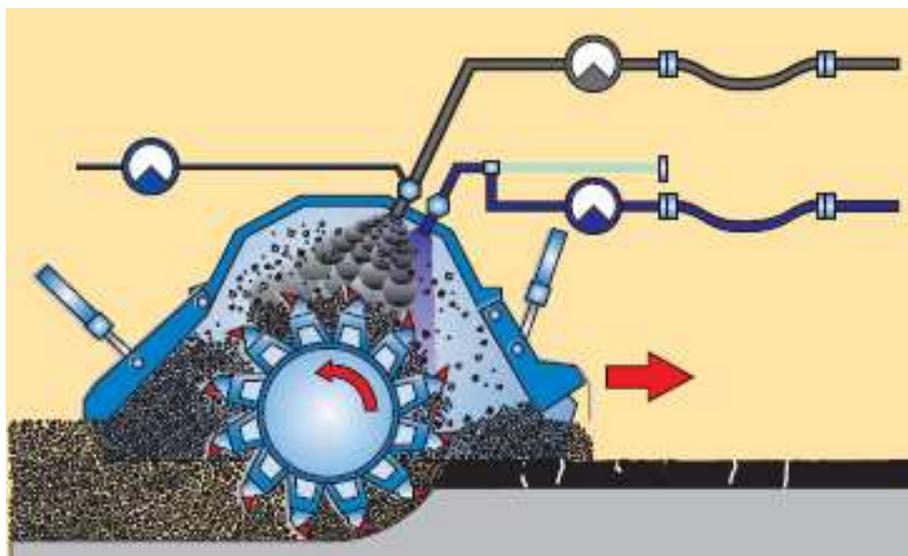




**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Departamento de Engenharia Civil**

**ISEL**



## **Reciclagem de Pavimentos "*in situ*" a Frio com Emulsão Betuminosa – A Experiência Portuguesa**

**MARIA GABRIELA FERREIRA NUNES**  
(Licenciada em Engenharia Civil)

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

**Orientador:**

Investigadora Auxiliar do LNEC, Doutora Fátima Alexandra Barata Antunes Batista

**Co-Orientador:**

Professora Coordenadora c/. agregação do ISEL, Doutora Maria da Graça Alfaro Lopes

**Júri:**

Presidente: Professora Coordenadora do ISEL, Doutora Maria Helena Ferreira Marecos do Monte

Professor Adjunto do ISEC, Doutor Silvino Dias Capitão

Investigadora Auxiliar do LNEC, Doutora Fátima Alexandra Barata Antunes Batista

Professora Coordenadora c/. agregação do ISEL, Doutora Maria da Graça Dias Alfaro Lopes

**Outubro de 2008**



## ERRATA

<b>Página</b>	<b>Linha</b>	<b>Onde se lê</b>	<b>Deve ler-se</b>
13	3	vários estudos no sentido de a tornar	vários estudos com vista a torná-la
21	9	catiónica	catiónicas
22	16	sistema aniónico	sistema catiónico
36	3 a 8	<ul style="list-style-type: none"><li>• Por indisponibilidade de mais material, .... sem imersão;</li></ul>	Deve retirar-se por estar repetido
50	6	chamadas motoscrapers ou <i>motor grader</i>	chamadas "motor graders"
50	13	o_u	ou
55	16	premature de degradações prematuramente	de degradações prematuramente
70	13	materiais onde	materiais, onde
74 e 89	21 e 7	trabalhos de manutenção	trabalhos de conservação
89	15	não necessária	não ser necessária
108	8	48 horas e	48 horas a
111	linha 4	IC-12 Cana de	IC-12 Canas de

---

# **RECICLAGEM DE PAVIMENTOS "IN SITU" A FRIO COM EMULSÃO BETUMINOSA**

## **A EXPERIÊNCIA PORTUGUESA**

### **Agradecimentos**

Este trabalho foi elaborado sob a orientação da Doutora Engenheira Fátima Alexandra Antunes Batista do Laboratório Nacional de Engenharia Civil e sob a co-orientação da Doutora Maria da Graça Alfaro Lopes do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

A ambas agradeço as palavras sábias e a constante disponibilidade com que me motivaram, sem as quais dificilmente teria conseguido levar esta tarefa até ao fim.

Gostaria de expressar o meu reconhecimento ao LNEC, pelos meios postos à disposição e às pessoas que contribuíram directa e indirectamente para a sua realização.

Não posso esquecer o Eng.º Joel Oliveira, Prof. Auxiliar na Universidade do Minho, pela pronta resposta com que esclareceu as dúvidas que lhe coloquei através dos meus e-mails, assim como ao Eng.º Orlando Gonçalves e Eng.ª Anabela Namorado da Estradas de Portugal pelos elementos fornecidos.

Quero deixar também um agradecimento muito especial pelos seus oportunos conselhos e sugestões, ao Doutor Henri Ruchot des Champs que acompanhou sempre de perto este trabalho.

E ainda, a todas as pessoas que contactei pela internet no continente americano, em particular nos Estados Unidos, pois, para além de me terem fornecido o material de trabalho e Web sites que solicitei, ainda me enviaram na maioria das vezes informação complementar.

---

Resumo da Tese apresentada ao CC/ISEL como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil (M.Sc.)

## **RECICLAGEM DE PAVIMENTOS "IN SITU" A FRIO COM EMULSÃO BETUMINOSA**

### **A EXPERIÊNCIA PORTUGUESA**

**PALAVRAS-CHAVE:** Pavimentos rodoviários; Reabilitação de pavimentos; Reciclagem "*in situ*" a frio; Emulsões betuminosas.

Esta dissertação procura documentar a experiência portuguesa na reciclagem "*in situ*", a frio, de pavimentos flexíveis com recurso a emulsões betuminosas, desde a primeira destas obras realizada no nosso país, em 1993, até ao presente.

Assim, principia-se por elaborar uma revisão bibliográfica dos temas associados ao assunto central, sendo de seguida expostos os principais conceitos sobre misturas recicladas a frio com emulsão betuminosa e, por último, passadas em revista as normas e especificações técnicas a que devem obedecer, que mais comumente entre nós se aplicam.

Numa segunda fase, são examinadas as principais obras que em Portugal se executaram por este processo. Neste âmbito, descrevem-se os vários materiais utilizados nas misturas recicladas: materiais fresados dos pavimentos; materiais correctivos; e ligantes (emulsão betuminosa e cimento). Nos casos em que foi possível obter os elementos necessários a tal, são ainda apresentados os respectivos estudos de formulação. Prossegue-se fazendo a descrição de aspectos relativos ao processo construtivo, tais como, forma de adição do material correctivo, equipamento utilizado na reciclagem do pavimento (máquina recicladora), equipamento de compactação, faseamento dos trabalhos de ocupação da via, tempo de encerramento ao tráfego, etc.

---

Questões relacionadas com o processo de cura e com o desempenho das misturas recicladas a frio com emulsão betuminosa, são também, analisadas.

Finalmente, termina-se fazendo um balanço geral de toda a experiência que sobre esta matéria até à data entre nós se adquiriu, extraindo-se dela as conclusões que se afiguraram mais pertinentes.

Abstract of Thesis presented to CC/ISEL as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

**"IN SITU" PAVEMENT COLD RECYCLING WITH BITUMINOUS EMULSIONS**  
THE PORTUGUESE EXPERIENCE

**KEY-WORDS:** Road pavement; Pavement rehabilitation; *"In situ"* cold recycling; Bituminous emulsions

This dissertation has the purpose of documenting the experience gained in Portugal on flexible pavement "in situ" cold recycling based on bituminous emulsions, since the first of the works in which this process was used, in 1993.

It begins by the result of a bibliographic research of the associated issues to the main theme, followed by the main concepts of cold recycled mixes using bituminous emulsions and in the end the most applicable standards and technical specifications in Portugal are reviewed.

In a second phase, the main works carried out in Portugal in which this process was used are examined. To achieve this, the several materials used in the recycled mixes are described: reclaimed asphalt pavement materials; corrective materials; and binders (bituminous emulsions and cement). In cases in which it was possible to obtain the necessary information, the respective mix design studies are presented. The dissertation then carries by describing aspects related to construction processes, such as, how to add the corrective material, recycling equipment used, compaction equipment, road works phasing, traffic interdiction time, etc. Matters related to the curing process and to the

---

performance of cold recycled mixes with bituminous emulsion, are also carefully analysed.

At last, a general overview of all the experience gained in Portugal on this field until nowadays is made, and thereby the most important conclusions are presented.

# RECICLAGEM DE PAVIMENTOS "IN SITU" A FRIO COM EMULSÃO BETUMINOSA

A EXPERIÊNCIA PORTUGUESA

## ÍNDICE DE GERAL

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objectivos do trabalho	4
1.3. Organização do trabalho	5
<b>2. MISTURAS RECICLADAS A FRIO "IN SITU" COM EMULSÃO BETUMINOSA</b>	<b>7</b>
2.1. Considerações iniciais	7
2.2. Descrição da técnica de reciclagem a frio "in situ" com emulsão betuminosa	8
2.3. Materiais utilizados na mistura reciclada a frio "in situ" com emulsão betuminosa	16
2.3.1. Material fresado do pavimento	16
2.3.2. Emulsões betuminosas	19
2.3.3. Água	28
2.3.4. Materiais correctivos e outros	29
2.4. Formulação das misturas recicladas	32
2.5. Aspectos construtivos da reciclagem	40
2.6. Equipamentos usados nas obras de reciclagem	44
2.6.1. Recicladoras	44
2.6.2. Motoniveladoras	49
2.6.3. Misturadoras	51
2.6.4. Equipamentos de compactação	53
2.7. Controlo de qualidade	55
2.8. Evolução do comportamento das misturas recicladas a frio "in situ" com emulsão betuminosa durante o processo de cura	58
<b>3. OBRAS DE RECICLAGEM "IN SITU" A FRIO COM EMULSÃO BETUMINOSA EM PORTUGAL</b>	<b>63</b>
3.1. Introdução	63
3.2. EN12 – Estrada de circunvalação do Porto	63
3.2.1. Descrição sumária da obra	63
3.2.2. Formulação da mistura reciclada	65
3.2.3. Aspectos construtivos desta obra	65
3.2.4. Principais conclusões	66

---

<b>3.3.</b>	<b>EN222 – Régua/Ponte das Bateiras</b>	<b>67</b>
3.3.1.	Descrição sumária da obra	67
3.3.2.	Formulação da mistura reciclada	69
3.3.3.	Conclusões	70
<b>3.4.</b>	<b>EN108 – Porto/Entre-os-Rios</b>	<b>70</b>
3.4.1.	Descrição sumária da obra	70
3.4.2.	Formulação da mistura reciclada	72
3.4.3.	Aspectos construtivos desta obra	72
3.4.4.	Caracterização estrutural do pavimento reabilitado	73
<b>3.5.</b>	<b>EN 260 – Serpa/Vila Verde de Ficalho</b>	<b>74</b>
3.5.1.	Descrição sumária da obra	74
3.5.2.	Caracterização dos materiais empregados	76
3.5.3.	Formulação da mistura reciclada	77
3.5.4.	Aspectos construtivos desta obra	78
3.5.5.	Caracterização da camada reciclada	79
3.5.6.	Conclusões	80
<b>3.6.</b>	<b>EN254 – Aguiar/Viana do Alentejo</b>	<b>82</b>
3.6.1.	Descrição sumária da obra	82
3.6.2.	Formulação da mistura reciclada	83
3.6.3.	Aspectos construtivos desta obra	84
3.6.4.	Controlo de qualidade	84
3.6.5.	Conclusões	85
<b>3.7.</b>	<b>IP2 – Barragem do Fratel/EN118</b>	<b>86</b>
3.7.1.	Descrição sumária da obra	86
3.7.2.	Caracterização dos materiais empregados	89
3.7.3.	Formulação da mistura reciclada	90
3.7.4.	Aspectos construtivos desta obra	91
3.7.5.	Características da mistura reciclada	92
3.7.6.	Controlo de qualidade	93
3.7.7.	Abertura ao tráfego e colocação das ultimas camadas	94
<b>3.8.</b>	<b>EN 114 – Montemor-o-Novo/nó poente da A6-Évora</b>	<b>94</b>
3.8.1.	Descrição sumária da obra	94
3.8.2.	Formulação da mistura reciclada	97
3.8.3.	Controlo de qualidade	98
<b>3.9.</b>	<b>EN 222 – Ameias/Barragem de Crestuma-Lever</b>	<b>98</b>
3.9.1.	Descrição sumária da obra	98
3.9.2.	Formulação da mistura reciclada	100
<b>3.10.</b>	<b>IC12 – Canas de Senhorim/IP3</b>	<b>100</b>
3.10.1.	Descrição sumária da obra	100
3.10.2.	Formulação da mistura reciclada	103
3.10.3.	Aspectos construtivos e do controlo de qualidade desta obra	103
3.10.4.	Conclusões	106
<b>3.11.</b>	<b>ANÁLISE COMPARATIVA E CRÍTICA</b>	<b>106</b>
<b>4.</b>	<b>ESPECIFICAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA A RECICLAGEM A FRIO “IN SITU” COM EMULSÃO BETUMINOSA</b>	<b>113</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b>	<b>123</b>
5.1.	Síntese do trabalho e principais conclusões	123
5.2.	Desenvolvimentos futuros	126
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>129</b>

# RECICLAGEM DE PAVIMENTOS "IN SITU" A FRIO COM EMULSÃO BETUMINOSA

A EXPERIÊNCIA PORTUGUESA

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3-1 - Curvas granulométricas .....	85
Quadro 3-2 – Características do betume nos casos acima identificados (IP2)	91
Quadro 3-3 – Resultados dos ensaios efectuados nos três sub-trechos (IP2)	92
Quadro 3-4 – Resultados dos ensaios de “imersão-compressão” (EN114) .....	97
Quadro 3-5 – Quadro das obras de reciclagem “in situ” a frio com emulsão betuminosa executadas em Portugal .....	109-111
Quadro 4-1 – Tabela dos valores de tolerância admissíveis na fórmula de trabalho para as misturas betuminosas a frio em Portugal (adaptado de CEPISA., 2007) .....	120
Quadro 4-2 – Tabela dos valores de tolerância admissíveis na fórmula de trabalho para as misturas betuminosas a frio em Espanha (adaptado de PG4, 2001) .....	120
Quadro 4-3 – Tabelas dos valores de tolerância admissíveis na formula de trabalho para as misturas betuminosas a frio no Brasil (adaptado de DER–Br, 2006) .....	121

---

# RECICLAGEM DE PAVIMENTOS "IN SITU" A FRIO COM EMULSÃO BETUMINOSA

A EXPERIÊNCIA PORTUGUESA

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Vários estágios na rotura das emulsões (Salomon, 2006) .....	9
Fig. 2 – Secção de um pavimento antes e após a reciclagem (Raya, J., 2008)	10
Fig. 3 – Esquema das operações de reciclagem do pavimento (Victoria <i>et al.</i> , 2008) .....	11
Fig. 4 – Comboio de reciclagem (Moviter, 2008).....	12
Fig. 5 – Diagrama do pavimento existente e das diferentes opções de reabilitação (adoptado de Thenoux <i>et al.</i> , 2006). .....	13
Fig. 6 – Estudo comparativo da economia energética entre vários processos construtivos de reabilitação de pavimentos (Chappat e Bilal, 2003) .	15
Fig. 7 – Teor de Sílica nos principais agregados usados em misturas betuminosas (Liberatori e Constantino, 2006).....	17
Fig. 8 – Estágios possíveis na actuação de uma emulsão catiónica sob os agregados (Pederson <i>et al.</i> , 2006) .....	18
Fig. 9 – Deslocamento do filme betuminoso pela acção da água (Liberatori e Constantino, 2006) .....	19
Fig. 10 – Esquema de uma emulsão betuminosa (Akzo Nobel, 2008).....	19
Fig. 11 – Esquema do processo de fabrico de uma emulsão betuminosa (Shell, 1990) .....	20

---

Fig. 12 – Exemplos de emulsão betuminosa catiónica (esquerda) e emulsão betuminosa aniónica (direita).....	21
Fig. 13 – Rotura de uma emulsão catiónica(Akzo Nobel, 2008).....	23
Fig. 14 – Floculação (Azko Nobel, 2008) .....	24
Fig. 15 – Assentamento do betume na emulsão (Azko Nobel, 2008).....	24
Fig. 16 – Coalescência (Azko Nobel, 2008) .....	25
Fig. 17 – Reciclagem com mistura de agregados (Arrieiro, 2007).....	29
Fig. 18 – Espalhamento mecanizado de cimento (Arrieiro, 2007).....	30
Fig. 19 – Espalhamento manual de cimento (Arrieiro, 2007).....	31
Fig. 20 – Organigrama para a formulação de misturas betuminosas a frio (adaptado de Batista, 2004) .....	37
Fig. 21 – Aspecto dos dentes da recicladora após utilização e numa máquina nova.....	41
Fig. 22 – Modelo da WR 2500 da Wirtgen (Wirtgen, 2008).....	44
Fig. 23 – Máquina fresadora WR 2500 da Wirtgen (Silva e Miranda Jr., 2008)	45
Fig. 24 – Reciclagem “ <i>in situ</i> ” a frio com a WR 2500 no Zion National Park, UT (FHWA, 2008).....	46
Fig. 25 – Recicladora Wirtgen WR 2000 (Wirtgen, 2007).....	47
Fig. 26 – Caixa do rolo dentado do modelo WR 2000 (Wirtgen, 2007) .....	47
Fig. 27 – Sistema de dentes da WR 2000 (Wirtgen,2007) .....	48
Fig. 28 – Motoniveladora tipo CAT 140 M (Catterpillar,2008) .....	50

Fig. 29 - Escarificador ( figura esquerda) e aspecto do movimento da lâmina central (figura direita) (Santos <i>et al.</i> , 2007).....	51
Fig. 30 – Esquema da misturadora móvel de lama de cimento WM 1000 (Wirtgen 2007).....	52
Fig. 31 – Comboio composto pela recicladora, misturadora e cisterna de emulsão (Wirtgen, 2005) .....	53
Fig. 32 – Cilindro vibratório de rasto liso do tipo CAT CB-534D (Catterpillar, 2008) .....	54
Fig. 33 – Cilindro de pneus do tipo PF-300C (Catterpillar, 2008).....	54
Fig. 34 – Evolução da altura dos tarolos extraídos com a idade da camada, na 5ª semana já tinham a altura da camada (Batista e Antunes, 2006) .	59
Fig. 35 – Evolução do teor em água de misturas a frio compactadas em obra (Batista e Antunes, 2006) .....	60
Fig. 36 – Estrutura final do pavimento reabilitado (EN12 – Estrada de Circunvalação do Porto) .....	64
Fig. 37 – Estrutura final do pavimento reabilitado (EN222 – Régua/Ponte das Bateiras) .....	69
Fig. 38 – Estado de degradação em que se encontrava o pavimento da EN108 antes da obra de reabilitação (Batista, 2004) .....	71
Fig. 39 – Estrutura final do pavimento reabilitado (EN-108 Porto/Entre-os-Rios) .....	72
Fig. 40 – Trabalhos de fresagem antes da passagem da recicladora na EN108 (Batista, 2004) .....	73
Fig. 41 – Estado de degradação do pavimento da EN 260 antes da obra de reabilitação (Batista, 2004) .....	75

---

Fig. 42 – Estrutura final do pavimento reabilitado (EN 260 Serpa –Vila Verde de Ficalho).....	76
Fig. 43 – Juntas formadas pela sobreposição das passagens com a recicladora	78
Fig. 44 – Compactação da camada reciclada na EN 260 (Batista, 2004) .....	79
Fig. 45 – Amostra de matéria fresado sob acção da recicladora na EN 260 (Batista, 2004) .....	80
Fig. 46 – Refluimentos de betume do pavimento na EN 260 (Batista, 2004) ...	81
Fig. 47 – Estrutura inicial do pavimento (EN 254 – Aguiar/Viana do Alentejo) .	82
Fig. 48 – Estrutura final do pavimento reabilitado (EN 254 / Aguiar–Viana do Alentejo) .....	83
Fig. 49 – Estrutura inicial do pavimento aquando da sua construção em 1992 (IP2).....	87
Fig. 50 – Estado de degradação em que se encontrava o pavimento do IP2 antes da obra de reabilitação (Batista, 2004) .....	87
Fig. 51 – Estrutura final do pavimento reabilitado (IP 2).....	88
Fig. 52 – Estrutura inicial do pavimento (EN 114 – Montemor–o–Novo/nó da A6 Évora).....	95
Fig. 53 – Estado de degradação do pavimento (EN 114 – Montemor–o–Novo/nó da A6 Évora) .....	96
Fig. 54 – Estrutura final do pavimento reabilitado (EN 114 – Montemor–o–Novo/nó da A6 Évora) .....	97
Fig. 55 – Estrutura inicial do pavimento (EN 222 – Barragem de Crestuma/Lever).....	99

Fig. 56 – Estrutura final do pavimento reabilitado (EN 222 Barragem de Crestuma – Lever).....	99
Fig. 57 – Estrutura inicial do pavimento (IC12 – Canas de Senhorim/IP3).....	101
Fig. 58 – Marcas da descolagem entre camadas num tarolo extraído do pavimento existente (Araújo, <i>et al</i> , 2008) .....	101
Fig. 59 – Tapagem das covas existentes na via da direita (Araújo <i>et al.</i> , 2008)	102
Fig. 60 – Fendilhamento tipo pele de crocodilo com desagregação de blocos	102
Fig. 61 – Estrutura final do pavimento reabilitado (IC12-Canas de Senhorim/IP3).....	103
Fig. 62 – Imagens do “comboio” de reciclagem (à esquerda) e do cilindro pneumático em plena compactação (à direita) – IC12 .....	104
Fig. 63 – Representação do troço do IC12 e da estrutura final do pavimento (adaptado de Araújo, <i>et al</i> , 2008) .....	105

---

## LISTA DE SIGLAS

AADT – Annual Average Daily Traffic

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABGETE – Aglomerado Britado de Granulometria Extensa Tratado com Emulsão

AFNOR – Agence Française de Normalisation

AGC – Associated General Contractors of America

ARRA – The Asphalt Recycling and Reclaiming Association

ARTBA – American Road & Transportation Builders Association

ASTM – American Society for Testing and Materials

CaDOT – California Department of Transportation

EAPA – European Asphalt Pavement Association

ENDS – Estratégia Nacional para o Desenvolvimento Sustentável

EP – Estradas de Portugal S.A.

FHWA – Federal Highway Administration

FP<sup>2</sup> – Foundation for Pavement Preservation

JAE – Junta Autónoma das Estradas, actualmente Estradas de Portugal

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

RHMA – Rubberized Hot Mix asphalt

TMDA – Tráfego Médio Diário Anual

---

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

O aumento da rede viária para fazer face às necessidades económicas e populacionais, resultantes da industrialização, do avanço da agricultura e do crescimento das cidades, levou conseqüentemente ao aumento do número necessário de obras de conservação.

Ao longo da sua vida útil, os pavimentos rodoviários estão sujeitos a diversas acções que conduzem a alterações nas suas características superficiais e estruturais, estando entre os principais responsáveis pelo desenvolvimento da degradação nos pavimentos flexíveis, o tráfego pesado e a acção do sol e da chuva. Esta última, é sem dúvida, o agente que mais contribui para a sua aceleração.

Outros factores podem igualmente desempenhar um papel importante na degradação dos pavimentos, como sejam, o subdimensionamento das camadas com insuficiente capacidade de carga para suportar o tráfego, saturação por drenagem deficiente, assoreamento e subdimensionamento de valetas e a presença de fendilhamento permitindo a percolação de água nas camadas, *etc.* Todas estas patologias podem representar, uma diminuição da segurança e do conforto para o utente da via.

Em sistemas de gestão da rede viária, à medida que as degradações vão evoluindo é necessário determinar o momento óptimo para proceder às intervenções de conservação preventiva ou correctiva de modo a prolongar a vida útil do pavimento e repor suas condições de serviço. No entanto, em muitos casos, as verbas disponíveis são insuficientes para acompanhar o ritmo de conservação necessário e preservar o pavimento à medida que este envelhece (Oliveira *et al.*, 2008).

Para a conservação e reabilitação da rede viária existem diversas alternativas possíveis, adoptando-se por princípio e, para cada caso, a melhor solução em termos técnicos e económicos. Uma das alternativas, que por vários motivos tem sido sistematicamente usada entre as formas tradicionais de reabilitação é a execução de camadas de reforço que, sucessivamente elevam o perfil do pavimento e rebaixam as valetas e bermas com os perigos eventualmente daí decorrentes. Por outro lado, quando se adopta uma solução tradicional de reforço do pavimento, é frequente ser necessário fresar as camadas fendilhadas existentes de forma a eliminar o risco de propagação de fendas para as camadas novas superiores. O material fresado resultante desta operação é normalmente transportado a vazadouro contribuindo para um aumento dos resíduos sólidos.

As limitações orçamentais associadas às restrições impostas pela legislação ambiental para construção e reabilitação rodoviária estão entre os factores que mais têm estimulado o desenvolvimento e a aplicação de novas tecnologias como a reciclagem de pavimentos. Novos meios de maximizar resultados técnico-económicos vêm a ser estudados pelos especialistas rodoviários a partir do advento da reciclagem.

Existem assim diversas razões que têm conduzido ao desenvolvimento da técnica de reciclagem dos materiais recuperados dos pavimentos a reabilitar, sendo particularmente atractiva, a técnica de reciclagem “*in situ*” a frio pelas vantagens económicas e ambientais que apresenta, ao proporcionar, por um lado uma redução dos gastos energéticos e por outro uma diminuição dos resíduos gerados durante a reabilitação de um pavimento.

Segundo Sullivan (1996) e Nicholls (1996) a reciclagem de pavimentos flexíveis iniciou-se no século XX, mais concretamente no início dos anos 30, em Singapura e na Índia. Apesar de nessa época se terem feito experiências de reciclagem a frio “*in situ*”, só a partir da década de 70 se notou maior interesse pela reciclagem de pavimentos a nível mundial. Isto ocorreu fundamentalmente por motivos económicos durante o embargo do petróleo em 1973, motivos esses, decorrentes do seu aumento de preço e dos custos de construção rodoviária. Se tal não tivesse acontecido, a reciclagem era economicamente

inviável, pois o custo de remover e reciclar o pavimento era maior do que o de utilizar novo material (Roberts *et al.*, 1996). O aparecimento das máquinas de reciclagem e posteriormente, o seu desenvolvimento, proporcionaram uma maior quantidade de material fresado em muito menos tempo, o que veio marcar pontos no desenvolvimento desta técnica. Nos Estados Unidos, já na década de 90, cerca de 33% dos materiais betuminosos fresados eram utilizados para reciclagem (Sullivan, 1996).

O desenvolvimento dos equipamentos e também das emulsões tem pois conduzido a um longo, durável e bem sucedido custo-efeito na tecnologia da reciclagem a frio, tornando-se esta, tanto mais atractiva, quanto maior for a escassez de agregados nas proximidades das vias a reabilitar.

Na Península Ibérica, esta técnica está presente desde os anos oitenta (Dueñas *et al.*, 2008). Tendo em Portugal, a reciclagem de pavimentos a frio “*in situ*” sido iniciada em 1993, com a obra de reabilitação do troço do pavimento da EN12 (Batista, 2004), até 2004, estimava-se que tivessem sido reciclados cerca de 1 900 000 m<sup>2</sup> (Martinho *et al.*, 2004), 43% dos quais com recurso à técnica da reciclagem a frio com emulsão betuminosa. Apesar desta percentagem ser muito inferior à de outros países europeus, houve um significativo aumento nos últimos anos (Pereira e Picado-Santos, 2006).

A proposta de Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável (ENDS) para o período 2005/15 e respectivo plano de implementação, aprovados em Resolução do Conselho de Ministros n.º 109/2007, D.R. n.º 159, Série I de 2007-08-20, pretende fazer de Portugal, no horizonte de 2015, um dos países mais competitivos da União Europeia, num quadro de qualidade ambiental e de coesão e responsabilidade social.

Ficou previsto no seu 3º terceiro objectivo – Melhor Ambiente e valorização do Património, a promoção de uma política integrada de gestão dos resíduos, que “fomente a redução na fonte e estimule a reutilização e reciclagem, bem como a sua valorização e deposição final em condições seguras assegurando uma actualização permanente das soluções adoptadas face aos progressos científico e tecnológico verificados neste sector”. A reciclagem de pavimentos,

vem pois satisfazer todas estas estratégias políticas, económicas e ambientais, tanto a nível europeu como mundial, reduzindo os resíduos geradores de grande impacto ambiental, assim como a necessidade de abertura de novas jazidas para obtenção de agregados.

Quanto ao processo de reciclagem *“in situ”* a frio com emulsão betuminosa, em que incide este trabalho, é sem dúvida uma técnica de reabilitação extraordinariamente aliciente uma vez que, favorece os dois factores, económicos e ambientais. Por um lado, uma parte importante dos materiais utilizados no fabrico da mistura reciclada provêm do próprio pavimento a reabilitar, o que proporciona uma redução significativa do emprego de novos materiais e evita o depósito em vazadouro dos materiais fresados, sendo ainda, energeticamente compensatória pelo facto da mistura reciclada, ser fabricada e aplicada à temperatura ambiente (Batista, 2004).

## **1.2. Objectivos do trabalho**

O principal objectivo deste trabalho é dar a conhecer o estado da arte em Portugal, relativamente à técnica de reciclagem de pavimentos a frio *“in situ”* com emulsão betuminosa, através da compilação, análise comparativa e análise crítica das obras executadas até hoje.

Verifica-se contudo, que a informação relativa a estas obras de reciclagem se encontra, de um modo geral, algo dispersa, sendo um dos objectivos deste trabalho recolher e compilar essa informação.

Com base na informação recolhida procurar-se-á extrair conclusões sobre esta técnica de reabilitação avaliando as suas vantagens e limitações, bem como elaborar recomendações relativamente à sua utilização.

### 1.3. Organização do trabalho

O presente trabalho desenvolve-se ao longo de cinco capítulos, descrevendo-se seguidamente os aspectos em que mais incide:

- No primeiro capítulo faz-se o enquadramento da técnica de reciclagem “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa no panorama actual, incluindo-se um breve historial que considera tanto os factores que levaram ao aparecimento da reciclagem como os condicionalismos económico-ambientais do presente;

- No segundo capítulo, efectua-se uma pesquisa bibliográfica no sentido de rever conceitos gerais relativamente à técnica de reciclagem “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa, aos materiais constituintes destas misturas recicladas, tais como: o material fresado, as emulsões betuminosas, a água, e os materiais correctivos que eventualmente possam ser empregados;

Abordam-se ainda os estudos de formulação e equipamentos utilizados para este tipo de misturas, aspectos construtivos, de controlo de qualidade e evolução do seu comportamento durante o processo de cura, face à necessidade que este tipo de misturas têm de eliminação de água para alcançar a propriedades mecânicas pretendidas durante o mesmo;

- No terceiro capítulo, descrevem-se por ordem cronológica, as obras de reabilitação de pavimentos realizadas em Portugal, onde se utilizou a técnica de reciclagem a frio “*in situ*” com emulsão betuminosa;

Em cada obra, para além da sua descrição, das suas condições iniciais, formulação das misturas e aspectos construtivos, tentou-se informar, sempre que possível sobre o desempenho dos pavimentos reciclados após abertura ao tráfego;

Sintetizam-se ainda num quadro as obras referidas no capítulo 3, estabelecendo-se uma análise comparativa e crítica dos vários casos de obra e dos aspectos mais relevantes de cada experiência para futuras aplicações;

- No quarto capítulo abordam-se os aspectos mais relevantes das especificações técnicas para a reciclagem a frio *“in situ”*, em vigor nalguns países e a conveniência da uniformização de critérios a nível europeu ou mesmo mundial;
- Por último, no quinto capítulo, resumem-se as principais conclusões retiradas deste estudo e sugerem-se aspectos a desenvolver num futuro próximo.

## 2. MISTURAS RECICLADAS A FRIO “*IN SITU*” COM EMULSÃO BETUMINOSA

### 2.1. Considerações iniciais

Como já foi dito, a reciclagem como processo de reaproveitamento dos materiais fresados dos pavimentos flexíveis foi acelerada nos últimos anos pelas preocupações ambientais que envolvem as políticas respeitantes à gestão de resíduos. Não só a nível Europeu, como mundial, cada país tem contribuído a este nível adaptando à sua realidade, os esforços para atingir os objectivos traçados na conferência ECO-92 realizada no Rio de Janeiro em 1992, onde se estabeleceu a importância de cada um assumir o compromisso de reflectir, global e localmente, sobre a forma pela qual governos, empresas, entidades não governamentais e todos os sectores da sociedade podem cooperar no estudo das soluções para os problemas socioeconómicos.

Ficou estabelecido que cada país desenvolveria a sua agenda 21, que no nosso caso, foi incluída como medida de implementação da ENDS – Estratégia Nacional para o Desenvolvimento Sustentável.

Todos os anos, na Europa, produzem-se cerca de 50 milhões de toneladas de material betuminoso fresado dos pavimentos e uma grande parte dessa quantidade é reutilizada e reciclada. O objectivo é atingir os 100% no reaproveitamento destes materiais (EAPA, 2008).

Em Portugal, diversos condicionalismos de gestão da rede viária, em particular de natureza económica, têm conduzido a que por vezes não sejam realizadas atempadamente as necessárias acções de conservação, conduzindo algumas estradas a estados de degradação tais, que implicam a fresagem das camadas

superiores com os consequentes resíduos resultantes desta operação de reabilitação.

Por tudo isto, o desenvolvimento das técnicas de reciclagem tem tido particular importância, face à necessidade de reduzir em vazadouro este tipo de resíduos, reutilizando-os. Não pode deixar também de ficar implícita a redução dos recursos naturais e eventualmente dos custos de obra que este tipo de técnica veio trazer à reabilitação dos pavimentos.

Actualmente, existem diversas técnicas de reciclagem dos materiais fresados do pavimento, que se podem distinguir, por exemplo, quanto à localização dos trabalhos de reciclagem ("*in situ*" ou em central), quanto ao ligante utilizado (betume, emulsão betuminosa, cimento, *etc.*), e consequentemente, quanto à temperatura de fabrico da mistura reciclada (a quente, semi-quente e a frio).

Este trabalho incide no caso particular da reciclagem "*in situ*" com emulsão betuminosa, inserido nas técnicas de reciclagem a frio. Nas secções seguintes descreve-se esta técnica de reciclagem com as suas vantagens e limitações, assim como os materiais intervenientes na mistura reciclada a frio "*in situ*" com emulsão betuminosa.

## **2.2. Descrição da técnica de reciclagem a frio "*in situ*" com emulsão betuminosa**

Na reciclagem "*in situ*" a frio com emulsão betuminosa, os materiais fresados do pavimento são processados sem o dispêndio de energia para o aquecimento dos mesmos, sendo-lhes adicionado como ligante, uma emulsão betuminosa e, eventualmente agregados, agentes rejuvenescedores ou estabilizantes químicos e outros materiais correctivos.

O custo com o transporte de materiais, é muito reduzido por não ser praticamente necessária a sua utilização para os materiais tanto a empregar como a retirar do pavimento, visto que estes últimos são reutilizados.

A mistura final é geralmente utilizada como camada de base, sendo posteriormente revestida com uma ou mais camadas de uma mistura betuminosa nova.

A profundidade do tratamento é geralmente de 75 mm a 100 mm, quando só são processadas as camadas betuminosas, podendo atingir maiores profundidades quando a reciclagem do pavimento envolve também as camadas granulares.

Os dois principais condicionamentos na aplicação desta técnica são:

- A variabilidade dos materiais existentes no pavimento a reabilitar, dado que é com estes que se constitui a nova mistura, sendo por vezes difícil encontrar troços homogéneos em resultado por exemplo, de operações de conservação diferenciadas ao longo do traçado, (remendos sucessivos, *etc.*);
- O processo de cura da mistura reciclada, que se inicia com a rotura da emulsão (Fig. 1), isto é, quando o betume se separa da fase aquosa e os glóbulos de betume se orientam formando uma película que envolve os agregados.

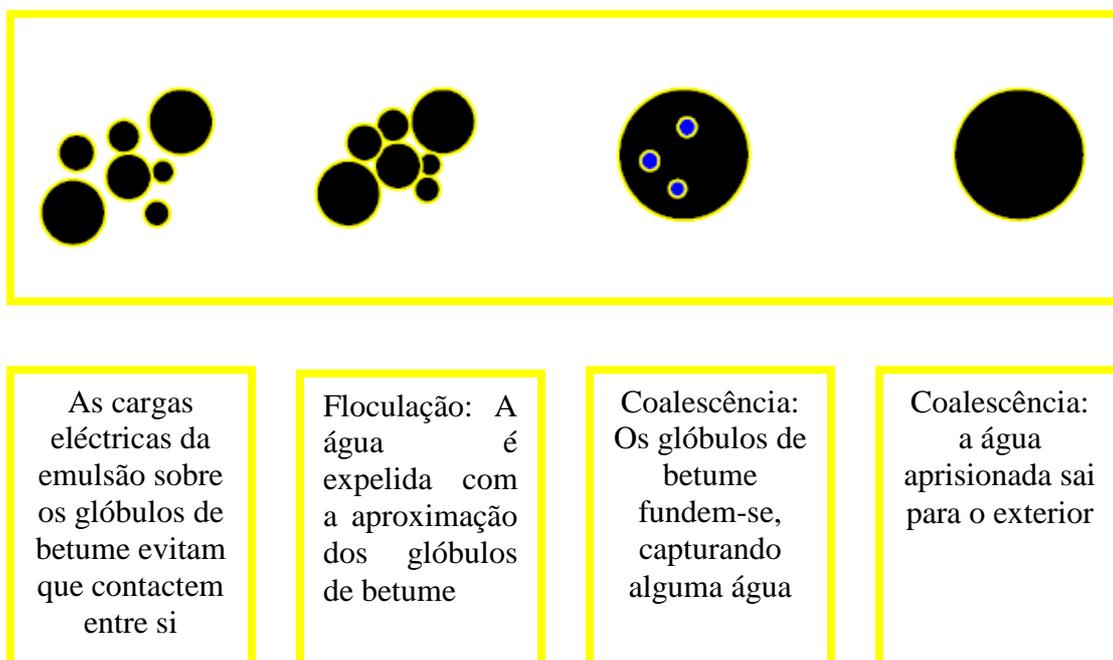


Fig. 1 – Vários estágios na rotura das emulsões (Salomon, 2006)

As condições atmosféricas assumem, face ao que se disse anteriormente, um papel importante para o bom sucesso do comportamento final das misturas recicladas a frio com emulsão betuminosa, dado que o aumento de resistência da camada reciclada durante o processo de cura, depende em grande parte, da libertação da água ainda presente no final da compactação. Implicando por isso, que durante a sua aplicação, e nas primeiras semanas, a isenção de pluviosidade seja a condição ideal para a realização deste tipo de trabalhos, que se aconselham para os meses de Primavera e Verão.

Os principais passos da técnica de reciclagem *"in situ"* com emulsão betuminosa são:

- Espalhamento, antes da passagem da máquina recicladora, de eventuais materiais correctivos estabelecidos na fórmula de trabalho, com o apoio de equipamento próprio para esse efeito;
- Passagem do comboio formado pela recicladora e pelas cisternas de emulsão e água, onde se inicia o processo de fresagem até à profundidade especificada, adição do ligante betuminoso e da água nas percentagens da fórmula de trabalho e mistura de todos os materiais;
- Espalhamento e nivelamento da mistura reciclada;
- Compactação da nova camada.

Na figura seguinte mostra-se a secção de um pavimento antes e depois da intervenção de reabilitação com recurso á técnica de reciclagem.

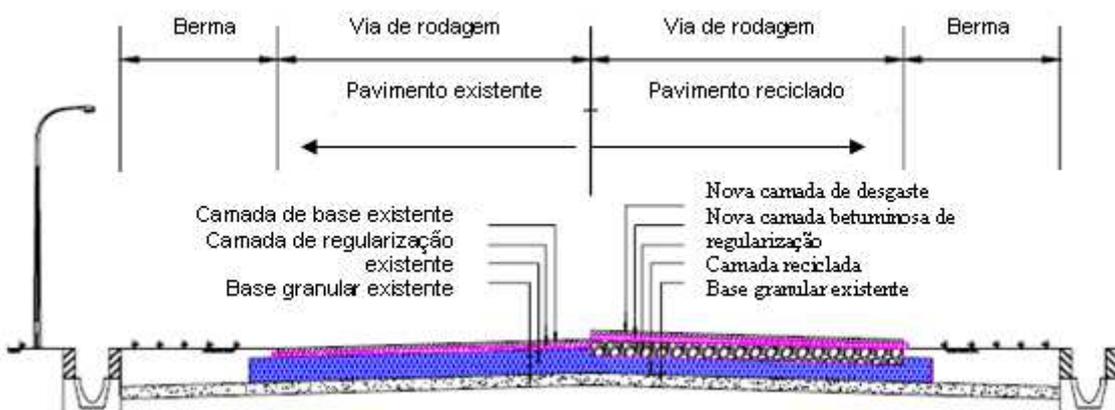


Fig. 2 – Secção de um pavimento antes e após a reciclagem (Raya, J., 2008)

Na Fig. 3 esquematizam-se as operações de reciclagem “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa, podendo constatar-se que a recicladora executa em simultâneo as funções de desagregação do pavimento e mistura da emulsão e água através de injectores directamente ligados às cisternas de alimentação. A potência e velocidade da máquina afectam a granulometria da mistura, pelo que a escolha do equipamento assume um papel importante nas obras a realizar (Batista, 2004).

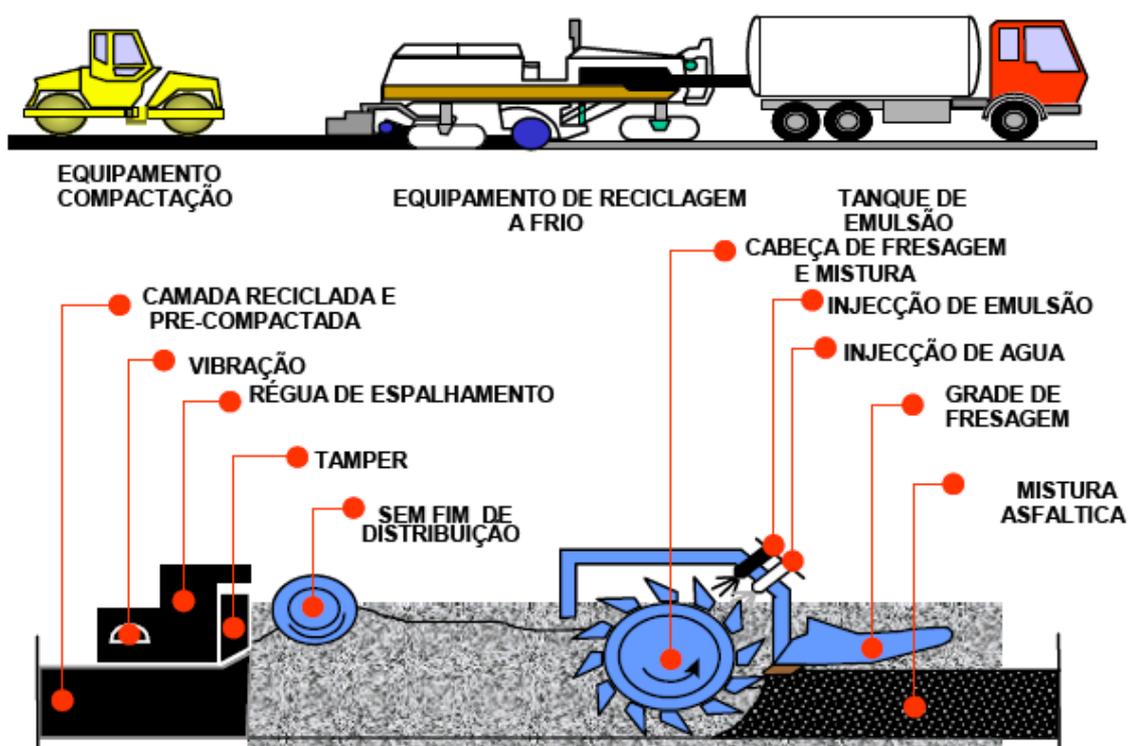


Fig. 3 – Esquema das operações de reciclagem do pavimento (Victoria *et al.*, 2008)

Na Fig. 4 exemplifica-se, através da fotografia de uma obra o chamado “comboio” de reciclagem com a recicladora e as cisternas de emulsão e água.



Fig. 4 – Comboio de reciclagem (Moviter, 2008)

O fendilhamento dos pavimentos betuminosos flexíveis, reduz muitas vezes a sua vida útil, permitindo ainda a infiltração da água nas camadas betuminosas do pavimento deteriorando-o e nas camadas de base amolecendo-as, acabando por sofrer deformações sob acção das cargas do tráfego.

Uma das vantagens importantes de com esta técnica de reciclagem *"in situ"* a frio se atingirem as camadas granulares, está no facto de se poder tratar a maioria das patologias que os pavimentos apresentam quando alcançam um estado de degradação elevado. No caso do fendilhamento, consegue-se erradicar a propagação de fendas melhorando o pavimento em termos estruturais com redução dos custos associados no transporte de materiais assim como nos gastos energéticos com os equipamentos envolvidos. A vantagem ambiental mais significativa é não ser poluente e, a vantagem funcional está em proporcionar uma melhoria na qualidade e conforto de utilização do pavimento.

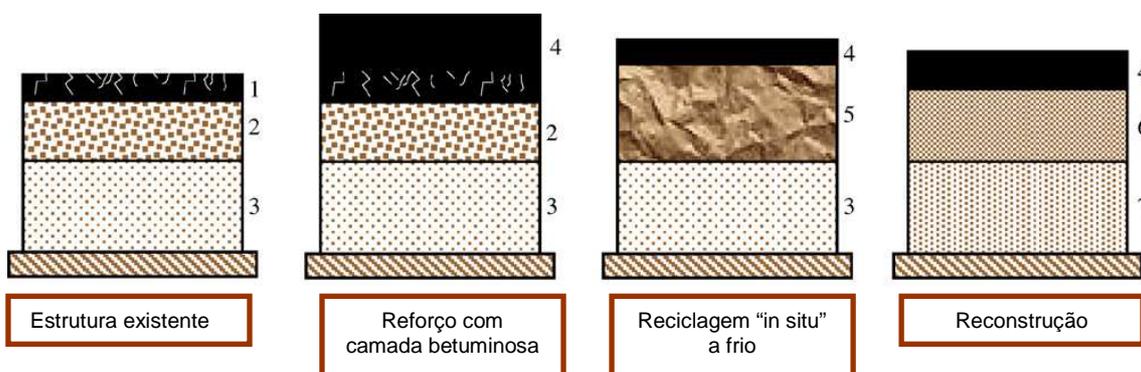
Sendo a reciclagem a frio *"in situ"*, uma técnica com manifesto interesse sob diversos pontos de vista, existe de uma maneira geral uma clara compreensão

das suas vantagens técnicas e ambientais, o mesmo já não sendo tão patente numa perspectiva económica. Para melhorar o conhecimento nesta área, têm sido efectuados vários estudos no sentido de a tornar mais objectiva e com resultados concretos.

Neste sentido, a Universidade Católica do Chile conjuntamente com a Universidade de Canterbury na Nova Zelândia, fez um estudo comparativo entre três alternativas de reabilitação de pavimentos, onde o cálculo do consumo de energia para cada processo construtivo é obtido convertendo a energia fornecida (combustível, gás natural ou electricidade) em unidades de energia equivalentes, possibilitando assim o cálculo da energia necessária para produzir uma unidade de volume ( $\text{MJ}/\text{m}^3$ ). Os resultados dos consumos totais gastos são apresentados em ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) para cada solução estrutural (Thenoux *et al.*, 2005).

As três alternativas de reabilitação apresentam-se esquematicamente na Fig.5 e foram as seguintes:

- Camadas de reforço em mistura betuminosa;
- Reciclagem “*in situ*” a frio com espuma de betume;
- Reconstrução.



(1) Camada betuminosa fissurada; (2) base granular existente; (3) sub-base granular existente; (4) nova mistura betuminosa; (5) camada reciclada; (6) nova base granular; (7) nova sub-base granular.

Fig. 5 – Diagrama do pavimento existente e das diferentes opções de reabilitação (adoptado de Thenoux *et al.*, 2006).

Concluíram-se pois, para os diferentes cenários estudados, que na reciclagem a frio havia um menor dispêndio de energia por tonelada de material colocado, principalmente se as estradas a reabilitar não tivessem um grande fluxo de tráfego. Sendo a distância de transporte dos inertes o factor mais significativo no consumo total de energia.

Verificou-se ainda que, em condições normais de utilização dos transportes dos materiais para as obras rodoviárias, a reciclagem a frio reduzia consideravelmente o consumo com estes equipamentos comparativamente às obras de colocação de camadas de reforço sendo essa economia significativamente maior no caso das de reconstrução total do pavimento.

No gráfico apresentado na Fig.6, Chappat e Bilal (2003), também representaram um estudo comparativo entre várias técnicas de reabilitação onde a reciclagem "*in situ*" a frio com emulsão se distingue claramente como a solução de reabilitação mais económica.

De tudo o que foi dito sobre a técnica de reciclagem a frio "*in situ*" com emulsão betuminosa, convém no entanto ressaltar que esta não é aplicável à generalidade das situações. Inclusivamente, dá-se como exemplo um artigo do California Department of Transportation (2008), onde esta entidade, não aconselha o seu uso nos seguintes casos:

- Em pavimentos com elevado volume de tráfego, apesar de não estar estabelecido um valor limite de Tráfego Médio Diário Anual;
- Em pavimentos constituídos por misturas betuminosas com borracha RHMA (Rubberized Hot Mix Asphalt);
- Em pavimentos com fendas profundas, dado que este tipo de patologia deve ser reciclada pelo menos em 70% da zona afectada;
- Com frio ou com chuva, sendo as temperaturas mínimas indicadas: 16º para o pavimento e 10º para a temperatura ambiente;
- Perto das zonas urbanas, porque o barulho causado pelo comboio de reciclagem pode criar problemas de poluição sonora.

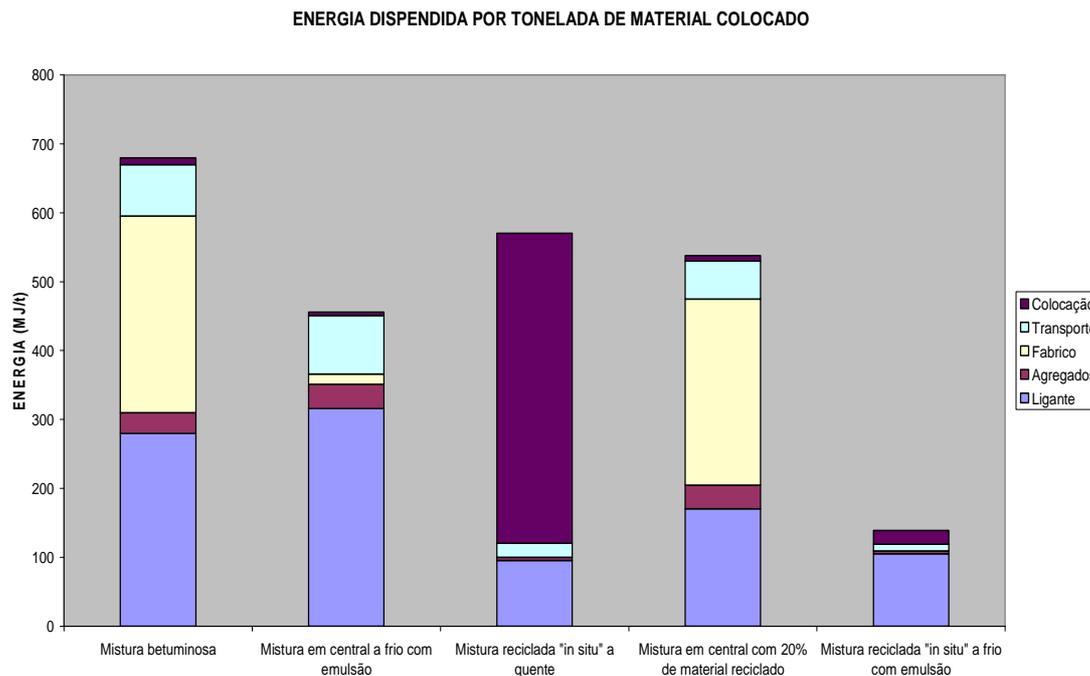


Fig. 6 – Estudo comparativo da economia energética entre vários processos construtivos de reabilitação de pavimentos (Chappat e Bilal, 2003)

Apesar de na sua generalidade, os pavimentos reciclados a frio “*in situ*” com emulsão betuminosa terem um bom comportamento ao longo do tempo, tem-se vindo a verificar que alguns casos não confirmam esta regra. Uns anos após a reciclagem, há pavimentos que apresentam uma condição excelente enquanto outros estão deformados e fendilhados. Esta diferença de comportamentos tem sido observada em estradas intervencionadas na mesma região, pelo mesmo empreiteiro e na mesma época do ano, pelo que, tudo indica que a diferença no comportamento do pavimento não pode ser atribuída, nestes casos, a factores como as condições atmosféricas, equipamento, experiência do construtor a quem foi adjudicado o trabalho e técnicas de construção. Possivelmente, outros factores afectam o comportamento do pavimento de uma forma mais proeminente, tais como: a idade do pavimento; o volume de tráfego; fundação e as características dos materiais reciclados (Jahren, 2005).

A técnica de reciclagem a frio “*in situ*” com emulsão betuminosa é pois, como se viu, um processo de reabilitação aplicável, muitas vezes a pavimentos que já não garantem satisfatoriamente o nível de serviço para que foram calculados,

desde que as patologias se limitem às camadas superficiais betuminosas ou mesmo granulares.

Para melhor compreensão desta técnica, descrevem-se nas secções seguintes os principais aspectos relativos aos materiais que podem constituir a mistura reciclada, às percentagens em que são adicionados através da sua formulação, às suas técnicas construtivas assim como aos equipamentos usados na sua implementação, ao controlo de qualidade na fase de obra e à evolução do comportamento destas misturas durante o processo de cura tão importante no aumento da resistência da camada reciclada.

## **2.3. Materiais utilizados na mistura reciclada a frio “*in situ*” com emulsão betuminosa**

### **2.3.1. Material fresado do pavimento**

O material fresado é o produto final da operação de desagregação de pavimentos flexíveis, normalmente designada por fresagem de pavimentos. Os principais constituintes são os agregados e o betume utilizado aquando da construção inicial do pavimento, nos casos em que não tenham havido intervenções ao nível da conservação do pavimento. Quando isto acontece, já vão existir no pavimento a reabilitar zonas compostas por remendos ou mesmo camadas betuminosas de reforço que vão adicionar ao pavimento inicial novos materiais e eventualmente criar zonas heterogéneas.

Na reciclagem “*in situ*” a frio, os materiais recuperados do pavimento são 100% reutilizados, para o fabrico da mistura betuminosa, sendo nalguns casos necessário adicionar material correctivo, tal como cimento e cal, no sentido da mistura apresentar as características finais para a qual foi concebida.

Tratando-se de material fresado, a granulometria dos agregados está condicionada ao material que se vai recuperando do pavimento e ao processo de fresagem. Este último, pode ser controlado, de entre outras formas, pela capacidade do rolo dentado ou pela velocidade de avanço da máquina

recicladora (Batista, 2004). As suas características devem ser avaliadas, nos troços a reciclar, dado que a mistura betuminosa é produzida utilizando o próprio pavimento a reabilitar, podendo ocasionar uma maior variabilidade dos materiais empregues.

Abordando seguidamente a classificação dos agregados utilizados em pavimentação, estes podem ser alcalinos ou ácidos. Com um pH elevado os agregados tendem a ficar carregados negativamente. Os agregados raramente são compostos por um único mineral e mesmo um mineral puro pode ter componentes alcalinos e ácidos. Se os agregados são avaliados de acordo com o seu conteúdo de sílica, tal como representado na Fig. 7, verifica-se que os que contêm maior percentagem são os mais ácidos e com uma forte tendência para adoptar cargas negativas (Akzo Nobel, 2008).

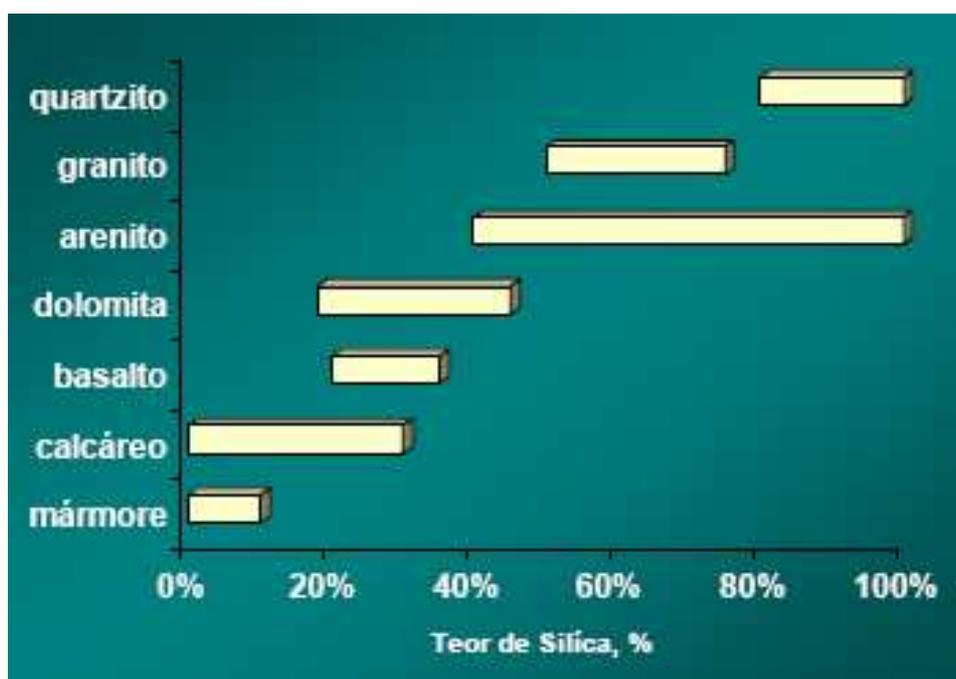


Fig. 7 – Teor de Sílica nos principais agregados usados em misturas betuminosas (Liberatori e Constantino, 2006)

Os agregados podem por isso, ser classificados em função do seu teor de sílica (ou carbonato de cálcio) presente na sua estrutura. Conforme acima referido, quanto maior o teor de sílica presente, mais ácido é o agregado. Geralmente,

os agregados de natureza ácida necessitam de materiais com características básicas como promotores de adesão e vice-versa.

No caso particular das misturas betuminosas, verifica-se que normalmente os agregados ácidos silicosos possuem má adesividade ou interacção química fraca com a maioria dos betumes. No caso dos agregados alcalinos, como o calcário, a adesividade dependerá fundamentalmente da acidez do betume (Liberatori e Constantino, 2006).

Na figura seguinte mostram-se os vários estágios possíveis na actuação de uma emulsão catiónica sobre os agregados, que é a mais utilizada na reciclagem a frio "*in situ*" como se verá na secção relativa às emulsões betuminosas.



Fig. 8 – Estágios possíveis na actuação de uma emulsão catiónica sob os agregados (Pederson *et al.*, 2006)

Caso não haja uma ligação química efectiva entre o filme de betume e a superfície do agregado, quando houver água livre na mistura, poderá ocorrer o deslocamento deste filme, expondo a superfície do agregado (Fig.9). Este mecanismo está na origem de diversas patologias observadas nos pavimentos betuminosos.



Fig. 9 – Deslocamento do filme betuminoso pela acção da água (Liberatori e Constantino, 2006)

Muitos agregados podem também estar contaminados com partículas de argila, que mesmo em pequenas quantidades aumentam a taxa de rotura das emulsões (Akzo Nobel, 2008).

Abordaram-se as características químicas das partículas de agregado e a sua interacção com o betume. Na secção seguinte, veremos de que forma as emulsões betuminosas em particular podem influenciar o comportamento dos agregados.

### 2.3.2. Emulsões betuminosas

As emulsões betuminosas podem ser definidas como dispersões, relativamente estáveis, de gotículas de betume (fase dispersa ou descontínua) num meio aquoso (fase contínua), conforme se representa esquematicamente na Fig. 10. Assim, a sua composição, e conseqüentemente as suas propriedades e tipo de aplicação, são condicionadas pelas proporções das duas fases.

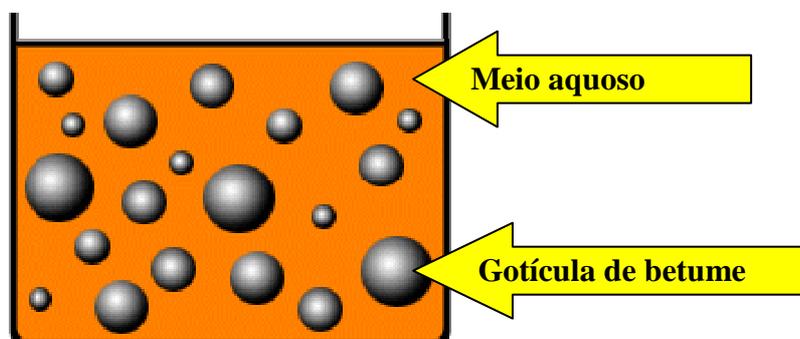


Fig. 10 – Esquema de uma emulsão betuminosa (Akzo Nobel, 2008)

Como foi dito, a fase descontínua é constituída por betume, o qual foi previamente dividido em pequenas partículas por um moinho coloidal, dando-se a mistura das duas fases em condições pré definidas (r.p.m., temperatura, etc.) (Fig. 11).

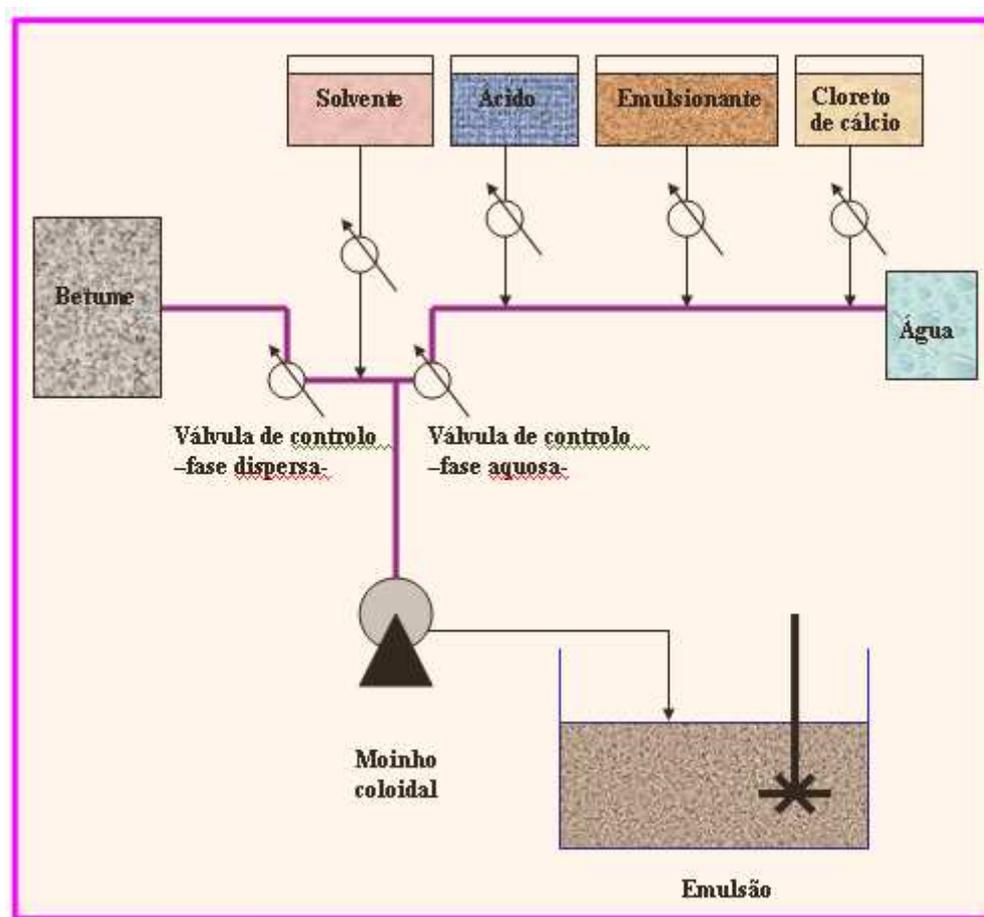


Fig. 11 – Esquema do processo de fabricação de uma emulsão betuminosa (Shell, 1990)

O tamanho das gotículas de betume está normalmente compreendido entre 0.001 e 0.02 mm e, dependendo do tipo de aplicação, a sua concentração está geralmente compreendida entre 40% e 70% (Akzo Nobel, 2008).

Há um limite superior para a quantidade de betume numa emulsão, dependendo principalmente do volume relativo das duas fases. Quando se atinge este limite deixa de haver espaço suficiente para mais gotículas sem que estas se deformem (Akzo Nobel, 2008). As gotículas arrumam-se tão juntas que aderem parcialmente e eventualmente a água entre elas transforma-se em gotas de água. O resultado é uma emulsão água-em-óleo ou uma emulsão

invertida. O limite máximo de concentração de betume está entre 70% e 80% e depende principalmente do tamanho de distribuição das partículas (Akzo Nobel, 2008).

Para obter uma emulsão betuminosa estável é necessário adicionar um emulsionante. As gotículas de betume ficam separadas devido a um campo de forças formado pelas cargas electrostáticas produzidas pelo emulsionante. A estabilidade da emulsão depende deste campo de forças. Se o emulsionante é do tipo catiónico, as gotículas ficam carregadas positivamente – emulsões catiónica – enquanto que com um emulsionante aniótico a carga será negativa - emulsão aniónica (Fig. 12).

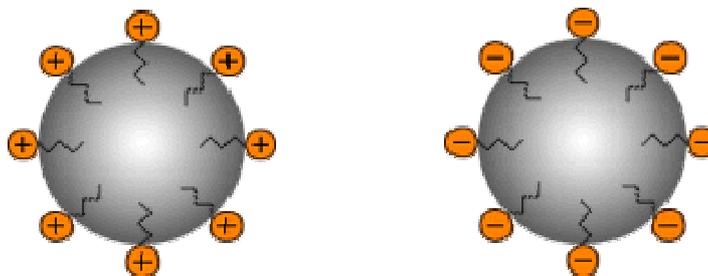


Fig. 12 – Exemplos de emulsão betuminosa catiónica (esquerda) e emulsão betuminosa aniónica (direita)

Seguidamente faz-se uma breve descrição dos principais constituintes de uma emulsão betuminosa, para além da água e do betume; solventes, emulsionantes e ácidos/bases.

A função dos solventes é amaciar temporariamente o ligante, diminuindo-lhe a viscosidade e melhorando as capacidades para revestimento dos agregados. Na selecção de um solvente há dois casos a considerar: primeiro, este tem que ser compatível com o betume, isto é, quando se mistura o betume com o solvente, a mistura deve ser homogénea não apresentando sinais de separação; segundo, o solvente tem que ser suficientemente volátil para não deixar nenhum resíduo no betume, assim como, diminuir-lhe a viscosidade (Akzo Nobel, 2008).

Uma cuidadosa escolha do emulsionante é essencial para obter emulsões com as propriedades desejadas. Há vários compostos químicos que podem ser usados para emulsionar o betume, mas por razões técnicas e económicas só alguns têm sido amplamente utilizados. Estes compostos, podem ser usados sozinhos ou combinados com um ou mais composto. Eles também podem ser modificados de diferentes formas com a finalidade de obter propriedades específicas, obtendo-se um produto com um bom custo-desempenho e de fácil manuseamento (Akzo Nobel, 2008).

O emulsionante normalmente consiste numa extensa cadeia de hidrocarbonetos, terminando num grupo aniónico e catiónico funcional. Os iões orientam-se para a superfície da gotícula de betume, pelo que a cadeia de hidrocarbonetos fica firmemente ligada ao betume, com a porção iónica localizada na superfície da gotícula. Daí que as gotículas fiquem carregadas electricamente com cargas positivas e negativas consoante sejam emulsões catiónicas ou aniónicas.

No sistema aniónico utiliza-se um ácido para formar um sal a partir do emulsionante e para baixar o pH até um determinado nível. Neste caso utiliza-se ácido clorídrico. Num sistema aniónico usa-se uma base, geralmente hidróxido de sódio (Akzo Nobel, 2008).

As principais propriedades que caracterizam uma emulsão betuminosa são, para além da carga presente na superfície dos glóbulos de betume, a viscosidade, a estabilidade ao armazenamento e a estabilidade frente aos agregados.

A viscosidade é controlada pelo tipo e quantidade de betume, temperatura e tipo de emulsionante. Alguns betumes conferem uma maior viscosidade que outros. Para corrigir a viscosidade, aumenta-se ou diminui-se a quantidade de betume e, adiciona-se ou retira-se cloreto de cálcio (Akzo Nobel, 2008).

A emulsão deve apresentar-se estável durante o armazenamento e transporte mas deve romper (Fig. 13) facilmente durante ou após a aplicação. De uma forma geral esta qualidade é mais fácil de atingir com soluções catiónicas, uma

vez que estas emulsões reagem e rompem quimicamente em contacto com a maioria dos agregados.

Na maioria dos casos os agregados têm cargas negativas, actuando o emulsionante como um agente promotor de adesividade nesta fase.

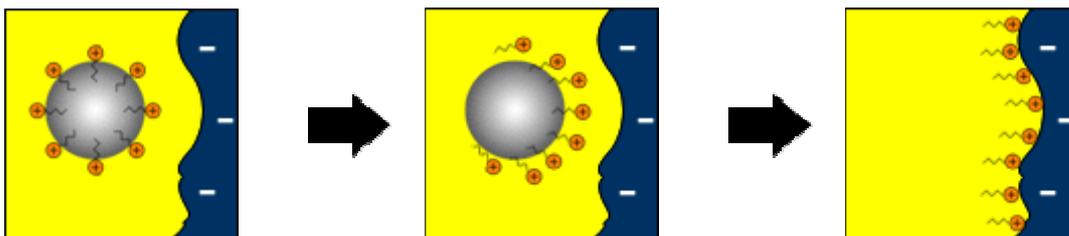


Fig. 13 – Rotura de uma emulsão catiónica (Akzo Nobel, 2008).

No caso da reciclagem a frio “*in situ*”, usam-se geralmente emulsões catiónicas pelos motivos atrás referidos e também porque, a rotura nas emulsões aniónicas está mais condicionada pelas condições atmosféricas porque não rompe quimicamente. Neste ultimo caso o processo de rotura depende exclusivamente da eliminação de água, podendo eventualmente conduzir a adesividades mais baixas. Nas emulsões catiónicas o processo de rotura deve-se a reacções físico-químicas entre o agente emulsionante e os agregados tendo por isso uma rotura de emulsão mais rápida (Campo, 1983; Potti, 1999)

O tipo de emulsionante utilizado no fabrico da emulsão, bem como o seu conteúdo, são fundamentais no fabrico da emulsão. A rotura pode ser controlada pela escolha do emulsionante e seu conteúdo. Outros factores que influenciam a rotura são a temperatura, humidade e o tipo de betume.

A estabilidade de uma emulsão betuminosa relaciona-se com a sua velocidade de rotura, à qual estão associados fenómenos de floculação, de assentamento e de coalescência seguidamente sintetizados (Azko Nobel, 2008):

- A floculação (Fig. 14), é o processo em que as gotículas de betume começam a aderir uma às outras. Muito frequentemente há uma gotícula

no meio rodeada de outras mais pequenas. Na floculação as gotículas podem frequentemente ser separadas novamente por agitação.

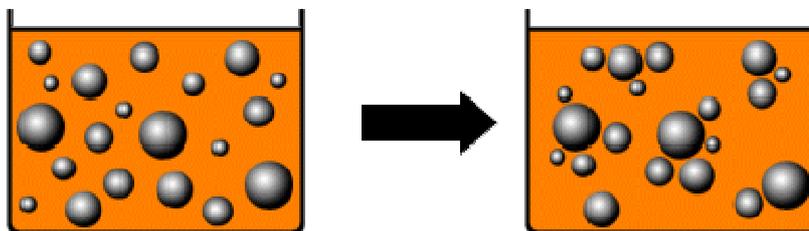


Fig. 14 – Floculação (Azko Nobel, 2008)

- O betume é mais denso que a água, então, por acção da gravidade, as gotículas tendem a orientar-se para o fundo do recipiente (Fig. 15). Se o solvente adicionado ao betume tem uma menor densidade que a água acontece o contrário.

O assentamento pode ser reduzido:

- Melhorando as condições de acondicionamento;
- Aumentando a temperatura e agitando por pequenos períodos;
- Reduzindo a densidade do betume por adição de um solvente;
- Prevenindo a floculação alterando os tipos e concentrações do estabilizador e emulsionante ou por alteração do pH;
- Aumentando a quantidade de betume;
- Aumentando a viscosidade da emulsão.

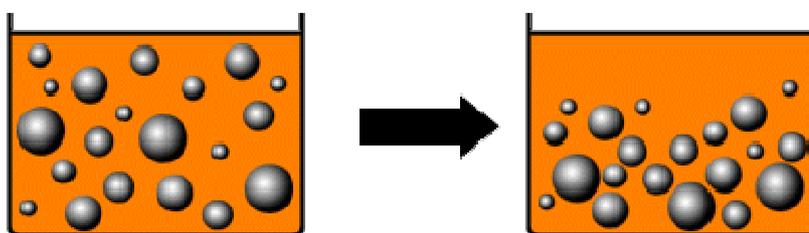


Fig. 15 – Assentamento do betume na emulsão (Azko Nobel, 2008)

- Quando as gotículas se fundem e formam grandes partículas – coalescência – a emulsão eventualmente rompe antes de ser aplicada

(Fig. 16). Este processo começa frequentemente com a floculação e pode ser influenciado pelos seguintes factores:

- Quantidade insuficiente de emulsionante;
- Tipo errado de emulsionante;
- Temperaturas erradas durante o fabrico;
- Temperatura errada de armazenamento;
- Influência mecânica (circular num circuito de bomba durante um longo período de tempo, transporte);
- Betume impróprio.

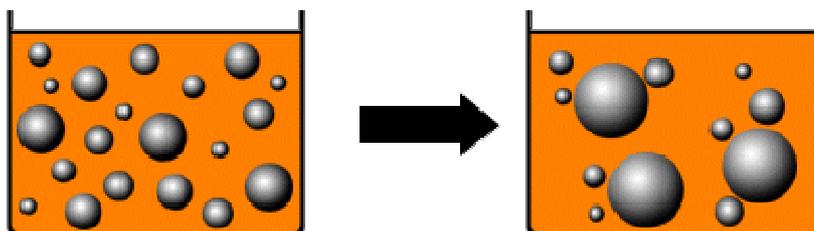


Fig. 16 – Coalescência (Azko Nobel, 2008)

Um problema que se coloca no material fresado do pavimento, é o envelhecimento do betume existente nesse material. O efeito da temperatura, ar, luz solar e chuva em camadas de desgaste, conduz ao envelhecimento da mistura betuminosa, perdendo a suas características elásticas e gerando fendilhamento, consequência da perda das propriedades do ligante betuminoso. O ligante betuminoso quando envelhece aumenta sua consistência (viscosidade e ponto de amolecimento) e do ponto de vista químico aumenta o teor de asfaltenos e reduz o teor de aromáticos e resinas (Betunel, 2008).

A reciclagem de pavimentos é pois, uma técnica que visa a reutilização dos materiais betuminosos recuperados (agregados e ligante envelhecido), sendo por vezes adicionados agentes **rejuvenescedores** para redução da viscosidade e reposição de compostos aromáticos e resinas para recompor a natureza do ligante.

Muitos países têm especificações para as emulsões catiónicas e aniónicas. De uma forma geral as emulsões betuminosas são classificadas segundo a sua

natureza (catiónicas ou aniónicas), estabilidade (velocidade de rotura), viscosidade e dureza do betume base empregue no seu fabrico.

Em Portugal, têm sido classificadas de acordo com as especificações do LNEC E 128/1984 e E 354/1984 que a seguir se sintetizam:

Quanto à sua natureza podem ser:

- Aniónicas (EA);
- Catiónicas (EC).

Quanto à sua estabilidade das emulsões, a classificação é atribuída em função da velocidade de rotura em:

- Rotura rápida (R);
- Média (M);
- Lenta (L).

Relativamente à viscosidade, as emulsões são classificadas em 1 ou 2 consoante sejam menos ou mais viscosas, dependendo de três factores:

- Viscosidade do betume base;
- Teor em betume;
- Dimensão das gotículas de betume.

Classificam-se ainda quanto à dureza do betume utilizado no seu fabrico, designando-se pela letra h (do inglês "hard") as fabricadas a partir de betumes de dureza superior.

Posto isto, as emulsões aniónicas são designadas na especificação LNEC E 128 - (1984) da seguinte forma:

- Emulsões aniónicas de rotura rápida EAR-1 e EAR-2;
- Emulsões aniónicas de rotura média EAM-1 e EAM-2h;
- Emulsões aniónicas de rotura lenta EAL-1 e EAL-1h.

As emulsões catiónicas são designadas na especificação LNEC E 354 –(1984) da seguinte forma:

- Emulsões catiónicas de rotura rápida ECR-1 e ECR-2;
- Emulsões catiónicas de rotura média ECM-2 e ECM-2h;
- Emulsões catiónicas de rotura lenta ECL-1 e ECL-1h.

A partir de 2009, passará a ser obrigatória a aplicação da norma europeia para as emulsões betuminosas catiónicas, EN 13808 (2005), que teve origem na directiva dos “produtos da construção” 89/106/CEE (1988), cujo objectivo foi harmonizar todos os produtos europeus para a construção. De acordo com a Norma Europeia, as emulsões são classificadas como se passa a descrever:

- Quanto à natureza pela letra (C) “cationic”;
- Quanto ao conteúdo nominal de ligante em % (m/m) representado por 2 dígitos;
- Quanto ao tipo de ligante: (B) quando produzido a partir do betuminoso; (P) quando contém polímeros e (F) quando é produzido de um betuminoso que contém um fluxo de mais de 2%;
- Quanto ao comportamento da emulsão à rotura representa-se pelas classes de 1 a 7.

A Cepsa (2008), está a desenvolver bioemulsões baseadas no emprego de substâncias mais ecológicas que permitam a substituição das actualmente utilizadas no seu fabrico, garantindo, as características adequadas a cada aplicação sem, no entanto, deixar de cumprir as especificações vigentes.

Apesar dos benefícios ambientais, os valores de venda no mercado ainda são um pouco mais elevados do que as emulsões tradicionais, uma vez que o custo das naftas verdes e dos tensoactivos ecológicos empregues nas bioemulsões é superior ao das matérias-primas empregues hoje em dia.

Foi verificada a aptidão da utilização destes novos produtos mediante a sua aplicação e fabrico de misturas em laboratório e, tanto as bioemulsões com as “naftas verdes”, como as bioemulsões com “tensoactivos ecológicos”

apresentam um comportamento satisfatório nas misturas a que habitualmente se destinam (Victoria, M., 2008).

As emulsões aniónicas foram desenvolvidas inicialmente no início de 1900. Descobriram-se as suas aplicações mas a sua utilização foi relativamente lenta. Em meados de 1940 foram introduzidas as emulsões catiónicas que significaram uma melhoria técnica significativa e, como se referiu são as mais usadas nas obras de reciclagem "*in situ*" a frio.

Sendo as emulsões constituídas em parte por água, na secção seguinte abordar-se-ão as principais razões que conduzem a que por vezes, seja necessário adicionar mais quantidade à mistura reciclada, além da já existente na emulsão betuminosa.

### **2.3.3. Água**

No fabrico de misturas betuminosas a frio, em particular, nas misturas recicladas, para além dos agregados e das emulsões betuminosas, é ainda utilizada a água, quer com a finalidade de melhorar o envolvimento dos agregados através do ligante betuminoso, quer para otimizar a compactação da camada, pelo efeito de lubrificação que exerce nos agregados.

Conforme referido anteriormente, as misturas fabricadas com emulsão betuminosa são sensíveis às cargas electrostáticas presentes nos materiais, pelo que deve ser avaliada a compatibilidade da água a ser usada no fabrico da mistura com os restantes materiais, em particular com a emulsão betuminosa. Assim, quando da realização do estudo de formulação da mistura reciclada a frio, deve ser utilizada a mesma água que vai ser usada em obra. Se forem detectados efeitos adversos, tais como a rotura prematura na emulsão betuminosa, deve adoptar-se outra fonte de abastecimento, que não a existente no local onde se vai efectuar a obra (Asphalt Institute, 1983), ou em alternativa usar outra emulsão betuminosa.

A água é pois, um elemento interveniente relevante nos estudos de formulação das misturas recicladas, não só porque a quantidade de água a incorporar à mistura, é determinante durante o fabrico da mistura e, a compactação da camada, mas também porque condiciona o desenvolvimento das características mecânicas deste tipo de misturas.

#### 2.3.4. Materiais correctivos e outros

A principal finalidade da adição de materiais correctivos nas misturas é fornecer as fracções granulométricas em falta no material fresado, funcionando como correctores granulométricos e interligando-se entre si (Moreira *et al.*, 2006).

Após a avaliação do pavimento a reciclar, pode ser necessária a adição de agregados virgens, não só como material correctivo melhorando as propriedades da mistura reciclada, tais como estabilidade, durabilidade ou trabalhabilidade, mas também para aumentar a capacidade estrutural do pavimento, com particular interesse, nos casos em que haja um aumento do tráfego na via a reabilitar (ARRA, 2001; Epps, 1990), ou ainda, para fortalecer o esqueleto mineral da estrutura e/ou baixar o conteúdo de betume (Croteau e Lee, 1997).

Na Fig. 17 podem-se observar trabalhos de reciclagem de um pavimento sobre o qual foi espalhado previamente agregado virgem.



Fig. 17 – Reciclagem com mistura de agregados (Arrieiro, 2007)

No fabrico de misturas recicladas a frio também se usa por vezes cimento Portland ou cinzas volantes para aumentar a resistência da mistura, alcançar mais rapidamente as características mecânicas finais e obter maior resistência aos danos causados pela água (Jahren *et al.*, 1998). Pelas mesmas razões, também se adiciona por vezes cal hidratada em combinação com a emulsão betuminosa na produção de misturas (Cross, 1999; Salomon e Newcomb, 2000).

Em relação à utilização de cimento, Marques (1999), considera igualmente que este material, em pequenas quantidades, pode ter como objectivo a diminuição da sensibilidade da camada reciclada à água, principalmente se a reciclagem se estender às camadas granulares subjacentes.

Para o espalhamento de material correctivo tal como o cimento ou a cal, existem actualmente equipamentos modernos que permitem a sua adição imediatamente antes da passagem da máquina recicladora, como se representa na Fig. 18. No entanto, no caso de obras de menor dimensão e tráfego reduzido, esta aplicação também pode ser manual conforme se pode observar na Fig. 19.



Fig. 18 – Espalhamento mecanizado de cimento (Arrieiro, 2007)



Fig. 19 – Espalhamento manual de cimento (Arrieiro, 2007)

Para além das propriedades do material fresado do pavimento, quando se seleccionam os materiais correctivos a adicionar à mistura, deve sempre considerar-se a disponibilidade destes na região onde se vai fazer a obra, seus custos e desempenho (Epps, 1990; Kandhal e Malick, 1997).

No lista da FHWA (2005) relativa aos procedimentos a adoptar no fabrico de misturas recicladas a frio, em particular no caso de se usarem materiais correctivos e/ou aditivos, preconizam-se as seguintes orientações:

- Verificar se a emulsão betuminosa, água, materiais correctivos e aditivos são misturados nas proporções especificadas na fórmula de trabalho da mistura, de acordo com o caderno de encargos;
- Fazer uma inspecção visual da uniformidade e da homogeneidade da mistura;
- Obter amostras da mistura reciclada incorporando os materiais correctivos e/ou os aditivos de acordo com o requerido no caderno de encargos;
- Verificar se a mistura reciclada e os materiais utilizados no seu fabrico obedecem ao requerido no caderno de encargos.

## 2.4. Formulação das misturas recicladas

Os principais objectivos a atingir na formulação das misturas betuminosas são uma boa trabalhabilidade durante o fabrico e aplicação, assim como, um bom comportamento mecânico durante a vida útil do pavimento. Por outro lado, se forem misturas a aplicar em camadas de desgaste, deverão ainda ser formuladas de forma a satisfazerem a alguns requisitos funcionais.

A AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials, a AGC – Associated General Contractors of America e a ARTBA – American Road & Transportation Builders Association, propuseram em 1998, três teorias básicas alternativas para a formulação das misturas recicladas a frio. A primeira assume que o material recuperado do pavimento age como um agregado “negro” e a formulação da mistura compreende a determinação dos materiais correctivos a adicionar aos agregados. A segunda teoria, avalia as características físicas e químicas do betume recuperado e, adiciona um agente rejuvenescedor com a finalidade do betume atingir a sua consistência original. A terceira, e a teoria mais predominante, é uma combinação das duas primeiras. Esta ultima é referida como a teoria efectiva de betume (“effective asphalt theory”), onde os materiais correctivos e os rejuvenescedores do betume integram a camada betuminosa (AASHTO–AGC–ARTBA, 1998; Croteau e Lee 1997 e Rogge et al.,1995).

De acordo com o anteriormente exposto, há quem considere o betume envelhecido como um “inerte”, logo, o material fresado do pavimento é tratado como um agregado negro. Outros, classificam o betume como um material activo, onde a adição de um agente rejuvenescedor terá a função de devolver as características originais do betume envelhecido (ARRA, 2001 e Croveti, 2000). O efeito rejuvenescedor depende, segundo alguns autores, do betume antigo presente no material fresado. Observações efectuadas em campo, e em laboratório, conduziram a que se concluísse que uma parte do betume envelhecido se mantém “inerte” e a outra parte, combina-se com o betume

virgem contido na emulsão para eventualmente produzir um novo ligante (AASHTO–AGC–ARTBA, 1998).

Por seu lado, O’Leary e Williams (1993), ponderaram outros dois métodos muito distintos entre si para o tratamento das misturas recicladas a frio:

- Método 1: Não consideraram necessária a formulação das misturas em laboratório, isto porque, o material fresado do pavimento depende de diversos factores tais como: pavimento existente, profundidade de corte, idade, meio ambiente, remendos, tráfego, tipo de equipamento utilizado para a reciclagem e fresagem, *etc.* A necessidade de adicionar outros materiais é pois, estimada com base em experiências prévias com o ensaio Marshall, mas sem qualquer avaliação relativamente à dureza do betume existente no material fresado. A construção é então iniciada, e são feitos os ajustes na mistura durante a obra de reciclagem, baseados em experiências anteriores, aparência do material, trabalhabilidade e plasticidade;
- Método 2: Alia um sofisticado processo de formulação de mistura a um rigoroso controlo de qualidade durante a execução. São extraídas várias amostras do pavimento no sentido de se efectuarem análises granulométricas do material fresado, para determinação dos materiais correctivos a adicionar. A essas premissas, junta-se um rigoroso controlo de qualidade em campo.

A FHWA (1997), cita alguns métodos de formulação de misturas recicladas a frio. Entre eles está o Método Marshall modificado. Neste método, as misturas são preparadas com 3% de água na mistura, para facilitar o envolvimento da emulsão. A compactação é realizada com 50 pancadas por face, seguindo-se cura por 6 horas, à temperatura de 60°C. Com a definição da percentagem óptima de betume residual, moldam-se mais provetes de ensaio com esta percentagem, variando a quantidade de água adicionada e determinando o volume de vazios de cada mistura. Os parâmetros de dosagem sugerem um volume de vazios entre 9% e 14%.

O Asphalt Institute (1983), propôs um método de formulação para as misturas a frio que não difere muito do método proposto para as misturas a quente. O método prevê a selecção da emulsão betuminosa, sem citar o uso de agentes rejuvenescedores, baseado na granulometria resultante da combinação de material fresado e material virgem. No entanto, o método proposto apenas estima o valor inicial de ligante virgem que será adicionado na mistura reciclada. Este valor, de acordo com o método, deve ser ajustado em campo sem, contudo, haver um parâmetro objectivo para determinar que percentagem de ligante virgem é suficiente (Moreira, 2006).

Face ao exposto anteriormente, verifica-se que ainda não existem orientações ou especificações unanimemente aceites a nível Mundial ou Europeu, apesar dos benefícios a alcançar serem comuns. Este tema tem sido estudado em Portugal, em particular no LNEC. Num dos estudos aí realizados (Antunes 2002), seleccionaram para se proceder a uma análise comparativa, três métodos utilizados em diferentes países para a formulação de misturas densas a frio onde se inclui o caso em apreço, das misturas betuminosas recicladas a frio com emulsão betuminosa. Os métodos em estudo foram os seguintes:

- Método Marshall modificado;
- “Método Espanhol”, baseado nas normas espanholas NLT-161/84 e NLT-162/84;
- “Método Francês”, recomendado nas especificações francesas AFNOR.

Concluiu-se que a formulação por qualquer um dos métodos acima identificados, apresentava o mesmo objectivo comum, isto é, determinar a proporção óptima dos materiais constituintes, em termos da mistura de agregados, emulsão betuminosa, água e eventuais materiais correctivos, de tal forma, que a mistura final não se limite a ter uma boa trabalhabilidade, tão importante na fase de aplicação, mas também, possa garantir as características adequadas de estabilidade e comportamento mecânico durante a vida útil do pavimento (Batista, 2004).

Todos os métodos referidos utilizam os ensaios de “imersão-compressão” com a finalidade de caracterizar mecanicamente as misturas e avaliar a sua susceptibilidade à água.

No estudo comparativo dos três métodos de formulação, após obtenção da fórmula de trabalho para a mistura de agregados, seguiram-se os seguintes procedimentos nos estudos de formulação das misturas:

- Determinação do teor em água óptimo para recobrimento dos agregados;
- Determinação do teor em líquidos óptimo para efeitos de compactação;
- Moldagem de provetes para efectuar os ensaios de “imersão-compressão”;
- Determinação da percentagem óptima de betume residual.

Deste estudo, ressaltou de imediato, o facto dos procedimentos utilizados para cada ensaio serem marcadamente diferentes, tanto na compactação dos provetes, na cura e condicionamento das misturas, como ainda, no método de ensaio para a caracterização mecânica das misturas.

Os resultados alcançados implicaram composições de mistura distintas nos três métodos analisados, concluindo-se que:

- Por indisponibilidade de mais material, não foi possível concluir o estudo de formulação realizado segundo o método recomendado nas especificações AFNOR. Seriam necessários novos estudos, visto que a mistura não satisfazia as especificações, tanto em termos de percentagem de vazios como das características de resistência à compressão sem imersão;
- No caso do ensaio Marshall, verificou-se haver alguma dificuldade na compactação dos provetes, verificando-se a expulsão de água acompanhada também pela expulsão de finos da mistura, não simulando as condições em campo;
- O método de compactação de provetes para ensaios de “imersão-compressão” segundo as normas espanholas NTL-161/84 e NTL-162/84

que se baseiam nas normas ASTM (D 1074 e D 1075), indicou, ser eventualmente o mais adequado para este tipo de misturas;

- Por indisponibilidade de mais material, não foi possível concluir o estudo de formulação realizado segundo o método recomendado nas especificações AFNOR. Seriam necessários novos estudos, visto que a mistura não satisfazia as especificações, tanto em termos de percentagem de vazios como das características de resistência à compressão sem imersão.

Nos estudos de formulação os materiais existentes devem ser caracterizados de forma média, ajustando as fórmulas de trabalho por troços homogêneos do pavimento a reciclar (Batista, 2008).

Em Portugal, a metodologia de formulação das misturas a frio que tem vindo a ser adoptada é semelhante à usada em Espanha, apesar dos valores limite especificados para a resistência da mistura serem diferentes nos dois países.

Na Fig. 20, representa-se um organigrama com os passos usualmente seguidos nos estudos de formulação de misturas fabricadas a frio com emulsão betuminosa.

Conforme referido anteriormente, o método de formulação de misturas densas a frio, nas quais se incluem as misturas recicladas, que tem vindo a ser utilizado em Portugal, baseia-se no "Método Espanhol".

Segundo este método, os provetes a utilizar na determinação da percentagem óptima de betume residual são preparados de acordo com a norma NLT 161/84 (baseada na ASTM D 1074), são posteriormente submetidos a uma cura acelerada de 1 dia à temperatura ambiente e 3 dias a 60° C de acordo com uma proposta de Campo (1998) e são seguidamente ensaiados à "imersão-compressão" de acordo com a norma NLT 162/84 (baseada na norma ASTM D 1075).

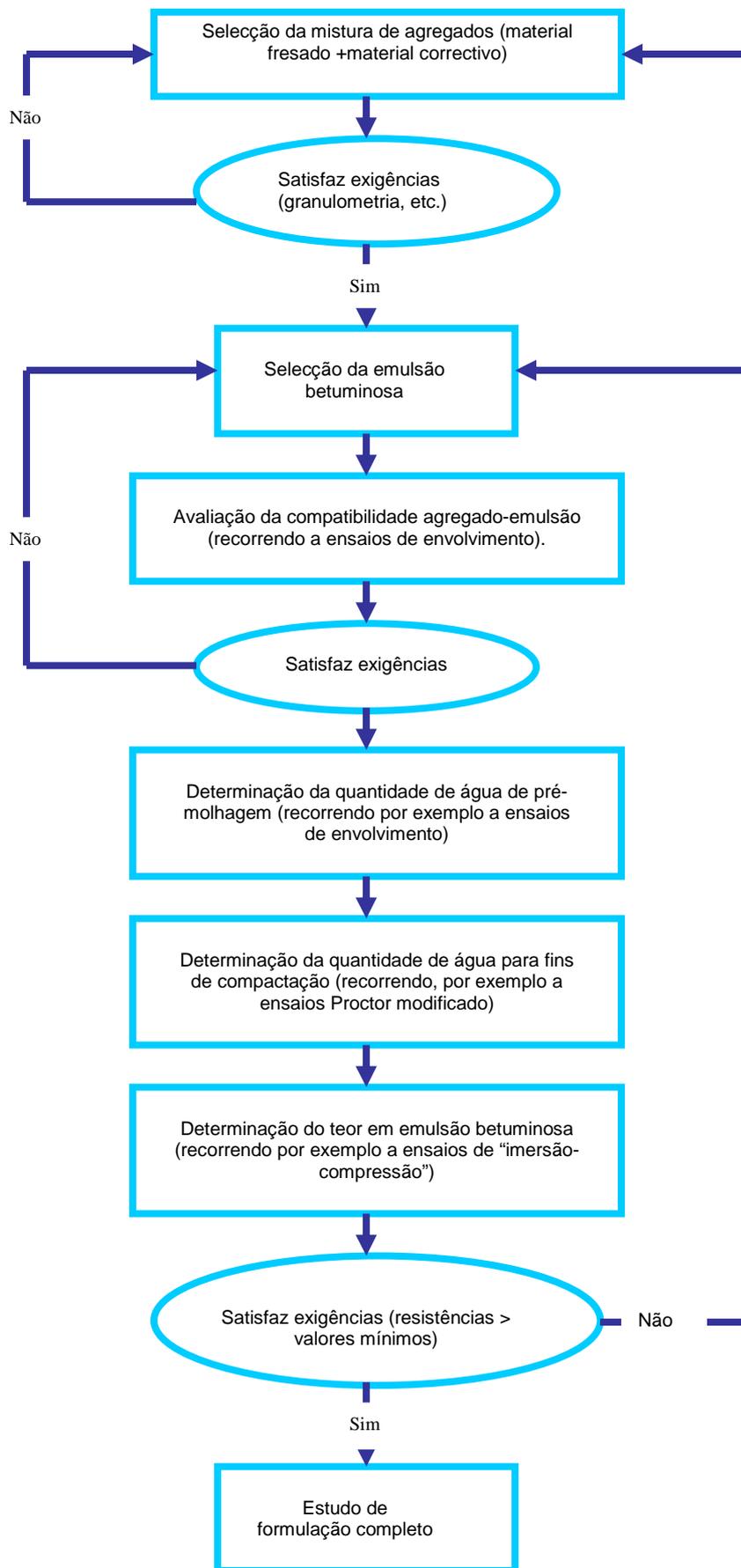


Fig. 20 – Organigrama para a formulação de misturas betuminosas a frio (adaptado de Batista, 2004)

No Caderno de Encargos da EP (1998), estabelecem-se os seguintes valores mínimos a obter em ensaios de "imersão-compressão" de provetes de Agregado Britado de Granulometria Extensa Tratado com Emulsão:

- Resistência após imersão  $\geq 5$  kN;
- Resistência conservada  $\geq 60$  %.

No referido Caderno de Encargos, é indicado o ensaio Proctor Modificado para a determinação do teor óptimo em líquidos para compactação assim como para estabelecer a baridade de referência no controlo de compactação de camadas, subtraindo-se ao teor em água óptimo a água existente na emulsão (no caso das emulsões catiónicas).

A determinação da quantidade de água de pré-molhagem dos agregados, é efectuada usualmente a partir de um teor em emulsão reduzido e várias misturas com diferentes teores em água.

Em relação aos ensaios de "imersão-compressão" é importante referir que a experiência adquirida em Portugal, quer em obras em que se realizaram camadas de ABGETE, quer em obras de reciclagem "*in situ*" a frio, tem demonstrado que os valores mínimos preconizados no C.E. da EP são com frequência largamente ultrapassados, tendo já sido realizadas obras em que o C.E. específico da obra preconizava valores mais elevados (Batista, 2004).

Com base em estudos efectuados no LNEC (Batista e Antunes, 2004) propõe-se os seguintes valores a atingir em ensaios de "imersão-compressão" para este tipo de misturas:

- Resistência à compressão simples após imersão  $\geq 10$  kN;
- Resistência conservada  $\geq 75$  %.

Na formulação das misturas recicladas "*in situ*", a operação de seleccionar os agregados é fortemente condicionada, dado que a principal fonte de agregados, quando não a única, é o próprio pavimento a reabilitar. Por este motivo, deve ter-se em atenção os seguintes factores:

- Variabilidade de materiais na mistura de agregados. Para a sua detecção são recolhidas amostras no pavimento a reabilitar, pelo menos 5 por km (Asphalt Institute MS-21, 1983), com a finalidade de caracterizar o material constituinte do pavimento, sendo que, o equipamento de recolha, deverá ser escolhido de forma a reproduzir o mais fielmente possível a acção da recicladora no campo (FHWA, 1987). Desta avaliação pode aferir-se da viabilidade ou não do uso do material recuperado na reciclagem do pavimento (Batista, 2004);
- Granulometria do material fresado. Independentemente da granulometria do material recuperado do próprio pavimento a granulometria do material fresado vai também depender da máquina recicladora adoptada e da sua velocidade de avanço. Ambos os casos podem, eventualmente ser corrigidos, quer pela adição de novos agregados, quer por ajustamentos na máquina recicladora (rolo dentado com maior ou menor potência de fresagem, maior ou menor velocidade de avanço, *etc.*);
- Natureza dos agregados. Esta depende das características e espessura do pavimento a reciclar. A correcção de qualquer contaminação que possa existir no material fresado, poderá eventualmente ser feita com a adição de cal e/ou cimento;
- Envelhecimento do betume. Processo de natureza físico-química, que resulta da alteração da sua composição química e da sua estrutura coloidal, manifestando-se na prática por um endurecimento e por uma perda das suas características mecânicas e aglutinantes. A correcção, pode ser conseguida, pela adição de rejuvenescedores que devolvem as características originais dos componentes do betume, gradualmente perdidas no decurso do processo de envelhecimento (Dueñas *et al.*, 2008).

Em obras de maior dimensão, em que o pavimento a reabilitar tenha sido sujeito a consecutivas intervenções de manutenção, apresentando por isso, grande variabilidade nos materiais a reciclar, dever-se-á subdividir toda a via a reciclar em troços que apresentem à partida características homogéneas,

caracterizá-los e ajustar o dimensionamento e a formulação aos resultados (Batista, 2004).

## **2.5. Aspectos construtivos da reciclagem**

Segundo Murphy e Emery (1997), e a própria ARRA (2001), para o bom sucesso dos trabalhos de reciclagem a frio devem-se ter em conta os aspectos e conceitos que se descrevem de seguida:

- Preparação da área de construção antes de ser iniciada a obra: devem ser identificadas e eventualmente corrigidas as zonas onde existem materiais não uniformes, diferenças na espessura do pavimento, espessuras diferentes de camadas, ou ainda zonas com insuficiente capacidade de carga para suportar o comboio de reciclagem (ARRA, 2001; Croteau e Lee, 1997 e Kandhal e Malick, 1997);
- Devido à formação de partículas de grandes granulometrias, recomenda-se que não sejam aplicadas camadas inferiores a 5 cm, quando se adicionam cinzas volantes a espessura não deve ser menor do que 10 cm a 15 cm (Kandhal e Malick, 1997 e AASHTO–AGC–ARTBA, 1998);
- Dado que as misturas recicladas "*in situ*", têm geralmente uma maior quantidade de material grosseiro, a colocação requer mais cuidados para evitar a segregação, por isso, a espessura destas camadas está limitada a um máximo de pouco mais de 10 cm podendo ultrapassar os 15 cm quando se usam cinzas volantes. Quanto maior é a espessura da camada, mais difícil é transmitir a energia de compactação em profundidade (Kandhal e Malick, 1997; ARRA, 2001; AASHTO–AGC–ARTBA, 1998 e Murphy e Emery, 1997);
- Os dentes da recicladora devem manter-se desobstruídos e serem limpos com frequência (Fig. 21);
- O equipamento normalmente usado para compactação da camada reciclada, traduz-se geralmente num cilindro de rasto liso vibratório de duplo tambor de 12 t ou mais e um cilindro de pneus de 25 t ou mais (Kandhal e Malick, 1997; ARRA, 2001 e AASHTO–AGC–ARTBA, 1998).

Quando se utiliza a emulsão betuminosa como ligante, a compactação da mistura reciclada deve ser iniciada imediatamente antes ou logo que a emulsão inicie o seu processo de rotura. Este processo, reconhece-se por uma notória mudança de cor da mistura de castanho para negro. Quando isto ocorre, há água suficiente na mistura para actuar como lubrificante das partículas dos agregados mas insuficiente para preencher os seus vazios. Geralmente, é nesta altura que a mistura reciclada reúne capacidade suficiente para suportar o cilindro (AEMA, 2004).



Fig. 21 – Aspecto dos dentes da recicladora após utilização e numa máquina nova

É necessário tempo para a mistura atingir uma cura e resistência mínimas antes de se colocarem as camadas superiores, especificando-se usualmente um período de 14 dias (Kandhal e Malick, 1997; ARRA, 2001; AASHTO–AGC–ARTBA, 1998; Murphy e Emery, 1997 e Croteau e Lee, 1997). Por outro lado, recomenda-se por vezes que devido à grande quantidade de vazios das misturas recicladas a frio, se utilize uma rega para proteger a mistura (ARRA, 2001; Asphalt Institute, 1986 e Kandhal e Malick, 1997). Para pavimentos com baixo volume de tráfego ( $TMD < 400$ ), as selagens têm sido empregadas com

sucesso. Para pavimentos com alto volume de tráfego (TMD > 400), usam-se camadas com misturas betuminosas a quente com cerca de 4 cm com uma rega entre a camada reciclada, para uma boa aderência entre as duas (Kandhal e Malick, 1997; ARRA, 2001 e Asphalt Institute, 1986).

Algumas destas recomendações estão de acordo com conclusões alcançadas em estudos efectuados no LNEC, em que se acompanharam obras onde foram realizadas camadas em misturas densas a frio, incluindo o caso das camadas recicladas (Batista e Antunes, 2003). Nesses estudos verificou-se que em obras realizadas em condições atmosféricas favoráveis (durante a Primavera/Verão) o teor em água das misturas betuminosas estabilizou em cerca de 1% a 2% ao fim de 2 a 4 semanas de idade, considerando-se então que a camada sobrejacente pode ser realizada.

Outros autores consideram, como regra prática, que a camada reciclada apenas alcança a resistência suficiente para receber a/as camadas superiores quando se consegue extrair um tarolo completo (AASHTO–AGC–ARTBA, 1998; ARRA, 2001 e Kandhal, P. e Malick, R., 1997).

A FHWA e FP<sup>2</sup> (2005), aconselham na lista de aspectos a observar relativamente às exigências atmosféricas e controlo de tráfego neste tipo de obras de reciclagem "*in situ*" a frio com emulsões, o seguinte:

- Verificar a temperatura do ar nas datas previstas para a execução dos trabalhos, tendo em atenção o especificado no caderno de encargos. Regra geral, a temperatura deve situar-se acima dos 10° C;
- Ter em linha de conta que as variações de temperatura, humidade e vento afectam os tempos de rotura e cura. Geralmente as especificações recomendam também que não se executem trabalhos com nevoeiro;
- Verificar se existem previsões de pluviosidade significativa, desaconselhada durante os trabalhos;
- Verificar o plano de controlo de tráfego;
- Verificar se os sinais existentes na estrada estão de acordo com o plano de controlo de tráfego do caderno de encargos;

- Certificar-se que os operários encarregues da sinalização de segurança e controlo de tráfego não param o trânsito durante longos períodos de tempo ou em cima do pavimento acabado de tratar;
- Verificar se os sinais são removidos ou tapados logo que deixam de ser necessários;
- Assegurar e desenvolver a implementação de um apropriado plano de acção para veículos de emergência que necessitem circular nas vias a reciclar durante a execução da obra;
- Assegurar que quaisquer condições de insegurança são comunicadas a um supervisor ou às autoridades oficiais.

Durante a reciclagem podem-se formar juntas longitudinais resultantes das várias passagens da máquina recicladora, necessárias para perfazer a largura da via. O que acontece na generalidade é que é a segunda passagem que deve receber a emulsão betuminosa na largura do tambor de fresagem, devendo por isso acautelar-se que a emulsão não é aplicada na passagem anterior em cima das juntas, fechando os injectores nessa zona (Batista, 2004).

Por outro lado dá-se a formação de juntas transversais sempre que a operação de reciclagem é iniciada ou parada, mesmo que seja por um curto espaço de tempo sendo necessário tratar a junta formada. Por tudo isto só se deve parar a recicladora quando for estritamente necessário (Arrieiro, 2007; Wirtgen, 2004).

Durante as paralisações, para evitar a aplicação de outros materiais (por ex: aditivos) por excesso ou por defeito nas juntas transversais deverão ser feitas marcas no local exacto onde a recicladora parou e quando for reiniciada, a recicladora voltará atrás alguns metros e avançará sem adição de emulsão e/ou água, voltando a ligar-se os injectores quando atingir a marca. No momento em que chegar ao local marcado, o operador deverá accionar o sistema de incorporação do material a adicionar (Arrieiro, 2007).

De acordo com o Manual de Recuperação de Rodovias da *Caterpillar* (Caterpillar, 1996), deve ser sempre reajustada a profundidade de corte se a reciclagem for efectuada em mais de uma passagem, caso em que por vezes durante a segunda passagem não se mistura completamente todo o material.

Isto acontece devido à recicladora passar de uma superfície rígida e compactada para outra em que o material está já solto. Para obviar este problema, o tambor deve ser ajustado para cortar numa espessura maior, ou seja, numa profundidade igual à diferença em altura.

## 2.6. Equipamentos usados nas obras de reciclagem

Nas obras de reciclagem *"in situ"* a frio com emulsão betuminosa realizadas em Portugal (ver capítulo 3) foram usados vários tipos de equipamentos, tanto para a reciclagem em si, como para a adição de materiais, nivelamento e compactação.

Para uma melhor compreensão das suas capacidades e características, faz-se uma breve descrição destes equipamentos nos subcapítulos seguintes.

### 2.6.1. Recicladoras

Uma das recicladoras frequentemente usada nas obras de reciclagem *"in situ"* a frio é a fresadora/recicladora "Wirtgen WR 2500" (Fig. 22), que é considerada uma máquina extremamente versátil. Tem tracção independente nas quatro rodas, potência de 610 hp, tambor fresador-misturador de desenho avançado e câmara de mistura de volume variável. Pode executar misturas *"in situ"* de bases granulares com aglutinantes ou não, reciclagens simples de pavimentos flexíveis ou com emulsão betuminosa (Wirtgen, 2008).



Fig. 22 – Modelo da WR 2500 da Wirtgen (Wirtgen, 2008)

A recicladora é dotada de instalação para aplicação da água e emulsão e câmara de mistura. As quantidades são controladas por um sistema computadorizado que assegura exactidão nas taxas de aplicação, possibilitando a reciclagem de pavimentos deteriorados com extrema rapidez (2 km/dia) e grande economia em relação aos métodos de reabilitação convencionais usados actualmente.

As suas principais especificações técnicas são as seguintes:

- Largura de trabalho: 2438 mm;
- Espaçamento entre dentes: 30 mm;
- Profundidade de fresagem máxima: 500 mm;
- Sistema de troca-rápida dos dentes do cilindro de fresagem;
- Número de dentes de corte: 216;
- Quatro velocidades no cilindro fresador para assegurar os melhores resultados nos trabalhos, podendo trabalhar nos sentidos de fresagem para cima e para baixo;
- Tracção variável nas quatro rodas com quatro velocidades e diferencial auto-blocante permanente;
- Ajustamento variável da profundidade de fresagem.

Na Fig. 23 apresenta-se outra fotografia de uma Wirtgen WR 2500 em operação numa estrada rural.



Fig. 23 – Máquina fresadora WR 2500 da Wirtgen (Silva e Miranda Jr., 2008)

Mostra-se na Fig. 24 este equipamento em funcionamento no Zion National Park no estado do Utah, que pelas suas características ecológicas e ambientais como Parque Nacional é um exemplo concreto da situação ideal para a utilização deste tipo de técnica de reciclagem a frio.



Fig. 24 – Reciclagem “*in situ*” a frio com a WR 2500 no Zion National Park, UT (FHWA, 2008)

Outro dos equipamentos muito utilizados na reciclagem de pavimentos “*in situ*” a frio é a recicladora Wirtgen “WR 2000” (Fig. 25), que é igualmente considerada uma máquina extremamente versátil, e que, segundo os entendidos, a sua câmara de mistura variável constitui o melhor argumento a seu favor. Assegura todos os requisitos necessários na reciclagem a frio, estabilização de solos e mistura completa de todos os materiais envolvidos no processo, dado que só uma mistura homogênea poderá satisfazer as elevadas exigências impostas nas camadas de base de grande qualidade. O princípio fundamental consiste no facto da sua caixa do rolo dentado estar unida fixamente ao chassis, sendo que quanto maior for a profundidade de penetração deste no solo, tanto maior será o volume na parte superior do rolo (Fig. 26).



Fig. 25 – Recicladora Wirtgen WR 2000 (Wirtgen, 2007)



Fig. 26 – Caixa do rolo dentado do modelo WR 2000 (Wirtgen, 2007)

Segundo a Wirtgen (2007), a WR-2000 está preparada para enfrentar todos os desafios de utilização, com o seu engenhoso dispositivo de “dentes” que garantem um excelente rendimento de fresagem. Estes dentes são de desgaste muito reduzido, destacando-se pela sua grande duração, e rendimento de fresagem graças à sua elevada capacidade de penetração. A rápida substituição é acelerada pelo apoio de instaladores pneumáticos, assim como dispositivos hidráulicos para fazer girar o tambor. Os tempos de imobilização, a vida útil do tambor e os gastos de serviço são minimizados através do sistema patenteado HT11 de porta dentes trocáveis (Fig. 27). Frequentemente o sucesso no comportamento dos dentes é afectado pela sujidade acumulada nestes, por partículas finas do material fresado ficarem presas no interior do cilindro e, o sistema HT11 permite expeli-las por uma ranhura situada atrás da peça superior evitando que o dente fique bloqueado.



Fig. 27 – Sistema de dentes da WR 2000 (Wirtgen, 2007)

As suas principais especificações técnicas são as seguintes:

1. Largura máxima de trabalho: 2000 mm;
2. Profundidade máxima de fresagem: 500 mm;
3. Espaçamento entre dentes: 20 mm;
4. Número de dentes 158;
5. Diâmetro do tambor incluindo os dentes: 1480 mm;
6. Sistema de troca rápida dos dentes HT 11.

Por último a WR 2100 DCR, é também uma máquina de grande rendimento, com a capacidade de fresar de uma só vez as camadas betuminosas e granulares, misturando-as com o ligante e eventualmente a água necessários. Procede ainda ao espalhamento e nivelamento da mistura, graças à régua que possui para o efeito, permitindo alcançar trabalhos de grande qualidade através dos resultados obtidos com o material reciclado em termos de regularidade e homogeneidade. Vem equipada com um motor com 610 cv, atingindo profundidades até 220 mm e 2000 mm de largura. Este modelo tem ainda as seguintes funcionalidades:

- Regulação automática de potência;
- 8 injectores de emulsão com doseadores assistidos por um microprocessador, permitindo com o apoio de uma bomba volumétrica a regulação da quantidade de ligante em função da profundidade e largura a reciclar;
- Sistema electrónico de nivelamento longitudinal e sensor electrónico de nivelamento transversal;
- Dispositivo regulável para o espalhamento do material reciclado entre 2 a 3 cm, com sistema de vibração e compactação.

### **2.6.2. Motoniveladoras**

Para nivelamento das misturas colocadas em obra, usam-se geralmente máquinas niveladoras entre a passagem da máquina recicladora e a passagem dos cilindros.

A motoniveladora CAT 140 M (Fig. 28) é um exemplo deste tipo de equipamento, cuja finalidade, no caso das obras de reciclagem "in situ" a frio é o espalhamento e nivelamento do material reciclado para garantir uma camada regular e uniforme.



Fig. 28 – Motoniveladora tipo CAT 140 M (Catterpillar, 2008)

Também chamadas motoscrapers ou *motor grader*, estas máquinas são muito úteis para regularização das misturas betuminosas, para mistura de materiais sobre os pavimentos a reabilitar ou construir (*road-mix*); para arejamento e secagem de misturas demasiadamente húmidas para compactação; para amontoar materiais (*windrow*); e para espalhamento de misturas em camadas sobre a via (Santos *et al.*, 2007).

Essas máquinas dispõem de lâmina de aço central, com movimentos de e até 90° (Fig. 29, direita), comandada hidráulicamente ou mecanicamente, na qual incide também o peso da própria máquina. Dispõem de escarificador (Fig. 29, esquerda), também central, útil para abrir pequenos sulcos superficiais e ajudar a resolver problemas de segregação nas vias (Santos *et al.*, 2007)

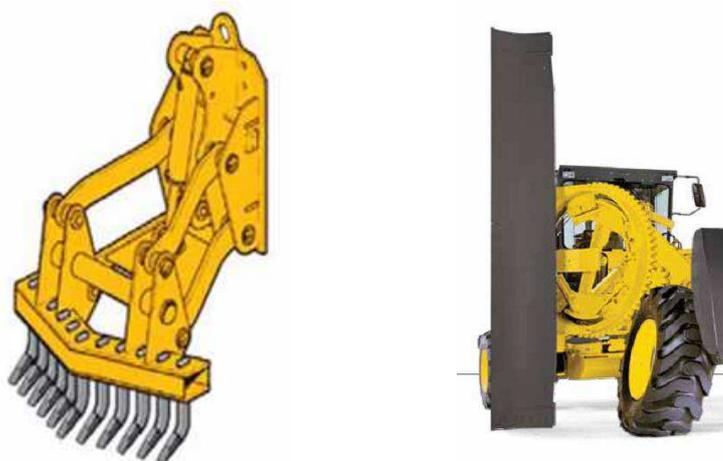


Fig. 29 - Escarificador (figura esquerda) e aspecto do movimento da lâmina central (figura direita) (Santos *et al.*, 2007)

Acresce ainda que, as motoniveladoras são capazes de fazer serviços leves de terraplenagem, e de se deslocarem por moto próprio, a uma velocidade razoável, sem inconveniente para o local do serviço, mesmo a grandes distâncias.

Em geral as motoniveladoras dispõem de quatro rodas motrizes traseiras e de duas rodas direccionais dianteiras. As rodas dianteiras podem ser inclinadas lateralmente com comando hidráulico ou mecânico de modo a poder servir de apoio às pressões maiores da lâmina sobre os materiais a trabalhar. São máquinas muito versáteis e utilíssimas nos trabalhos de construções rodoviárias, nos de pavimentação e na conservação das estradas (Santos *et al.*, 2007).

### **2.6.3. Misturadoras**

Nas obras de reciclagem “*in situ*” a frio, em que para além da emulsão betuminosa se utiliza também cimento, uma das formas mais correntemente utilizadas para a sua adição, é misturá-lo previamente com água, formando uma calda que se junta, através de mangueiras, posteriormente aos restantes materiais na câmara de mistura da máquina recicladora.

Uma das misturadoras de cimento e água que se tem utilizado em Portugal é a WM 1000. Este equipamento permite a mistura de 1000 l/min, ligando-se à recicladora através de uma mangueira flexível conforme se pode ver na Fig. 30.

Esta misturadora foi, por exemplo, usada na obra do IC12, para mistura com o auxílio de um microprocessador de controlo das quantidades de água e cimento especificadas na fórmula de trabalho. No caso desta obra, com a adição de cimento pretendeu-se melhorar a adesão agregado-betume e diminuir o tempo de cura com a conseqüente abertura ao tráfego mais rápida. Melhorou-se também ainda as características mecânicas da mistura reciclada (Araújo *et al.*, 2008).

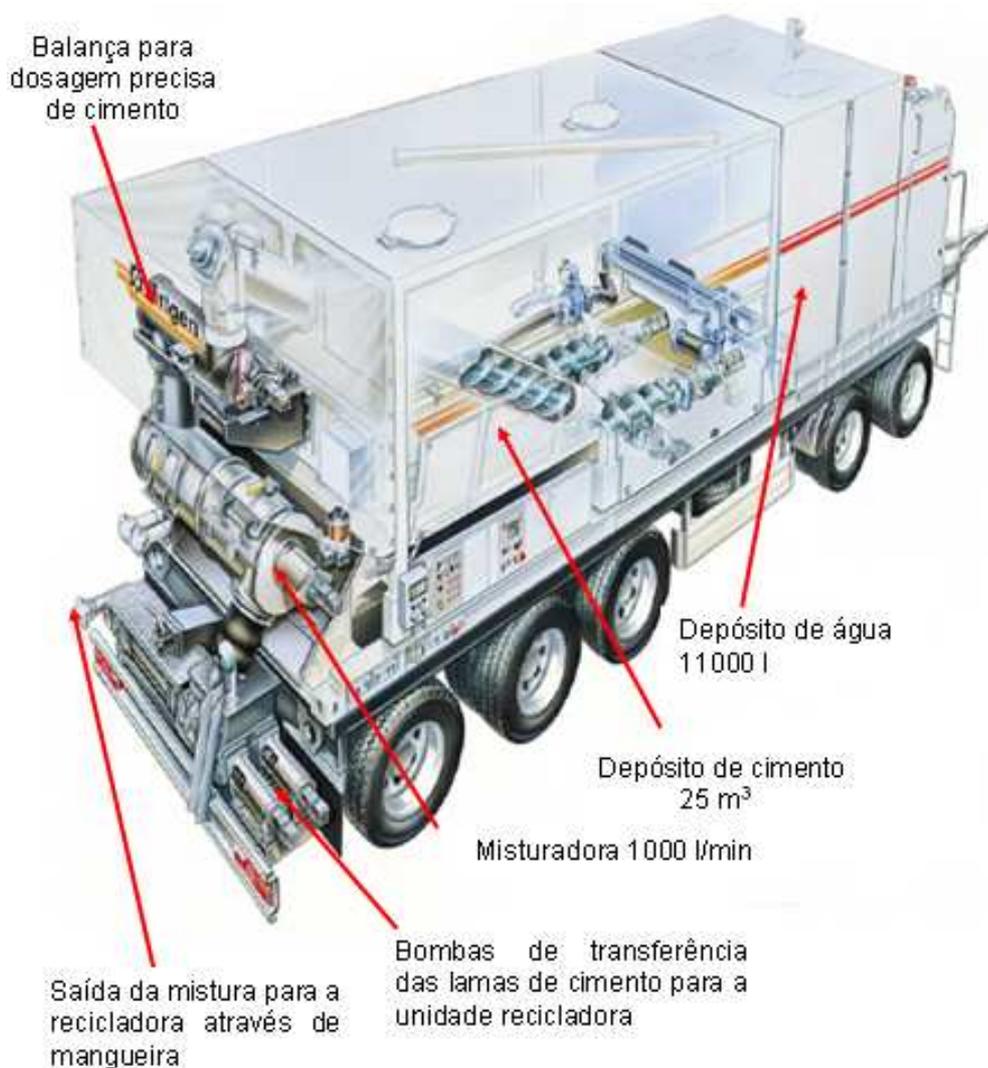


Fig. 30 – Esquema da misturadora móvel de lama de cimento WM 1000 (Wirtgen, 2007)

O transporte e ligação da emulsão betuminosa é feito, conforme retratado na Fig. 31, através de um camião cisterna que vai à frente da recicladora ligado a este através de uma mangueira flexível.



Fig. 31 – Comboio composto pela recicladora, misturadora e cisterna de emulsão (Wirtgen, 2005)

Os materiais fresados juntamente com a emulsão e a calda de cimento são processados na câmara de mistura da recicladora e colocados através da parte posterior desta.

#### **2.6.4. Equipamentos de compactação**

Nas obras de reciclagem a frio “*in situ*” usam-se geralmente dois tipos de cilindros de compactação: de rasto liso e pneumáticos. Seguidamente toma-se como exemplo a obra do IC12 entre Canas de Senhorim e o IP3 onde foi usado um cilindro vibratório de rasto liso do tipo CAT CB-534D (Fig. 32), e um cilindro de pneus do tipo PF-300C (Fig. 33). O primeiro utilizou-se na fase inicial de compactação e o segundo na fase seguinte.



Fig. 32 – Cilindro vibratório de rasto liso do tipo CAT CB-534D (Catterpillar, 2008)



Fig. 33 – Cilindro de pneus do tipo PF-300C (Catterpillar, 2008)

## 2.7. Controlo de qualidade

Nas obras de reciclagem a frio “*in situ*”, onde se associa o aproveitamento dos materiais existentes no pavimento à economia (tanto energética como de transporte dos materiais), a experiência, é sem dúvida um factor determinante na sua avaliação e no controlo de qualidade. Neste tipo de obras é particularmente importante que haja uma boa concepção, execução e controlo de qualidade para que esta solução seja de facto técnica e economicamente viável. As experiências anteriores, mostram no entanto, que nem todos os casos são bem sucedidos, ocorrendo por vezes a degradação precoce do pavimento reciclado (Arrieiro, 2007).

Qualquer obra de pavimentação mal executada, em particular, obras de reciclagem “*in situ*” onde os riscos associados são naturalmente maiores, pode implicar a redução da vida útil do pavimento gerando custos futuros relativos à reparação de falhas e, requerendo eventualmente intervenções profundas que aumentarão substancialmente o custo da obra. Além do mais, o aparecimento de degradações prematuramente no pavimento aumenta os custos de transporte, interfere directamente no desenvolvimento económico e social e no bem-estar das populações (Arrieiro, 2007).

O controlo de qualidade em obras de reciclagem “*in situ*” a frio torna-se eventualmente mais difícil, derivado a um variado número de factores que incluem a limitação na capacidade de controlar as características dos materiais utilizados (por ex: granulometria dos agregados, a alteração das propriedades pré-existentes do betume, *etc.*), particularmente em estradas muito antigas onde predominem os “remendos” (ARRA, 2001; Croteau e Lee, 1997 e Epps, 1990).

Por outro lado, os pavimentos a reciclar dificilmente apresentam o mesmo grau de homogeneidade de um pavimento novo em resultado de se utilizarem materiais existentes do pavimento que, durante a sua construção, já haviam sido sujeitos a tolerâncias de fabrico. Acresce o facto do pavimento a reciclar

poder eventualmente ter sido alvo de acções de conservação diferenciadas ao longo do seu traçado.

Por tudo isto, é necessário um bom planeamento das operações de controlo de qualidade para obter uma camada reciclada a frio “*in situ*”, que garanta as características mecânicas satisfatórias, independentemente do tipo de especificações que se tenha seguido, que como se verá mais à frente, variam de país para país, não existindo na maioria das vezes para este tipo de misturas.

Um bom plano de controlo de qualidade por um lado não deve ser tão rígido que não possa autorizar alterações devidas à variabilidade inerente a este tipo de técnica, mas por outro, deve ser suficientemente sofisticado para que se possa determinar o nível de aceitabilidade do processo de reciclagem a frio e identificar com precisão as áreas de não uniformidade, que portanto requeiram alterações no processo de reciclagem (AASHTO–AGC–ARTBA, 1998).

As obras portuguesas têm seguido as características exigidas no caderno de encargos das EP para ABGETE, dado ainda não existirem especificações técnicas para as misturas reciclados “*in situ*” a frio.

O LNEC recomenda que o controlo de qualidade vise, para além dos três primeiros pontos que são comuns nas operações de controlo de qualidade, o seguinte:

- Determinação do betume residual;
- Análise granulométrica;
- Avaliação da compacidade;
- Realização de ensaios de “imersão-compressão” com amostras retiradas à saída da máquina recicladora para avaliação da resistência mecânica e da susceptibilidade à água.

Tomando como outro exemplo as experiências Espanhola e a Brasileira, descrevem-se de seguida, sumariamente, os principais procedimentos de

controlo de qualidade constantes das especificações técnicas vigentes nesses países, para as misturas recicladas a frio “*in situ*”.

Em Espanha os métodos de controlo laboratoriais e de campo são definidos no caderno de encargos de cada obra a executar, sobre amostras extraídas com um espaçamento de pelo menos uma em cada 100 m.

Deve ser efectuada uma observação visual, da mistura betuminosa. Recolhem-se amostras de material à saída da recicladora, pelo menos duas vezes ao dia para determinação da granulometria, do teor em humidade da mistura, do teor em betume e pelo menos uma vez ao dia para efectuar ensaios de “imersão-compressão”.

Deve ser efectuada uma observação visual da mistura betuminosa reciclada, para verificação do envolvimento do ligante, homogeneidade da superfície e ausência de segregação.

No Brasil, para controlo das características do material fresado deve ser executado em cada sub-troço homogéneo, com no mínimo uma recolha de amostra por cada 3.500 m<sup>2</sup> de via, abrangendo as seguintes determinações (DER, 2006):

- Granulometria;
- Extração de betume;
- Teor de humidade.

Por cada 30 m determina-se:

- Espessura de corte, imediatamente após a passagem da recicladora com uma tolerância admitida de  $\pm 1,0$  cm da definida em projecto;
- Espessura das camadas de desgaste e subjacentes existentes. Os resultados obtidos são parâmetros para ajuste e verificação da composição granulométrica definida na fórmula de trabalho da mistura reciclada, e confirmação dos sub-troços de materiais homogéneos.

O controlo da camada reciclada inclui:

- Extração de betume;
- Análise granulometria da mistura após extração do betume;
- Ensaio *Marshall*, para determinação do índice de vazios.

Podemos retirar do que foi dito anteriormente que, a existência de um sistema de controlo de qualidade no decurso de uma obra é de relevante importância para qualquer dono de obra e empreiteiro, no sentido de poderem ser efectuados os devidos e necessários ajustamentos de campo.

## **2.8. Evolução do comportamento das misturas recicladas a frio “*in situ*” com emulsão betuminosa durante o processo de cura**

O conhecimento das características mecânicas dos materiais de pavimentação e da sua evolução ao longo da vida útil de serviço, é indispensável para a concepção e o dimensionamento da estrutura do pavimento, por forma a garantir que esta estrutura terá capacidade de carga suficiente para suportar o tráfego a que se destina num pavimento reciclado a frio “*in situ*”.

Numa mistura reciclada a frio com emulsão betuminosa, só são atingidas as suas características mecânicas finais quando o processo de cura tiver terminado (Batista, 2004), verificando-se em todo o processo, variações no comportamento mecânico da camada reciclada.

Existindo pois, uma relação directa da cura com a eliminação de água da camada reciclada, o LNEC (Batista, 2004), procedeu a um estudo para monitorizar a evolução do teor em água durante o processo de cura, comparando resultados obtidos em algumas obras, em particular, nas obras do IP2 entre a Barragem do Fratel e a EN 118 e da EN120 entre Aljezur e Bensafrim. Na primeira obra referida foi utilizada uma mistura reciclada a frio e na segunda, uma mistura do tipo ABGETE.

Ao longo do acompanhamento destas obras, durante o processo de evolução de cura da mistura, foi sendo possível extrair tarolos a profundidades cada vez

maiores, com valores cada vez mais elevados, sendo uma manifestação evidente da variação do comportamento mecânico dos materiais (Batista, 2004).

Concluiu-se que, em condições climáticas favoráveis só se conseguiam extrair tarolos em toda a altura da camada ao fim de 5 a 8 semanas (Fig. 34), enquanto que, por outro lado, se atingia um teor em água de em cerca de 1% a 2%, logo ao fim de 2 a 4 semanas (Fig. 35).

Posto isto, atingindo assim a estabilização do teor em água, torna-se possível colocar a camada sobrejacente à reciclada, apesar da mistura ainda não ter atingido as suas características mecânicas finais.

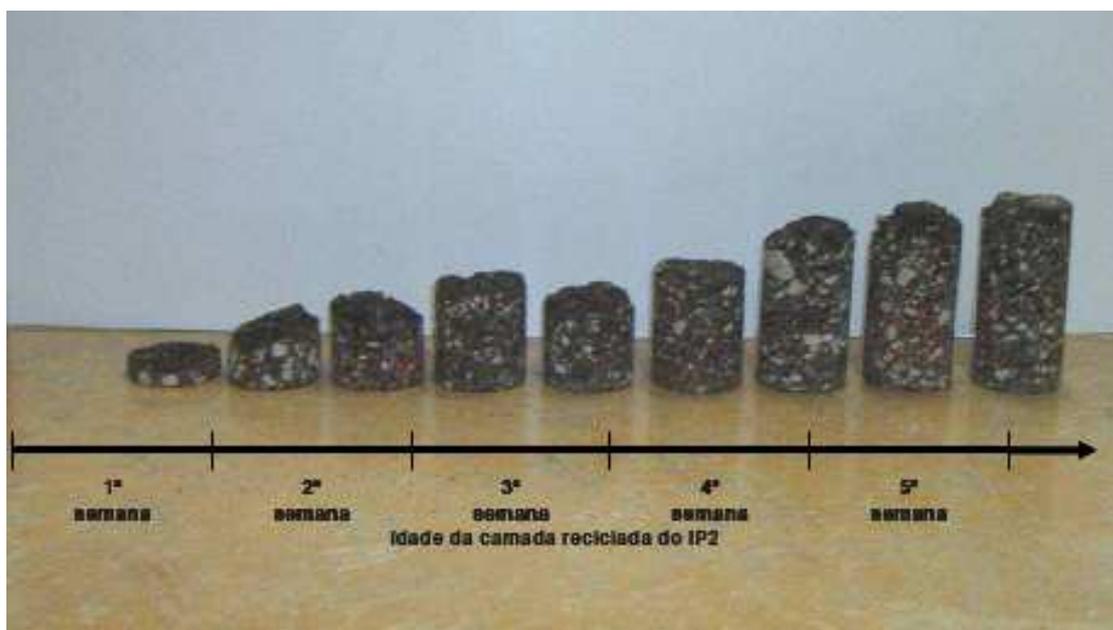


Fig. 34 – Evolução da altura dos tarolos extraídos com a idade da camada, na 5ª semana já tinham a altura da camada (Batista e Antunes, 2006)

É pois, durante a cura que se dá o desenvolvimento das propriedades mecânicas do ligante betuminoso (Asphalt Institute, 1986). A “cura” é, no caso particular das misturas betuminosas fabricadas a frio com emulsão betuminosa, um aspecto fundamental a considerar no que respeita à evolução no tempo das características mecânicas das camadas recicladas.

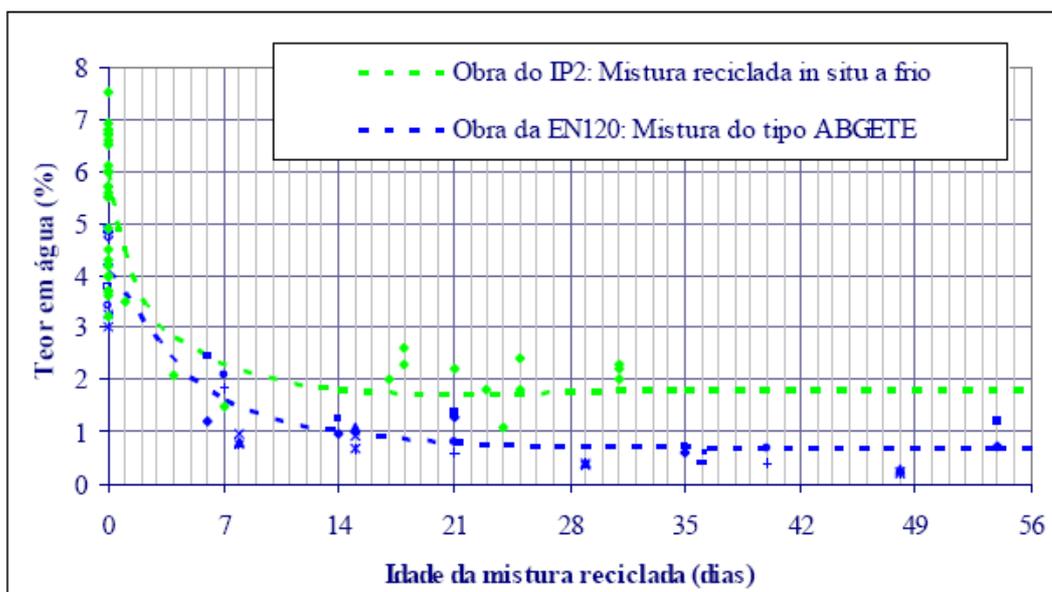


Fig. 35 – Evolução do teor em água de misturas a frio compactadas em obra (Batista e Antunes, 2006)

Cabe aqui referir que, apesar da “cura” se processar durante um período de tempo relativamente curto da vida útil do pavimento reabilitado, é condicionante para as características mecânicas que esse pavimento apresentará durante o seu tempo de utilização restante (Batista, 2004).

Face ao anteriormente exposto, para caracterizar de forma detalhada a evolução das características mecânicas das camadas com misturas fabricadas a frio ao longo do processo de cura, foi realizado um estudo no LNEC (Batista, 2004), que inclui um vasto plano de ensaios laboratoriais, com provetes constituídos por:

- Uma mistura betuminosa a frio fabricada em laboratório;
- Uma mistura reciclada “*in situ*” a frio, recolhida de duas obras em curso;
- Uma mistura a quente do tipo GB1.

Os ensaios foram realizados em condições controladas, abordando os seguintes casos:

<sup>1</sup> - Grave-Bitume (Azevedo, 1993)

- Evolução do módulo de deformabilidade ao longo do processo de cura das misturas a frio: concluiu-se que este aumenta com a idade das camadas;
- Influência da temperatura no módulo de deformabilidade das misturas a frio: a lei que rege a variação do módulo de deformabilidade com a temperatura é do mesmo tipo que para as misturas a quente;
- Resistência à fadiga e às deformações permanentes das misturas betuminosas a frio e sua evolução ao longo do processo de cura. Verificou-se da análise dos resultados obtidos nos ensaios de fadiga que, após terminada a cura, as misturas a frio possuem um comportamento semelhante às convencionais. Relativamente à deformabilidade, já existe diferenças entre as misturas estudadas, dado que os resultados mostraram que, o comportamento das misturas recicladas a frio, fica entre o das misturas a quente e o das misturas a frio com agregados virgens. Observou-se ainda, que durante a cura, principalmente nas idades mais jovens, as misturas a frio sofrem deformações iniciais relativamente elevadas em comparação com as misturas a quente e que, finalizado este processo, as deformações passam a ser mínimas, podendo concluir-se que apresentarão um bom comportamento às deformações permanentes. Isto confere alguma confiança ao emprego das misturas recicladas a frio porque, não sendo aplicadas nas camadas superiores, as deformações que possam vir a formar-se, vêm a ser corrigidas quando da aplicação das camadas subjacentes.



## **3. OBRAS DE RECICLAGEM “*IN SITU*” A FRIO COM EMULSÃO BETUMINOSA EM PORTUGAL**

### **3.1. Introdução**

Em Portugal, a reciclagem de pavimentos a frio “*in situ*” foi iniciada em 1992, com a obra de reabilitação do troço do pavimento da EN12 (Batista, 2004). Estima-se que até 2004, tenham sido reciclados cerca de 1 900 000 m<sup>2</sup> (Martinho *et al*, 2004), 43% dos quais com recurso à técnica da reciclagem a frio com emulsão betuminosa. Apesar desta percentagem ser muito inferior à de outros países europeus, houve um significativo aumento nos últimos anos (Pereira e Picado–Santos, 2006).

Nas seguintes secções, descrever-se-ão sumariamente, as principais obras de reciclagem “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa, efectuadas até hoje no nosso país. Seguidamente far-se-á uma breve descrição dessas obras, com a finalidade de apresentar elementos sobre a experiência portuguesa neste tipo de reciclagem.

As obras são descritas por ordem cronológica e na generalidade, quanto à sua localização, descrição das camadas do pavimento antes e depois das obras de reabilitação, fórmulas de trabalho e processos construtivos. Sempre que foi possível, acrescentou-se também informação, sobre o controle de qualidade e caracterização da camada reciclada.

### **3.2. EN12 – Estrada de circunvalação do Porto**

#### **3.2.1. Descrição sumária da obra**

A obra decorreu entre 1992 e 1993, sendo entidade fiscalizadora, na altura, a Direcção de Estradas do Porto (EP).

A obra teve lugar em diversos troços da Estrada de Circunvalação do Porto, ao longo de 13,2 km entre Matosinhos e o Freixo, do km 0+000 ao km 13+200 e foi resultado de uma alteração, já em fase de obra, à solução de reabilitação adoptada inicialmente, isto porque se verificou, que as espessuras necessárias a aplicar nas camadas de reforço previstas inicialmente (cerca de 16 cm), iriam causar problemas ao nível da geometria de fronteira, problemas esses já existentes e resultantes de anteriores intervenções (Oliveira, 2000).

O troço da EN12 a reabilitar era formado por 2 vias em cada sentido, em pavimento flexível, apresentava grande variabilidade de materiais, sendo por isso de características muito heterogéneas. Integrava camadas em betão betuminoso com uma espessura global entre 5 a 25 cm, sobre bases granulares com uma espessura maior ou igual a 12 cm (Oliveira, 2000).

As anomalias principais eram fundamentalmente fendilhamento tipo “pele de crocodilo” com algumas covas e deformações permanentes muito acentuadas nas vias exteriores em consequência do tráfego pesado.

Relativamente à estrutura final do pavimento reabilitado, ficou prevista uma camada, resultante da reciclagem “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa até 20 cm de profundidade, subjacente da camada de desgaste em betão betuminoso com 5 cm (Fig. 34).

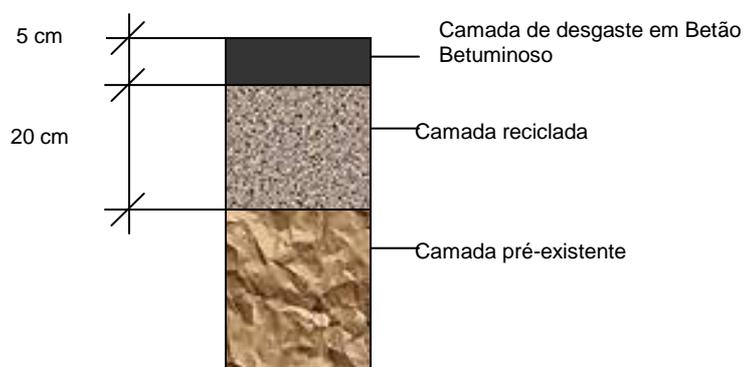


Fig. 36 – Estrutura final do pavimento reabilitado (EN12 – Estrada de Circunvalação do Porto)

### 3.2.2. Formulação da mistura reciclada

Previa-se inicialmente, derivado ao facto de existirem variações na espessura da camada em betão betuminoso entre os 5 cm e os 25 cm (Miranda, 1997), resultantes eventualmente de obras de conservação onde foram colocados nalgumas zonas, tapetes betuminosos, que a contribuição das camadas betuminosas do material retirado do pavimento que iria integrar a camada reciclada oscilasse entre 25% e 100% com uma predominância entre os 50% e os 90%, o que era um indicador provável de variações da fórmula de trabalho a adoptar (Oliveira, 2000). No entanto, apesar das perspectivas não serem muito favoráveis, os estudos de formulação permitiram chegar a valores de acordo com os estipulados no Caderno de Encargos para esta obra.

Para ligante do material reciclado, o adjudicatário, empregou uma emulsão betuminosa catiónica de rotura lenta à base de betume isento de fluidificantes, com a designação espanhola “ECL-2-Rejuv (Telcograva)” (Dueñas *et al.*, 2008).

Como material correctivo foi utilizado cimento, para garantir os valores de resistência conservada de 90% para o material betuminoso e de 70% para o granular (Oliveira, 2000).

Foram desenvolvidos estudos sobre amostras retiradas do pavimento antigo pelo laboratório do “Centro de Investigacion-Elpidio Sanchez Marcos” para apuramento da fórmula de trabalho, sendo a composição da mistura reciclada para 100% de material fresado a seguinte (Gonçalves, 1994):

- 5% de emulsão do tipo ECL-2-Rejuv “Telcograva” (REPSOL);
- 2% de cimento;
- 2% de água.

### 3.2.3. Aspectos construtivos desta obra

Com o intuito de facilitar os trabalhos ao equipamento de reciclagem, aumentando-lhe o seu rendimento, decidiu-se executar uma primeira fresagem

(com fresadora), seguida de regularização com a motoniveladora e de uma compactação.

Antes de se iniciar o processo de reciclagem, e mistura dos materiais com a emulsão e água, espalhou-se previamente o cimento na percentagem estipulada na fórmula de trabalho. Utilizou-se uma máquina recicladora Caterpillar RR 250 (Gonçalves, 1994).

A compactação realizou-se com recurso a um cilindro vibratório de rasto liso com 35 kgf por cm de geratriz vibrante, seguido por um mínimo de 6 passagens com um cilindro de pneus pesado (pressão de 0,8 MPa) (Oliveira, 2000).

Após a cura foi aplicada uma camada de desgaste em betão betuminoso 0/14 mm, com 5 cm de espessura.

#### **3.2.4. Principais conclusões**

Apesar de se ter concluído esta obra com êxito, aplicando a técnica de reciclagem "*in situ*" a frio com emulsão betuminosa, numa estrada com um volume de tráfego elevado e cruzamentos com outras vias, a presença das caixas de saneamento básico foi um factor altamente limitativo ao rendimento dos trabalhos, chegando mesmo a inviabilizá-los nalguns troços (Oliveira, 2000). Acresce ainda o facto de aumentar a mão-de-obra com os inconvenientes que daí advêm (Gonçalves, 1994). Isto explica porque nalguns países com experiência mais prolongada desta técnica, só é aplicada em estradas rurais sem infra-estruturas no subsolo.

As condições atmosféricas menos favoráveis, não permitiram que esta técnica fosse aplicada em toda a área que estava inicialmente prevista pelo que também se pode concluir que a não ser que se execute a obra numa época garantidamente sem pluviosidade o planeamento dos trabalhos deve ter sempre em atenção este factor que é dos mais limitativos da reciclagem "*in situ*" a frio com emulsões.

Verificou-se ainda que esta solução foi vantajosa neste caso e em casos similares, pois permitiu, tratar de forma diferenciada as duas vias de circulação existentes, eliminando o problema estrutural de base na via exterior (muito degradada pelo tráfego pesado) e actuando só superficialmente com aplicação da camada de desgaste na via interior (relativamente em bom estado de conservação) (Gonçalves, 1994).

A camada reciclada apresentou nalgumas zonas desagregações, que foram no entanto atribuídas ao excesso de tempo decorrido até á aplicação da camada de desgaste tendo erradicado por completo a propagação de fendas (Oliveira, 2000).

Fez-se uma avaliação em termos económicos comparativamente ao valor por m<sup>2</sup> da solução tradicional de execução de uma nova camada de base com características semelhantes à camada reciclada verificando-se que, ao ser aplicada esta técnica de reciclagem “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa, se economizava cerca de 5,5 €/m<sup>2</sup>, sendo uma contribuição economicamente importante e a considerar em obras onde se procure um solução que possa integrar este tipo de técnica (Gonçalves, 1994).

### **3.3. EN222 – Régua/Ponte das Bateiras**

#### **3.3.1. Descrição sumária da obra**

A obra de reabilitação do troço da EN222 entre a Régua e a Ponte das Bateiras, inserido nos Concelhos de Lamego, Armamar e Tabuaço, todos pertencentes ao distrito de Viseu, decorreu em 1995, sendo a entidade fiscalizadora a Direcção de Estradas do Porto (EP).

O troço a reciclar revestia-se de particular interesse para a região por se situar ao longo da margem esquerda do Douro, muito menos acidentada que a margem direita e utilizada rodovariamente pelas populações entre a Régua e o Pinhão.

Na execução dos trabalhos, que se desenvolveram ao longo de um troço de 14,2 km do km 134+800 ao km 149+000, no sentido Régua – Ponte das Bateiras, a técnica utilizada foi a reciclagem “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa, por ser a única técnica encontrada de reaproveitamento parcial que permitia resolver os graves problemas do pavimento tanto em termos das deformações existentes como da baixa qualidade das bases, assim como, representava ainda uma economia de resíduos gerados a colocar a vazadouro de aproximadamente 22000 m<sup>3</sup> relativamente a outra solução tradicional que se pudesse adoptar (Graça e Manilha, 1998).

Há que considerar também, em abono da adopção desta solução de reabilitação neste caso que, face às características dos terrenos envolventes o vazadouro mais próximo se situaria sempre a mais de 60 km, o que, perfaria cerca de 1834 percursos de camiões a vazadouro com os consequentes consumos de combustível e incómodos pelo aumento do tráfego pesado nas proximidades da obra assim como uma economia em cerca de 2300 deslocações para transporte de agregados para a reconstrução (Graça e Manilha, 1998).

O pavimento flexível existente, apresentava grande variabilidade de materiais, sendo por isso de características muito heterogéneas.

As anomalias principais eram fundamentalmente fendilhamento tipo “pele de crocodilo”, com grandes deformações transversais e longitudinais, assim como covas com desagregação de material. Verificava-se uma manifesta perda de eficácia das guardas de segurança por afundamento relativo, em resultado das repetidas operações de preenchimento de depressões (Graça e Manilha, 1998). O seu avançado estado de degradação e as deformações consequentes, estava associado não só ao facto de ter ultrapassado há muito a sua vida útil mas também ao arrastamento de finos por alteração do nível da água na albufeira da barragem de Bagaúste e à percolação das águas internas ou de superfície infiltradas nas valetas, quase todas em patamar (Oliveira, 2000).

Relativamente à estrutura final do pavimento rehabilitado, ficou prevista uma camada, resultante da reciclagem “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa até 20 cm de profundidade, subjacente às camadas de regularização e de desgaste. A camada de regularização com 10 cm de espessura, ficou constituída por uma base tratada com emulsão betuminosa e a de desgaste, em betão betuminoso 0/10 mm com 4 cm de espessura, antecedida de rega de colagem (Fig. 37).

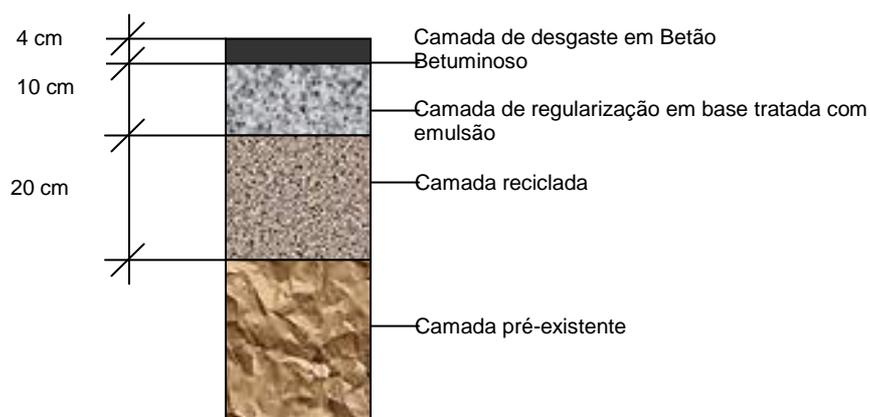


Fig. 37 – Estrutura final do pavimento rehabilitado (EN222 – Régua/Ponte das Bateiras)

### 3.3.2. Formulação da mistura reciclada

Nas zonas do pavimento onde se efectuaram sucessivas operações de reforço concluiu-se ser necessária a introdução de materiais correctivos como areia e pó de granulação (Oliveira, 2000).

A composição da mistura reciclada para 100% de material fresado foi a seguinte para todos os troços estudados:

- 5% de emulsão do tipo ECL-2-Rejuv “Telcograva” (REPSOL);
- 3,2% de água;
- 2% de cimento.

### **3.3.3. Conclusões**

A solução adoptada foi sem dúvida a ideal para a zona envolvente à obra face às exigências em termos ambientais que a caracterizavam.

A dificuldade em encontrar um vazadouro nas proximidades face à inclinação acentuada das encostas, perigo de contaminação dos solos, acessos difíceis, terrenos de valor elevado, grande sensibilidade paisagística e regulamentação da região no âmbito da Reserva Ecológica Nacional teve grande contribuição como também já foi dito anteriormente na opção pela técnica de reciclagem "*in situ*" a frio com emulsão betuminosa.

A este facto, juntou-se ainda, a economia em cerca de 70% do volume de agregados relativamente a uma solução de reabilitação tradicional, aspecto particularmente relevante por se tratar de uma região de escassos recursos nestes materiais, onde a exploração de uma pedreira estaria fora de questão na zona envolvente à obra e a mais próxima se situava em Tabuaço a cerca de 50 km (Graça e Manilha, 1998).

Face ao tempo necessário de espera até ser possível colocar as camadas de regularização e desgaste, efectuou-se um tratamento superficial temporário para proteger a camada reciclada e prolongar o tempo de desfasamento entre essa aplicação (Oliveira, 2000). Para minorar este inconveniente é pois forçoso que se desenvolvam estudos no sentido de diminuir o tempo de cura destas misturas recicladas a frio "*in situ*".

## **3.4. EN108 – Porto/Entre-os-Rios**

### **3.4.1. Descrição sumária da obra**

A obra de reabilitação da EN108 entre o Porto e Entre-os-Rios, decorreu durante o verão de 1997 numa primeira fase, tendo a segunda fase dos trabalhos só sido executada em 1998. O adjudicatário foi a empresa Gomes do Monte, S.A., e a entidade fiscalizadora a Direcção de Estradas do Porto.

Na execução dos trabalhos, que se desenvolveram ao longo de um troço de 38,7 km, entre o Porto e Entre-os-Rios foi utilizada a reciclagem “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa catiónica e cimento, do km 0+000 ao km 38+700, no sentido Porto a Entre-os-Rios (Batista, 2004).

O pavimento flexível existente, era formado por camadas em betão betuminoso sobre zonas onde foram anteriormente efectuados reforços e remendos com misturas a frio ou semi-penetrações betuminosas. Subjacente a estas camadas sucedia-se a base constituída por materiais granulares em macadame hidráulico (Batista, 2004).

O pavimento encontrava-se muito degradado (Fig. 38), com fendilhamento tipo pele de crocodilo e desprendimento de blocos nalgumas zonas.



Fig. 38 – Estado de degradação em que se encontrava o pavimento da EN108 antes da obra de reabilitação (Batista, 2004)

Relativamente à estrutura final do pavimento reabilitado, consistiu na execução de uma camada, resultante da reciclagem “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa até 15 cm de profundidade, subjacente a uma camada de regularização em mistura betuminosa densa com 6 cm de espessura seguida da de desgaste em betão betuminoso com 5 cm de espessura (fig. 39), (Batista, 2004).



Fig. 39 – Estrutura final do pavimento reabilitado (EN-108 Porto/Entre-os-Rios)

### 3.4.2. Formulação da mistura reciclada

A elaboração dos estudos de formulação da mistura reciclada foi realizada pelo Centro de Investigación Elpidio Sanchez Marcos - Madrid de acordo com o estudo "Reciclado en Frio Portugal – EN 108-Gomes do Monte".

Face aos resultados obtidos, a composição da mistura reciclada para 100% de material fresado foi a seguinte:

- 3,1% de emulsão de rotura lenta do tipo ECL2-Rejuv "Telcograva" (COMPOSAN Portuguesa) – betume residual 80/100 (foi aumentada mais tarde para 3,7%);
- 3,3 de água;
- 1,6% de cimento com a finalidade de aumentar a resistência conservada.

### 3.4.3. Aspectos construtivos desta obra

A ordem dos trabalhos adoptada para esta obra foi a seguinte:

- Fresagem até 15 cm numa primeira passagem com uma fresadora normal (Fig. 40);
- Compactação ligeira para facilitar o percurso da recicladora;
- Espalhamento de cimento e água;
- Reciclagem com adição de emulsão seguida de espalhamento;
- Compactação com cilindro de rasto liso.



Fig. 40 – Trabalhos de fresagem antes da passagem da recicladora na EN108  
(Batista, 2004)

#### **3.4.4. Caracterização estrutural do pavimento reabilitado**

No âmbito do acompanhamento da obra, pelo LNEC, na 2ª fase dos trabalhos, foram feitos ensaios vários com o deflectómetro de impacto com a finalidade de avaliar o comportamento estrutural do pavimento durante diferentes fases do processo de cura.

Os resultados indicaram que os módulos deformabilidade quase duplicaram no espaço de um ano após os primeiros ensaios efectuados cerca de 15 dias

depois da colocação da mistura, tendo passado de valores pouco superiores a 1000 MPa para valores na ordem dos 2000 MPa (Batista, 2004).

### **3.5. EN 260 – Serpa/Vila Verde de Ficalho**

#### **3.5.1. Descrição sumária da obra**

A obra de reabilitação da EN260 entre Serpa e Vila Verde de Ficalho, decorreu entre Março e Novembro de 1998, sendo o adjudicatário a empresa PROBISA Portuguesa – Produtos Betuminosos, S.A., e a entidade fiscalizadora a Direcção de Estradas de Beja (EP).

Na execução dos trabalhos, que se desenvolveram ao longo de um troço de 27 km, foi adoptada a solução de reciclagem "*in situ*" a frio na extensão do km 58+000 ao km 40+200, num total de cerca de 17,8 km (Batista, 2004).

O pavimento flexível existente, apresentava grande variabilidade tanto na espessura das camadas, como na granulometria dos materiais constituintes e natureza dos seus agregados. Subjacentes à camada de desgaste (em revestimento superficial betuminoso), sucedia-se uma semi-penetração betuminosa e camadas de materiais granulares em macadame hidráulico ou tout-venant (Batista, 2004).

Previamente à obra de reabilitação deste pavimento, foram efectuadas, durante a sua vida útil, revestimentos superficiais e reparações pontuais em diversos locais.

O estado do pavimento (Fig. 41) não justificava mais trabalhos de manutenção por se encontrar altamente degradado. Qualquer posterior intervenção teria de ser profunda, dado registar-se fendilhamento e desagregação da camada de desgaste.



Fig. 41 – Estado de degradação do pavimento da EN 260 antes da obra de reabilitação (Batista, 2004)

Relativamente à estrutura final do pavimento reabilitado, inicialmente estava apenas previsto realizar um micro-aglomerado a frio sobrejacente à camada reciclada “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa. No entanto, durante o Verão a camada reciclada não teve o comportamento esperado, apresentando algumas anomalias, pelo que foi necessária a colocação de uma camada de reforço do tipo macadame betuminoso a frio que variou entre 6 a 10 cm de espessura consoante o sub-trecho e só depois a camada de micro-aglomerado betuminoso (fig. 42).

Esta obra, foi pioneira no nosso país, no que se refere à reciclagem incorporando maioritariamente camadas granulares, tendo em conta que as experiências anteriores efectuadas em estradas do norte, utilizando esta técnica, envolviam fundamentalmente as camadas betuminosas.



Fig. 42 – Estrutura final do pavimento reabilitado (EN 260 Serpa –Vila Verde de Ficalho)

Adoptou-se a profundidade de reciclagem de 12 cm, ao contrário dos 15 cm inicialmente previstos, porque logo no troço inicial foram detectados muitos finos argilosos nas camadas inferiores, fracções a evitar, pois podem eventualmente dificultar o processo de cura.

Para ligante do material reciclado, o adjudicatário, empregou uma emulsão betuminosa catiónica de rotura lenta, com a designação espanhola “ECL-2/GRAVAMUL”, equivalente à usada no nosso país com a classificação ECL-1<sup>2</sup>, segundo a especificação LNEC E 354 -1984.

Como material correctivo foi utilizado pó de pedra 0/5 mm e cal hidráulica, após se ter verificado em estudos efectuados pela PROBISA a necessidade de corrigir a granulometria e a plasticidade dos finos.

### 3.5.2. Caracterização dos materiais empregados

Nos diversos ensaios efectuados no LNEC, para determinação das características dos materiais empregados, chegou-se às seguintes conclusões:

- A mistura composta pelo material fresado do pavimento, pó de pedra e cal hidráulica, continha elementos muito grossos relativamente ao estipulado, para a dimensão máxima de agregados, no Caderno de

<sup>2</sup> - Emulsão catiónica de rotura lenta, podendo ser 1 ou 2, consoante for menos ou mais viscosa

Encargos Tipo das EP (para Agregado Britado de Granulometria Extensa Tratado com Emulsão);

- A emulsão adoptada, ECL-2/GRAVAMUL, satisfaz a exigência do Caderno de Encargos Tipo das EP par ABGETE quanto à ausência de fluidificantes, no entanto, por não ser do tipo “h” (“hard”), o que significa que não é fabricada a partir de betumes com dureza superior, tem como resultado o registo de valores de penetração superiores aos limites máximos recomendados, naquele caderno de encargos, para o resíduo de destilação. Concluindo-se que a emulsão utilizada, deveria ter sido eventualmente do tipo ECL-2d, até porque, seria a indicada segundo as especificações 6.1-IC- Secciones de Firmes (2003), para as condições existentes em obra, tanto relativamente à zona térmica como às condições de tráfego.

### **3.5.3. Formulação da mistura reciclada**

Para a elaboração dos estudos de formulação da mistura reciclada, a PROBISA distinguiu as zonas cujas camadas eram compostas por tout-venant das de macadame hidráulico. No primeiro caso, não foram efectuados mais estudos além dos existentes durante o projecto inicial, no segundo caso, foram detectados dois troços constituídos por macadame granítico e macadame sílico-calcário, tendo sido retiradas 5 amostras de cada.

Face aos resultados obtidos, a composição da mistura reciclada para 100% de material fresado foi a seguinte para todos os troços estudados (PROBISA, 1998):

- 10% de pó de pedra 0/5 mm com a finalidade de corrigir a granulometria;
- 5% de emulsão do tipo ECL-2-GRAVAMUL (REPSOL) (Classificação ECL1 de acordo com a especificação LNEC E 354 -1984);
- 1 a 2% de cal hidráulica para correcção da plasticidade dos finos.

### 3.5.4. Aspectos construtivos desta obra

O equipamento de reciclagem utilizado foi uma fresadora/recicladora "Wirtgen 2100 DCR".

Um dos problemas que surge sempre durante a aplicação de uma mistura reciclada "*in situ*" são as juntas longitudinais e transversais. A solução adoptada neste caso foi reciclar diariamente toda a largura da via em duas meias secções para atenuar as marcas das juntas longitudinais. Iniciando-se os trabalhos do eixo da faixa de rodagem para a berma, permitiu também o controle das inclinações transversais. O rendimento diário foi de 600 m/dia (4200 m<sup>2</sup>/dia).

Para evitar a sobredosagem nas juntas, e, tendo o pavimento uma largura de 7 m e a recicladora de 2 m, foram efectuadas 4 passagens com sobreposição de cerca de 0,33 m, desligando-se os injectores nas juntas de sobreposição á segunda passagem (fig. 43).

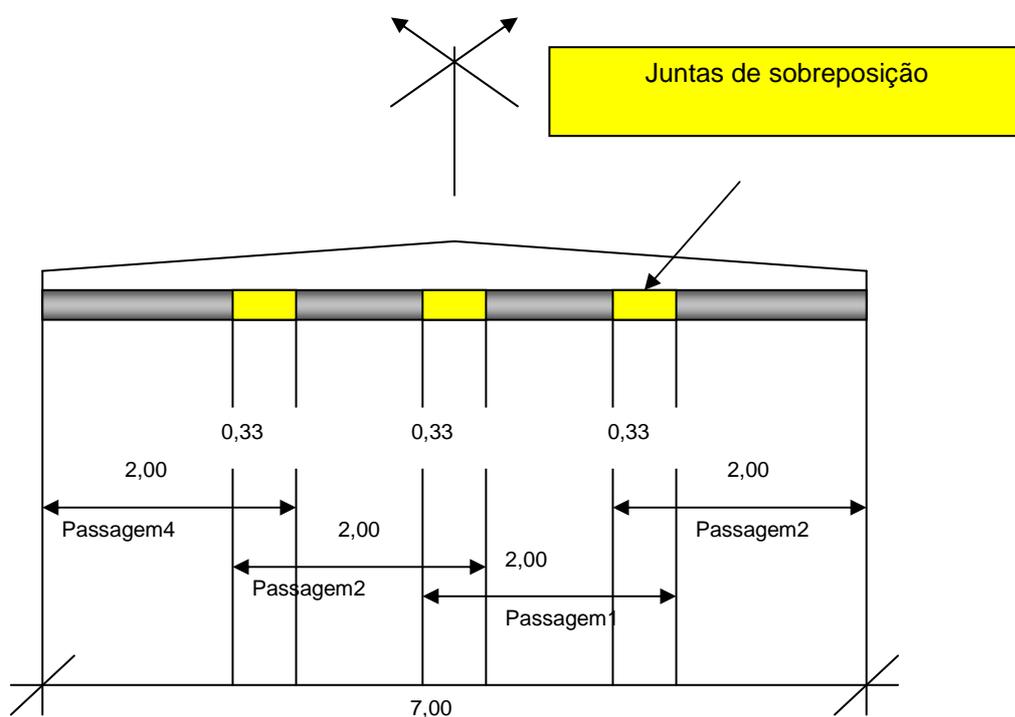


Fig. 43 – Juntas formadas pela sobreposição das passagens com a recicladora

O material correctivo, pó de pedra e cal, foi colocado antes da passagem da máquina recicladora, com a máquina de espalhamento de micro-aglomerado por não existir equipamento próprio para efeito, tendo-se adoptado por efectuar a mistura nas proporções estudadas para a fórmula de trabalho.

Utilizou-se para a compactação, um cilindro vibratório de rasto liso de 15 t seguido de um de pneus de 27 t como se pode observar na figura seguinte.



Fig. 44 – Compactação da camada reciclada na EN 260 (Batista, 2004)

### **3.5.5. Caracterização da camada reciclada**

Foram retiradas amostras do pavimento fresado sob acção da recicladora antes da adição de emulsão betuminosa (Fig. 45), bem como da camada reciclada (durante a execução da obra e após abertura ao tráfego), no sentido de efectuar ensaios para caracterização do seu material constituinte, tendo-se observado uma grande variabilidade tanto na granulometria como na quantidade de betume residual.

Foram também efectuados ensaios em 13 amostras retiradas ao longo da obra após extracção do betume com resultados variáveis, apresentando inclusive, elementos muito grossos relativamente aos indicados para este tipo de misturas.



Fig. 45 – Amostra de matéria fresado sob acção da recicladora na EN 260  
(Batista, 2004)

O mesmo se passou com a percentagem de betume residual, com resultados a variar entre os 3,5% e os 6,3%, ultrapassando também frequentemente os valores especificados e indicando que a percentagem de betume existente nalgumas zonas era claramente superior à esperada.

Verificou-se com este estudo, que a avaliação da variabilidade dos materiais existentes nas camadas ao longo dos troços a reciclar é de grande importância, quer para os estudos de formulação, quer mesmo para a selecção do tipo de reabilitação a efectuar nos pavimentos.

### 3.5.6. Conclusões

Da execução desta obra, retiram-se as seguintes conclusões:

- Os estudos de formulação e caracterização dos materiais a reciclar devem ser bem representativos do panorama existente ao longo de toda a extensão da obra a executar;

- As amostras devem ser retiradas seguindo um processo que simule a acção de desagregação da recicladora;
- A camada superficial fina é na maioria das vezes insuficiente para garantir a regularidade da superfície, sendo por isso necessária a aplicação de pelo menos uma camada de regularização sobre a camada reciclada.

Estas conclusões foram retiradas, fundamentalmente em resultado do aparecimento de refluimentos de betume (Fig. 46) nalgumas zonas e deformações permanentes acentuadas que se sucederam após a obra de reciclagem. Atribui-se esta situação à grande variabilidade dos materiais existentes no pavimento, à emulsão utilizada cujo betume de base apresentava um resíduo de destilação com elevada penetração, excesso de ligante na reciclagem, granulometria inadequada do material reciclado, presença nalgumas zonas de materiais argilosos e às fortes temperaturas sentidas nesse verão, pelo que se deveria como já foi dito anteriormente ter utilizado um betume de dureza superior.



Fig. 46 – Refluimentos de betume do pavimento na EN 260 (Batista, 2004)

### 3.6. EN254 – Aguiar/Viana do Alentejo

#### 3.6.1. Descrição sumária da obra

A obra de reabilitação da EN254 entre Aguiar e Viana do Alentejo, decorreu ao longo de 10 dias, entre 27 de Abril e 12 de Maio de 1998, sendo o adjudicatário a empresa PAVIA – Pavimentos e Vias, S.A. e a entidade fiscalizadora a Direcção de Estradas de Évora (EP).

Na execução dos trabalhos, que se desenvolveram ao longo de um troço de 7 km, foi utilizada a técnica da reciclagem "*in situ*" a frio, do km 74+500 ao km 81+500, no sentido Aguiar – Viana do Alentejo.

O pavimento flexível existente, apresentava grande variabilidade de materiais. A sua constituição resumia-se a uma camada de enrocamento sob outra de regularização, em macadame hidráulico com 10 cm de espessura à qual se sobrepunha a de desgaste, em betão betuminoso com 4 cm (Fig. 47).

A largura da plataforma era: 0,5 m (berma) + 5,5 m (faixa de rodagem) + 0,5 m (berma).

O Tráfego Médio Diário era de 100 veículos (Martinho e Clérigo, 1999).

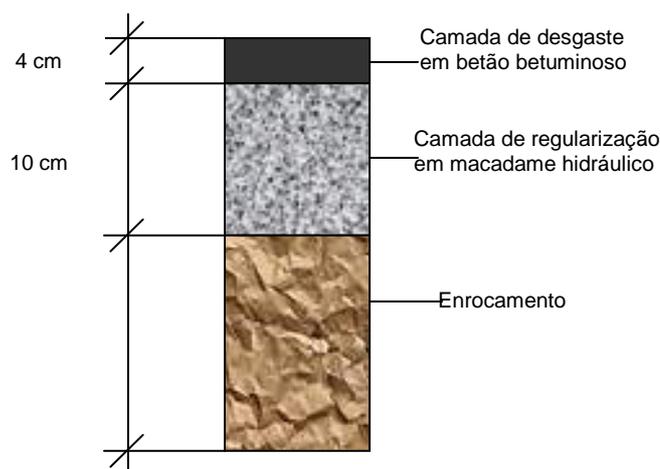


Fig. 47 – Estrutura inicial do pavimento (EN 254 – Aguiar/Viana do Alentejo)

Antes da obra de reabilitação, esta estrada estava muito degradada apresentando fendilhamento, deformações permanentes e covas com desagregação de material. O seu nível de serviço estava reduzido, fundamentalmente derivado às deformações causadas por graves problemas de drenagem (Martinho e Clérigo, 1999).

Relativamente à estrutura final do pavimento reabilitado, ficou prevista uma camada, resultante da reciclagem “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa até 10 cm de profundidade, subjacente às camadas de regularização e desgaste. A de regularização com 3 cm de espessura, ficou constituída por uma mistura betuminosa densa e a de desgaste, em betão betuminoso com 4 cm (Fig. 48).

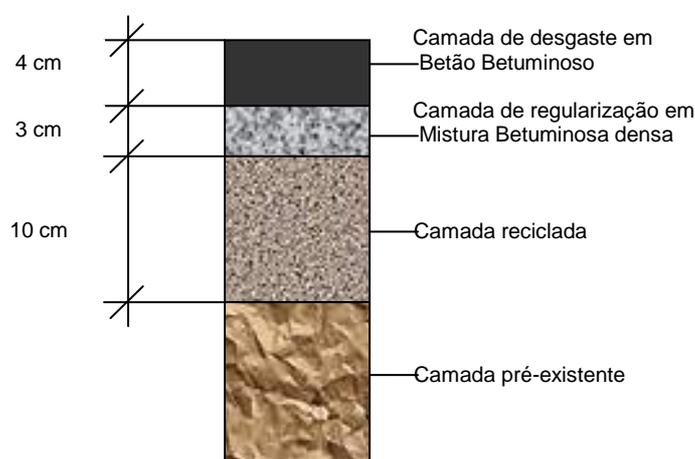


Fig. 48 – Estrutura final do pavimento reabilitado (EN 254 / Aguiar–Viana do Alentejo)

### 3.6.2. Formulação da mistura reciclada

Nos estudos laboratoriais foi possível constatar que, nos ensaios de “imersão-compressão” efectuados para calcular a percentagem de emulsão a adicionar à mistura, no exemplar que não integrava cimento, o valor da resistência conservada era substancialmente inferior aos outros casos em que fazia parte integrante da mistura, tendo-se revelado por isso determinante (Martinho e Clérigo, 1999).

A composição da mistura reciclada para 100% de material fresado foi a seguinte para todos os troços estudados:

- 4,5% de emulsão do tipo ECL-2-Rejuv (REPSOL);
- 3 % de água;
- 1,5 % de cimento.

### **3.6.3. Aspectos construtivos desta obra**

A obra demorou 10 dias, sempre com tempo seco e sem temperaturas demasiadamente elevadas.

Foram reciclados 36400 m<sup>2</sup> correspondentes a um rendimento médio de 3640 m<sup>2</sup>/dia que satisfizeram a estimativa inicialmente prevista de 3500 m<sup>2</sup>/dia (Martinho e Clérigo, 1999).

O equipamento usado foi o seguinte:

- Estabilizadora CAT RM 350 – 430 HP;
- Cilindro de pneus de 23 t;
- Cilindro misto de 17 t;
- Cisterna de 25 t com água e emulsão;
- Espalhadora de cimento;
- Cisterna de 25 t com cimento;
- Camião de espalhamento de material correctivo – ABGE.

Executaram-se 3 passagens paralelas devido á largura do rotor (2,40 m), pelo que foi necessário efectuar o tratamento das juntas longitudinais.

### **3.6.4. Controlo de qualidade**

Do controlo de qualidade efectuado sobre a mistura betuminosa reciclada obtiveram-se os resultados apresentados no quadro seguinte:

Quadro 3-1 - Curvas granulométricas

Peneiros	Intervalo de Campo	Curva média	Curva da mistura (estudo)
3”	-	-	100
2 1/2”	-	-	98
2”	100	100	86
1 1/2”	90.9-100	96.5	79
1”	69.2-100	88.2	68
3/4”	61.8-94.8	76.2	60
1/2”	56.1-85.8	68.9	51
3/8”	51.1-82.1	63,8	45
nº 4	42.4-58.7	50.6	36
nº 10	31.5-38.5	35.0	25
nº 20	18.9-26.3	21.8	17.2
nº 40	13.6-17.4	15.1	11.4
nº 80	8.8-10.3	9.6	7.6
Nº 200	5.3-6.0	5.6	4.3

### 3.6.5. Conclusões

Face aos resultados apresentados nos ensaios para a formulação da mistura, verificou-se que o cimento melhorava os resultados da resistência conservada e das cargas à compressão simples, permitindo uma cura mais rápida da mistura reciclada a frio “*in situ*” e acelerando a abertura ao tráfego.

Inicialmente estava prevista uma solução tradicional de reabilitação. Com a adopção desta técnica de reciclagem houve uma redução de 16% no consumo de agregados e de 14% no betume, minorando o impacte ambiental (Martinho e Clérigo, 1999).

Há que considerar ainda a economia na energia por ser um processo a frio e na redução das viagens de transporte de materiais tanto novos como para vazadouro.

### 3.7. IP2 – Barragem do Fratel/EN118

#### 3.7.1. Descrição sumária da obra

A obra de reabilitação do IP2 entre a barragem do Fratel e a EN118, decorreu entre Abril de 1992 e Janeiro de 2003, sendo o adjudicatário a empresa PAVIA – Pavimentos e Vias, S.A., e a entidade fiscalizadora a Direcção de Estradas de Portalegre (EP).

Na execução dos trabalhos, que se desenvolveram ao longo de um troço de 11 km entre a Barragem do Fratel e a EN 118/Nó de Arêz, foi utilizada como técnica de reabilitação, a reciclagem "*in situ*" a frio com emulsão betuminosa, iniciando-se ao km 152+000 e prolongando-se até ao km 163+000 (Batista, 2004).

O pavimento flexível existente, datava de 1992 e apresentava a seguinte composição (Fig. 49):

- Fundação, solos areno/siltosos, (grupos A-4 e A-2-4)<sup>3</sup> e saibros graníticos (grupo A-1-b);
- Sub-base com 30 cm em agregado britado de granulometria extensa (ABGE);
- Base com 12 cm em mistura betuminosa densa;
- Camada de desgaste com 4 cm em betão betuminoso.

---

<sup>3</sup> - De acordo com a classificação AASHTO-American Association of State Highway and Transportation Officials

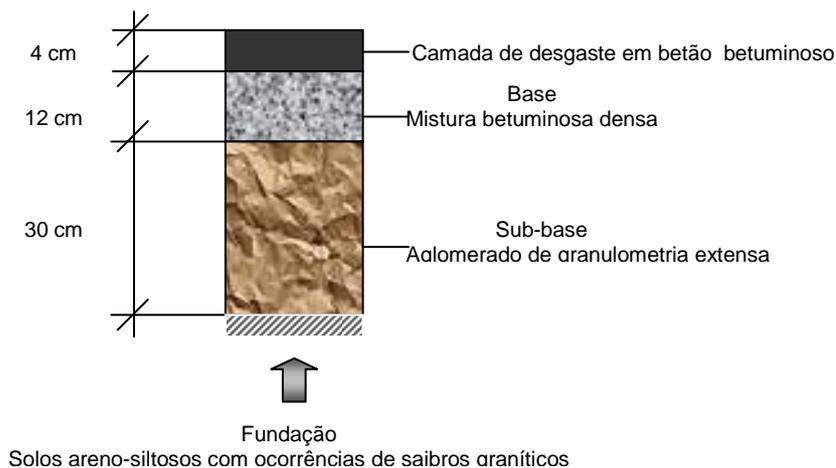


Fig. 49 – Estrutura inicial do pavimento aquando da sua construção em 1992 (IP2)

O pavimento, como se pode observar na figura seguinte, apresentava uma degradação significativa com fendilhamento tipo “pele de crocodilo” com desagregação de blocos.



Fig. 50 – Estado de degradação em que se encontrava o pavimento do IP2 antes da obra de reabilitação (Batista, 2004)

Relativamente à estrutura final (Fig.51) do pavimento rehabilitado, adoptou-se pela execução de uma camada, resultante da reciclagem "in situ" a frio com emulsão betuminosa até 15 cm de profundidade, subjacente a uma camada de reforço com características de regularização em macadame betuminoso, com 7 cm de espessura. A camada de desgaste, com 3 cm foi executada em microbetão betuminoso rugoso (Batista, 2004).

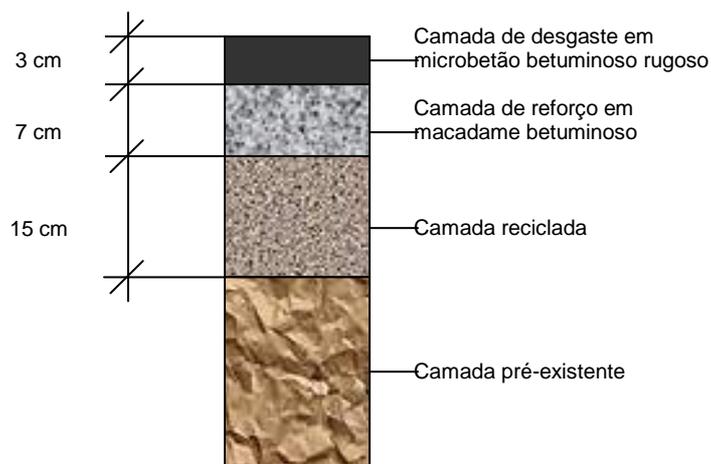


Fig. 51 – Estrutura final do pavimento rehabilitado (IP 2)

Esta obra, incluía troços com via de lentos e bermas com 2,50 m, pelo que o levantamento do perfil transversal existente efectuado, foi de particular importância não só na fase de projecto como também na escolha do equipamento de reciclagem, definição da actuação em termos do número de passagens e controlo de tráfego durante a execução dos trabalhos.

Como ligante do material reciclado, o adjudicatário, empregou uma emulsão betuminosa catiónica de rotura lenta, com a designação comercial espanhola "ECL2-Rejuv", fornecida pela REPSOL Portugal, Lda. (Fábrica de Setúbal).

### 3.7.2. Caracterização dos materiais empregados

Para caracterização do pavimento existente foram retirados vários tarolos em toda via a reabilitar, tendo-se verificado, favoravelmente para a utilização desta técnica, a homogeneidade da espessura das camadas e dos materiais constituintes nos diversos troços. Como já foi dito anteriormente, esta característica, infelizmente pouco frequente em pavimentos que tenham já sido sujeitos a diversos trabalhos de manutenção, quer estes tenham sido pontuais ou não, permite que só seja efectuado um único estudo de formulação.

Dos ensaios efectuados, no laboratório da Pavia, com estas amostras para a determinação da granulometria dos agregados e da quantidade de betume residual, concluiu-se que no primeiro caso não era necessária a sua correcção e que no segundo, o teor de betume era de 5%.

Para a análise da eventual necessidade de tratamento de finos pela adição de materiais correctivos à mistura a reciclar, foi efectuado o ensaio de Equivalente de Areia que mostrou não necessária a correcção visto os resultados serem superiores aos valores mínimos preconizados no Caderno de Encargos (40%).

Para avaliação da emulsão betuminosa adoptada pela PAVIA, ECL-2-Rejuv equivalente à emulsão ECL1-h segundo a especificação LNEC E 354-1984, o LNEC efectuou ensaios sobre uma amostra com as seguintes conclusões:

- Apresentava resultados inferiores aos preconizados em termos de viscosidade;
- Apresentava resultados superiores em termos de peneiração.

Durante o processo de reciclagem, os injectores entupiram por diversas vezes tendo que se recorrer à sua limpeza em profundidade, no final de cada período de trabalho, para evitar paragens no decurso da obra. Julga-se pois, fazendo uma leitura dos resultados dos ensaios de peneiração, que os valores obtidos, superiores aos preconizados, possam estar associados a esta anomalia.

### 3.7.3. Formulação da mistura reciclada

Para a elaboração dos estudos de formulação da mistura reciclada pelo método que tem sido adoptado em Portugal, a PAVIA efectuou o ensaio Proctor modificado e ensaios de "imersão-compressão" segundo o método "Espanhol". No primeiro caso determinou-se o teor óptimo em líquidos para efeitos de compactação, no segundo, a percentagem óptima em betume residual. Ficou programado para o início da obra a execução de novos ensaios com o material recuperado com a recicladora para confirmação de alguns destes valores.

Face aos resultados obtidos, a composição da mistura reciclada para 100% de material fresado foi a seguinte:

- 3% de emulsão do tipo ECL-2-Rejuv (REPSOL);
- 2,8% de água de adição.

Dos resultados dos ensaios de "imersão-compressão" chegaram-se aos seguintes valores:

- Resistência à compressão simples, a seco ( $R_{seco}$ ):  $\geq 12$  kN;
- Resistência à compressão simples, depois da imersão em água ( $R_{im.água}$ ):  $\geq 10$  kN;
- Resistência conservada ( $R_{im.água} / R_{seco} \times 100$ ):  $\geq 75\%$ .

Estes valores satisfaziam os estabelecidos no Caderno de Encargos da Obra.

O LNEC realizou ainda ensaios para determinação das características do betume existente no pavimento antes da reabilitação comparativamente ao recuperado da mistura reciclada (Fig. 52).

### Quadro 3-2 – Características do betume nos casos acima identificados (IP2)

Amostras de Betume			Propriedades	
Identificação	Percentagem de betume "envelhecido"	Percentagem de betume "novo"	Penetração (25°C, 100g, 5s), 0,1 mm (ASTM D 5)	Temperatura de amolecimento, °C (ASTM D 36)
<u>Betume recuperado da mistura fresada do pavimento existente</u>	100	-	15	77,6
<u>Betume contido na emulsão betuminosa utilizada no fabrico da mistura reciclada</u>	-	100	77	-
<u>Betume recuperado da mistura reciclada fabricada em laboratório e curada à temperatura ambiente até estabilizar o teor em água</u>	≈72	≈28	32	62,6

Concluiu-se, que os resultados obtidos para o betume existente na mistura reciclada se encontravam entre os valores do betume contido na emulsão e os do betume extraído do pavimento a reabilitar.

#### 3.7.4. Aspectos construtivos desta obra

O equipamento de reciclagem utilizado foi uma fresadora/recicladora “Wirtgen WR 2500”, cujas características e descrição se desenvolverem na secção 2.5.1, considerada uma máquina extremamente versátil com tracção independente nas quatro rodas e 610 hp de potência

Para a compactação da mistura, foram escolhidos dois cilindros:

- Rasto liso vibratório de 17,3 ton.
- Pneus de 28 ton.

Tendo em atenção a largura de trabalho da recicladora (2,438 m) e a do troço a reabilitar, que apresentava uma variação entre 7,50 e 11,00 m, originaram-se

juntas de 0,75 m no primeiro caso após 4 passagens e de 0,30 m no segundo após 5 passagens. Seguindo as boas regras de construção para esta técnica de reciclagem, foi necessário desligar os injectores na zona das juntas à primeira passagem para evitar a sobredosagem de emulsão e água.

### 3.7.5. Características da mistura reciclada

No sentido de confirmar os valores da baridade de referência para compactação da camada reciclada, a que já se tinha chegado nos estudos de formulação da mistura (secção 3.7.3), foram efectuados no início da obra, novos ensaios Proctor modificado com o material fresado sob acção da máquina recicladora e os 3% de emulsão previstos na fórmula de trabalho pelo LNEC, a Direcção de Estradas de Portalegre e a PAVIA. Paralelamente, recorreu-se à execução de um trecho experimental com 150 metros, o que permitiu não só ajustar a formulação como também o processo construtivo.

O trecho experimental foi dividido em três sub-trechos de 50 metros cada e a experiência consistiu em fazer-se variar em cada um, para a mesma quantidade de emulsão, tanto o teor em água como o número de passagens a vibrar e estáticas de cilindro de rasto liso, único equipamento de compactação disponível na altura. Foram posteriormente realizados ensaios para determinação da baridade e teor em água cujos resultados se apresentam no quadro da Fig. 53.

**Quadro 3-3 – Resultados dos ensaios efectuados nos três sub-trechos (IP2)**

Baridade húmida "in situ" % (g/cm <sup>3</sup> )	Sub-trecho experimental (via de lentos)	Teor em água "in situ" w <sub>o</sub> (%)	Baridade seca "in situ" % (g/cm <sup>3</sup> )
1,956	nº1 (km157+050 a 157+100)	4,5	1,872
2,041	nº2 (km157+100 a 157+150)	6	1,926
1,99	nº2 (km157+150 a 157+200)	6,7	1,865

Concluiu-se com todo este trabalho que o 2º sub-trecho era o que apresentava maior compacidade e homogeneidade da mistura reciclada, chegando-se pois

a um teor óptimo em água de 6%, valor este que incluía os 3% de água adicionados, os 1,2% da emulsão e os 1,8% existentes no pavimento. Quanto à baridade de referência adoptou-se o valor  $1,96 \text{ g/cm}^3$ , resultado a que já se tinha chegado nos ensaios Proctor sobre a mistura com emulsão, visto que os  $1,93 \text{ g/cm}^3$  alcançados neste sub-troço tinham sido conseguidos sem a passagem do cilindro de pneus, esperando-se melhorar este valor durante a execução da obra, o que se veio a confirmar.

O esquema usado para o 2º sub-trecho foi o seguinte:

- Adição de cerca de 3% de emulsão betuminosa;
- Adição de cerca de 3% de água;
- 5 passagens do cilindro de rasto liso a vibrar e 4 passagens estáticas.

Dos ensaios realizados para caracterização granulométrica dos materiais com amostras retiradas da recicladora sem adição de emulsão e com emulsão, concluiu-se o seguinte:

- As granulometrias inseriam-se no geral, no fuso preconizado no C. E. da JAE para ABGETE;
- Os resultados das granulometrias obtidas nas amostras retiradas sob acção da recicladora eram semelhantes às das retiradas com a fresadora.

### **3.7.6. Controlo de qualidade**

No âmbito do acompanhamento da obra (Batista *et al.*, 2002) extraíram-se as seguintes conclusões acerca dos resultados obtidos nos ensaios realizados para o controlo de qualidade.

Os ensaios para determinação da quantidade de betume residual presente na mistura reciclada a frio realizados por centrifugação, indicaram valores de betume residual mínimos e máximos de 4,9 e 7,3% e com um valor médio de

6,4%, o que se compreende face aos 4,7% de betume da camada do pavimento existente e aos 1,8% de betume presente na emulsão adicionada.

Para medição da baridade *"in situ"* foram efectuados ensaios com o Troxler "3450" e aferidos pelo método da garrafa de areia, obtendo-se resultados idênticos. Adoptou-se para baridade de referência o valor obtido com o ensaio Proctor modificado nas amostras recolhidas no trecho experimental, verificando-se que a compactidade alcançada para a camada reciclada satisfaz o mínimo exigido no C. E. de 95%.

Dos ensaios de "imersão-compressão" efectuados, obtiveram-se também, valores tanto da resistência absoluta como da resistência conservada, dentro dos valores mínimos preconizados no Caderno de Encargos da Obra para ABGETE.

### **3.7.7. Abertura ao tráfego e colocação das ultimas camadas**

Foi monitorizada a evolução do teor em água da camada reciclada a frio *"in situ"* para avaliação da altura em que esta alcançava estabilidade suficiente para poder ser aberta ao tráfego, assim como, quando o seu teor em água estabilizava para colocação das camadas sobrejacentes.

Verificou-se ser possível, por se estar nos meses de Julho e Agosto em que as temperaturas eram mais elevadas, abrir ao tráfego logo passadas 24 horas e colocar as camadas sobrejacentes ao fim de duas semanas.

## **3.8. EN 114 – Montemor–o–Novo/nó poente da A6–Évora**

### **3.8.1. Descrição sumária da obra**

A obra de reabilitação da EN114 entre Montemor–o–Novo e o nó poente da A6 em Évora decorreu em 2003–2004, sendo a entidade fiscalizadora a Direcção de Estradas de Évora (EP).

Na execução dos trabalhos, que se desenvolveram ao longo de um troço de 8 km, foi utilizada a reciclagem “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa, do km 178+000 ao km 170+000 no sentido de Montemor–o–Novo.

Inicialmente pensava-se utilizar esta técnica de reciclagem com emulsão betuminosa num troço de 18 km entre o km 178+000 ao km 160+000, não tendo sido possível fazê-lo até ao fim face ao aparecimento de situações imprevistas, tais como zonas com cubos de granito e de zonas com situações de inexistente drenagem subterrânea, estas ultimas, incompatíveis com o uso de emulsão betuminosa pelos problemas que envolvem o processo de cura (Namorado, 2008).

Esta obra teve como objectivos: o reforço estrutural do pavimento; remodelação da geometria dos entroncamentos; criação de uma 3ª via e melhoria das condições de drenagem e segurança (Namorado, 2008).

A largura da plataforma era: 2,5 m (berma) + 7,0 m (faixa de rodagem) + 2,5 m (berma).

O pavimento flexível existente (Fig. 54), apresentava grande variabilidade de materiais, sendo por isso de características muito heterogéneas. Era constituído por duas camadas sobrejacentes à sub-base de 30 cm de ABGE, uma de regularização em mistura betuminosa densa, e a de desgaste em betão betuminoso num total de 14 cm de espessura de misturas betuminosas. Os solos de fundação eram constituídos por terrenos areno-siltosos e saibros graníticos.

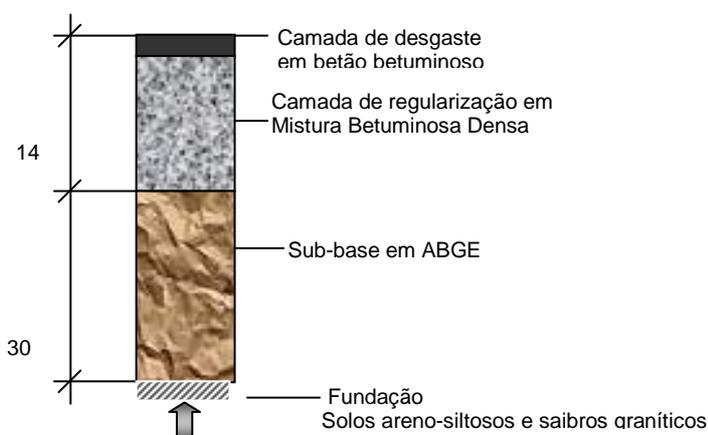


Fig. 52 – Estrutura inicial do pavimento (EN 114 – Montemor–o–Novo/nó da A6 Évora)

As anomalias principais resumiam-se fundamentalmente a fendilhamentos tipo “pele de crocodilo”, refluximentos e deformações permanentes em cerca de 60% a 70% da totalidade do pavimento (fig. 55).



Fig. 53 – Estado de degradação do pavimento (EN 114 – Montemor-o-Novo/nó da A6 Évora)

Relativamente à estrutura final do pavimento reabilitado, ficou prevista uma camada, resultante da reciclagem “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa até 15 cm de profundidade, subjacente às camadas de regularização e desgaste. A de regularização com 8 cm de espessura, em macadame betuminoso e a de desgaste, em microbetão betuminoso rugoso com 4 cm (Fig. 56).

Relativamente às bermas que se encontravam em mau estado em cerca de 30% e também apresentavam fendilhamento tipo “pele de crocodilo”, ficou previsto reciclar “*in situ*” a frio com emulsão e/ou cimento até 12 cm de profundidade com correcção granulométrica.



Fig. 54 – Estrutura final do pavimento reabilitado (EN 114 – Montemor-o-Novo/nó da A6 Évora)

### 3.8.2. Formulação da mistura reciclada

Para a formulação da mistura reciclada (Quadro 4), foi recolhido material sob o qual foram efectuados os seguintes ensaios:

- LNEC E-199: Ensaio de equivalente de areia;
- LNEC E-233: Análise granulométrica;
- NLT 161/84: Resistência á compressão simples de misturas betuminosas;
- NLT 162/84: Ensaio de Imersão-Compressão (efeito da água na coesão de misturas betuminosas compactadas).

**Quadro 3-4 – Resultados dos ensaios de “imersão-compressão” (EN114)**

Emulsão (%)	2,0	3,0	4,0
Água (%)	3,7	3,3	2,9
Material reciclado (%)	100	100	100
Baridade (g/cm <sup>3</sup> )	2,230	2,247	2,248
Resistência em seco (kgf)	1219	1440	1472
Resistência após imersão(kgf)	806	1117	1076
Resistência conservada (%)	66,1	77,6	73,1

Face ao exposto anteriormente, a composição da mistura reciclada para 100% de material fresado foi a seguinte:

- 3,0 % de emulsão do tipo ECL-2-Rejuv (REPSOL);
- 3,3 % de água.

### **3.8.3. Controlo de qualidade**

Para o controle de qualidade foi verificada a quantidade de betume residual presente nas misturas recicladas, a análise granulométrica, a avaliação da compacidade e a avaliação da resistência à compressão simples, em ensaios de “imersão-compressão” utilizando mistura recolhida em obra, à saída da máquina recicladora.

## **3.9. EN 222 – Ameias/Barragem de Crestuma–Lever**

### **3.9.1. Descrição sumária da obra**

A obra de reabilitação da EN 222 entre Ameias e a Barragem de Crestuma-Lever decorreu em 2004, sendo a entidade fiscalizadora a Direcção de Estradas do Porto (EP).

Na execução dos trabalhos, que se desenvolveram ao longo de um troço de 10 km, foi utilizada a reciclagem “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa catiónica e cimento, do km 1+700 ao km 11+750.

O pavimento flexível existente, apresentava grande variabilidade de materiais, sendo por isso de características muito heterogéneas. Era constituído por duas camadas sobrejacentes à sub-base, uma de regularização com 25 cm em macadame betuminoso, e a de desgaste em betão betuminoso com 5 cm de espessura (Fig. 57).

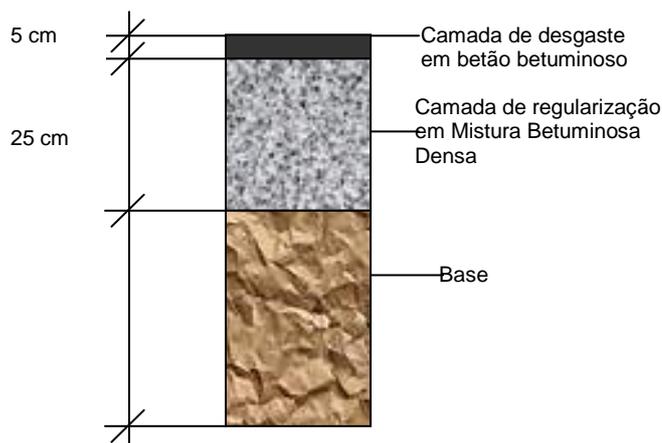


Fig. 55 – Estrutura inicial do pavimento (EN 222 – Barragem de Crestuma/Lever)

As anomalias principais resumiam-se fundamentalmente a fendilhamentos tipo “pele de crocodilo”.

Relativamente à estrutura final do pavimento reabilitado, ficou prevista uma camada, resultante da reciclagem “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa até 12 cm de profundidade, subjacente às camadas de regularização e desgaste. A de regularização com 8 cm de espessura, ficou constituída por uma base tratada com emulsão betuminosa e a de desgaste, em betão betuminoso com 4 cm (Fig. 58).



Fig. 56 – Estrutura final do pavimento reabilitado (EN 222 Barragem de Crestuma – Lever)

### **3.9.2. Formulação da mistura reciclada**

A composição da mistura reciclada para 100% de material fresado foi a seguinte para todos os troços estudados:

- 3% de emulsão do tipo ECL-2-Rejuv (REPSOL);
- 6,3 % de água;
- 1% de cimento.

## **3.10. IC12 – Canas de Senhorim/IP3**

### **3.10.1. Descrição sumária da obra**

A obra de reabilitação do IC12 entre Canas de Senhorim e o IP3, decorreu entre Agosto de 2007 e Abril de 2008 (Trindade, 2007), sendo o adjudicatário o consórcio Mota–Engil – Pavimentações, S.A./Rosas Construtores e a entidade fiscalizadora a Direcção de Estradas de Viseu (EP).

A execução dos trabalhos, cuja solução de reabilitação foi a reciclagem “*in situ*” a frio com injeção de emulsão betuminosa e adição de cimento, desenvolveu-se ao longo de um troço do IC12 com cerca de 11,7 km, do km 9+800 ao km 21+500, no sentido IP3 – Canas de Senhorim (Trindade, 2007). Mais concretamente, o IC12 faz parte da ligação entre a A25, na zona de Mangualde e o IP 3, na zona de Rojão Grande.

O pavimento existente era constituído por (Fig. 59):

- Sub-base com 20 cm em agregado britado de granulometria extensa (ABGE);
- Base com 20 cm em agregado britado de granulometria extensa (ABGE);
- Camada de regularização com 12 cm em macadame betuminoso;
- Camada de desgaste com 6 cm em betão betuminoso.

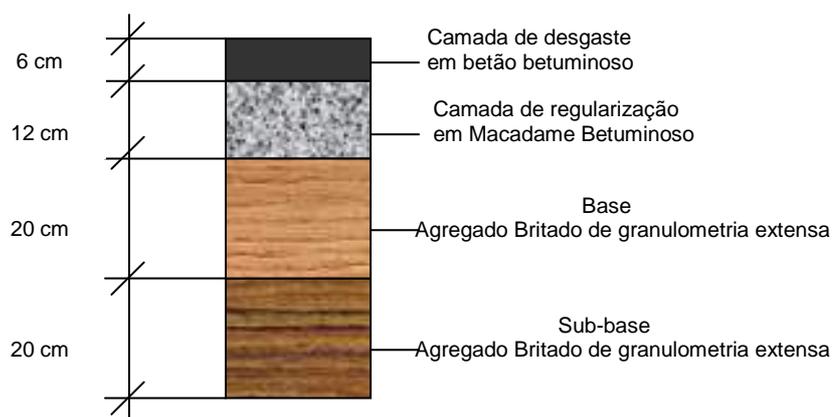


Fig. 57 – Estrutura inicial do pavimento (IC12 – Canas de Senhorim/IP3)

Relativamente ao seu estado de conservação, apresentava nítida descolagem entre a camada de desgaste e a de regularização, anomalia esta que se tornou decisiva no tipo de reabilitação a adoptar (Fig. 60). Além desta deficiência, a degradação era generalizada, com especial relevo para a via da direita, com covas acentuadas sucessivas (Fig. 61) e fendilhamento tipo pele de crocodilo com desagregação de blocos (Fig. 62).



Fig. 58 – Marcas da descolagem entre camadas num tarolo extraído do pavimento existente (Araújo, *et al*, 2008)



Fig. 59 – Tapagem das covas existentes na via da direita (Araújo *et al.*, 2008)



Fig. 60 – Fendilhamento tipo pele de crocodilo com desagregação de blocos

### 3.10.2. Formulação da mistura reciclada

Após os estudos efectuados para a mistura nomeadamente, estudos de formulação, foram definidos os seguintes parâmetros no Caderno de Encargos (Araújo *et al.*, 2008; Dueñas *et al.*, 2008 e Trindade, 2007):

- Reciclagem “*in situ*” até 15 cm de profundidade;
- Percentagem de emulsão: entre 3% e 5%;
- Percentagem de cimento: 0,5%;
- Rega de colagem com emulsão modificada à taxa 0,6 kg/m<sup>2</sup>;
- Aplicação de 6cm de Mistura Betuminosa Descontínua – Betume Modificado com Alta percentagem de Borracha (BMBAP);
- Resistência à compressão simples, a seco  $\geq 12$  MPa;
- Resistência à compressão simples, após imersão em água  $\geq 10$  MPa;
- Resistência conservada (Rim água/ Rseco x 100)  $\geq 75$  %;
- Betume residual  $\leq 2,5$ %.

Face ao que antecede, configurou-se para o pavimento reabilitado a estrutura que se esquematiza na figura seguinte:



Fig. 61 – Estrutura final do pavimento reabilitado (IC12-Canas de Senhorim/IP3)

### 3.10.3. Aspectos construtivos e do controlo de qualidade desta obra

O acompanhamento da obra em termos de controlo de qualidade foi efectuado pela firma Geoqual, consultores em Geotecnia e Qualidade.

Em primeiro lugar procedeu-se a uma fresagem prévia das zonas mais degradadas do pavimento para melhorar a homogeneização dos materiais constituintes do material recuperado e evitar a segregação, seguida da passagem do comboio com a recicladora, escarificação e mistura da emulsão, água e cimento. Posteriormente efectuaram-se operações de nivelamento para regularização da superfície e uma pré-compacção a 90/95%, tendo-se atingido a compacidade máxima com a compactação final a 98/100%.

Apresentam-se de seguida algumas fotografias tiradas no decurso da obra (Fig. 64) representativas da fase de reciclagem e compactação.



Fig. 62 – Imagens do “comboio” de reciclagem (à esquerda) e do cilindro pneumático em plena compactação (à direita) – IC12

Esta obra foi executada com recurso aos seguintes equipamentos, cujas características são descritas na secção 2.5:

- Recicladora Wirtgen “WR 2000”, onde os materiais fresados juntamente com a emulsão e a calda de cimento são processados na sua câmara de mistura e colocados através da parte posterior desta;
- Misturadora de cimento WM 1000, para mistura com o auxílio de um microprocessador de controlo das quantidades de água e cimento especificadas na fórmula de trabalho;
- O transporte e ligação da emulsão betuminosa foram feitos com recurso a um camião cisterna colocado à frente da misturadora, ligado à recicladora através de uma mangueira flexível;

- Motoniveladora tipo CAT 140 G cuja finalidade foi o espalhamento e nivelamento do material fresado para garantir uma camada regular e uniforme;
- Cilindro vibratório de rasto liso do tipo CAT CB-534D e cilindro de pneus do tipo PF-300B, o primeiro foi usado na fase inicial de compactação e o segundo na fase seguinte.

Esquematzam-se seguidamente as características do Itinerário complementar (IC12) em termos do seu perfil tipo e estrutura final do pavimento após reabilitação.

### Perfil Tipo do Km 9+800 ao Km 21+500

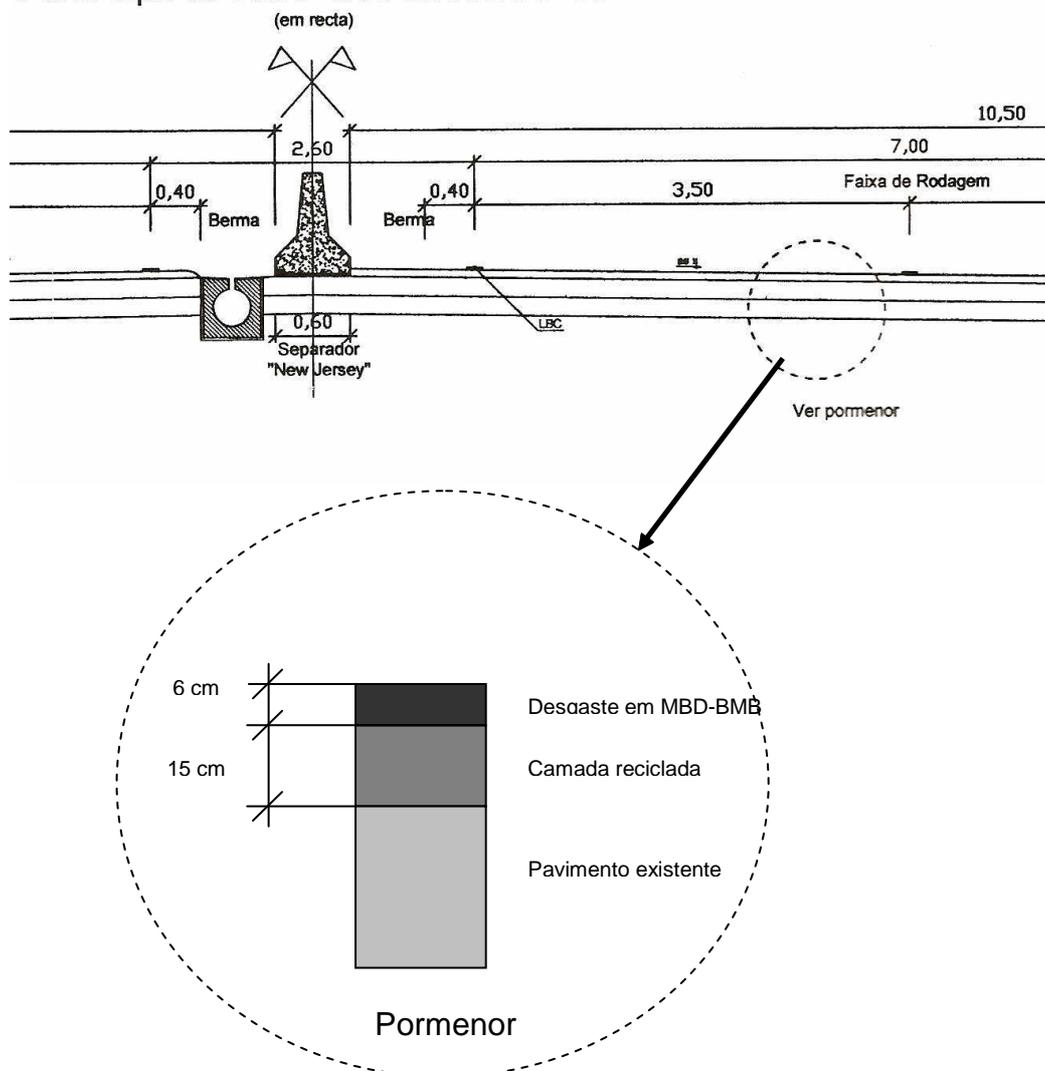


Fig. 63 – Representação do troço do IC12 e da estrutura final do pavimento (adaptado de Araújo, *et al*, 2008)

### **3.10.4. Conclusões**

No decurso da obra foram efectuadas as seguintes alterações (Trindade, 2007):

- Aumento da percentagem de cimento para 0,7%;
- Alteração da emulsão betuminosa para outra com um betume mais duro 80/100;
- Fresagem das zonas que apresentavam maior degradação para evitar a segregação;
- Alteração da rega de colagem para outra termo-aderente.

O rendimento da obra situou-se na ordem dos 1500 m<sup>2</sup>/dia e os valores obtidos nas amostras retiradas para a resistência à compressão simples a seco, resistência à compressão simples, após imersão em água e resistência conservada satisfaziam o estipulado no Caderno de Encargos (Trindade, 2007).

## **3.11. ANÁLISE COMPARATIVA E CRÍTICA**

Da análise das obras descritas nas secções anteriores, uma das conclusões que se pode retirar em primeiro lugar é a de que, quando se selecciona a técnica de reciclagem a frio "*in situ*" com emulsão betuminosa, já é necessário ter sido efectuado o levantamento do troço a reciclar de forma a avaliar a viabilidade de execução desta técnica, dado que há fundamentalmente além das condições atmosféricas na época em que se pretende executar a obra, 3 componentes do pavimento a reabilitar que comprometem o bom sucesso dos trabalhos:

- Deficiências estruturais nas camadas inferiores à zona a reciclarem;
- Variabilidade dos materiais que compõem as camadas a reciclar;
- Más condições de drenagem do pavimento.

Os estudos de formulação da mistura efectuados antes da execução da obra revestem-se de grande importância, devendo ser realizados com material

fresado semelhante ao obtido em obra, através da acção da recicladora. É também essencial que a fórmula de trabalho seja ajustada/confirmada no trecho experimental.

De facto, na sequência dos estudos anteriormente descritos, manifesta-se fundamental a execução do trecho experimental, permitindo efectuar o planeamento dos trabalhos, do método de compactação, ajustar o teor em água e confirmar os valores da fórmula de trabalho.

Dos estudos efectuados pelo LNEC sobre a obras que acompanhou, foi possível constatar que na generalidade, e sempre em condições climatéricas favoráveis, no processo de cura das camadas se alcançou entre 2 a 4 semanas após colocação, um do teor em água de 1% a 2%, tendo no entanto, só sido possível extrair tarolos inteiros ao fim de 6 a 8 semanas (Batista, 2004).

Desta análise, é pois, permitido retirar em termos práticos, que só é possível colocar as camadas sobrejacentes à camada reciclada, após estabilização do teor em água.

Dos estudos para avaliação das características mecânicas com amostras do IP2, avaliou-se a evolução do módulo de deformabilidade ao longo do tempo, bem como a resistência à fadiga e resistência às deformações permanentes. Concluiu-se que estas misturas, depois de terem uma cura completa, têm um comportamento mecânico semelhante ao das misturas convencionais, o seu módulo de deformabilidade aumenta ao longo do tempo, assim o indicam os ensaios de carga efectuados com o deflectómetro de impacto nos casos da EN 260 e EN 108.

Relativamente ao seu desempenho, as informações existentes é de que tem sido na generalidade bom, com excepção de alguns problemas pontuais relatados do tipo desagregação de partículas superficiais e rodeiras.

Quanto às condições climatéricas, verificou-se também, que nem só a pluviosidade pelas suas implicações no processo de cura, tem influência na utilização desta técnica de reciclagem “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa. A temperatura pode igualmente fazer a diferença nos tempos de abertura ao

tráfego, tão importantes no congestionamento causado pelas obras de reabilitação, assim como na diminuição do tempo necessário para a colocação das camadas sobrejacentes, que também importa para evitar a deterioração da camada reciclada. Para confirmação, do atrás exposto, tem-se como exemplo a obra do IP2, em que face às temperaturas mais elevadas efectuadas nos meses de Verão foi possível abrir ao tráfego passadas 24 horas e colocar as camadas sobrejacentes passadas 2 semanas, isto quando, na generalidade dos casos, só é possível abrir ao tráfego cerca de respectivamente 48 horas a 4 semanas após a colocação da camada reciclada.

Apresentam-se de seguida os quadros resumo das obras descritas na secção anterior.

Quadro 3-5 – Quadro das obras de reciclagem "in situ" a frio com emulsão betuminosa executadas em Portugal

Obra	Data	Localização (km) Extensão	Patologias existentes	Estrutura do pavimento existente	Estrutura do novo pavimento	Espessura das camadas (cm)	Profundidade de reciclagem	Fórmula de trabalho
EN 12 - Circunvalação Porto	1992/1993	0+000 13+200 13,2 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Fendilhamento tipo "pele de crocodilo";</li> <li>◆ Deformações permanentes;</li> <li>◆ Covas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Pavimento flexível com características muito heterogêneas;</li> <li>◆ Betão betuminoso (5 a 25 cm) sobre bases granulares de (<math>\geq 12</math> cm).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Camada de desgaste em betão betuminoso (5 cm);</li> <li>◆ Camada reciclada a frio (20 cm).</li> </ul>		Reciclagem a frio "in situ" até 20 cm de profundidade.	Para 100% de material reciclado; ◆ 5% emulsão - Emulsão "Telcograva" ECL2-Rejuv (Repsol); ◆ 2% água; ◆ 2% cimento
EN 222- Régua/Ponte das Bateiras	1995	134+800 149+000 14,2 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Fendilhamento tipo "pele de crocodilo";</li> <li>◆ Deformações longitudinais e transversais;</li> <li>◆ Covas com perda de material.</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Camada de desgaste em betão betuminoso (4 cm);</li> <li>◆ Camada de regularização em base tratada com emulsão (10 cm);</li> <li>◆ Camada reciclada a frio (20 cm)</li> </ul>		Reciclagem a frio "in situ" até 20 cm de profundidade.	Para 100% de material reciclado; ◆ 5% emulsão - Emulsão "Telcograva" ECL2-Rejuv (Repsol); ◆ 3,2% água; ◆ 2% cimento
EN 108- Porto/Entre-os-Rios	1997/1998	0+000 38+700 38,7 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Fendilhamento tipo pele de crocodilo;</li> <li>◆ Deformações permanentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Pavimento flexível;</li> <li>◆ Camadas de betão betuminoso;</li> <li>◆ Base em macadame hidráulico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Camada de desgaste em betão betuminoso (5 cm);</li> <li>◆ Camada de desgaste em mistura betuminosa densa (6 cm);</li> <li>◆ Camada reciclada a frio (15 cm).</li> </ul>		Reciclagem a frio "in situ" até 15 cm de profundidade.	Para 100% de material reciclado; ◆ 3,7% emulsão - Emulsão "Telcograva" ECL2-Rejuv (Repsol); ◆ 3,3% água; ◆ 1,6% cimento



- Camada de desgaste



- Camada de regularização



- Camada reciclada

Obra	Data	Localização (km) Extensão	Patologias existentes	Estrutura do pavimento existente	Estrutura do novo pavimento	Espessura das camadas (cm)	Profundidade de reciclagem	Fórmula de trabalho
EN 260- Serpa/Vila Verde de Ficalho	1998	<u>58+000</u> <u>48+200</u> 17,8 km	♦ Fendilhamento e desagregação da camada de desgaste.	♦ Flexível; ♦ Revestimento superficial em betão betuminoso; ♦ Macadame hidráulico ou tout-venant	♦ Camada de desgaste em micro-aglomerado betuminoso a frio (3 cm); ♦ Camada de regularização em macadame betuminoso a frio (6-10 cm); ♦ Camada reciclada a frio (12 cm).	   	Reciclagem a frio "in situ" até 12cm de profundidade.	Para 100% de material reciclado; ♦ 5% emulsão - Emulsão <u>ECL2-GRAVAMUL (Probisa)</u> ; ♦ 10% pó de pedra; ♦ 1 a 2% cal hidráulica.
EN 254 - Aguiar/Viana do Alentejo	1998	<u>74+500</u> <u>81+500</u> 7,0 km	♦ Fendilhamento; ♦ Deformações permanentes; ♦ Covas com perda de material.	♦ Revestimento superficial duplo em betão betuminoso (4 cm) ♦ Camada de regularização em macadame hidráulico (10 cm) ♦ Enrocamento	♦ Camada de desgaste betão betuminoso (4 cm); ♦ Camada de regularização em mistura betuminosa densa (3 cm); ♦ Camada reciclada a frio (10 cm).	   	Reciclagem a frio "in situ" até 10 cm de profundidade.	Para 100% de material reciclado; ♦ 4,5% emulsão - Emulsão <u>ECL2-Rejuv(Repsol)</u> ; ♦ 3% água; ♦ 1,5% cimento. ♦ Material correctivo ABGE
IP 2- Barragem do Fratel/ EN118	2002/2003	<u>152+000</u> <u>163+000</u> 11,0 km	♦ Fendilhamento tipo "pele de crocodilo".	♦ Camada de desgaste em betão betuminoso (4 cm) ♦ Camada de regularização em mistura betuminosa densa (12 cm) ♦ ABGE (30 cm)	♦ Camada de desgaste em micro betão betuminoso rugoso (3 cm); ♦ Regularização macadame betuminoso (7 cm); ♦ Camada reciclada a frio 15 cm.	   	Reciclagem a frio "in situ" até 15 cm de profundidade.	Para 100% de material reciclado; ♦ 3% emulsão - Emulsão <u>ECL2-Rejuv (Repsol)</u> ; ♦ 2,8% água.



- Camada de desgaste



- Camada de regularização



- Camada reciclada

Obra	Data	Localização (km) Extensão	Patologias	Estrutura do pavimento existente	Estrutura do novo pavimento	Espessura das camadas (cm)	Profundidade de reciclagem	Fórmula de trabalho
EN114-Montemor-o-Novo/Évora	2003-2004	<u>178+000</u> <u>170+000</u> 8,0 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Fendilhamento tipo "pele de crocodilo".</li> <li>◆ Deformações permanentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Betão betuminoso e mistura betuminosa densa (14 cm);</li> <li>◆ ABGE (30 cm);</li> <li>◆ Solos arenosiltosos/saibros graníticos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Camada de desgaste microbetão betuminoso rugoso (3 cm);</li> <li>◆ Camada de macadame betuminoso (7 cm);</li> <li>◆ Camada reciclada a frio (15 cm).</li> </ul>		Reciclagem a frio "in situ" até 15 cm de profundidade.	Para 100% de material reciclado; ◆ 3% emulsão - Emulsão ECL2-Rejuv (Repsol); ◆ 3,3% água.
EN 222-Ameias/Barragem Crestuma - Lever	2004	<u>1+700</u> <u>11+750</u> 10,0 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Fendilhamento tipo "pele de crocodilo".</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Camada de desgaste em betão betuminoso (5 cm);</li> <li>◆ Camada de regularização em mistura betuminosa densa (25 cm).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Camada de desgaste em betão betuminoso (5 cm);</li> <li>◆ Camada de regularização em macadame betuminoso (8 cm);</li> <li>◆ Camada reciclada a frio (12 cm).</li> </ul>		Reciclagem a frio "in situ" até 12 cm de profundidade.	Para 100% de material reciclado; ◆ 3% emulsão - Emulsão ECL2-Rejuv (Repsol); ◆ 6,3% água; ◆ 1% cimento.
IC 12-Cana de Senhorim/ IP 3	2008	<u>9+800</u> <u>21+500</u> 11,7 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Covas na via direita;</li> <li>◆ Descolagem entre a camada de desgaste e a de regularização.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Camada de desgaste em betão betuminoso (6 cm);</li> <li>◆ Camada de regularização em macadame betuminoso (12 cm);</li> <li>◆ Camadas de base e sub-base e ABGE (20 cm).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Camada de desgaste em mistura betuminosa descontinua (6 cm);</li> <li>◆ Camada reciclada a frio (15 cm).</li> </ul>		Reciclagem a frio "in situ" até 15 cm de profundidade.	Para 100% de material reciclado; ◆ 3% a 5% emulsão - Emulsão com betume (80/100); ◆ 0,7% cimento.



- Camada de desgaste



- Camada de regularização



- Camada reciclada



## 4. ESPECIFICAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA A RECICLAGEM A FRIO “IN SITU” COM EMULSÃO BETUMINOSA

As especificações para a reciclagem a frio “*in situ*” com emulsão betuminosa, variam e envolvem um largo leque de tópicos tais como: materiais; equipamentos; métodos construtivos; compactação; condições atmosféricas; controle de tráfego; *etc.*

Apesar de, como já foi dito, ainda não existirem especificações técnicas comuns tanto a nível europeu como mundial, relativamente a este método de reciclagem, muito se tem escrito sobre ele. Cada país tem procurado o seu caminho, criando as suas próprias especificações a partir de normas pré-existentes e com base em ensaios já praticados para outras misturas, em particular para as misturas betuminosas a frio fabricadas com materiais novos.

Tentou estabelecer-se uma análise comparativa entre várias especificações técnicas existentes para este caso nalguns países, tais como, o Caderno de Encargos tipo da EP (ex-JAE, 1998), as especificações espanholas preconizadas no artº 20 do PG4 sobre “reciclado in situ com emulsión de capas betuminosas” (2001), a especificação técnica do Departamento de Estradas de Rodagem do Brasil para a “reciclagem de pavimentos betuminoso in situ com emulsão” (2006), as especificações da FHWA e da FP<sup>2</sup>, tendo-se concluído que existem alguns pontos comuns a todas elas, que se passam a descrever seguidamente:

Antes do início da obra devem adoptar-se os seguintes procedimentos:

- Analisar o tipo e causas das patologias existentes no pavimento;
- Efectuar um exame visual às condições de drenagem do pavimento para garantir que são suficientes e prevenir a sua degradação;

- Dividir a obra em troços a analisar;
- Colher e verificar se as amostras retiradas no eixo da via e junto às bermas estão a ser obtidas em locais espaçados ao longo dos troços a reciclar;
- Verificar se os troços a reciclar são suficientemente homogéneos para a aplicação desta técnica de reciclagem;
- Verificar se não existem estruturas próximas que possam colidir com os trabalhos a realizar;
- O tipo de emulsão betuminosa a ser utilizada na reciclagem deve ser definida na fórmula de trabalho e obedecer às normas existentes para cada país, no nosso caso, como já foi, dito em 2009 entrará em vigor a EN 13808 para emulsões betuminosas catiónicas;
- A água deve ser examinada sempre que houver dúvida sobre a sua qualidade;
- Para determinação da composição da mistura reciclada é necessário definir as percentagens em que se misturam todos os materiais envolvidos. Para tal, deve ser feita uma rigorosa investigação das camadas a serem recicladas, recolhendo amostras através de furos de sondagem ou com auxílio da própria recicladora, espaçados 500 m uns dos outros nos troços a reciclar.

Deve ser determinado o seguinte:

- Espessura das camadas existentes;
- Determinação da granulometria e teor em água dos materiais;
- É fundamental que a colheita de amostras seja executada de forma a cobrir todas as possíveis variações das camadas a serem recicladas;
- O trecho a ser reciclado deve ser classificado em sub-trechos homogéneos, isto é, com camadas a serem recicladas com características semelhantes, granulometria, espessura, percentagem de betume, teor em água, identificação do tipo de solo encontrado, ensaios de caracterização do betume existente, *etc.*;
- Estimar a percentagem de materiais correctivos a adicionar;

- Estabelecer a formula de trabalho e fazer as correcções em campo que não devem exceder +/- 10% dos valores estabelecidos tanto para a emulsão como para a água; este ajustamento faz-se por vezes após a primeira passagem do cilindro por observação da aparência da camada;
- Assegurar que foi efectuada a preparação da superfície do pavimento.

A recicladora deve possuir as seguintes características:

- Deve ter o peso e potência suficientes para cortar à profundidade exigida no caderno de encargos;
- Deve possuir comando hidráulico que permita variações na espessura de fresagem, bem como meios de ajustes para compensação das inclinações transversais, e ser capaz de cortar numa única passagem a profundidade de no mínimo 12 cm, com uma velocidade constante adequada. Deve ter um dispositivo que não permita a remoção de blocos, o que deve ser verificado durante os trabalhos;
- Verificar se os dentes estão em boas condições e os injectores não estão entupidos.

Deve ser realizado um trecho experimental, tal como a seguir indicado:

- Antes do início dos trabalhos é aconselhada a execução de um trecho experimental, geralmente com um mínimo de 150 m e cobrir a largura da faixa de rodagem ou a metade da largura da via a reciclar. Nas especificações espanholas fixou-se um tramo de 200 m para estradas com um tráfego pesado T1 e T2 e de 100 m nos restantes casos;
- Devem ser confirmados, durante a execução do trecho experimental, o tipo de equipamentos usados em obra, a técnica de compactação mais adequada e o número de passagens necessárias à obtenção do grau de compactação especificado.

Durante a reciclagem:

- Nos casos em que seja necessária a incorporação de materiais correctivos estes devem ser espalhados sobre a via a ser reciclada com emprego de equipamento próprio para esse efeito, na quantidade necessária, de forma a garantir os valores da fórmula de trabalho;
- O equipamento que debita a água, a emulsão e os aditivos, deve ser composto de depósitos, bombas de caudal variável e difusores adequadamente dispostos, com controle automático programável dos seus doseadores, de tal forma que permita adicionar à mistura as percentagens previstas na fórmula de trabalho correspondentes à profundidade e largura de material fresado a reciclar;
- Após cada paragem os difusores devem ser limpos;
- A reciclagem deve ser executada na extensão e espessura de corte indicada no projecto, incorporando simultaneamente o agregado adicional, quando for necessário. Posteriormente a adição da emulsão betuminosa e da água, na recicladora, nas quantidades fixadas na fórmula de trabalho;
- Para o espalhamento e nivelamento da mistura deve ser usado um equipamento com dispositivos que evitem a segregação e executem um nivelamento e pré-compacção homogéneos e com o perfil desejado, mediante uma régua de espalhamento com dispositivos de nivelamento automáticos;
- Durante a execução, devem ser colhidas amostras adicionais de materiais a serem reciclados, para verificação do conteúdo em água e em betume, no sentido de se efectuarem pequenos ajustes na adição de água e emulsão, caso seja necessário.

Na compactação, há que observar os seguintes aspectos:

- A compactação só deve ser iniciada após 15 a 30 minutos da camada reciclada ter sido espalhada para deixar “respirar” a mistura e permitir a rotura da emulsão (Kazmierowski, T. J. e Bradbury A., 1993);

- Todo o equipamento de compactação deve se autopropulsionado, deve ter inversores do sentido de marcha de acção suave;
- A compactação deve começar das bermas para o eixo, nos segmentos em tangente, e da berma interna para a berma externa, isto é, do lado mais baixo para o mais alto, nos segmentos em curva. Os rolos compactadores devem cobrir uniformemente, em cada passagem, pelo menos a metade da largura da passagem anterior;
- Não são permitidas mudanças de direcção e inversões bruscas de marcha, durante a passagem, e o estacionamento dos equipamentos sobre as zonas que tenham sido recentemente compactadas;
- A compactação deve continuar até que seja atingida a compactação mínima especificada.

Na abertura ao tráfego:

- Após a compactação da mistura, nenhum tráfego deve ser permitido sobre o material reciclado por pelo menos duas horas. Após ter decorrido o tempo mínimo para abertura ao tráfego, este pode ser permitido de forma controlada, verificando-se se não há desprendimento de agregados;
- Quando houver desprendimento de material, o tráfego deve ser suspenso até que ocorra cura suficiente do material, e a nova abertura, também deve ser efectuada de modo controlado;
- Após abertura ao tráfego, a superfície do pavimento reciclado deve ser mantida em condições adequadas para o movimento do trânsito. Todas as partículas soltas que possam estar na superfície do pavimento devem ser varridas.

Na aplicação das camadas sobrejacentes:

- Segundo as especificações brasileiras, antes da aplicação de tratamentos superficiais e/ou novas camadas sobrejacentes, é necessário que o teor em água do material reciclado seja reduzido a pelo menos 2%. Sob condições secas, a camada reciclada deve atingir esta exigência de humidade em 48 horas. Nas especificações

espanholas só é permitida aplicação da nova camada quando o teor em água tiver descido a 1%;

- Para o Asphalt Institute (1998), um exemplo de especificação técnica neste método de reciclagem é exactamente o caso de só se atingir a cura deste tipo de misturas, para valores do teor em água inferiores a 2% e um grau de compactação de 96%. Estes valores do teor em água só são atingidos geralmente entre 10 a 14 dias após a reciclagem.

No controle de espessura da camada reciclada:

- A espessura da camada reciclada deve ser determinada através de medida directa, no máximo a cada 300 m de superfície executada, efectuada em provete extraído com uma sondagem à rotação;
- O nivelamento do eixo e bermas deve ser executado a cada 20 m.

No controle de acabamento da superfície:

- O acabamento da superfície dos diversos segmentos concluídos é verificado com duas réguas, uma de 1,20 m e outra 3,00 m de comprimento, colocadas em ângulo recto e paralelamente ao eixo da estrada, nas diversas secções.

As principais diferenças nas especificações analisadas, estão ao nível dos estudos de formulação da mistura, tanto em termos dos ensaios usados, como dos valores adoptados.

Face às variações dos pavimentos a reciclar, caracterizam-se de forma média os materiais existentes e ajustam-se as fórmulas de trabalho, procurando mesmo, em obras mais extensas, fazer uma subdivisão em troços de homogeneidade comum.

Conforme referido, a metodologia que tem sido seguida para as misturas recicladas a frio com emulsão em Portugal, é semelhante à espanhola e segue o Caderno de Encargos das E.P. no que concerne às misturas ABGETE.

Na análise granulométrica, os ensaios usados para as misturas novas são modificados na parte da secagem por se tratarem de agregados que já têm betume no seu conteúdo, geralmente, desce-se a temperatura dos habituais 105 °C para 30/35 °C (Batista, 2004).

Em Portugal considera-se importante caracterizar o betume existente, achando-se a percentagem de betume recuperado e fazendo-se ensaios de penetração e temperatura de amolecimento anel e bola. Para selecção da emulsão, seguem-se geralmente as normas de cada país. No que toca à Europa, existe uma norma europeia EN 13808, que é relativa a emulsões betuminosas catiónicas, entrando em vigor em 2009.

Em Portugal, para o cálculo do teor óptimo em líquidos para efeitos de compactação, assim como da baridade de referência para controlo da compactação das camadas, usa-se o ensaio Proctor modificado, conforme para as misturas em ABGETE. No Brasil usam-se ensaios Marshall e nos Estados Unidos, além dos atrás referidos está a ser usado com grande receptividade, o compactador giratório Superpave, que segundo alguns seguidores, é o ensaio que melhor simula o processo de reorganização que sofrem as partículas de agregados durante a execução “in situ”.

Os valores mínimos de resistência destas misturas exigidos em Portugal no Caderno de Encargos da E.P., são de  $(R_{im.água})^4 \geq 5 \text{ kN}$  e  $(R_{im.água}/R_{seco} \times 100)^5 \geq 60\%$ , inferiores relativamente aos adoptados em Espanha e no Brasil. O LNEC, após vários ensaios efectuados para obras onde foram usados este tipo de misturas concluiu que os valores estão desajustados sendo eventualmente necessária a sua correcção.

No nosso país, a percentagem óptima de betume residual é calculada a partir dos ensaios de “imersão-compressão” de acordo com as normas ASTM D 1074 e D 1075 nas quais as normas espanholas NLT 161/84 e 162/84 também se baseiam. No Brasil segue-se a ASTM D 2172.

---

<sup>4</sup> -Resistência à compressão simples, depois de imersão em água.

<sup>5</sup> -Resistência conservada

As tolerâncias em relação aos valores de referência da composição granulométrica para as misturas betuminosas a frio (novas e recicladas), em Portugal são em geral inferiores às usadas em Espanha e no Brasil como se pode verificar nos quadros seguintes correspondentes a cada um dos países.

**Quadro 4-1 – Tabela dos valores de tolerância admissíveis na fórmula de trabalho para as misturas betuminosas a frio em Portugal (adaptado de CEPISA, 2007)**

PORTUGAL		
Desvios máximos em relação aos valores de referência		ABGETE
percentagem de material que passa no peneiro de abertura	0,075 mm	± 1%
	0,180 mm	± 2%
	2,0 mm	± 4%
	4,75 mm	± 5%
percentagem de betume residual		± 0,5%

**Quadro 4-2 – Tabela dos valores de tolerância admissíveis na fórmula de trabalho para as misturas betuminosas a frio em Espanha (adaptado de PG4, 2001)**

ESPAÑA			
Características		Percentagens	Tolerâncias
Peneiros UNE EN 933-2	tamanho máximo	% sobre a massa total do material a reciclar em seco	0
	> 2 mm		± 6%
	≤ 2 mm		± 3%
	0,063 mm		± 1,5%
Teor em betume residual			± 0,3%
Humidade de compactação		teor em água óptimo	± -1/+0,5%

**Quadro 4-3 – Tabelas dos valores de tolerância admissíveis na formula de trabalho para as misturas betuminosas a frio no Brasil (adaptado de DER-Br, 2006)**

BRASIL			
Peneira de malha quadrada	% em massa passando		Tolerâncias
mm	I	II	
31	100	0	
25	90-100	0	± 8%
19	80-100	100	± 8%
12,5	0	75-95	± 8%
9,5	45-80	70-90	± 8%
4,75	28-60	44-72	± 8%
2	20-45	22-50	± 10%
0,42	10-32	8-26	± 10%
0,18	8-20	4-16	± 10%
0,075	3-8	2-10	± 3%

De tudo o que foi escrito, pode concluir-se que ainda há um longo percurso até se finalizar um documento único sobre este assunto. Apesar das suas principais diferenças estarem ao nível dos procedimentos de formulação da mistura, serão necessários ainda muitos estudos laboratoriais e experimentais no âmbito do conhecimento das misturas betuminosas recicladas a frio “*in situ*” com emulsão.



## 5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 5.1. Síntese do trabalho e principais conclusões

Do estudo desta técnica de reciclagem na reabilitação de pavimentos – a reciclagem “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa, uma conclusão se pode tirar desde já: para além da componente científica, a experiência reveste-se de fundamental importância na sua aplicação prática. Efectivamente, cada obra constitui um caso diferente, dado não ser possível adequar à partida uma mistura ao pavimento a reabilitar, mas sim, ter se adequar posteriormente uma mistura com o material que se remove do pavimento.

Não sendo por isso uma técnica de fácil implementação, a não ser por empresas especializadas, as suas vantagens ambientais e económicas são, todavia, tão relevantes que justificam plenamente a sua utilização, desde que reunidas as condições para o efeito.

Atendendo à importância das condições climáticas no processo de cura deste tipo de misturas, Portugal, em particular as zonas centro e o sul, situa-se sem dúvida, em lugar cimeiro para usufruir dessas vantagens, face ao seu clima privilegiado e aos baixos índices de pluviosidade que o caracterizam.

Nas misturas recicladas a frio “*in situ*” com emulsão betuminosa foi possível verificar a importância dos seus materiais constituintes, principalmente pelo facto não ser possível seleccionar os agregados, pois estes, são extraídos do pavimento a reabilitar. Logo, a emulsão, a água e outros materiais adicionados tanto para corrigir a mistura como para melhorar as suas propriedades mecânicas, têm de ser criteriosamente seleccionados e quantificados através dos estudos de formulação da mistura.

Constatou-se também que, antes de se iniciar um trabalho, o troço experimental, assume fundamental importância para o bom sucesso das obras,

visto que serve de confirmação da fórmula de trabalho definida nos estudos de formulação, bem como do valor dos parâmetros de controlo da compactação, sendo ainda um instrumento útil para o construtor no planeamento da obra.

Estas misturas exigem pois, a adopção de critérios específicos no controlo de qualidade. Para além dos parâmetros usualmente achados: análise granulométrica, percentagem em betume residual e avaliação da compacidade, a avaliação da resistência mecânica e a susceptibilidade à água da camada reciclada também são factores a considerar no controlo de qualidade para este tipo de misturas recicladas a frio *“in situ”*.

Em alguns estados da América do Norte, tem-se vindo a constatar que esta técnica só atrai construtores de muito bom nível, por exigir um grande compromisso de qualidade de execução e desempenho que não está ao alcance de todos. Com efeito, o elevado preço do equipamento associado aos custos inaceitáveis das falhas decorrentes durante a obra tal o justificam (FHWA, 2008).

Um dos principais aspectos construtivos que se verificou dever ser seguido com grande atenção neste tipo de obras, prende-se com o facto de surgirem juntas nas zonas em que há sobreposição de passagens da recicladora. Tal obriga a que, nas subseqüentes passagens da máquina, se tomem especiais cuidados de forma a evitar que ocorra sobredosagem de emulsão, água e doutros materiais presentes na fórmula de trabalho.

Abordaram-se os procedimentos da mistura dos materiais, colação em obra e os equipamentos necessários à implementação desta técnica, a evolução das características mecânicas e o comportamento destas misturas recicladas a frio durante o processo de cura.

Posto isto, passamos a descrever as principais vantagens da reciclagem *“in situ”* a frio com emulsão betuminosa:

- Contribui para a conservação das fontes naturais de agregados porque é recuperado 100% do material fresado do pavimento;
- Contribui para a redução dos impactes ambientais;

- Não é necessário aquecer nem secar os agregados, podendo estes ser aplicados húmidos;
- Reduz os gastos energéticos;
- Por ser um processo a frio não há endurecimento do betume;
- Elimina o risco de propagação do fendilhamento às camadas superiores, uma vez que as camadas existentes degradadas foram recicladas;
- Elimina as deformações plásticas das camadas betuminosas recicladas;
- Provoca menor interferência com o tráfego (Zeballos & Sáez, 1999), principalmente pela redução de veículos pesados nos acessos à obra a reciclar;
- Reduz o movimento em obra pela diminuição das cargas e descargas de materiais;
- Proporciona uma melhor gestão de resíduos, porque reduz ou elimina o material a transportar para vazadouro;
- Permite ainda proceder a correcções do perfil da via, de inclinações, de ondulações e de deformações na camada superficial (Dantas *et al.*, 2007);
- Reduz o custo no transporte de matérias-primas;
- Reduz o tempo de execução da obra;
- Proporciona um menor consumo de derivados de petróleo (Moreira, 2005);
- Os pavimentos podem ser melhorados estruturalmente sem alterações no traçado;
- De uma forma geral torna desnecessária a reconstrução de bermas (FHWA, 2008);
- Aumenta a vida útil do pavimento, estimando-se que esta esteja situada entre 10-15 anos com a técnica da reciclagem a frio, em comparação com os 5-8 anos das camadas betuminosas convencionais (FHWA, 2008).

Não sendo, no entanto, só vantagens, esta técnica também apresenta naturalmente algumas desvantagens, limitações e condicionalismos, alguns dos quais se passam a descrever:

- Não é exequível em zonas urbanas, a não ser que seja possível ter um conhecimento exacto da localização das suas infra-estruturas (água, electricidade, gás, saneamento básico, etc.);
- A mistura reciclada apresenta geralmente uma maior variabilidade, visto esta ser maioritariamente composta pelos materiais que já existem no pavimento, relativamente às misturas fabricadas com materiais “novos” usadas nas técnicas de reabilitação convencionais;
- O processo de cura é altamente influenciado pelas condições climáticas, sendo mais segura a sua aplicação na primavera e no verão;
- Sendo necessária e imprescindível a eliminação da água da camada, limita a profundidade de reciclagem e condiciona a sua aplicação ao volume de tráfego da estrada e à capacidade de carga das camadas recicladas (AIPCR, 2003);
- Os módulos de resistência à fadiga são inferiores aos das misturas betuminosas a quente convencionais;
- Geralmente apresenta fraca capacidade de drenagem, podendo ocorrer saturação dos materiais granulares da sub-base (CaDOT, 2008).

## **5.2. Desenvolvimentos futuros**

Para a optimização desta técnica de reciclagem *“in situ”* a frio com emulsão betuminosa, assume relevante importância que se desenvolvam os conhecimentos nesta área, quer provenham estes da experiência adquirida em campo quer no laboratório.

No sentido de serem minimizadas algumas das desvantagens e limitações já referidas, que a técnica de reciclagem a frio *“in situ”* com emulsão betuminosa

pode apresentar, têm sido realizados diversos projectos de investigação a nível europeu.

De seguida, passam-se a descrever as áreas em estudo e a sua finalidade:

- Aperfeiçoar as emulsões betuminosas na perspectiva de melhorar o envolvimento dos agregados e a coesão da mistura e diminuir o tempo de cura;
- Desenvolver os estudos de formulação das misturas realizados em laboratório, para que se aproximem tanto quanto possível das condições em campo;
- Diminuir as dificuldades que se têm verificado com alguma frequência na compactação, com implicações ao nível da redução das compacidade das misturas;
- Desenvolver os equipamentos de reciclagem;
- Desenvolver os conhecimentos existentes relativamente ao desempenho das misturas ao longo do processo de cura;
- Obter parâmetros para o dimensionamento de pavimentos incorporando este tipo de materiais.

Considera-se ainda de grande interesse que seja feito o acompanhamento das obras onde seja adoptada este tipo de técnica, por forma a obterem-se dados que permitam uma melhor compreensão do seu comportamento.

No que toca à uniformização das designações e das características das emulsões betuminosas, pelo menos a nível europeu, já foi dado um passo nesse sentido, com a entrada em vigor em 2009 da norma europeia para emulsões betuminosas catiónicas, EN 13808.

Para concluir, e como já foi referido, preferencialmente no âmbito da Comunidade Europeia, considera-se premente, a execução de guias ou especificações técnicas, relativamente às misturas recicladas a frio “*in situ*” com emulsão betuminosa.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO–AGC–ARTBA (1998) – Joint Committee, Task Force No. 38, “Report on Cold Recycling of Asphalt Pavements,” American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

AEMA (2004) – Asphalt Emulsion Manufacturers Association. “Basic Asphalt Emulsion Manual”. Manual Series No. 19. Aggregate Mixes. Mar 2004

AIPCR (2003) – Association Mondiale de la Route. “Pavement recycling. Guidelines for: In-Place Recycling With Cement; In-Place Recycling With Emulsion or Foamed Bitumen; Hot Mix Recycling In Plant “.Comité Technique AIPCR C7/8 – “Chaussées Routières” PIARC Committee C7/8 – “Road Pavements”

Akzo Nobel Chemicals (2008) – “Basic Emulsions Know – how”. Akzo Nobel Asphalt Applications. Sweden. <http://www.surfactants.akzonobel.com/>

Antunes, M.L e Batista, F.A. (2002) – “Reabilitação de pavimentos utilizando misturas betuminosas a frio. Acompanhamento da obra de reabilitação do pavimento da EN120 entre Odemira e o Limite do Distrito de Faro (proximidades de Baiona)” – LNEC, Report 101/2002-NPR/DVC, Proc. 92/16/13636, Lisbon, Portugal, May 2002

Araújo, J.; Mesquita, M. e Cabanas, C. (2008) – “Pavimentação do IC12, entre Canas de Senhorim e o IP3”

ARRA (2001) – “Basic Asphalt Recycling”. Asphalt Recycling and Reclaiming Association, EUA

ARRA (2001) – Basic Asphalt Recycling Manual, Publication No. NHI01-022, Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA), Annapolis, MD

- ARRA (2008) – The Asphalt Recycling and Reclaiming Association “Cold Planing”
- Arrieiro, P. (2007) – “Controles Construtivos Utilizados em Obras de Reciclagem Profunda”. PAVISAN. Brasil. Setembro 2007
- Asociación Española de la Carretera (1999) – “10º Congreso Ibero-Latinoamericano del ASFALTO”. De 1 a 6 de Novembro de 1999. Sevilla, Espanha
- Asphalt Institute MS-19 (1986)– “A basic asphalt emulsion manual”. Manual Series Nº. 19, Third Edition, Asphalt Institute & Asphalt Emulsion Manufactures Association, EUA
- Asphalt Institute MS-21 (1983) – “Asphalt cold mix recycling”. Manual Series Nº. 21, Asphalt Institute, EUA, Março de 1983
- Batista, F.A. (2004) – “Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos – Misturas Betuminosas Densas a Frio”. PhD thesis. Laboratório Nacional de Engenharia Civil & Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Oporto, Portugal, Junho 2004
- Batista, F.A. e Antunes, M.L. (2003) – “Pavement rehabilitation using asphalt cold mixtures ”. proceedings of the 3rd International Symposium on the Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control “Mairepav03”, Guimarães, Portugal, 7 a 10 de Junho de 2003
- Batista, F.A. e Antunes, M.L. (2004) – “Reabilitação do pavimento do IP2, entre a Barragem do Fratel e a EN118, utilizando reciclagem a frio com emulsão betuminosa” – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, relatório 212/04 NIT/DT, Proc. 702/16/13636, Lisboa, Julho de 2004
- Batista, F.A. e Antunes, M.L. (2006) – “Desempenho de Misturas Betuminosas Recicladas a Frio” – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Outubro de 2006

Batista, F.A.; Antunes, M.L.; Pathé, P. e Botelho, T. (2002) – “Reabilitação do pavimento do IP2, entre a Barragem do Fratel e a EN 118, utilizando reciclagem a frio com emulsão betuminosa”. Proceedings of the “2º Congresso Rodoviário Português”, LNEC, Lisbon, Portugal, 18-20 de November 2002

Betunel (2008) – Betunel, Tecnologia em Asfaltos. <http://www.betunel.com.br>

CADOT (2008) – Califórnia Department of Transportation. “Cold In-Place Recycling”. Caltrans – Office of Pavement Engineering. <http://www.dot.ca.gov/hq/esc/Translab/ope/CIPR.html>

Caterpillar (1996) – “Manual de recuperação da rodovia Caterpillar”

Catterpillar Website (2008) – <http://espana.cat.com>

CE (2000) – “La Politique Européene des Transports à L’horizon 2010: l’heure du choix”. Livro Branco da Comissão Europeia

Chappat, M. e Bilal, J. (2003) – Colas Group, “The Environmental Road of the Future, Life Cycle AnaLysis”. pag. 34

Cross, S. (1999) – “Experimental Cold In-Place Recycling With Hydrated Lime,” Transportation Research Record 1684, pp 186-193, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

Croteau, J. e Lee, S. (1997) – “Cold In-Place Recycling”: Performance and Practices, Prepared for presentation at the Road Construction, Rehabilitation, and Maintenance Session of the 13<sup>th</sup> International Road Federation (IRF) World Meeting, Toronto, Ontario

Crovetti, J.A. (2000) – “Construction and Performance of Fly Ash-Stabilized Cold In-Place Recycled Asphalt Pavement in Wisconsin,” Transportation Research Record 1730, pp 161-166, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

- Dantas, T.; Neto, E.; Gomes Filho, F. e Souza, R. (2007) – “Reciclagem de Material Asfáltico Fresado com a Utilização de Solventes e Microemulsões”. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Outubro 2007
- DER (2006) – Departamento de Estradas de Rodagem. Especificação Técnica. “Reciclagem de Pavimento Asfáltico in situ com emulsão”. Brasil. Secretaria dos Transportes. Fevereiro 2006
- DIRECTIVA 89/106/CEE (1988) – do conselho de 21 de Dezembro de 1988. “Directiva dos Produtos de Construção – DPC”
- DNER (1996) – “Manual de pavimentação”. 2a ed. Rio de Janeiro: 1996. 320p.
- DNIT (2006) – “Manual de Restauração de pavimentos asfálticos”. Publicação IPR-720. Brasil
- Dueñas, A.; Lucas, F. e Nunes, H. (2008) – “Desenvolvimento Sustentável. Reciclagem a Quente e Reciclagem a Frio”. REPSOL
- EAPA (2008) – European Asphalt Pavement Association. “Arguments to stimulate the government to promote asphalt reuse and recycling”, Maio de 2008
- Eckmann, B. (1999) – “Especificaciones basadas en el comportamiento (performance based specifications) para el betún. Parte I: El papel del betún en una mezcla bituminosa”. PERFORMANCE, El boletín de información de Nynas sobre el betún asfáltico e sus aplicaciones, NYNAS
- EN 13808 (2005) – “Bitumen and Bituminous Binders. Framework for Specifying Cationic Bituminous Emulsions”. 30 p.
- ENDS (2005) – “Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável”. Documento aprovado em Conselho de Ministros, Resolução nº 109/2007, Diário da República, 1ª série – Nº 159 – 20 de Agosto de 2007

Engenho Novo (2008) – “Tratamento de águas oleosas nas indústrias”.

Epps, J. (1990) – “Cold-Recycled Bituminous Concrete Using Bituminous Materials”. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Synthesis of Highway Practice 160, University of Nevada-Reno, Nevada (NV)

del Campo, J.F. (1983) – “Pavimentos Betuminosos en Frio”. Editores Técnicos Asociados, S.A., Barcelona, Espanha

del Campo, J.F. (1998) – “Tratado de estabilización e reciclado de capas de firmes con emulsion asfáltica”. Asociación Española de la Carretera. Espanha

DGC (2001) – Caderno de encargos tipo da DGC Espanha. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales pra Obras de Conservacion de Carreteras PG4. “Reciclado In Situ com Emulsión de Capas Bituminosas”

FHWA (1987) – “Pavement Recycling Guidelines for Local Governments”

FHWA (1997) – “Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments”. Federal Highway Administration. USA

FHWA-CIR-02-01 (2002) – “Development of performance based mix design for cold-in-place recycling (CIR) of bituminous pavements based on fundamental properties, Research Report Findings”. Submitted by University of Rhode Island

FHWA (2008) – “Full Depht Reclamation (Cases Histories and QC/QA)”

FHWA (2008) – “Full Depht Reclamation (Construction Methods and Equipment)”

- FHWA e FP<sup>2</sup> (2005) – Federal Highway Transportation e Foundation for Pavement Preservation. “Cold In-Place Asphalt Recycling Application Checklist”. U. S. Department of Transportation. Publication No. FHWA-IF-06-012, November 2005
- Gonçalves, O. (1994) – “Solução de Reciclagem *“in situ”* a Frio, Adoptada na E. N.12 (Circunvalação).J.A.E. Direcção de Estradas do Porto. Maio de 1994
- Graça, P. e Manilha, S. (1998) – “A Implementação de Técnicas de Reciclagem de Pavimentos em Portugal, numa Perspectiva Ambiental”. I Congreso Hispano Portuguêz Y IV Simpósio Español Sobre Carreteras Y Medio Ambiente. Malaga Y Torremolinos, 1 a 5 de Junio de 1998
- IowaDOT (2005) – Iowa Department of Transportation.”Developmental Specifications for Cold In-Place Recycled Asphalt Pavement ”. January 2005
- Jahren, C.; Cawley, B.; Ellsworth, B. e Bergeson, K. (1998) – Review of Cold In-Place Recycled Asphalt Concrete Projects, Iowa DOT, Project HR-392, Ames, IA
- Jahren, C e Dong, C. (2005) – “Long-Term Performance of Cold In-Place Recycled Asphalt Roads”. Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, August 2005. © 2005 by Iowa State University
- Jiménez, F. (2007) – “Manual de Pavimentação”. CEPSA Betumes
- Kandhal, P. e Malick, R. (1997) – “Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments” – Participant’s Reference Book, National Center for Asphalt Technology (NCAT), – Report No. FHWA-SA-98-042, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Kazmierowski, T. (2007) – “Pavement Recycling in Ontario - Moving Towards a Sustainable Future”. Sustainable TransForum. Ministry of Transportation Ontário. May 2007

Kazmierowski, T.; Marks, P e Lee, S. (2008) – “Ten Year Performance Review of In-Situ Hot Mix Recycling in Ontario”

Kazmierowski, T. J. e Bradbury A. (1993) – "Performance of Cold Recycling in Ontario". In: Transportation Research Record, EUA

Liberatori, L. A. (1998) – “Reciclagem de Pavimentos”. Revisão bibliográfica apresentada à COPPE

Liberatori, L. e Constantino, R. (2006) – “Melhoradores de Adesividade para Misturas Asfálticas - Estado da Arte”. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP

LNEC E 128-1984 – “Emulsões Alcalinas para Pavimentação. Características e Recepção”

LNEC E 199-1967 – “Solos. Ensaios de Equivalente de areia”

LNEC E 233-1970 – “Agregados. Análise granulométrica”

LNEC E 354-1984 – “Emulsões betuminosas Catiónicas para Pavimentação. Características e Recepção”

Marques, J.A. (1999) – “Reciclagem in situ”. Acção de formação “As emulsões betuminosas e suas aplicações”, Centro Rodoviário Português, Lisboa, 24 a 26 de Novembro de 1999

Martinho, F. e Clérigo, V. (1999) – “Reciclagem in situ a frio”. 10º Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Volume II, Asociación Española de la Carretera, Sevilla, Espanha. 1 a 6 de Novembro de 1999

- Martinho, F.; Picado-Santos, L. e Pais, J. (2004) – “Reciclagem de Pavimentos Rodoviários – Seleção do Processo Construtivo”. Actas do 3º Congresso Rodoviário Português – Estrada 2004, Lisboa.
- Miranda Junior, J. e Silva, R. (2000) – "Reciclagem de Camadas Betuminosas com Sub-base Estabilizada com Cimento na BR-381: Uma Experiência". In: *Reunião Anual de Pavimentação*, 32a , ABPv, Brasília, 2000.
- Miranda, V. (1997) – “Reciclagem de pavimentos *in situ* com Emulsões de Betume”. Implementação da técnica em Portugal pela JAE (DSREN) – 92/97
- Moreira, H.; Soares, J. e Motta, L. (2006) – “Comparação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Frio com Diferentes Teores de Fresado Incorporado”. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Ceará
- Moreira, H.S. e Soares, J. (2005) – “Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Frio com diferentes Teores de Fresado”
- Moreira, J. (2005) – “Contribuição para a Reutilização de Material Fresado em Camadas Estruturais de Pavimento”. Tese de Mestrado, UM, Guimarães
- MOVITER (2008) – Moviter - Equipamentos, Lda. Fotografia do “comboio” de reciclagem.
- Murphy, D. e Emery, J. (1997) – “Evaluation of Cold In-Place Asphalt Recycling, Proceedings”. Canadian Technical Asphalt Association, Quebec, Canada
- Namorado, A. (2008) – “Materiais Tratados e Reciclados em Infra-estruturas de Transportes”. Curso no IST – 15 e 16 de Dezembro de 2008

Nicholls, C. (1996) – “Asphalt Surfacing – A Guide to Asphalt Surfacing and Treatments Used for the Surface Course of Road Pavements”. Transport Research Laboratory – Londres

NLT-161/84 – “Resistencia a compresión de mezclas betuminosas”

NLT-162/84 – “Efecto del agua sobre las mezclas betuminosas compactadas (Ensayo de Inmersión-Compresión)”

O’Leary, M. D. e Williams, R. D., (1993) – “In situ Cold Recycling of Bituminous Pavements With Polymer Modified High Flood Emulsion”. In: *Transportation Research Record*, EUA

Oliveira, J. (2000) – “Relatório de Projecto Individual – Reciclagem de Pavimentos, Uma Técnica Alternativa de Reabilitação”. Universidade do Minho, Guimarães

Oliveira, P.; Sant’ Anna, F. e Souza, F. (2008) – “Restauração do Pavimento da Rodovia SP-351 Através da Reciclagem das Camadas de Capa e Base com Adição de Cimento Portland e Brita”

Pereira, P. e Picado-Santos, L. (2006) – “Technical-Economical Evaluation of Pavement Recycling Alternatives”. Março de 2006

Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras, PG-4, Artículo 20/2001 – “Reciclado in situ con emulsión de capas betuminosas”, 2001

Potti,J.J. (1999) – “Propriedades y clasificación de las emulsiones betuminosas”. As Emulsões betuminosas e suas aplicações, 24 e 26 Novembro, 1999, Centro Rodoviário Português, Lisboa

PROBISA (1998) – “Estudo Reciclado a Frio – EN260 (IP8) – Beneficiação entre Serpa e Vila Verde de Ficalho”. PROBISA Potuguesa – Produtos Betuminosos, S.A., Portugal

- Raya, J. (2008) – “Mix Design for Cold-In-place Pavement Recycling, Does it Guarantee Performance?”. July 2008. Coimbra. Portugal
- Roberts, F.L.; Kandhal, P.S.; Brown, E.R.; Lee, D.Y.; e Kennedy, T.W. (1996) – “Hot Mix Asphalt Material, Mixture, Design, and Construction”. Segunda Edição, NAPA Education Foundation, Lanham, Maryland.
- Rogge, D.; Leahy, R.; e Blair, R. (1995) – Cold In-Place Recycling (CIR) with Lime, Transportation Research Report: 95-17, Transportation Research Institute, Oregon State University, Corvallis, OR
- Salomon, D.R. (2006) – “Transportation Research Circular – Asphalt Emulsion Technology”. Transportation Research Board of The National Academies. Number E-C102. August 2006
- Salomon, A. e Newcomb, D. (2000) – “Cold In-Place Recycling Literature Review and Preliminary Mixture Design Procedure”, Report No. MN/RC-2000-21 Performed by the Civil Engineering Department at the University of Minnesota, for the Minnesota Department of Transportation, St. Paul, MN
- Santos, R. e Santos, R.C. e Oliveira Jr., U. (2007) – “Motoniveladoras”. CEFETES, Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo.
- Shell (1990) – “The Shell Bitumen Handbook”. Shell Bitumen U.K.
- Silva, C. e Miranda Jr., J. (2008) – “Reciclagem de Camada Betuminosa como Sub-base Estabilizada com Cimento na BR 381: Uma Experiência”. Obras Rodoviárias da Diretoria de Construção do DER/MG
- Sullivan, J. (1996) – “Pavement Recycling Executive Summary and Report”. FHWA-AS-95-060, USA
- Thenoux, G.; González, A. e Dowling, R. (2006) – “Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile”. May 2005

Trindade, M. (2007) – “Pavimentação entre Canas de Senhorim e o IP3”. Estradas de Portugal, Direcção de Estradas de Viseu, Novembro de 2007

Victoria, M.; Sanchez, J. e Cardoso, A. (2008) – “CL 84 Bioemulsões betuminosas” – CEPESA

Wirtgen (2004) – “Cold Recycling Manual” Germany, 2004, 252p.

Wirtgen (2005) – “Rehabilitation of a heavily trafficked road” Germany, 2005, 44p.

Wirtgen GmbH (2006) – “Cold recyclers – WM 1000 Brochure – Dust-free addition of cement. Slurry mixer WM 1000”. Germany, 2006, 8p.

Wirtgen GmbH (2007) – “Cold Recyclers WR 2000. Brochure Stabilizer, Recycler WR 2000, The mobile recycler – always reaching its goals fast”. Wirtgen GmbH, Germany, 2007, 28p.

Wirtgen GmbH (2007) – “Cold Recyclers WR 2000. Technical specification, Recycler WR 2000, The mobile recycler – always reaching its goals fast”. Wirtgen GmbH, Germany, 2007, 8p.

Wirtgen GmbH (2007) – “technical specification – Slurry mixer, WM 1000”. Germany, 2007, 4p.

Wirtgen group (2008) – “Cold recycling in the midst of ravines and canyons”

Wirtgen GmbH (2008) – “Soil Stabilizers WR 2500. The new ice from Cologne to Frankfurt”. Wirtgen GmbH, Germany, 2008, 8p.

Wirtgen Group (1998) – “*Manual de Reciclagem a Frio*”

Zeballos, G.T. e Sáez, G.G. (1999) – “Reciclado em Frio de Pavimentos Asfálticos. Diseño De Mezclas em Base a Emulsiones”. 10º Congresso Ibero-Latinoamericano Del Asfalto. Sevilla, Espanha

