

10_16

REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RECICLAGEM DE MISTURAS BETUMINOSAS

Maria de Lurdes Antunes, LNEC, mlantunes@lnec.pt
Fátima Alexandra Batista, Investigadora Auxiliar do LNEC, xana@lnec.pt

1. INTRODUÇÃO

Na Europa, os pavimentos flexíveis, ou seja, pavimentos com camada de desgaste em material betuminoso e com as camadas subjacentes em material granular não ligado e/ou misturas betuminosas [1], representam mais de 90% da extensão da rede rodoviária.

As técnicas mais frequentemente utilizadas para a conservação e reabilitação de pavimentos flexíveis compreendem a remoção de camadas betuminosas degradadas (Fig. 1) e sua substituição por novos materiais. O reaproveitamento destes materiais, designados por "Misturas betuminosas recuperadas" (MBR ou "RA – Reclaimed Asphalt" na terminologia anglo-saxónica), através de reciclagem, assume atualmente um papel muito importante na construção rodoviária, proporcionando uma efetiva redução da produção de resíduos e do consumo de matérias-primas.

A reciclagem de misturas betuminosas compreende, genericamente, a adição de novos

ligantes betuminosos (eventualmente conjugados com outros) e de novos agregados, à mistura betuminosa recuperada, tendo em vista o fabrico de uma nova mistura betuminosa - a mistura betuminosa "reciclada" -.

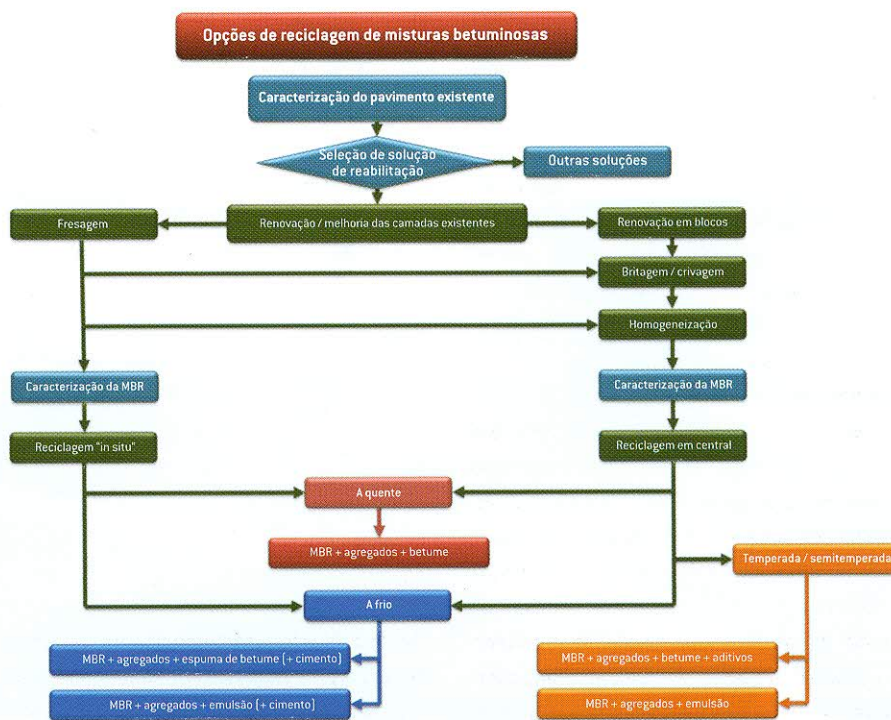
Existem várias opções para a reciclagem de misturas betuminosas, que se podem distinguir, por exemplo, quanto ao local onde é feita a reutilização do material recuperado ("in situ" ou em central), quanto ao tipo de ligante ou quanto à temperatura de fabrico (Fig. 2).

Neste artigo abordam-se duas das técnicas de reciclagem de misturas betuminosas com maior relevância no contexto português: a reciclagem a quente em central e a reciclagem a frio "in situ", com ligantes betuminosos (betume ou emulsão betuminosa).

O primeiro tipo de técnica tem sido essencialmente utilizado tendo em vista o aproveitamento de misturas betuminosas provenientes da fresagem das camadas superiores dos pavimentos, e consiste essencialmente no



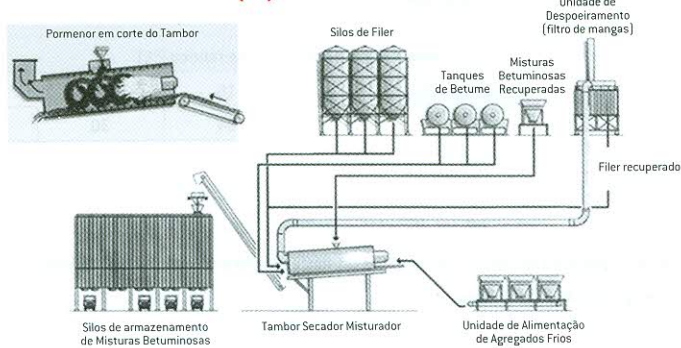
> 1



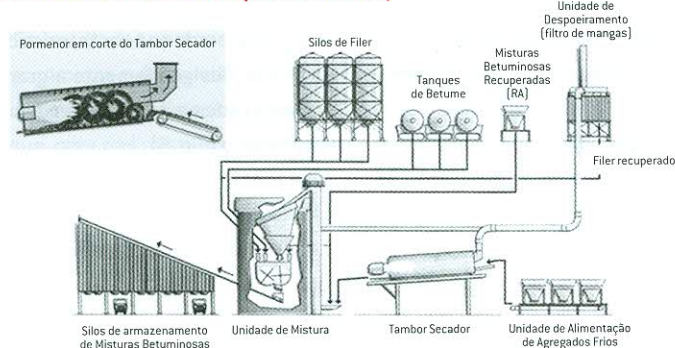
> 2

> Figura 1: Remoção de camadas betuminosas degradadas.
> Figura 2: Opções de reciclagem de misturas betuminosas.

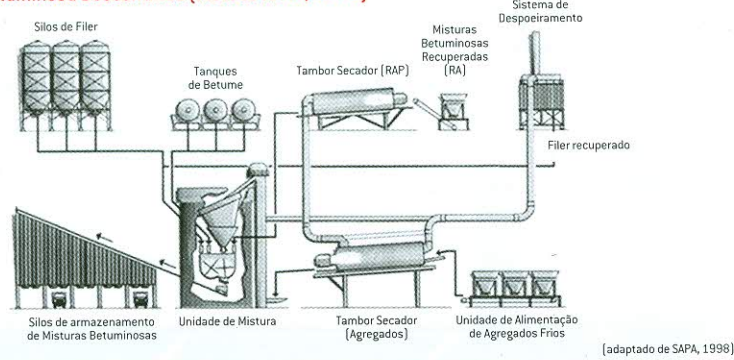
a) Centrais Betuminosas Contínuas (RA)



b) Central Betuminosa Descontínua (Método RA a Frio)



c) Central Betuminosa Descontínua (Método RA a Quente)



> 3

reaquecimento de misturas betuminosas recuperadas e sua mistura com ligante betuminoso, agregados novos e eventuais aditivos, em determinadas proporções, tendo em vista o fabrico, numa central de produção de misturas betuminosas, de uma nova mistura betuminosa.

A reciclagem "in situ" consiste na recuperação dos materiais presentes nas camadas superiores do pavimento, normalmente por fresagem, e na sua (re)utilização, no próprio local, no fabrico e aplicação de uma nova camada, recorrendo-se para tal a máquinas recicladoras. Na reciclagem a frio, o material recuperado do pavimento é remisturado com o novo ligante betuminoso (emulsão betuminosa ou espuma de betume) e/ou hidráulico (cimen-

to), e eventualmente com novos agregados ou materiais corretivos, à temperatura ambiente, proporcionando uma significativa redução da emissão de poluentes e poupança de energia, para além de favorecer a economia de matérias-primas e prevenir a produção de resíduos.

2. RECICLAGEM A QUENTE EM CENTRAL

2.1. Fabrico de misturas betuminosas recicladas em central

Um dos aspetos mais importantes a considerar no processo de fabrico das misturas recicladas a quente, é a técnica utilizada para aquecer as misturas betuminosas

recuperadas, uma vez que estas possuem na sua constituição betume envelhecido, que requer cuidados especiais durante o seu aquecimento [2].

Em geral, nas centrais contínuas, as misturas betuminosas a reciclar são, após processamento, introduzidas na zona central do tambor secador-misturador, onde estão protegidas da chama do queimador (Fig. 3a)). Neste caso, o aquecimento das misturas betuminosas recuperadas é feito quer pelos gases de combustão quentes, quer pelo contacto com os agregados novos sobreaquecidos, permitindo a adoção de taxas de incorporação de MBR da situadas entre 10 % e 50 % [3].

Nas centrais descontínuas, uma das formas mais simples de se adaptarem as instalações ao fabrico de misturas recicladas, é efetuando a introdução das misturas recuperadas diretamente no misturador (Fig. 3b)). Neste caso, o aquecimento e desidratação das misturas betuminosas fresadas é proporcionado apenas através do contacto com os novos agregados sobreaquecidos, pelo que as correspondentes taxas de incorporação de MBR são relativamente baixas, não excedendo os 30 % [3].

Outra possibilidade é complementar a central descontínua com a instalação de outro tambor secador destinado ao aquecimento, em separado, das misturas betuminosas recuperadas (Fig. 3c)). Este sistema permite a reciclagem de grandes quantidades de MBR, em geral, até percentagens da ordem de 70 % [3], apesar de na prática não ser usual a reciclagem em taxas superiores a 50 % [4].

Apesar dos desenvolvimentos havidos no processo tecnológico, envolvendo outros equipamentos específicos [4], a taxa máxima de incorporação de misturas recuperadas é frequentemente condicionada pelas características da mistura recuperada e dos seus constituintes (granulometria dos agregados, propriedades do ligante envelhecido), face às características que se pretendem obter para a mistura final.

Refira-se ainda que a utilização de elevadas taxas de incorporação de misturas recuperadas implica frequentemente um aumento do

tempo de mistura, a par de um incremento da temperatura de fabrico devido à presença de água nas misturas recuperadas (Quadro 1), o que tem implicações negativas no rendimento das centrais.

2.2. Armazenamento e caracterização das misturas betuminosas recuperadas

As misturas betuminosas recuperadas são habitualmente armazenadas em pilhas junto às centrais de fabrico, onde são caracterizadas e catalogadas.

A Especificação LNEC E 472 – 2009 - “Guia para a Reciclagem de Misturas Betuminosas a Quente em Central” - apresenta recomendações gerais para o armazenamento, manuseamento e classificação das misturas betuminosas recuperadas.

A adoção de adequadas condições de separação e armazenamento das misturas é essencial para a otimização da sua aplicação no fabrico de misturas recicladas. Com efeito, a garantia de homogeneidade dos materiais das pilhas de misturas recuperadas, a sua proteção contra as ações climáticas e a prevenção da sua contaminação, proporcionam um melhor controlo da qualidade final das misturas recicladas, permitindo a utilização de maiores taxas de incorporação.

Tendo em vista a melhoria da qualidade das misturas recicladas, é aconselhável homogeneizar os materiais recuperados antes da sua introdução na central de fabrico. Uma medida que permite melhorias significativas no controlo das propriedades da mistura final, quando se utilizam taxas de incorporação elevadas, é a separação das misturas recuperadas em frações granulométricas, e posterior controlo das proporções de cada fração, tendo em atenção que as frações mais finas contêm maiores percentagens de ligante.

A correta amostragem e caracterização das misturas betuminosas recuperadas, quer na fase de estudo de formulação da mistura, quer na fase de produção são também fatores essenciais para o sucesso da reciclagem de

% de MBR	Teor em água na MBR					
	1	2	3	4	5	6
	Aumento da temperatura de fabrico (°C)					
10	4	8	12	16	20	24
15	6	12	18	24	30	36
20	8	16	24	32	40	48
25	10	20	30	40	50	60
30	12	24	-	-	-	-

Quadro 1 Aumento da temperatura de fabrico das misturas em função da taxa de incorporação de misturas betuminosas recuperadas (MBR) e do respetivo teor em água [4].

misturas betuminosas. O projeto Europeu Re-Road, recentemente concluído, propõe recomendações relativas às condições de armazenamento, manuseamento e de amostragem das misturas recuperadas, e suas implicações relativamente às taxas de incorporação de misturas recuperadas (Fig. 4).

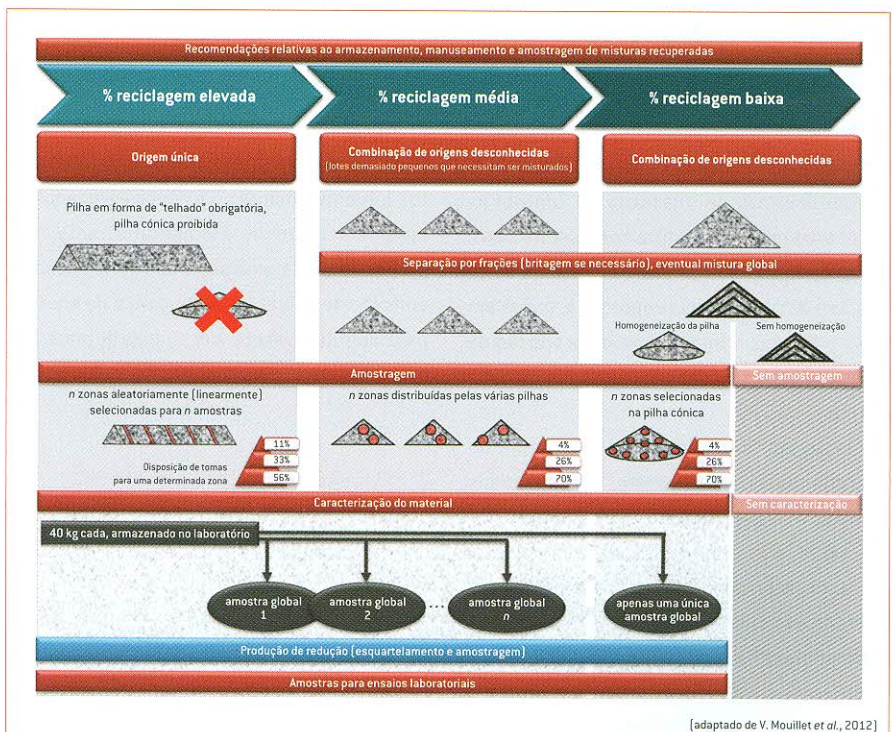
2.3. Formulação de misturas betuminosas recicladas

Para a formulação de misturas betuminosas recicladas a quente em central utiliza-se essencialmente o mesmo tipo de metodologia que para as misturas betuminosas convencionais [2, 6]. No entanto, haverá que ter em consideração a influência das características

dos materiais existentes na mistura betuminosa recuperada nas características da mistura final, designadamente a granulometria dos agregados e as propriedades do ligante betuminoso (Fig. 5).

2.4. Desempenho de misturas betuminosas recicladas a quente em central

As primeiras aplicações conhecidas em Portugal de misturas betuminosas recicladas a quente em central datam de 1999 [7]. Desde então, até ao presente, têm-se realizado alguns estudos de investigação que permitem concluir que este tipo de misturas, se corretamente formuladas e aplicadas, possuem características de desempenho idênticas

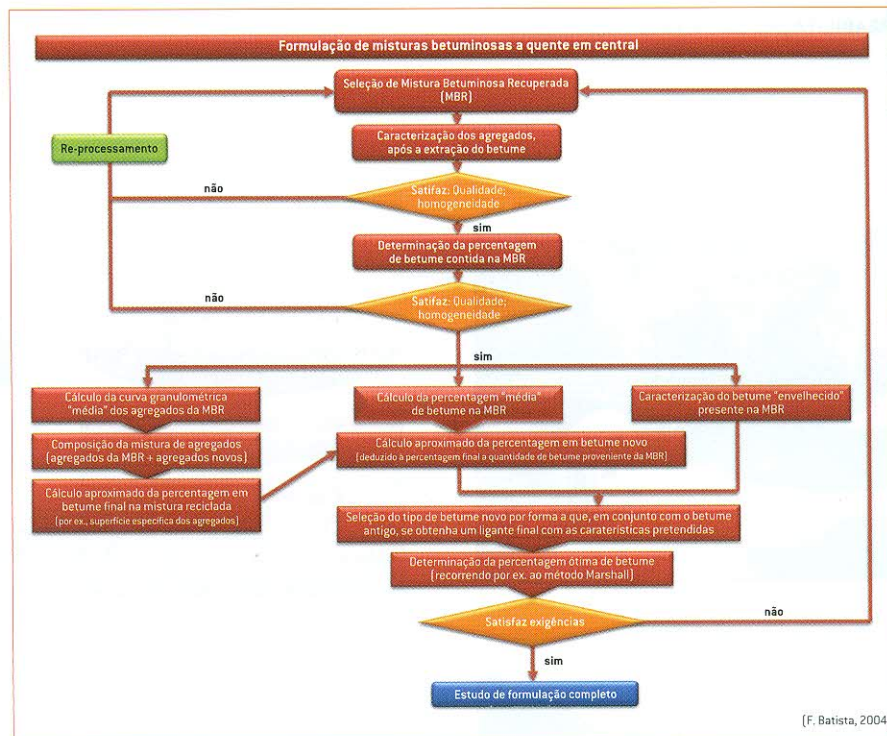


[adaptado de V. Mouillet et al., 2012]

> 4

> Figura 4: Recomendações relativas ao armazenamento, manuseamento e amostragem de misturas recuperadas.

ou superiores às misturas betuminosas convencionais [6, 7, 8]. Na Fig. 6 apresenta-se um exemplo de resultados obtidos em ensaios de fadiga realizados sobre misturas fabricadas em central e aplicadas em secções experimentais e produzidas em laboratório, com diversas percentagens de MBR (0, 20, 30 e 40%). Os resultados apresentados referem-se ao parâmetro ϵ_6 (extensão de tração correspondente a 1×10^6 ciclos) e permitem constatar que, quer nas misturas fabricadas em laboratório, quer nas misturas fabricadas em obra, se obtêm melhores características de desempenho para misturas recicladas.



> 5

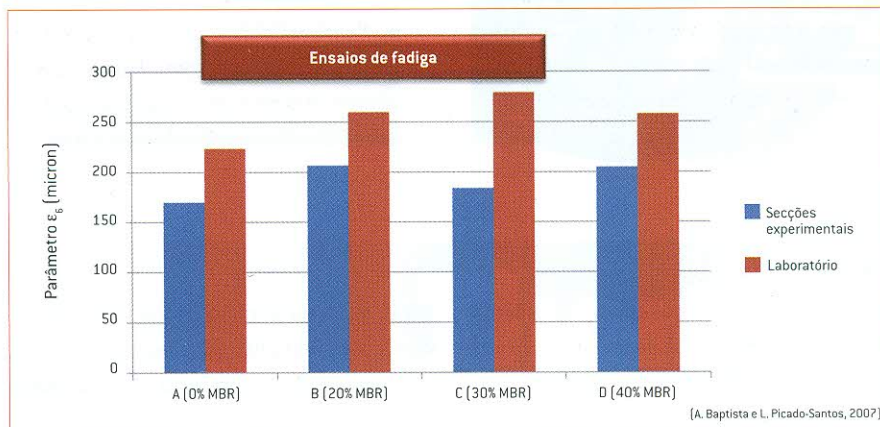
3. RECICLAGEM "IN SITU" A FRIO, COM EMULSÃO BETUMINOSA

3.1. Fabrico e aplicação em obra de misturas recicladas "in situ" a frio

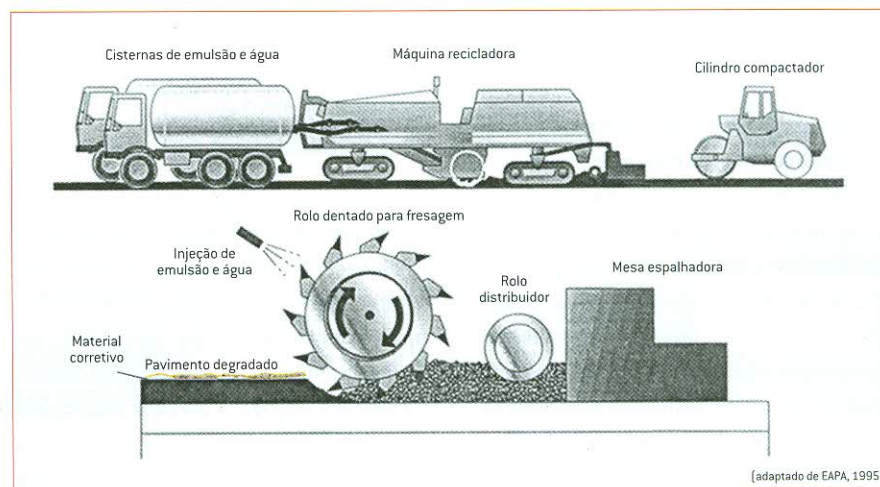
As misturas betuminosas recicladas "in situ" a frio com emulsão betuminosa são produzidas com o material recuperado do pavimento, emulsão betuminosa e água. A água é utilizada com o fim de facilitar o envolvimento dos agregados pela emulsão e a compactação da mistura. Nalguns casos torna-se ainda necessária a adição de material corretivo, como sejam, cimento e cal, que pode ter por objetivo alterar as características da mistura de agregados final ou aumentar a rigidez inicial da camada reciclada e diminuir a sua sensibilidade à água [9, 10]. Porém, a adição de ligantes hidráulicos pode aumentar o risco de fendilhamento em idades jovens (cura a curto prazo), pelo que, como regra geral, a adição de cimento ou cal deve ser limitada a 1% [10, 11].

As máquinas recicladoras utilizadas na reciclagem "in situ" procedem de forma contínua à desagregação do pavimento existente, à adição de água e emulsão através de injetores ligados às respetivas cisternas de alimentação [e ainda, eventualmente, de calda de cimento], à mistura dos diversos materiais e finalmente ao seu espalhamento (Fig. 7). As características da máquina recicladora, bem

> 6



> 7



> Figura 5: Formulação de misturas betuminosas a quente em central.
 > Figura 6: Ensaios de fadiga - secções experimentais e laboratório.
 > Figura 7: Representação de exemplo de máquina recicladora utilizada na reciclagem "in situ".

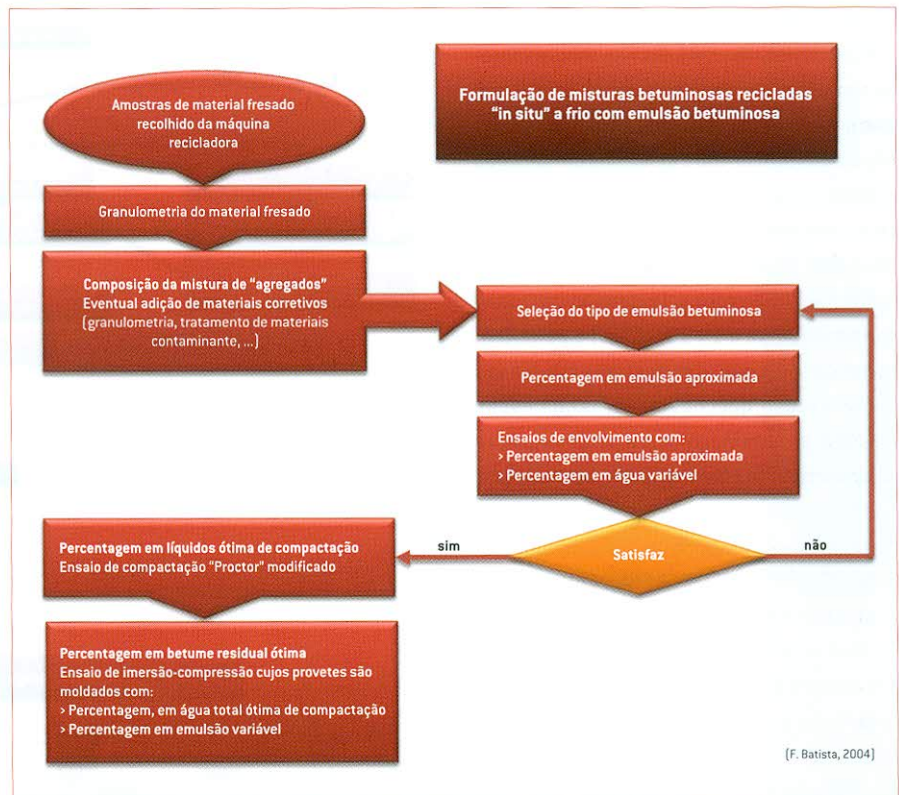


> 8



> 9

como as condições em que opera, são aspetos fundamentais neste tipo de técnica, uma vez que deles dependem algumas características dos materiais recuperados, por exemplo, a granulometria do material fresado depende, não só do tipo de camadas a reciclar, mas também da potência e velocidade da máquina. Os materiais corretivos, tais como agregados, cal hidráulica ou cimento, podem ser espalhados no pavimento previamente à passagem da máquina recicladora (Fig. 8) ou adicionados por via húmida (Fig. 9), consoante a natureza do material e o equipamento disponível. Às misturas a frio com emulsão betuminosa é de uma forma geral reconhecida uma maior dificuldade em se obterem compacidades elevadas, sendo desejável que não se utilizem grandes quantidades de água para a compactação. Assim, os equipamentos de compactação são fundamentais para o sucesso deste tipo de técnica, recomendando-se, de forma



> 10

geral, que seja primeiramente utilizado um cilindro de rasto liso (duplos, vibratórios e com peso igual ou superior a 11 t [13]) para dar uma primeira compactação à camada, seguindo-se o cilindro de pneus (com peso da ordem de 23 t ou mesmo superior) tendo por principal função favorecer a expulsão da água da mistura reciclada.

3.2. Formulação de misturas recicladas "in situ" a frio

Os métodos mais utilizados para misturas recicladas a frio apresentam os seguintes objetivos gerais: uma vez estabelecida a composição da mistura de "agregados", determinar a proporção ótima dos constituintes (mistura de agregados + emulsão betuminosa + água + outros aditivos), para obter uma boa trabalhabilidade da mistura betuminosa

durante o fabrico e aplicação, bem como adequadas características de estabilidade e comportamento mecânico durante a vida útil do pavimento (Fig. 10) [2].

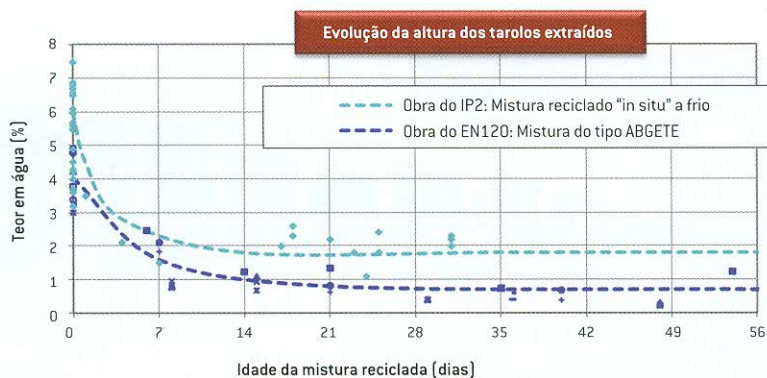
3.3. Cura e desempenho das misturas recicladas "in situ" a frio

Após a colocação em obra das misturas a frio, estas estão primeiramente sujeitas a um período de cura, durante o qual a água ainda existente vai sendo eliminada e a mistura vai ganhando resistência, sendo de assinalar que as características mecânicas "finais" da camada só são atingidas quando o processo de cura tiver terminado. No entanto, mesmo durante o processo de cura das misturas, que pode durar vários meses, o pavimento estará, a partir de certa altura, submetido à ação do tráfego.

- > Figura 8: Materiais corretivos espalhados no pavimento previamente à passagem da máquina recicladora.
- > Figura 9: Materiais corretivos adicionados por via húmida.
- > Figura 10: Formulação de misturas betuminosas recicladas "in situ" a frio com emulsão betuminosa.

Importa pois garantir que nesta fase não são induzidos danos nas camadas de misturas a frio, que se venham a repercutir no desempenho do pavimento durante o resto da sua vida útil. Neste contexto, o LNEC tem monitorizado em obra algumas das propriedades das misturas recicladas a frio ao longo do tempo, tendo sido possível observar que [2]:

- O teor em água da mistura vai decrescendo até estabilizar em cerca de 1% a 2%, o que, para condições climatéricas favoráveis, é em geral conseguido ao fim de cerca de duas a quatro semanas após a sua aplicação (Fig. 11);
- A possibilidade de extração de carotes íntegros da camada reciclada pode ser utilizada como um indicador da cura da camada (Fig. 12). O tempo decorrido para que seja possível obter carotes íntegros em toda a espessura da camada (10 cm a 15 cm) é, em geral conseguido, para condições atmosféricas favoráveis, ao fim de cinco a oito semanas após a sua aplicação.



(F. Batista, 2004)

> Figura 11: Evolução da altura dos tarolos extraídos

Da observação, ao longo do tempo, do comportamento de pavimentos reabilitados com técnicas a frio, tem-se verificado um aumento progressivo dos módulos de deformabilidade com a cura das camadas, sendo frequentemente obtidos valores finais da ordem de 3000 MPa [2, 14]

Em laboratório [2], foi estudada a evolução dos módulos de deformabilidade com a cura e estabelecidas relações entre os módulos de deformabilidade das misturas e as temperaturas. Efetuaram-se ainda estudos relativos à resistência à fadiga e às deformações permanentes de misturas betumi-

**SOLUÇÕES
PROFISSIONAIS
PARA REVESTIMENTO
DE PISOS**

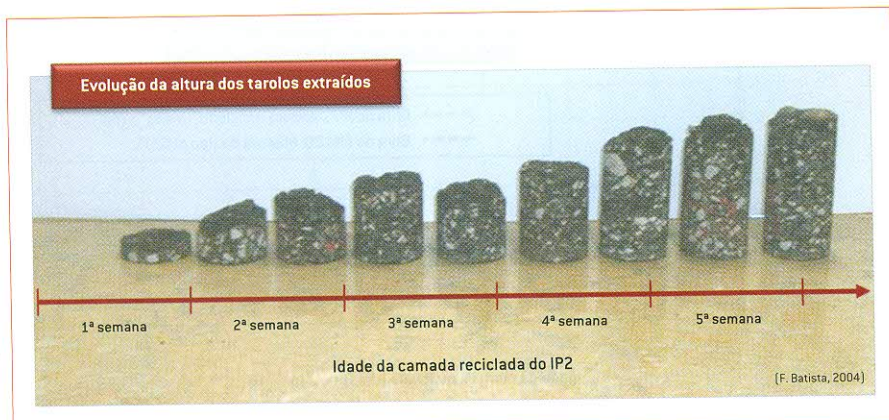
Thomsit

	RENOVAÇÃO DE PAVIMENTOS NÃO ABSORVENTES	COLOCAÇÃO DE REVESTIMENTOS EM BETONILHA COM HUMIDADE	COLOCAÇÃO DE REVESTIMENTOS EM PAVIMENTOS ABSORVENTES
5 REVESTIMENTO	VINÍLICO	LINÓLEO	
4 COLA	K 188 E COLA EXTRA PARA PVC, POLIOLEFINA E BORRACHA	L 240 D COLA PARA LINÓLEO	
3 MASSA DE REGULARIZAÇÃO	DX MASSA DE REGULARIZAÇÃO DE SECAGEM RÁPIDA	BIFLEX PLUS MASSA DE REGULARIZAÇÃO ATÉ 2MM POR CAMADA	
2 PRIMÁRIO	R 760 PRIMÁRIO PARA SUPORTES NÃO ABSORVENTES	R 755 (2ª DEMÃO) + AREIA 0,3-0,8 MM R 755 (1ª DEMÃO) ISOLAMENTO EPOXIDO CONTRA A HUMIDADE EM PAVIMENTOS	R 775 PRIMÁRIO PARA SUPORTES ABSORVENTES
1 SUPORTE	PAVIMENTO CERÂMICO ANTIGO	BETONILHA DE CIMENTO	BETONILHA DE CIMENTO

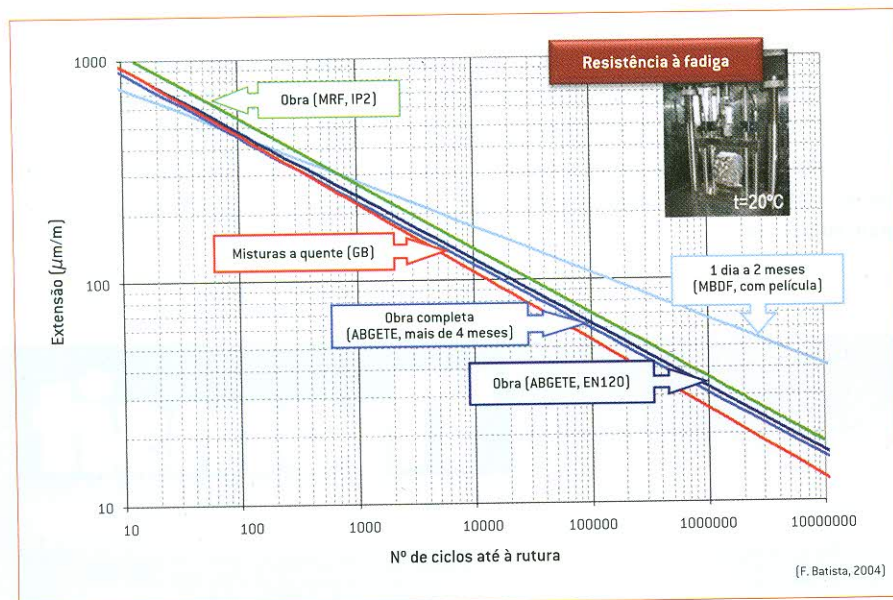
ASSISTÊNCIA TÉCNICA E ACONSELHAMENTO PERSONALIZADO
219 578 160

Henkel

QUALIDADE PARA PROFISSIONAIS



> 12



> 13

nasas a frio, tendo-se chegado às seguintes conclusões:

- O comportamento à fadiga das misturas recicladas a frio com o processo de cura em fase avançada é semelhante ao das misturas betuminosas a quente (Fig. 13).
- As misturas a frio com cura incompleta, (até cerca de 2 meses de idade), apresentam maiores deformações na fase primária quando comparadas com as obtidas para as misturas a quente. Admite-se que, pelo facto de as misturas se encontrarem ainda

em processo de cura, ocorrem maiores "movimentos" de rearranjo das partículas. No entanto, finda a fase 1, os provetes ensaiados não exibem praticamente mais deformações, o que se traduz por velocidades de deformação muito reduzidas na fase secundária. Uma vez que, geralmente, as misturas recicladas a frio são aplicadas em camadas de base, é possível corrigir quaisquer deformações permanentes que tenham ocorrido na fase 1, quando da execução das camadas superiores. ■

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] AIPCR/PIARC (2000) – "Terminology. Software and Data 2000". Paris.
- [2] Batista, F.A. (2004) – "Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos – Misturas Betuminosas Densas a Frio". Tese de doutoramento LNEC/FEUP, Porto, junho/2004, 463p.
- [3] EAPA (1998) – "Directivas ambientais sobre as melhores técnicas disponíveis (BAT) para a produção de misturas betuminosas". Breukelen, Holanda [Traduzido pela APORBET, Portugal], 86p.
- [4] Tušar, M.; Nielsen, E.; Batista, F.; Antunes, M. L.; Mollenhauer, K.; Vansteenkiste, S.; Carswell, I.; Kuttah, D.; Viman, L.; Waldemarson, A. (2012) – "Optimization of Reclaimed Asphalt in Asphalt Plant Mixing". Projeto Re-Road (Deliverable 4.5), novembro/2012, 30p.
- [5] Mouillet, V.; Gabet, T.; Enell, A.; Mollenhauer, K.; Piérrard, N.; Gaudefroy, V. (2012) – "Sampling and Characterization of Reclaimed Asphalts – Final Report". Projeto Re-Road (Deliverable 1.7), dezembro/2012, 77p.
- [6] Baptista, A.; Picado-Santos, L.; Capitão, S.; Oliveira, J. (2008) – "Performance-Based Mix Design Method for Bituminous Hot-Mix Recycling in Plant". Atas de "3rd European Pavement and Asset Management Conference", CD ed., n.º 1088, Coimbra.
- [7] Batista, F.A.; Antunes, M.L.; Marques, J.A. (2000) – "Reutilização de materiais betuminosos fresados na reabilitação de pavimentos". Atas do congresso "Estrada 2000", Lisboa, Volume II: 689-702.
- [8] Baptista, A.; Picado-Santos, L. (2007) – "Mechanical Behaviour of Hot Mix Recycled Asphalt Concrete in Plant". Atas de "International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials", Atenas, vol. 1, p.865-874.
- [9] Marques, J.A. (1999) – "Reciclagem in situ". Ação de formação "As emulsões betuminosas e suas aplicações", CRP, Lisboa, novembro/1999.
- [10] Batista, F.A.; Antunes, M.L.; Mollenhauer, K.; McNally, C. (2012) – "Building blocks for a best practice guide on cold in-place recycling". Atas de "5th Euroasphalt & Eurobitume Congress", Istambul, Junho/2012, USB Pen Disk, 10p.
- [11] Eckmann, B.; Soliman, S. (2008) – "Performance assessment of cold recycling in place". Atas de "2008 International Symposium on Asphalt Emulsion Technology", ISAET'08, Arlington (USA), 12p.
- [12] EAPA (1995) – "Recycling technologies in Europe". Breukelen (Holanda).
- [13] Task Force 38 Report (1998) – "Report on Cold Recycling of Asphalt Pavements". AASHTO-AGC-ARTBA Joint Committee, Março/1998.
- [15] Martínez, A.; Miró, R.; Pérez, F. (2007) – "Spanish experience with the application of gyratory compactor and indirect tensile test in design and control of cold recycled asphalt pavement". Transportation Research Record, n.º 2001, p.163-168.

> Figura 12: Evolução da altura dos tarolos extraídos.

> Figura 13: Resistência à fadiga.