

REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS UTILIZANDO MISTURAS BETUMINOSAS A FRIO

FÁTIMA ALEXANDRA BATISTA

DOCTORA EM ENGENHARIA CIVIL, LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

MARIA DE LURDES ANTUNES

INVESTIGADORA PRINCIPAL, CHEFE DO NÚCLEO DE INFRA-ESTRUTURAS DO DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES, LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

RESUMO

Nesta comunicação apresentam-se alguns resultados obtidos no decurso de um trabalho de investigação levado a cabo no LNEC, acerca da utilização de misturas betuminosas fabricadas a frio, com emulsão betuminosa, na reabilitação de pavimentos (reforço e reciclagem de pavimentos).

Os estudos efectuados, de carácter mais abrangente, compreenderam 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. A presente comunicação diz essencialmente respeito ao último ponto referido, apresentando-se os principais resultados obtidos no que concerne à deformabilidade, resistência à fadiga e às deformações permanentes das misturas a frio estudadas.

1. INTRODUÇÃO

As misturas betuminosas correntemente designadas por “misturas a frio” são aquelas em que o ligante betuminoso é incorporado na mistura sob a forma de uma emulsão betuminosa (emulsão de betume em água), podendo assim, a mistura ser fabricada, espalhada e compactada à temperatura ambiente.

Estas misturas podem ser fabricadas com agregados novos, ou podem ser fabricadas com material proveniente da fresagem das camadas superiores do pavimento existente sendo, neste caso, misturas recicladas a frio.

Regra geral, os materiais empregues no fabrico das misturas betuminosas a frio são agregados, emulsão betuminosa e ainda, 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.

Como resultado do facto de não ser necessário o aquecimento do ligante betuminoso e dos agregados para o fabrico e aplicação em obra das misturas a frio, estas apresentam diversas vantagens em relação às misturas a quente, entre as quais se destacam as seguintes:

- Redução dos gastos energéticos;
- Redução da emissão de poluentes;
- Possibilidade de utilização de centrais de menor complexidade que se podem instalar temporariamente no estaleiro da obra a realizar, proporcionando desta forma:
 - Redução dos custos e tempos de transporte da obra;
 - Maior facilidade na utilização dos agregados locais.

No entanto, se após a colocação em obra das misturas a quente, estas apresentam quase de imediato as características “finais” para que foram dimensionadas, o mesmo já não acontece com as misturas a frio. De facto, 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 “finais” para que foi dimensionada 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 condiciona de forma assinalável o comportamento das misturas betuminosas a frio se relaciona com o fenómeno da cura da mistura.

Um dos principais objectivos do trabalho de investigação desenvolvido [1] foi precisamente o estudo da evolução das propriedades das misturas a frio após colocação em obra, ou seja, ao longo do processo de cura. Este estudo desenvolveu-se essencialmente em duas vertentes:

- Acompanhamento de obras de reabilitação de pavimentos em que se utilizou este tipo de técnicas a frio, em particular, a execução de reforços em “agregado britado de granulometria extensa tratado com emulsão”, abreviadamente designado por “macadame betuminoso a frio”, e a reciclagem a frio *in situ*;
- Realização de estudos laboratoriais, em particular:
 - Moldagem de provetes representativos das condições de obra;
 - Ensaio de caracterização mecânica das misturas para várias idades dos provetes.

De referir que no acompanhamento das obras se obtiveram resultados que serviram não só para um melhor conhecimento do comportamento das misturas *in situ*, como também serviram de suporte aos estudos laboratoriais efectuados, como por exemplo, para a preparação de provetes em laboratório representativos das condições de obra.

Uma vez que os resultados que foram sendo obtidos no decurso do acompanhamento das diversas obras, foram sendo objecto de publicações, nomeadamente em anteriores congressos [2] [3], no presente artigo optou-se por abordar mais detalhadamente os estudos laboratoriais levados a cabo com vista à determinação da evolução das características mecânicas das misturas com a sua cura.

2. PROGRAMA DE ENSAIOS

2.1 Ensaios para caracterização mecânica das misturas

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. A razão da escolha deste equipamento prendeu-se essencialmente com o facto de os provetes aí utilizados serem cilindros, de dimensões modestas quando comparados com os provetes de outros equipamentos de ensaio, o que permitiria a moldagem de um número relativamente elevado de provetes (para ensaio com diferentes idades, submetidos a diferentes condicionamentos e a diversas condições de ensaio), ou a utilização de provetes extraídos das obras por sondagem à rotação.

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.

2.2 Preparação dos provetes

2.2.1 Fabrico das misturas

Os materiais utilizados neste estudo foram os aplicados na obra de reabilitação do pavimento da EN 120 entre Odemira e o Limite do Distrito de Faro [4], em que se procedeu ao reforço do pavimento com uma camada do tipo macadame betuminoso a frio. Esta obra decorreu em 2000, tendo os trabalhos sido adjudicados à PROBISA.

Para o fabrico da mistura betuminosa a frio em laboratório, utilizou-se a mesma composição que a adoptada na referida obra, que 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)

2.2.2 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.

De acordo com o exposto em 2.1, optou-se, no presente estudo, por realizar grande parte dos ensaios no NAT, onde são utilizados provetes cilíndricos. Para a selecção do método laboratorial de preparação destes provetes teve-se em conta os resultados obtidos nos estudos já efectuados acerca dos métodos que melhor simulariam as condições de obra. [1]. 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 por se compactarem os provetes 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, com vista a avaliar o efeito do processo de cura nas propriedades da mistura.

As condições de cura a que foram submetidos os provetes cilíndricos foram as seguintes:

- Cura ao ar à temperatura ambiente, com as superfícies lateral e superior livres;
- Cura ao ar à temperatura ambiente, envolvidos lateralmente em película de polietileno (excepto no topo) por forma a simular o efeito de continuidade a que um volume de mistura a frio está sujeito quando colocado no pavimento;
- Cura acelerada de acordo com o procedimento que tem sido habitualmente adoptado em Portugal para efeitos de formulação das misturas, ou seja, de colocação dos provetes um dia ao ar à temperatura ambiente, seguindo-se três dias em estufa a uma temperatura de 60°C.

Os ensaios de caracterização mecânica das misturas foram efectuados considerando as várias condições de cura referidas, para diversas idades, conforme se sintetiza seguidamente:

- Provetes curados à temperatura ambiente:
 - Acondicionamento: Envolto lateralmente com película
Idade: 1 dia, 2 dias, 1 semana, 2 semanas, 1 mês, 2 meses
 - Acondicionamento: Totalmente expostos ao ar
Idade: 2 meses

- Acondicionamento: Envoltó lateralmente com película (1ª fase) + Totalmente expostos ao ar (2ª fase)
Idade: 4 meses (2 meses com película + 2 meses sem película)
- Provetes submetidos a cura acelerada
 - Acondicionamento: Totalmente expostos ao ar
Idade: 4 dias (1 dia à temperatura ambiente + 3 dias a 60°C)

2.2.3 Outras amostras ensaiadas

Neste estudo realizaram-se ensaios não só sobre provetes moldados em laboratório, com também provetes recolhidos em obra onde haviam sido aplicados diferentes tipos de misturas. Com o ensaio de diversos tipos de amostras (fabricadas em laboratório/aplicadas em obra, misturas “novas”/misturas recicladas, misturas a frio/a quente), pretendeu-se efectuar uma avaliação comparativa entre o comportamento dos diversos materiais.

As amostras recolhidas em obra para ensaio de caracterização mecânica foram as seguintes:

- Obra da EN 120 entre Odemira e o Limite do Distrito de Faro [4]: Foram recolhidas amostras por sondagens à rotação da camada do tipo macadame betuminoso a frio executada, e que cujos materiais utilizados no seu fabrico foram os utilizados no fabrico das misturas em laboratório.
- Obra do IP 2 entre a Barragem do Fratel e a EN 118 [5]: No âmbito do presente trabalho, pretendia-se não só caracterizar misturas a frio “novas”, mas também, na medida do possível, misturas recicladas. Assim, foram também recolhidos provetes cilíndricos na obra do IP2 onde se havia procedido à reciclagem do pavimento *in situ* a frio.
- Trecho piloto com cerca de 400 m, localizado no IP2 – Variante a Castro Verde, onde foi aplicada, em camada de base, uma mistura a quente do tipo “grave-bitume” (GB) no âmbito de trabalho de investigação desenvolvido por M. C. Azevedo [6].

3. CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO ÀS DEFORMAÇÕES PERMANENTES

3.1 Descrição do ensaio

Conforme referido em 2.1, para a caracterização das misturas às deformações permanentes, foram realizados ensaios de compressão uniaxial com cargas repetidas, no *Nottingham Asphalt Tester*. Este equipamento contém um sistema pneumático que permite a aplicação de cargas verticais repetidas actuando na direcção do eixo do provete cilíndrico, um sistema de registo da extensão vertical acumulada observada (2 transdutores de deslocamentos), bem como um termostato que garante a manutenção e controlo da temperatura durante todo o ensaio, tal como se representa esquematicamente na Figura 1.

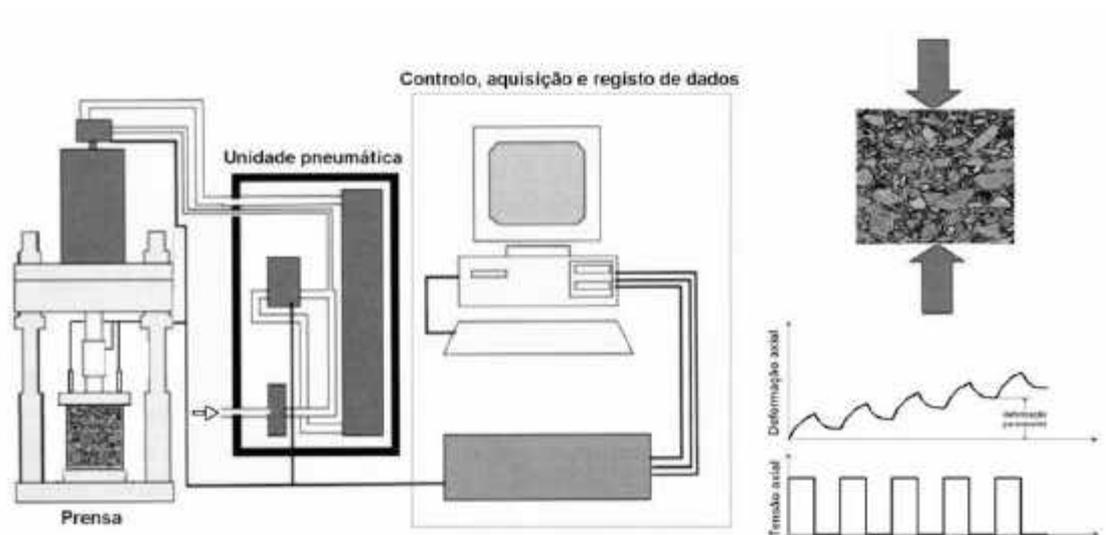


Figura 1 – Ensaio de compressão uniaxial com cargas repetidas no NAT

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)

3.2 Resultados dos ensaios de caracterização do comportamento às deformações permanentes

Na Figura 2 representam-se graficamente os resultados correspondentes à média de cada grupo de provetes ensaiados com as mesmas características. Nesse gráfico pode-se observar não só os resultados obtidos nos ensaios realizados sobre provetes moldados em laboratório, para diferentes idades das misturas a frio estudadas, mas também de ensaios realizados sobre provetes recolhidos em obra para diferentes tipos de mistura.

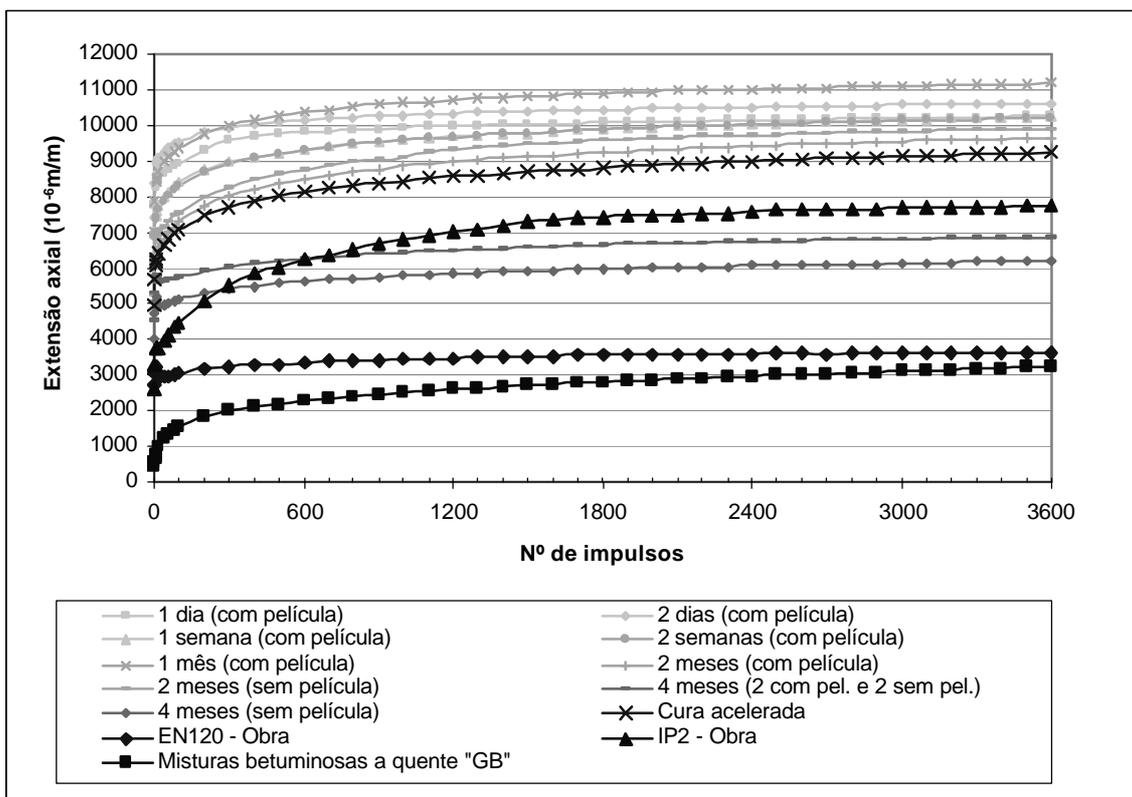


Figura 2 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial com cargas repetidas

Para as misturas em macadame betuminoso 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 re-arranjo 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 as 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 [7], 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 3 apresentam-se os resultados obtidos para no ensaio em pista de laboratório sobre provetes com 4 meses de idade.

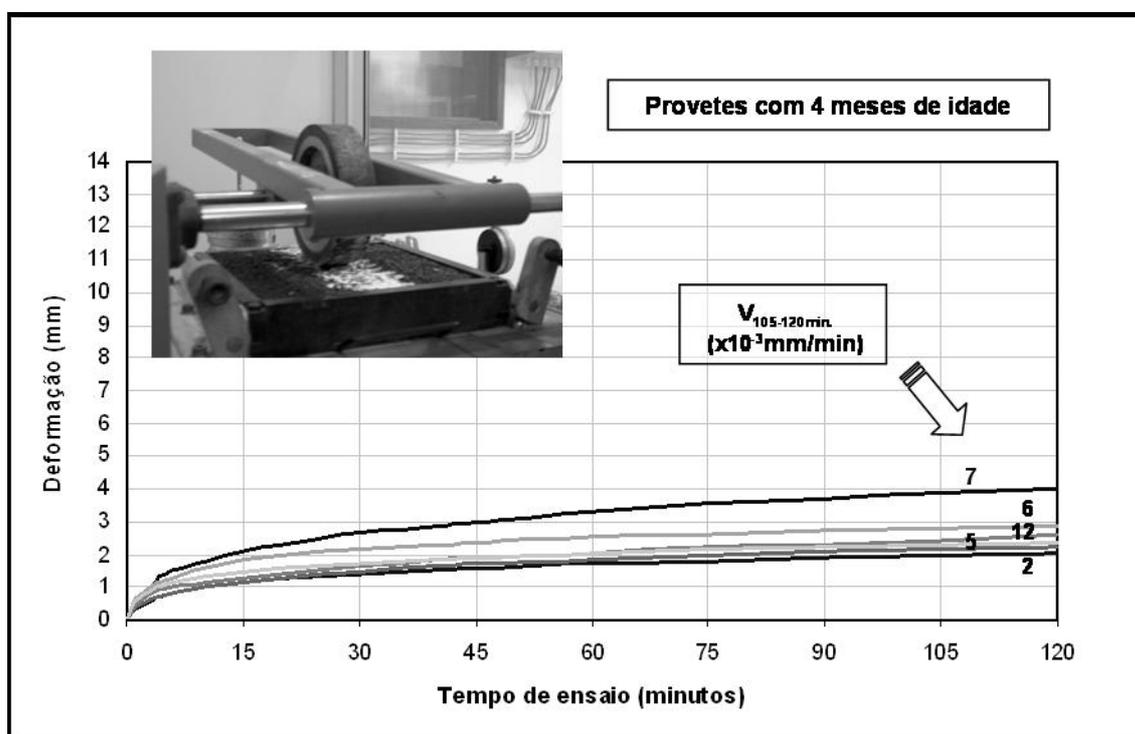


Figura 3 – Resultados de ensaios em pista de laboratório

4. DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE E CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO À FADIGA

4.1 Descrição do ensaio

Os ensaios de compressão diametral ou de tracção indirecta foram realizados quer sobre provetes cilíndricos moldados em laboratório, quer sobre provetes cilíndricos recolhidos em obra, com o *Nottingham Asphalt Tester* (NAT) do IST.

Este equipamento permite, através da adaptação do sistema de montagem do provete e de aplicação das cargas, a realização de ensaios de cargas repetidas em compressão diametral.

Neste caso, o sistema de carregamento permite a aplicação de uma carga pulsante, como a que se ilustra na Figura 4. Ao tempo que decorre entre o instante zero de início de aplicação da

carga, até ao valor de pico, e que se designa na língua inglesa por “rise-time”, dar-e-á o nome de “tempo de aumento de carga (t_{AC})”.

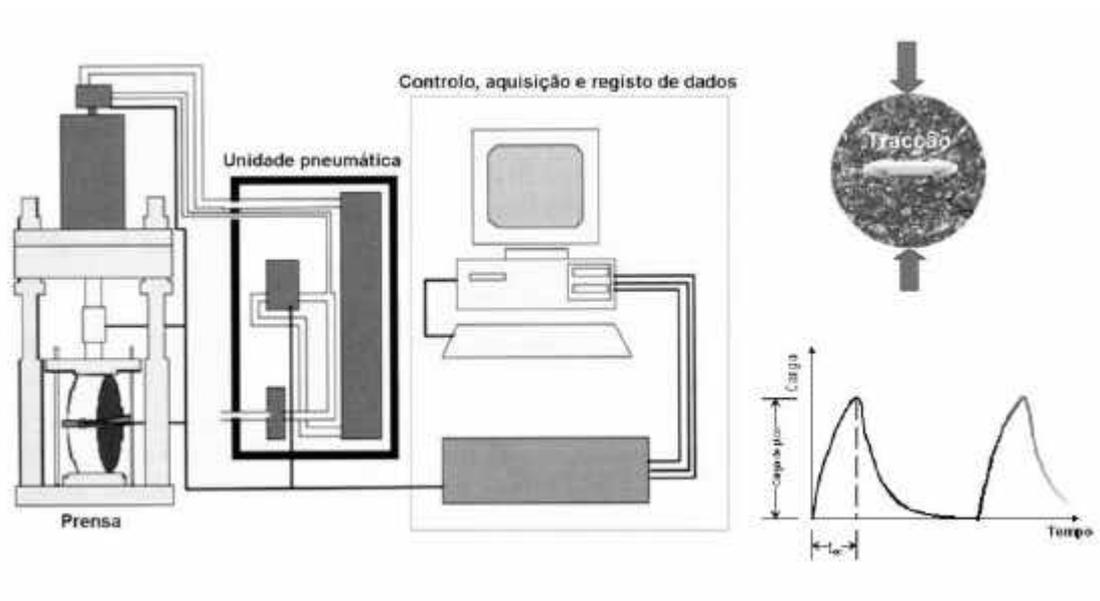


Figura 4 – Ensaio de compressão diametral com o NAT

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 tração 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.

4.2 Resultados dos ensaios para determinação do módulo de deformabilidade

Na Figura 5 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.

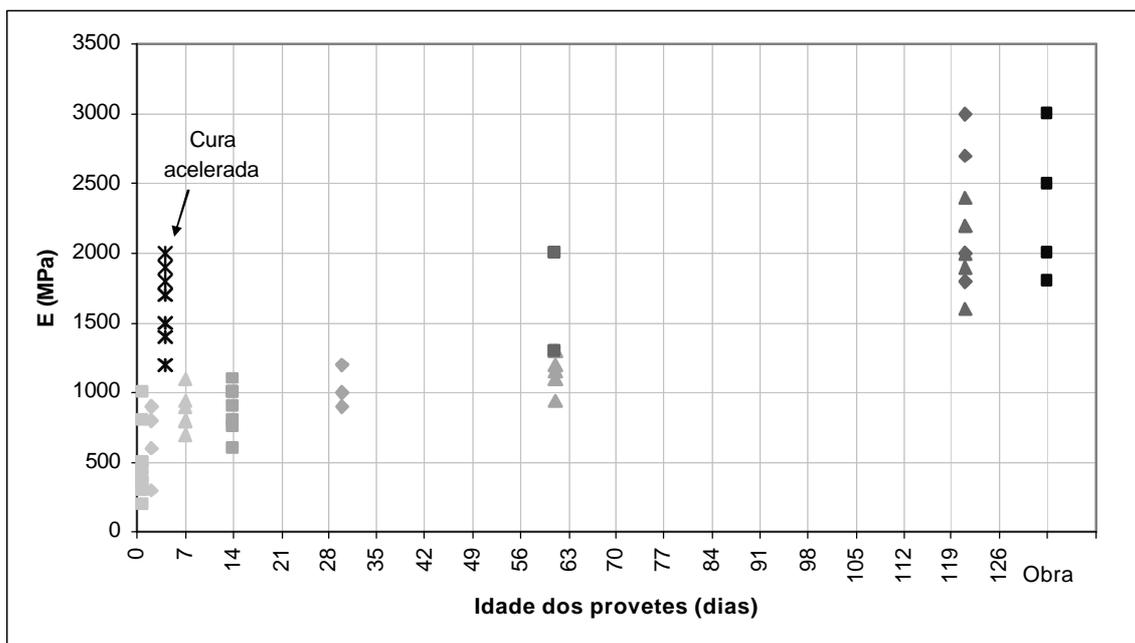


Figura 5 – Módulos de deformabilidade de provetes moldados em laboratório e de provetes recolhidos em obra (EN 120)

A análise dos resultados representados na Figura 5 permite concluir que existe sempre alguma dispersão nos 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.

Da observação da Figura 5 deduz-se ainda, que os provetes moldados em laboratório com quatro meses de idade, quer condicionados à temperatura ambiente com película de polietileno a envolver a superfície lateral, quer os totalmente expostos ao ar, apresentam módulos de deformabilidade da mesma ordem de grandeza dos obtidos sobre os provetes recolhidos em obra, com cerca de dois anos de idade. Desta forma, conclui-se que o módulo de deformabilidade do macadame betuminoso a frio aplicado na EN 120, determinado em ensaios à compressão diametral, estabiliza em volta de 2 000 a 3 000 MPa para provetes com cerca de quatro meses de idade. Os módulos obtidos em obra por retro-análise dos resultados de ensaios de carga com o deflectómetro de impacto são, em regra, superiores (mais de 3 000 MPa).

4.3 Resultados dos ensaios de caracterização do comportamento à fadiga

Com o objectivo de determinar a evolução do comportamento à fadiga do macadame betuminoso a frio, efectuaram-se ensaios de compressão diametral com o NAT, sobre provetes com diferentes idades e submetidos a várias condições de cura. A análise dos resultados obtidos permitiu deduzir que os provetes até dois meses de idade, curados sob as mesmas condições, ou seja, à temperatura ambiente e envolvidos lateralmente com película de

polietileno, 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. Na Figura 6 comparam-se os resultados obtidos com provetes moldados em laboratório e submetidos a diversos tipos de condicionamento, com os resultados obtidos com provetes de outro tipo de misturas.

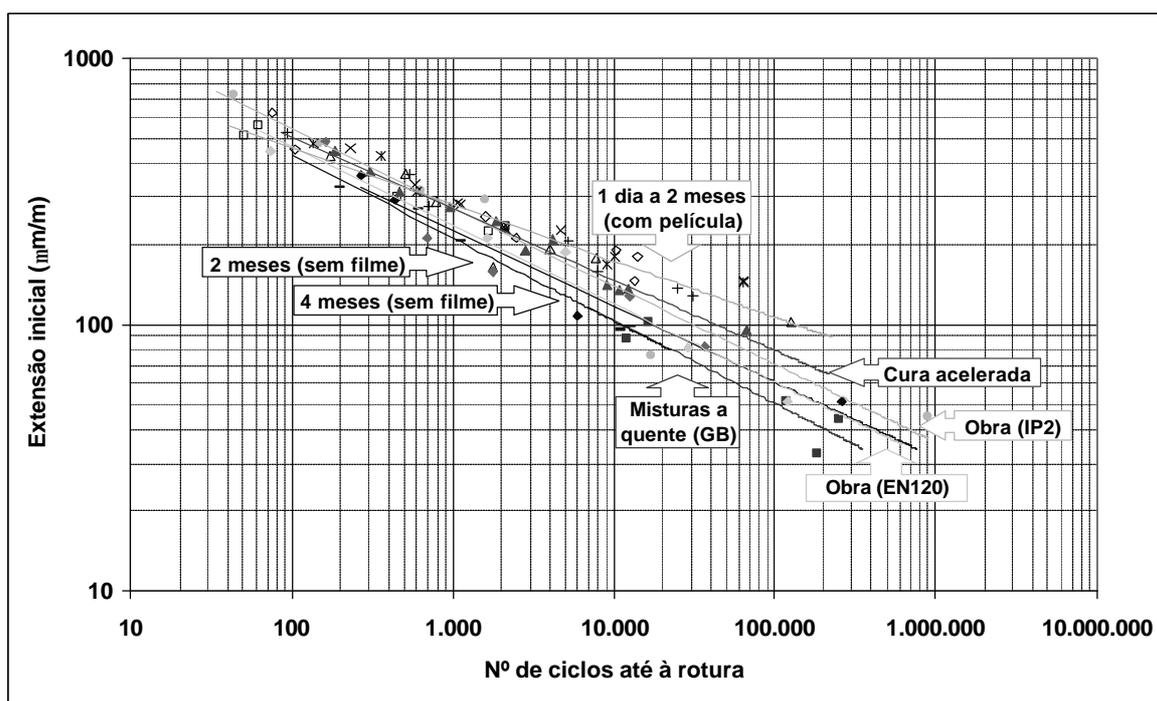


Figura 6 – Resultados dos ensaios de compressão diametral de caracterização do comportamento à fadiga

Uma primeira constatação que se pode fazer da observação da Figura 6, é de que para os provetes com mais de dois meses, e à medida que a cura vai avançando, verifica-se que a curva de fadiga se vai aproximando da curva obtida para a mistura a quente (GB).

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.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi proposta uma metodologia de estudo das misturas betuminosas a frio, baseada na revisão bibliográfica, no acompanhamento de obras, na reprodução em laboratório das condições de obra, bem como na determinação das características relacionadas com o desempenho tendo em conta as várias fases das misturas. Esta metodologia poderá ser utilizada no estudo de outras composições, nomeadamente incorporando cimento.

Os estudos levados a cabo permitiram concluir que a reabilitação de pavimentos utilizando misturas betuminosas densas 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, ao IEP, em particular, à Direcção de Estradas de Beja 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] – 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
- [2] – Antunes, M.L.; Batista, F.A.; Gonçalves, J.P. – “Estudos relativos a misturas betuminosas densas a frio”. 1º Congresso Rodoviário Português “Estrada 2000”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Novembro 2000, Volume III, 471-485
- [3] – Batista, F.A.; Antunes, M.L.; Pathé, P.; Botelho, T. – “Reabilitação do pavimento do IP2, entre a Barragem do Fratel e a EN 118, utilizando reciclagem a frio com emulsão betuminosa”. 2º Congresso Rodoviário Português “Estrada 2002”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Novembro 2002
- [4] – 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
- [5] – 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, Rel.º Proc.º 702/16/13636, Julho de 2004
- [6] – 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, Maio de 1993