

Estudo de caso 2: Reciclagem *in situ*, a frio, do pavimento do IP2, entre a Barragem do Fratel e o cruzamento com a EN 118

FÁTIMA ALEXANDRA BAPTISTA

DOUTORA EM ENG^a CIVIL, INVESTIGADORA AUXILIAR, LNEC

MARIA DE LURDES ANTUNES

DOUTORA EM ENG^a CIVIL, INVESTIGADORA PRINCIPAL COM HABILITAÇÃO, LNEC

PAULO PATHÉ

ENG^o CIVIL, CHEFE DE DIVISÃO DA DIRECÇÃO DE ESTRADAS DE PORTALEGRE, EP – ESTRADAS DE PORTUGAL, E.P.E.

TIAGO BOTELHO

ENG^o GEÓLOGO, RESP. PELO LABORATÓRIO, PAVIA - PAVIMENTOS E VIAS S.A.

RESUMO

Neste trabalho apresentam-se os principais resultados obtidos no decurso do acompanhamento da obra de reabilitação do pavimento do IP2 – Barragem do Fratel / EN118, realizado no âmbito do Protocolo de Colaboração entre a EP – Estradas de Portugal, E.P.E. e o LNEC.

As obras de reabilitação do pavimento compreenderam a reciclagem a frio “*in situ*” das camadas existentes, até uma profundidade de cerca de 15 cm, seguida da execução de camadas de regularização em macadame betuminoso e de desgaste em microbetão betuminoso rugoso. Atendendo à constituição do pavimento existente, as operações de reciclagem incidiram essencialmente sobre camadas de misturas betuminosas. Estas camadas apresentavam fendilhamento tipo “pele de crocodilo” em grande parte da extensão da obra.

Os resultados apresentados nesta comunicação referem-se essencialmente à caracterização dos materiais empregues na obra, ao estudo da evolução das propriedades da mistura reciclada ao longo do processo de cura e suas implicações em obra, e às actividades relacionadas com o controlo de qualidade da camada executada.

1. INTRODUÇÃO

No âmbito da colaboração entre o LNEC e a EP – Estradas de Portugal, E.P.E. (inicialmente Protocolo JAE/LNEC), o LNEC acompanhou, nos últimos 10 anos, a execução de algumas das obras de reciclagem de pavimentos *in situ* a frio de estradas pertencentes à rede rodoviária Nacional [1, 2, 3].

A par do acompanhamento das referidas obras, desenvolveram-se igualmente estudos no LNEC relativos a materiais tratados com emulsão betuminosa – dos quais a reciclagem a frio é um caso particular -, abordando diversos aspectos, entre os quais os seguintes:

- Métodos de formulação para misturas betuminosas a frio, incluindo técnicas de ensaio associadas a estes métodos;
- Evolução do processo de cura das misturas a frio e suas implicações nas propriedades das misturas;
- Comportamento mecânico de misturas betuminosas a frio, em particular, das misturas recicladas;
- Especificações e métodos de ensaio com vista à garantia da qualidade em obras incorporando misturas betuminosas recicladas a frio.

O presente trabalho refere-se em particular à execução, em 2002, da obra de beneficiação de um lanço do IP2, localizado entre a barragem do Fratel e a EN118, concelho de Nisa, distrito de Portalegre, no qual se realizou reciclagem do pavimento existente, numa extensão aproximada de 11 km (Figura 1).



Figura 1 – Localização esquemática do lanço do IP2 reabilitado

2. BREVE DESCRIÇÃO DA OBRA

A obra de reabilitação do lanço do IP2 em apreço, decorreu entre Abril de 2002 e Janeiro de 2003, tendo o adjudicatário sido a empresa Pavia - Pavimentos e Vias S.A., e tendo a fiscalização ficado, naturalmente, a cargo da Direcção de Estradas de Portalegre (DEP), ex-ICERR (actual EP – Estradas de Portugal, E.P.E.).

O pavimento flexível a reabilitar, havia sido construído em 1992, e era constituído por 300 mm de agregado de granulometria extensa, 120 mm de mistura betuminosa densa e 40 mm de camada de desgaste em betão betuminoso. No que concerne ao solo de fundação, os elementos disponíveis do projecto de construção permitiram constatar que o solo de fundação do lanço em apreço seria essencialmente constituído por solos areno/siltosos, pertencentes aos grupos A-4 e A-2-4, ocorrendo também saibros graníticos, pertencentes ao grupo A-1-b, de acordo com a classificação AASHTO.

Em 2002, dez anos decorridos após a sua construção, o pavimento existente apresentava anomalias importantes, destacando-se a ocorrência de fendilhamento tipo “pele de crocodilo” em grande parte de extensão da obra (Figura 2).



Figura 2 – Aspecto da superfície do pavimento existente antes da obra de reabilitação

No caso desta obra dispunha-se de um pavimento com características homogéneas ao longo do traçado, o que permitiu encarar, logo na fase de projecto, a solução de reciclagem “*in situ*” como particularmente interessante.

Quanto ao Caderno de Encargos específico da obra [5], a Direcção de Serviços de Apoio Técnico da JAE¹ elaborou as especificações técnicas dos trabalhos de reciclagem, adaptando as disposições existentes no Caderno de Encargos tipo da JAE [6] para as misturas a frio do tipo ABGETE e tendo em atenção as conclusões de estudos anteriormente realizados pelo LNEC neste domínio [1, 2]. A este respeito, salienta-se, por exemplo, que os valores de resistência especificados para as misturas recicladas quando submetidas a ensaios de imersão-compressão foram muito mais exigentes dos que os que constam do CE tipo.

A solução de reabilitação adoptada compreendeu genericamente, os seguintes trabalhos para o pavimento da plena via:

- Reciclagem “*in situ*”, a frio, do pavimento existente, numa espessura de 150 mm, utilizando adição de emulsão betuminosa;
- Execução de uma camada de reforço com características de regularização, em macadame betuminoso, com uma espessura de 70 mm;
- Execução de uma camada de reforço com características de desgaste em microbetão betuminoso rugoso, com uma espessura de 30 mm.

Com vista a determinar as características geométricas do perfil transversal existente, realizaram-se medições sistemáticas ao longo de todo o traçado, verificando-se uma variação em plena via de 7,50 m a 11,00 m (troços com via de lentos) e bermas de 2,50 m. Este levantamento revestiu-se de grande importância, não só na fase de projecto, tendo em vista a orçamentação dos trabalhos a efectuar, mas também na fase de planeamento da obra, tendo em vista a determinação do número de passagens do equipamento de reciclagem.

O processo construtivo adoptado na reciclagem do pavimento existente foi o seguinte:

- Passagem da máquina recicladora “*Recycler WR 2500*” da WIRTGEN, juntamente com as cisternas de água e de emulsão betuminosa a ela ligadas (Figura 3);
- Compactação da mistura reciclada utilizando dois cilindros: um de rasto liso, de 17,3 ton e outro de pneus, de 28 ton (Figura 4).

¹ Actualmente EP – Estradas de Portugal, E.P.E.



Figura 3 – Trabalhos de reciclagem do pavimento



Figura 4 – Compactação da camada reciclada

3. CARACTERÍSTICAS DA MISTURA RECICLADA

3.1. Materiais empregues na reciclagem

Na reciclagem de pavimentos “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa, os materiais utilizados no fabrico da mistura betuminosa são os materiais fresados do pavimento existente, emulsão e água. Nalguns casos torna-se ainda necessária a adição de material correctivo por forma a que a mistura de agregados final apresente as características desejadas, nomeadamente no que concerne à sua granulometria.

Pelo facto de a fonte de agregados da mistura betuminosa a produzir ser o próprio pavimento a reabilitar, torna-se indispensável conhecer os materiais a reciclar, pelo que se deverá proceder a uma avaliação cuidadosa da situação existente ao longo de toda a extensão da obra, bem como a uma caracterização detalhada dos materiais que constituem o pavimento [2, 4].

Com o objectivo principal de confirmar a homogeneidade do pavimento ao longo da extensão a reciclar, recolheram-se 8 tarolos ao longo da obra, através de sondagens à rotação (Figura 5). Da observação dos tarolos extraídos pôde-se constatar que, tal como se esperava, estes apresentavam uma certa homogeneidade quer em termos do tipo de materiais constituintes, quer em termos das espessuras dessas camadas, confirmando-se que a reciclagem do pavimento até à profundidade de 15 cm consistiria essencialmente na reciclagem de misturas betuminosas.

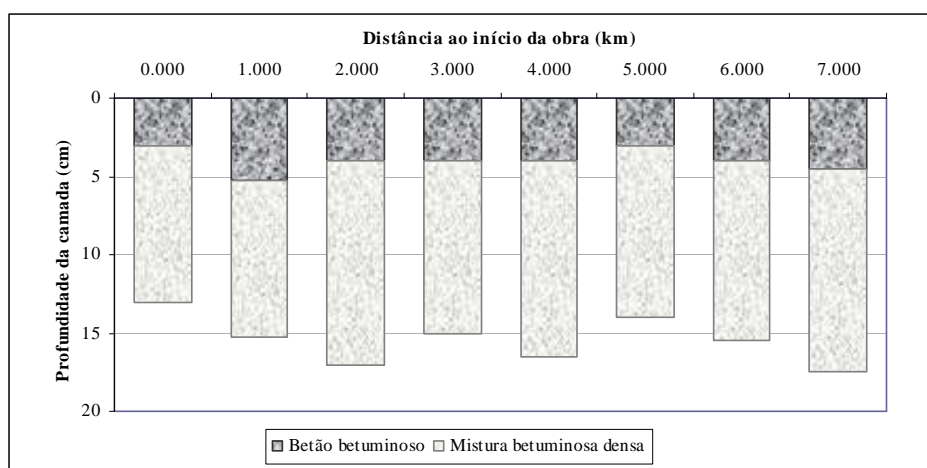


Figura 5 – Resultados da extracção de tarolos do pavimento existente

O facto de o pavimento existente ser relativamente homogéneo ao longo de toda a extensão a reabilitar é muito importante, pois neste caso é viável a realização de um único estudo de formulação para a mistura reciclada, bem como a adopção dos mesmos parâmetros de controlo de qualidade em toda a extensão da obra.

Sobre amostras dos tarolos do pavimento existente fizeram-se, no laboratório da Pavia, extracções de betume das misturas betuminosas por centrifugação e determinou-se a quantidade de betume residual presente na mistura a reciclar. A análise destes resultados permitiu concluir que a camada a reciclar possuía um teor em betume da ordem de 5%.

No que concerne ao estudo de formulação de misturas recicladas, a experiência adquirida [1, 4] recomenda que a recolha de amostras para este efeito seja efectuada, tanto quanto possível, por forma a simular a acção de desagregação obtida pela passagem do equipamento de reciclagem, obtendo-se assim um material com granulometria semelhante à que seria obtida em obra. Por questões de organização da obra, optou-se, no presente caso, por se proceder ao estudo de formulação utilizando material desagregado do pavimento com a ajuda de uma fresadora, com o compromisso de se confirmarem os resultados assim obtidos quando da execução do trecho experimental, altura em que já seria possível recolher material resultante da passagem da própria máquina recicladora.

No Quadro 1 e na Figura 6 apresentam-se algumas das características das amostras de material fresado recolhidas nesta fase. No que concerne à granulometria, pode-se comparar, na Figura 6, os resultados referentes às amostras obtidas directamente da fresagem, com os resultados obtidos após extracção prévia do ligante betuminoso. Constatou-se que os primeiros se enquadram melhor no fuso recomendado no Caderno de Encargos da obra [5], sendo que, após extracção do betume se obtém uma granulometria mais fina. Considera-se que a granulometria obtida sem extracção prévia de betume é mais significativa para efeitos de formulação da mistura e de controlo de qualidade da obra.

Quadro 1 – Características do material desagregado do pavimento existente através da acção de uma máquina fresadora

Identificação das amostras	Laboratório de ensaio	Equivalente de areia ⁽¹⁾ (%)	Extracção de betume	
			Percentagem de betume (%)	Teor em betume (%)
MF1 – Estudo de Formulação	Pavia	76	-	-
MF2	Pavia	-	4,4	4,6
MF3	DEP-EP	-	-	-
MF4	DEP-EP	-	5,4	5,7
MF5	DEP-EP	90	-	-

(1) Material fresado sem extracção de betume

Quanto ao Equivalente de Areia, ambas as amostras analisadas apresentaram valores superiores ao mínimo exigido (40%). Atendendo aos resultados obtidos considerou-se não ser necessária a adição de material correctivo à mistura a reciclar.

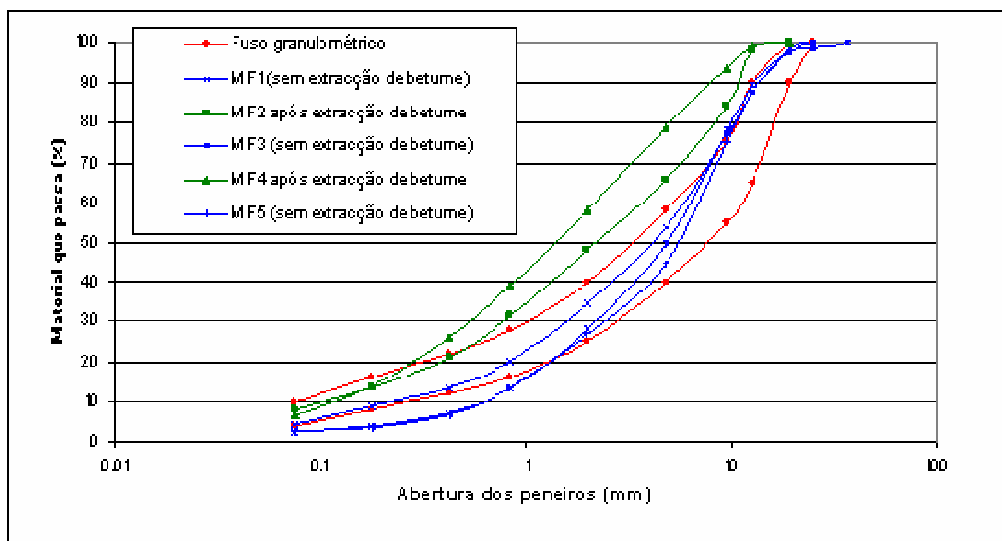


Figura 6 – Curvas granulométricas de amostras do material desagregado do pavimento existente através da acção de uma máquina fresadora

Relativamente ao ligante betuminoso, a Pavia adoptou uma emulsão betuminosa catiónica de designação comercial ECL-2-Rejuv, fornecida pela REPSOL Portugal, Lda. (Fábrica de Setúbal). Foram efectuados no LNEC ensaios sobre uma amostra da emulsão, tendo-se constatado que, de uma forma geral, a emulsão obedecia às especificações do Caderno de Encargos da obra [5]. No entanto, no que respeita à peneiração, obteve-se um valor (0,16%) superior ao máximo preconizado (0,10%). Este resultado poderá explicar de alguma forma alguns problemas de entupimento dos injectores da máquina recicladora que se registaram no decurso dos trabalhos de reciclagem.

3.2. Estudo de formulação

No estudo de formulação da mistura reciclada elaborado pela Pavia [6], seguiu-se o método que tem sido habitualmente adoptado em Portugal para a formulação de misturas densas a frio [4], ou seja, realizou-se o ensaio *Proctor* modificado sobre os agregados fresados para a determinação do teor óptimo em líquidos para a compactação, determinando-se em seguida a percentagem óptima em betume residual com recurso a ensaios de “imersão-compressão” realizados segundo as normas Espanholas NLT161/84 e NLT162/84 (Procedimento 1). Atendendo aos resultados do estudo, a composição adoptada para a mistura reciclada, indicada em percentagem em relação à massa de material fresado, foi a seguinte:

- 100% de material fresado;
- 3% de emulsão betuminosa de designação comercial “ECL-2-Rejuv” (REPSOL);
- 2,8% de água de adição.

De referir que os ensaios de “imersão-compressão” realizados sobre provetes com a composição adoptada para a mistura reciclada, conduziram a valores superiores aos mínimos estabelecidos no Caderno de Encargos da obra [5]:

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

Tendo em vista avaliar a relação entre as características do betume presente nas camadas betuminosas do pavimento existente e do betume da mistura reciclada, realizaram-se no LNEC, ensaios para recuperação do ligante e determinação de algumas das suas características, conforme se apresenta no Quadro 2. Os resultados obtidos permitem concluir que, como se esperava, as características do betume recuperado da mistura reciclada se situam entre os valores obtidos para o betume presente na mistura “antiga” e os obtidos para o ligante contido na emulsão betuminosa.

Quadro 2 – Características do betume recuperado da mistura betuminosa a reciclar, da emulsão betuminosa adoptada e da mistura betuminosa reciclada

Amostras de betume			Propriedades	
Identificação	Percentagem de betume “envelhecido”	Percentagem de betume “novo”	Penetração (25°C, 100g, 5s), 0.1 mm (ASTM D 5)	Temp. de amolecimento, °C (ASTM D 36)
Betume recuperado da mistura fresada do pavimento existente	100	-	15	77,6
Betume contido na emulsão betuminosa utilizada no fabrico da mistura reciclada	-	100	77	-
Betume recuperado de mistura reciclada fabricada em laboratório e curada à temp. ambiente até estabilizar o teor em água	≈72	≈28	32	62,6

3.3. Trecho experimental

Quando da realização do trecho experimental e tal como havia sido programado, recolheu-se material desagregado do pavimento através da acção da máquina recicladora. Com este material e adicionando 3% de emulsão efectuaram-se, quer no LNEC, quer nos laboratórios da EP e da Pavia, ensaios *Proctor* modificado. Devido às características particulares do material a ser ensaiado, registaram-se algumas dificuldades na realização destes ensaios, não tendo sido possível identificar um teor óptimo em água. Este facto reforçou a necessidade de ajustar a fórmula de trabalho, quanto à quantidade de água a adicionar à mistura, através do

trecho experimental. No que concerne às baridades a seco, obtiveram-se, em geral, valores máximos na ordem de $1,96 \text{ g/cm}^3$.

Com o objectivo de se ajustar a fórmula de trabalho e o processo construtivo, realizou-se um trecho experimental de 150 m de extensão, o qual foi subdividido em 3 sub-trechos distintos, nos quais se fixou o teor em emulsão e se fez variar, quer a quantidade de água adicionada, quer o número de passagens do cilindro de rasto liso a vibrar e estáticas. De notar que, quando da realização do trecho experimental, no início do mês de Abril, o cilindro de pneus ainda não estava disponível, pelo que não foi utilizado. Após a compactação de cada um dos sub-trechos foram realizados ensaios para determinação do teor em água e da baridade através dos métodos da “garrafa de areia” e de secagem em estufa (Quadro 3).

Quadro 3 – Resultados obtidos no Trecho Experimental

Sub-trecho experimental (Via de lentos)	Ensaio com a “garrafa de areia”		
	Baridade húmida “ <i>in situ</i> ” $\gamma_w \text{ (g/cm}^3\text{)}$	Teor em água “ <i>in situ</i> ” $\omega_0 \text{ (%)}$	Baridade seca “ <i>in situ</i> ” $\gamma_d \text{ (g/cm}^3\text{)}$
n°1 (km157+050 a km157+100)	1,956	4,5	1,872
n°2 (km157+100 a km157+150)	2,041	6,0	1,926
n°3 (km157+150 a km157+200)	1,990	6,7	1,865

A solução adoptada baseou-se na utilizada no 2º sub-trecho, dado que foi este que apresentou maiores compacidades da mistura reciclada, bem como uma melhor homogeneidade da camada reciclada. Neste sub-trecho havia-se seguido a seguinte solução:

- 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.

De acordo com os resultados obtidos, considerou-se pois, que o teor total em água da mistura óptimo seria de 6% (cerca de 3% de água adicionada + 1,8% de água existente no pavimento + 1,2% água da emulsão). Para estas condições, obteve-se no 2º sub-trecho, uma baridade seca da ordem de $1,93 \text{ g/cm}^3$. Tendo em atenção que as baridades máximas obtidas nos ensaios *Proctor* realizados foram da ordem de $1,96 \text{ g/cm}^3$, e levando ainda em conta que a compactação da mistura reciclada poderia ser melhorada com a utilização de um cilindro de pneus a seguir ao cilindro de rasto liso, acordou-se como baridade de referência um valor inicial de $1,96 \text{ g/cm}^3$. Durante a execução da obra, na fase em que a compactação já era feita

através da passagem dos dois cilindros (primeiro o de rasto liso, seguindo-se o de pneus), verificou-se que este valor era adequado.

Conforme já foi referido, no início do trecho experimental, recolheu-se material desagregado do pavimento através da acção da máquina recicladora (MDR), bem como mistura reciclada (MR), ou seja, material desagregado ao qual foi adicionada emulsão. Realizaram-se ensaios para caracterização destes materiais, cujos resultados se apresentam no Quadro 4 e na Figura 7.

Quadro 4 – Características do material desagregado do pavimento existente através da acção da máquina recicladora e da mistura reciclada – trecho experimental

Identificação das amostras	Laboratório de ensaio	Extracção de betume	
		Percentagem de betume (%)	Teor em betume (%)
MDR1	Pavia	5,4	5,2
MDR2	DEP-EP	-	-
MR1	DEP-EP	6,0	6,4

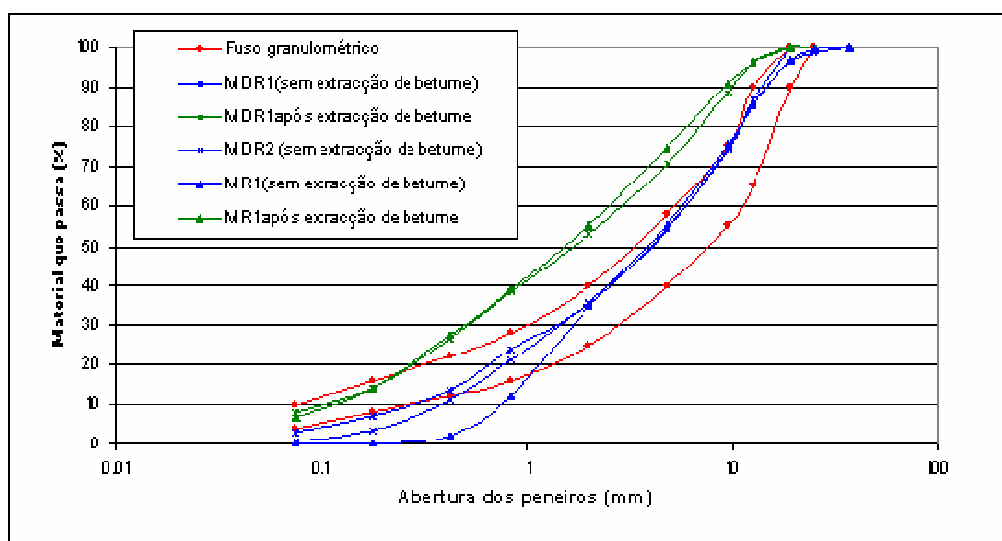


Figura 7 – Curvas granulométricas de amostras de material desagregado do pavimento existente através da acção da máquina recicladora e de uma amostra de mistura reciclada

A análise dos resultados permite constatar que as granulometrias obtidas para o material desagregado com a recicladora são, no caso da obra em apreço, semelhantes às obtidas para o material desagregado com a máquina fresadora (vd Figura 7). No que concerne ao material reciclado (isto é, material desagregado, com emulsão), constata-se um andamento semelhante, no que respeita às fracções de maiores dimensões, e uma ausência quase total de materiais

finos. Este facto explica-se pelo efeito da emulsão que aglutina os finos existentes na mistura. Quanto às amostras a que foi previamente extraído o betume, estas apresentam uma granulometria mais fina que as anteriores, à semelhança do que se havia observado para as amostras fresadas.

4. ASPECTOS PARTICULARES RELATIVOS AO CONTROLO DE QUALIDADE

O controlo de qualidade das misturas betuminosas tradicionais traduz-se geralmente no controlo das características dos materiais empregues no fabrico da mistura, da sua composição, e no controlo de compactação da camada executada. No caso das misturas recicladas “*in situ*” uma parte significativa das matérias primas utilizadas é retirada do próprio pavimento existente possuindo pois, à partida, uma variabilidade inerente a esta situação. É pois, mais difícil, garantir a homogeneidade dos materiais empregues na execução das camadas. Por esta razão, o LNEC tem vindo a recomendar que neste tipo de obras sejam igualmente efectuados ensaios para avaliação da resistência da mistura que se está a aplicar, como por exemplo, ensaios de imersão-compressão sobre misturas recolhidas em obra. Assim, o controlo de qualidade da camada reciclada, incidiu essencialmente nos seguintes aspectos:

- Determinação da quantidade de betume residual presente nas misturas recicladas;
- Análise granulométrica das misturas recicladas;
- Avaliação da compactidade das misturas recicladas compactadas;
- Realização de ensaios de imersão-compressão utilizando mistura recolhida em obra, à saída da máquina recicladora.

4.1. Quantidade de betume residual

No Quadro 5 resumem-se os resultados dos ensaios realizados para determinação da quantidade de betume residual da mistura reciclada a frio. Os valores de percentagem de betume residual obtidos variam entre 4,9 e 7,3%, tendo um valor médio de 6,4%. Estes valores são em geral da ordem de grandeza do valor esperado, tendo em atenção as percentagens de betume presentes nas camadas do pavimento existente, e a percentagem correspondente à emulsão adicionada (1,8% de betume).

No que concerne à tolerância de fabrico admitida na percentagem de betume residual em relação à fórmula de trabalho aprovada, o Caderno de Encargos da obra [5] preconiza para a mistura reciclada um valor de $\pm 0,5\%$, idêntico ao das misturas “novas” (tipo agregado britado

de granulometria extensa tratado com emulsão betuminosa). Considera-se, no entanto, que este valor deve ser futuramente ajustado, por forma a ter em conta:

- a variabilidade própria da composição da misturas a reciclar, bem como as variações de espessuras das camadas do pavimento existente;
- a variabilidade na aplicação da própria emulsão betuminosa.

Quadro 5 – Extracção de betume de amostras da mistura reciclada

Parâmetros estatísticos (População: 18 amostras)	Percentagem de betume (%)	Teor em betume (%)
Média	6,4	6,9
Valor mínimo	4,9	5,2
Valor máximo	7,3	7,9
Desvio padrão	0,56	0,63

O controlo da resistência mecânica das misturas através da realização dos ensaios de imersão-compressão, a que se fez referência anteriormente, servirá de complemento à aceitação de maiores tolerâncias na percentagem de betume.

4.2. Granulometria da mistura reciclada

Na Figura 8 representam-se graficamente as curvas granulométricas de amostras de mistura reciclada, recolhida enquanto decorriam os trabalhos. Nessa figura podem-se observar dois tipos de curvas: uma família, com materiais mais finos, correspondente a ensaios efectuados após extracção do betume, e uma outra família, correspondente a ensaios efectuados directamente sobre a mistura reciclada (isto é, ensaios efectuados sobre mistura com emulsão e água).

As curvas obtidas sem extracção do ligante apresentam, tal com era esperado, menor quantidade de finos, o que tem a ver com o facto de a emulsão já adicionada à mistura estar a aglomerar este material. No entanto, considera-se que as curvas obtidas após extracção do ligante, não são, também, representativas do agregado que constitui a mistura reciclada uma vez que, neste caso, são desaglutinadas “partículas” que após a passagem da máquina recicladora estariam ainda aglutinadas. Considera-se que o primeiro método é mais adequado para o controlo de qualidade, por permitir uma melhor avaliação dos efeitos da máquina recicladora em termos de desagregação da mistura existente.

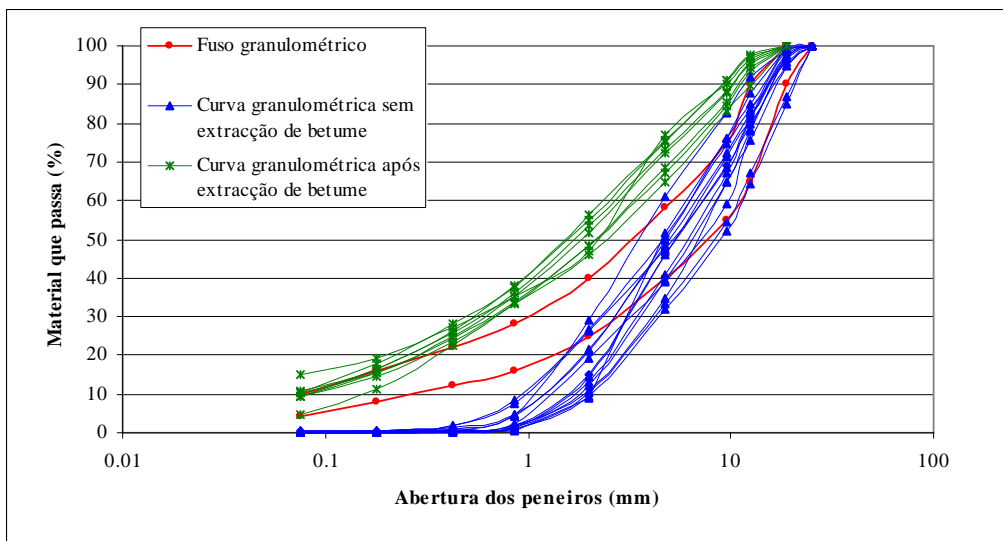


Figura 8 – Curvas granulométricas de amostras de mistura reciclada

Tendo em atenção que se trata de uma mistura reciclada “*in situ*”, os resultados obtidos consideraram-se aceitáveis e confirmaram que a granulometria da mistura aplicada em obra é relativamente homogénea, e semelhante às obtidas no estudo de formulação e no trecho experimental.

4.3. Controle de compactação

Foram realizados ensaios para avaliação da compactidade da camada de mistura reciclada obtida, tendo-se utilizado o núcleo-densímetro, de designação comercial Troxler 3450, recomendado para medição da baridade “*in situ*” em camadas betuminosas e camadas delgadas. Nalguns locais, realizaram-se também, ensaios pelo método da “garrafa de areia” por forma a aferir os resultados obtidos pelo núcleo-densímetro (Figura 9).

A análise dos resultados apresentados na Figura 9 permitiu verificar que os valores de baridade seca determinados através do núcleo-densímetro são, em geral, semelhantes aos valores determinados pela “garrafa de areia”. Este facto permitiu que o controlo da compactação da camada reciclada fosse feito de uma forma sistemática pelo método mais expedito que é o do núcleo-densímetro (Quadro 6).

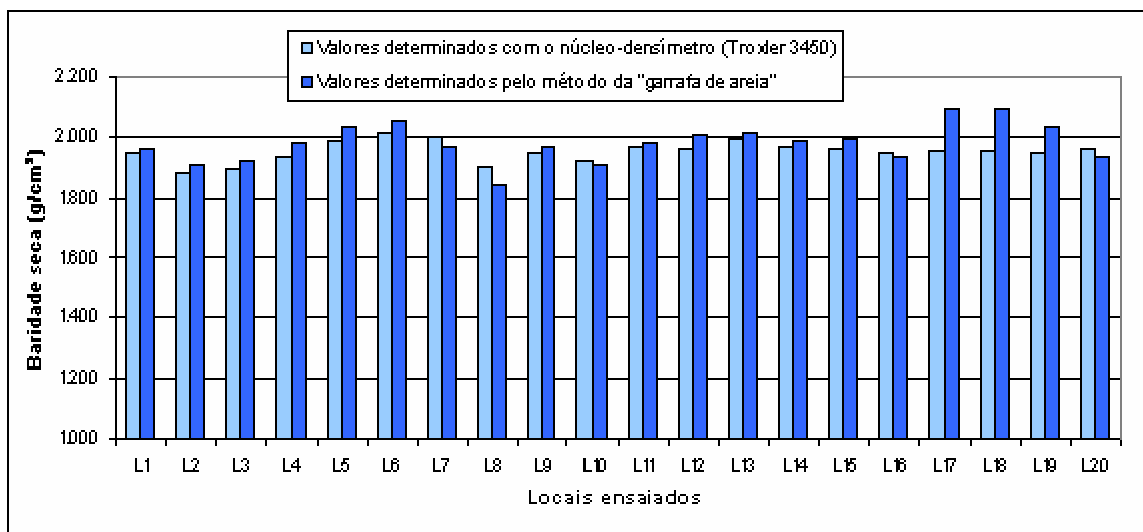


Figura 9 – Baridades secas medidas “*in situ*” pelo método do núcleo-densímetro (Troxler 3450) e “garrafa de areia”

Quadro 6 – Compacidade da camada reciclada

Parâmetros estatísticos (População: 636 ensaios)	Ensaio com o Troxler 3450	Avaliação da compacidade em relação à baridade de referência		Avaliação da compacidade em relação à baridade máxima teórica	
	Baridade seca, γ_d (g/cm ³)	Baridade de referência, γ_{ref} (g/cm ³)	Grau de compactação, γ_d/γ_{ref} (%)	Baridade máx. teórica, $\gamma_{máx.t.}$ (g/cm ³)	Grau de compactação, $\gamma_d/\gamma_{máx.t.}$ (%)
Média	1,962	1,96	100	2,44	80
Valor mínimo	1,879	1,96	96	2,44	77
Valor máximo	2,056	1,96	105	2,44	84
Desvio padrão	0,0254	-	-	-	-

4.4. Ensaio de imersão/compressão

No Quadro 7 resumem-se os resultados dos ensaios de imersão-compressão realizados segundo o método preconizado no Caderno de Encargos, sobre amostras de mistura reciclada recolhida em obra. No mesmo Quadro apresentam-se ainda resultados de ensaios de imersão-compressão realizados por outros métodos que o LNEC tem vindo a estudar [4], por forma a melhor simular as condições de compactação em obra.

Quadro 7 – Ensaio de imersão-compressão

Identificação da amostra	Nº de provetes moldados	Método de compactação	Cura dos provetes	Baridade da mistura (g/cm ³)	Ensaio de imersão-compressão			
					Procedimento de ensaio	Resistência em seco (kN)	Resistência após imersão (kN)	Resistência conservada (%)
MR2	3+3	NLT161/84 (compactação estática de duplo efeito)	1 dia à temperatura ambiente + 3 dias a 60°C	2,302	NLT162/84 (Procedimento1)	18,1	13,7	76
MR3	3+3			2,323		23,5	19,7	84
MR4	3+3			2,281		22,7	20,0	88
MR5(LNEC)	3+3			2,319		25,9	17,1	66
MR6	3+3			2,308		24,9	21,1	85
MR7	3+3			2,322		24,1	20,4	84
MR8(LNEC)	3+3	ASTM D156A (Kneading)		2,240		18,9	13,1	69
MR9(LNEC)	3+3		21 dias à temp.ambiente	2,234		19,1	10,2	53

Da leitura do Quadro 7 pode-se concluir que em todos os ensaios os valores de resistência à compressão simples obedecem aos valores mínimos preconizados no caderno de Encargos da obra (vd Secção 3.2). Exceptua-se um caso no qual se obteve uma resistência conservada inferior a 75% associada a um elevado valor da resistência à compressão simples dos provetes não imersos. Considera-se que este facto não deve inviabilizar a mistura pois os valores mínimos de resistência à compressão simples antes e após imersão são largamente cumpridos.

No que concerne às baridades obtidas verificou-se que mesmo os provetes de menores compacidades, compactados através do equipamento “kneading” do LNEC, registaram baridades secas superiores às observadas em obra (vd Quadro 7). Anota-se que a amostra MR9, para a qual se obteve um valor de resistência conservada inferior, não foi submetida ao mesmo processo de cura que as restantes.

5. ASPECTOS PARTICULARES RELATIVOS À ORGANIZAÇÃO DA OBRA

5.1. Aspectos construtivos

A máquina recicladora utilizada na presente obra permite reciclar, em cada passagem, uma faixa com 2,45 m de largura. Tendo em atenção que o perfil transversal do pavimento em estudo varia em plena via entre 7,5 e 11 m, consoante se trate de lanço sem ou com via de lentos, foi necessário efectuar respectivamente 4 e 6 passagens da máquina em cada local, por forma a reciclar toda a largura do pavimento existente, com sobreposições da ordem dos 50 cm. Nas zonas de sobreposição, houve o cuidado de à primeira passagem da máquina, desligar os injectores de emulsão e água aí localizados, ou seja, o pavimento ficava

desagregado na totalidade da largura de passagem da máquina, mas apenas era adicionada emulsão e água em cerca de 2 m. Desta forma, evitou-se que nas zonas de sobreposição houvesse “sobredosagem” de emulsão e água.

5.2. Evolução do processo de cura das misturas recicladas

Dado que a mistura em estudo é uma mistura fabricada com emulsão betuminosa e água, um dos aspectos a que deve ser prestada especial atenção é ao processo de eliminação da água contida nas camadas e respectiva “cura”. Assim, a obra deve ser organizada por forma a assegurar que:

- A camada reciclada só é sujeita ao tráfego quando tiver a estabilidade suficiente para não sofrer deteriorações devidas à acção dos rodados dos veículos;
- O teor em água da camada está estabilizado antes da execução das camadas sobrejacentes.

No que concerne à abertura ao tráfego, no início da obra, optou-se conservadoramente por abrir os troços reciclados apenas 48h após a sua conclusão. Mais tarde verificou-se que, após 24h, os troços reciclados poderiam estar sujeitos ao tráfego, o que em termos de condicionamento do tráfego foi bastante benéfico.

No que respeita à cobertura da camada reciclada, foi monitorizada a evolução do teor em água das misturas recicladas ao longo do tempo (Figura 10).

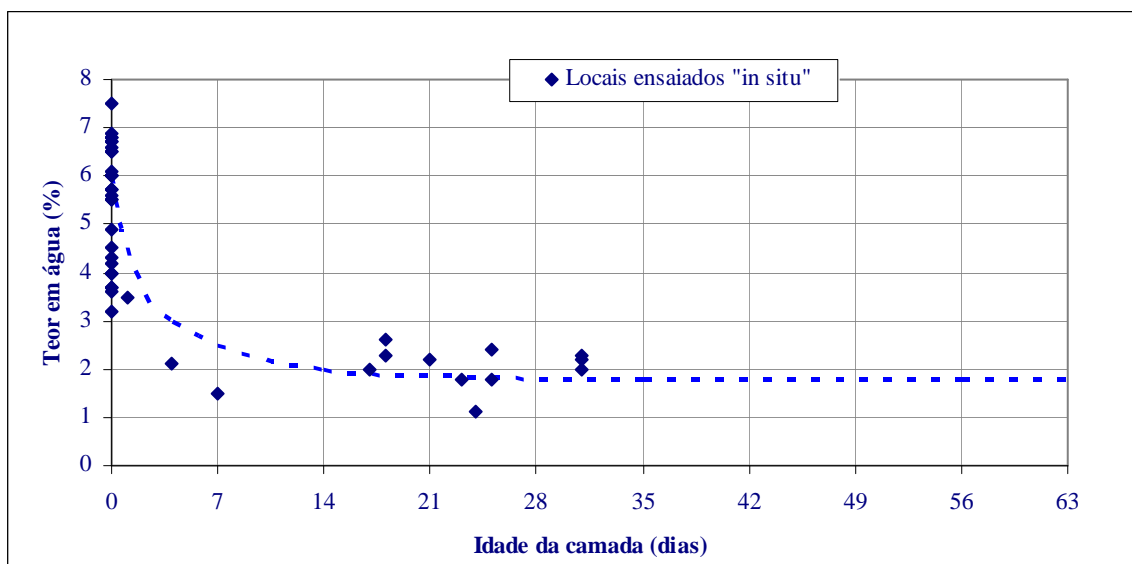


Figura 10 – Evolução do teor em água da mistura reciclada com a idade da camada

Os resultados obtidos permitiram verificar que, para as condições particulares desta obra, realizada em condições climáticas relativamente favoráveis, o teor em água estabilizou entre cerca de 1 e 2% ao fim de 2 a 4 semanas de idade. É curioso notar que já noutra obra (EN 120) em que se havia monitorizado a evolução do teor em água de uma camada em “agregado de granulometria extensa tratado com emulsão betuminosa” [8], o período necessário para a estabilização do teor em água foi o mesmo.

Tendo em conta os resultados obtidos, considerou-se que, em tempo seco, a colocação da camada sobrejacente à camada reciclada poderia ser efectuada, em geral, 1 mês após a sua realização. Durante os meses de Julho e Agosto verificou-se, através das medições sistemáticas do teor em água da camada reciclada, que este intervalo poderia ser reduzido para cerca de 2 semanas, uma vez que os teores em água estabilizavam ao fim deste período.

Considerando também como medida indicadora do avanço do processo de cura das camadas recicladas, a profundidade até à qual é possível recolher tarolos íntegros, efectuaram-se sondagens à rotação em diversos locais da obra. Verificou-se que para idades jovens, de cerca de 1 semana, não foi possível extrair tarolos, pois a mistura ainda não apresentava coesão suficiente (Figura 11). A obtenção de tarolos íntegros em toda a espessura da camada reciclada (15cm), só começou a ser possível, em geral, ao fim de cerca 4 a 8 semanas. Anota-se que, os resultados obtidos quando do acompanhamento da obra da EN 120 também apontavam nesse sentido [8].



Figura 11 – Evolução do teor em água da mistura reciclada com a idade da camada

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O acompanhamento, por parte do LNEC, da execução de obras nas quais se utilizam técnicas de pavimentação cuja utilização não é ainda corrente no nosso país, tem permitido que, a par da prestação de apoio técnico às entidades responsáveis pelas referidas obras, se desenvolvam estudos com vista a aperfeiçoar os conhecimentos existentes relativamente a essas técnicas.

No presente trabalho procurou-se salientar alguns aspectos particulares das misturas recicladas a frio “*in situ*”, nomeadamente no que concerne à sua execução em obra e ao respectivo controlo de qualidade. Como resultado da experiência adquirida, apontam-se alguns aspectos a desenvolver com vista ao aperfeiçoamento de especificações para cadernos de encargos de obras, procurando-se desta forma contribuir para a futura utilização deste tipo de técnicas com sucesso.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Antunes, M.L.; Baptista, F.A.; Barros, R.; Fonseca, E. – “Acompanhamento da obra de beneficiação da EN 260 (IP8) entre Serpa e Vila Verde de Ficalho”, JAE/LNEC, Rel.º Proc.º 92/16/13636, Março de 1999.
- [2] Antunes, M.L.; Baptista, F.A.; Fonseca, M.E.; Barros, R. – “Comportamento estrutural de pavimentos com camadas recicladas a frio”, 10º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Volume II, páginas 1089-1107, Asociación Española de la Carretera, Sevilla, Espanha, 1 a 6 de Novembro de 1999.
- [3] Antunes, M.L.; Batista, F.A. – “Reabilitação do pavimento do IP2, entre a Barragem do Fratel e a EN 118, utilizando reciclagem a frio com emulsão betuminosa”, LNEC, Relatório 212/04-NIT/DT, Proc. 702/16/13636, Lisboa, Julho de 2004, 119p.
- [4] Batista, F.A. – “Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos – Misturas Betuminosas Densas a Frio”, Dissertação de Doutoramento. Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Junho de 2004, 463p.
- [5] ICERR – “IP2 - Beneficiação entre a Barragem do Fratel e a EN 118, Caderno de Encargos”.
- [6] JAE/EP – “Caderno de Encargos – Volume V:03 – Pavimentação”, Junta Autónoma de Estradas/EP-Estradas de Portugal, E.P.E., Lisboa, Março de 1998.
- [7] PAVIA – “Estudo para reciclagem “*in situ*” com emulsão betuminosa”, Pavia - Pavimentos e Vias S.A., Relº nº R020056, Alverca, 26 de Março de 2002.
- [8] Antunes, M.L.; Batista, F.A. – “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, Rel.º Proc.º 92/16/13636, Janeiro de 2002.