

DESEMPENHO DE MISTURAS BETUMINOSAS RECICLADAS A FRIO

FÁTIMA ALEXANDRA BATISTA

DOCTORA EM ENG^a CIVIL, INVESTIGADORA AUXILIAR, LNEC

MARIA DE LURDES ANTUNES

DOCTORA EM ENG^a CIVIL, INVESTIGADORA PRINCIPAL, CHEFE DO NÚCLEO DE INFRA-ESTRUTURAS DO DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES, LNEC

RESUMO

Nos últimos oito anos, o LNEC tem vindo a desenvolver diversos estudos de investigação no domínio da reciclagem *in situ* de pavimentos com emulsão betuminosa. Os estudos efectuados compreenderam o acompanhamento de algumas das obras realizadas no nosso País em que esta técnica foi utilizada, bem como a caracterização dos materiais, a avaliação dos métodos laboratoriais mais adequados para a obtenção de condições representativas das verificadas em obra, e a determinação das características relacionadas com o desempenho dos pavimentos incorporando este tipo de misturas.

1. INTRODUÇÃO

A protecção do ambiente tem-se afirmado como um domínio chave no desenvolvimento dos Países da Comunidade Europeia. Neste mesmo sentido, diversos organismos internacionais actuando no sector dos transportes têm incentivado a adopção de técnicas de pavimentação que minimizem a emissão de poluentes atmosféricos e possibilitem a economia de matérias primas, bem como a reutilização ou reciclagem dos materiais já existentes nas estradas a reabilitar [1].

Como resposta a estes novos imperativos, nos últimos anos têm surgido no mercado Nacional diversas técnicas de pavimentação vocacionadas para o desenvolvimento sustentável e que, ao mesmo tempo, constituem soluções muito interessantes do ponto de vista técnico e económico.

A reciclagem de pavimentos *in situ* a frio é precisamente uma dessas técnicas, constituindo, comparativamente à solução tradicional de reabilitação de pavimentos (reforço do pavimento com uma camada em mistura betuminosa a quente, após uma eventual fresagem das camadas

fendilhadas do pavimento existente), uma solução extremamente atraente do ponto de vista ambiental, pois alia o facto de proporcionar uma significativa redução da emissão de poluentes e poupança de energia, com o facto de favorecer a economia de matérias primas e prevenir a produção de resíduos, uma vez que o pavimento é utilizado como fonte de matéria prima.

Em Portugal a reciclagem de pavimentos *in situ* a frio tem sido adoptada na reabilitação de pavimentos desde 1993, altura em que, no âmbito da obra de reabilitação do pavimento da EN 12 (Estrada de Circunvalação do Porto) se procedeu, numa extensão de cerca de 10 km, à reciclagem do pavimento das vias exteriores de ambas as faixas de circulação, com emulsão betuminosa e com cimento [2] [3]. Desde essa altura até ao presente, que se realizaram no nosso País outras obras importantes onde esta técnica foi utilizada. O LNEC, através de protocolos com a EP - Estradas de Portugal, E.P.E., acompanhou, embora com diferentes graus de intervenção, três dessas obras, a seguir indicadas:

- Obra de reabilitação do pavimento da EN 108 entre o Porto e Entre-os-Rios [4]., ao longo de aproximadamente 39 km, onde se procedeu à reciclagem do pavimento existente com emulsão betuminosa e cimento, numa espessura de 15 cm, envolvendo as camadas betuminosas. Os trabalhos de reciclagem foram realizados essencialmente durante o ano de 1997. A composição adoptada para a mistura reciclada, indicada em percentagem em relação à massa de material fresado, foi a seguinte:
 - 3,0% de emulsão de rotura lenta (posteriormente foi aumentada para 3,5%), denominada pela COMPOSAN Portuguesa como “Telcografa” (betume residual 80/100);
 - 1,5% de cimento.

- Obra de reabilitação do pavimento da EN 260 (IP8) entre Serpa e Vila Verde de Ficalho [5], em cerca de 27 km. Os trabalhos de reciclagem foram realizados numa extensão de aproximadamente 18 km, e consistiram na reciclagem do pavimento existente com emulsão betuminosa, até uma profundidade de 12 cm, envolvendo camadas betuminosas e materiais granulares. Neste caso, foram ainda utilizados materiais correctivos, em particular, cal hidráulica e pó de pedra, para o fabrico da mistura reciclada. Os trabalhos decorreram essencialmente durante o ano de 1998. A composição da mistura reciclada adoptada pelo Adjudicatário, indicada em percentagem em relação à massa do material fresado, foi a seguinte:
 - 10 % de pó de pedra 0/5 mm (correção da granulometria);
 - 5 % de emulsão do tipo “ECL-2/GRAVAMUL” (PROBISA);
 - 1 a 2 % de cal hidráulica (tendo em vista a correção da plasticidade dos finos).

- Obra de reabilitação do pavimento do IP2 entre a Barragem do Fratel e a EN 118 [6] onde, numa extensão de cerca de 11 km, se procedeu à reciclagem do pavimento existente com emulsão betuminosa, até uma profundidade de 15 cm, envolvendo essencialmente camadas betuminosas. Os trabalhos de reciclagem entre 2002 e 2003. Atendendo aos resultados do estudo de formulação realizado pelo Adjudicatário, a composição adoptada para a mistura reciclada, indicada em percentagem em relação à massa de material fresado, foi a seguinte:
 - 3% de emulsão betuminosa de designação comercial “ECL-2-Rejuv” (REPSOL);
 - 2,8% de água de adição (posteriormente foi aumentada para 3%)

A par do acompanhamento de obras de reciclagem de pavimentos *in situ* a frio, o LNEC acompanhou outras obras onde foram aplicadas técnicas a frio, em particular, onde foram realizadas camadas em “Agregado Britado de Granulometria Extensa Tratado com Emulsão Betuminosa” (ABGETE).

O acompanhamento destas obras e os estudos subsequentes que se lhes seguiram, inseriram-se num trabalho de investigação que tinha como um dos objectivos aprofundar os conhecimentos relativos ao comportamento mecânico das misturas fabricadas a frio, novas ou recicladas, por forma a poder quantificar adequadamente o contributo destas camadas no desempenho dos pavimentos [7]. Anota-se que por questões práticas (disponibilidade de material, etc.), os estudos laboratoriais realizados de forma sistemática envolveram sobretudo misturas do tipo ABGETE.

No entanto, considera-se que a maioria das conclusões deduzidas para as misturas a frio com materiais novos (ABGETE) poderão ser aplicáveis às misturas recicladas a frio, uma vez que estas últimas não são mais que um caso particular das primeiras. Assim, neste trabalho serão apresentados alguns resultados relativos as misturas fabricadas com materiais novos, a par de resultados relativos a misturas recicladas com emulsão.

2. ESPECIFICIDADES DAS MISTURAS BETUMINOSAS RECICLADAS A FRIO

2.1 Descrição

A reciclagem *in situ* consiste na (re)utilização dos materiais presentes nas camadas superiores do pavimento e no fabrico e aplicação, no próprio local, de uma nova mistura, recorrendo-se para tal a equipamentos específicos para esse efeito.

No caso particular da reciclagem de pavimentos flexíveis *in situ* a frio com emulsão betuminosa, trata-se do fabrico de uma mistura betuminosa a frio utilizando os materiais fresados do pavimento existente aos quais se adiciona emulsão e eventualmente água. A água

é utilizada com o fim de facilitar o envolvimento dos agregados pela emulsão, bem como para efeitos de compactação da mistura, à semelhança do caso dos materiais granulares não ligados.

Nalguns casos torna-se ainda necessária a adição de material correctivo, como sejam, cimento e cal, por forma a que a mistura de agregados final apresente as características desejadas. A adição de pequenas quantidades de cimento, pode também ter como objectivo a diminuição da sensibilidade da camada reciclada à água, principalmente no caso de a referida camada ser formada não só por material proveniente de misturas betuminosas, mas também por material das camadas granulares subjacentes [3].

O facto de a fonte de agregados da mistura betuminosa a produzir ser o próprio pavimento a reabilitar, pode implicar uma maior variabilidade dos materiais empregues e das condições de execução, tornando-se indispensável conhecer os materiais a reciclar. Deve-se pois 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.

2.2 Cura das misturas recicladas 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 este tipo de misturas apenas apresenta as características mecânicas “finais” 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 acção do tráfego. 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.

Compreende-se assim, que um dos aspectos que requer particular atenção relativamente à execução de obras com misturas betuminosas a frio, se relaciona com o processo de eliminação da água contida nas camadas, e respectiva cura.

Por esta razão, nalgumas das obras acompanhadas pelo LNEC procurou-se investigar a evolução do teor em água das camadas após colocação em obra, e a sua relação com a evolução da resistência da mistura. Para tal, seleccionou-se um conjunto de locais ao longo das obras nos quais foi monitorizada a evolução do teor em água das camadas a frio ao longo do tempo (Figura 1). Paralelamente, foram recolhidos, através de sondagens à rotação, tarolos dessas camadas (Figura 2).

Verificou-se que, à medida que as misturas a frio iam ganhando coesão, era possível extrair tarolos a maiores profundidades, até se conseguir extrair tarolos em toda a altura das camadas, admitindo-se que a extracção de tarolos nestas condições constitui um indicador da cura da camada.

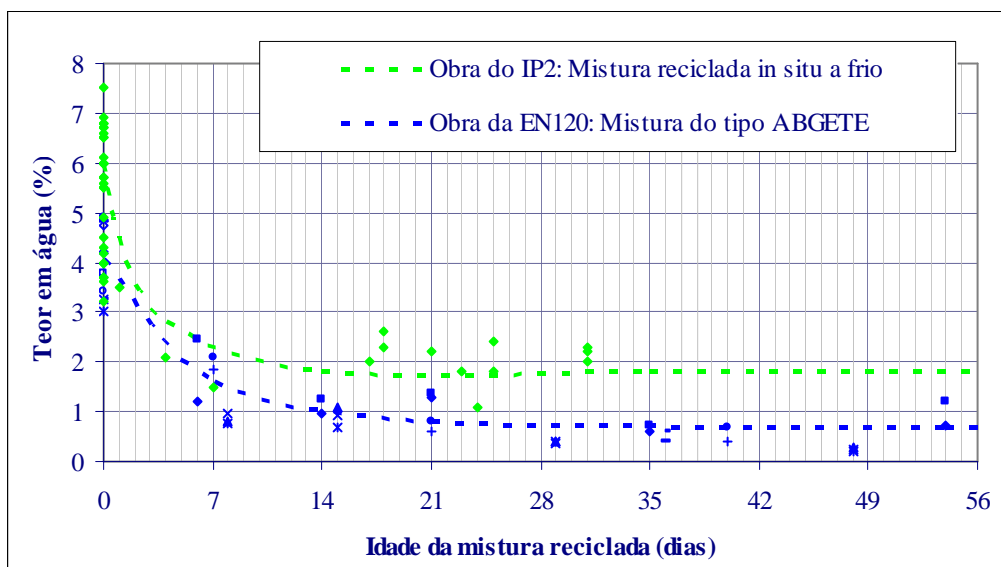


Figura 1 – Evolução do teor em água de misturas a frio compactadas em obra



Figura 2 – Evolução da altura dos tarolos extraídos com a idade da camada

Através da análise dos resultados obtidos foi possível observar que, em condições climatéricas favoráveis, o tempo decorrido para que o teor em água estabilizasse em cerca de 1% a 2% (duas a quatro semanas de idade da camada) foi menor que aquele que decorreu até que fosse possível obter tarolos íntegros em toda a espessura da camada (10 cm a 15 cm) (cinco a oito semanas de idade da camada), embora estes aspectos sejam muito influenciados pelas condições climatéricas e pelas condições de exposição ao sol.

Em termos práticos, a evolução das propriedades da mistura reveste-se de particular importância para a programação da obra, uma vez que é conveniente assegurar que:

- A camada tem estabilidade suficiente para suportar as acções do tráfego tão cedo quanto possível; assim, o intervalo entre a aplicação da camada e a abertura ao tráfego deve ser estudado caso a caso;
- O teor em água da camada de mistura a frio está estabilizado antes de executar as camadas sobrejacentes a esta. A partir do momento em que se dá a estabilização do teor em água, parece ser admissível a impermeabilização da superfície através da colocação das referidas camadas, embora a mistura não tenha ainda atingido o máximo das suas características mecânicas.

2.3 Estudos laboratoriais

2.3.1 Recolha de material representativo

Como é habitual, antes da execução da obra, deverão ser submetidos à aprovação estudos de formulação das misturas betuminosas. Para o estudo de formulação da mistura reciclada é necessário proceder a uma caracterização detalhada dos materiais a reciclar.

Normalmente os pavimentos a reciclar não possuem características homogéneas, quer porque, por vezes, na sua construção original, estas não resultaram homogéneas, quer porque, pelo processo de desgaste e envelhecimento que determina a necessidade de reabilitação e reforço, as suas características se alteram de forma heterogénea em função de diversos factores (tráfego, agentes atmosféricos, medidas de conservação corrente e preventiva, etc.).

Esta é, naturalmente, uma dificuldade do processo de reciclagem *in situ* dado que não é possível proceder à caracterização e ajuste das fórmulas de trabalho em contínuo em função das variações do pavimento a reciclar.

Nos estudos de formulação deve-se, pelo exposto, procurar caracterizar de forma média os materiais existentes e ajustar o processo de fabrico para essas características.

Os estudos a efectuar devem debruçar-se sobre as variações esperadas para as características das camadas recicladas (baridades, resistências mecânicas, etc.) em função do desvio das características das matérias primas.

No caso de obras mais extensas, com reconhecida variabilidade, deve proceder-se à subdivisão em zonas relativamente homogéneas, proceder à caracterização de troços experimentais representativos das zonas definidas e ajustar o dimensionamento e a formulação em face dos resultados obtidos [8].

Ainda no que concerne ao estudo de formulação de misturas recicladas, a experiência adquirida [7] [8] mostra que a recolha de amostras para este efeito deve ser efectuada, tanto quanto possível, recorrendo a equipamentos que simulem 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. A recolha de amostras deve pois ser feita até à profundidade que se vai reciclar, de preferência recorrendo ao mesmo equipamento a utilizar na execução da obra. Se tal não for possível, poder-se-á recorrer a uma máquina fresadora para recolher o material, devendo então os resultados ser reconfirmados quando da realização do trecho experimental [6].

Finalmente, para um estudo completo destas misturas tem que se ter em linha de conta o efeito do período de cura e caracterizar a mistura nas suas diferentes fases, tendo em atenção as peculiaridades da obra (condições de aplicação em obra, condições climatéricas da zona, etc.).

2.3.2 Caracterização dos materiais

Para a análise granulométrica das amostras de materiais fresados do pavimento antigo contendo ligante betuminoso, têm que se adaptar as normas geralmente utilizadas para esse efeito, modificando-as no que concerne à secagem dos materiais, que deve ser efectuada à temperatura máxima de 30/35°C (em vez da temperatura habitual utilizada na secagem de agregados virgens que é da ordem dos 105°C).

Em relação aos materiais fresados a serem reciclados, é igualmente importante recuperar o betume envelhecido e determinar o teor em betume, bem como as suas características (penetração, temperatura de anel e bola, etc). A selecção da emulsão a usar deve ter em conta os resultados obtidos.

2.3.3 Formulação das misturas betuminosas

No que diz respeito à metodologia de formulação das misturas que tem vindo a ser adoptada em Portugal, e que corresponde à que está preconizada no Caderno de Encargos tipo da JAE [9], esta é semelhante à utilizada em Espanha, sendo, no entanto, os valores especificados para as características de resistência das misturas distintos dos valores limite actualmente adoptados naquele país [10]. No referido Caderno de Encargos tipo da JAE, preconiza-se, para as misturas do tipo ABGETE, a realização do ensaio Proctor modificado sobre a mistura de agregados, para a determinação do teor óptimo em líquidos para fins de compactação, bem como para o estabelecimento da baridade de referência a utilizar no controlo de compactação das camadas. Ao teor em água óptimo determinado por esta via,

deve ser posteriormente subtraído o valor correspondente à “contribuição” da emulsão (igual à quantidade de água contida na emulsão, no caso de emulsões catiónicas). Quanto à determinação da quantidade de água necessária à pré-molhagem dos inertes, esta é efectuada através da apreciação visual do recobrimento obtido em misturas com diferentes teores em água e com um teor em emulsão relativamente reduzido. A determinação da percentagem óptima de betume residual baseia-se em ensaios de “imersão-compressão” realizados segundo as normas ASTM D 1074 e D 1075 (nas quais se baseiam as normas Espanholas NLT 161/84 e 162/84), estabelecendo-se os seguintes valores mínimos para as resistências obtidas:

- Resistência à compressão simples, depois de imersão em água ($R_{im.água}$):..... ≥ 5 kN
- Resistência conservada ($R_{im.água}/R_{seco} \times 100$): $\geq 60\%$

Da comparação destes valores com as características mínimas de resistência preconizadas em Espanha [10], verifica-se que o nível de exigência estabelecido em Portugal é inferior ao do país vizinho, mesmo para classes de tráfego mais baixas (entre T3 e T4). De acordo com a experiência adquirida no LNEC, no acompanhamento de obras onde estes tipos de misturas foram aplicados, tem-se vindo a verificar que os ensaios de “imersão-compressão” realizados sobre provetes com a composição adoptada para as misturas a frio executadas, conduzem sistematicamente a valores muito superiores aos mínimos estabelecidos no Caderno de Encargos da JAE, pelo que estes se consideram algo desajustados.

Assim, na obra de reabilitação do IP2 [6], tendo em conta a experiência até então obtida nas obras acompanhadas pelo LNEC, foram estabelecidos no Caderno de Encargos da obra, os seguintes valores a obter em ensaios de “imersão-compressão”:

- 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 ($R_{im.água}/R_{seco} \times 100$): $\geq 75\%$

2.4 Fabrico e aplicação em obra

Para a reciclagem de pavimentos *in situ* a frio com emulsão betuminosa são utilizados “comboios” constituídos por uma máquina recicladora acoplada a cisternas de água e de emulsão. As máquinas recicladoras actualmente disponíveis no mercado procedem de forma contínua à desagregação do pavimento existente, à adição de água e emulsão através de injectores ligados às cisternas de alimentação, à mistura dos diversos materiais e finalmente ao seu espalhamento. Posteriormente, efectua-se a compactação da mistura como é habitual.

Assim, os trabalhos de reciclagem de pavimentos *in situ* a frio com emulsão betuminosa, envolvem, de uma forma genérica, as seguintes etapas construtivas (Figura 3):

- Espalhamento de material correctivo (cimento, agregados e/ou cal) se previamente estabelecido na fórmula de trabalho. Para este efeito, existem actualmente, equipamentos

modernos que permitem a adição da cal ou cimento imediatamente antes da passagem da máquina recicladora;

- Passagem da máquina recicladora juntamente com as cisternas de água e de emulsão a ela ligadas:
 - Desagregação do pavimento existente por fresagem, até à profundidade estabelecida;
 - Adição contínua de ligante betuminoso, e eventualmente, de água;
 - Mistura do material desagregado com os materiais adicionados;
 - Espalhamento da mistura assim constituída.
- Compactação da mistura.

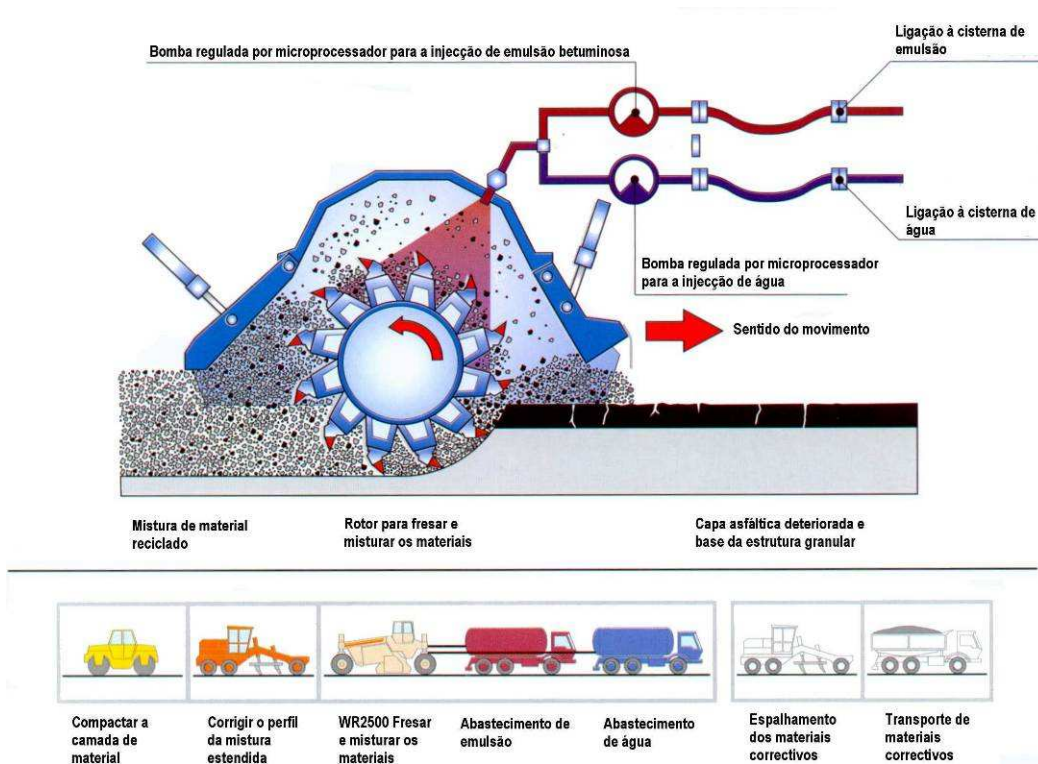


Figura 3 – Esquema das operações de reciclagem do pavimento [12]

Há que ter em atenção que consoante os equipamentos de reciclagem e de compactação utilizados assim se podem obter camadas com diferentes características, por exemplo, quanto à homogeneidade e granulometria dos materiais reciclados (que poderá ser mais fina, se a máquina recicladora tiver mais potência e se circular a uma velocidade mais reduzida), ou, quanto à compactação da camada reciclada. De facto, um dos campos que tem sido alvo de investigação e de grandes desenvolvimentos relaciona-se com os equipamentos de reciclagem, ou seja, com o processo de escarificação do pavimento, que condiciona a homogeneidade e granulometria dos materiais reciclados [11].

Quanto à compacidade das camadas reciclada, tem-se verificado com alguma frequência que existem dificuldades na sua compactação, e que as compacidades relativamente reduzidas que se obtêm influem negativamente o comportamento das misturas aplicadas. Assim, a escolha do equipamento de compactação adequado é outro aspecto que se reveste de grande importância. Actualmente, para a compactação das misturas recicladas a frio são usualmente utilizados dois tipos de cilindros: de rasto liso e de pneus. Segundo alguns autores [13] os cilindros de rasto liso geralmente utilizados na compactação deste tipo de camadas, são duplos, vibratórios e têm um peso igual ou superior a 11 toneladas. Os cilindros de pneus têm geralmente um peso da ordem de 23 toneladas ou mesmo superior. Na Figura 4 ilustram-se estes equipamentos.



Figura 4 – Equipamento utilizado na compactação de uma camada reciclada in situ a frio

No que concerne à adição de material correctivo, havendo necessidade de o fazer, devem-se adoptar as diligências necessárias por forma a minimizar os riscos de contaminação do ambiente, em particular no caso do cimento e da cal. Por exemplo, o espalhamento do material correctivo sobre o pavimento a reciclar deve ser feito com a mínima antecedência relativamente à passagem da recicladora, e em condições atmosféricas favoráveis, sem vento que arraste o material para fora da zona alvo.

As condições atmosféricas também são importantes quando da execução da camada, recomendando-se que este tipo de trabalhos seja executado durante a Primavera/Verão, também por forma a que o período de cura ocorra em circunstâncias mais favoráveis, podendo desta forma a camada atingir mais rapidamente as características “finais” para que foi dimensionada.

Um aspecto importante a considerar quando da reciclagem de um pavimento *in situ* diz respeito à largura de pavimento reciclado por cada passagem da máquina recicladora. Tendo em atenção as características do perfil transversal do pavimento (largura da via) a reciclar, bem como os condicionamentos de tráfego, define-se o número de passagens da máquina, em cada local, por forma a reciclar toda a largura do pavimento existente, e determinam-se as zonas de sobreposição, cuja largura deve, em geral, situar-se num intervalo de 15 a 30 cm [14], com um valor mínimo de 10 cm [13]. Nas zonas de sobreposição há que evitar que haja “sobredosagem” de emulsão e água, e, se for esse o caso, de materiais correctivos. Para tal, quando da primeira passagem da máquina recicladora, os eventuais materiais correctivos não devem ser adicionados nessas zonas, e os injectores de emulsão e água aí localizados devem ser desligados. Portanto, como resultado da primeira passagem da máquina, recicla-se o pavimento na largura da máquina recicladora, excepto nas zonas de sobreposição, onde o pavimento é apenas desagregado.

2.5 Trecho experimental

A execução de um trecho experimental antes da aplicação de qualquer camada do pavimento é um procedimento que faz parte integrante das boas técnicas construtivas.

No caso da reciclagem *in situ* a frio, a execução do trecho experimental reveste-se de uma especial importância, podendo, pela devida consideração dos resultados obtidos, obviar alguns problemas durante a obra. A sua execução é por exemplo essencial, tendo em vista ajustar o avanço do equipamento de reciclagem face à granulometria que se pretende obter, definir o método de compactação adequado e ajustar o teor em água de compactação e verificar os resultados obtidos no estudo de formulação da mistura.

Os resultados obtidos no trecho experimental deverão também servir de base à programação da obra, tendo em atenção a evolução do teor em água e do processo de cura da mistura observados nesse trecho. Assim, não é conveniente executar a camada sobrejacente à camada em mistura a frio antes do respectivo teor em água estabilizar, sendo também desejável verificar qual o intervalo de tempo necessário para que a camada seja aberta ao tráfego sem que sofra danos à superfície.

Os resultados obtidos no trecho experimental deverão também ser utilizados com vista ao estabelecimento da metodologia a adoptar no controlo da qualidade, designadamente no que concerne à granulometria dos “agregados” (mistura desagregada sob acção da máquina recicladora) e, também no que concerne ao controlo da compactação.

2.6 Controlo de qualidade

Devido à inexistência de exigências específicas para a reciclagem *in situ* a frio, as características que se têm exigido, nas obras que se têm realizado, são as mesmas que as preconizadas no Caderno de Encargos Tipo da JAE para ABGETE, nomeadamente quanto ao fuso granulométrico e aos resultados a obter no ensaio de “imersão-compressão”.

No entanto, o controlo da qualidade das misturas betuminosas fabricadas com agregados novos, traduz-se, em boa parte, pelo controlo das características dos materiais empregues no fabrico da mistura e da sua composição, para além do 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 seja dada maior relevância à adopção de grandezas directamente relacionadas com o desempenho, recorrendo, por exemplo, a ensaios para avaliação da resistência da mistura que se está a aplicar, tal como, ensaios de “imersão-compressão” sobre misturas recolhidas em obra [6] [7] [8]. Assim, tem-se recomendado que o controlo de qualidade da camada reciclada, incida 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.

Embora no Caderno de Encargos tipo da JAE [9] se preconize que o controlo da compactação seja efectuado tomando como referência a baridade seca máxima obtida no ensaio Proctor modificado realizado sobre os agregados, constatou-se que a compactação da mistura é muito afectada pela presença da emulsão [7], conforme se ilustra na Figura 5, obtida numa camada de ABGETE realizada na EN 120 [15].

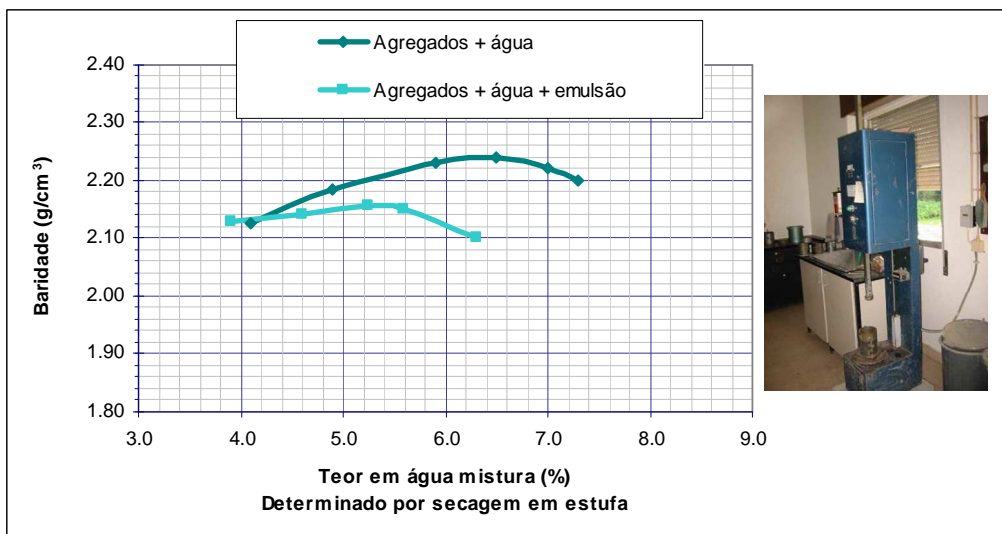


Figura 5 - Ensaio Proctor modificado realizado com materiais para uma mistura a frio

Por outro lado, verificou-se que o método de compactação utilizado nos estudos de formulação das misturas (compactação estática de duplo efeito a uma pressão de 21 MPa) conduz a baridades muito superiores às de obra [7]. Dos estudos efectuados, recomenda-se que essa pressão baixe para 8 MPa (Figura 6).

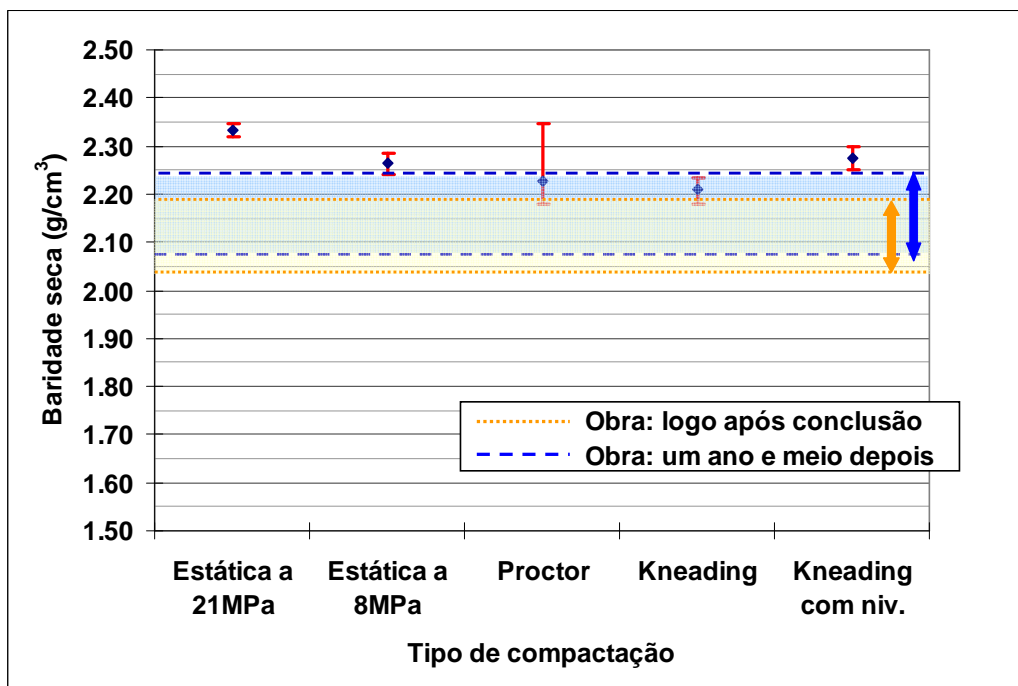


Figura 6 – Baridade de misturas a frio compactadas segundo diferentes processos de compactação

3. DESEMPENHO

Nos trechos de pavimento em cuja reabilitação se têm utilizado misturas a frio com emulsão betuminosa, têm-se observado comportamentos estruturais variáveis, por vezes correspondentes a módulos de deformabilidade inferiores aos das camadas executadas com misturas a quente. 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 das camadas à medida que o processo de cura se desenvolve.

De facto, a “cura” dos materiais tratados com emulsão envolve uma evolução das propriedades mecânicas do ligante betuminoso [16], o que conduz a mudanças no comportamento estrutural das camadas de misturas betuminosas a frio durante o processo de cura dessas misturas.

A este respeito foi desenvolvido no LNEC um trabalho de investigação [7] em que um dos aspectos abordados era precisamente o estudo da evolução do comportamento das camadas com misturas fabricadas a frio ao longo do processo de cura, bem como os mecanismos de degradação associados aos pavimentos com misturas a frio, por forma a dispor-se de ferramentas adequadas para o dimensionamento deste tipo de pavimentos. Nesta comunicação abordar-se-á este assunto mais detalhadamente.

3.1 Evolução do módulo de deformabilidade das misturas recicladas avaliado com base em ensaios de carga com o deflectómetro de impacto

Tendo em vista avaliar o comportamento estrutural dos pavimentos reabilitados através de técnicas a frio, têm sido realizadas campanhas de ensaios de carga com o deflectómetro de impacto para várias idades das camadas de misturas a frio. Os resultados obtidos nas campanhas de ensaios de carga com deflectómetro de impacto, conjuntamente com os elementos relativos à estrutura do pavimento, servem de base para a determinação dos módulos de deformabilidade das camadas constituintes do pavimento e respectiva fundação, utilizando a metodologia geralmente adoptada pelo LNEC [17].

Da apreciação dos resultados que têm sido obtidos em diversas obras, tem-se podido comprovar que, tal como se esperava, o módulo de deformabilidade das camadas tratadas com emulsão aumenta com a idade das mesmas. A Figura 7 ilustra alguns dos resultados obtidos (módulos de deformabilidade correspondendo a ensaios de carga com deflectómetro de impacto realizados para diferentes idades da camada).

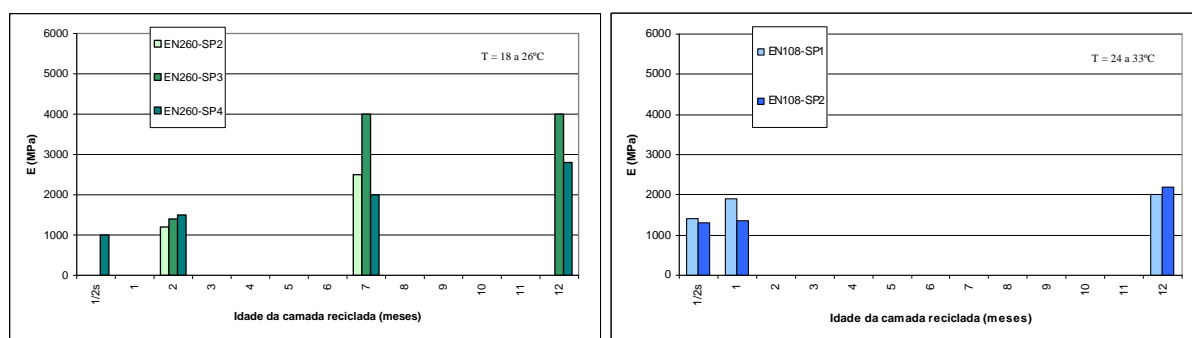


Figura 7 – Módulos de deformabilidade das camada recicladas

A questão da evolução dos módulos de deformabilidade de misturas densas a frio com o processo de cura e a sua sensibilidade à temperatura é uma das questões abordadas no presente trabalho.

3.2 Caracterização mecânica das misturas em laboratório

Com o objectivo de avaliar a evolução das propriedades das misturas a frio ao longo do processo de cura, efectuaram-se ensaios de caracterização mecânica das misturas para várias idades dos provetes.

A maioria dos ensaios foi feita recorrendo ao equipamento “Nottingham Asphalt Tester” (NAT) do Instituto Superior Técnico (IST), que é um equipamento que permite realizar ensaios de cargas repetidas sobre provetes cilíndricos, em compressão diametral ou em compressão uniaxial, possibilitando a determinação do módulo de deformabilidade, da resistência à fadiga e da resistência às deformações permanentes (Figura 8).

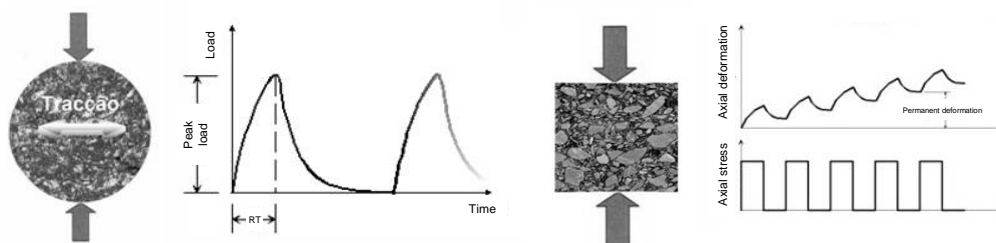


Figura 8 – Ensaios de cargas repetidas no NAT para avaliação da resistência à fadiga e às deformações permanentes

Com o objectivo de complementar os resultados obtidos, realizaram-se ainda outros ensaios de caracterização mecânica para avaliação das mesmas características (módulo de deformabilidade, resistência à fadiga e às deformações permanentes) com outros equipamentos, geralmente utilizados para este tipo de estudos, designadamente, ensaios de simulação em pista de laboratório (“Wheel tracking”) para a avaliação da resistência às deformações permanentes.

3.2.1 Preparação dos provetes

Neste estudo, a grande maioria dos provetes foram preparados usando os mesmos materiais da obra de reabilitação do pavimento da EN 120 entre Odemira e o Limite do Distrito de Faro [15], em que se procedeu ao reforço do pavimento com uma camada do tipo ABGETE. Esta obra decorreu em 2000, tendo os trabalhos sido adjudicados à PROBISA. Assim, a composição adoptada para o fabrico da mistura betuminosa a frio em laboratório foi a seguinte (indicada em percentagem ponderal em relação à mistura de agregados):

- 25 % de gravilha 12/20 mm
- 25 % de gravilha 6/12 mm
- 50 % de pó 0/6 mm
- 6.5 % de emulsão betuminosa ECL-1h, de denominação comercial GRAVAMUL (PROBISA)

Para a avaliação do comportamento das misturas recicladas, foram também recolhidos provetes cilíndricos na obra do IP 2 entre a Barragem do Fratel e a EN 118 [6] para ensaio em laboratório.

Com o objectivo de se efectuar uma avaliação comparativa entre o comportamento de diversos materiais, foram ainda ensaiados provetes em mistura a quente do tipo “grave-bitume” (GB), provenientes do trecho piloto com cerca de 400 m, localizado no IP2 – Variante a Castro Verde, realizado no âmbito do trabalho de investigação desenvolvido por M. C. Azevedo [18].

3.2.2 Compactação e cura das misturas

A evolução das características mecânicas das misturas foi avaliada em estudos de laboratório, sobre provetes moldados segundo um procedimento uniforme e curados em condições diversas.

Para a selecção do método laboratorial de preparação dos provetes cilíndricos, tiveram-se em conta os resultados obtidos nos estudos já efectuados acerca dos métodos que melhor simulariam as condições de obra [7]. Nesses estudos concluiu-se que tanto a compactação estática de duplo efeito a 8 MPa, como a compactação *kneading* com nivelamento das bases do provete no final, seriam métodos de compactação laboratorial adequados para a moldagem de provetes em mistura a frio. No presente estudo optou-se pelo processo *kneading* seguindo-se o nivelamento das suas bases através de uma leve compactação estática.

Os provetes assim moldados em laboratório foram seguidamente curados em condições variadas (cura à temperatura ambiente com ou sem película envolvente; cura acelerada, etc.), com vista a avaliar o efeito do processo de cura nas propriedades da mistura.

3.2.3 Determinação do módulo de deformabilidade e caracterização do comportamento à fadiga

Conforme referido, para a caracterização das misturas quanto à sua deformabilidade foram realizados ensaios de compressão diametral ou de tracção indirecta com o NAT. Neste caso, o sistema de carregamento permite a aplicação de uma carga pulsante, como a que se ilustra na Figura 8. Para a realização dos ensaios de compressão diametral seguiu-se a norma inglesa BS DD 213:1993, adoptando-se os seguintes parâmetros:

- Dimensão dos provetes: 102 mm de diâmetro e 64 mm de altura;
- Temperatura de ensaio: 20°C;
- Tempo de aumento de carga (“rise-time”): 124 ms;
- Número de ciclos de ensaio para determinação do módulo:
 - Provetes com idades muito jovens (1/2 dias): 50 ciclos
 - Provetes com idades mais avançada (uma ou mais semanas): 100 ciclos
- Número de ciclos de ensaio para caracterização do comportamento à fadiga: número de ciclos correspondente a metade do módulo inicial

Os ensaios para determinação do módulo de deformabilidade foram realizados mantendo-se, para os diversos provetes ensaiados, as mesmas condições de carregamento, ou seja, para um valor da máxima tensão de tracção horizontal no centro do provete de 100 kPa. Já os ensaios para caracterização do comportamento à fadiga foram realizados para diferentes níveis de tensão aplicada, com valores de tensão máxima compreendidos entre 50 e 600 kPa.

Na Figura 9 representam-se graficamente os resultados obtidos nos ensaios de compressão diametral para determinação do módulo de deformabilidade, em função da idade dos provetes e das condições de cura a que estes foram submetidos.

A análise dos resultados permite concluir que existe sempre alguma dispersão no comportamento dos provetes ensaiados para a mesma idade e submetidos às mesmas condições de cura, podendo no entanto, observar-se um aumento nítido do valor do módulo de deformabilidade à medida que o processo de cura evolui.

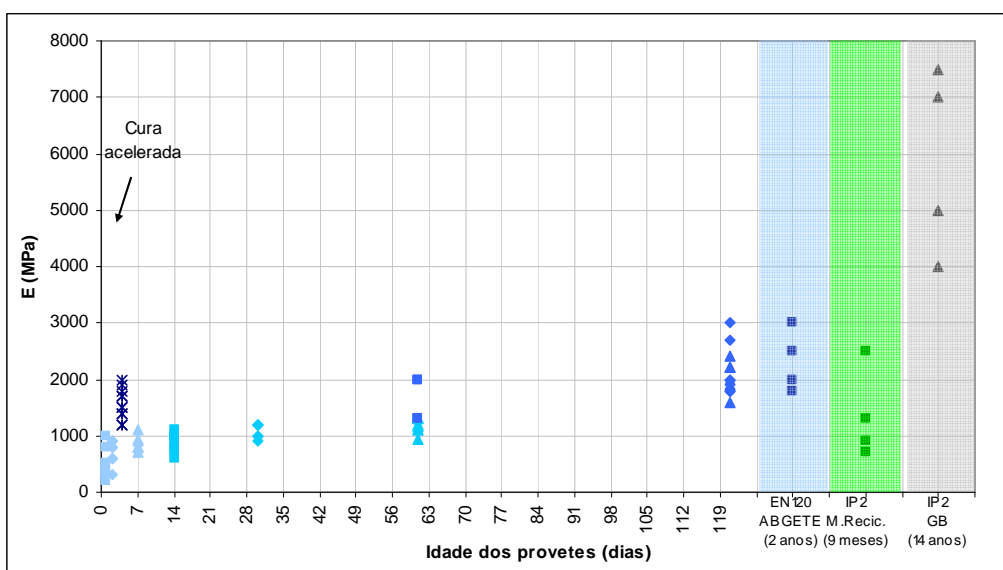


Figura 9 – Módulos de deformabilidade de provetes moldados em laboratório e de provetes recolhidos em obra

Com o objectivo de avaliar a influência da temperatura no módulo de deformabilidade das misturas a frio, realizaram-se ensaios de compressão diametral com o NAT a temperaturas que cobriram uma gama de variação entre 0 e 50°C.

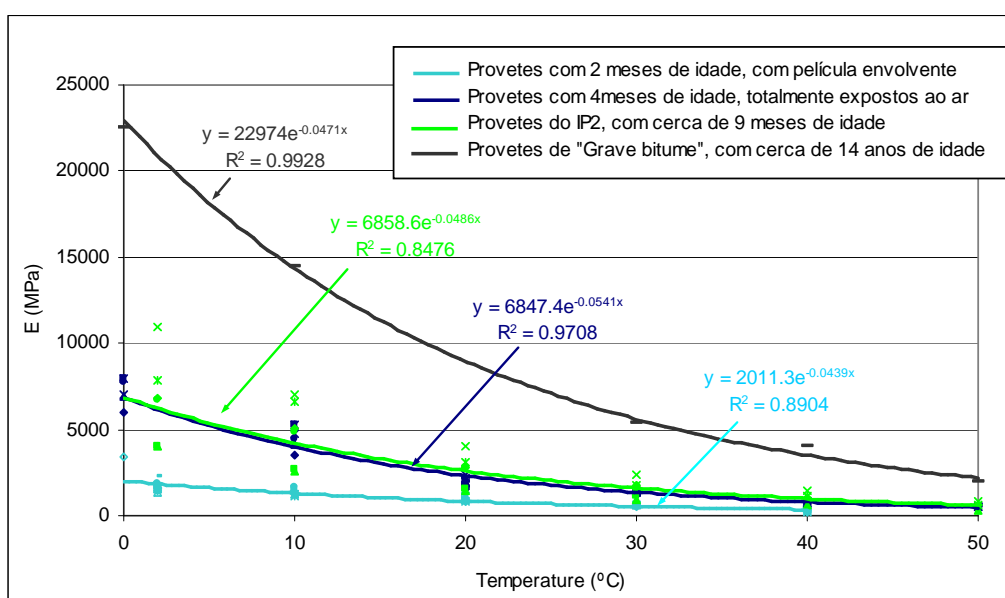


Figura 10 – Variação do módulo de deformabilidade com a temperatura

Constatou-se que o módulo de deformabilidade das misturas betuminosas (E_{CD}), deduzidos dos ensaios de compressão diametral, a uma determinada temperatura (T), pode ser

relacionado com o módulo de deformabilidade a uma temperatura de referência de 20°C ($E_{CD}^{20°C}$), através da seguinte expressão [7]:

$$E_{CD}(T) = 2,72 \cdot E_{CD}^{20°C} \cdot e^{-0,05T}$$

A análise dos resultados obtidos nos ensaios de fadiga permitiu deduzir que os provetes até dois meses de idade, curados sob as mesmas condições, apresentam leis de fadiga muito semelhantes, podendo-se agrupar num mesmo conjunto. Considera-se pois que se pode utilizar a mesma lei de fadiga para representar o comportamento deste tipo de misturas para curas não completas.

Para idades mais avançadas verificou-se que a “inclinação” da curva à fadiga vai aumentando (Figura 11), aproximando-se da curva obtida para a mistura a quente (GB).

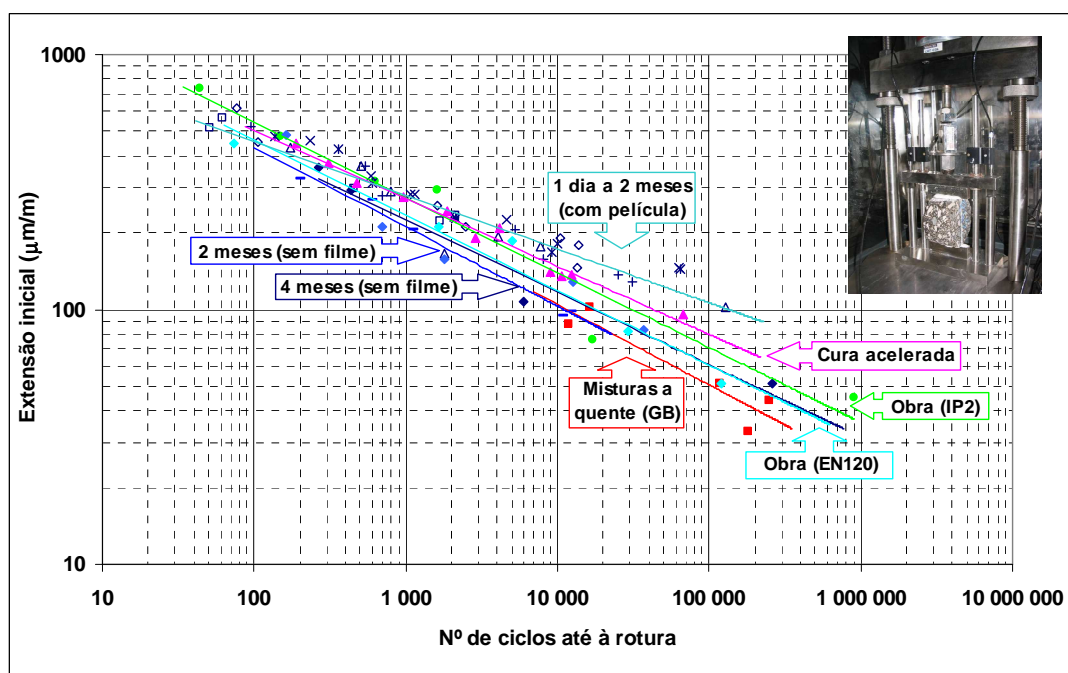


Figura 11 – Resultados dos ensaios de compressão diametral de caracterização do comportamento à fadiga

Outro aspecto importante a notar, é o de que o comportamento à fadiga obtido para os provetes extraídos de obra é semelhante ao obtido para os provetes moldados em laboratório.

Com base nestes resultados, pode pois considerar-se que, após a conclusão da cura, as misturas a frio possuem comportamento à fadiga semelhante ao das misturas convencionais.

3.2.4 Caracterização do comportamento às deformações permanentes

Para a caracterização das misturas às deformações permanentes, foram realizados ensaios de compressão uniaxial com cargas repetidas, no NAT (Figura 8).

O ensaio foi realizado segundo a norma inglesa BS DD 226:1996, de acordo com os seguintes parâmetros:

- Dimensão dos provetes: 102 mm de diâmetro e 64 mm de altura;
- Temperatura de ensaio: 50°C;
- Período de pré-condicionamento: 10 min. à pressão constante de 10 kPa;
- Aplicação de cargas repetidas
 - Tipo de carregamento: “onda rectangular”, com a aplicação alternada de 1 s de carga e de 1 s de repouso
 - Duração do ensaio: 3600 ciclos (2h)

Na Figura 12 representam-se graficamente os resultados correspondentes à média de cada grupo de provetes ensaiados com as mesmas características.

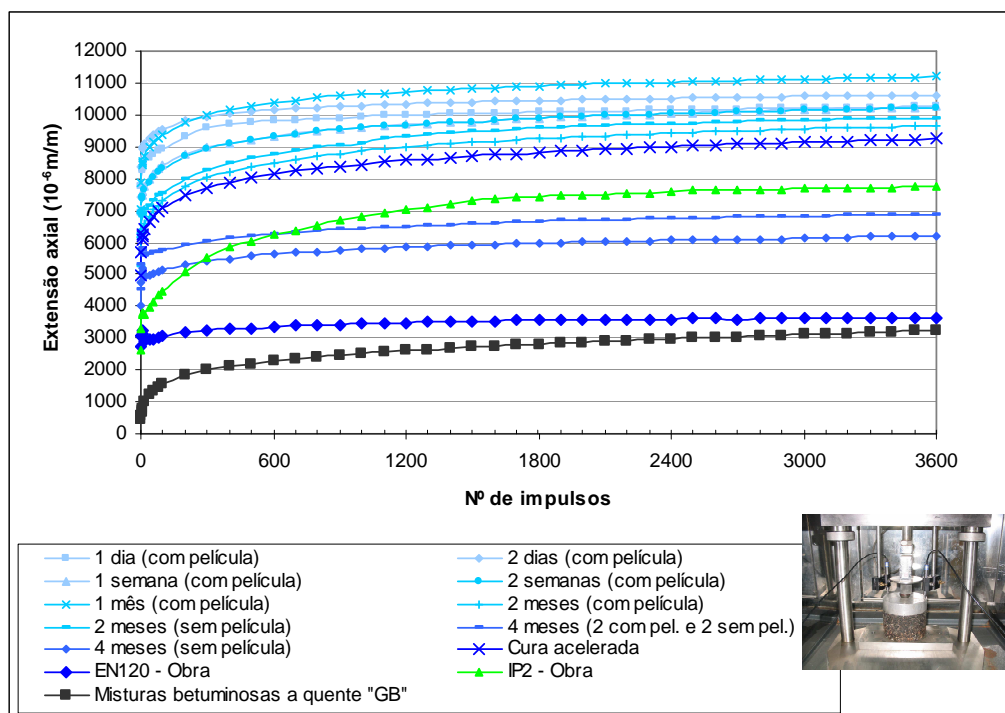


Figura 12 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial com cargas repetidas

Para as misturas a frio, principalmente para idades mais jovens, verifica-se que a fase primária é muito importante, uma vez que origina deformações muito elevadas e com grande variabilidade quando comparadas com as obtidas para as misturas tradicionais fabricadas a quente. Admite-se que, o facto de as misturas se encontrarem ainda em processo de cura,

quando do início dos ensaios, proporciona a ocorrência de maiores “movimentos” de rearranjo das partículas.

No entanto, finda a fase 1, os provetes em misturas a frio ensaiados não exibem praticamente mais deformações, o que se traduz por velocidades de deformação muito reduzidas na fase secundária.

Quanto aos resultados obtidos para o caso específico das misturas recicladas a frio, parece que o seu comportamento se situa de alguma forma entre o das misturas a frio fabricadas com agregados novos e o das misturas a quente.

As misturas betuminosas densas a frio em estudo, quer novas, quer recicladas, são para aplicação em camadas de pavimento sobre as quais se realizarão outra(s) camada(s) superior(es), o que significa que quando da execução das camadas superiores, quaisquer deformações permanentes que já tenham ocorrido nas camadas em misturas a frio (deformações atribuídas à fase 1) serão corrigidas. Atendendo pois, às baixas velocidades de deformação atingidas na fase 2 para as misturas a frio, pode-se concluir que depois de concluída a obra (camadas superiores executadas), as misturas a frio apresentarão um bom comportamento às deformações permanentes.

Por forma a complementar a caracterização do comportamento das misturas às deformações permanentes, realizaram-se também ensaios de simulação em pista de laboratório (“Wheel tracking”). Estes ensaios foram realizados de acordo com a norma espanhola NLT 173/84, para duas temperaturas de ensaio: a 50°C que é, dentro das temperaturas consideradas adequadas para a realização destes ensaios em Portugal, a mais desfavorável [19], e a 60°C que é a temperatura preconizada na referida norma. Os resultados obtidos vieram confirmar as conclusões que já haviam sido extraídas dos resultados dos ensaios com o NAT. A título de exemplo, na Figura 13 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios em pista de laboratório realizados sobre provetes retirados de campo, após cerca de dois anos em serviço.

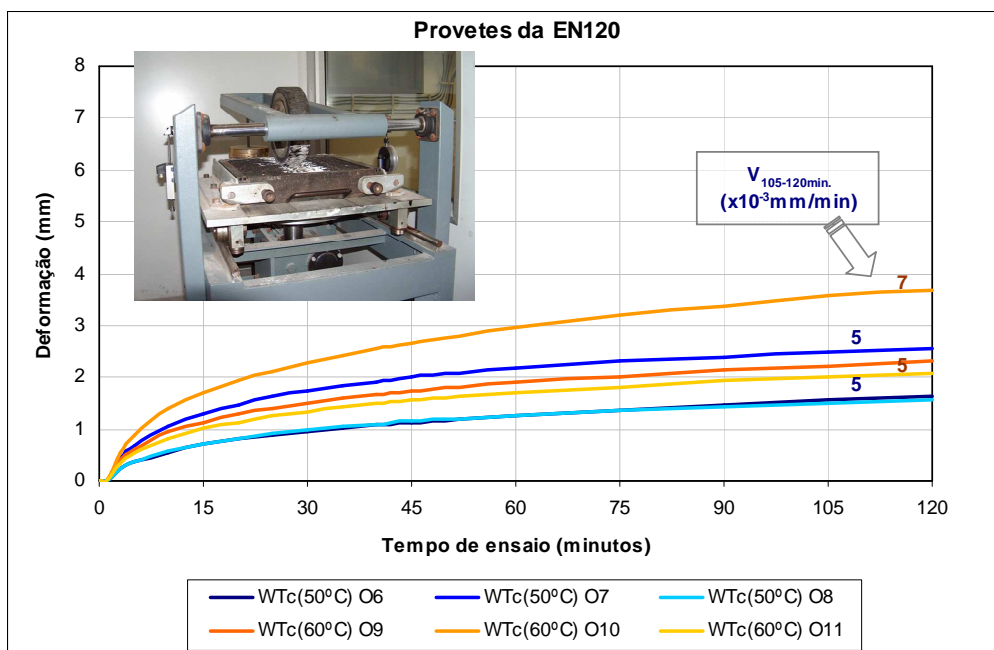


Figura 13 – Resultados de ensaios em pista de laboratório

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Do exposto, ressalta que as principais características que a reciclagem de pavimentos *in situ* a frio com emulsão apresenta são as que a seguir se sintetizam:

- Recicla-se 100% do material fresado do pavimento
No caso da reciclagem *in situ* processa-se todo o material, adicionando apenas emulsão ou eventualmente material correctivo em muito pequenas quantidades, como material novo. No entanto, existem algumas desvantagens associadas a este facto. Por exemplo, não é viável que se retire o material contaminante que eventualmente exista nas camadas de pavimento a reciclar.
- Reduzem-se os gastos energéticos
Não é necessário aquecer os materiais empregues no fabrico da mistura, nem manter a própria mistura reciclada a elevadas temperaturas.
- Não há “endurecimento” do betume presente no material betuminoso fresado do pavimento existente, durante o fabrico da mistura
Uma vez que durante o processo de reciclagem a frio, não é necessário o aquecimento dos materiais por forma a obter-se a consistência necessária ao fabrico e aplicação da mistura, não há endurecimento do betume por este efeito.

- Os materiais a utilizar no fabrico da mistura reciclada podem estar húmidos
Um dos componentes utilizados no fabrico das misturas a frio é precisamente a água, pelo que os materiais fresados e, eventualmente, os agregados novos adicionados, podem estar húmidos quando do fabrico da mistura. O teor em água contido nos referidos materiais deve ser tido em linha de conta quer em laboratório (durante a realização do estudo de formulação da mistura reciclada), quer em obra (quando da execução da reciclagem).
- Reduz-se consideravelmente o movimento de veículos e transporte de materiais à obra
O material recicla-se *in situ* não sendo necessário, contrariamente ao que sucede noutras técnicas de reciclagem, transportá-lo até à central para o seu processamento.
Também não é necessário transportar a mistura reciclada fabricada da central até à obra.
- Consegue-se uma melhoria da homogeneidade e regularidade do trecho, e a eliminação das zonas fendilhadas
O tratamento de forma contínua das camadas superiores do pavimento permite a eliminação das zonas fendilhadas, a homogeneização dos materiais reciclados do pavimento e a correcção do perfil longitudinal e transversal do mesmo.
Esta camada reciclada oferece, assim, uma superfície mais homogénea e regular para a colocação das camadas subjacentes (reforço e/ou desgaste). Por outro lado, elimina-se ainda o risco de propagação de fendas a estas últimas camadas.
- Requer equipamentos específicos
Para a realização dos trabalhos de reciclagem utilizam-se máquinas recicladoras.
- Requer avaliação cuidada dos riscos envolvidos
- A sua viabilidade depende das dimensões da obra.

Os estudos levados a cabo permitiram concluir que a reabilitação de pavimentos utilizando misturas betuminosas recicladas a frio constitui, de facto, uma alternativa técnica, económica e ambientalmente interessante.

Um dos aspectos que se considera mais importante na promoção do uso mais generalizado de técnicas não tradicionais, como seja o caso das técnicas a frio, tem a ver com o desenvolvimento de especificações baseadas no desempenho. Com este trabalho procurou-se dar um contributo neste sentido.

AGRADECIMENTOS

As autoras desejam expressar o seu agradecimento ao LNEC, à Fundação para a Ciência e a Tecnologia, ao Instituto Superior Técnico, à EP – Estradas de Portugal, E.P.E., em particular, às Direcções de Estradas de Beja e de Portalegre e à PROBISA, pelo apoio prestado à realização deste trabalho. As autoras agradecem igualmente, aos colegas que colaboraram na realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – OCDE – “Stratégies de recyclage dans le travaux routières”, Organisation de Coopération et de Développement Économiques, Paris, France, 1987.
- [2] – Prates, M.; Barros, R. – “As novas técnicas de pavimentação em Portugal”, Fórum Internacional sobre Novas Técnicas de Pavimentação, Barcelona, Espanha, 26 e 27 de Novembro de 1998.
- [3] – Marques, J.A. – “Reciclagem *in situ*”, Acção de formação “As emulsões betuminosas e suas aplicações”, Centro Rodoviário Português, Lisboa, 24 a 26 de Novembro de 1999.
- [4] – Antunes, M.L.; Batista, F.A.; Fonseca, M.E.; Barros, R. – “Comportamento estrutural de pavimentos com camadas recicladas a frio”, *10º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto*, Volume II, Asociación Española de la Carretera, Sevilha, Espanha, 1 a 6 de Novembro de 1999, pp. 1089-1107.
- [5] – Antunes, M.L.; Batista, F.A.; Barros, R.; Fonseca, M.E. – “Acompanhamento da obra de beneficiação da EN 260 (IP8) entre Serpa e Vila Verde de Ficalho”, Junta Autónoma de Estradas/Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório Proc. 92/16/13636, Lisboa, Março de 1999.
- [6] – 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” – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 212/04-NIT/DT, Proc. 702/16/13636, Lisboa, Julho de 2004.
- [7] – Batista, F.A. – “Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos – Misturas Betuminosas Densas a Frio”. Tese de Doutoramento. Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2004
- [8] – Batista, F.A.; Antunes, M.L. – “Estratégias de reabilitação de pavimentos. Reciclagem”, Actas do Simpósio Ibérico GALP ENERGIA “Ambiente, Qualidade e Segurança nos Ligantes Betuminosos” – 2ª Parte (Comunicação publicada em diapositivos), 25 de Outubro de 2001, Centro Científico e Cultural de Macau, Lisboa, Portugal.
- [9] – JAE/EP – “Caderno de Encargos – Volume V:03 – Pavimentação”, Junta Autónoma de Estradas/EP-Estradas de Portugal, E.P.E., Lisboa, Março de 1998.

- [10] – PG-4 – “Artículo 20 - Reciclado In Situ con Emulsión de Capas Bituminosas” Pliego de prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservacion de Carreteras, Espanha, 2001.
- [11] – Pérez Jiménez, F.E. – “Reciclado in situ con emulsión. Análisis de su comportamiento. Comparación resultados de laboratorio y obra”, II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários – Reciclagem de Pavimentos, FEUP, Porto, Portugal, 30 de Maio de 2003, pp 6.1-6.17.
- [12] – Wirtgen – “Máquina recicladora WR 2500. Prestaciones convincentes para múltiples aplicaciones”, Wirtgen GmbH, Windhagen, Alemanha, 1997.
- [13] – Task Force 38 Report - "Report on Cold Recycling of Asphalt Pavements", AASHTO-AGC-ARTBA Joint Committee, March 1998
- [14] – Ángel del Val, M.; Rocci, S. - "Guia para el dimensionamento de firmes reciclados in situ en frio", PROBISA, Espanha, 1998.
- [15] – 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)”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Rel.º Proc.º 92/16/13636, Maio de 2002
- [16] – Asphalt Institute MS-19 - "A basic asphalt emulsion manual". Manual Series No.19, Third Edition, Asphalt Institute & Asphalt Emulsion Manufactures Association, EUA
- [17] – Antunes, M.L. – "Avaliação da capacidade de carga de pavimentos utilizando ensaios dinâmicos", Tese de Doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, Outubro de 1993
- [18] – Azevedo, M.C. – “Características mecânicas de misturas betuminosas para camadas de base de pavimentos”, Tese de Doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 1993
- [19] – Freire, A.C. – "Deformações permanentes de misturas betuminosas em pavimentos rodoviários". Tese de Doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2002