicladas com cimento. Para Ribeiro (2003), as camadas recicladas com espuma de betume são flexíveis, resistentes à fadiga e à deformação.

Quando comparada com outros tipos de reciclagem *in situ* a frio, pode-se dizer que a técnica que utiliza o espuma de betume requer algum equipamento muito específico – câmara de expansão, e envolve maiores riscos para os trabalhadores, durante o processo de construção, uma vez que existe a necessidade de aquecer o betume até pelo menos 180°C.

A técnica de reciclagem *in situ* a quente só pode ser utilizada desde que não haja problemas estruturais do pavimento, estando indicada a sua utilização para a correcção apenas de defeitos superficiais, exclusivamente problemas funcionais da camada de desgaste. Assim, não pode ser considerada como uma técnica de reabilitação estrutural de um pavimento degradado. Esta técnica permite apenas o rejuvenescimento da camada de desgaste do pavimento, reaproveitando os materiais existentes.

A reciclagem *in situ* a quente apresenta um elevado custo comparativamente com as outras técnicas de reciclagem *in situ* a frio, resultado das especificidades de equipamento e da necessidade de aquecer o pavimento com o consequente aumento do consumo de energia, os quais podem ser agravados no caso de condições climáticas desfavoráveis.

A vantagem da utilização da técnica de reciclagem *in situ* a quente decorre do facto de reaproveitar os materiais do antigo pavimento, diminuindo a necessidade de criação de zonas de vazadouro para depósito dos materiais, e a exploração de matérias nas pedreiras, contribuindo

para o equilíbrio ambiental. Mas por outro lado, a necessidade de aquecer o pavimento leva a que sejam emitidos gases nocivos para a atmosfera, com consequentes impactos ambientais.

No caso das técnicas em central, independentemente da temperatura a que se dá o processo e do ligante utilizado, existe sempre a vantagem de haver um maior controlo da qualidade da mistura obtida, relativamente as técnicas *in situ*. As misturas apresentam uma maior fiabilidade e as mesmas características ao longo de toda a obra.

No entanto, em central, não existe a possibilidade de incorporar 100% do material fresado. As percentagens mais elevadas são conseguidas com a utilização de centrais descontínuas pelo método a quente, que chegam a atingir, como referido no Ponto 3.2.2, valores da ordem dos 70%.

Para as técnicas em central a frio com emulsão betuminosa ou com espuma de betume, as misturas betuminosas que resultam, apenas podem ser utilizadas como camadas de base no novo pavimento reabilitado, enquanto as misturas betuminosas obtidas em central a quente podem ser utilizadas não só em camadas de base do novo pavimento, mas também em camadas de regularização e de desgaste.

Nos últimos anos, as técnicas em central a frio têm-se tornado cada vez menos populares, derivado às melhorias de equipamento e de qualidade das técnicas a *in situ* a frio, que permitem alcançar misturas betuminosas recicladas com idêntico desempenho.

A técnica em central semi-quente com emulsão betuminosa, ainda não está tão desenvolvida quantos as anteriores, havendo ainda a necessidade de averiguar quais as reais características de desempenho das misturas. Mas de acordo com a bibliografia recolhida, é possível dizer que esta técnica apresenta um menor consumo de energia relativamente à reciclagem em central a quente, uma vez que a mistura é fabricada a temperaturas inferiores, para além de ter a vantagem de possibilitar a incorporação de 100% do material fresado.

No Quadro 5.1 resumem-se as vantagens e desvantagens que decorrem de cada uma das técnicas, consoante o local e a temperatura a que se dá o processo.

Importa, também, referir para que casos de degradações dos pavimentos flexíveis, cada uma das técnicas deve ou não ser utilizada, de modo a que seja uma solução de reabilitação eficaz (Quadro 5.2)

Por fim, importa ainda estabelecer qual a influência do ligante no processo de reciclagem *in situ* a frio (Quadro 5.3) e no comportamento da futura camada reciclada, para assim mais facilmente perceber quais as vantagens e/ou desvantagens que decorrem da utilização de cada um deles e para que situações devem ou não ser utilizados.

Quadro 5.1 – Vantagens e desvantagens das técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis

Vantagens e Desvantagens das Técnicas de Reciclagem de Pavimentos Flexíveis		
Técnica de Reciclagem	Vantagens	Desvantagens
1. Reciclagem in situ	1.1. a frio 1. Possibilidade de incorporação de 100% do material fresado 2. Dispensa zonas de vazadouro 3. Menor consumo de energia 4. As novas misturas podem ser empregues em camadas de base 5. Aumenta a capacidade estrutural do pavimento	1. Não apresenta o mesmo rigor ao longo de toda a obra 2. Qualidade do trabalho afectada pelas condições locais 3. Dependente das condições climáticas 4. Interferência com o tráfego 5. Necessita de uma camada de sobreposição
	1.2. a quente 1. Possibilidade de incorporação de 100% do material fresado 2. Dispensa zonas de vazadouro 3. Melhora as características funcionais do pavimento 4. Diminui a permeabilidade do pavimento à água	1. Não pode ser utilizada quando existem problemas estruturais do pavimento 2. Elevado consumo de energia 3. Emissão de substâncias poluentes para a atmosfera 4. Equipamento de reciclagem muito complexo
2. Reciclagem em central	2.1. a frio 1. As novas misturas podem ser empregues em camadas de base 2. Aumenta a capacidade estrutural do pavimento 3. A qualidade da mistura não é afectada por factores climáticos 4. Maior controlo da qualidade das misturas obtidas	1. Necessidade de transportar o material fresado até à central 2. Impossibilidade de incorporar 100% do material fresado 3. Necessita de zonas de vazadouro 4. Necessita de uma camada de sobreposição
	2.2. a quente 1. A qualidade da mistura não é afectada por factores climáticos 2. Maior controlo da qualidade das misturas obtidas 3. As novas misturas podem ser empregues em camadas de base, regularização e de desgaste 4. As misturas obtidas são comparadas qualitativamente às misturas novas	1. Necessidade de transportar o material fresado até à central 2. Maior consumo de energia 3. Emissão de substâncias para a atmosfera 4. Necessita de zonas de vazadouro 5. Custos mais elevados
	2.3. semi-quente 1. Possibilidade de incorporação de 100% do material fresado 2. A qualidade da mistura não é afectada por factores climáticos 3. Maior controlo da qualidade das misturas obtidas 4. Menor consumo de energia	1. Necessidade de transportar o material fresado até à central 2. Técnica pouco desenvolvida 3. Não são conhecidas as reais características de desempenho das misturas

Quadro 5.2 – Método de reabilitação de pavimentos flexíveis de acordo com a degradação (Adaptado de USDD, 2001)

Método de Reabilitação do Pavimento Flexível de acordo com o Tipo de Degradação					
Degradação	Reciclagem <i>in situ</i> a quente	Reciclagem <i>in situ</i> a frio	Reciclagem em central a quente	Selagem de fendas	Fresagem e colocação de nova camada
Fendilhamento por fadiga	x	x	x	x	x
Exsudação	x		x		
Ondulações		x	x		x
Deformação localizada	x	x	x		x
Fendas longitudinais		x	x	x	x
Polimentos dos Agregados	x				
Desagregação Superficial	x				
Rodeiras	x		x		

Quadro 5.3 – Vantagens e Desvantagens dos ligantes utilizados nas técnicas de reciclagem *in situ* a frio (Adaptado de Lewis & Collings, 1999)

Vantagens e Desvantagens dos Ligantes		
Ligante	Vantagem	Desvantagem
Cimento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Facilidade de aplicação 2. Confere elevada rigidez à camada 3. Geralmente mais barato que o betume e emulsão 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fendilhamento da camada. 2. Pouca flexibilidade e dificuldades de adaptar-se a irregularidades da camada inferior
Emulsão betuminosa	<ol style="list-style-type: none"> 1. Facilidade de aplicação, a emulsão é directamente pulverizada na câmara de mistura da máquina recicladora 2. O tratamento com emulsão produz uma camada flexível e resistente à fadiga 3. Aumento da resistência da camada 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Normalmente mais caro que o cimento que e a espuma de betume forma a ser compatível com o material reciclado 3. Maior sensibilidade às condições climáticas 4. O grau de saturação do material é por vezes tão elevado que fica saturado com emulsão
Cimento + Emulsão betuminosa (reciclagem mista)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Processo de cura é mais rápido 2. Menor sensibilidade à água 3. Não existe propensão para fendilhamento por retracção 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mais caro que o cimento e que a emulsão 2. Ao entrar em contacto com o cimento pode dar-se a ruptura prematura da emulsão
Espuma de Betume	<ol style="list-style-type: none"> 1. Resulta uma camada flexível com boa resistência à fadiga 2. Não existe propensão para fendilhamento da camada por retracção 3. Permite uma abertura imediata ao tráfego após a compactação 4. Geralmente mais barato que o cimento e/ou emulsão 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Necessidade de aquecer o betume a 180°C 2. Material com menos de 5% de finos não pode ser utilizado

5.1 Apresentação de Casos de Estudo sobre as Características Mecânicas das Misturas Recicladas

Nesta fase do trabalho são apresentados diferentes casos de estudo realizados, de modo a aferir as características mecânicas das misturas recicladas.

a) Avaliação das características mecânicas das misturas recicladas *in situ* a frio com emulsão betuminosa e cimento – (Rastelli & Giuliani, 2004)

No estudo realizado por Rastelli & Giuliani (2004), pretende-se avaliar as características mecânicas das misturas recicladas *in situ* a frio com emulsão betuminosa e emulsão betuminosa com cimento (reciclagem mista a frio).

As misturas betuminosas recicladas *in situ* a frio, após o processo de reciclagem passam a funcionar como agregado em camadas de base do novo pavimento reabilitado, interessa por isso perceber, qual o seu comportamento nestas novas camadas e qual o seu desempenho quando comparados com misturas com agregados virgens.

Foram analisadas várias amostras fabricadas em laboratório, compostas por agregados de diferentes origens e com diferentes percentagens de ligantes. No Quadro 5.4 apresentam-se todas as amostras produzidas e analisadas.

Quadro 5.4 – Amostras fabricadas e analisadas (Adaptado de Rastelli & Giuliani, 2004)

Amostra		
Nº	Agregado	% Ligante
1	Agregado virgem	3,5% Emulsão betuminosa
2		4,5% Emulsão betuminosa
3		5,5% Emulsão betuminosa
4		3,5% Emulsão betuminosa + 2% cimento
5		4,5% Emulsão betuminosa + 2% cimento
6		5,5% Emulsão betuminosa + 2% cimento
7	Agregado reciclado proveniente das misturas betuminosas	3,5% Emulsão betuminosa
8		4,5% Emulsão betuminosa
9		5,5% Emulsão betuminosa
10		3,5% Emulsão betuminosa + 2% cimento
11		4,5% Emulsão betuminosa + 2% cimento
12		5,5% Emulsão betuminosa + 2% cimento

} Reciclagem "in situ" a frio com emulsão betuminosa
 } Reciclagem "in situ" a frio mista

Cada uma das amostras fabricadas foi compactada com diferentes energias de compactação, de acordo com o preconizado no Ensaio *Proctor* Normal e no Ensaio *Proctor* Modificado, sujeitas a um período de cura de 7 dias e 28 dias e submetidas a ensaios para avaliação da resistência à compressão e à tracção.

As amostras com cimento e mais baixa percentagem de emulsão, tanto para as amostras com agregados virgem como para as amostras com agregados provenientes das misturas betuminosas recicladas, foram aquelas que apresentaram melhores resultados, quando submetidas a ensaios de resistência à compressão.

Como se pode ver pela Figura 5.1 e Figura 5.2, os agregados reciclados apresentam valores de resistência à compressão bastante inferiores, relativamente aqueles que são apresentados pelos agregados virgem. De acordo com Rastelli & Giuliani (2004) o facto dos agregados reciclados estarem cobertos por uma “película” de betume, impede a absorção de água por parte desses agregados, o que não acontece com os agregados virgem, que absorvem melhor a água permitindo uma melhor compactação da mistura. Isto mostra que o betume que envolve os agregados reciclados, diminui a capacidade desses mesmos agregados para resistirem a esforços de compressão.

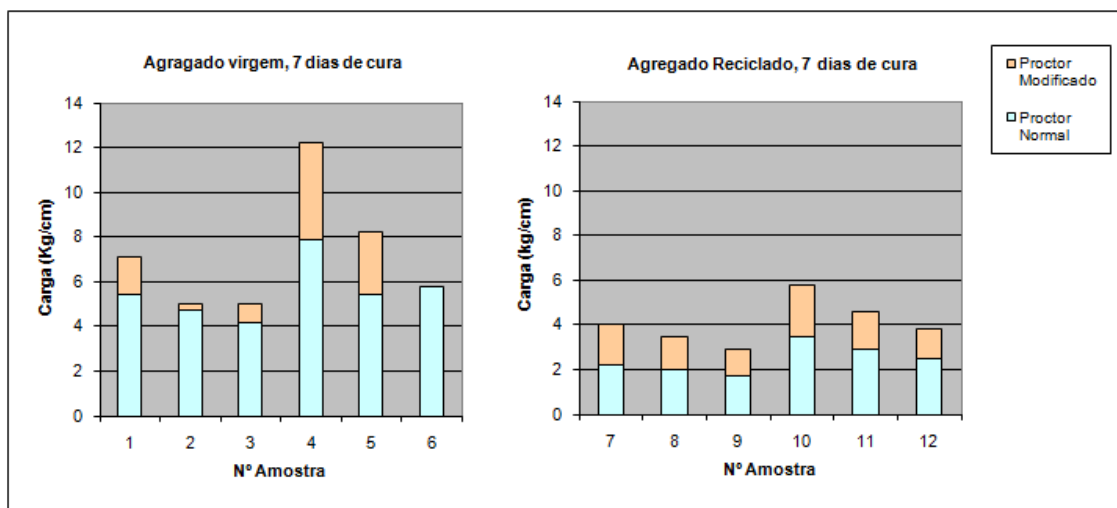


Figura 5.1 – Resultado dos ensaios para avaliação da resistência à compressão das amostras com 7 dias de cura (Adaptado de Rastelli & Giuliani, 2004)

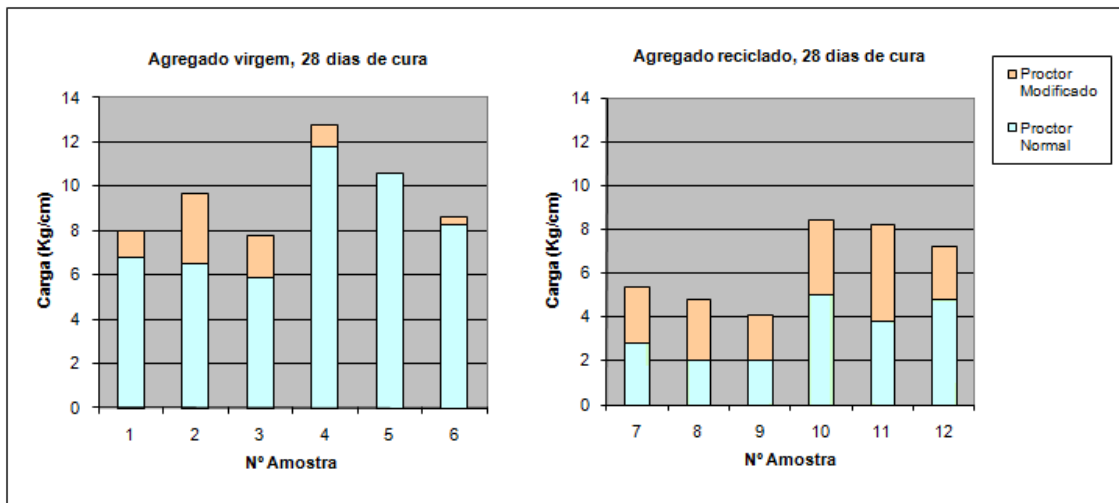


Figura 5.2 – Resultado dos ensaios para avaliação da resistência à compressão das amostras com 28 dias de cura (Adaptado de Rastelli & Giuliani, 2004)

No que diz respeito aos ensaios para avaliação da resistência tracção, como se pode ver no Quadro 5.5, mais uma vez os agregados virgem obtiveram melhores resultados, face aos agregados reciclados. Enquanto nas amostras com agregado virgem, a adição de cimento não revelou um melhor desempenho dessas mesmas amostras, o mesmo não aconteceu com as amostras de agregado reciclado. De facto as amostras com agregado reciclado apresentam melhores resultados para as mais baixas percentagens de emulsão betuminosa e com adição de cimento. A adição de cimento, em baixas percentagens, nas misturas recicladas com emulsão betuminosa contribui para o processo de cura da mistura.

Quadro 5.5 – Resultados dos ensaios para avaliação da resistência à tracção das amostras fabricadas (Adaptado de Rastelli & Giuliani, 2004)

Emulsão (%)	Cimento (%)	Agregados Virgem		Agregados Reciclados	
		7 dias de cura (Kg/cm ²)	28 dias de cura (Kg/cm ²)	7 dias de cura (Kg/cm ²)	28 dias de cura (Kg/cm ²)
3,5	0	2,60	3,01	2,54	2,81
4,5	0	2,90	3,97	2,52	3,16
5,5	0	1,61	4,30	2,49	2,79
3,5	2	2,03	3,49	3,08	3,65
4,5	2	1,81	3,24	2,96	3,26
5,5	2	1,78	3,90	2,77	3,37

b) Avaliação das características mecânicas das misturas recicladas *in situ* a frio com emulsão betuminosa (Jiménez, 2003)

O objectivo deste trabalho foi não só avaliar o comportamento mecânico das misturas betuminosas recicladas *in situ* a frio com emulsão betuminosa após a sua entrada em serviço, mas principalmente comparar o seu desempenho com o de misturas recicladas fabricadas em laboratório.

Para tal, foram acompanhadas duas obras de reabilitação de pavimentos degradados, durante a fase de execução e após a entrada em funcionamento dos pavimentos, dos quais foram extraídos carotes com diferentes idades e conseqüentemente, diferentes características.

Para o primeiro pavimento (Caso 1) a solução de reabilitação do pavimento preconizava:

- Reciclagem *in situ* a frio do pavimento existente, numa profundidade de 8cm, utilizando uma emulsão betuminosa;
- Execução de uma camada de reforço com 4cm, com características de desgaste com misturas betuminosas fabricadas a quente em central.

Para o segundo pavimento (Caso 2) a solução de reabilitação do pavimento preconizava:

- Reciclagem *in situ* a frio do pavimento existente, numa profundidade de 6cm, utilizando uma emulsão betuminosa;
- Execução de uma camada de reforço com 8cm em misturas betuminosas fabricadas a quente em central.

Paralelamente, em laboratório procedeu-se ao fabrico das misturas com emulsão betuminosa e material proveniente da fresagem dos dois pavimentos reabilitados, as quais, depois de fabricadas foram compactadas de acordo com a norma NLT-161/ 98.

Posteriormente, as misturas em laboratório foram sujeitas a um período de cura de 180 dias, em que a temperatura ambiente variava entre os 18°C e os 25°C, sendo que para cada uma delas procedeu-se ao acompanhamento da evolução das resistências à compressão.

No Quadro 5.6 e no Quadro 5.7 apresentam-se os resultados obtidos relativos aos ensaios de caracterização das misturas recicladas em laboratório, bem como os valores obtidos para os carotes extraídos dos pavimentos reciclados em diferentes etapas.

Quadro 5.6 – Resultados dos ensaios – Caso 1 (Adaptado de Jimenéz, 2003)

Ensaio em Laboratório		Evolução dos Carotes extraídos do Pavimento			
Densidade (g/cm ³)	2,44	Tempo	Densidade (g/cm ³)	Resistência à tracção indirecta (MPa)	Módulo de deformabilidade 20°C, 10Hz (MPa)
Resist. compressão em seco	2,5	6 meses	2,27	1,2	4550
Resist. compressão após imersão	2,1	18 meses	2,31	1,4	5370
Resistência conservada (%)	85	6,5 anos	2,33	1,4	4700

Quadro 5.7 – Resultados dos ensaios – Caso 2 (Adaptado de Jimenéz, 2003)

Ensaio em Laboratório		Evolução dos Carotes extraídos do Pavimento		
Densidade (g/cm ³)	2,34	Tempo	Densidade (g/cm ³)	Resistência à tracção indirecta (MPa)
Resist. compressão em seco	4	2 meses	2,12	–
Resist. compressão após imersão	3,4	4,5 anos	2,12	1,7
Resistência conservada (%)	83			

Verifica-se, em primeiro lugar, que as densidades obtidas a partir das amostras fabricadas em laboratório são muito superiores àquelas que se obtêm para os carotes extraídos dos pavimentos. Em laboratório é fácil produzir um efeito forte de compactação da mistura reciclada, pela aplicação de uma carga estática durante um determinado período de tempo que conduz à expulsão da água da mistura reciclada ao mesmo tempo que aproxima as partículas e causa deformação no betume antigo. No entanto, em obra de acordo com Jimenéz (2003) nem com a utilização de cilindros de pneus ou com cilindros de rasto liso se conseguem alcançar tais níveis de compactação.

Em segundo lugar, verifica-se que as densidades em obra mantêm-se praticamente constantes a partir dos 2 meses, tempo durante o qual se verifica a maior parte do processo de cura da camada reciclada. Até serem alcançados os 2 meses de idade da camada reciclada, os carotes extraídos do pavimento ainda estão pouco endurecidos e acabam por se desagregarem, razão pela qual é difícil determinar as reais densidades das camadas recicladas para idades jovens. Assim, segundo Jimenéz (2003) é difícil fixar as condições de cura das misturas recicladas em laboratório de modo a que estas possam simular de forma real o desempenho das

misturas recicladas quando aplicadas em pavimentos rehabilitados e após a sua entrada em serviço.

c) Avaliação das Características Mecânicas de Misturas Recicladas a Quente em Central – Costa-Baptista (2006)

Costa-Baptista (2006) procurou avaliar as características mecânicas, no que diz respeito ao módulo de deformabilidade, leis da fadiga e deformação permanente, de 7 misturas betuminosas recicladas a quente, com diferentes taxas de reciclagem (30% e 40%), para além de uma mistura betuminosa nova de referência, fabricada a quente.

Para as misturas betuminosas recicladas, foram utilizados 3 tipos diferentes de betume (35/50; 50/70 e 70/100) e a percentagem de ligante novo utilizado na mistura betuminosa foi de 4,2%. No Quadro 5.8 apresenta-se em resumo as características das misturas produzidas e avaliadas.

Quadro 5.8 – Características das misturas produzidas e avaliadas (Adaptado de Costa-Baptista, 2006)

	Designação da Mistura	Taxa de Reciclagem (%)	Tipo de Betume	Ligante Novo (%)
Mistura de Referência ⇒	LA	0	35/50	-
	LB	20	35/50	4,2
	LC	30	35/50	4,2
	LD	40	35/50	4,2
	LE	30	50/70	4,2
	LF	40	50/70	4,2
	LG	30	70/10	4,2
	LH	40	70/100	4,2

Os valores do módulo de deformabilidade das diferentes misturas, foram obtidos em ensaios de flexão, para três temperaturas diferentes (15°C; 25°C e 40°C) e para três frequências diferentes (1Hz; 5Hz; 10 Hz).

O Quadro 5.9 mostra os valores do módulo de deformabilidade para a mistura de referência e para as misturas com betume 35/50 com diferentes taxas de reciclagem.

Quadro 5.9 – Módulos de deformabilidade para as misturas com betume 35/50 (Adaptado de Costa-Baptista, 2006)

Módulos de Deformabilidade (Mpa)									
Designação da Mistura	Temperatura = 15°C			Temperatura = 25°C			Temperatura = 40°C		
	10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
LA	10838	10482	7071	7024	5670	3401	2314	1737	1078
LB	11145	10943	8056	8258	7434	4977	3481	2684	1729
LC	11200	10843	8464	9301	8351	5912	4085	3247	2160
LD	11127	10490	8114	8793	8372	5707	4606	3692	2402

Como se verifica pelos resultados do Quadro 5.9, as misturas betuminosas recicladas independentemente da percentagem de reciclagem, apresentam sempre módulos de deformabilidade superiores aos da mistura betuminosa nova. Para a temperatura de 40°C é bem visível a influência das taxas de reciclagem, resultado da maior rigidez do ligante final.

Do estudo realizado às 8 misturas, foi ainda possível concluir que para a mesma taxa de reciclagem de material, os módulos de deformabilidade são tanto menores, quanto menor for a dureza do betume (menores módulos para o betume 70/100), como seria de esperar.

No que diz respeito às leis da fadiga, as misturas betuminosas recicladas também apresentaram melhores comportamentos à fadiga, como se pode ver pela Figura 5.3. O comportamento à fadiga foi tanto melhor quanto menor grau de dureza do betume. Assim, as misturas betuminosas recicladas com betume 70/100 foram as que apresentaram os melhores resultados. Os valores foram ao encontro do que seria de esperar, betumes menos duros apresentam melhores comportamentos em relação à fadiga.

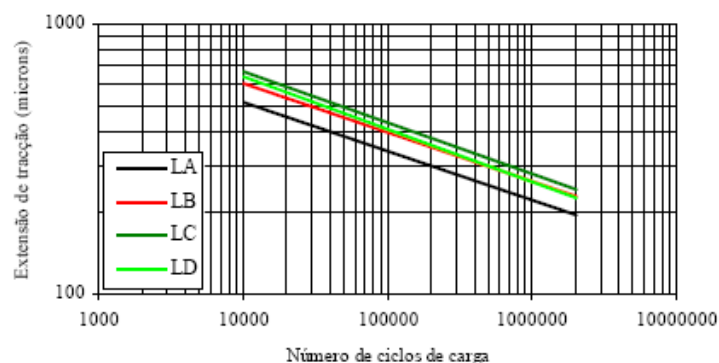


Figura 5.3 – Representação gráfica das leis da fadiga para as misturas com betume 35/50 (Costa-Baptista, 2006)

Foi ainda analisado o comportamento das 8 misturas betuminosas à deformação permanente. Verificou-se que o comportamento à deformação permanente melhora ligeiramente com o aumento da taxa de reciclagem para o mesmo tipo de betume.

Globalmente, as misturas betuminosas com betume menos duro (70/100) e com mais altas taxas de reciclagem (30% e 40%) foram aquelas que apresentaram melhores comportamentos aos três parâmetros analisados.

Verifica-se assim, que para incorporações de material fresado mais altas, a opção por um betume de adição mais brando, além de um bom comportamento à fadiga, consegue um desempenho à deformação permanente satisfatório mesmo sem aumento da rigidez da mistura (Costa-Baptista, 2006).

d) Avaliação das Características Mecânicas de Misturas Recicladas a Quente em Central – Picado-Santos & Pereira (2006)

O trabalho desenvolvido teve por objectivo comparar o comportamento das misturas betuminosas recicladas a quente em central com uma mistura betuminosa nova fabricada a quente em central. Para tal, foram analisados e comparados três parâmetros diferentes: módulo de deformabilidade, leis da fadiga e deformação permanente.

As misturas analisadas foram:

- A2 – mistura betuminosa nova;
- C1 – mistura betuminosa com incorporação de 30% de material fresado;
- D1 – mistura betuminosa com incorporação de 40% de material fresado.

Os módulos de deformabilidade das misturas foram obtidos utilizando três frequências diferentes (1Hz, 5Hz, 10 Hz) e considerando três temperaturas (15°C; 25°C e 40°C), as quais são representativas das temperaturas observadas em Portugal Continental.

Como pode ser observado na Figura 5.4, a mistura com incorporação de 40% de material fresado é aquela que apresenta maiores valores de módulo de deformabilidade. Isto deve-se ao facto da mistura betuminosa reciclada possuir material recuperado do pavimento anterior, que é mais rígido do que o material novo. E por isso, quanto maior a percentagem de incorporação de material fresado nas misturas betuminosas, maior será o seu módulo de deformabilidade.

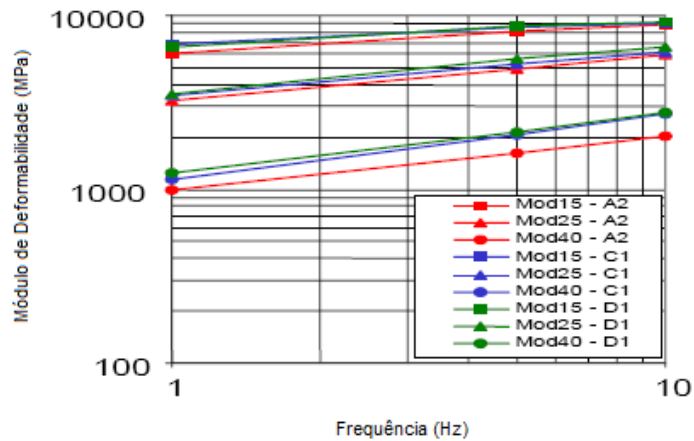


Figura 5.4 – Módulo de deformabilidade das misturas (Picado-Santos & Pereira, 2006)

Pela análise das leis da fadiga (Figura 5.5), as misturas com incorporação de material fresado também apresentam melhores resultados quando comparadas com uma mistura nova, sendo que a mistura com incorporação de 40% de material fresado é aquela que apresenta valores mais elevados. Estes valores são o resultado de uma maior quantidade de betume presente nas misturas recicladas.

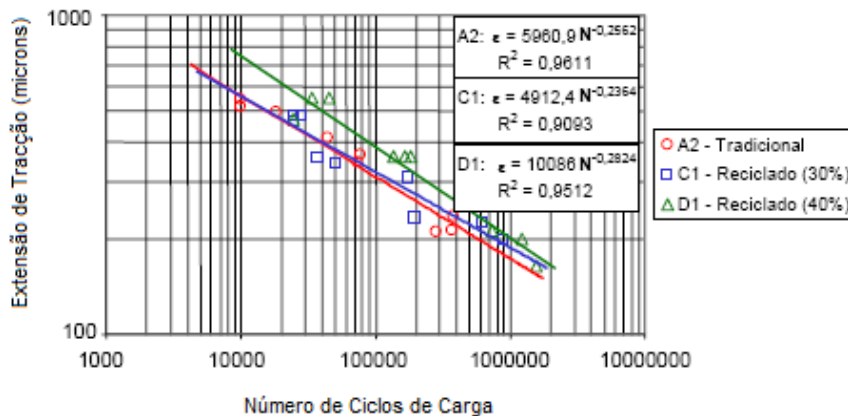


Figura 5.5 – Leis da fadiga das misturas betuminosas (Picado-Santos & Pereira, 2006)

A Figura 5.6 mostra um desempenho superior das misturas betuminosas recicladas a quente em central relativamente à mistura betuminosa nova, desta vez no que diz respeito à deformação permanente.

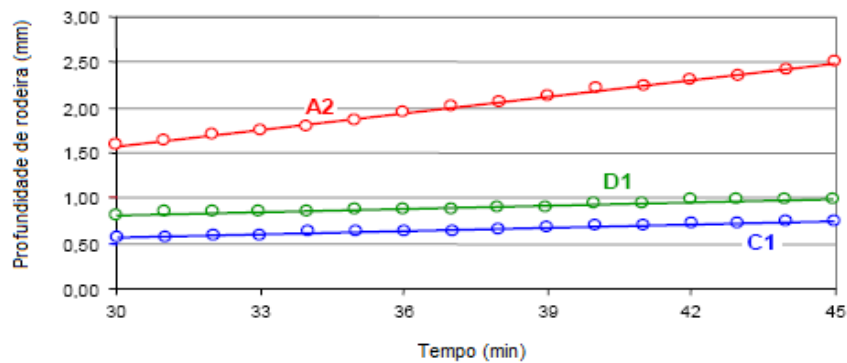


Figura 5.6 – Deformação permanente das misturas betuminosas (Picado-Santos & Pereira, 2006)

Para os três parâmetros avaliados, em todos eles as misturas betuminosas recicladas a quente em central obtiveram melhores resultados quando comparados com a mistura nova obtida em central a quente.

5.2 Apresentação de Caso de Estudo da Análise Económica das Técnicas de Reciclagem

a) Análise Económica das Técnicas de Reciclagem – Picado-Santos & Pereira, (2006)

Nesta fase do trabalho são apresentados dois casos de reabilitação de pavimentos flexíveis degradados e analisados os custos associados a cada uma das soluções propostas para a reabilitação desses mesmos pavimentos. Para o primeiro caso (Figura 5.7) as técnicas de reabilitação estrutural comparadas são uma solução tradicional e a técnica de reabilitação em central a quente, enquanto para o segundo caso (Figura 5.8) temos uma solução tradicional e a técnica de reciclagem *in situ* a frio com emulsão betuminosa.

No primeiro caso, o pavimento degradado apresentava as seguintes características:

- Extensão de 10 km, com duas vias de 8 metros de largura e uma área total de 160m²;
- Apresentava fendas com 10 cm de comprimento, desde a camada de desgaste até à base. A sub-base e a fundação apresentavam-se em boas condições.

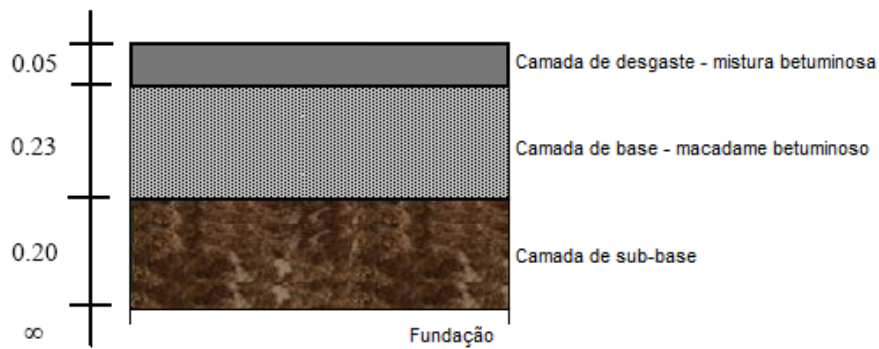


Figura 5.7 – Estrutura do pavimento degradado – Caso 1 (Adaptado de Picado-Santos & Pereira, 2006)

No segundo caso, o pavimento degradado apresentava as seguintes características:

- Extensão total de 10 Km, com 8 metros de largura, resultando numa área total 80,000m²;
- Pavimento em avançado estado de degradação, com fendas de 26cm.

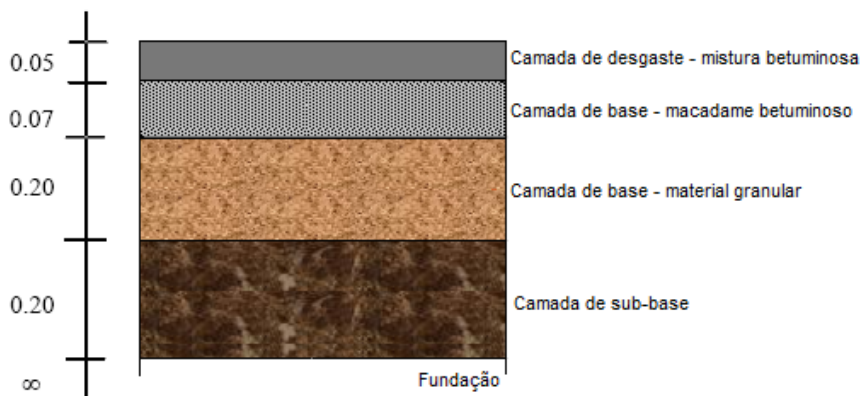


Figura 5.8 – Estrutura do pavimento degradado – Caso 2 (Adaptado de Picado-Santos & Pereira, 2006)

Para a técnica de reciclagem em central a quente foi considerada uma taxa de 40% de incorporação de material fresado na nova mistura betuminosa. O dimensionamento dos pavimentos reabilitados foi feito com base no método preconizado pela Shell para o dimensionamento de pavimentos. As espessuras das novas camadas encontram-se no Quadro 5.10.

Quadro 5.10 – Espessura das novas camadas (cm) (Adaptado de Picado-Santos & Pereira, 2006)

Reabilitação Pavimento Degradado				
Novas Camadas	Caso 1		Caso 2	
	Solução tradicional	Reciclagem em central a quente	Solução tradicional	Reciclagem "in situ" a frio com emulsão betuminosa
Desgaste	5	2	5	5
Base	16	14	10	15

De seguida foi feita a análise aos custos de cada uma das soluções, para cada um dos casos, tendo em consideração o custo das misturas betuminosas e das emulsões betuminosas em Portugal para o ano de 2004. No caso 2, para a solução tradicional foi aplicada uma SAMI - (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*), com influência no respectivo custo final. Os custos finais são apresentados no Quadro 5.11 e no Quadro 5.12.

Quadro 5.11 – Custo final associado a cada uma das alternativas de reabilitação – Caso 1 (Adaptado de Picado-Santos & Pereira, 2006)

Custo da Reabilitação - Caso 1		
Camada	Solução tradicional	Reciclagem em central a quente
Desgaste	800.000,00 €	352.000,00 €
Regularização	1.232.000,00 €	1.097.600,00 €
Custo total	2.032.000,00 €	1.449.600,00 €
Diferença de custo		582.400,00 €

Quadro 5.12 – Custo final associado a cada uma das alternativas de reabilitação – Caso 2 (Adaptado de Picado-Santos & Pereira, 2006)

Custo da Reabilitação - Caso 2		
Camada	Solução tradicional	Reciclagem "in situ" a frio com emulsão betuminosa
Desgaste	400.000,00 €	400.000,00 €
Regularização	560.000,00 €	240.000,00 €
SAMI	80.000,00 €	
Custo total	1.040.000,00 €	640.000,00 €
Diferença de custo		400.000,00 €

Nos dois casos de estudo apresentados, as técnicas de reciclagem mostraram ser vantajosas, do ponto de vista económico, quando comparadas com uma solução tradicional de reabilitação de um pavimento flexível degradado (Figura 5.9). A técnica de reciclagem em central a quente (Caso 1) permitiu uma redução de aproximadamente 30% nos custos finais, enquanto na técnica de reciclagem *in situ* a frio com emulsão betuminosa (Caso 2) a redução foi ainda maior, de aproximadamente 40%.

Para estes dois casos não foram considerados os custos de transporte nem os custos de depósito do material fresado em vazadoiro, o que teria como consequência percentagens ainda maiores de redução dos custos finais.

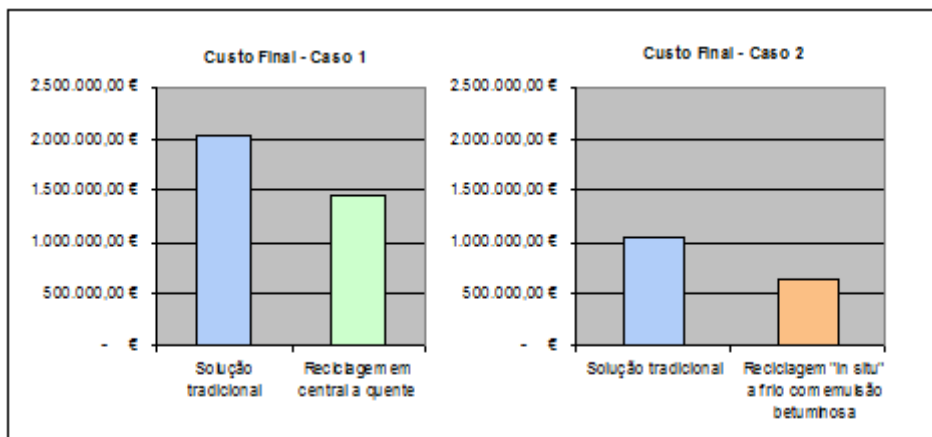


Figura 5.9 – Custos finais para cada uma das alternativas de reabilitação – Caso 1 e Caso 2 (Adaptado de Picado-Santos & Pereira, 2006)

5.3 Principais Conclusões no âmbito dos Diferentes Tipos de Reciclagem. Vantagens e Desvantagens dos Diferentes Tipos de Reciclagem

Cada técnica de reciclagem apresenta determinadas especificidades, em termos construtivos, de desempenho, ambientais e até mesmo económicos, que fazem com que essa mesma técnica de reciclagem possa ser uma solução viável para um determinado caso de reabilitação de um pavimento. Ou seja, pode-se dizer que a escolha da técnica de reciclagem mais adequada está dependente das características do pavimento degradado, das características que se pretende para o futuro pavimento, dos equipamentos disponíveis e dos recursos económicos disponibilizados.

Em termos de qualidade e de desempenho, foi possível aferir que as misturas betuminosas recicladas em central a quente são aquelas que apresentam os melhores resultados. Estas misturas são frequentemente apresentadas como tendo comportamento ao nível das misturas betuminosas novas. Para os dois casos de estudo apresentados relativos às misturas betuminosas recicladas em central a quente, os resultados mostraram um comportamento não ao mesmo nível, mas superior, em termos de módulos de deformabilidade, leis da fadiga e deformação permanente. Foi ainda possível concluir, que este comportamento é tanto melhor, quanto maior é a taxa de incorporação de material reciclado e que esta depende da dureza do betume utilizado como ligante.

A técnica em central a quente, de entre todos os tipos de reciclagem, não só é aquela que consegue dar resposta eficaz a um maior número de tipos de degradações de um pavimento flexível, como é também uma alternativa de reabilitação capaz de responder a avançados estados de degradação dos pavimentos.

Relativamente ao comportamento das misturas betuminosas recicladas *in situ* a frio, os resultados não são unânimes, variando o seu comportamento entre um agregado de granulometria extensa e uma mistura betuminosa aberta a frio. No que diz respeito a estas misturas, verificou-se que não existem muitos estudos de acompanhamento, de modo a aferir o seu real comportamento após a entrada em serviço do pavimento reabilitado, e ao longo do tempo de serviço, o que poderá justificar a falta de consensualidade. Na verdade, existem vários casos de estudo realizados em laboratório, mas os resultados obtidos são influenciados pela natureza do próprio local onde são realizados (o laboratório, onde todo o processo é controlado e não se verifica a influência de factores externos ao processo). Ora, tal não acontece quando se trata de executar uma camada reciclada *in situ* a frio, em que não existe a possibilidade de controlar factores externos, mas que têm grande influência em todo o processo de reciclagem *in situ* a frio, daí que os resultados obtidos em laboratório não possam ser considerados como representativos do real desempenho destas misturas recicladas.

De entre as misturas recicladas *in situ* a frio, foi possível concluir que as que utilizam como ligante o cimento, são aquelas que apresentam maiores resistências, sem ser necessário para isso recorrer a uma camada reciclada com elevada espessura. Mas estas camadas tratadas com cimento apresentam propensão para o aparecimento de fendas por retracção dos materiais que as constituem e por serem mais rígidas, não se adaptam tão bem às irregularidades ou deformações que a camada subjacente possa apresentar. Nesse aspecto, as camadas recicladas com uma emulsão betuminosa ou com espuma de betume são apresentadas como sendo mais flexíveis.

É possível aferir, que o ligante utilizado na reciclagem *in situ* a frio, assume papel preponderante no que diz respeito às características da camada reciclada. Mas esta preponderância não diz respeito apenas aos aspectos relacionados com o desempenho da camada reciclada. Também em termos económicos, a utilização de determinado tipo de ligante, em detrimento de outro tem consequências. O cimento é o mais barato, seguido da espuma de betume e por último a emulsão betuminosa, que representa um custo mais elevado.

Globalmente, a técnica de reciclagem tende a ser mais económica, face a uma solução de reabilitação mais tradicional, com fresagem do pavimento e aplicação de uma nova camada de reforço. Os resultados demonstram uma redução nos custos de cerca de 30% para a reciclagem em central a quente e de 40% para a reciclagem *in situ* a frio com emulsão.

6 Considerações Finais e Trabalhos Futuros

6.1 Considerações Gerais

Com a elaboração do presente trabalho pretendeu-se contribuir para a discussão da utilização de novas técnicas de conservação/reabilitação dos pavimentos rodoviários flexíveis, tendo em consideração que a solução escolhida para a reabilitação de um pavimento flexível degradado deve ter em consideração factores de índole económica, técnica e ambiental. Nesse âmbito, foi efectuado um aprofundamento dos conhecimentos quanto à possível utilização da reciclagem dos pavimentos, a qual se subdivide em diferentes tipos de reciclagem, que por sua vez conduzem a diferentes respostas a cada um destes factores supracitados.

Desde logo, no caso da técnica de reciclagem *in situ* a quente, que ao contrário de todos os outros tipos, não é uma técnica de reabilitação estrutural de pavimentos flexíveis, reutiliza o material proveniente do pavimento antigo, mas apenas ao nível da camada de desgaste. Trata-se de uma técnica de conservação das características superficiais.

Em termos de desempenho estrutural, quando aplicada em camadas do novo pavimento reabilitado, as misturas betuminosas actuam ao nível da camada de base, contribuindo para um aumento da capacidade resistente do pavimento. As misturas betuminosas recicladas em central a quente são aquelas que apresentam melhores resultados, podendo mesmo ser utilizadas não só ao nível das camadas de base, mas também em camadas de regularização e de desgaste.

Do ponto de vista económico, conclui-se que para a reabilitação estrutural de um pavimento degradado, a técnica de reciclagem é tendencialmente mais barata que uma solução tradicional. Os valores podem contemplar a uma redução da ordem dos 40%, dependendo sempre do tipo de reciclagem. No caso da reciclagem em central, este aspecto torna-se muito importante, na medida em que as distâncias a percorrer entre o local da obra e a central, podem ser de tal modo grandes, com custos associados, que tornam este tipo de reciclagem inviável em termos económicos.

A reciclagem, ao possibilitar a incorporação de material fresado de pavimentos antigos, torna-se desde logo vantajosa em termos ambientais, face a outras técnicas de reabilitação estrutural, na medida em que contribui para a eliminação de zonas de vazadouro, as quais são uma consequência directa de actividades de construção civil. Mas mais uma vez, nem todos os tipos de reciclagem respondem do mesmo modo em termos ambientais.

No que diz respeito, às taxas de reciclagem, a reciclagem *in situ* a frio permite a reutilização de todo o material fresado na estrutura do novo pavimento, ou seja, taxas de reciclagem de 100%. O que não se verifica para as técnicas em central, onde a taxa máxima de reutilização não vai além dos 70%. A adicionar a este aspecto há ainda as questões relacionadas com a emissão de gases poluentes. Nas técnicas a quente, os agregados fresados cobertos de betume, provenientes do pavimento antigo são aquecidos. Ao serem aquecidos libertam gases tóxicos, daí que estas técnicas sejam mais poluentes.

Pode-se assim concluir, que em termos económicos e ambientais a reciclagem *in situ* a frio é aquela que apresenta mais vantagens, mas em termos de desempenho, a técnica a quente em central é aquela que apresenta os melhores resultados, sendo que qualquer uma delas, permite a reabilitação das características estruturais de um pavimento flexível.

6.2 *Desenvolvimentos Futuros*

Considera-se face ao conhecimento adquirido e exposto no presente trabalho, a apresentação de possíveis caminhos de investigação com vista à optimização das diferentes técnicas de reciclagem, que se sugerem para futuros trabalhos:

1. Generalizar a nível nacional o estudo do desempenho das misturas betuminosas fabricadas com materiais provenientes de camadas recicladas, nomeadamente à fadiga e à deformação permanente;
2. Acompanhamento em obra, do fabrico e aplicação dos materiais cuja constituição apresente materiais reciclados de pavimentos existentes;
3. Avaliação do comportamento *in situ* dos pavimentos, cujas camadas tenham sido realizadas com a utilização de materiais reciclados provenientes de pavimentos existentes, através da instrumentação de pavimentos;
4. Aprofundamento do estudo de parâmetros para o dimensionamento de pavimentos com a incorporação de material reciclado, segundo a técnica de reciclagem adoptada;
5. Desenvolvimento de novos equipamentos de reciclagem e/ou melhoria dos equipamentos existentes, nomeadamente no que diz respeito às técnicas em central, com a finalidade de permitir a incorporação de uma maior percentagem de material fresado, sem que isso seja sinónimo de emissão de gases poluentes para a atmosfera.

7 Bibliografia

Alkins, A.; Lane, B.; Kazmierowski, T. - *Sustainable Pavements- Environmental, Economic and Social Benefits of In-Situ Pavement Recycling*. Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Canada, 2008. (Alkins *et al.*, 2008).

American Association of State Highway and Transportation Officials. - *Maintenance Management 2006*. Maintenance Management Conference, South Carolina, USA, 2006. (AASHTO, 2006).

ARRA@. Acedido em Setembro de 2009 em <http://www.arra.org/>.

Azevedo, M.; Cardoso, M - *Reciclagem a Quente em Central Betuminosa*. Actas das II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2003. (Azevedo & Cardoso, 2003).

Azevedo, M. - *Construção e Reabilitação de Pavimentos – Ligantes Betuminosos*. Documento Base, INIR, Lisboa, 2009. (Azevedo, 2009a).

Azevedo, M. - *Construção e Reabilitação de Pavimentos – Reciclagem de Pavimentos*. Documento Base, INIR, Lisboa, 2009. (Azevedo, 2009b).

Baptista, D. - *Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central na Rede Brisa*. 2^{as} Jornadas Cepsa Betumes /CRP. Lisboa, 2009. (Baptista, 2009).

Baptista, T.; Delgado, J. - *Beneficiação de Pavimentos Utilizando Misturas Betuminosas com Betume Borracha*. Actas das IV Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos – Pavimentos Sustentáveis. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005. (Baptista & Delgado, 2005).

Batista, F. A. - *Misturas Betuminosas Densas a Frio*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2004 (Baptista, 2004).

Batista, F. A. - *Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2005 (Baptista, 2005).

Batista, F. A.; Antunes, M. - *Reciclagem de Pavimentos Utilizando Ligantes Betuminosos*. 2^{as} Jornadas Cepsa Betumes /CRP, Lisboa, 2009. (Batista & Antunes, 2009).

Batista, F.A.; Antunes, M.; Gomes, J.; Almeida, M. - *Reciclagem semi-quente de misturas betuminosas – Formulação e Caracterização do Desempenho*. 2^{as} Jornadas Cepsa Betumes /CRP, Lisboa, 2009. (Batista *et al.*, 2009).

Capitão, S. D. - *Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade – Contribuição para a caracterização do seu comportamento*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 1996. (Capitão, 2006).

Caterpillar@. Acedido em Agosto de 2009 em <http://www.cat.com/products/>. (Caterpillar, 2009).

Cepsa@. Acedido em Maio de 2009 em <http://www.cepsa.com/>. (Cepsa, 2009).

Cordeiro, A. D. - *Reciclagem Semiquente em Central – EN 244 - Entre Ponte de Sôr e o Entroncamento com a EN 118 (Gavião)*. 2^{as} Jornadas Cepsa Betumes, Lisboa, 2009. (Cordeiro, 2009).

Corbet, M.; Lee, S. Q.; Terrel, R. - *New Developments In Hot In-Place Recycling Technology and Specification*. Forty-Third Annual Conference of Canadian Technical Asphalt Association, Vancouver, Canada, 1998. (Corbet *et al.*, 1998).

Costa - Baptista, A. M. - *Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central – Contribuição para o seu Estudo e Aplicação*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil – F.C.T.U.C., Coimbra. (Costa – Baptista, 2006).

Cross, S. A. - *Evaluation of Cold In-Place Recycled Mixtures on US-283*. School of Engineering – University of Kansas, USA, 2000. (Cross, 2000).

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. - *Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos*. Rio de Janeiro, Brasil, 1998. (DNER, 1998).

Department of the Army. - *Pavement Condition Surveys*. Washington DC, USA, (1989). (Department of the Army, 1989).

Department of the Army - *Hot In-Place Recycling of Asphalt Pavements*. Washington DC, USA, 1990. (Department of the Army, 1990).

Engenharia Civil @. Acedido em Junho de 2009 em: <http://www.engenhariacivil.worldpress.com>. (Engenharia Civil, 2009).

European Union Road Federation@. Acedido em Agosto de 2009 em: <http://www.irfnet.eu/>. (EURF, 2009).

Federal Highway Administration - *Cold In-Place Recycling and Full-Depth Recycling with Asphalt Products, Research Report Findings*. Submitted by University of Illinois, USA, 2009. (FHWA, 2009).

Fonseca, P. - *Reciclagem de Pavimentos Rodoviários*. RECIPAV, Cartaxo, 2002. (Fonseca, 2002).

Fonseca, P. - *A Reciclagem de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha: A Experiência Americana*. Actas das IV Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos – Pavimentos Sustentáveis. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005. (Fonseca, 2005).

Freire, A.C. - *Agregados para Misturas Betuminosas*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica, 2004. (Freire, 2004).

Gomes, L. S. - *Reciclagem de Misturas Betuminosas a Quente em Central*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005. (Gomes, 2005).

Jacobson, T. - *Cold Recycling of Asphalt Pavement – Mix in Plant*. Swedish National Road and Transport Research Institute, Suécia, 2002. (Jacobson, 2002).

Jenkins, K.; Derbyshire R; Bondietti M. - *Investigation of the Early Performance Properties of a Pavement, Recycled with Foamed Bitumen and Emulsion Through Field Testing*. South African Transport Conference, Africa do Sul, 2000. (Jenkins *et al.*, 2000).

Jiménez, F. E. – *Reciclado in situ com Emulsión. Análisis de su Compartamiento. Comparación Resultados de Laboratorio y Obra*. Actas das II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto 2003. (Jiménez, 2003).

Jiménez, F. E. - *Manual de Pavimentação*. CEPESA Betumes, CEPESA Portuguesa Petróleos, S.A., Lisboa, 2007. (Jimenes, 2007).

Laboratório Nacional de Engenharia Civil. - *Eficiência e Durabilidade de Técnicas de Conservação e Reabilitação de Pavimentos*. Lisboa, 2005. (LNEC, 2005).

Lewis, A. J.; Collings, D. C. - *Cold in Place Recycling: A Relevant Process for Road Rehabilitation and Upgrading*. 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa. Africa do Sul, 1999. (Lewis & Collings, 1999).

Marte@. Acedido em Julho de 2009 em.
http://www.martec.ca/technology/asphalt_recycling_techniques.htm. (Martec, 2009).

Miranda, H. M. B. - *Resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Alta Percentagem de Borracha*. Tese de Mestrado em Transportes, Instituto Superior Tecnico, Universidade Tecnica de Lisboa, Lisboa (Miranda, 2008).

Miranda, V.; Pereira P. - *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*. Departamento de Engenharia Civil – Universidade do Minho, Braga, 1999. (Miranda & Pereira, 1999).

Normas del Laboratorio de Transportes. NLT – 161: *Resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas* – CEDEX, 1998 (NLT -161/98).

Nunes, A. - *Guia de Apoio da Reciclagem de Pavimentos com Cimento*. Actas das IV Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos – Pavimentos Sustentáveis. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005. (Nunes, 2005).

Nunes, H. P.; Dueñas, A. P. - *Reciclagem com Rejuvenescedores*. Actas das IV Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos – Pavimentos Sustentáveis. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005. (Nunes & Dueñas, 2005).

Nunes, M. G. - *Reciclagem de Pavimentos “in situ” a Frio com Emulsão Betuminosa – A Experiência Portuguesa*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa. (Nunes, 2008).

Pais, J.C.; Fontes, L.P.T.L; Trichês, G.; Pereira, P.A. - *Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha através do Processo Húmido*. XIV Congresso Ibero-Americano del Asfalto. Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba, Cuba, 2007. (Pais *et al.*, 2007).

Pais, J.C.; Pereira, P. - *Influência do Tipo de Agregado e Ligante no Comportamento das Misturas Betuminosas*. Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, 2004. (Pais & Pereira, 2004).

Paul, I.; Simões, R. - *Aplicação da Técnica de Reciclagem de Pavimentos in situ com Cimento, na beneficiação da EN383*. Actas das II Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos – Pavimentos Sustentáveis. Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, 2003. (Paul & Simões, 2003).

Pereira, P.; Pais, J.; Pestana C. - *Reabilitação de Pavimentos Utilizando Misturas Betuminosas com Betumes Modificados*. Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, 2006. (Pereira *et al.*, 2006).

Pereira, P.; Moreira, J. - *Reutilização de Material Fresado em Camadas Estruturais de Pavimento – Novas Perspectivas*. VI Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2007. (Pereira & Moreira, 2007).

Pereira, P.; Oliveira J.; Silva, H. - *Pavement Recycling: an Environmentally Sustainable Rehabilitation Alternative*. Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, 2007. (Pereira *et al.*, 2007).

Picado-Santos, L.; Pereira, P. - *Technical-Economical Evaluation of Pavement Recycling Alternatives*. Third Gulf Conference on Roads, 2006. (Picado-Santos & Pereira, 2006).

Picado-Santos, L.; Branco, F.; Pereira, P. - *Pavimentos Rodoviários*. Almedina, Coimbra, 2008. (Picado-Santos *et al.*, 2008).

Picado-Santos, L; Baptista, A. M. - *Formulação de Misturas Betuminosas Recicladas a Quente*. 2008. (Picado-Santos & Baptista, 2008).

Picado-Santos, L.; Baptista, A. M. - *Misturas Betuminosas a Quente com Alta Incorporação de Material Fresado*. 2^{as} *Jornadas Cepsa Betumes /CRP*, Lisboa, 2009. (Picado-Santos & Baptista, 2009).

Rastelli, S.; Giuliani, F. - *An Analytical Approach to Evaluate the Performance of Cold Recycled Asphalt Mixtures*. International RILEM Conference on the Use of Materials in Buildings and Structures. RILEM Publications, Bagnaux, France, 1^o Volume pp.13-22, 2004. (Rastelli & Giuliani, 2004).

Recipav. - *A Utilização do Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus em Portugal*. Cartaxo, 2004. (Recipav, 2004).

Ribeiro, J. Q. - *Reciclagem a Frio com Espuma Betume*. Actas das II Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos – Pavimentos Sustentáveis. Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, 2003. (Ribeiro, 2003).

Saleh, M. F. - *Experimental Investigation of Bitumen Physical Properties on Foamability and Mechanical Properties of Foam Bitumen Stabilizes Mixes*. Department of Civil Engineering – University of Canterbury, Nova Zelandia, 2006. (Saleh, 2006).

Seixas, P. - *Reciclagem de Pavimentos com Espuma de Betume – Uma Experiência a Grande Altitude, Cordilheira dos Andes, Peru*. Mota-Engil, Pavimentações, S.A., Porto, 2008. (Seixas, 2008).

Schmidt, C.; Shuler, S. - *A Study of the Performance of Three Asphalt Pavement Rehabilitation Strategies*". Colorado State University, USA, 2009. (Schmidt e Shuler, 2009).

Suleiman, N. - *A State-of-the-Art Review of Cold in Place Recycling of Asphalt Pavements in Northern Plains Region*. Department of Civil Engineering – University of North Dakota, USA, 2002. (Suleiman, 2002).

Teixeira, M. S. - *A Utilização de Espumas de Betume na Reciclagem de Pavimentos Flexíveis*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2006. (Teixeira, 2006).

Trindade, M. - *Pavimentação entre Canas de Senhorim e o IP3*. Estradas de Portugal S.A., Almada, 2007. (Trindade, 2007).

United States Department of Defense – *Standard Practice Manual for Flexible Pavements*. USA, 2001. (USDD, 2001).

Vicente, A. M. - *A Utilização de Betumes Modificados com Borracha na Reabilitação de Pavimentos Flexíveis*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2006. (Vicente, 2006).

Vieira, L. - *Pavimentação – Reciclagem Semiquente em Central*. Actas das II Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos – Pavimentos Sustentáveis. Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, 2003. (Vieira, 2003).

Washington State Department of Transportation - *Flexible Pavement Distress*. Acedido em Setembro de 2009 em:

http://training.ce.washington.edu/wsdot/modules/09_pavement_evaluation/09-7_body.htm#slippage_cracking. (WSDOT, 2009a).

Bibliografia

Washington State Department of Transportation - *Flexible Pavement Recycling*.
Acedido em Setembro de 2009 em: <http://training.ce.washington.edu/wsdot/>. (WSDOT, 2009b).

Wirtgen@. Acedido em Junho de 2009 em: <http://www.wirtgen.de/en>. (Wirtgen, 2009).

Wirtgen Group - *Foam Bitumen – The Innovative Technology for Road*. Alemanha, 2001.
(Wirtgen, 2001).

Wirtgen Group - *Cold Recycling Manual*. Alemanha, 2004. (Wirtgen, 2004).